

Ryzyko rażenia prądem w maszynach elektrycznych znajdujących się w stanie wybiegu

Streszczenie: W artykule opisano zagrożenia występujące w maszynach elektrycznych będących w ruchu po wyłączeniu napięcia zasilającego. Zbadano zjawisko indukowania napięcia w maszynach znajdujących się w stanie wybiegu, na skutek przetwarzania zgromadzonej w wirującej maszynie energii mechanicznej i magnetycznej w energię elektryczną. Pokazano przebiegi czasowe napięć w maszynach będących w stanie wybiegu. Przeprowadzono próby dla kilkunastu typowych maszyn elektrycznych o różnych momentach bezwładności. Maszyny przed wyłączeniem zasilane były ze źródeł napięcia przemiennego i stałego, a także za pomocą układów energoelektronicznych. Wskazano problemy związane w z zastosowaniem wyłączników RCD, jako środka ochrony przeciwporażeniowej w układach elektromaszynowych

Abstract: Risk of the electric shock at electrical machines in coasting state are described in this paper. Phenomenon of the coasting voltage arise at the electrical machines as a results of the mechanical and magnetic energy conversion into electrical energy are investigated. Are shown waveforms of the coasting voltages at electrical machines. Tests for more than ten typical electrical machines of a different moments of inertia are performed. Electrical machines are supplied from AC and DC sources, as well as from AC and DC power converters (**Electric shock risk at electrical machines in coasting state**)

Słowa kluczowe: maszyny elektryczne, rażenie prądem, stan wybiegu

Keywords: electrical machines, electric shock, coasting state

doi:10.12915/pe.2014.12.49

Wstęp – indukowanie napięć w maszynach znajdujących się w stanie wybiegu

W zastosowaniach przemysłowych napęd elektryczny najczęściej składa się z maszyny elektrycznej prądu przemiennego lub stałego połączonej mechanicznie sztywnym wałem z urządzeniem napędzanym. Po wyłączeniu napięcia zasilającego maszyna elektryczna znajduje się w stanie wybiegu, którego czas zależy od momentu bezwładności układu mas wirujących wchodzących w skład całego układu napędowego. Pomimo braku napięcia zasilającego, na zaciskach silnika pojawia się napięcie indukowane na skutek przetwarzania zgromadzonej w wirującej maszynie energii mechanicznej i magnetycznej w energię elektryczną. W chwili początkowej wybiegu napięcie indukowane na zaciskach maszyny ma wartość odpowiadającą napięciu zasilania. Amplituda indukowanego napięcia zmniejsza się, zgodnie z funkcją wykładniczą, w czasie zależnym od parametrów silnika oraz momentu bezwładności mas wirujących wchodzących w skład układu napędowego. Zjawisko to występuje we wszystkich typowych maszynach elektrycznych zarówno prądu przemiennego, jak i stałego.

W pracy [1] przedstawiono wyniki badań urządzeń napędowych w kopalniach węgla kamiennego pod kątem indukowania napięcia niebezpiecznego dla człowieka na zaciskach maszyn elektrycznych. Autor pracy przeprowadził eksperymenty na maszynach prądu przemiennego średniej i dużej mocy w napędach urządzeń kopalnianych, gdzie czasy wybiegu osiągają duże wartości (w szczególnych przypadkach nawet do kilkunastu minut). Autor wskazał na nieskuteczność zabezpieczeń przeciwporażeniowych w zastosowaniach do ochrony maszyn elektrycznych, ze względu na występowanie na ich zaciskach napięcia wybiegu o wartości niebezpiecznej dla człowieka przez czas kilku sekund.

W pracy [2] autorzy opisali problemy ze stosowaniem wyłączników RCD do ochrony przeciwporażeniowej układów elektromaszynowych zasilanych z przemienników częstotliwości z falownikami PWM.

