

Stefan GIERLOTKA

Kopalnia Węgla Kamiennego "Wujek" Katowice

POMIARY IMPEDANCJI I REZYSTANCJI CIAŁA LUDZKIEGO W CELU OKREŚLENIA ZAGROŻENIA PORĄŻENIOWEGO W ŚRODOWISKU GÓRNICZYM

Streszczenie. Zaproponowano nową metodę pomiaru impedancji i rezystancji ciała ludzkiego przeznaczoną do badań w sposób bezpieczny zmian oporności ciała pod wpływem klimatu dołowego. Przeprowadzono weryfikację metody sposobami statystyki matematycznej i porównano z wynikami innych opracowań. Określono na podstawie zaistniałych wypadków na dole cztery typowe drogi przepływu prądu przez ciało poszkodowanego. Omówiono niektóre zagadnienia związane z wpływem klimatu dołowego na skutki działania prądu rażenia.

MEASUREMENT OF HUMAN BODY IMPEDANCE AND RESISTANCE FOR THE DETERMINATION OF ELECTRIC SHOCK HAZARDS IN A MINING ENVIRONMENT

Summary. A new method of human body impedance and resistance measurement for the purpose of safe study of human body resistance-changing under the influence of mining climate has been prospected. A verification of the method by mathematic statistical means has carried out way and it was compared to other elaboration results. Four typical current paths associated with the influence underground climate on the effect of shock current operation have been discussed.

ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛНОГО И АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ТЕЛА ДЛЯ ПОРАЖЕНИЯ ЗЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ

Резюме. Предложен новый метод измерения полного и активного сопротивления человеческого тела предназначенных для исследования безопасном способом изменений сопротивления тела под влиянием окружающей среды в подземных выработках. Верификация метода средствами математической статистики, сделано сравнение с результатами других работ. На основании анализа несчастных случаев происшедших в подземных выработках, установлено четыре типичных пути прохождения тока поражения через тело пострадавшего. Обсуждены некоторые проблемы, связанные с влиянием окружающей среды подземных выработок на последствия воздействия тока поражения.

1. WPLYW ŚRODOWISKA GÓRNICZEGO NA ELEKTROPATOLOGIĘ ORGANIZMU LUDZKIEGO

Podatność organizmu ludzkiego na skutki działania prądu elektrycznego jest zależna od wielkości przepływającego prądu rażenia w wyniku oddziaływania napięcia. Wielkość prądu przepływająca przez ciało warunkuje impedancja ciała w chwili rażenia. Organizm ludzki różnie reaguje na zmiany spowodowane klimatem środowiska górniczego. Zmiany te uwidaczniają się w funkcjonowaniu organów ludzkich, psychice, jak też zmianie parametrów fizycznych ciała. Duży wpływ odgrywają czynniki antropogenne, konstytucjonalne oraz skłonności patologiczne. Skóra stanowiąca powierzchnię warstwę organizmu ludzkiego odgrywa ważną funkcję w procesie termoregulacji chroniąc go przed szkodliwym wpływem klimatu dołowego. Duża wilgotność względna, zapylenie i podwyższona temperatura powietrza w wyrobiskach pogarszają warunki oddawania ciepła z organizmu do otoczenia. Parowanie wody wydzielanej z potem ochładza ustrój tracąc nadmiar ciepła. Pot zawiera: 98% wody, chlorek sodowy, cholesterol, mocznik, ślady białek. Odczyn pH potu zależy od ilości kwasu mlekowego i zawiera się od 4 do 8 pH.

Zwiększenie intensywności pocenia się w środowisku górniczym powoduje nasycenie zrogowaciałej warstwy naskórka elektrolitami zawartymi w pocie, co powoduje zmniejszenie rezystancji skóry. Również odparowanie wody z potu powoduje zasolenie naskórka zmniejszając rezystancję przejścia podczas porażenia.

Podwyższona temperatura środowiska powoduje rozszerzenie naczyń w skórze. Rozszerzenie naczyń odbywa się przez pobudzenie układu przywspółczulnego. Rozszerzenie naczyń oraz wzrost ciśnienia krwi powoduje obniżenie rezystancji ciała i obniżenie progu percepcji - wyczuwalności prądu. Wzrost dwutlenku węgla w atmosferze dołowej zwiększa czułość prądową organizmu [10].

Przy obniżeniu temperatury otoczenia już poniżej 12°C następuje skurcz naczyń. Skurcz tętniczek powoduje zablokowanie krwinek w naczyniach włoskowatych. Utrata przez te krwinki tlenu powoduje blednienie skóry [6]. W takich warunkach impedancja ciała wzrasta.

Większość górników zatrudnionych na przodkach oddziałów wydobywczych i robót przygotowawczych posiada naskórek na podszyciu rąk grubszy i twardszy niż ludzie w innych zawodach. Wpływ środowiska dołowego jest tak silny na organizm ludzki, że impedancja ciała w warunkach przodkowych jest mniejsza od impedancji w warunkach normalnych.

