

**ZESZYTY  
NAUKOWE  
POLITECHNIKI  
ŚLĄSKIEJ**

**Stefan GIERLOTKA**

**WPŁYW UCIAŻLIWOŚCI ERGONOMICZNYCH  
WYSTĘPUJĄCYCH W KOPALNIACH  
WĘGLA KAMIENNEGO  
NA IMPEDANCJĘ ELEKTRYCZNĄ  
CIAŁA CZŁOWIEKA**

**GÓRNICtwo**  
**z. 252**



**GLIWICE 2002**



POLITECHNIKA ŚLĄSKA  
ZESZYTY NAUKOWE  
Nr 1539

Stefan GIERLOTKA

**Wpływ uciążliwości ergonomicznych  
występujących w kopalniach węgla kamiennego  
na impedancję elektryczną ciała człowieka**

## **OPINIODAWCY**

Prof. dr hab. inż. Henryk MARKIEWICZ  
Dr hab. n. med. Krystyna PAWLAS  
Dr hab. inż. Jan DRENDA -  
Profesor Politechniki Śląskiej

## **KOLEGIUM REDAKCYJNE**

REDAKTOR NACZELNY – Prof. dr hab. Zygmunt Kleszczewski  
REDAKTOR DZIAŁU – Dr hab. inż. Franciszek Plewa -  
Profesor Politechniki Śląskiej  
SEKRETARZ REDAKCJI – Mgr Elżbieta Leško

## **REDAKCJA**

Mgr Kazimiera Szafir

## **REDAKCJA TECHNICZNA**

Alicja Nowacka

**Wydano za zgodą  
Rektora Politechniki Śląskiej**

PL ISSN 0372-9508

**Wydawnictwo Politechniki Śląskiej  
ul. Akademicka 5  
44-100 Gliwice  
tel./fax (0 prefiks 32) 237-13-81  
Dział Sprzedaży i Reklamy (0 prefiks 32) 237-18-48**

[www.polsl.gliwice.pl/alma.mater/wps.html](http://www.polsl.gliwice.pl/alma.mater/wps.html)  
[wydawnictwo@polsl.gliwice.pl](mailto:wydawnictwo@polsl.gliwice.pl)

## SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ .....	str.
<b>1. WPROWADZENIE .....</b>	<b>7</b>
1.1. WSTĘP .....	7
1.2. CEL, ZAKRES I TEZY PRACY .....	8
<b>2. IMPEDANCJA CIAŁA CZŁOWIEKA .....</b>	<b>9</b>
2.1. DOTYCHCZASOWY STAN WIEDZY I HISTORIA BADAŃ ELEKTRYCZNYCH WŁAŚCIWOŚCI CIAŁA CZŁOWIEKA .....	9
2.2. CZYNNIKI WPLYWAJĄCE NA IMPEDANCJĘ CIAŁA CZŁOWIEKA .....	11
2.3. ELEKTROFIZJOLOGIA SKÓRY CZŁOWIEKA .....	13
2.4. WPLYW ŚRODOWISKA PRACY NA ELEKTROFIZJOLOGIĘ CIAŁA CZŁOWIEKA .....	17
2.5. SKUTKI RAŻENIA PRADEM ELEKTRYCZNYM ZALEŻNE OD DROGI PRZEPEŁYWU W CIELE CZŁOWIEKA .....	19
2.6. METODA BADAŃ IMPEDANCJI CIAŁA CZŁOWIEKA .....	21
<b>3. WPLYW KLIMATYCZNYCH WARUNKÓW PRACY NA IMPEDANCJĘ CIAŁA CZŁOWIEKA .....</b>	<b>25</b>
3.1. WPLYW KLIMATU DOŁOWEGO NA PRACUJĄCEGO CZŁOWIEKA I IMPEDANCJĘ JEGO CIAŁA .....	25
3.2. METODA OKREŚLANIA KLIMATU DLA BADAŃ ZMIAN WARTOŚCI IMPEDANCJI CIAŁA .....	27
3.3. BADANIA EKSPERYMENTALNE ZMIAN WARTOŚCI IMPEDANCJI CIAŁA CZŁOWIEKA POD WPLYWEM KLIMATU I NAPIĘCIA RAŻENIA .....	28
3.4. SPODZIEWANE WARTOŚCI IMPEDANCJI CIAŁA CZŁOWIEKA DLA ZNAMIONOWYCH NAPIĘĆ STOSOWANYCH W GÓRNICTWIE .....	32
3.5. ZMIANY WARTOŚCI IMPEDANCJI CIAŁA CZŁOWIEKA POD WPLYWEM WARUNKÓW KLIMATYCZNYCH .....	37
<b>4. WPLYW HAŁASU ORAZ WIBRACJI IMPEDANCJĘ CIAŁA CZŁOWIEKA .....</b>	<b>45</b>
4.1. CHARAKTERYSTYKA BODŹCÓW AKUSTYCZNYCH .....	45
4.2. WPLYW BODŹCÓW AKUSTYCZNYCH NA ZMIANĘ IMPEDANCJI CIAŁA CZŁOWIEKA .....	47
4.3. ŹRÓDŁA HAŁASU W KOPALNIACH .....	48
4.4. BADANIA EKSPERYMENTALNE ZMIAN WARTOŚCI IMPEDANCJI CIAŁA CZŁOWIEKA NARAŻONEGO NA HAŁAS .....	50
4.5. ZMIANY WARTOŚCI IMPEDANCJI CIAŁA CZŁOWIEKA POWODOWANE CZASEM EKSPOZYCJI NA UCIAŹLIWE BODŹCE AKUSTYCZNE .....	58
4.6. WPLYW DRGAŃ I WIBRACJI ŚRODOWISKA TECHNICZNEGO KOPALNI NA ZMIANY WARTOŚCI IMPEDANCJI CIAŁA CZŁOWIEKA .....	61
<b>5. WPLYW BODŹCÓW OPTYCZNYCH NA IMPEDANCJĘ CIAŁA CZŁOWIEKA .....</b>	<b>65</b>
5.1. WPLYW NATEŻENIA OŚWIETLENIA NA PRACĘ CZŁOWIEKA W KOPALNI .....	65
5.2. WPLYW BODŹCÓW OPTYCZNYCH NA ZMIANĘ IMPEDANCJI CIAŁA CZŁOWIEKA .....	66
5.3. BADANIE ZMIAN WARTOŚCI CIAŁA CZŁOWIEKA SPOWODOWANYCH EKSPOZYCJĄ NA OŚWIETLENIE O RÓŻNYM NATEŻENIU .....	68
5.4. ZMIANY WARTOŚCI IMPEDANCJI CIAŁA CZŁOWIEKA W CZASIE WYKONYWANIA PRACY W MIEJSCU O NIEWŁAŚCIWYM NATEŻENIU OŚWIETLENIA .....	75
<b>6. WPLYW POLA ELEKTROMAGNETYCZNEGO W GÓRNICTWIE NA IMPEDANCJĘ CIAŁA CZŁOWIEKA .....</b>	<b>78</b>
6.1. ODDZIAŁYWANIE PÓL ELEKTROMAGNETYCZNYCH NA ORGANIZMY ŻYWE .....	78
6.2. ŹRÓDŁA PÓL ELEKTROMAGNETYCZNYCH W GÓRNICTWIE .....	79
6.3. NORMY PRAWNE W ZAKRESIE OCHRONY PRZED ODDZIAŁYWANIEM PÓL ELEKTROMAGNETYCZNYCH STAŁYCH I O CZĘSTOTLIWOŚCI 50 HZ .....	82
6.4. ZMIANY WARTOŚCI IMPEDANCJI CIAŁA CZŁOWIEKA NARAŻONEGO NA EMISJĘ POLA ELEKTROMAGNETYCZNEGO .....	83
<b>7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE .....</b>	<b>86</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>89</b>
<b>STRESZCZENIE .....</b>	<b>93</b>

