ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1995

Seria: GÓRNICTWO z. 225 Nr kol. 1307

Stefan GIERLOTKA

ZMIANY IMPEDANCJI CIAŁA CZŁOWIEKA POD WPŁYWEM NAPIĘCIA I KLIMATU ŚRODOWISKA GÓRNICZEGO

Streszczenie. W artykule omówiono wpływ klimatu środowiska dołowego kopalni na zmiany impedancji ciała człowieka. Przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań impedancji ciała przy zdeterminowanym klimacie i napięciu rażenia. Dokonano ujęcia badanego zjawiska za pomocą metod statystycznych. Otrzymane wyniki porównano z opracowaniami innych badań.

CHANGES OF HUMAN BODY IMPEDANCE UNDER AN INFLUENCE OF SHOCK CURRENT AND COAL-MINING CLIMAT

Summary. The article describes the effect underground ervironment on changes in impedance of human body. It was presented tests results of human body impedance firm detereminated climat and shock current. It was formulated tested effect with statistics methods. Obtained results was compared with other tests elaborates.

ИЗМЕНЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ТЕЛА ПОД ВЛИЯНИЕМ НАПРЯЖЕНИЯ И КЛИМАТИЧЕСКИХ УЛОВИЙ ШАХТНОЙ СРЕДЫ

Резюме. В статье рассмотрено влияние климатических условий шахтной среда на изменения вещины электрического сопротивления человеческого тела. Представлено результаты проведеных исследований сопротивления тела при определенных климатических условиях и напражении поражения. Исследованое явление проанализировано при помощи статистического метода. Полученое результаты сравнено с разработками других исследований.

1. WSTĘP

Mimo że wypadki śmiertelnego porażenia prądem elektrycznym stanowią zaledwie kilka procent wypadków w kopalniach, to zagadnienie porażenia prądem elektrycznym wymaga bliższego rozeznania. Za główną przyczynę zaistniałych śmiertelnych skutków porażenia prądem elektrycznym uznać należy wpływ specyficznych warunków środowiskowych panujących na dole kopalni. Duża wilgotność względna, zapylenie, podwyższona temperatura powietrza pogarszają warunki oddawania ciepła z organizmu do otoczenia. Ma to zasadniczy wpływ na zmianę wartości impedancji ciała człowieka oraz rezystancji przejścia prądu rażeniowego od elektrody do ciała człowieka podczas rażenia. Podwyższona temperatura zwiększa pocenie się powodując zasolenie miejsca dotyku, a tym samym zmniejszenie oporu ciała ludzkiego.

2. ELEKTROPATOLOGIA ORGANIZMU CZŁOWIEKA W ŚRODOWISKU GÓRNICZYM

Podatność organizmu człowieka na skutki działania prądu elektrycznego jest zależna od wartości natężenia prądu rażenia uwarunkowanego oporem ciała człowieka podczas rażenia. Organizm ludzki różnie reaguje na zmiany spowodowane klimatem środowiska górniczego. Zmiany te uwidaczniają się w funkcjonowaniu organów ludzkich, psychice oraz zmianach parametrów fizycznych ciała. Duży wpływ mają czynniki antropogenne, konstytucjonalne oraz skłonności patologiczne. Skóra stanowiąca powierzchniową warstwę organizmu człowieka odgrywa ważną rolę w procesie termoregulacji, chroniąc człowieka przed szkodliwym wpływem klimatu. Parowanie wody wydzielanej z potem ochładza ustrój powodując stratę nadmiaru ciepła. W warunkach normalnych człowiek wydziela do jednego litra potu na dobę. Przy ciężkiej pracy dołowej w ciepłym klimacie dołowym organizm może wydzielać ponad 1 litr potu na godzinę [5]. Pot zawiera 98% wody oraz chlorek sodowy, którego zawartość jest zmienna i może przekraczać 10 g na dobę. Intensywne pocenie się w środowisku górniczym powoduje nasączenie zrogowaciałej warstwy naskórka elektrolitami zawartymi w pocie i zmianę oporu skóry. Odparowanie wody z potu powoduje zasolenie naskórka zmniejszając rezystancję przejścia podczas rażenia.

Cechą charakterystyczną klimatu dołowego jest podwyższona temperatura występująca w przodkach robót przygotowawczych przewietrzanych wentylacją odrębną. Podwyższona temperatura środowiska górniczego powoduje rozszerzenie naczyń w skórze. Rozszerzenie naczyń odbywa się przy pobudzeniu układu przywspółczulnego. Rozszerzone naczynia oraz wzrost ciśnienia krwi powodują zmniejszenie oporu ciała oraz obniżenie progu wyczuwalności prądu (percepcji). Wzrost dwutlenku węgla w atmosferze dołowej ponad 1% zwiększa dwukrotnie czułość prądową organizmu [13]. Przy obniżonej temperaturze otoczenia już poniżej 12^0C następuje skurcz naczyń. Skurcz tętniczek powoduje zablokowanie krwinek w naczyniach włoskowatych [10]. Utrata przez te krwinki tlenu powoduje blednienie skóry i wzrost oporu ciała. W takich warunkach, występujących w szybach i na podszybiach, organizm jest bardziej odporny na skutki rażenia prądem. Pył węglowy zawarty w powietrzu węglowym szczególnie w wyrobiskach wentylacyjnych zużytego powietrza osadza się na wilgotnej spoconej skórze tworząc powierzchnię ciała o małej rezystancji przejścia. Większość górników zatrudnionych w przodkach oddziałów wydobywczych i robót przygotowawczych posiada naskórek na poszyciu rąk grubszy i twardszy niż ludzie pracujący w innych zawodach. Wpływ środowiska górniczego na organizm ludzki jest tak silny, że opór ciała w warunkach przodkowych jest mniejszy od oporu w warunkach normalnych.

Ciało ludzkie jako element obwodu elektrycznego nie stanowi przewodnika jednorodnego, lecz ma charakter przewodnika anizotropowego. Wpływają na to czynniki biofizyczne. Wartość impedancji ciała człowieka warunkuje rezystancja przejścia, impedancja skóry, rezystancja organów wewnętrznych organizmu. Impedancja organizmu posiada charakter rezystancyjno-pojemnościowy. Kąt przesunięcia fazowego jest zmienny i zawiera się od 18^0 do 48^0 [3]. Reaktancyjny charakter ciała wyjaśnia zmiana wartości impedancji ciała przy pomiarze prądem zmiennym od rezystancji przy pomiarze prądem stałym. Impedancja skóry zmienia się pod wpływem czynników zewnętrznych. Według badań [17] skóra mokra obniża opór o 40%, zaś spocona i zasolona o 60%. W miejscu styku naskórka z elektrodą powstaje naturalne zawilgocenie. Jest tzw. odruch skórno-galwaniczny. Bogate w elektrolity środowisko wewnątrz organizmu posiada bardzo małą rezystancję w porównaniu z oporem skóry. Organy wewnętrzne organizmu człowieka posiadają charakter czysto rezystancyjny w odróżnieniu od rezystancyjno-pojemnościowego charakteru naskórka. Badania austriackie przeprowadzone przez Biegelmeiera [1] wykazały, że rezystancja wewnętrzna ciała wynosi od 780 Ω do

110 Ω. Natomiast impedancja ciała z naskórkiem wynosi 3500 Ω do 1400 Ω . Pomiary te wykonano napięciem 25V na drodze ręka-ręka.