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych wybiegu typowych maszyn elektrycznych prądu przemiennego i stałego z grupy III i IV elektrycznych urządzeń napędowych współpracujących z różnego typu obciążeniami. Maszyny prądu przemiennego zasilane były z sieci trójfazowej 3x400V oraz z

przemienników częstotliwości z falownikiem napięcia PWM, natomiast maszyny prądu stałego zasilano z sieci 230V oraz z przekształtników energoelektronicznych, tj. z nawrotnego układu napędowego prądu stałego z prostownikami 6T i przerywacza tranzystorowego sterowanego metodą PWM.

Oddziaływanie prądu elektrycznego na organizm ludzki

Użytkownicy instalacji i urządzeń elektrycznych mogą być narażeni na wystąpienie porażenia prądem elektrycznym na skutek dotyku bezpośredniego części czynnych niebezpiecznych lub dotyku pośredniego części przewodzących dostępnych, które znalazły się pod napięciem.

Najbardziej rozpowszechnionym standardem instalacji elektrycznych niskiego napięcia są układy 230/400V o częstotliwości 50/60 Hz. Z tego względu, większość wypadków porażenia występuje dla prądów przemiennych 50/60 Hz, przy czym najczęstsze są rażenia na drodze: ręka – stopa (stopy) lub ręka – ręka.

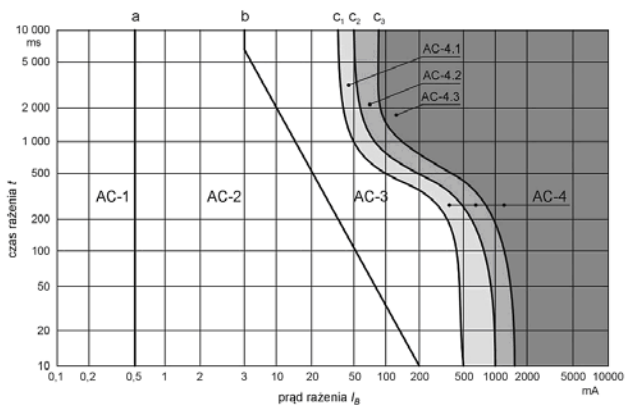
Wystąpienie negatywnych skutków rażenia prądem elektrycznym ocenić można na podstawie raportu nr 479 Międzynarodowej Komisji Elektrotechnicznej [3]. Na rys. 1 przedstawiono charakterystykę skutków rażenia prądem przemiennym o częstotliwości 15÷100 Hz na drodze przepływu lewa ręka – stopy.

Na rys. 1 oznaczono także strefy występowania skutków patofizjologicznych w zależności od czasu i wartości prądu wrażliwego. Krzywą b uznaje się za graniczną wartość prądu samouwolnienia, powyżej której nie jest możliwe samodzielne uwolnienie się rażonego spod napięcia. Zdarzenia zagrażające bezpośrednio życiu występują wówczas, gdy wartości prądu i czasu rażenia przekraczają wartości graniczne wynikające z krzywych $c_1 - c_2 - c_3$, rozdzielających strefy AC-3 i AC-4. Krzywą c_1 uznaje się za granicę tolerowanego ryzyka przy ochronie przeciwporażeniowej.

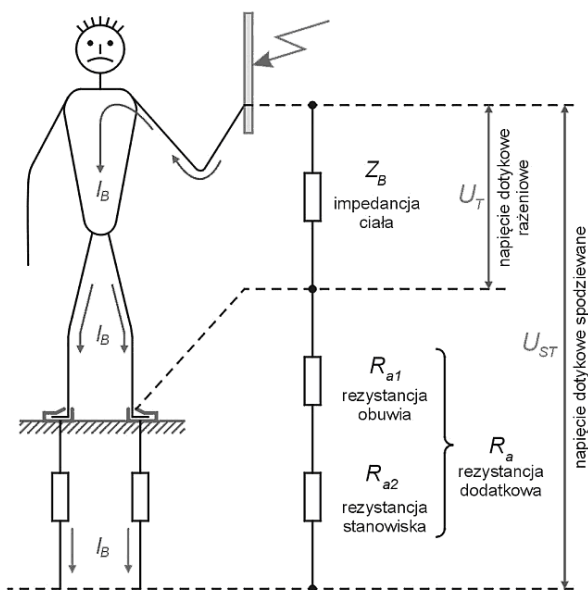
Napięcie panujące na części dotykanej jest parametrem pośrednim decydującym o wartości prądu rażeniowego płynącego przez organizm zgodnie z prawem Ohma. W przypadku wystąpienia rażenia prądem bardzo ważna jest relacja między napięciem dotykowym rażeniowym U_T a napięciem dotykowym spodziewanym U_{ST} (rys. 2).

