

Piotr GAWOR
Politechnika Śląska, Gliwice

WPŁYW NIEKORZYSTNYCH ZMIAN IMPEDANCJI CIAŁA CZŁOWIEKA NA RYZYKO PORAŻENIA PRZEMIENNYM PRĄDEM ELEKTRYCZNYM

Streszczenie. Impedancja ciała człowieka stykającego się z urządzeniem elektrycznym może ulegać zmianom pod wpływem różnych czynników zewnętrznych. Szczególnie w warunkach środowiskowych podziemi kopalń istotny staje się wpływ czynników ergonomicznych. W artykule przedstawiono sposób oceny zmian ryzyka porażenia prądem przemiennym w sytuacjach, gdy impedancja ciała człowieka ulega zmniejszeniu w wyniku oddziaływań niekorzystnych warunków zewnętrznych.

THE IMPACT OF UNFAVORABLE CHANGES IN HUMAN BODY IMPEDANCE ON THE RISK OF SHOCK FROM ALTERNATING CURRENT (AC)

Summary. Human body impedance while in contact with electrical equipment may be subjected to changes evoked by different external conditions. Under specific environmental conditions prevailing in coal mines the influence of ergonomic factors is essential. The scope of the paper is the manner of assessing the risk of shock from alternating current when human body impedance is reduced due to unfavorable external conditions.

1. Wprowadzenie

Ryzyko porażenia prądem elektrycznym zależne jest m. in. od wartości prądu rażeniowego i czasu jego przepływu. W samoczynnym wyłączeniu zasilania, jako jednym z częściej stosowanych środków ochrony przeciwporażeniowej przy uszkodzeniu [6] (dodatkowych), określony jest zwykle największy dopuszczalny czas działania urządzeń ochronnych [5], a więc i spodziewany czas ewentualnego rażenia prądem. Czas ten wyznaczany jest zgodnie

z przewidywanymi skutkami rażenia prądem o wartości określonej na podstawie obliczonego spodziewanego napięcia dotykowego i przyjętej wartości impedancji ciała człowieka stykającego się z uszkodzonym urządzeniem elektrycznym. Przewidywane skutki rażenia ocenia się na podstawie przyjmowanego powszechnie, jako najbardziej miarodajnego, raportu nr 479 Międzynarodowej Komisji Elektrotechnicznej [7]. Impedancja ciała człowieka jest, jak wiadomo, wielkością zależną od wpływu wielu czynników i stąd jej wartości zawierają się w bardzo szerokich granicach. Należy się zatem liczyć z tym, że wartości rzeczywistych prądów rażeniowych mogą się różnić od wyznaczonych przy założeniu określonej wartości impedancji ciała. Rzeczywista wartość impedancji ciała w chwili rażenia może być bowiem większa lub mniejsza od przyjętej do określenia dopuszczalnego czasu rażenia. W pierwszym przypadku prąd rażeniowy będzie mniejszy i ryzyko porażenia się zmniejszy. Drugi natomiast przypadek jest bardzo niekorzystny. Zmniejszona, w wyniku oddziaływania różnych czynników, wartość impedancji ciała spowoduje, że rzeczywisty prąd rażeniowy będzie większy od przyjętego do wymiarowania czasu wyłączenia i ryzyko może osiągnąć poziom nietolerowalny. Istnieje zatem potrzeba oceny zmian ryzyka spowodowanych niekorzystnymi zmianami wartości impedancji ciała.

2. Czynniki wpływające na wartość impedancji ciała człowieka

Do najważniejszych czynników wpływających na wartość impedancji ciała człowieka zaliczyć można:

- wartość napięcia dotykowego i częstotliwość prądu rażeniowego,
- drogę przepływu prądu rażeniowego,
- właściwości osobnicze ciała człowieka i jego stan psychofizyczny,
- warunki klimatyczne w miejscu rażenia i czynniki ergonomiczne.

Wartość napięcia dotykowego i częstotliwość prądu wynikają ze specyfiki właściwej sieci elektroenergetycznej. Drogi przepływu prądu rażeniowego mogą być bowiem bardzo zróżnicowane w zależności od konkretnych warunków miejsca pracy oraz od sposobu pracy. Skutki rażenia prądem przepływającym wzdłuż różnych dróg zależą nie tylko od wartości impedancji ciała między punktem wpływu i wypływu prądu rażeniowego, ale i od tego, jakie organy znajdują się na drodze prądu.