# CONTENTS

	Page
<b>THE LIST OF SUBSTANTIAL SYMBOLS .....</b>	<b>5</b>
<b>1. INTRODUCTORY REMARKS .....</b>	<b>7</b>
1.1. INTRODUCTION .....	7
1.2. AIM, SCOPE AND THESES .....	8
<b>2. HUMAN BODY IMPEDANCE .....</b>	<b>9</b>
2.1. FORMER KNOWLEDGE AND HISTORY OF THE RESEARCH ABOUT THE ELECTRIC FEATURES OF HUMAN BODY .....	9
2.2. FACTORS DETERMINING THE IMPEDANCE OF HUMAN BODY .....	11
2.3. ELECTROPHYSIOLOGY OF HUMAN SKIN .....	13
2.4. THE INFLUENCE OF WORK ENVIRONMENT ON ELECTROPHYSIOLOGY OF HUMAN BODY .....	17
2.5. ELECTRIC SHOCK CONSEQUENCES DEPENDING ON THE ROUTE OF FLOW INSIDE HUMAN BODY .....	19
2.6. METHODS FOR MEASURING IMPEDANCE .....	21
<b>3. THE INFLUENCE OF CLIMATIC CONDITIONS AT WORK ON THE IMPEDANCE OF HUMAN BODY .....</b>	<b>25</b>
3.1. THE INFLUENCE OF THE UNDERGROUND CLIMATE ON THE WORKING PERSON AND HIS/HER IMPEDANCE .....	25
3.2. THE METHOD FOR DEFINING THE CLIMATE NEEDED FOR MEASURING THE CHANGE OF THE IMPEDANCE VALUE .....	27
3.3. EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE IMPEDANCE CHANGE IN VALUE FOR THE BODY BEING TESTED UNDER THE INFLUENCE OF THE CLIMATIC CONDITIONS AND THE VOLTAGE SHOCK .....	28
3.4. ASSUMED VALUES OF THE IMPEDANCE OF HUMAN BODY FOR THE CHARACTERISTIC VOLTAGE USED IN MINING INDUSTRY .....	32
3.5. THE CHANGE OF IMPEDANCE VALUE UNDER THE INFLUENCE OF CLIMATIC CONDITIONS .....	37
<b>4. THE INFLUENCE OF NOISE AND VIBRATIONS ON THE IMPEDANCE OF HUMAN BODY .....</b>	<b>45</b>
4.1. THE CHARACTERISTIC OF ACOUSTIC STIMULI .....	45
4.2. THE INFLUENCE OF ACOUSTIC STIMULI ON THE IMPEDANCE OF HUMAN BODY .....	47
4.3. THE SOURCE OF NOISE IN MINES .....	48
4.4. THE EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE IMPEDANCE CHANGE IN VALUE FOR THE BODY BEING EXPOSED TO NOISE .....	50
4.5. THE CHANGE OF THE IMPEDANCE VALUE DEPENDING ON THE TIME OF EXPOSURE TO ARDUOUS ACOUSTIC STIMULI .....	58
4.6. THE INFLUENCE OF OSCILLATION AND VIBRATION ON THE CHANGE OF THE IMPEDANCE OF HUMAN BODY .....	61
<b>5. THE INFLUENCE OF OPTIC STIMULI ON THE IMPEDANCE OF HUMAN BODY .....</b>	<b>65</b>
5.1. THE INFLUENCE OF THE INTENSITY OF THE LIGHT ON THE PEOPLE'S WORK IN THE MINES .....	65
5.2. THE INFLUENCE OF OPTIC STIMULI ON THE IMPEDANCE OF HUMAN BODY .....	66
5.3. EXAMINING THE CHANGE OF HUMAN IMPEDANCE DEPENDING ON THE DIFFERENT INTENSITY OF THE LIGHT .....	68
5.4. THE CHANGE OF THE IMPEDANCE OF HUMAN BODY WHILE WORKING IN A PLACE WITH IMPROPER INTENSITY OF LIGHT .....	75
<b>6. THE INFLUENCE OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD ON HUMAN BODY IMPEDANCE IN MINING INDUSTRY .....</b>	<b>78</b>
6.1. THE INFLUENCE OF ELECTROMAGNETIC FIELDS ON LIVING ORGANISMS .....	78
6.2. THE SOURCES OF ELECTROMAGNETIC FIELDS IN MINING INDUSTRY .....	79
6.3. LEGAL PRINCIPLES DEALING WITH PROTECTION FROM THE ELECTROMAGNETIC FIELDS' INFLUENCE EQUALLYING 50 HZ AND OF STABLE FREQUENCY .....	82
6.4. THE CHANGE OF THE HUMAN BODY IMPEDANCE UNDER THE EXPOSURE OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD .....	83
<b>7. CONCLUSION .....</b>	<b>86</b>
<b>BIBLIOGRAPHY .....</b>	<b>89</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>93</b>

## WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- A - powierzchnia ( $m^2$ )
- B - indukcja magnetyczna (T)
- $C_k$  - pojemność kanalika potowego ( $\mu F$ )
- $C_s$  - pojemność skóry ( $\mu F/cm^2$ )
- D - wskaźnik narażenia
- E - natężenie oświetlenia (lx)
- $E_p$  - natężenie pola elektrycznego (V/m)
- $H_p$  - natężenie pola magnetycznego (A/m)
- I - natężenie dźwięku ( $W/m^2$ )
- $I_o$  - natężenie dźwięku dla progu słyszalności
- K - klimat dołowy określony w katastopniach wilgotnych ( $^{\circ}K_w$ )
- L - poziom natężenia dźwięku (dB)
- $L_p$  - poziom ciśnienia akustycznego (dB)
- M - wydatek energetyczny człowieka ( $W/m^2$ )
- Q - stała katatermometru
- $R_i$  - rezystancja wewnętrzna ciała człowieka
- $R_s$  - rezystancja skóry
- $T_e$  - czas ekspozycji
- U - napięcie rażenia
- Z - impedancja całkowita ciała człowieka
- $Z_0$  - impedancja standardowa ciała człowieka (wartość spodziewana)
- $Z_m$  - wartość empiryczna impedancji standardowej ciała człowieka
- c - prędkość rozchodzenia się dźwięku (m/s)
- f - częstotliwość (Hz)
- K - współczynnik szczytu drgań
- N - liczba badań
- P - ciśnienie akustyczne (Pa)
- $p_o$  - ciśnienie akustyczne dla progu słyszalności
- s - odchylenie standardowe
- t - czas
- $w_E$  - gęstość pola elektrycznego
- $w_H$  - gęstość pola magnetycznego
- $\gamma$  - gęstość środowiska ( $kg/m^3$ )
- $\Phi$  - strumień świetlny (lm)
- $\delta$  - wskaźnik dyskomfortu cieplnego
- $\delta_o$  - grubość błony komórkowej
- $\epsilon$  - przenikalność dielektryczna względna
- $\zeta$  - współczynnik transformacji drogi rażenia
- $\mu$  - przenikalność magnetyczna środowiska
- $\mu_o$  - przenikalność magnetyczna próżni
- $\rho$  - rezystywność potu
- $\sigma$  - współczynnik korelacji





# 1. WPROWADZENIE

## 1.1. Wstęp

Współczesny rozwój elektrotechniki górniczej usprawnia pracę w kopalniach i sprzyja wzrostowi bezpieczeństwa. Z drugiej strony zwiększenie napięć zasilania i mocy zainstalowanych urządzeń powoduje wzrost zagrożenia porażenia prądem na dole kopalni. W tych warunkach ograniczenie szkodliwości oddziaływań urządzeń elektrycznych oraz zmniejszenie liczby nieszczęśliwych wypadków wymaga stałego postępu w technice bezpieczeństwa górniczego.

Tradycyjne przejście do problemu ochrony pracowników przed porażeniem prądem elektrycznym polega na zastosowaniu odpowiednich środków organizacyjno-technicznych. Głównie zwraca się przy tym uwagę na niezawodność urządzeń technicznych, środki ochrony przeciwporażeniowej oraz zasady bezpiecznej pracy przy urządzeniach elektrycznych. Mimo znacznych postępów w zwalczaniu wypadków porażenia prądem elektrycznym przez stosowanie coraz doskonalszych środków ochrony, dotychczas nie udawało się zapewnić pełnego bezpieczeństwa użytkownika urządzeń elektrycznych w kopalniach.

Za ważną przyczynę śmiertelnych w skutkach porażenia prądem elektrycznym uważać należy wpływ specyficznych warunków środowiskowych występujących na dole kopalni. Specyfika środowiska technicznego w podziemiach kopalń wynika przede wszystkim z dużej intensywności kumulowania się narażeń techniczno-organizacyjnych, czynników fizykochemicznych, a szczególnie ergonomicznych. Wymienione czynniki wpływają na samopoczucie pracowników w danym środowisku. Praca człowieka w środowisku o specyficznych warunkach i uciążliwościach ergonomicznych kopalni powoduje duże zmęczenie i podatność na działanie prądu elektrycznego w przypadku rażenia. Najistotniejszym czynnikiem w ochronie przeciwporażeniowej jest wartość prądu rażenia uzależniona od napięcia i rzeczywistej impedancji ciała człowieka. Czynniki środowiskowe mogą powodować zmęczenie oraz zwiększone wydzielanie potu, co ma wpływ na obniżenie wartości impedancji elektrycznej ciała człowieka.