2. DROGA PRZEPIYU PRĄDU RAŻENIA

Prąd rażeniowy płynąc w ciele ludzkim szuka sobie drogi 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 rażeniowego znajdują się ważne dla życia organy, jak serce, mózg i inne.

Ustalone przez Sama współczynniki prądu serca K_s umożliwiają oszacowane zagrożenia życia człowieka, występującego przy takim samym napięciu i różnych drogach rażenia [7] [14]. Współczynnik ten został opracowany w czasie aproksymacji gęstości prądu płynącego przez serce dla różnych dróg prądu w stosunku do gęstości tego prądu przy przepływie na drodze lewa ręka obie nogi $K_s = 1$.

Uwzględniając przedstawione w tablicy 1 wartości tych współczynników, można stwierdzić, że przy napięciu rażeniowym 220V i przy czasach krótszych niż 100 ms należy się liczyć ze zjawiskiem migotania komór sercowych tylko w przypadku drogi rażenia dłonie-klatka piersiowa [12].

Tablica 1

Współczynnik prądu serca K_s (wg Sama) [14]

Droga prądu rażenia	K_s
Lewa ręka - stopy	1,00
Obie ręce - obie stopy	1,00
Lewa ręka - prawa ręka	0,40
Prawa ręka - stopa (obie stopy)	0,80
Plecy - prawa ręka	0,30
Plecy - lewa ręka	0,70
Klatka piersiowa - prawa ręka	1,30
Klatka piersiowa - lewa ręka	1,50
Siedzenie - lewa ręka	0,70

Droga rażenia ma wpływ na wartość impedancji ciała, a tym samym na wartość prądu rażenia. Duże znaczenie odgrywa sposób, w jaki ciało ludzkie zostało włączone w obwód elektryczny.

Instytut Badań Wypadków Elektrycznych w Kolonii (Institut zur Erforschung elektrischer Unfälle) przeanalizował 56 tys. porażen prądem i ustalił, że najczęściej podczas rażenia następuje przepływ prądu na drodze ręka-ręka 67,5% [8].

Rozdział procentowy wypadków na poszczególne drogi rażenia wg [8] przedstawiono w tablicy 2. Częstość występowania zgonów wśród porażen wynosi 4,5%. Wypadki śmiertelne w górnictwie podziemnym stanowią 13.2%.

Tablica 2

Wypadkowość w poszczególnych drogach rażenia wg [8]

Droga przepływu prądu rażenia	Wypadki ogółem w %	Wypadki śmiertelne w %
Ręka - ręka	67,50	44,00
Ręka - noga	6,90	10,10
Ręka - nogi	6,30	10,50
Ręce - nogi	2,30	9,50
Inna wzdłuż i w poprzek ciała	1,60	18,60
Inna omijająca serce	15,40	7,30

Analizując zagrożenie porażeniowe na dole kopalni na podstawie zaistniałych wypadków można dokonać podziału na cztery grupy (typy) zależnie od drogi przepływu prądu rażenia przez ciało poszkodowanego. Najczęściej porażeniom na dole kopalni ulegają elektromonterzy-profesjonaliści w wyniku lekkomyślności i nieprzestrzegania zasad bezpiecznej pracy.

Przyjęto na podstawie obserwacji i analiz cztery podstawowe drogi przepływu prądu przez ciało poszkodowanego jako typowe drogi rażenia A,B,C,D.

Typ A Ręka-ręka

Wypadki tego typu występują, gdy poszkodowany jedną ręką dotyka uziemionego korpusu, a drugą nieświadomie elementów pod napięciem lub dotyka rękoma elementów urządzeń o różnych potencjałach.

Typ B Ręka-nogi

Występuje, gdy poszkodowany w butach roboczych o małej rezystancji stoi na mokrym spągu i dotyka ręką lub rękoma elementów pod napięciem.

Typ C Ręka-plecy

Ręka-tułów

Ręka-ramię drugiej ręki.

Wypadki tego typu występują, gdy uszkodzony opiera się plecami, tułowiem lub ramieniem o uziemiony korpus, a ręka dotyka elementów pod niebezpiecznym napięciem. Ten typ dotyczy głównie elektromonterów pracujących na dole bez koszul roboczych przy niewłaściwym zabezpieczeniu stanu wyłączenia napięcia, np.: podczas wymiany listwy stykowej w ognioszczelnym wyłączniku.

Typ D Od traktacji dołowej

Wypadki porażen od przewodu jezdnej traktacji o napięciu stałym 250V na drodze rażenia: ręka-szyja, ramię-nogi, plecy-brzuch i inne.

Występują przy robotach transportowych, rozładowywaniu materiałów z wozów przy niewyłączonej traktacji elektrycznej oraz przy przechodzeniu przez wozy.