Szczególną własnością tkanek żywych jest nieliniowo zmieniająca się rezystancja ze wzrostem napięcia. Przy wyższym napięciu i czasie rażenia wzrasta nagrzanie w miejscu przejścia prądu, a skóra poci się obniżając swój opór. W oparciu o liczne badania Międzynarodowa Komisja Elektrotechniki IEC w raporcie 479-1 [18] określa zakres zmian impedancji ciała od napięcia dla różnych kwantyli prawdopodobieństwa.

Istnieją u ludzi stany patologiczne, które zmieniają ich podatność na działanie prądu przez zmiany ich oporu ciała. Niedobór witaminy A w organizmie powoduje wysychanie naskórka i tworzenie się grubej warstwy zrogowaciałej skóry oraz wzrost jej oporu [10]. Nadczynność tarczycy powoduje obniżenie oporu skóry. Natomiast niedoczynność tarczycy powoduje podniesienie oporu ciała w miejscu, gdzie skóra jest sucha i chłodna [10]. Również przebyta gruźlica zwiększa opór ciała. Istnieją na ciele ludzkim powierzchnie o dużej wrażliwości i czułości prądowej. Są to: skroń, szyja, przedramię, plecy [7]. Z uwagi na pracę ludzi w przodkach bez odzieży istnieje duże prawdopodobieństwo, że te miejsca ciała staną się miejscami dotyku napięcia rażenia.

3. DROGA PRZEPŁYWU PRĄDU RAŻENIA W CIELE POSZKODOWANEGO

Droga rażenia ma istotny wpływ na wartość impedancji ciała, a tym samym na wartość prądu rażenia. Płynący podczas rażenia prąd "szuka" sobie drogi w organizmie o najmniejszej impedancji wytwarzając, zależnie od drogi rażenia, różne wartości gradientów napięcia w sercu. Skutki rażenia zależą w dużym stopniu od tego, czy na drodze przepływu prądu znajdują się ważne dla życia organy jak: serce, mózg i inne. Analizując zagrożenia prądem na podstawie zaistniałych wypadków na dole kopalni, można dokonać podziału na cztery typowe drogi przepływu prądu rażenia przez ciało poszkodowanego.

Typ A Ręka-ręka

Typ B Ręka-nogi

Typ C Ręka-plecy
Ręka-tułów
Ręka-ramię drugiej ręki.
Typ D Od dotyku przewodu jezdnego trakcji dołowej.

Wypadki typu C dotyczą głównie elektromonterów pracujących na dole bez koszul roboczych przy niewłaściwym zabezpieczeniu stanu wyłączenia napięcia, np. podczas wymiany listwy stykowej w ognioszczelnym wyłączniku.

Wypadki porażeń od przewodu jezdnego trakcji dołowej o napięciu stałym 250V występują na drodze rażenia: ręka-szyja, ramię-nogi, plecy-brzuch, szyja-nogi. Dla drogi rażenia typu B i D, gdzie przepływ prądu rażenia jest do nóg poszkodowanego, przyjąć należy, że poszkodowany stoi na spągu w typowych górniczych butach roboczych o określonej rezystancji. Na wartość prądu rażenia wpływa impedancja ciała oraz rezystancja obuwia. Wartość rezystancji obuwia roboczego jest różna i zależy od ich zużycia i stanu. Według przeprowadzonych badań [7] wartość rezystancji obuwia po trzech miesiącach noszenia na dole kopalni obniża się prawie do zera. Dla rozważań ochrony przeciwpożarowej w typie drogi rażenia B i D rezystancję obuwia przyjmować należy równą zero. Dla poszczególnych dróg rażenia wypadkowość zostala określona metodami statystycznymi na podstawie wypadków zaistniałych w górnictwie [8] i podana w tabeli 1.

Tabela 1

Wartość współczynnika transformacji oraz wypadkowości w przyjętych typach dróg rażenia

Typ drogi	Droga rażenia	Współ.transforma.	Wypadkowość
A	Ręka-ręka	6	24,6%
B	Ręka-nogi	10	37,5%
C	Ręka-plecy	9	18,3%
D	Trakcja	9	19,2%

4. METODA BADAŃ OPORU CIAŁA W ŚRODOWISKU DOŁOWYM

Większość badań oporu ciała człowieka przeprowadzonych w różnych okresach i przez różnych badaczy było wykonywanych na pomiarowej drodze rażenia: ręka-ręka lub ręka-noga [3]. Utrudnienie w prowadzeniu pomiarów impedancji ciała na dole kopalni stanowi konieczność wykonania pomiarów w taki sposób, aby nie stanowiło to zagrożenia dla zdrowia i życia badanych. Uwzględniając zagrożenia oraz szczególnie trudne warunki klimatyczne i organizacyjne w czynnych wyrobiskach podziemi kopalni, prowadzenie pomiarów impedancji ciała człowieka na drodze pomiarowego rażenia: ręka-ręka lub ręka-noga uważa się za zbyt ryzykowne dla osób badanych. Wobec tego dla badań zmian impedancji ciała człowieka pod wpływem klimatu przyjęto taką standardową drogę pomiarowego rażenia, aby metoda była możliwie najbezpieczniejsza i uwzględniała zjawiska klimatyczne panujące na dole. Jako pomiarową drogę standardowego rażenia przyjęto odcinek od opuszka palca środkowego do opuszka kciuka ręki lewej lub prawej. Wartość impedancji standardowej Z^* zmierzono metodą techniczną dociskając do miedzianej elektrody płaskiej wewnętrznymi powierzchniami, poniżej opuszka palca środkowego oraz kciuka. Powierzchnia dotyku palca do elektrody wynosiła 330 mm^2 przy sile docisku 6 N.

W celu wyznaczenia rzeczywistej impedancji ciała wprowadzono współczynnik transformacji drogi rażenia ξ przeliczający impedancję standardową Z^* do impedancji ciała Z_T dla typowych dróg rażenia spotykanych w górnictwie [8].

$$\xi = \frac{Z^*}{Z_T} \tag{1}$$

Wartość współczynników transformacji ξ impedancji standardowej ciała człowieka do impedancji ciała w danym typie drogi rażenia określona została metodami empirycznymi [8] i przedstawiona w tabeli 1.