W rozważaniach dotyczących bezpieczeństwa należy rozpatrywać człowieka nie tylko jako element obwodu elektrycznego, ale również jako sprawcę porażenia prądem elektrycznym, tj. z uwzględnieniem aspektów psychologicznych oraz stanów i poziomów jego homeostazy. Psychofizjologiczne podejście w tym zakresie bazuje na analizie naturalnych reakcji człowieka spowodowanych środowiskiem pracy. Celowe staje się prowadzenie badań człowieka jako obiektu ochrony przed porażeniem prądem elektrycznym. Człowiek może być rozpatrywany nie jako pasywny opór elektryczny, lecz jako aktywny podmiot zdolny do kierowania własnymi reakcjami. Istotne staje się dokładniejsze poznanie znajomości zmian parametrów elektrycznych ciała człowieka w zależności od szeregu czynników środowiskowych, takich jak: klimat, hałas, wibracje, rodzaj i natężenie oświetlenia w miejscu wykonywanej pracy. O wpływie uciążliwego hałasu oraz niewłaściwego oświetlenia w miejscu pracy na właściwości modelowe impedancji ciała człowieka wspominał F. Krasucki z Politechniki Śl. w Gliwicach w swoich pracach [40] [41]. Stwierdzenie to o charakterze jakościowym nie zostało poparte badaniami ilościowymi, których konieczność przeprowadzenia uważał za potrzebne.

W zagadnieniach dotyczących bezpieczeństwa związanego z elektryfikacją kopalń nie sposób pominąć zjawiska występowania pola elektromagnetycznego i jego oddziaływania na pracującego człowieka. Chociaż wpływ pola elektromagnetycznego na człowieka nie został jeszcze do końca zbadany, to wiadomo, że nie jest on obojętny. Ze względu na powszechność pola elektromagnetycz-

nego wokół urządzeń elektrycznych w kopalni zagadnienie to staje się równie ważne jak pozostałe czynniki wpływające na bezpieczeństwo pracy.

Przytoczone uwagi wskazują na ciągle istniejącą potrzebę zdobywania nowej i pogłębianie już istniejącej wiedzy o wpływie czynników ergonomicznych środowiska pracy w kopalni na skutki rażenia człowieka prądem elektrycznym. Złożoność problematyki bezpieczeństwa elektrycznego wymaga niewątpliwie ujęcia systemowego. Wiele czynników wchodzi w spłot wzajemnych zależności utrudniających ocenę zagrożenia oraz prawidłowe kształtowanie warunków bezpieczeństwa i optymalizację ochrony. Poszukiwanie odpowiednich metod postępowania w tego rodzaju badaniach prowadzić musi do celu użytecznego, jakim jest opracowanie i wybór optymalnych sposobów zmniejszenia zagrożenia porażeniowego.

W niniejszej dysertacji przedstawiono wyniki badań wpływu wybranych uciążliwości ergonomicznych podziemia kopalni węgla kamiennego na zmiany wartości impedancji ciała człowieka. Praca ma charakter poznawczy, gdyż rozszerza dotychczasowy stan wiedzy o wpływie czynników środowiskowych, występujących w podziemiach kopalń, na modelowe wartości impedancji ciała człowieka. Uzyskanie wiarygodnych informacji o aktualnym stanie zagrożenia porażenia prądem elektrycznym jest niezbędne dla permanentnego i operatywnego podejmowania decyzji profilaktycznych i optymalnych rozwiązań zabezpieczeń przed skutkami działania prądu rażenia na człowieka w kopalni. Proponowane podejście może w dużym stopniu przyczynić się do zmniejszenia liczby wypadków porażenia prądem elektrycznym w kopalniach.

## **1.2. Cel, zakres i tezy pracy**

Niezadowolający stan wiedzy z zakresu ochrony przeciwporażeniowej w kopalniach węgla kamiennego oraz problemy związane z wpływem środowiska pracy na człowieka skłoniły autora do podjęcia badań mających na celu określanie wpływu czynników ergonomicznych środowiska pracy w górnictwie na zmiany wartości impedancji ciała człowieka. Prowadzenie badań określających wartość impedancji ciała człowieka oprócz aspektów poznawczych posiada szczególne znaczenie w technice ochrony przeciwporażeniowej. W celu ustalenia środków ochrony i kryteriów oceny niebezpieczeństwa rażenia konieczna jest znajomość chociażby przybliżonych wartości impedancji ciała w środowisku dołowym kopalni. W badaniach uwzględniono specyficzne warunki środowiskowe podziemia kopalń, jak: klimat, wydatek energetyczny organizmu człowieka podczas pracy, hałas, wibracje, rodzaj i natężenie oświetlenia miejsca pracy, jak również narażenie na pole elektromagnetyczne. Wymienione czynniki występujące w kopalniach węgla kamiennego determinują wartości impedancji ciała człowieka. Realizując podjęty temat starano się poszerzyć już istniejącą oraz zdobyć nową wiedzę z zakresu wpływu środowiska pracy w kopalni węgla kamiennego na wartość impedancji ciała człowieka.

Celem poznawczym pracy jest określenie wpływu wybranych uciążliwości ergonomicznych występujących w górnictwie na zmiany wartości impedancji ciała człowieka. Wykorzystanie wniosków oraz opracowanych zależności badanych zjawisk do poprawy ochrony przeciwporażeniowej w podziemiach kopalń stanowić będzie cel użyteczny.

Tezę pracy autor sformułował następująco:

**Warunki pracy i przebywania w środowisku kopalni węgla kamiennego posiadają istotny wpływ na skutki rażenia prądem elektrycznym i elektrofizjologię organizmu człowieka. Oddziaływanie czynników środowiskowych i uciążliwości ergonomicznych występujących w podziemiach kopalni węgla kamiennego, głównie: klimatu, wydatku energetycznego, hałasu, wibracji, oświetlenia miejsca pracy oraz ekspozycja na pola elektromagnetyczne pracującego człowieka, powoduje zmiany wartości impedancji jego ciała, co wymaga potwierdzenia empirycznego.**

## 2. IMPEDANCJA CIAŁA CZŁOWIEKA

### 2.1. Dotychczasowy stan wiedzy i historia badań elektrycznych właściwości ciała człowieka

Pierwsze badania właściwości elektrycznych ciała człowieka wykonywano w ubiegłym stuleciu, wykorzystując jako źródło prądu maszynę elektrostatyczną. J. Runge w roku 1870 przeprowadził pierwsze badania rezystancji ciała dla skóry suchej oraz spoconej. Stwierdził, że rezystancja spoconego naskórka jest większa od tkanki podskórnej. W tym samym czasie S. Kohlrausch określił wartość rezystancji ciała pomiędzy lewą a prawą ręką na 1600-3000  $\Omega$  [3]. F. Jolly w 1884 roku stwierdził, że rezystancja ciała kobiety jest o 30 % większa niż mężczyzny oraz, że na wartość rezystancji ciała wpływają zmiany fizjologiczne w organizmie [2]. Fere i Tarchanoff w 1890 roku przeprowadzili badania fizjologiczne zmian w skórze człowieka powodowanych przepływem prądu elektrycznego [15]. Postawili hipotezę wpływu prądu elektrycznego na zmiany w krwi oraz czynnościach gruczołów potowych. Silva i Pescarolo w 1891 roku stwierdzili, że rezystancja ciała człowieka zależy od powierzchni dotyku, siły docisku i temperatury otoczenia. Weber z Politechniki w Zurychu określił w 1897 roku zależność rezystancji ciała od napięcia rażenia w zakresie do 100V [2].

W pierwszej dekadzie dwudziestego wieku S. Jelinek w Austrii stwierdził, że napięcie rażenia powoduje „śmierć pozorną” człowieka, która objawia się wstrzymaniem oddechu [2]. Po I wojnie światowej wykazano, że istotną przyczyną zgonów jest zakłócenie pracy serca .

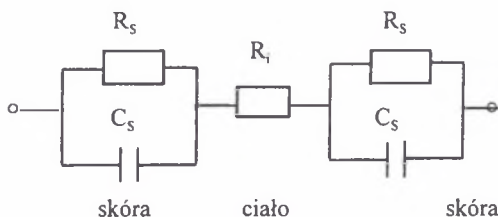
W początkach XX wieku M. Gildemeister oraz R. Kaufhold stwierdzili, że wartość rezystancji ciała zależy od częstotliwości napięcia rażenia. W roku 1923 W. Einthoven oraz J. Bijtel stwierdzili, że ciało człowieka ma charakter pojemnościowy. N. Malow oraz S. Rschewkin w 1930 roku prowadząc badania na skórze ludzi i zwierząt dokonali próby określenia zależności pojemności elektrycznej ciała od napięcia rażenia i częstotliwości [2].

