

Piotr GAWOR
Politechnika Śląska

MODEL REZYSTANCJI CIAŁA CZŁOWIEKA W PRZYPADKU RAŻENIA PRĄDEM STAŁYM W NIEKORZYSTNYCH WARUNKACH ŚRODOWISKOWYCH PODZIEMI KOPALŃ

Streszczenie. Znany fakt zależności rezystancji ciała człowieka rażonego prądem elektrycznym od warunków środowiskowych nie znajduje potwierdzenia, np. w postaci normalizacyjnych zaleceń ilościowych. W artykule przedstawiono propozycję modelowego przedstawienia zmienności rezystancji ciała w zależności od klimatu wyrobiska podziemnego określonego liczbą katastrof. Model sporządzono na podstawie znanych z literatury wyników badań rezystancji ciała elektromonterów zatrudnionych w zakładach górniczych.

MODEL OF HUMAN'S BODY RESISTANCE IN CASE OF ELECTRIC SHOCK FROM DIRECT CURRENT IN UNFAVOURABLE ENVIRONMENTAL CONDITIONS OF MINES

Summary. The known fact of relationship between human's body resistance in case of electric shock and environmental conditions does not find confirmation e.g. in standardisation quantitative advises. In the paper a proposal model presentation of human's body resistance variation related to heading climate is presented. The model was made using known literature outcomes of mine-wiremen bodies' resistance research.

1. Wprowadzenie

Wartość spodziewanego prądu rażeniowego przy określonym napięciu dotykowym zależy jest od rezystancji ciała człowieka. Spośród czynników wpływających na zmiany rezystancji ciała na pierwszy plan w warunkach podziemi kopalń wysuwają się warunki środowiskowe w miejscu pracy. Szczegółowe, prowadzone od wielu lat badania [np. 1, 4, 5] i rozważania nad wpływem poszczególnych składników warunków środowiskowych na rezystancję ciała człowieka nie znalazły dotąd ilościowego ujęcia w dokumentach

normalizacyjnych [8]. W niektórych dawniejszych propozycjach przepisowych [9] rozróżnia się dwa rodzaje warunków środowiskowych, przyporządkowując im dwa przedziały rezystancji ciała (powyżej 1 k Ω i do 1 k Ω) i dwie różne wartości dopuszczalnych napięć dotykowych. Inni autorzy [7] proponują uwzględnianie wpływu warunków środowiskowych powodujących znaczne zmniejszenie rezystancji ciała (np. skutek zwilżenia naskórka w pomieszczeniach wilgotnych i mokrych) przy określaniu tzw. stopnia zagrożenia porażeniowego i doborze środków ochrony przeciwporażeniowej, nie odnosząc się ilościowo do wartości tej rezystancji. W niektórych zagadnieniach związanych z analizą ryzyka porażenia prądem elektrycznym od urządzeń dołowej trakcji elektrycznej przewodowej przydatna może być znajomość wartości rezystancji ciała człowieka w różnych warunkach środowiskowych panujących w wyrobiskach podziemnych [3]. W artykule przedstawiono propozycję modelu rezystancji ciała człowieka i obliczeniowe wartości tej rezystancji w zależności od napięcia dotykowego i liczby katastrofni charakteryzujących warunki klimatyczne w podziemiach kopalń.

2. Wpływ warunków środowiskowych na rezystancję ciała człowieka

Warunki środowiskowe w podziemiach kopalń (w tym zwłaszcza klimatyczne) charakteryzują się m. in. znacznym zróżnicowaniem, związanym przede wszystkim ze sposobem przewietrzania i/lub klimatyzacji, temperaturą skał i wilgotnością wyrobiska. Rozpatrując warunki klimatyczne w pobliżu urządzeń elektrycznych, z którymi kontaktuje się człowiek, należy dodatkowo uwzględnić miejsce zainstalowania urządzenia oraz wpływ samego urządzenia na klimat miejsca pracy. Niektóre urządzenia elektryczne (np. przewoźne stacje prostownikowe zasilające sieć trakcyjną) ustawiane są w słabo przewietrzanych wnękach i, nagrzewając się podczas pracy, przyczyniają się do istotnego wzrostu temperatury otoczenia. Osoby przebywające w pobliżu takiego urządzenia w czasie wystarczająco długim do zaaklimatyzowania się, np. elektromonterzy obsługujący, narażone są na pogorszenie komfortu pracy. Niekorzystne warunki klimatyczne i związane z tym najczęściej zwiększone pocenie się przyczyniają się do zmiany rezystancji ciała, co pociąga za sobą wpływ na poziom ryzyka porażenia prądem elektrycznym.