Podstawowym kryterium oceny skuteczności ochrony przeciwporażeniowej jest wartość napięcia dotykowego

rażeniowego U_T , czyli napięcia przypadającego na impedancję ciała podczas przepływu prądu rażeniowego I_B [5]. Napięcie dotykowe spodziewane U_{ST} jest siłą elektromotoryczną obwodu w konkretnym przypadku wystąpienia rażenia. Jeżeli w obwodzie rażeniowym oprócz impedancji ciała występują dodatkowe rezystancje (obuwia, stanowiska), to dopuszczalna wartość napięcia dotykowego spodziewanego ulega zwiększeniu o spadki napięć na tych rezystancjach jakie wywoła przepływający prąd rażeniowy I_B .



Rys. 1. Działanie na organizm ludzki prądu elektrycznego o częstotliwości 15÷100 Hz przy przepływie prądu na drodze obie strony – lewa ręka [3]



Rys. 2. Relacja między napięciem dotykowym rażeniowym U_T , a napięciem dotykowym spodziewanym U_{ST} [5]

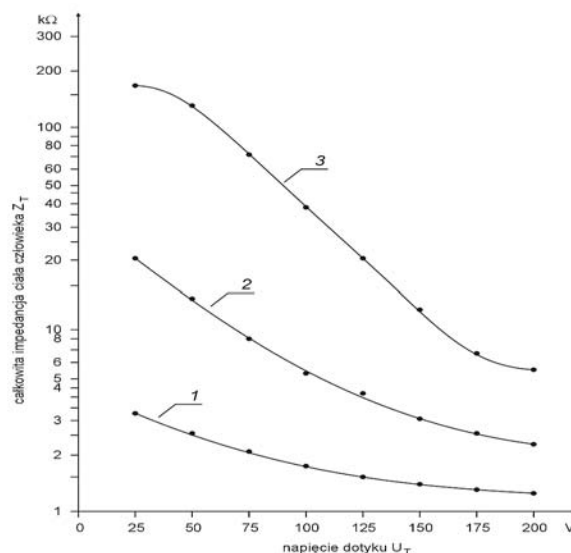
Ciało człowieka nie stanowi przewodnika jednorodnego, lecz ma charakter przewodnika anizotropowego [4]. Wartość impedancji ciała zależy od napięcia rażeniowego, czynników biofizycznych, składa się z impedancji skóry oraz rezystancji organów wewnętrznych [3]. Argument impedancji ciała człowieka jest zmienny i zawiera się w granicach $15^0 \div 55^0$ [4].

Na podstawie licznych badań prowadzonych dla prądu o częstotliwości 50/60 Hz i najczęstszych przypadków rażeń na drodze ręka-ręka lub ręka-noga (nogi), ustalono zależność zmian całkowitej impedancji ciała człowieka od napięcia dotykowego rażeniowego [3]. Zależność tę przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Całkowita impedancja ciała człowieka na drodze ręka-ręka dla prądu 50/60 Hz, duże powierzchnie styku w warunkach suchych [3]

Napięcie dotykowe V	Maksymalne graniczne wartości całkowitej impedancji Z_T ciała człowieka dla dużych powierzchni styku ($10\ 000\text{mm}^2$), warunki suche, Ω		
	5% populacji	50% populacji	95% populacji
25	1 750	3 250	6 100
50	1 375	2 500	4 600
75	1 125	2 000	3 600
100	990	1 725	3 125
125	900	1 550	2 675
150	850	1 400	2 350
175	825	1 325	2 175
200	800	1 275	2 050
225	775	1 225	1 900
400	700	950	1 275
500	625	850	1 150
700	575	775	1 050
1000	575	775	1 050
pow. 1000	575	775	1 050

Na rys. 3 przedstawiono zmiany całkowitej impedancji ciała człowieka Z_T w zależności od powierzchni styku oraz od wartości napięcia dotykowego rażeniowego w warunkach suchych.