W USA stwierdzono, że prąd stały jest mniej szkodliwy od przemiennego. Ustalono, że śmiertelne jest już napięcie 110V dla częstotliwości 60Hz [24]. Stwierdzono, że przyczyną zgonu są zaburzenia koordynacji ruchu mięśnia sercowego. Na podstawie wykonanych w USA badań eksperymentalnych K. Alvensleben w latach dwudziestych uporządkował stan wiedzy o działaniu prądu na człowieka. Ustalił założenia do bezpiecznego wykonywania instalacji elektrycznych oraz opracował pierwsze zasady ratowania porażonych i ich reanimacji [33].

W latach trzydziestych C. Dalziel zbadał zagadnienie wyczuwalności prądu przez człowieka oraz wartości prądu wywołujące skurcze ciała zależne od masy ciała rażonych [24]. U. Sam wprowadził zależny od drogi rażenia współczynnik prądu serca, który określa procent całkowitego prądu rażenia przepływający bezpośrednio przez serce [45].

W 1934 roku H. Freiburger opublikował wnikliwe badania dotyczące zagadnienia rezystancji ciała zarówno dla prądu stałego, jak i przemiennego. Opracowanie to stanowiło podsumowanie dotychczasowych osiągnięć i było przez bardzo długi okres czasu podstawą w ochronie przeciwporażeniowej. Freiburger przeprowadził pomiary rezystancji stosując napięcie o wartości do 5 kV dla zwłok ludzkich oraz napięcie 30 kV dla żywego organizmu. Opracował zależność zmian impedancji ciała człowieka od napięcia rażenia w zakresie do 500V [3]. Stwierdził, że wewnętrzne organy ciała człowieka posiadają charakter rezystancyjny, natomiast skóra posiada charakter impedancyjny. Określił wartość pojemności skóry na 20 nF/cm<sup>2</sup>. Opracował aktualny do dziś schemat zastępczy impedancji ciała człowieka pokazany na rys.2.1.





Rys. 2.1. Schemat zastępczy impedancji ciała człowieka wg Freibergera;  $R_S$ - rezystancja skóry,  $R_i$ - rezystancja wewnętrzna ciała,  $C_S$  - pojemność skóry

Fig. 2.1. Supplementary schedule of human body's impedance according Freiberg;  $R_S$  – skin resistance,  $R_i$  - internal resistance of human body,  $C_S$  - skin capacitance

Przeprowadzone na Uniwersytecie Kolumbijskim w 1936 roku przez zespół w składzie: L.Ferris, B.King, P.Spence i H.Williams badania na owcach wykazały, że przyczyną śmierci w wyniku porażenia prądem jest zjawisko migotania komór serca. Ferris udowodnił, że wartość progowa zjawiska fibrylacji serca zależy nie od napięcia rażenia, lecz od wartości natężenia prądu [24]. W. Kouwenhoven w 1959 roku na Uniwersytecie Hopkinsa w USA wnioskował o warunkach fibrylacji serca człowieka na podstawie badań przeprowadzonych na psach i owcach [33]. Wpływ prądu rażenia na fibrylację serca przebadał dokładnie H.Antoni na uniwersytecie we Freiburgu. H. Antoni przeprowadził obserwacje na świnich, które posiadają serce wagowo porównywalne z sercem człowieka.

E. Wagner z końcem lat pięćdziesiątych zbadał zjawisko występowania zmian w skórze porażonych w zależności od gęstości prądu i czasu trwania rażenia [2].

G. Biegelmeier z Wiednia wykonał w 1969 roku bardzo dokładne pomiary impedancji ciała człowieka zwilżonego 3% roztworem wodnym soli kuchennej. Stwierdził, że narządy wewnętrzne ciała mają charakter rezystancyjny w odróżnieniu od rezystancyjno-pojemnościowego charakteru skóry. Określił wartość rezystancji wewnętrznej ciała  $R_i=781\pm 114 \Omega$ , a wartość impedancji ciała  $Z=3500\pm 1400\Omega$  [6]. Swoje wyniki badań przeanalizował metodami statystycznymi. Wartość elektrycznej pojemności ciała określił od 0,006 do 0,05  $\mu\text{F}/\text{cm}^2$  [4]. Wyniki i osiągnięcia Biegelmeiera stanowiły podstawę dla Międzynarodowej Komisji Elektrotechnicznej IEC, która w 1984 roku opracowała raport nr 479-1 [68] działania prądu na ciało człowieka. Przyjęte w Europie jako podstawowe zależności impedancji ciała człowieka na drodze ręka-ręka według normy [68] przedstawiono w tab. 2.1. W raporcie tym przedstawiono również strefy skutków występujących w organizmie w wyniku rażenia prądem (rys. 2.8).

D. Kieback z Instytutu Badań Wypadków Elektrycznych w Koloni współpracując z Instytutem Biomedycyny na Uniwersytecie w Karlsruhe określił w roku 1989 wartości rezystywności poszczególnych organów i tkanek człowieka [38].

Liczne badania i doświadczenia z elektrofizjologii przeprowadzono w Związku Radzieckim w latach sześćdziesiątych [34]. B.E.Manojłow przebadął elektrofizjologię włókien nerwowych skóry i innych tkanek. Stwierdził, że na wartości prądu rażenia człowieka wpływają takie czynniki środowiskowe, jak: temperatura, wilgotność, hałas, gazy zawarte w atmosferze pomieszczenia [47].

Polska posiada również swój wkład w badania z zakresu elektropatologii. W latach sześćdziesiątych Z.Teresiak z Politechniki Wrocławskiej wykonał pomiary impedancji ciała zwierząt, a wyniki transformował na warunki ciała człowieka. Określił wartości medialne impedancji ciała człowieka dla potrzeb techniki ochrony przeciwporażeniowej.

F. Krasucki z Wydziału Górnictwa i Geologii z Politechniki Śląskiej w Gliwicach przeprowadził w latach sześćdziesiątych wnikliwe badania nad rezystancją ciała człowieka. Przebadął czynniki środowiska górniczego wpływające na wartość rezystancji ciała człowieka oraz opracował

logarytmiczny model rezystancji ciała w funkcji napięcia rażenia [40]. W. Korniluk z Politechniki Białostockiej opracował model impedancji ciała człowieka w kategoriach probabilistycznych [39]. Również H. Markiewicz, J. Masny i W. Jabłoński z Politechniki Wrocławskiej przebadali zagadnienie prądu rażenia ze szczególnym uwzględnieniem rażeń prądem stałym.

## 2.2. Czynniki wpływające na impedancję ciała człowieka

Ciało człowieka jako element obwodu elektrycznego nie stanowi przewodnika jednorodnego, lecz ma charakter przewodnika anizotropowego. Impedancja ciała człowieka zależy od czynników biofizycznych i warunkuje go rezystancja przejścia, impedancja skóry oraz rezystancja organów wewnętrznych organizmu.

Rezystancja przejścia prądu elektrycznego przez skórę zależy od napięcia rażenia, powierzchni styczności i siły nacisku do elektrody oraz od zawilgocenia i stanu naskórka. Impedancja skóry zmienia się pod wpływem czynników zewnętrznych, a o jej wartości decydują zrogowaciały naskórek [5][20]. Bogate w elektrolity środowisko wewnątrz organizmu posiada bardzo małą rezystancję w porównaniu z impedancją skóry. Biegelmeier na podstawie przeprowadzonych badań [4] określił wartość rezystancji wewnętrznej ciała człowieka:  $R_i = 781 \pm 114 \Omega$ .

Impedancję ciała człowieka cechuje charakter rezystancyjno - pojemnościowy. Organy wewnętrzne organizmu posiadają charakter czysto rezystancyjny w odróżnieniu od rezystancyjno-pojemnościowego charakteru naskórka [7]. Argument impedancji ciała człowieka (kąąt przesunięcia fazowego) jest zmienny zależnie od warunków klimatycznych środowiska i zawiera się od  $15^\circ$  do  $55^\circ$  [26].