Właściwości osobnicze ciała człowieka, a także jego stan psychofizyczny wpływają bardzo istotnie na wartość impedancji. Znajduje to odzwierciedlenie w statystycznym sposobie prezentowania wartości impedancji. Podaje się je najczęściej zgrupowane w percentylach rozkładów uzyskanych z wyników badań (tablice 1 i 2).

Tablica 1
Impedancja całkowita podczas przepływu prądu przemiennego 50/60 Hz przy dużej powierzchni dotyku i suchym naskórku

Napięcie dotykowe (V)	Wartości, których nie przekracza impedancja całkowita ciała (Ω) odpowiedniej części populacji					
	5% populacji		50% populacji		95% populacji	
	wg [7]	wg [1]	wg [7]	wg [1]	wg [7]	wg [1]
25	1750	1750	3250	3250	6100	6100
50	1450	1375	2625	2500	4375	4600
115	1155	936	1725	1620	3320	2855
200	1026	800	1408	1275	2283	2050
Wartość asymptotyczna	650	575	750	775	850	1050

Tablica 2
Impedancja całkowita podczas przepływu prądu przemiennego 50/60 Hz przy dużej powierzchni dotyku i naskórku zwilżonym [1]

Napięcie dotykowe (V)	Wartości, których nie przekracza impedancja całkowita ciała (Ω) odpowiedniej części populacji					
	5% populacji		50% populacji		95% populacji	
	Naskórek zwilżony zwykłą wodą	Naskórek zwilżony wodą słoną	Naskórek zwilżony zwykłą wodą	Naskórek zwilżony wodą słoną	Naskórek zwilżony zwykłą wodą	Naskórek zwilżony wodą słoną
25	1175	960	2175	1300	4100	1755
50	1100	945	2000	1275	3675	1720
115	930	896	1600	1210	2785	1634
200	800	840	1275	1135	2050	1530
Wartość asymptotyczna	575	575	775	775	1050	1050

Przedstawione w tablicach 1 i 2 wartości impedancji ciała dotyczą przypadku, gdy powierzchnia dotyku jest stosunkowo duża (50 do 100 cm²). Przy mniejszych jednak polach powierzchni dotyku impedancja ciała jest znacznie większa. W tablicy 3 przedstawiono dla porównania stosunek impedancji przy dotyku o powierzchni 10 cm² i 1 cm² do impedancji przy dotyku o dużej powierzchni (100 cm²).

Badania impedancji ciała ludzkiego przeprowadzane są, jak wiadomo, zwykle w warunkach laboratoryjnych [1, 4]. Rzeczywiste jednak warunki klimatyczne w pomieszczeniu,

w którym dojść może do wypadku porażenia, mają istotny wpływ na wartość impedancji ciała. Na podstawie badań w warunkach podziemi kopalń [3] stwierdzić można, że w niekorzystnych warunkach klimatycznych (np. w wyrobisku charakteryzującym się liczbą katastrofni wilgotnych poniżej 11) obliczeniowa impedancja ciała może ulec np. czterokrotnemu zmniejszeniu w stosunku do wartości impedancji w warunkach korzystnych (powyżej 20 katastrofni wilgotnych). Dotyczy to zwłaszcza niewielkich wartości napięć dotykowych; przy dużych napięciach dotykowych, kiedy przebicciu ulega naskórek, wpływ ten jest mniejszy [2].

Tablica 3

Stosunek impedancji przy dotyku o powierzchni 10 cm^2 (Z_{c10}) i 1 cm^2 (Z_{c1}) do impedancji przy dotyku o powierzchni 100 cm^2 (Z_{c100}) [1]