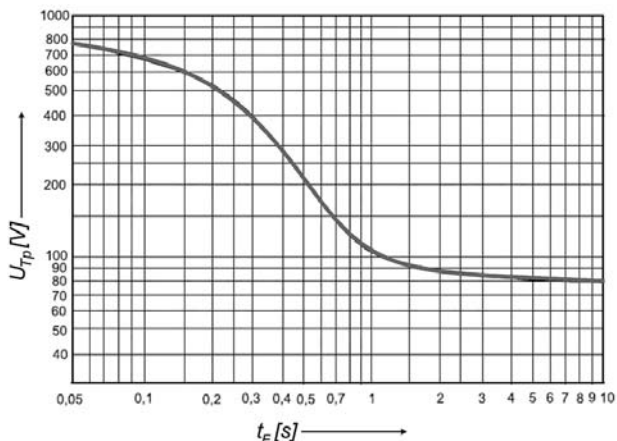
Rys. 3. Całkowita impedancja ciała człowieka Z_T (50% populacji) w suchych warunkach dla napięcia dotykowego rażeniowego w zakresie 25 ÷ 200 V, 50/60 Hz [3]

- 1 – powierzchnia styku duża, $10\ 000\text{mm}^2$,
- 2 – powierzchnia styku średnia, $1\ 000\text{mm}^2$,
- 3 – powierzchnia styku mała 100mm^2

Uwzględnienie w obwodzie oprócz impedancji ciała człowieka (średnią wartość przyjmuje się ok. $1000\ \Omega$), dodatkowych rezystancji obuwia i stanowiska, pozwala na tolerowanie znacznie większych wartości napięcia dotykowego spodziewanego. Dopuszczalne wartości napięć dotykowych rażeniowych U_T , które wywołują negatywne skutki w organizmie człowieka uzależnione są od czasu trwania rażenia t_f (rys. 4).

W zakresie ochrony przeciwporażeniowej, niezależnie od zastosowanego układu sieci, przyjęte zostały dopuszczalne wartości napięć dotykowych, które w zależności od warunków środowiskowych nie stwarzają zagrożenia porażeniowego. Największą wartość dopuszczalnego

napięcia przemiennego dotykowego długotrwałe, dla normalnych warunków, przyjęto równą 50V [8].



Rys. 4. Największe dopuszczalne napięcie dotykowe rażeniowe U_{Tp} , w zależności od czasu trwania rażenia t_F [6].

Zastosowanie wyłączników RCD w ochronie przeciwporażeniowej

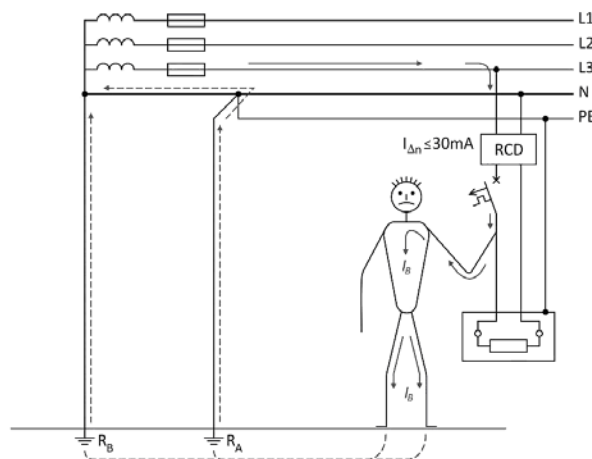
Najpopularniejszym środkiem ochrony przy uszkodzeniu (ochrona przy dotyku pośrednim) w instalacjach niskiego napięcia jest samoczynne wyłączenie zasilania [9]. Ochrona ta polega na spowodowaniu w wymaganym czasie wyłączenia obwodu lub urządzenia, w którym wystąpiło uszkodzenie izolacji podstawowej (zwarcie między częścią czynną i częścią przewodzącą dostępną lub przewodem ochronnym). Samoczynnego wyłączenia dokonują zabezpieczenia nadprądowe (bezpieczniki, wyłączniki instalacyjne) lub wyłączniki RCD, zastosowane w danym obwodzie [7].