Na wartość impedancji ciała człowieka duży wpływ mają czynniki antropogenne, konstytucjonalne oraz stany patologiczne. Kobiety posiadają impedancję ciała większą niż mężczyźni. Spowodowane to jest bardziej rozwiniętą podskórną tkanką tłuszczową oraz gęstością gruczołów potowych mniejszą niż u mężczyzn. Mężczyźni pocą się silniej pod wpływem bodźców cieplnych, natomiast kobiety silniej pod wpływem bodźców nerwowych [51].

Istnieją u ludzi stany patologiczne, które zmieniają wartość impedancji ich ciała, a tym samym podatność na działanie prądu elektrycznego [5]. Niedobór witaminy A w organizmie powoduje wysychanie naskórka i tworzenie się grubej zrogowaciałej warstwy skóry o dużej wartości impedancji ciała [35]. Nadczynność tarczycy powoduje zmniejszenie impedancji skóry. Natomiast niedoczynność tarczycy powoduje wzrost impedancji ciała, gdyż skóra jest sucha i chłodna [12]. Również przebyta gruźlica zwiększa impedancje ciała [2].

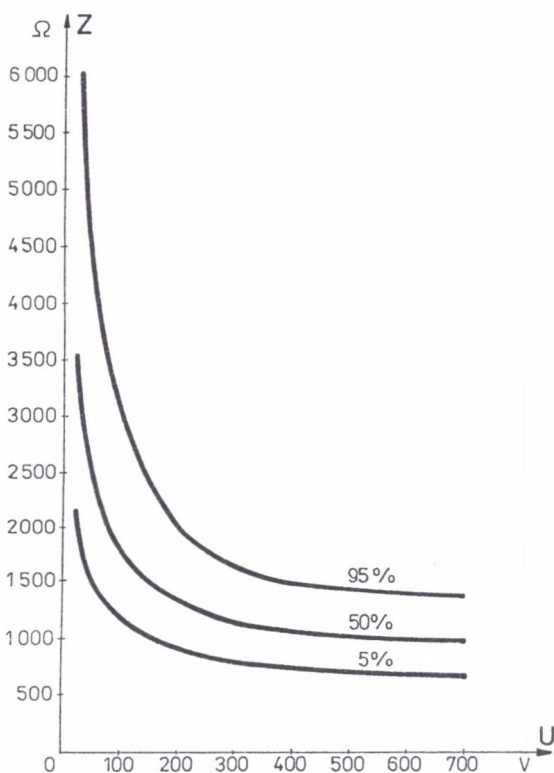
Szczególną właściwością tkanek żywych jest nieliniowe zmniejszanie się ich impedancji ze wzrostem napięcia. Na podstawie przeprowadzonych przez Biegelmeiera i innych licznych badań [3][5] i ich analizy metodami statystycznymi Międzynarodowa Komisja Elektrotechniczna IEC w raporcie nr 479-1 z roku 1984 ustaliła zależność zmian impedancji ciała człowieka od napięcia rażenia [68]. Opracowana w tym raporcie zależność dla suchego naskórka i drogi rażenia ręka - ręka przy styczności z elektrodami o powierzchni 50 do 100 cm<sup>2</sup> przedstawia tab. 2.1 oraz rys. nr 2.2.

Na wartość impedancji ciała człowieka wpływają również procesy fizjologiczne związane z wysiłkiem pracy fizycznej. Badania rosyjskie [47] wykonane na dole kopalni obrazują zmiany wartości impedancji ciała w miarę upływu czasu intensywnej pracy przy robotach przodkowych. Otrzymane w tych badaniach wyniki przedstawia rys 2.3. Z wykonanych badań [47] wynika, że po pięciu godzinach pracy górnika wartość impedancji ciała obniża się do 60% wartości impedancji na początku dniówki.

Warunki klimatyczne, jak też czynniki psychospołeczne oraz procesy fizjologiczne związane z wysiłkiem pracy dołowej wywołują w skórze człowieka zwiększone wydzielanie potu, co powoduje zmianę wartości impedancji ciała. Również takie bodźce środowiska zewnętrznego, jak: silny i przeraźliwy dźwięk, drgania i wibracje, rażące wzrok światło wpływają na zmiany wartości impedancji ciała człowieka.

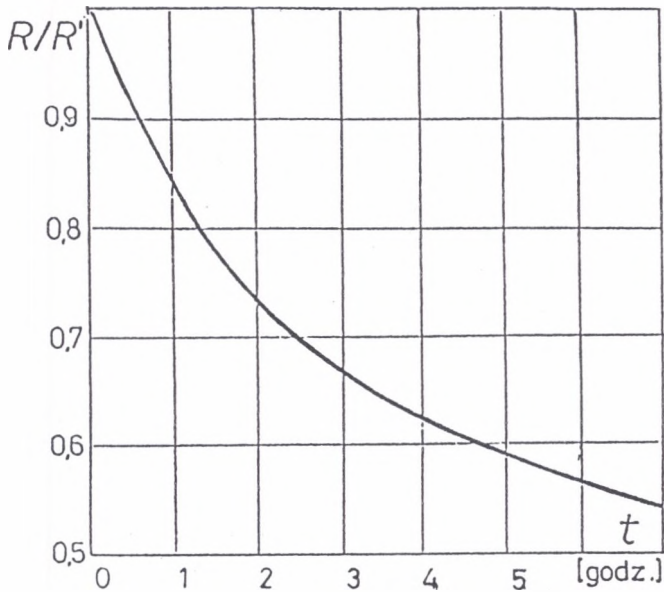
Tabela 2.1  
 Impedancja ciała człowieka w zależności od napięcia rażeniowego [68]

Napięcie rażeniowe (V)	Impedancja ciała człowieka ( $\Omega$ ) przy prawdopodobieństwie wystąpienia wartości niższych :		
	5%	50%	95%
25	1750	3250	6100
50	1450	2625	4375
75	1250	2200	3500
100	1200	1875	3200
125	1125	1625	2875
250	1000	1350	2125
700	750	1100	1550
1000	700	1050	1500
powyżej 1000	650	750	850



Rys. 2.2. Zależność impedancji ciała człowieka od napięcia rażenia (przebiegi zmian impedancji odpowiadają kwantylom 5% , 50% , 95% prawdopodobieństwa)

Fig. 2.2. Dependence of impedance of human's body on voltage of electrocution (changes's course of impedance which meet the quantile 5%, 50%, 95% of probability)



Rys. 2.3. Zależność zmiany rezystancji ciała człowieka w czasie pracy na dole kopalni; R - rezystancja ciała człowieka w czasie zmiany roboczej; R' - rezystancja ciała człowieka na początku zmiany roboczej, t - czas pracy (h)

Fig. 2.3. Dependence of resistance's of human's body during work in coal-mine; R - resistance of human's body during work's change, R' - resistance of human's body beginning work's change, t - time of work

### 2.3. Elektrofizjologia skóry człowieka

Skóra człowieka jest rozległym narządem o powierzchni około 1,6 - 2 m<sup>2</sup>, chroniącym narządy wewnętrzne przed wpływem środowiska zewnętrznego. Grubość skóry u człowieka wynosi od 250 μm do 4 mm (bez tkanki podskórnej)[51]. Najgrubsza skóra występuje na podeszwach, dłoniach i karku, gdzie są największe naprężenia mechaniczne. Skórę człowieka stanowią dwie charakterystyczne warstwy: naskórek (Epidermis) oraz skóra właściwa (Dermis, Corim) łącząca się z tkanką podskórną (Tela subcutanea), rys. 2.4.

Naskórek jest pokryty od zewnątrz warstwą rogową (Stratum corneum), która ulega złuszczeniu oraz warstwą zarodkową (Stratum germinativum) od wewnątrz. Warstwa rogowa składa się z komórek pozbawionych jąder, przylegających do siebie w dolnych warstwach, a luźno ułożonych na powierzchni. Komórki te ulegają złuszczeniu. Warstwa rogowa zawiera białka keratynowe, które wiążąc wodę nadają jej elastyczność. Błony komórkowe w warstwie rogowej naskórka są zbudowane z lipidów i regulują wraz z kreatyną proces wchłaniania i przenikania do skóry substancji rozpuszczalnych w wodzie i tłuszczach. Naskórek składa się w 90% z właściwych komórek naskórka (kreatynocytów) oraz z komórek układu immunologicznego i układu nerwowego [51]. Grubość naskórka wynosi zależnie od umiejscowienia skóry 0,04 - 0,4 mm.



Skóra właściwa o grubości od 0,5 mm do 1,7 mm jest włóknistą i elastyczną warstwą o dużej mechanicznej wytrzymałości, zbudowaną z włókien tkanki łącznej. W warstwie skóry właściwej zawarte są naczynia krwionośne i zakończenia nerwowe.