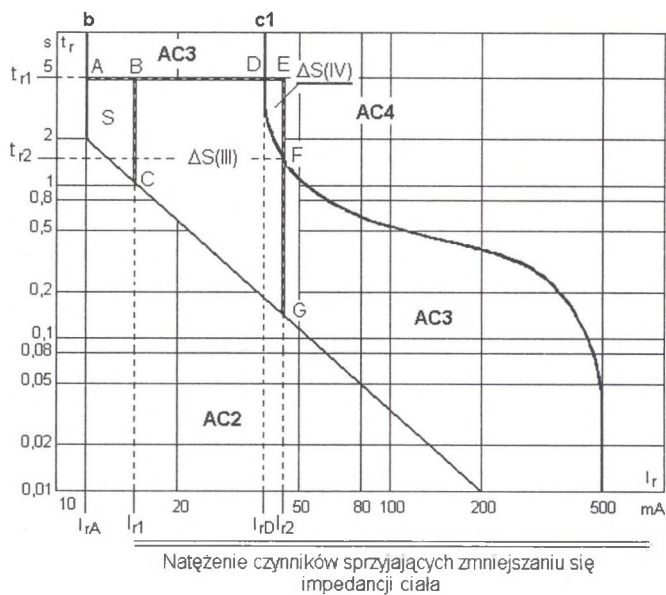
U_d (V)	25	50	75	100	125	150	175	200
Z_{c100} (Ω)	3750	2710	2240	1830	1700	1530	1450	1390
Z_{10}/Z_{c100}	8,6	7,1	5,5	4,0	2,9	2,4	1,7	1,6
Z_1/Z_{c100}	53,2	60,9	35,3	25,5	10,6	6,1	4,1	3,9

3. Prognozowanie wzrostu ryzyka porażenia prądem elektrycznym w warunkach obniżonej impedancji ciała

Zmniejszanie się impedancji ciała człowieka przy stałej wartości napięcia dotykowego pociąga za sobą wzrost ewentualnego prądu rażeniowego, a to z kolei wzrost ciężkości porażenia. „Ciężkość porażenia”, stanowiąca jeden ze składników ryzyka [2], jest pojęciem trudnym do jednoznacznego określenia ilościowego z punktu widzenia rozważań technicznych; bardziej szczegółowy opis jest domeną medycyny (patofizjologii). Chcąc jednak analizować i oceniać ryzyko porażenia prądem elektrycznym, niezbędny jest opis ciężkości porażenia w kategoriach ilościowych. Metodę takiego opisu dla prądu stałego w odniesieniu do zmian rezystancji ciała spowodowanych zmianami dyskomfortu cieplnego przedstawiono w [2]. Bazując na powyższej metodzie, dokonać można analizy w warunkach uogólnionych dla prądu przemiennego.

Podstawą do określenia ilościowego wskaźnika zmian ryzyka może być wykres zależności $t_r = f(I_r)$, przedstawiający strefy czasowo-prądowe skutków działania prądów przemiennych [7]. Za niepożądane (niebezpieczne) można uznać skutki wywołane prądem rażeniowym większym od prądu samouwołnienia, oznaczonego na wykresie krzywą **b** (rys. 1, rys. 2). Każdy punkt znajdujący się na wykresie na prawo od krzywej **b** reprezentuje sytuację, w której ciężkość porażenia jest niepożądana; im bardziej więc współrzędne punktu oddalone są od krzywej **b** (zwłaszcza w kierunku osi odciętych), tym większa jest ciężkość porażenia. Po-

nieważ o skutkach rażenia (ocenianych wg wykresu $t_r = f(I_r)$) decyduje zarówno wartość prądu rażeniowego, jak i czas rażenia, to za miarę ciężkości porażenia można przykładowo uznać zbiór punktów ograniczonych z jednej strony krzywą **b**, a z drugiej strony rzędną i odciętą rozpatrywanego punktu. Im większe jest zatem pole powierzchni uzyskanej w ten sposób figury, tym większa jest ciężkość porażenia, a więc i ryzyka.



Rys. 1. Ilustracja graficzna sposobu określania wzrostu ryzyka spowodowanego obniżeniem impedancji ciała przy stałej wartości napięcia dotykowego i czasie samoczynnego wyłączenia zasilania równym 5s
 Fig.1. Graphic representation of the manner of assessing the risk posed by reduced human body impedance at constant value of the touch voltage and the time of automatic disconnection of supply equal to 5s

Jest to oczywiście opis uproszczony, jako że skutki przepływu prądu rażeniowego nie są liniowo zależne od jego wartości. Przykładowo, skutki cieplne (oparzenie prądem) są w przybliżeniu proporcjonalne do kwadratu wartości prądu. Punktom położonym na wykresie bardziej na prawo należałoby zatem przypisać większą wagę. Aktualny stan wiedzy w zakresie elektropatologii nie umożliwia jednak dostatecznie szczegółowego opisu rozkładu intensywności skutków rażenia w zaznaczonych na wykresie strefach. Dlatego też w rozważaniach związanych z ryzykiem przyjęto założenie, że miarą ciężkości porażenia jest pole powierzchni figury wyznaczonej w sposób podany wyżej.