Wartość współczynnika transformacji ξ została zweryfikowana metodami statystyki matematycznej z wynikiem pozytywnym [8]. Przeprowadzono test istotności oraz test λ-Kołmogorowa, a wyniki porównano z wartościami podanymi przez międzynarodową normę IEC [17]. Przeprowadzone przez Biegelmeiera [4] badania zmian impedancji ciała czło-

wieka zależnie od napięcia rażenia i powierzchni dotyku z elektrodą dowodzą, że przy napięciu powyżej 220 V pole powierzchni dotyku nie odgrywa większej roli. Z analiz wypadków porażeń na dole kopalni i własnej praktyki dołowej autora można ustalić, że zazwyczaj powierzchnia dotyku przy porażeniu jest mniejsza niż 400 mm^2, stąd wniosek, że przyjęta do badań powierzchnia standardowa dotyku odpowiada najbardziej prawdopodobnej powierzchni dotyku podczas faktycznych porażeń. Również przyjąć należy czas rażenia dla wypadków porażeń na dole kopalni dłuższy niż 0,1 s. Według opracowań Kupfera i Teresiaka [15], gdy czas rażenia jest dłuższy niż 0,1 s, można pominąć zależność impedancji ciała od czasu rażenia.

5. OKREŚLENIE WIELKOŚCI PANUJĄCEGO KLIMATU NA DOLE KOPALNI

Do określenia warunków klimatycznych, czyli intensywności chłodzenia ciała człowieka pod wpływem temperatury, wilgotności i prędkości powietrza, służy katatermometr. Katatermometr jest termometrem alkoholowym o rozszerzonej u góry rurce kapilarnej z oznaczonymi na kapilarze temperaturami 350^0C i 38^0C. Przed wykonaniem pomiaru katatermometr podgrzewa się tak, aby górne rozszerzenie kapilary wypełniło się alkoholem do 1/3 objętości. Następnie zawiesza się katatermometr w miejscu mierzonego klimatu obserwując jego ochładzanie i mierząc jednocześnie czas opadania słupa alkoholu pomiędzy zaznaczonymi na podziałce temperaturami 38^0C i 35^0C. Średnia temperatura katatermometru wynosi $36,5^0C$, co odpowiada normalnej temperaturze ciała człowieka. Wielkość klimatu K jest odwrotnie proporcjonalna do mierzonego czasu t, a wprost proporcjonalna do stałej katatermometru. Stała katatermometru F podawana jest na przyrządzie w [kJ/m^2].

$$K = \frac{F}{t} \qquad (2)$$

Jednostką jest katastopień (^0K) $1^0K = 1W/1m2$.

W górnictwie stosuje się pomiary katatermometrem wilgotnym. Dla wykonania pomiarów katastopni wilgotnych dolne naczynie katatermometru owija się wilgotnym muślinem. Frycz [5] podaje, że największy komfort pracy jest przy 17 katastopniach wilgotnych.

6. WARUNKI WYKONYWANIA POMIARÓW IMPEDANCJI CIAŁA CZŁOWIEKA NA DOLE KOPALNI

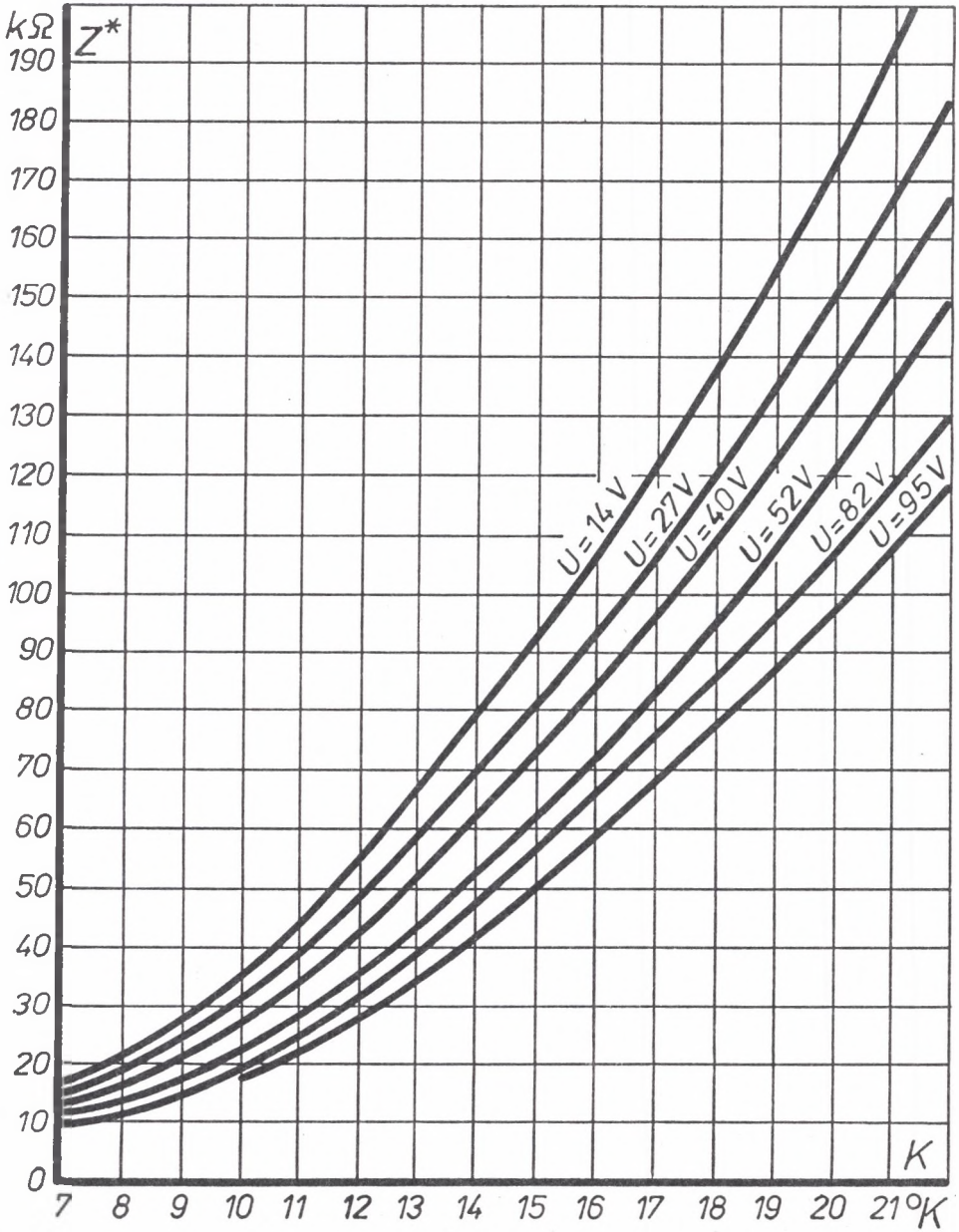
W celu wyznaczenia zależności zmian oporu ciała człowieka zależnie od zmian napięcia rażenia i klimatu środowiska przeprowadzono pomiary impedancji w różnych warunkach. Pomiary wykonano na standardowej drodze rażenia dociskając opuszkiem palca środkowego i opuszkiem kciuka tej samej ręki do miedzianych elektrod płaskich. Osobami poddanymi badaniom impedancji ciała byli elektrycy dołowi w wieku od 29 do 37 lat. Pomiary wykonano w miejscach o różnym klimacie mierzonym katatermometrem wilgotnym w zakresie zmian klimatu od 8 do 24 katastopni. Miejscami pomiaru były podszybia, warsztaty i komory dołowe, drogi transportowe oraz wyrobiska przodkowe oddziałów robót górniczych z wentylacją odrębną. Na podszybiach szybów wdechowych o przepływie dużej ilości powietrza pomiary wykonano porą zimową dla otrzymania klimatu zimnego powyżej 20 katastopni. Natomiast pomiary w klimacie gorącym o małej liczbie katastopni wykonywano w przodkach przewietrzanych wentylacją odrębną. Pomiary poprzedzał 20-minutowy okres aklimatyzacji w klimacie badanego środowiska. Badane osoby poddane były działaniu pomiarowego napięcia rażenia zmiennego o częstotliwości 50 Hz, ze specjalnie wykonanego zasilacza transformatorowego o napięciach 14V, 27V, 40V, 52V, 82V, 95V. Nie przeprowadzono pomiarów oporu dla pomiarowego napięcia rażenia w klimacie określonym: 7, 8, 9, 10 katastopni wilgotnych, gdyż przebieg badań był bardzo bolesny dla badanych osób.