Tkanka podskórna, położona pomiędzy skórą właściwą a powięzią ustroju, otacza prawie całe ciało. Grubość tkanki podskórnej jest różna i zależy od: wieku, płci, rasy i okolicy ciała. Zawiera do 60% całkowitej masy tłuszczowej ustroju człowieka. Funkcją tkanki podskórnej jest izolacja cieplna i magazynowanie energii w zgromadzonym tłuszczu. Tkanka podskórna jest zbudowana z tkanki łącznej, w której zawarte są części wydzielnicze gruczołów potowych oraz naczynia krwionośne i włókna nerwowe.

Gruczoły potowe skóry (glandulae sudoriferae) są zewnątrzwydzielniczymi cewkowatymi gruczołami, które dzielą się na apokrynowe i ekrynowe [51].

Apokrynowe gruczoły potowe występują na całej skórze, są jednak głównie rozmieszczone w okolicach pachowych i pachwinowych. Składają się one z części wydzielniczej oraz kanału wyprowadzającego uchodzącego bocznie do mieszka włosowego. Apokrynowy pot cechuje się intensywnym zapachem. Pocenie to jest typu emocjonalnego, bez związku z termoregulacją.

Ekrynowe gruczoły potowe występują na całej skórze, a szczególnie na wewnętrznych powierzchniach rąk, podeszwach stóp, plecach i na czole. Liczba gruczołów potowych jest różna w różnych częściach ciała człowieka. Na rękach i stopach znajduje się około 370 gruczołów na  $1\text{cm}^2$ , zaś na przedramieniu około 160 gruczołów na  $1\text{cm}^2$  [51]. Składają się one z kłębkowej części wydzielniczej i krętego przewodu wyprowadzającego, który uchodzi bezpośrednio na powierzchnię skóry (rys. 2.4.). Gruczoły potowe mają okrągły kanalik, wielokrotnie spiralnie pokręcony w tkance podskórnej. Spiralnie pokręcone kanaliki potowe przebiegają przez skórę właściwą do naskórka, przybierając lejkowaty kształt. Gruczoły potowe otacza gęsty splot naczyń i nerwów. Kanaliki potowe zbudowane są z trzech warstw komórek [51]. Średnica kanalika potowego wynosi 0,02 mm [3]. Ekrynowy pot o odczynie pH od 4 do 8 jest bezbarwny i zawiera wodę, chlorek sodowy od 0.1+ 0.4% oraz śladowe ilości mocznika, cholesterolu i białka. Przeciętna ilość dobowa potu wynosi około 0,8 l, a w wyniku ciężkiej pracy do 10 l. [50]. Rezystywność potu przy stężeniu 0.3% soli kuchennej wynosi  $140\ \Omega\text{cm}$  [4]. Spocone miejsca zrogowaciałej warstwy skóry posiadają napełnione potem kanaliki potowe, stając się bardzo dobrym przewodnikiem prądu przez skórę do naczyń krwionośnych w tkance podskórnej.

Aby dokładnie zbadać właściwości elektryczne skóry należy przeanalizować budowę kanalika potowego napełnionego potem oraz określić jego rezystancję i reaktancję względem przewodzących warstw otoczenia.

Rezystancję kanalika napełnionego potem, pozwijanego w kłębuszki i przebiegającego od części wydzielniczej do ujścia w naskórku, można wyznaczyć ze wzoru :

$$R_k = \frac{\rho \cdot l}{S} = \frac{140\ \Omega\text{cm} \cdot 0,6\ \text{cm}}{3 \cdot 10^{-6}\ \text{cm}^2} = 28\ \text{M}\Omega, \quad (2.1)$$

gdzie:  $\rho$  - rezystywność potu  $140\ \Omega\text{cm}$ ,

$S$  - pole powierzchni przekroju kanalika potowego przy  $d = 0,02\ \text{mm}$  [3],

$l$  - długość kanalika potowego.

Dla powierzchni skóry człowieka z usytuowanymi równolegle 370 kanalikami na  $1\ \text{cm}^2$  rezystancja skóry wyniesie  $R_s = 75\ \text{k}\Omega/\text{cm}^2$ .

Pojemność elektryczną skóry powoduje zrogowaciała warstwa naskórka, będąca dielektrykiem [32]. Rozpatrując kanalik potowy jako specyficzny warstwowy kondensator cylindryczny w tkankach przewodzących można oszacować jego pojemność. Kanalik potowy jest otoczony czterema warstwami błon komórkowych o grubości  $\delta_0 = 0,03\ \mu\text{m}$  [3] [69]. Aby wyznaczyć jego pojem-



ności, należy określić pojemność poszczególnych warstw błon komórkowych, które są ze sobą połączone szeregowo (rys. 2.5). Powierzchnie tych kondensatorów  $A_1, \dots, A_4$  wyznaczamy uwzględniając czynną długość koralika  $l$ .

$$\begin{aligned}
 C_1 &= \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot A_1}{\delta_0} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot 2\pi r \cdot l}{\delta_0} \\
 C_2 &= \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot A_2}{2\delta_0} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot 4\pi r \cdot l}{3\delta_0} = \frac{2}{3} C_1 \\
 C_3 &= \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot A_3}{2\delta_0} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot 5\pi r \cdot l}{6\delta_0} = \frac{5}{6} C_1 \\
 C_4 &= \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot A_4}{\delta_0} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_0 \cdot 4\pi r \cdot l}{\delta_0} = 2C_1
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

Pojemność kanalika potowego z szeregowo połączonymi warstwami błon komórkowych wynosi :

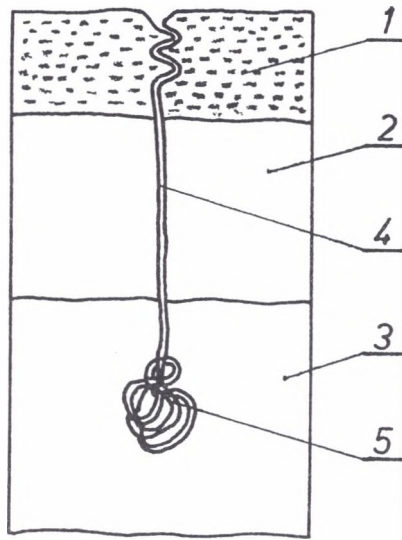
$$\frac{1}{C_K} = \frac{1}{C_1} \left( 1 + \frac{3}{2} + \frac{6}{5} + \frac{1}{2} + \frac{4}{C_1} \right) = \frac{4}{C_1} \tag{2.3}$$

Uwzględniając promień kanalika potowego  $10\mu\text{m}$ , jego długość  $l=3\text{mm}$  oraz przenikalność dielektryczną względną dla lipidów  $\varepsilon = 6$  [3][69] równanie (2.3) po podstawieniu można zapisać :

$$C_K = \frac{C_1}{4} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot 2\pi r \cdot l}{4\delta_0} = \frac{6 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot 3,14 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 10^{-8}} = 4 \cdot 10^{-5} \mu\text{F} \tag{2.4}$$

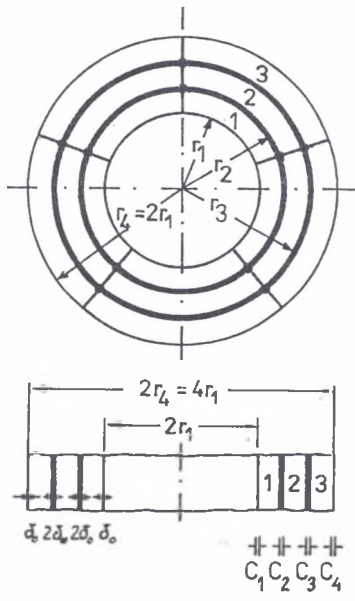
Pojemność skóry dla 370 kanalików na  $1\text{cm}^2$  wynosi  $C_s = 0,015 \mu\text{F}/\text{cm}^2$ . Reaktancja skóry dla częstotliwości 50 Hz wynosi  $X_s = 0,2 \text{M}\Omega/\text{cm}^2$ . Pojemność elektryczna skóry człowieka została doświadczalnie zbadana przez Biegelmeiera, który określił jej wartość od 0,006 do  $0,5 \mu\text{F}/\text{cm}^2$  [4].