Spośród wielu prób określenia wpływu warunków klimatycznych na wartość rezystancji ciała człowieka [1, 4, 5, 6] na szczególną uwagę zasługują wyniki badań przeprowadzonych z udziałem elektromonterów górniczych w rzeczywistych warunkach kopalnianych [4].

Badania te przeprowadzono przy przemiennym (50 Hz) napięciu dotykowym z przedziału od 14 V do 95 V, mierząc impedancję na przyjętej tzw. standardowej drodze rażenia, tj. od opuszka palca średniego do opuszka kciuka tej samej dłoni, w wyrobiskach o zróżnicowanym klimacie. Jako ilościowy wskaźnik charakteryzujący klimat przyjęto najczęściej obecnie w kopalniach stosowane natężenie chłodzenia wyrażane w katastrofniach wilgotnych. Pomiarzy przeprowadzone zostały w wyrobiskach, w których natężenie chłodzenia zawierało się w przedziale od 7 do 22 katastrofni wilgotnych. Badania umożliwiły sformułowanie zależności [4]:

$$Z_0 = \frac{0,45 \cdot K_w^{2,3}}{\sqrt[3]{U_d}}, \quad (1)$$

w której:

K_w – liczba katastrofni wilgotnych,

Z_0 – tzw. impedancja standardowa ciała człowieka, posiadająca wymiar [$k\Omega$],

U_d – napięcie dotykowe, wyrażone w [V].

Impedancję na drodze standardowej przeliczyć można dla innych, najczęściej spotykanych dróg rażenia, wprowadzając tzw. współczynnik transformacji określony empirycznie [4]. Uzyskane w ten sposób obliczeniowe wartości impedancji ciała człowieka w różnych warunkach klimatycznych znaleźć można w kilku publikacjach [np.4].

3. Założenia przyjęte w proponowanym modelu rezystancji ciała człowieka

Analizując metodykę prowadzenia przedstawionych w rozdz.2 badań [4] należy przyjąć, że uzyskane wyniki charakteryzują w większym stopniu właściwości elektryczne skóry (naskórka) niż całego ciała (droga przepływu prądu pomiarowego przy pomiarach rezystancji standardowej pomiędzy opuszkami dwóch palców tej samej dłoni nie odpowiada drogom najczęściej spotykanych porażień). Łącząc wyniki badań w kopalniach [4] z zależnościami przedstawionymi w raporcie IEC-479 [10], można zaproponować uproszczony model rezystancji ciała człowieka w różnych warunkach środowiska podziemi kopalń.

Podstawą tego modelu jest założenie, że na rezystancję ciała składają się:

- a) rezystancja wewnętrzna R_w , której wartość praktycznie nie jest zależna od wpływów środowiskowych i od napięcia dotykowego,
- b) rezystancja skóry (dokładniej – podwójna jej wartość, tzn. w miejscu wpływu i w miejscu wypływu prądu rażeniowego), której wartość zależy od napięcia dotykowego i od wskaźnika charakteryzującego klimat w miejscu pracy.

Rezystancji wewnętrznej można przyporządkować wartość stałą, równą wartości asymptotycznej dla określonej populacji badanych, a więc odpowiednio [10]:

$$R_{w5\%} = 650 \Omega, \quad (2a)$$

$$R_{w50\%} = 750 \Omega, \quad (2b)$$

$$R_{w95\%} = 850 \Omega. \quad (2c)$$

Rezystancja skóry natomiast zależna będzie:

- od napięcia dotykowego zgodnie z zależnością podaną w raporcie IEC-479 [10],
- od liczby katastrofni wilgotnych i napięcia dotykowego – zgodnie z wynikami badań w kopalniach – wzór (1).