Określenie wielkości zagrożenia w przyjętym typie drogi przepływu prądu przez ciało uszkodzonego na dole nie może być wyłącznie rozpatrywane na podstawie kart wypadkowych zgłoszonych wypadków. Przeglądając protokoły powypadkowe porażen prądem w większości dochodzeń nie określa się drogi przepływu prądu rażenia przez ciało uszkodzonego, co stanowi poważny błąd komisji dochodzeniowej. W większości zaistniałych wypadków porażen na dole dozór jak też sami uszkodzeni są z poczucia własnej winy osobiście zainteresowani, aby takich zajęć nie zgłaszać. Dlatego wobec niektórych zaistniałych wypadków porażen nie prowadzi się dochodzeń powypadkowych. Każdy starszy elektromonter dołowy jak też osoby dozoru ruchu elektrycznego na dole posiadają swoją ocenę zagrożenia na podstawie własnej praktyki. W celu określenia rzeczywistego zagrożenia porażenia w przyjętym typie drogi przepływu prądu przeprowadzono test wśród bezpośrednio narażonych na zagrożenie. Test przeprowadzono na 72 pracownikach z 3 kopalń zarówno osób dozoru ruchu elektrycznego, jak też elektromonterów dołowych o stażu większym niż 10 lat pracy na dole.

Wyniki testu przedstawia tablica 3.

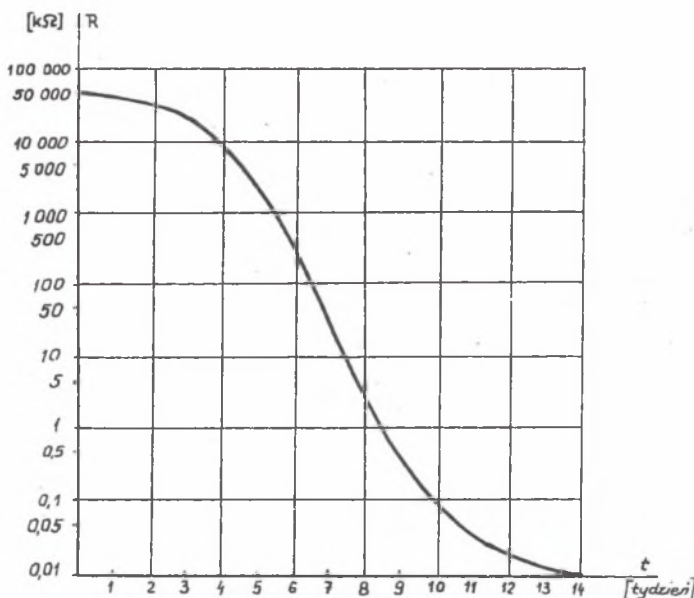
W przypadkach drogi rażenia typ B i D, gdzie przepływ prądu rażenia jest do nóg uszkodzonego, przyjęć należy, że uszkodzony stoi na spągu w typowych górniczych butach roboczych o określonej rezystancji. Na wartość prądu rażenia wpływa impedancja ciała oraz rezystancja obuwia. Wartość rezystancji obuwia roboczego jest różna i zależy od zużycia i ich stanu [9]. W celu określenia wielkości rezystancji przebadano obuwie stosowane przez elektromonterów zatrudnionych w ścianach i na robotach przygotowawczych zależnie od czasu ich noszenia. Pomiar rezystancji obuwia wykonano indukcyjnym miernikiem izolacji o napięciu 1000V w sposób zgodny z normą PN-77/C-94136. Nowe obuwie posiadało rezystancję $45 \text{ M}\Omega \pm 13\%$. Badanie rezystancji przeprowadzono co dwa tygodnie przez okres 4 miesięcy. Po trzymiesięcznym okresie noszenia rezystancja była prawie zero. Dokładny przebieg zmiany rezystancji od czasu chodzenia przedsta-

wia wykres na rys. 1. Z przeprowadzonych badań wynika, że większość elektromonterów dołowych użytkuje obuwie o rezystancji bardzo małej lub równej zero. Przy prowadzeniu analizy zagrożenia przeciwporażeniowego należy uwzględnić tylko impedancję ciała.

Tablica 3

Wypadkowość w poszczególnych typach dróg rażenia

Typ drogi	Droga rażenia	Wart. śr. wypadkowości w %	Media	Wariancja	Odchyl. stand.
A	Ręka - ręka	24,64	25	94,80	9,70
B	Ręka - nogi	37,58	35	340,10	18,40
C	Ręka - plecy - tułów	18,27	20	38,00	6,20
D	Trakcja	19,21	15	168,00	12,90



Rys. 1. Zmiana rezystancji obuwia roboczego elektromonterów w czasie ich użytkowania na dole kopalni

Fig. 1. Changes of the working footwear resistance during its using (underground mine)