Ponieważ wartość prądu rażeniowego, przy stałym napięciu dotykowym, zależna jest od impedancji ciała, więc wyznaczyć należy dwie spodziewane wartości prądu:

- prąd rażeniowy I_{r1} obliczony, przy założeniu że impedancją ciała odpowiada przyjętemu stanowi normalnemu (np. dla skóry suchej, wg zaleceń IEC),

- prąd rażeniowy I_{r2} obliczony, dla impedancji ciała zmniejszonej pod wpływem dowolnych czynników.

Celowe jest rozróżnienie tutaj dwóch przypadków:

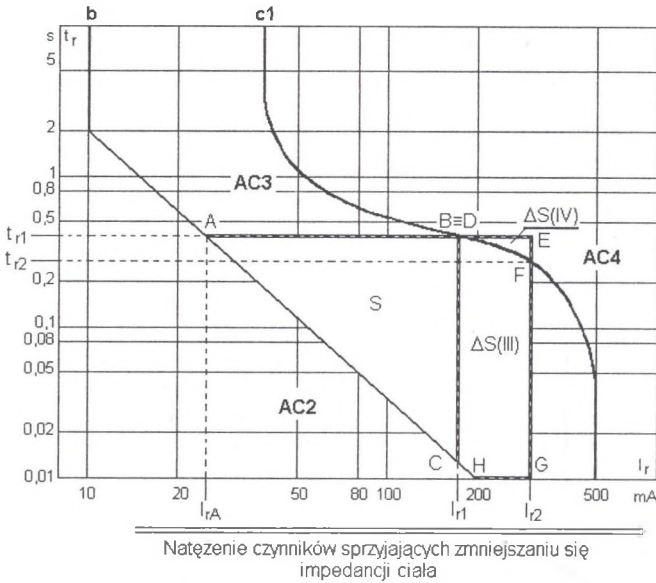
1. wartość prądu rażeniowego I_{r1} nie przekracza najmniejszej wartości wynikającej z krzywej **c1** (prądów niefibrylujących) – rys. 1,
2. wartość prądu rażeniowego I_{r1} wyznacza na krzywej **c1** czas t_{r1} – rys. 2.

W pierwszym przypadku (rys. 1) ciężkość porażenia w stanie przyjętym za normalny (prąd I_{r1}) odpowiada polu powierzchni S trapezu wyznaczonego punktami A-B-C. Rzędna punktów A i B ustalona została na poziomie umownego czasu trwania rażenia, równego umownemu czasowi działania urządzeń ochronnych zapewniających samoczynne wyłączenie zasilania $t_{r1} = 5s$ w przypadkach, gdy wartości prądów rażeniowych nie osiągają wartości wynikających z krzywej **c1**. Obniżenie wartości impedancji ciała spowoduje wzrost prądu rażeniowego do wartości I_{r2} , w wyniku czego ciężkość porażenia (a więc i ryzyko) wzrasta. Charakteryzuje to pole figury wyznaczonej punktami B-E-G-C, przy czym część tego pola $\Delta S(III)$ należy do strefy AC3 (braku możliwości samouwolnienia), a część $\Delta S(IV)$ do strefy AC4 (bezpośredniego zagrożenia życia w wyniku mogącej wystąpić fibrylacji komór serca). Chcąc uniknąć zatem zagrożenia życia (ryzyka nietolerowalnego), należałoby skrócić czas działania urządzeń ochronnych do wartości t_{r2} .