Pojemność naskórka jest proporcjonalna do przenikalności dielektrycznej ośrodka  $\varepsilon \cdot \varepsilon_0$  oraz powierzchni dotyku do elektrody, zaś odwrotnie proporcjonalna do grubości zrogowiałej warstwy naskórka [3]. W skórze człowieka dielektryk stanowią biologiczne błony komórkowe, których anizotropia dielektryczna zmienia się ze zmianą temperatury. Bazę strukturalną błon biologicznych stanowi podwojona warstwa molekuł lipidów uporządkowanych względem siebie [62][69]. Podwojone warstwy lipidowe zmieniają swoje właściwości w kontakcie z rozpuszczalnikiem, jakim jest pot człowieka. Oznacza to, że reaktancja skóry zmienia się zależnie od napięcia potem kanalików potowych.



Rys. 2.4. Budowa skóry człowieka; 1 - warstwa rogowa, 2 - skóra właściwa, 3 - tkanka podskórna, 4 - kanałik potowy, 5 - gruczoły potowe

Fig. 2.4. Structure the human skin; 1 - horny layer, 2 - dermis, 3 - subcutaneous tissue, 4 - canal of sweat gland, 5 - sweat glands



Rys. 2.5. Model pojedynczego kanału potowego; 1,2,3 - warstwy komórkowe,  $\delta$  - błona komórkowa

Fig. 2.5. Model of a perspiration duct; 1, 2, 3 - membrane layers,  $\delta$  - plasma membrane

## 2.4. Wpływ środowiska pracy na elektrofizjologię ciała człowieka

Środowisko pracy człowieka nie jest stałe i dlatego narzuca organizmowi konieczność przystosowania się do zachodzących zmian. Informacje o środowisku zewnętrznym człowieka (klimat, hałas, wibracje, wrażenia wzrokowe i inne) docierają do ośrodkowego układu nerwowego za pośrednictwem różnego rodzaju receptorów. Organizm człowieka zawiera receptory czucia przekazujące informacje uświadamiane, stanowiące obwodowy układ nerwowy oraz informacje poza jego świadomością, stanowiące autonomiczny układ nerwowy [35]. Receptory te spełniają rolę przetworników przekształcających różne formy energii środowiska zewnętrznego na potencjały czynnościowe w neuronach [12]. Informacje o różnicy w natężeniu danego wrażenia zmysłowego przekazywane są przez zmianę częstotliwości potencjałów w nerwach czuciowych lub przez zmianę liczby pobudzanych receptorów [12]. Bódcze środowiska zewnętrznego działające na receptory wywołują odruchy. Powstałe odruchy uaktywniają w ośrodkowym układzie nerwowym efekторы organizmu właściwe do pobudzającego bodźca.

Zmienność środowiska zewnętrznego człowieka pobudza receptory czucia, których potencjał czynnościowy przekazywany jest poprzez układ włókien nerwowych do kory mózgu [12]. Pod korą mózgową leży istota biała, zbudowana z aksonów komórek nerwowych, której włókna nerwowe tworzą połączenia między ośrodkami korowymi a innymi częściami układu nerwowego człowieka [62]. Główne aferentne i eferentne drogi nerwowe mózgu połączone są z podwzgórzem, które jest ośrodkiem autonomicznego układu nerwowego. Podwzgórze jest to część mózgowia, w której mieszczą się ośrodki homeostazy organizmu [12]. Ośrodki te regulują procesy życiowe człowieka tak, aby różne czynniki nie powodowały przekroczenia fizjologicznie dopuszczalnych granic. Ważną funkcję w procesie homeostazy, a zwłaszcza termoregulacji odgrywa skóra człowieka. Unerwienie skóry stanowią włókna biegnące od układu ośrodkowego oraz włókna układu autonomicznego. W ten sposób skóra staje się narządem zmysłu i odbiera wrażenia dotykowe, bólu, temperatury i czucia mechanicznego. Impulsy, które pobudzają czynność podwzgórza, pochodzą z aferentnych (doprowadzających) neuronów połączonych z korą mózgu oraz receptorów skórnych wrażliwych na temperaturę otoczenia [35]. Podwzgórze jest połączone z przysadką mózgową i tworzy pomost między czynnościami mózgu a mechanizmami fizjologicznymi ustroju [12]. Pobudzenie podwzgórza powoduje między innymi zmianę czynności gruczołów potowych skóry, co jest przyczyną zmian parametrów fizycznych a szczególnie impedancji ciała.

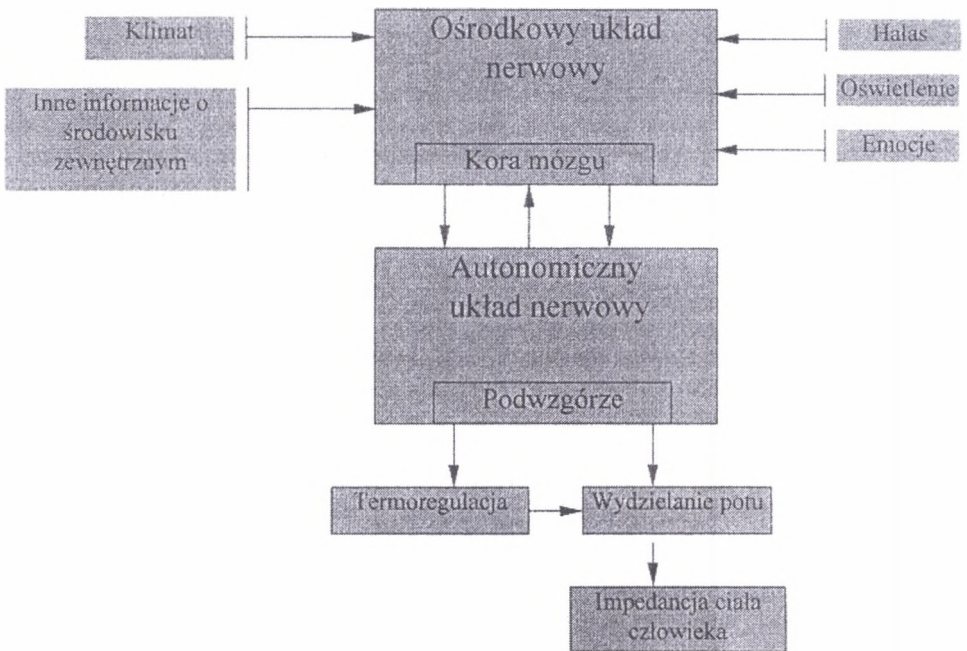
W podwzgórzach zawarty jest ośrodek termoregulacji oraz inne ośrodki kontrolujące zmysły. Ośrodek termoregulacji utrzymuje na stałym poziomie temperaturę ciała człowieka [35]. Receptory czucia temperatury zlokalizowane są pod naskórkiem i przez włókna nerwowe przekazują informacje do kory mózgu oraz podwzgórza [12]. Skórne receptory ciepła i zimna pobudzane są, gdy temperatura otoczenia różni się od temperatury normalnej ciała człowieka. Reakcje pobudzone przez ciepło kontrolowane są przez podwzgórze przednie [35]. Drażnienie podwzgórza przedniego powoduje rozszerzenie naczyń skórnych i zwiększoną czynność gruczołów potowych w skórze człowieka [50]. Reakcje pobudzone przez zimno kontrolowane są przez podwzgórze tylne. Drażnienie podwzgórza tylnego wywołuje dreszcze, uczucie zimna oraz zmniejszenie czynności gruczołów potowych i skurcz naczyń skórnych [12].

Odbierane przez narząd wzroku bodźce świetlne związane z oświetleniem miejsca pracy pobudzają receptory znajdujące się w siatkówce oka. Nerw wzrokowy przewodzi impulsy nerwowe od siatkówki do ośrodków wzrokowych kory mózgowej [35]. Aksony neuronów drogi wzrokowej odzwierciedlają w korze mózgowej przestrzenną reprezentację siatkówki. Ośrodki wzrokowe kory mózgu połączone z podwzgórzem współdziałają z autonomicznym układem nerwowym człowieka [12]. Wrażenia wzrokowe związane z niewłaściwym oświetleniem miejsca pracy pobudzają czynność podwzgórza [53]. Skutkiem pobudzenia podwzgórza jest zmiana czynności gruczołów skóry, co powoduje zmianę impedancji ciała człowieka.

Środowisko pracy na dole kopalni oddziałuje na człowieka również poprzez bodźce akustyczne oraz wibracje. Odbierane przez narząd słuchu bodźce akustyczne środowiska zewnętrznego człowieka powodują wygenerowanie impulsów nerwowych przez komórki rzęsaste w ślimaku ucha [12]. Sygnały te docierają nerwową drogą słuchową do ośrodków słuchowych w korze mózgu. Połączenie ośrodków słuchowych kory mózgu z podwzgórzem powoduje, że odbierane wrażenia zmysłowe wywołują reakcje odruchowe u człowieka, które wpływają na czynność gruczołów skóry [12]. Narazenie człowieka na drgania przez środowisko techniczne kopalni również powoduje wzrost aktywności gruczołów w skórze. Zmiana czynności gruczołów potowych w skórze powoduje zmianę wartości impedancji ciała człowieka.