7. WYZNACZENIE FUNKCJI EMPIRYCZNEJ IMPEDANCJI STANDARDOWEJ Z*=f(U,K)

Opis matematyczny zmian oporu ciała człowieka w funkcji napięcia rażenia i panującego klimatu należy rozpatrywać w kategoriach probabilistycznych. Oznacza to, że mierzone wartości impedancji są wartościami zaobserwowanymi zmiennych losowych. Rozpatrując związek pomiędzy oporem ciała człowieka a czynnikami, które jego wartość kształtują, stwierdzić należy, że gdyby możliwe było uwzględnienie wszystkich czynników kształtujących wartość oporu, to rozpatrywany związek nie byłby typu stochastycznego, lecz przekształciłby się w postać matematycznego związku funkcyjnego. Jest to jednak niemożliwe ze względu na to, że nie wszystkie czynniki kształtujące opór ciała są znane, a z tych, które są znane, nie wszystkie są mierzalne. Spośród wielu czynników mierzalnych ze względu na złożność zjawisk fizjologicznych nie można określić ich wpływu na wielkość oporu. Ponieważ zmienne niezależne klimatu K i napięcia U ze względów fizycznych nie spełniają stochastycznej zależności, to uważać należy, że są niezależne korelacyjnie. Można jedynie rozpatrywać związek korelacyjny pomiędzy napięciem rażenia czy też klimatem wartością średnią lub medialną oporu ciała.

Dla określenia zmian impedancji ciała człowieka Z*=f(U,K) w środowisku górniczym wykonano 688 pomiarów wartości impedancji standardowej ciała człowieka przy zdeterminowanym klimacie i napięciu rażenia. Otrzymane wyniki badań pogrupowano według klimatu w katastopniach wyznaczając ich wartość średnią, medianę oraz odchylenie standardowe. Dla wyznaczenia tych parametrów oporu standardowego korzystano z programu komputerowego MATHESS-STATISTIK, a wyniki przedstawia tabela 2.

Do dalszej analizy wartości modelu oporu ciała człowieka przyjęto wartości medialne wyznaczonej impedancji. Uzasadnione to jest postulatem Teresiaka [16], ponieważ impedancja ciała podlega rozkładowi niesymetrycznemu o skośności dodatniej większej niż skośność rozkładu prądu odczuwania. Posługiwanie się medianą zamiast średnią do określenia oporu ciała jest bardziej korzystne, ponieważ nie reaguje ona tak mocno na błędy i zakłócenia występujące w empirycznych rozkładach [16]. Zależność wartości medialnej impedancji od zmian klimatu pokazano na wykresach rys.1. Dla dokładnego określenia zależności między zależną wartością impedancji a niezależną wartością napięcia i klimatu po-



Rys. 1. Przebieg funkcji impedancji standardowej Z* = f(K)

Tabela 2

Wyniki pomiarów impedancji standardowej ciała człowieka

U	14 V			27 V			40 V			52 V			82 V			95 V			n
K	$\bar{Z}$	Zm	s	$\bar{Z}$	Zm	s	$\bar{Z}$	Zm	s	$\bar{Z}$	Zm	s	$\bar{Z}$	Zm	s	$\bar{Z}$	Zm	s	
7	21	22	2	20	19	2	16	15	3	14	13	2	11	10	2				6
8	22	23	2	19	19	1	17	17	1	14	14	1	12	12	1				8
9	30	32	5	26	27	4	21	20	4	16	16	1	13	14	1				7
10	37	36	9	33	33	8	26	30	8	23	25	8	17	17	6				17
11	47	46	9	40	36	8	35	36	9	28	27	6	23	21	6	20	18	4	17
12	54	50	7	49	42	6	41	39	8	34	31	6	28	26	6	23	21	5	10
13	64	65	10	59	52	9	51	45	8	46	38	8	38	32	9	30	27	8	8
14	83	82	5	72	68	7	66	66	4	56	56	5	48	54	6	40	41	5	11
15	92	92	9	86	90	9	77	77	8	64	67	7	57	59	5	46	48	6	5
16	111	115	8	100	105	7	92	100	11	76	79	5	68	69	2	54	55	1	5
17	128	128	8	115	117	9	102	104	8	85	87	9	76	77	7	62	62	1	4
18	140	138	9	133	120	8	118	110	7	101	95	8	87	87	6	75	71	8	4
19	168	168	12	155	158	12	132	138	10	117	112	10	101	98	9	85	86	8	4
20	185	179	13	171	168	11	162	163	11	133	133	10	112	113	10	94	96	9	4
21	199	204	11	189	195	10	179	180	9	158	151	9	130	130	9	107	105	8	4
22	233	220	14	220	200	13	200	185	12	178	170	8	150	150	9	130	140	11	4
23	347	362	14	310	320	12	300	312	13	268	280	12	230	238	11	200	210	11	3

Z - wartość średnia impedancji kΩ

Zm - wartość medialna impedancji kΩ

s - odchylenie standardowe

n - liczba badanych osób

służyć się można funkcją regresji jako aproksymacją deterministyczną. Korzystając z wyników wykonywanych pomiarów impedancji standardowej ciała człowieka badane zjawisko ujęto w sposób analityczny. W tym celu, posługując się funkcją regresji, poddano opracowaniu usystematyzowane wyniki pomiarów według klimatu i napięcia przedstawione w tabeli 2. Dla ustalonej wartości klimatu wyznaczono metodą funkcji regresji współczynniki równań wykorzystując wartości medialne impedancji standardowej ciała człowieka. Posługując się programem komputerowym MATHE-ASS-STATISTIK wyznaczono współ-

czynniki równań $Z^*=f(U)$ kilku typowych funkcji algebraicznych. Wstępne oszacowanie przydatności różnych typów równań algebraicznych, oceniając ich odchylenia standardowe oraz graficzny przebieg funkcji względem empirycznych współrzędnych pozwoliło wyodrębnić do dalszej analizy dwa typy równań:

$$Z^*=a\,b^U \tag{3}$$

$$Z^*=a\,U^b \tag{4}$$

W trakcie opracowań stwierdzono, że współczynnik "b" równań posiada w obu typach wartość stałą niezależną od zmian klimatu. Natomiast widoczne jest że parametr "a" równań jest zależny od zmian wartości klimatu. Można wobec tego napisać:

$$Z^*=a(K)\,b^U$$

$$Z^*=a(K)\,U^b$$

Postępując podobnie z danymi przedstawionymi w tabeli 2 oraz posługując się funkcją regresji i programem komputerowym wyznaczono współczynniki równań $Z^*=f(K)$ dla zdeterminowanego pomiarowego napięcia rażenia otrzymując równania:

$$Z^*=a(U)\,b^U \tag{5}$$

$$Z^*=a(U)\,K^b \tag{6}$$

Dla wyznaczenia funkcji empirycznej impedancji standardowej ciała człowieka $Z^*=f(U,K)$ zależnie od zmian napięcia rażenia i klimatu środowiska, posłużono się opcją regresji statystycznej programu komputerowego. Opierając się na wynikach badań przeprowadzono regresję współczynnika "a" względem klimatu środowiska zastępując współczynnik a(K) otrzymaną funkcją. Postępując podobnie z danymi wyznaczono regresję współczynnika "a" względem napięcia zastępując współczynnik a(U) otrzymanym równaniem. Otrzymano w ten sposób osiem równań $Z^*=f(U,K)$, które podano w tabeli 3.

Dla właściwego wyboru wzoru z tabeli 3, najdokładniej opisującego badane zjawisko, przeprowadzono weryfikację równań $Z^*=f(U,K)$ według zasady najmniejszych kwadratów. Zasada ta żąda, aby parametry najodpowiedniejszego równania były takie, dla których suma kwadratów odchyleń była najmniejsza.

$$\frac{\sum_{i=1}^{n} (Zi^* - Zmi)^2}{n} = \min \tag{7}$$

gdzie:

Z* - impedancja standardowa wyznaczona ze wzoru w tabeli 3,

Zm - empiryczna warość medialna impedancji standardowej z tabeli 2,

n - liczba obserwacji w metodzie.

Tabela 3

Porównanie empirycznych wzorów dla Z*=f(U,K) otrzymanych funkcją regresji

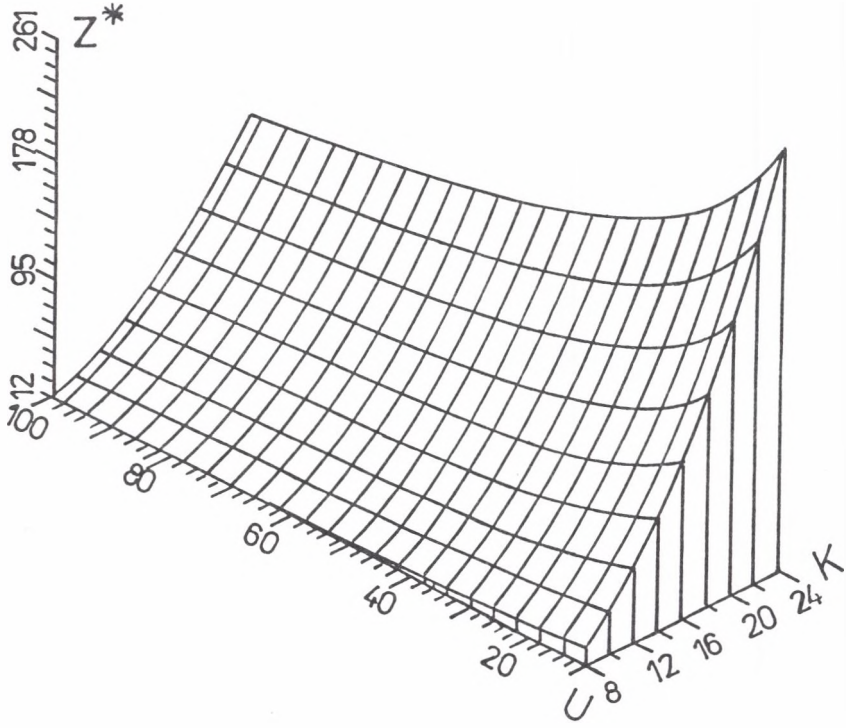
Lp.	Typ równania	Wzór	$\frac{\Sigma(Zm-Z^0)^2}{n}$
1	$Z^0 = a(K)* b^U$	$Z^0 = 0,28 \cdot K^{2.8} * 0,99^U$	94,2
2		$Z^0 = 7,8 \cdot 1,1^K * 0,99^U$	216,4
3	$Z^0 = a(K)* U^b$	$Z^0 = 0,45 \cdot K^{2,3} * U^{-0.3}$	76,6
4		$Z^0 = 19,1 \cdot 1,1^K * U^{-0,3}$	172,3
5	$Z^0 = a(U)* K^b$	$Z^0 = 7,3 \cdot K^{2,4} * U^{-1,2}$	92,1
6		$Z^0 = 0,31 \cdot K^{2,4} * 0,97^U$	104,2
7	$Z^0 = a(U)* b^K$	$Z^0 = 7,9 \cdot 1,1^K * 0,98^U$	148,7
8		$Z^0 = 31,5 \cdot 1,1^K * U^{-0,5}$	196,5

Po dokonaniu weryfikacji dla wszystkich typów równań z tabeli 3, w zakresie stosowanego w badaniach napięcia i klimatu, porównano z empirycznymi wartościami mediany impedancji (z tabeli 2) wyznaczając sumę kwadratów odchyleń. Otrzymaną sumę kwadratów odchyleń podzieloną przez liczbę obserwacji (n=92) przedstawiono w tabeli 3. Kierując się zasadą najmniejszych kwadratów można wysunąć wniosek, że równanie nr 3 z tabeli 3 najdokładniej ujmuje badane zjawisko.

$$Z^* = 0.45 * K^{2.3} * U^{-0.3} \qquad (8)$$

Porównanie wyliczonej wartości impedancji według tego wzoru z wartościami empirycznymi oraz ich kwadraty odchyleń przedstawia tabela 4 .

Przebieg funkcji impedancji Z*=f(U,K) pokazano na rysunku 2.