W drugim natomiast przypadku (rys. 2) wartość spodziewanego prądu rażeniowego w stanie przyjętym za normalny I_{r1} jest na tyle duża, że wyznacza na krzywej **c1** dopuszczalny czas rażenia t_{r1} , przed upływem którego powinno nastąpić samoczynne wyłączenie zasilania, by nie dopuścić do rażenia zagrażającego powstaniem fibrylacji komór serca (w strefie AC4). Ciężkość porażenia (a więc i ryzyko) w stanie normalnym odpowiada wówczas polu powierzchni S trójkąta wyznaczonego punktami A-B≡D-C i uznać ją można za tolerowalną, pod warunkiem że nastąpi samoczynne wyłączenie zasilania przed czasem t_{r1} . Obniżenie impedancji ciała spowoduje wzrost prądu rażeniowego do wartości I_{r2} , wywołując wzrost ciężkości porażenia do poziomu określonego polem figury wyznaczonej punktami B≡D-E-G-H-C. Część $\Delta S(III)$ pola tej figury znajduje się w strefie AC3, a część $\Delta S(IV)$ w strefie AC4. Z rozważań tych wynika, że w miarę wzrostu natężenia czynników sprzyjających zmniejszaniu się impedancji ciała rośnie pole powierzchni figury skojarzonej z ciężkością porażenia (ryzykiem). Wskaźnik przyrostu ryzyka ΔR związany z obniżaniem impedancji ciała można zatem zdefiniować jako stosunek:

$$\Delta R = \frac{\Delta S(III) + \Delta S(IV)}{S} \quad (1)$$

w którym $\Delta S(III)$ i $\Delta S(IV)$ są odpowiednio polami powierzchni figur znajdujących się w strefach AC3 i AC4 (rys. 1 i rys. 2).



Rys. 2. Ilustracja graficzna sposobu określania wzrostu ryzyka spowodowanego obniżeniem impedancji ciała przy stałej wartości napięcia dotykowego i czasie samoczynnego wyłączenia zasilania wynikającym z krzywej C1
 Fig. 2. Graphic representation of the manner of assessing the risk posed by reduced human body impedance at constant value of the touch voltage and the time of automatic disconnection of supply derived from curve C1

Poszczególne pola powierzchni można wyznaczyć ze wzorów:

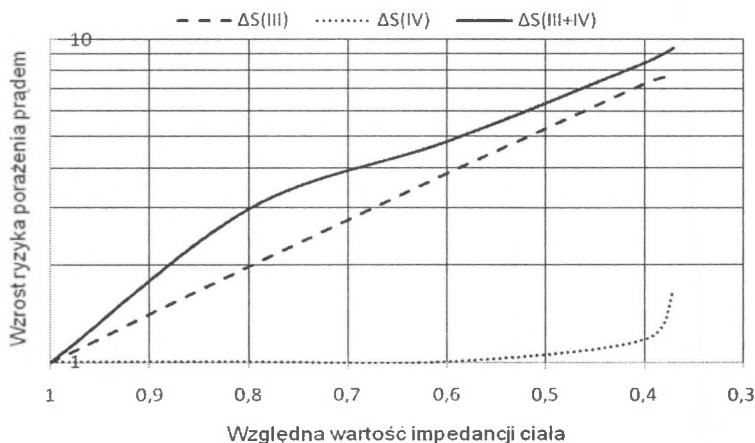
$$S = \int_{I_{rA}}^{I_{r1}} (t_{r1} - b(I_r)) d(I_r), \tag{2}$$

$$\Delta S(III) = \int_{I_{r1}}^{I_{rD}} (t_{r1} - b(I_r)) d(I_r) + \int_{I_{rD}}^{I_{r2}} (c1(I_r) - b(I_r)) d(I_r), \tag{3}$$