Dodatkowo przyjęto następujące założenia:

- w warunkach środowiskowych skrajnie niekorzystnych, w których praca jest zabroniona i zagrażająca zdrowiu, rezystancja skóry w wyniku intensywnego pocenia się jest pomijalna ($R_s \rightarrow 0$),
- jako warunki normalne w odniesieniu do rezystancji ciała należy przyjąć takie, w których rezystancja ciała równa jest wartości wynikającej z raportu IEC-479 [10].

Warunkom skrajnie niekorzystnym przyporządkować można liczbę katastrofni wilgotnych Kw_0 , natomiast warunkom normalnym w odniesieniu do rezystancji ciała – liczbę katastrofni Kw_n . Uproszczony model rezystancji ciała przy określonym napięciu dotykowym i określonej liczbie katastrofni można zatem przedstawić w postaci równania:

$$R_c(U_d, Kw) = R_w + [R(U_d) - R_w] \cdot k_R(Kw), \quad (3)$$

w którym współczynnik uwzględniający wpływ warunków klimatycznych na rezystancję ciała człowieka $k_R(Kw)$ przyjmować może następujące wartości:

$k_R(Kw_0) = 0 \rightarrow$ rezystancja skóry pomijalna, rezystancja ciała równa jest rezystancji wewnętrznej,

$k_R(Kw_n) = 1 \rightarrow$ rezystancja ciała wynika z zależności podanej w raporcie IEC-479 [10],

$k_R(Kw_0 < Kw < Kw_n)$ – wynika z wyrażenia:

$$k_R(Kw) = \frac{Z_0(Kw)}{Z_0(Kw_n)} = \frac{Kw^{2,3}}{Kw_n^{2,3}} \quad (4)$$

Charakterystyczne skrajne wartości katastrofni wilgotnych Kw_0 i Kw_n ocenić można na podstawie następującego rozumowania, uwzględniającego zależność wydajności człowieka od warunków klimatycznych oraz zalecane i dopuszczalne normy komfortu pracy [2]:

- a) Przy $Kw \geq 15$ wydajność pracy górnika ocenia się na poziomie 100%, przy czym wysoki komfort pracy gwarantuje środowisko, w którym osiągnięto liczbę katastrofni wilgotnych

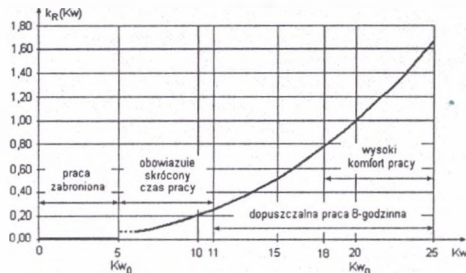
- z przedziału (18 – 25); stąd wartość Kw_n , przy której rezystancja ciała człowieka nie odbiega od wartości podawanej w raporcie IEC [10] nie powinna być mniejsza od 15.
- b) Wydajność pracy górnika spada poniżej 60% przy $Kw < 5$, co w wyrobisku o prędkości przewietrzającego powietrza $w = 0,1$ m/s, odpowiada temperaturze wilgotnej 30°C , a więc temperaturze, w której praca jest zabroniona (z wyjątkiem prowadzenia akcji ratowniczej); można zatem przyjąć, że $Kw_0 = 5$, czyli, że rezystancja ciała człowieka w takich warunkach wynika tylko z rezystancji wewnętrznej (rezystancja skóry jest pomijalna), a wartość współczynnika $k_R(Kw_0 = 5)$ równa jest zero.
- c) Przy $Kw < 11$ wydajność pracy górnika osiąga poziom ok. 75% i należy skrócić czas pracy do 6 godzin przyjmując, że te właśnie warunki klimatyczne powinny charakteryzować zwiększoną wrażliwość na działanie prądu elektrycznego, wyrażającą się również obniżeniem rezystancji ciała człowieka poniżej umownego poziomu $1000 \Omega^1$. Można metodą kolejnych przybliżeń ustalić wartość 20 katastopni wilgotnych, jako odpowiadającą klimatowi, przy którym rezystancja ciała człowieka nie zależy od tego klimatu ($Kw_0 = 20$).

¹ W nawiązaniu do obowiązujących dawniej przepisów [9].

Wobec tego wzór (4) przyjmie postać:

$$k_R(Kw) = \frac{Z_0(Kw)}{Z_0(Kw_n = 20)} = \frac{Kw^{2,3}}{20^{2,3}} = \frac{Kw^{2,3}}{982,6} \quad (5)$$

Zależność współczynnika $k_R(Kw)$ od liczby katastopni wilgotnych przedstawiono na rys. 1.