3. DOTYCHCZASOWE BADANIA NAD REZYSTANCJĄ I IMPEDANCJĄ CIAŁA LUDZKIEGO

Badania nad impedancją ciała rozpoczęto z końcem XIX w. I już wtedy Kohlrausch określił rezystancję ciała na 1600-3000 Ω na drodze ręka-ręka. Pescarolo w 1891 r. podaje, że oporność ciała zależy od powierzchni dotyku, siły docisku i temperatury. Weber na Politechnice w Zurychu prowadził badania rezystancji ciała dla skóry suchej i mokrej elektrodami o średnicy 6 mm w zakresie napięć 10 V - 100 V [3]. W latach dwudziestych O. Muller bada rezystancję ciała napięciem o zmiennej częstotliwości. W 1923 roku Einthoven oraz Bijtel podają, że ciało ludzkie posiada charakter pojemnościowy, Malov w 1930 roku podaje swoje wyniki badań nad zmianami pojemności ciał od częstotliwości i napięcia [3]. Przełomowe znaczenie odegrały badania Heiricha Freibergera opublikowane w 1934 roku. Prowadził on badania zmian impedancji ciała od napięcia rażenia na żywych organizmach ludzkich do 50 V oraz na zwłokach do 5 kV [3].

Freiberger wykonywał pomiary na drodze ręka-ręka za pomocą elektrod prętowych o średnicy od 5 do 50 mm oraz na drodze ręka-nogi elektrodami płytowymi. Podał zależność rezystancji ciała dla zwłok, skóry suchej i mokrej w zakresie napięć do 500 V. Określił pojemność jako 200 $\mu\text{F}/\text{m}^2$, co zostało zakwestionowane przez Soderbauma, który skorygował pojemność na 60-100 $\mu\text{F}/\text{m}^2$ [4].

Duże osiągnięcia w elektropatologii mieli tacy badacze, jak: Sam, Osypka, Koeppen, Antoni, Dalziel oraz Jellinek, którzy badania wykonywali na zwłokach, zwierzętach i zbrodniarzach [1]. W czasach współczesnych największe znaczenie posiadają prace Gottfrieda Biegelmeiera z Wiednia, który do badań wykorzystywał elektrody cylindryczne o średnicy 0,08 m i długości 0,1 m. Pomiary wykonywał na drodze ręka-ręka na skórze suchej oraz zwilżonej 3% roztworem soli kuchennej. Wspólnie z Kuttnerem w latach siedemdziesiątych przybliżyli wiedzę z zagadnień pojemności ciała i przesunięcia fazowego udowadniając, że przyczyną pojemności ciała są błony komórkowe gruczołów potowych [3].

Badania i opracowania Biegelmeiera wykorzystano przy opracowywaniu międzynarodowej normy IEC w 1984 roku [14] z zakresu działania prądu na ciało ludzkie.

W latach osiemdziesiątych w Instytucie Biocybernetyki i Biomedycyny w Karlsruhe Meyer-Waarden wykorzystał tomografię komputerową do badań działania prądu na organy ludzkie. Wyniki tych prac rozszerzył D. Kieback, który w 1989 roku opublikował impedancje właściwe poszczególnych organów ludzkich [8].

W Związku Radzieckim Manojłow przeprowadził badania wpływu na impedancję ciała takich czynników środowiska, jak hałas, zapylenie, obecność gazów w atmosferze. Szczuckij z Moskiewskiego Instytutu Górnictwa opracował probalistyczny model impedancji ciała człowieka [13]. Również w Polsce w 1968 roku Teresiak opracowuje model ciała ludzkiego na potrzeby ochrony przeciwporażeniowej. Badania nad impedancją ciała ludzkiego na potrzeby ochrony w sieciach górniczych prowadził Krasucki w latach sześćdziesiątych. Opracował logarytmiczny model oporności ciała w funkcji napięcia rażenia. Przebadał również wpływ czynników środowiska górniczego na zmiany impedancji ciała i zwiększoną podatność organizmu na skutki prądu rażenia [10].

4. NOWA METODA POMIARU REZYSTANCJI I IMPEDANCJI CIAŁA

Większość badań impedancji ciała ludzkiego przeprowadzonych w różnych okresach i przez różnych badaczy było wykonywanych na pomiarowej drodze rażenia: ręka-ręka lub ręka-noga.

Utрудnienie w prowadzeniu pomiarów impedancji ciała na dole kopalni stanowi konieczność wykonywania 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 ludzkiego na drodze pomiarowego rażenia: ręka-ręka lub ręka-noga uważa się za zbyt ryzykowne dla osób badanych. Wobec tego dla badań zmian impedancji ciała ludzkiego pod wpływem klimatu przyjęto taką standardową drogę pomiarowego rażenia, aby metoda była możliwie najbezpieczniejsza i uwzględniała zjawiska klimatyczne.

Jako pomiarową drogę standardowego rażenia przyjęto odcinek od opuszka palca środkowego do opuszka kciuka ręki lewej lub prawej. Wartość standardowej rezystancji R_s i impedancji Z_s zmierzono metodą techniczną dociskając do elektrody płaskiej wewnętrznej górną powierzchnię poniżej opuszka palca środkowego oraz kciuka. Powierzchnia dotyku palca do elektrody wynosiła 350 mm² dla palca środkowego i 330 mm² dla kciuka przy sile docisku 6 N.