$$\Delta S(IV) = \int_{I_{rD}}^{I_{r2}} (t_{r1} - c1(I_r)) d(I_r). \tag{4}$$

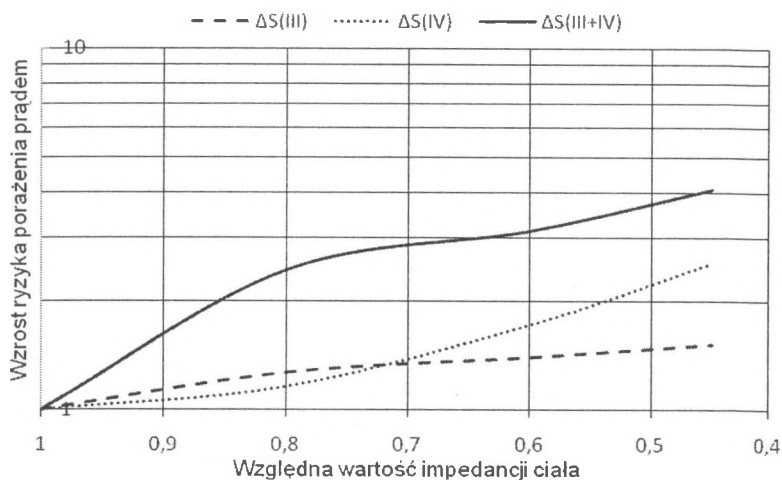
Ponieważ zależności $b(I_r)$ i $c1(I_r)$ występujące we wzorach (2), (3) i (4) nie są określone analitycznie, za najbardziej efektywną metodę całkowania należy uznać całkowanie numeryczne z wykorzystaniem reguły trapezów. Trzeba tutaj zauważyć, że na rys. 1 i rys. 2 użyto współrzędnych logarytmicznych, w związku z czym przed całkowaniem wygodniej jest zmienić współrzędne na liniowe. Korzystając ze wzorów (2), (3) i (4), wykonano stosowne obliczenia

dla czterech przykładowych wartości napięć dotykowych: 25V, 50 V, 115 V i 200 V. Pierwsze dwie wartości odpowiadają dopuszczalnym wartościom spodziewanych napięć dotykowych w sieci IT stosowanych w podziemiach kopalń. Następne zaś dwie wartości odpowiadają największym spodziewanym wartościom napięć dotykowych w sieciach TN o napięciach nominalnych 230/400V i 400/690 V. Dla każdego napięcia dotykowego przyjmowano jako impedancję odniesienia wartość 5% percentylu podawaną w raporcie 479 IEC [7]. Jako najmniejszą wartość impedancji przyjmowano wartość asymptotyczną, równą 650 Ω (por. tablica 1).



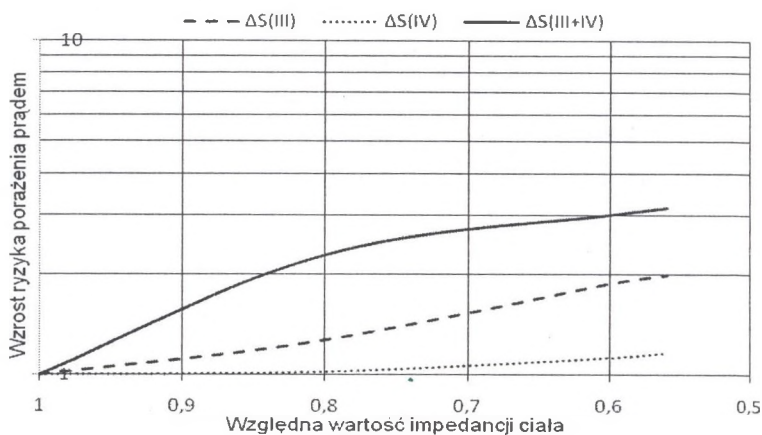
Rys. 3. Wpływ obniżania się impedancji ciała na wzrost ryzyka porażenia prądem elektrycznym przy napięciu dotykowym 25 V

Fig. 3. The impact of reduced human body impedance on the increase of the risk of shock from AC at the value of the touch voltage equal to 25V



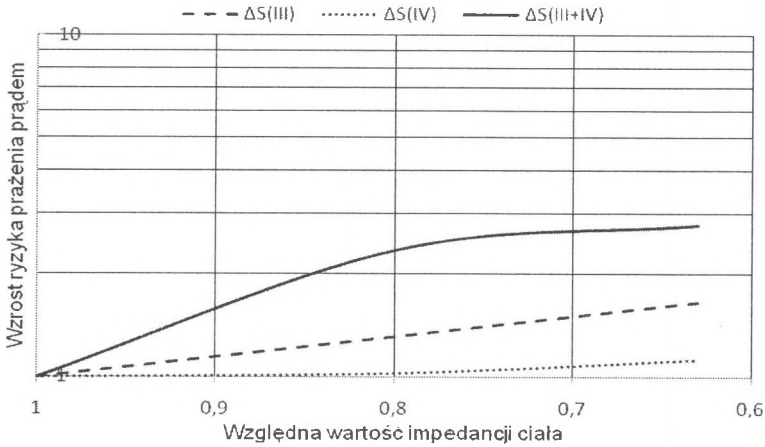
Rys. 4. Wpływ obniżania się impedancji ciała na wzrost ryzyka porażenia prądem elektrycznym przy napięciu dotykowym 50 V