Rys.2. Funkcja impedancji standardowej ciała człowieka Z* = f(U,K)

Tabela 4

Porównanie wartości empirycznych impedancji i standardowej ciała człowieka z wartościami funkcji (8)

U	14 V			27 V			40 V			52 V			82 V			95 V			
K	Zm	Z^0	δ^2	Zm	Z^0	δ^2	Zm	Z^0	δ^2	Zm	Z^0	δ^2	Zm	Z^0	δ^2	Zm	Z^0	δ^2	$\Sigma (Zm-Z^0)^2$
7	22	17	25	19	16	9	15	15	0	13	13	0	10	9	1	0	0	0	35
8	23	21	4	19	18	1	17	16	1	14	14	0	12	12	0	0	0	0	6
9	32	29	9	27	24	9	20	20	0	16	18	4	14	16	4	0	0	0	26
10	36	36	0	33	31	4	30	27	49	25	24	1	17	20	9	0	0	0	63
11	46	40	36	36	37	1	36	33	9	27	28	1	21	25	16	18	23	25	88
12	50	53	9	42	45	9	39	39	0	31	35	16	26	31	25	21	28	49	108
13	65	68	9	52	54	4	45	47	4	38	42	16	32	37	25	27	34	49	107
14	82	81	1	68	66	4	66	57	81	56	53	9	54	46	64	41	42	1	160
15	92	93	1	90	79	121	77	68	81	67	62	25	59	54	25	48	49	1	254
16	115	110	25	105	89	256	100	78	484	79	72	49	69	61	64	55	57	4	892
17	128	127	1	117	108	81	104	91	169	87	82	25	77	71	36	62	65	9	321
18	138	141	9	120	115	25	110	103	49	95	84	121	87	80	49	71	76	25	278
19	168	164	16	148	132	256	138	119	361	112	107	25	98	92	36	86	86	0	694
20	179	181	4	168	149	361	163	142	441	133	119	196	113	107	16	96	96	0	1018
21	204	204	0	195	176	361	180	159	441	151	135	256	130	113	289	105	108	9	1356
22	220	228	64	200	186	256	189	171	324	170	152	324	150	131	361	140	122	324	1653
																			$\Sigma = 7049$

$\delta = Zm - Z$

$$\frac{\Sigma(Zm - Z)^2}{n} = \frac{7049}{92} = 76{,}6$$

8. SPODZIEWANE WARTOŚCI IMPEDANCJI CIAŁA CZŁOWIEKA DLA ZNAMIONOWYCH NAPIĘĆ STOSOWANYCH W GÓRNICTWIE

Wyznaczone wartości impedancji standardowej ciała człowieka nie są przydatne w tej postaci do celów ochrony przeciwporażeniowej. Dla praktycznej przydatności celowe jest wyznaczenie wartości impedancji ciała dla znamionowych napięć stosowanych w sieciach. Również dla rzeczywistej drogi przepływu prądu rażenia przez ciało poszkodowanego nale-

ży uwzględnić współczynnik ξ przeliczający wartość oporu standardowego na wartość oporu dla drogi rażenia przyjętej jako typową w p.3.

Wykorzystując wzór (8) na impedancję standardową ciała człowieka wyznaczyć można wartości dla znamionowych napięć stosowanych w sieciach w różnych warunkach klimatycznych. Wartości te przedstawia tablica 5.

Tablica 5

Wartość impedancji standardowej ciała człowieka dla napięć znamionowych wyznaczone wg wzoru (8)

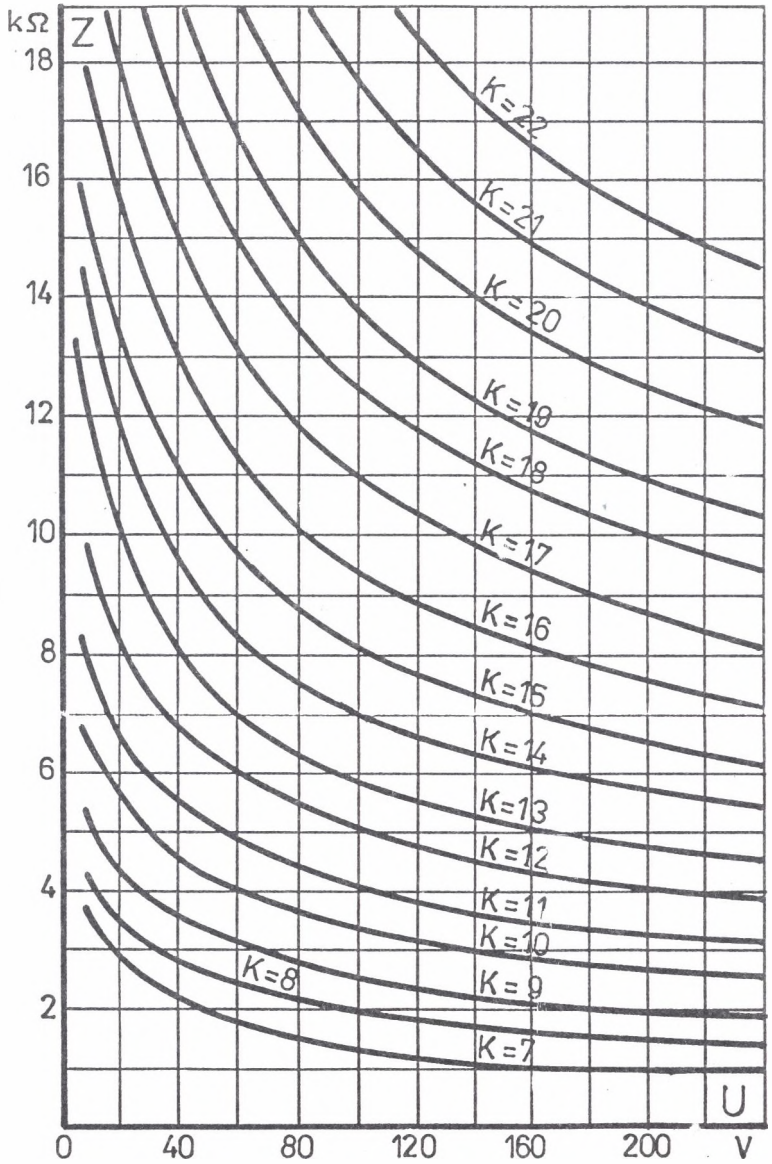
U/K	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
24V	13,7	18,6	24,4	31,2	38,8	47,4	57,0	68,2	79,2	91,9	105	120	136	153	171	191	211	233
42V	11,4	15,5	20,3	25,9	32,2	39,3	47,3	56,6	65,7	76,2	87,7	100	113	127	142	158	175	193
127V	7,9	10,7	14,0	17,9	22,3	27,2	32,7	39,1	45,4	52,7	60,6	[illegible]	78,2	88,0	98,5	109	121	133
220V	6,5	8,9	11,7	14,9	18,5	22,6	27,2	32,6	37,8	43,9	50,4	57,5	65,1	73,3	82,0	91,3	101	111
500V	5,0	6,7	8,8	11,3	14,0	17,2	20,7	24,8	28,8	33,4	38,4	43,7	49,5	55,7	62,4	69,4	76,9	84,8
1000V	3,9	5,4	7,1	9,1	11,2	13,6	16,1	19,6	22,8	26,5	30,4	34,5	39,3	44,2	49,4	55	61,1	67,2
6000V	2,2	2,9	3,9	4,9	6,1	7,5	9,0	10,8	12,5	14,6	16,7	19,1	21,6	24,3	27,2	30,3	33,5	37,0

Dla wyznaczenia wartości spodziewanej impedancji ciała na drodze rażenia przyjętej jako typową należy w wzorze (8) uwzględnić wyznaczony współczynnik transformacji drogi rażenia ξ wg tabeli 1.