Rys.1. Zależność współczynnika uwzględniającego zmienność rezystancji ciała $k_R(Kw)$ od wskaźnika klimatu kopalnianego Kw

Fig. 1. Coefficient taking into account variation of the body resistance $k_R(Kw)$ as a function of the heading climate index Kw

4. Obliczeniowe wartości rezystancji ciała człowieka w różnych warunkach środowiskowych

Nawiązując do zamieszczonej w raporcie IEC 479 [10] tablicy rezystancji ciała człowieka dla różnych napięć dotykowych i różnych percentyli badanej populacji obliczono na podstawie wzoru (3) rezystancje odpowiadające różnym warunkom klimatycznym. Tablice uzupełniono wartościami rezystancji ciała dla napięć dotykowych mogących mieć zastosowanie w rozważaniach porażen od urządzeń trakcji elektrycznej dołowej zasilanej napięciem znamionowym 250 V, przy czym obliczono je stosując interpolację liniową. Wyniki obliczeń zestawiono w tabl. 1 do 3. Wartości odpowiadające napięciom dotykowym różnym od podanych w raporcie IEC zaznaczono kursywą.

5. Wnioski

Analizując wartości rezystancji ciała człowieka zamieszczone w tabl. 1, 2 i 3 warto zwrócić uwagę na kolumny odpowiadające liczbie katastrofni wilgotnych $K_w = 11$ i $K_w = 15$ w tabl. 1.

Tablica 1

Spodziewane wartości rezystancji ciała człowieka na drodze prądu rażeniowego dłoń – dłoń (DD) lub dłoń stopa (DS) w warunkach zróżnicowanego klimatu ocenianego w katastrofniach wilgotnych, dla 5% percentylu badanej populacji wg IEC-479 [10]

U_d, V	$R_c(U_d, K_w), \Omega$				
	$K_w = 20$	$K_w = 15$	$K_w = 11$	$K_w = 8$	$K_w = 5$
25	2200	1456	1038	836	650
30	2110	1409	1015	825	650
50	1750	1222	925	782	650
60	1654	1172	901	770	650
75	1510	1097	865	753	650
120	1482	1083	858	750	650
125	1230	952	795	720	650
150	1169	920	786	716	650
180	1097	882	762	704	650
210	1024	845	744	695	650
220	1000	832	738	692	650
250	767	711	679	664	650
700	750	702	675	662	650
1000	700	676	663	656	650
Wartość asymptotyczna	650	650	650	650	650

Tablica 2
Spodziewane wartości rezystancji ciała człowieka na drodze prądu rażeniowego dłoń – dłoń (DD) lub dłoń stopa (DS) w warunkach zróżnicowanego klimatu ocenianego w katastrofniach wilgotnych, dla 50% percentylu badanej populacji wg IEC-479 [10]

U_d, V	$R_c(U_d, K_w), \Omega$				
	$K_w = 20$	$K_w = 15$	$K_w = 11$	$K_w = 8$	$K_w = 5$
25	3875	2375	1531	1125	750
30	3698	2283	1487	1104	750
50	2990	1915	1310	1019	750
60	2782	1807	1258	994	750
75	2470	1644	1180	956	750
120	2398	1607	1162	947	750
125	1750	1270	1000	870	750
150	1645	1215	974	857	750
180	1518	1150	942	842	750
210	1392	1084	911	827	750
220	1350	1062	900	822	750
250	1117	941	842	794	750
700	1100	932	838	792	750
1000	1050	906	825	786	750
Wartość asymptotyczna	750	750	750	750	750

Tablica 3
Spodziewane wartości rezystancji ciała człowieka na drodze prądu rażeniowego dłoń – dłoń (DD) lub dłoń stopa (DS) w warunkach zróżnicowanego klimatu ocenianego w katastrofniach wilgotnych, dla 95% percentylu badanej populacji wg IEC-479[10]