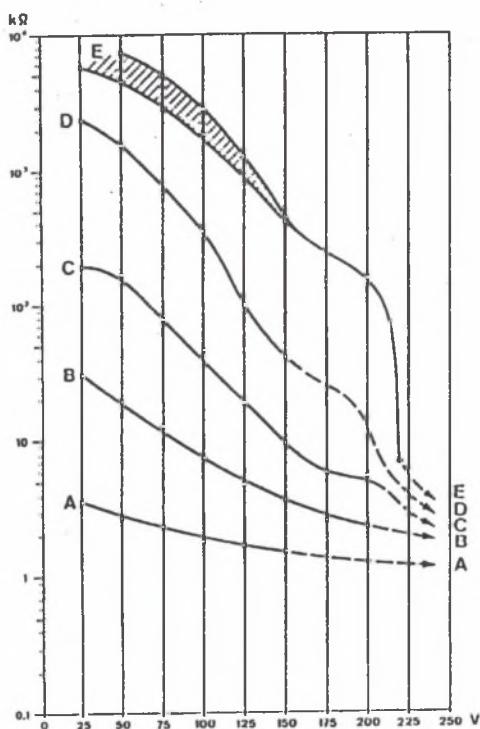
W celu wyznaczenia rzeczywistej impedancji dla danego napięcia i określonego klimatu wprowadzono współczynnik transformacji drogi rażenia ξ przeliczający impedancję R_s zmierzoną na drodze przyjętej jako standardową do impedancji ciała R_T w danym typie drogi rażenia spotykanej w górnictwie.

$$\xi = \frac{R_s}{R_T} \quad (1)$$

Aby wyznaczyć współczynnik transformacji ξ , przeprowadzono pomiary impedancji i rezystancji ciała badanych osób w ustalonym klimacie i napięciu od 8 V do 24 V.

Z wyników pomiarów impedancji wykonanych w tych samych warunkach dla drogi standarowego rażenia R_{sn} i dla drogi w przyjętym typie rażenia R_{Tn} wyznacza się współczynnik transformacji ξ_n . Z otrzymanych tą drogą współczynników ξ_n dla badanych osób średnia wyznacza współczynnik ξ dla danego typu drogi rażenia. Do wykonania pomiarów impedancji ciała na różnych drogach rażenia wykorzystano trzy rodzaje elektrod pomiarowych:

- elektrodę płaską z miedzi o wymiarach 25x48 mm,
- elektrodę płaską dla nóg z blachy miedzianej o wymiarach 300x300 mm,
- elektrodę w postaci tulejki miedzianej o średnicy 22 mm i długości 67 mm zaciskanej w dłoni badanej osoby.



Rys. 2. Zależność impedancji ciała człowieka od napięcia rażeniowego i pola powierzchni dotyku z elektrodą
 A dla $S = 8200 \text{ mm}^2$ B dla $S = 1250 \text{ mm}^2$
 C dla $S = 100 \text{ mm}^2$ D dla $S = 10 \text{ mm}^2$
 E dla $S = 1 \text{ mm}^2$

Fig. 2. Dependence (changes) between impedance of human body, voltage and surface touch

Pomiary impedancji dla drogi typu A (ręka-ręka) wykonano:

- dotykając wewnętrzną powierzchnią palcy środkowych obu rąk do elektrody płaskiej,
- zaciskając w dłoniach obu rąk elektrody w postaci tulejek.

Pomiary impedancji dla drogi rażenia typ B (ręka-noga) wykonano tak, że badana osoba stała boso na elektrodzie płaskiej, a w dłoni ręki zaciskała elektrodę w postaci tulejki lub palcem środkowym dotykała elektrody płaskiej.

Pomiary impedancji dla drogi rażenia typ C (ręka-plecy, tułów) wykonano elektrodami płaskimi jako najbardziej adekwatne dla spotykanych przypadków porażień na dole. Do jednej elektrody płaskiej badana osoba dociskała palec środkowy, a drugą elektrodę dotykano do pleców, tułowia i ramienia drugiej ręki.

Pomiary impedancji ciała dla drogi rażenia typ D (ramię-nogi, plecy-nogi, szyja-ręka) wykonano dwoma sposobami: Badana osoba stała boso na elektrodzie płaskiej, a drugą elektrodą dotykano do ramienia i pleców oraz badana osoba zaciskała w dłoni elektrodę w postaci tulejki, a drugą elektrodę płaską dotykano do pleców i tylnej powierzchni szyi.