Najdłuższe, dopuszczalne czasy wyłączenia określa norma [8]. Zależą one od napięcia sieci względem ziemi, typu układu sieci oraz od rodzaju obwodu i jego maksymalnego prądu. Ogólne wymagania dla najbardziej rozpowszechnionych instalacji o napięciu względem ziemi 230V zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Zestawienie wymagań odnośnie maksymalnego czasu samoczynnego wyłączenia zasilania w instalacjach prądu przemiennego o napięciu względem ziemi 230 V [8]

Rodzaj obwodu	Układ TN	Układ TT	Układ IT
Obwody odbiorcze o prądzie znamionowym $I_n \leq 32 \text{ A}$	0,4 s	0,2 s	0,4 s lub 0,2 s
Obwody odbiorcze o prądzie znamionowym $I_n > 32 \text{ A}$	5 s	1 s	5 s lub 1 s
Obwody rozdzielcze o dowolnym prądzie znamionowym	5 s	1 s	5 s lub 1 s
Obwody, w których nie sposób uzyskać samoczynne wyłączenie zasilania w wymaganym czasie	Miejscowe połączenia wyrównawcze ochronne ograniczające długotrwałe utrzymujące się napięcie dotykowe na poziomie dopuszczalnym długotrwałe		

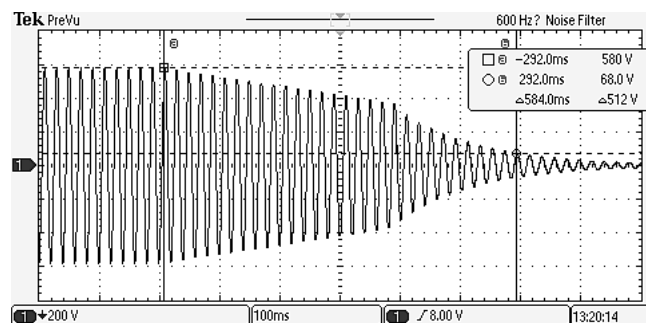
W przypadku wystąpienia dotyku bezpośredniego części niebezpiecznej, prąd rażeniowy przepływa przez impedancję ciała człowieka oraz rezystancje np. obuwia, stanowiska (rys. 5), które znacząco ograniczają jego wartość. W takich warunkach skuteczną ochronę przeciwporażeniową powinny zapewnić wyłączniki RCD. W większości przypadków, aby zagwarantować odpowiedni czas wyłączenia wystarczy aby prąd rażeniowy wynosił minimum $I_{\Delta n}$ zastosowanego do ochrony wyłącznika RCD (norma [8] zaleca przyjmować $5 \cdot I_{\Delta n}$).



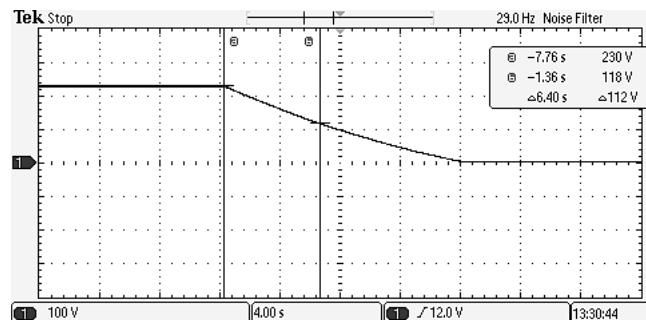
Rys. 5. Zastosowanie wyłącznika RCD jako środka ochrony przeciwporażeniowej w układzie TN-C-S w przypadku dotyku bezpośredniego