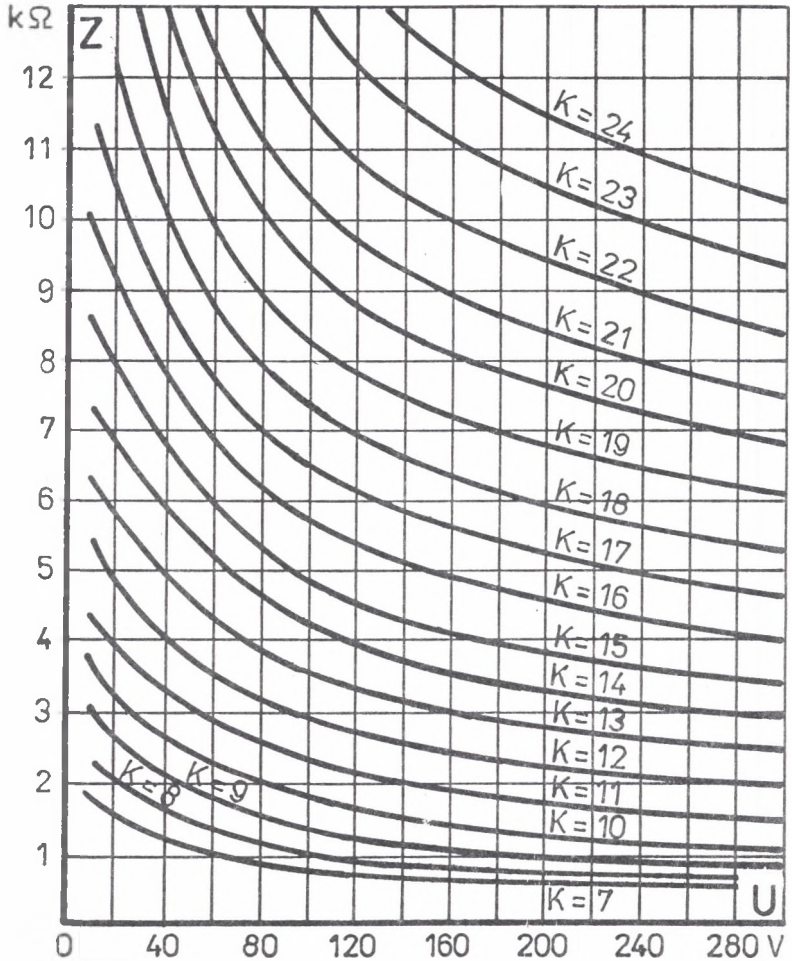
$$Z = \frac{0.45 * K^{2.3}}{\sqrt[3]{U} * \xi} \qquad (9)$$

Wartości impedancji ciała człowieka w przyjętych typach dróg rażenia podano w tabelach 5, 6, 7, oraz pokazano na rysunkach 3, 4

Dla weryfikacji otrzymanych wartości impedancji ciała człowieka dokonano porównań z wynikami podanymi przez innych badaczy. Utrudnieniem w takim porównaniu jest brak informacji o warunkach klimatycznych, w jakich badania prowadzili. Założono więc, że pomiary innych badaczy były wykonywane w pomieszczeniu ciepłym o normalnych warunkach klimatycznych. Takim warunkom klimatycznym można przyporządkować klimat od 10÷13 katastopni. Porównanie wyznaczonych w pracy wartości impedancji ciała człowieka dla klima-



Rys.3. Wartość impedancji ciała człowieka dla różnych warunków klimatycznych (K) na drodze rażenia ręka-ręka



Rys.4. Wartości impedancji ciała człowieka dla różnych warunków klimatycznych (K) na drodze rażenia ręka-nogi

tu K=10 na drodze przepływu prądu rażenia ręka-nogi z wynikami Teresiaka [16], Bigelmeiera oraz IEC[18] i Krasuckiego [13] podaje tabela 8.

Tabela 6

Wartości impedancji ciała dla drogi przepływu prądu rażenia ręka-ręka [kΩ] typ A

U/K	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
24V	2,28	3,10	4,06	5,20	6,46	7,9	9,5	11,3	13,2	15,3	17,5	20,0	22,6	25,5	28,5	31,8	35,1	42,1
42V	1,9	2,58	3,38	4,31	5,36	6,55	7,88	9,43	10,9	12,7	14,6	16,6	18,8	21,1	23,6	26,3	29,1	32,1
127V	1,31	1,78	2,33	2,98	3,71	4,53	5,45	6,51	7,56	8,78	10,1	11,5	13,0	14,6	16,4	18,1	20,1	22,1
220V	1,08	1,48	1,95	2,48	3,08	3,76	4,53	5,43	6,31	7,31	8,4	9,58	10,8	12,2	13,6	15,2	16,8	18,5
500V	0,93	1,11	1,46	1,88	2,33	2,86	3,45	4,13	4,80	5,56	6,42	7,28	8,25	9,25	10,4	11,5	12,7	14,1
1000V	0,65	0,9	1,18	1,51	1,86	2,26	2,73	3,26	3,80	4,41	5,06	5,75	6,55	7,36	8,23	9,12	10,1	11,2
6000V	0,36	0,48	0,65	0,81	1,01	1,25	1,51	1,80	2,08	2,43	2,78	3,18	3,60	4,05	4,53	5,05	5,58	6,16

Tabela 7

Wartości impedancji ciała dla drogi przepływu prądu rażenia ręka-nogi typ B [kΩ]

U/K	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
24V	1,37	1,86	2,44	3,12	3,88	4,74	5,71	6,82	7,92	9,19	10,5	12,0	13,6	15,3	17,1	19,1	21,1	23,3
42V	1,14	1,55	2,03	2,59	3,22	3,93	4,73	5,66	6,57	7,62	8,77	10,0	11,3	12,7	14,2	15,8	17,5	19,3
127V	0,79	1,07	1,4	1,79	2,23	2,72	3,27	3,91	4,54	5,27	6,06	6,91	7,82	8,8	9,85	10,9	12,1	13,3
220V	0,65	0,89	1,17	1,49	1,85	2,26	2,72	3,26	3,78	4,39	5,04	5,75	6,51	7,33	8,2	9,13	10,1	11,1
500V	0,5	0,67	0,88	1,13	1.4	1,72	2,07	2,48	2,88	3,34	3,84	4,37	4,95	5,57	6,24	6,94	7,69	8,48
1000V	0,39	0,54	0,71	0,91	1,12	1,36	1,64	1,96	2,28	2,65	3,04	3,45	3,93	4,42	4,94	5,5	6,1	6,72
6000V	0,22	0,29	0,39	0,49	0,61	0,75	0,91	1,08	1,25	1,46	1,67	1,91	2,16	2,43	2,72	3,03	3,35	3,70

Tabela 8

Wartość impedancji ciała dla drogi przepływu prądu rażenia ręka-plecy-tułów typ C