Przyjęcie metody opartej na topograficznym współczynniku drogi rażenia jest zgodne z obowiązującą normą IEC [14], która wartość na drodze ręka-ręka określa jako 100%, a podaje procentowy współczynnik przeliczeniowy na inną drogę rażenia ciała człowieka. Przy dużych powierzchniach styczności ciała z elektrodą, gdzie gęstość natężenia jest mała, prąd praktycznie zaraz osiąga pełną wartość. Natomiast przy małych powierzchniach rzędu milimetrów kwadratowych natężenie może wzrastać na skutek uszkodzenia skóry spowodowanego przepływem prądu o dużej gęstości. Przeprowadzone przez Biegelmeiera [3] [2] badania zmian impedancji ciała ludzkiego zależnie od napięcia rażenia i powierzchni styczności z elektrodą przedstawia rys.2. Krzywe przy napięciu powyżej 220 V szybko zbliżają się do siebie, tak że pole powierzchni dotyku z urządzeniem nie odgrywa większej roli.

Z analiz wypadków porażen na dole kopalni i własnej praktyki dołowej autora można ustalić, że zazwyczaj powierzchnia dotyku przy porażeniu jest mniejsza niż 400 mm², stąd wniosek, że przyjęta do badań powierzchnia standardowa dotyku odpowiada najbardziej prawdopodobnej powierzchni dotyku podczas faktycznych porażen. Również przyjąć należy czas rażenia dla wypadków porażen na dole kopalni dłuższy niż 0,1 s. Według opracowań Kupfera i Teresiaka [12], gdy czas rażenia jest dłuższy niż 0,1 s. można pominąć zależność impedancji ciała od czasu rażenia.

5. WERYFIKACJA METODY I WSPÓŁCZYNNIKA ξ

Z opisu pomiarów wynika, że współczynnik transformacji drogi rażenia ξ przeliczający impedancję ciała na standardowej drodze rażenia do drogi rzeczywistej w danym przyjętym typie rażenia wyznaczono w sposób analityczno-doświadczalny. Wartość współczynnika ξ z uwagi na fakt, że nie wszystkie czynniki wpływające na wartość impedancji ciała są znane, a z tych, które są znane, nie wszystkie są mierzalne, weryfikację przeprowadzono metodami statystyki matematycznej.

Do weryfikacji postawionej hipotezy stanowiącej wartość współczynnika ξ sprawdzono postawioną hipotezę, badając na podstawie przeprowadzonych pomiarów rodzaj rozkładu zmiennej losowej, estymację oraz test istotności. Z wyników pomiarów w badanych drogach rażenia wyznaczono z pomocą programu komputerowego MATHE-ASS-STATISTIK: wartość średnią, medianę, wariancję, odchylenie standardowe. Dodatkowo wyznaczono dla każdej badanej drogi średnią wartość przesunięcia fazowego φ , która okazała się w przybliżeniu jednakowa dla wszystkich dróg i wynosiła 27° - 28°.

Dla zbadania rodzaju rozkładu wartości badanego współczynnika zastosowano zgodnie z obowiązującą normą PN-83/N-01052.07 [16] test λ - Kołomogorowa. Na podsta-

wie wyników przeprowadzonego testu oddzielnie dla każdej badanej drogi rażenia wyznaczono wartość statystyki λ oraz wartość krytyczną rozkładu λ_α zgodnie z normą [16]. Porównując wartość statystyki λ z wartością krytyczną λ_α postawiono wniosek, że badany rozkład jest zgodny z rozkładem normalnym. Wartość krytyczną dla testu λ -Kołomogorowa wyznaczono dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$, a wyniki pokazano w tabelicy 4. W celu przeprowadzenia estymacji współczynnika ξ określono liczbowo taki przedział na podstawie wyników pomiarów, aby z dostatecznym stopniem uzasadnienia probalistycznego można było przypuszczać, że szacowany współczynnik ξ znajduje się wewnątrz niego. Przedział ten zwany przedziałem ufności Neymana określony został przy założonym współczynniku ufności $1-\alpha$ wynoszącym $0,95$ [15]. Współczynnik ufności $1-\alpha$ wg teorii Neymana określa prawdopodobieństwo, że wartość badanego współczynnika znajduje się wewnątrz przedziału. Oznacza to, że tylko w $\alpha \times 100\%$ przypadków wartość szacowanego parametru przypadnie poza przedziałem ufności. Zgodnie z PN-83/N-01.052.02 [15] przedział ufności dla wartości średniej o rozkładzie normalnym ma postać:

$$\bar{x} - t_\gamma \cdot \frac{S}{\sqrt{n-1}} < E(x) < \bar{x} + t_\gamma \cdot \frac{S}{\sqrt{n-1}} \quad (2)$$

gdzie:

- n - liczba badań,
- S - odchylenie standardowe,
- x - wartość średnia wyników pomiarów,
- t_γ - kwantyl rozkładu t-Studenta odczytany z tablic dla przyjętego poziomu ufności dla n-1 stopni swobody,
- E(x) - estymator współczynnika x .