Fig. 4. The impact of reduced human body impedance on the increase of the risk of shock from AC at the value of the touch voltage equal to 50V



Rys. 5. Wpływ obniżania się impedancji ciała na wzrost ryzyka porażenia prądem elektrycznym przy napięciu dotykowym 115 V

Fig. 5. The impact of reduced human body impedance on the increase of the risk of shock from AC at the value of the touch voltage equal to 115V



Rys. 6. Wpływ obniżania się impedancji ciała na wzrost ryzyka porażenia prądem elektrycznym przy napięciu dotykowym 200 V

Fig. 6. The impact of reduced human body impedance on the increase of the risk of shock from AC at the value of the touch voltage equal to 200V

Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 3, 4, 5 i 6, odkładając na osi rzędnych sumę:

$$R' = 1 + \frac{\Delta S}{S}. \quad (5)$$

Z krzywych przedstawionych na powyższych rysunkach wynika, że obniżanie się wartości impedancji ciała ma istotny wpływ na ryzyko porażenia prądem elektrycznym. Szczególnie widać to przy małych wartościach napięć dotykowych, gdy impedancja ciała jest stosunkowo duża. Wzrost ryzyka wiąże się z różnymi skutkami rażenia. W przypadku niewielkich napięć dotykowych (25 V), przy których możliwe jest samouwolnienie, obniżenie impedancji ciała np. o ok. 40% powoduje ok. 5-krotny wzrost ciężkości porażenia, głównie w wyniku działania cieplnego i działania na układ nerwowy. Dalsze obniżanie jednak wartości impedancji ciała spowodować może nawet zagrożenie życia. W przypadku napięcia dotykowego 50 V (rys. 4) zwraca uwagę znaczny przyrost ryzyka w obszarze skutków śmiertelnych (powierzchnia $\Delta S(IV)$ w strefie AC4, bezpośredniego zagrożenia życia).

4. Wnioski

1. Możliwość zmniejszenia się wartości impedancji ciała człowieka w wyniku oddziaływań zewnętrznych lub jego stanu psychofizycznego ma istotny wpływ na ryzyko porażenia prądem.

2. Wzrost ryzyka wywołany zmniejszeniem się impedancji ciała można oceniać ilościowo, posługując się wykresem $t_r = f(I_r)$ wg raportu IECF 479 [7].
3. Wzrost ryzyka wywołany zmniejszeniem się impedancji ciała jest szczególnie istotny przy małych wartościach napięć dotykowych.

BIBLIOGRAFIA

1. Bahl H., Biegelmeier G., Hirtler R.: Körperimpedanzen des Menschen bei trockenen, wassernassen und salznassen Berührungsf lächen verschiedener Größe. ESF Vienna. Wien 2001.
2. Gawor P.: Analiza i ocena ryzyka związanego z użytkowaniem sieci trakcji elektrycznej przewodowej w zakładach górniczych. Zesz. Nauk. Polit. Śl. Seria Górnictwo, z. 264. Gliwice 2005.
3. Gierlotka S.: Elektropatologia porażen prądem. Śląsk, Katowice 2006.
4. Manojlov W. Je.: Osnovy elektrobezopasnosti. Energoatomizdat, Leningrad 1991.
5. PN-IEC 60364-4-41:2000 Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych – Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa – Ochrona przeciwporażeniowa.
6. PN-EN 61140:2005 Ochrona przed porażeniem prądem elektrycznym – Wspólne aspekty instalacji i urządzeń.
7. Raport techniczny IEC nr 479-1 Skutki działania prądu na ludzi i zwierzęta domowe, Część 1: Aspekty ogólne. PKN, Warszawa 1999.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Bogdan Miedziński