U_d, V	$R_c(U_d, K_w), \Omega$				
	$K_w = 20$	$K_w = 15$	$K_w = 11$	$K_w = 8$	$K_w = 5$
25	8800	4984	2838	1804	850
30	8100	4620	2663	1720	850
50	5300	3164	1963	1384	850
60	4780	2894	1833	1322	850
75	4000	2488	1638	1228	850
120	3900	2436	1613	1216	850
125	3000	1968	1388	1108	850
150	2770	1848	1330	1080	850
180	2493	1705	1261	1047	850
210	2217	1561	1192	1014	850
220	2125	1513	1169	1003	850
250	1589	1234	1035	939	850
700	1550	1214	1025	934	850
1000	1500	1188	1013	928	850
Wartość asymptotyczna	850	850	850	850	850

Wynika z nich, że natężenie chłodzenia określone liczbą katastrofni $K_w = 11$ można przyjąć jako stan rozgraniczający warunki, w których rezystancja ciała człowieka (dla 5% percentylu populacji) jest w przybliżeniu większa i mniejsza od 1000 Ω . Pozwala to nawiązać do proponowanego niegdyś [9] kryterium różnicowania rezystancji ciała, a więc i wrażliwości na porażenia. Można zatem przyjąć następujące założenie:

- w wyrobiskach (i/lub na stanowiskach pracy), w których liczba katastrofni wilgotnych jest większa od 11, rezystancja ciała człowieka i wrażliwość człowieka na działanie prądu elektrycznego są zbliżone do spotykanej (percentyl 5%) w zwykłych warunkach powierzchniowych ($R_c > 1000 \Omega$),
- w wyrobiskach (i/lub na stanowiskach pracy), w których liczba katastrofni wilgotnych jest mniejsza od 11, rezystancja ciała człowieka jest obniżona ($R_c < 1000 \Omega$), a wrażliwość człowieka na działanie prądu elektrycznego jest istotnie zwiększona w stosunku do spotykanej w warunkach powierzchniowych.

Przedstawione w tabl. 1, 2 i 3 obliczeniowe wartości rezystancji ciała człowieka mogą być wykorzystane w analizie ryzyka związanego z użytkowaniem trakcji elektrycznej dołowej oraz w innych specjalistycznych rozważaniach wchodzących przykładowo w skład wykonywania dokumentacji związanych z wypadkami porażenia prądem elektrycznym stałym.

LITERATURA

1. Bahl H., Biegelmeier G., Hirtler R.: Körperimpedanzen des Menschen bei trockenen, wassermassen und salznassen Berührungsflächen verschiedener Größe. Schriftenreihe der Stiftung Elektroschutz, Bericht nr 2, Wien 2001.
2. Frycz A.: Klimatyzacja kopalń. „Śląsk”, Katowice 1969.
3. Gawor P.: Element ryzyka wypadków elektrycznych w warunkach kopalnianych. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa nr 6, 1998.
4. Gierlotka S.: Wpływ uciążliwości ergonomicznych występujących w kopalniach węgla kamiennego na impedancję elektryczną ciała człowieka. Zesz. Nauk. Polit. Śl. Górnictwo z.252. Gliwice 2002.
5. Krasucki F.: Zagrożenia elektryczne w górnictwie. „Śląsk”, Katowice 1984.
6. Manojłow W. J.: Osnovy elektrobezopasnosti. Energoatomizdat, Leningrad 1991.
7. Musiał E., Jabłoński W.: Warunki techniczne jakim powinny odpowiadać urządzenia elektroenergetyczne niskiego napięcia w zakresie ochrony przeciwporażeniowej – nowelizacja projektu. Biuletyn SEP Informator o Normach i Przepisach Elektrycznych nr 24, marzec 1999.
8. PN-IEC 60364-3 Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych - Ustalanie ogólnych charakterystyk.
9. Rozporządzenie MP z 8.10.1990 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać urządzenia elektroenergetyczne w zakresie ochrony przeciwporażeniowej. Dz. U. nr 81, poz. 473, 1990 r.
10. Skutki działania prądu na ludzi i zwierzęta domowe, część 1: Aspekty ogólne. Raport techniczny IEC nr 479-1. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 1999 r.

Abstract

In the paper the analytical values of human's body resistance for different touch voltage and different environmental conditions of mines are presented. The calculations are based on bodies' resistance model known from literature [4] and researches including non-linearity of skin resistance [10]. Results of the calculations can be helpful in the analysis of the risk connected with using electric traction.