Weryfikacja hipotez statystycznych polega na zastosowaniu testu istotności, który rozstrzyga, w jakich warunkach z próby sprawdzoną hipotezę zerową H_0 należy odrzucić, a przy jakich nie ma podstaw do jej odrzucenia. Hipotezę zerową zdefiniowano

$$H_0: E(x) = \xi \quad (3)$$

Każdą hipotezę dopuszczalną przy badaniu danego zjawiska i różną od hipotezy zerowej nazywamy hipotezą alternatywną H_1

$$H_1: E(x) \neq \xi \quad (4)$$

W celu zweryfikowania sformułowanej hipotezy zgodnie z PN-83/N-01052.02 [15] obliczamy wartość statystyki t wg wzoru

$$t = \frac{\bar{x} - E(x)}{S} \sqrt{n} \quad (5)$$

Dla $n-1$ stopni swobody w zależności od postaci hipotezy alternatywnej i poziomu istotności α odczytujemy z tablic statystycznych [15] wartość krytyczną α i tworzymy obszar krytyczny testu $[(-\infty, -t_\alpha) (t_\alpha, +\infty)]$ [11]. Weryfikację prowadzono dla poziomu istotności $\alpha=0,01$, a wyniki z przeprowadzonych badań zamieszczono w tablicy 4. Po porównaniu t z t_α zgodnie z [15] decydowano o odrzuceniu czy przyjęciu hipotezy. Gdy wyznaczona wartość t nie jest objęta obszarem krytycznym, decyzja weryfikacji brzmi: nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o wartości współczynnika ξ .

Dodatkowo, przy ocenie, jak rzetelna jest wartość współczynnika, porównywano jego wartość dla poszczególnych dróg rażenia z obowiązującą normą IEC [14]. Przeliczając zgodnie z normą wartość współczynnika ξ tak, aby impedancja na drodze ręka-ręka stanowiła 100% wyniki procentowe dla dróg pozostałych podano w tablicy 4. Z porównań przeliczonych wartości do danych z normy IEC widać, że różnica stanowi kilka procent. Wyniki porównano również z wynikami badań radzieckich [13], gdzie jako impedancji na drodze ręka-noga przyjmuje się równą 1. Porównując tak przeliczoną wartość współczynnika ξ w tablicy 4 można ocenić, że różnica jest niewielka.

WNIOSKI KOŃCOWE

Zaproponowana metoda pomiarów impedancji i rezystancji ciała ludzkiego oprócz aspektów poznawczych posiada szczególnie istotne znaczenie w technice ochrony przeciwporażeniowej. Najistotniejszym parametrem do realizacji ochrony przeciwporażeniowej jest wartość bezpieczna prądu oraz rzeczywista impedancja ciała w chwili rażenia. O ile zagadnienie prądu bezpiecznego jest w pewnym stopniu rozeznane, to w zagadnieniu impedancji ciała w rzeczywistych warunkach rażenia pozostało jeszcze wiele do zbadania. Zagadnienie to dotyczy szczególnie porażań w środowisku górniczym, gdzie wpływ klimatu dołowego jest bardzo silny na zmiany impedancji ciała, która jest znacznie niższa niż podawana w literaturze. W celu dokładnego rozeznania tego, zagadnienia opracowano bezpieczną metodę pomiarów impedancji ciała, której wiarygodność potwierdzono metodami statystyki matematycznej.

LITERATURA

- [1] Biegelmeier G.: Neue Erkenntnisse der Elektropathologie. E und J 1989 H.1.
- [2] Biegelmeier G.: Oddziaływanie prądu elektrycznego na człowieka. VII Konferencja Ochrony Przeciwporażeniowej w Urzędzeniach Elektrycznych. Łódź 1989.