Wyniki badań eksperymentalnych

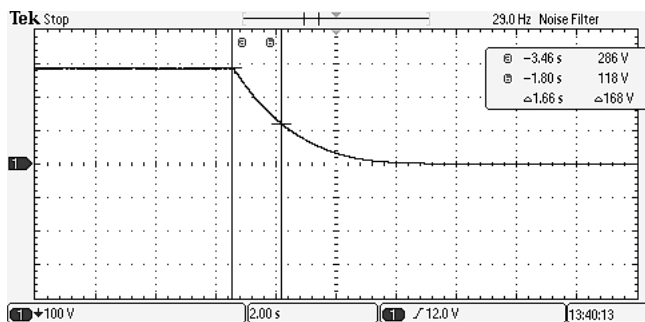
Badania eksperymentalne przeprowadzono dla kilkunastu typowych maszyn elektrycznych prądu stałego i prądu przemiennego. Za pomocą oscyloskopu cyfrowego zarejestrowano przebiegi czasowe napięcia wybiegu maszyn zasilanych z sieci prądu przemiennego i stałego, a także z układów energoelektronicznych. Na rys. 6 pokazano przebieg napięcia wybiegu silnika asynchronicznego pierścieniowego (ze zwartym wirnikiem) SZJe56i 4kW/380V/16A/955n zasilanego z przemiennika częstotliwości z falownikiem napięcia PWM i obciążonego mechanicznie prądnicą prądu stałego. Szczególnie zwraca uwagę przebieg spadku amplitudy napięcia wybiegu w jego początkowym okresie. Wartość amplitudy napięcia w chwili wyłączenia napędu jest równa napięciu w obwodzie pośredniczącym falownika PWM i wynosi około 580V.



Rys. 6. Przebieg napięcia wybiegu silnika SZJe56i 4kW/380V zasilanego z przemiennika częstotliwości z falownikiem napięcia PWM



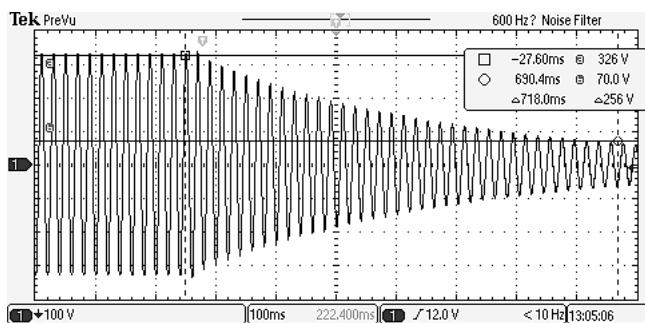
Rys. 7. Przebieg napięcia wybiegu silnika prądu stałego PBBa52a 5,1kW/220V zasilanego z nawrotnego napędu tyrystorowego prądu stałego



Rys. 8. Przebieg napięcia wybiegu silnika prądu stałego PZOD44d 1,1kW/220V zasilanego ze źródła napięcia stałego

Na rys. 7 pokazano przebieg napięcia wybiegu silnika prądu stałego PBBa52a 5,1kW/220V/27,3A/1000n zasilanego z nawrotnego napędu tyrystorowego prądu stałego i obciążonego mechanicznie silnikiem pierścieniowym. Napięcie niebezpieczne utrzymuje się na zaciskach maszyny przez ponad 6s. Na rys. 8 pokazano przebieg napięcia wybiegu silnika prądu stałego PZOD44d 1,1kW/220V/5,4A/1550n zasilanego ze źródła napięcia stałego obciążonego mechanicznie również silnikiem pierścieniowym.