U/K	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
24V	1,52	2,06	2,71	3,46	4,31	5,26	6,33	7,57	8,80	10,2	11,6	13,3	15,1	17,0	19,0	21,2	23,4	25,8
42V	1,26	1,72	2,25	2,87	3,57	4,36	5,25	6,28	7,30	8,46	9,74	11,1	12,5	14,1	15,1	17,5	19,4	21,4
127V	0,87	1,18	1,51	1,98	2,47	3,02	3,63	4,34	5,04	5,85	6,73	7,67	8,65	9,77	10,9	12,1	13,4	14,7
220V	0,72	0,98	1,30	1,65	2,05	2,51	3,02	3,62	4,21	4,87	5,60	6,38	7,23	8,14	9,10	10,1	11,2	12,3
500V	0,55	0,74	0,97	1,25	1,55	1,91	2,30	2,75	3,20	3,71	4,26	4,85	5,51	6,18	6,93	7,71	8,54	9,42
1000V	0,43	0,60	0,77	1,00	1,24	1,51	1,82	2,17	2,53	2,94	3,37	3,83	4,36	4,91	5,48	6,11	6,76	7,46
6000V	0,24	0,32	0,43	0,54	0,67	0,83	1,02	1,22	1,38	1,62	1,85	2,12	2,40	2,72	3,02	3,36	3,72	4,11

Tabela 9

Porównanie wartości medialnych impedancji ciała człowieka z wynikami badań Teresiaka, Biegelmeiera i Krasuckiego na drodze ręka-nogi

V	Wartość impedancji ciała [Ω]			
	Teresiak	**Biegelmeier oraz IEC**	**Krasucki**	**Gierlotka K=10**
25 V	3382	3250	2370	3073
50 V	3382	2625	1980	2431
75 V	3008	2200	1760	2129
100 V	2426	1875	1600	1934
125 V	2077	1626	1475	1795
220 V	1405	1350	1180	1487
250 V	1292		1100	1420
700 V		1100	680	1011
1000 V		1050		899

9. UWAGI KOŃCOWE

Droga przepływu prądu rażenia przez ciało poszkodowanego ma istotny wpływ na skutki w organizmie wywołane porażeniem. Wielkość natężenia prądu rażenia warunkowana jest głównie impedancją skóry.

Zależność zmian impedancji ciała od napięcia rażenia jest w zasadzie rozeznana przez raport 479-1 Międzynarodowego Komitetu Elektrotechniki IEC [18]. Opracowanie to dotyczy porażeń zaistniałych w normalnych warunkach klimatycznych. Korzystanie z wyników tego opracowania przy prowadzeniu profilaktyki przeciwporażeniowej w specyficznych warunkach klimatycznych prowadzi do wyników obciążonych błędem i dlatego jest niepoprawne. Dotyczy to szczególnie porażeń w podziemiach kopalń. Wartość impedancji ciała zależy od zmian parametrów elektrycznych skóry wywołanych wpływem klimatu środowiska. Przeprowadzone badania pokazują, jak zależna jest wartość impedancji ciała od czynnika klimatu. Warunki klimatyczne, jak też czynniki psychotropowe oraz procesy fizjologiczne, związane z wysiłkiem

pracy fizycznej, wywołują w skórze ludzkiej zwiększone wydalanie potu. Można zatem stwierdzić, że wartość impedancji ciała człowieka zależy głównie od stopnia napełnienia potem kanalików potowych.

LITERATURA

1. Biegelmeier G.: Neue Erkenntnisse der Elektropathologie. E und J, 1989 H.1.
2. Biegelmeier G.: Odziaływanie prądu elektrycznego na człowieka. VII Konferencja Ochrony Przeciwporażeniowej w Urządzeniach Elektrycznych, Łódź 1989.
3. Biegelmeier G., Mikisch J.: Uber den Einfluβ der Haut auf die Körperimpedanz des Menschen. E und M. 1980 H9.
4. Biegelmeier G., Bachl H., Mörx A., Rabitsch G.: Neue Messungen des Körperwiderstands lebender Menschen mit Wechselstrom 50 Hz sowie mit höheren Frequenzen und mit Gleichstrom. Elektrotechnik und Informationstechnik 3/1991.
5. Frycz A.: Klimatyzacja kopalń. Śląsk 1984.
6. Gierlotka S., Froch E.: Przyczyny i skutki porażeń prądem elektrycznym w podziemiu kopalń. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa 1989/1.
7. Gierlotka S.: Podatność organizmu ludzkiego na skutki działania prądu elektrycznego w środowisku górniczym. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa nr 76. 1993/4.
8. Gierlotka S.: Pomiary impedancji ciała ludzkiego dla określania zagrożenia porażeniowego w środowisku górniczym.Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Górnictwo 218.
9. Gierlotka S.: Zagrożenie porażenia prądem elektrycznym na dole kopalni od urządzeń prądu stałego. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa 1994/3.
10. Gołąb B., Traczyk W.: Anatomia i fizjologia człowieka. PZWL 1986.
11. Jabłoński W.: Działanie prądu elektrycznego na organizm ludzki. Gospodarka Paliwami i Energią 1986/6.
12. Kieback D.: Ergebnisse von Forschungsarbeiten und statistischen Untersuchungen des Instituts zur Erforshung elektrischer Unfalle. E und I. 1989 H1.
13. Krasucki F.: Zagrożenia elektryczne w górnictwie. Śląsk 1984.

14. Krasucki F.: Wybrane zagadnienia oceny wypadków porażeń elektrycznych w kopalniach węgla kamiennego. IX Międzynarodowa Konferencja Ochrony Przeciwporażeniowej w Urz. Elektr. Łódź 1993.
15. Kupfer J., Teresiak Z.: Wartości graniczne wielkości warunkujących fizjologiczne zagrożenie porażeniem elektrycznym. Przegląd El.1986/11.
16. Korniluk W.: Probabilistyczne metody oceny skuteczności ochrony przeciwporażeniowej w urządzeniach elektrycznych niskiego napięcia. Rozprawy naukowe Politechniki Białostockiej nr 17/ 1993.
17. Manojłow W.: Osnowy biezopasnosti. Leningrad 1991.
18. Effects of current passing through the human body. IEC Report 1984 r. Publication 479-1.

Recenzent: Prof.zw.dr hab.inż. Zdzisław Teresiak

Wpłynęło do Redakcji 14 września 1994 r.

Abstract

This article ttreats of influence mining industry climat to electropathology of human body. On the base of described electric shock accidents was defined in the four cases of current path: hand-hand, hand-legs, hand-shoulders and shock from electrie traction underground, there id delimited standardhuman body impedance between 3-rd finger tip and end thumb tip of the same hand. On the statistic method was defined the faktor ξ of conversion of standard impedence to human body impedance in the particular types of current path. It was experimented in diffrent circumstances of mining industry climat measurements of standard human body impedence with determinated climat and voltage. The value of climat was quality by katathermometr. By means of regressire function and the smallest square function and with computer program was defined dependence of analytic standard impedance to climat and voltage changes. In tables: 5,6,7 describe values of human body impedance for thypic electric-shock paths. The table 8 compared obtained values of human body impedance with results from another elaborations.