Tablica 4

Wyniki analizy statystycznej współczynnika transformacji drogi rażenia

Droga rażenia	Typ	ξ śr.	Mediana	Wariancja	Odchylenie standard. S	Temp. sr. °C	ξ	Test-Kolmogorowa			Przedział ufności	Weryfikacja testu istotności			Porównanie z danymi IEC			Porównanie z badaniami radzieckimi	
								λ	λ_α	Wynik testu		t	t_α obszar kryt.	wyniki weryfik.	IEC %	Z_A %	%	Dane rosyj.	Z_B
Lewa ręka -prawa ręka	A	5,3	5,08	3,61	1,9	28	6	1,31	1,35	+	4,56<E<6,04	2,52	-2,6<t<2,6	+	100	100	-		
Ręce-nogi	B	10,4	9,06	20,61	4,5	28	10	1,32	1,35	+	8,6<E<12,1	0,66	-2,6<t<2,6	+	50	51	1	1,00	1,00
Lewa ręka -nogi		8,5	6,1	14,7	3,86	27		1,35	1,35	+	6,6<E<10,05	2,55	-2,6<t<2,6	+	75	67	8	1,00	0,80
Prawa ręka -nogi		8,5	6,12	14,7	3,87	27		1,35	1,35	+	6,6<E<10,05	2,55	-2,6<t<2,6	+	75	67	8	1,00	0,80
Ręka-plecy	C	10,3	10,04	5,22	2,28	29	9	1,01	1,35	+	8,9<E<11,6	2,76	-2,8<t<2,8	+				0,70	0,80
Ręka-tułów		9,9	10,05	4,53	2,12	27		1,09	1,35	+	8,8<E<10,9	2,34	-2,7<t<2,7	+	45	53	8	0,70	0,80
Lewa ręka -brzuch		9,1	10,07	6,10	2,46	28		0,89	1,35	+	7,9<E<10,1	0,22	-2,7<t<2,7	+	50	58	8	1,30	0,90
Lewa ręka -ramię prawe		6,6	6,52	4,82	2,19	27		0,49	1,35	+	5,6<E<7,4	7,31	-2,7<t<2,7	-	70	80	10		
Ręka-szyja	D	10,3	10,12	5,29	2,31	29	9	1,01	1,35	+	8,8<E<11,6	0,63	-2,7<t<2,7	+	40	50	10	0,30	0,80
Ramię-nogi		7,5	5,62	5,83	2,42	27		1,04	1,35	+	6,3<E<8,9	2,73	-2,8<t<2,8	+				1,00	1,10
Lewa ręka -brzuch		9,1	10,06	6,09	2,46	28		0,92	1,35	+	8,2<E<9,6	0,24	-2,7<t<2,7	+	50	58	8	1,30	1,00
Plecy-nogi		8,9	9,54	2,05	1,43	27		0,92	1,35	+	8,3<E<10,1	0,22	-2,7<t<2,7	+				1,00	1,00

Z_A - Przeliczony współczynnik ξ przy założeniu, że oporność na drodze ręka-ręka stanowi 100% dla porównania z normą IEC [14].

Z_B - Przeliczony współczynnik ξ przy założeniu, że oporność na drodze ręka-nogi stanowi 1 dla porównania z opracowaniami rosyjskimi IEC [13].

ξ_{sr} - Wartość średnia współczynnika ξ_n z pomiarów.

ξ - Wartość przyjęta współczynnika.

t - Wartość statystyki wg [5].

- [3] Biegelmeier G., Mikisch J.: Über den Einfluß der Haut auf die Körperimpedanz der Menschen. E und M. 1980 H9.
- [4] Biegelmeier G. Rotter K.: Elektrische Widerstände und Ströme im menschlichen Körper. E und M. 1971 H3.
- [5] Gierlotka S. Froch E.: Przyczyny i skutki porażenia prądem elektrycznym w podziemiu kopalń. Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa, 1989 /1.
- [6] Gołąb B. Traczyk W.: Anatomia i fizjologia człowieka. PZWL, 1986.
- [7] Jabłoński W.: Działanie prądu elektrycznego na organizm ludzki. Gospodarka Pałiwami i Energią 1986/6.
- [8] Kieback D.: Ergebnisse von Forschungsarbeiten und statistischen Untersuchungen des Instituts zur Erforschung elektrischer Unfälle. E und I. 1989 H1.
- [9] Krasucki F.: Stan izolacji elektrycznej sieci kopalnianej jako kryterium bezpieczeństwa rażenia. Przegląd Górniczy, 1968/2.
- [10] Karsucki F.: Zagrożenia elektryczne w górnictwie. Śląsk, Katowice 1984.
- [11] Krzysztofaki M., Luszniwicz A.: Statystyka. PWE, Warszawa 1981.
- [12] Kupfer J., Teresiak Z.: Wartości graniczne wielkości warunkujących fizjologiczne zagrożenie porażeniem elektrycznym. Przegląd El. 1986/11.
- [13] Manojłow W.: Osnovy biezopasnosti. Leningrad 1991.
- [14] Effects of current passing through the human body. IEC Rport 1984 r. Publication 479-1.
- [15] PN-83/N-01052.02 Statystyka matematyczna. Estymacja i test istotności dla wartości średniej.
- [16] PN-83/N-01052.07 Statystyka matematyczna. Badanie zgodności rozkładu właściwości w populacji z rozkładem teoretycznym.

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

Wpłynęło do Redakcji w marcu 1993 r.

Abstract

A new method of human body impedance and resistance measurement is proposed in this publication. This method is destined for impedance of human body measurement in the mining industry and it is much more safe for the investigated person than other methods. Hitherto used methods were based on the measurement of human body impedance on the path: hand-hand or hand-legs. The new method is based on finding the standard impedance measured between middle finger and thumb of the left or right hand. On

the base of the described electric shock accidents in mining industry the electric shock hazard was defined in the four cases of current path:

type A: hand-hand

type B: hand-legs

type C: hand-shoulders

type D: shock from electric traction underground

The factor ξ of conversion of standard body impedance to human body impedance in the particular types of current paths.

This factor ξ was verified by mathematical statistical methods with positive results. The obtained results are shown in table 4.

Some problems connected with the influence of the mining climate on the changes of human body impedance are discussed.