Na rys. 9 pokazano przebieg napięcia wybiegu silnika prądu klatkowego DO67/4 produkcji niemieckiej 19kW/380V/37,8A/1450n zasilanego z sieci 3 x 400V i obciążonego mechanicznie prądnicą prądu stałego. Napięcie niebezpieczne utrzymuje się na zaciskach maszyny przez ponad 700ms, co jest spowodowane dużą bezwładnością układu elektromaszynowego.



Rys. 9. Przebieg napięcia wybiegu silnika klatkowego DO67/4 (prod. niem.) 19kW/380V zasilanego z sieci 3 x 400V

Wnioski

Na podstawie wykonanych badań eksperymentalnych stwierdzono, że napięcie wybiegu maszyn elektrycznych utrzymuje się na poziomie niebezpiecznym dla człowieka przez czas od kilkuset milisekund do kilku sekund, co może stwarzać poważne zagrożenie dla osób obsługujących napędy elektryczne. Dotyczy to zarówno maszyn elektrycznych prądu stałego jak i przemiennego, także małych i średnich mocy będących elementami układów

napędowych z grupy III i IV elektrycznych urządzeń napędowych. Czas utrzymywania się napięcia niebezpiecznego zależy głównie od czasu wybiegu związanego bezpośrednio z momentem bezwładności układu elektromaszynowego i napięcia początkowego. Szczególnie uwidacznia się to w układach z maszynami asynchronicznymi zasilanymi z przemienników częstotliwości z falownikami PWM, gdzie amplituda początkowa napięcia wybiegu jest równa wartości napięcia w obwodzie pośredniczącym falownika (około 580V). Poza tym w urządzeniach napędowych z falownikami PWM w przewodzie ochronnym występują prądy upływu będące wynikiem powstającego w punkcie zerowym obwodu napięcia niezrównoważenia. Ich negatywny wpływ na skuteczność zadziałania wyłączników RCD autorzy opisali w pracy [2].

Wyniki badań eksperymentalnych potwierdzają wątpliwą skuteczność wyłączników RCD do ochrony przeciwporażeniowej układów napędowych. Dotyczy to szczególnie elektrycznych urządzeń napędowych o dużym momencie bezwładności oraz zasilanych z przemienników częstotliwości z falownikami PWM.

LITERATURA

- [1] Gierlotka S.: *Ryzyko porażenia prądem przez maszyny elektryczne wyłączone z ruchu*, (2011), elektro.info 5/2011
- [2] Czaja P., Jąderko A.: *Wpływ prądów upływu w przewodach ochronnych przekształtników z falownikiem PWM na działanie zabezpieczeń przeciwporażeniowych RCD*, (2013), Przegląd Elektrotechniczny 12/2013, ss. 203-206
- [3] CEI/IEC/TS 60479-1:2005 *Effects of current on human beings and livestock – Part 1: General aspects*
- [4] Gierlotka S.: *Elektropatologia porażenia prądem elektrycznym*, Wydawnictwo Śląsk, Katowice, 2006
- [5] Musiał E.: *Ochrona przeciwporażeniowa w urządzeniach średniego napięcia – aktualny stan normalizacji*, (2010), materiały konferencji „Automatyka, elektryka, zakłócenia”, Jurata, 23-26 czerwca 2010, Gdańsk INFOTECH, ss. 85-100
- [6] PN-E-05115:2002 *Instalacje elektroenergetyczne prądu przemiennego o napięciu wyższym od 1 kV*
- [7] PN-EN 61140:2005/A1:2008 *Ochrona przed porażeniem prądem elektrycznym – wspólne aspekty instalacji i urządzeń*
- [8] PN-HD 60364-4-41:2009 *Instalacje elektryczne niskiego napięcia. Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa. Ochrona przed porażeniem elektrycznym*
- [9] *Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie* (Dz.U. nr 75, poz. 690, z późniejszymi zmianami)

Autorzy:

dr. inż. Paweł Czaja, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, e-mail: czajap@el.pcz.czyst.pl;
dr. inż. Andrzej Jąderko, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, e-mail: aj@el.pcz.czyst.pl;