Czynniki środowiska zewnętrznego oraz bodźce emocjonalne działają na ośrodkowe i obwodowe drogi układu współczulnego. Emocje oddziałujące na fizjologię człowieka to przypadkowe, niezorganizowane reakcje na bodźce, które obejmują: postrzeganie, świadomość wrażeń oraz afekt wzruszenia się [53]. Podwzgórze steruje emocjami jak i ich powstawianiem [12]. Stany emocjonalne powodują zmiany fizyczne w organizmie, takie jak: wzrost ciśnienia tętniczego krwi, przyśpieszenie pracy serca oraz pobudzają gruczoły potowe skóry do wydzielania potu [44]. Między fizjologią skóry a psychiką człowieka istnieją ściśle wzajemne związki [51]. Emocje, sytuacje stresowe wpływające na psychikę i fizjologię skóry wywołują zmiany wartości impedancji ciała człowieka.

Wpływ bodźców środowiska pracy na zmianę wartości impedancji ciała człowieka pokazano schematycznie na rys. 2.6.



Rys. 2.6. Schemat oddziaływania bodźców środowiska pracy na impedancję ciała człowieka  
Fig. 2.6. Scheme of influence of outer habitat's on human's body



## 2.5. Skutki rażenia prądem elektrycznym zależne od drogi przepływu w ciele człowieka

Skutki działania prądu elektrycznego zależne są od wartości natężenia prądu uwarunkowanego napięciem i impedancją ciała człowieka w chwili rażenia. Droga przepływu prądu rażenia w ciele człowieka ma istotny wpływ na wartość impedancji ciała, a tym samym na wartość jego natężenia [13], [19]. Na podstawie analiz zaistniałych wypadków elektrycznych w górnictwie wyodrębniono typowe drogi przepływu prądu rażenia przez ciało poszkodowanego, które przedstawiono w tab. 2.2 [16].

Tabela 2.2  
Typowe drogi przepływu prądu rażenia  
w organizmie człowieka podczas wypadków  
elektrycznych

Typ drogi	Droga rażenia w ciele człowieka
A	ręka – ręka
B	ręka - nogi
C	ręka - tułów (plecy)

Przepływ prądu rażenia na drodze ręka - ręka (typ A) występuje najczęściej w wypadkach, gdy poszkodowany jedną ręką dotyka uziemionego korpusu urządzenia, a drugą elementu będącego pod napięciem lub gdy poszkodowany dotyka rękoma elementów o różnych potencjałach.

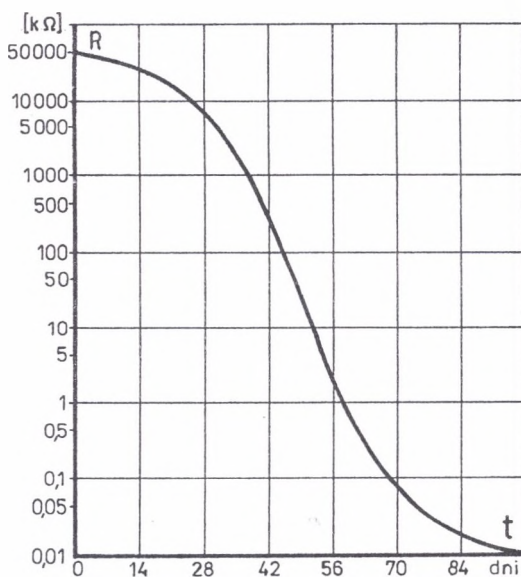
Przepływ prądu rażenia na drodze ręka - nogi (typ B) występuje w wypadkach, gdy poszkodowany stoi na mokrym spągu w butach roboczych o małej rezystancji i dotyka ręką lub rękoma elementów pod napięciem. Dla tej drogi rażenia, w której prąd rażenia przepływa do nóg poszkodowanego, przyjąć należy, że poszkodowany stoi na spągu w górniczych butach roboczych, których wartość rezystancji przejścia jest zmienna i zależy w dużym stopniu od warunków i okresu ich użytkowania. Wykonane badania [17] obuwia użytkowanego przez elektromonterów dołowych zatrudnionych w wyrobiskach ścianowych i na robotach przygotowawczych wykazały, że rezystancja buta po trzech miesiącach noszenia obniża się praktycznie do zera. Nowe obuwie robocze posiada rezystancję  $45 \text{ M}\Omega \pm 13 \%$ . Zmianę wartości średniej rezystancji obuwia w czasie noszenia na dole kopalni pokazano na rys. 2.7. Z badań wynika, że większość górników użytkuje obuwie o rezystancji bardzo małej lub równej zero. W działaniach profilaktycznych i analizie zagrożeń rażeniowych w przypadku, gdy prąd rażenia płynie do nóg poszkodowanego, należy uwzględnić tylko impedancję ciała człowieka.

Przepływ prądu rażenia na drodze ręka - tułów (plecy) (typ C) występuje w wypadkach, gdy poszkodowany opiera się plecami lub tułowiem o uziemiony korpus urządzenia, a ręką dotyka elementów urządzeń będących pod niebezpiecznym napięciem. Wypadki takie dotyczą głównie elektromonterów pracujących na dole kopalni bez koszul roboczych, przy niewłaściwym zabezpieczeniu stanu wyłączenia napięcia, np. podczas wymiany listwy stykowej w ognioszczelnym wyłączniku stycznikowym.

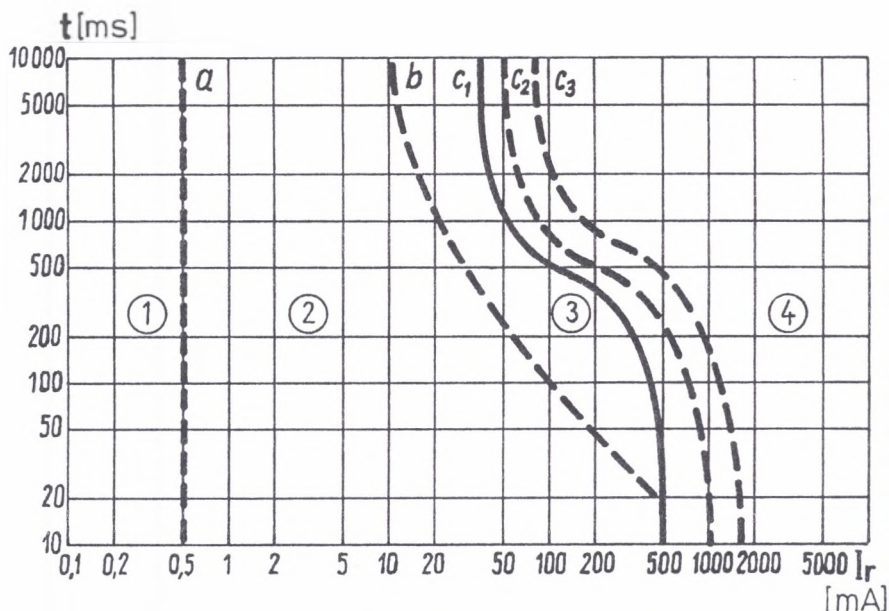
Niebezpieczne skutki rażenia człowieka zależą w dużym stopniu od tego, czy na drodze przepływu prądu znajdują się ważne dla życia organy (serce, mózg, płuca). Skutki rażenia mogą być nieodczuwalne, mogą powodować przykre odczucie (mrowienie, bolesne skurcze mięśni), mogą powodować: oparzenie tkanek, wstrzymanie oddechu oraz wstrzymanie pracy serca lub fibrylację jego komór [48]. Opracowany przez Międzynarodową Komisję Elektrotechniczną IEC raport nr 479 [68] przedstawia skutki oddziaływania prądu przemiennego 50 Hz na ciało człowieka. Zależność wartości prądu rażenia od czasu działania oraz spodziewane reakcje organizmu człowieka dla prądu

przemienneego pokazano na rys. 2.8. Minimalną wartość prądu, która wywołuje jego odczucie, nazywa się prądem percepcji (prosta „a” na rys.2.8). W strefie 1, ograniczonej prostą „a” i początkiem układu współrzędnych, zazwyczaj brak jest odczuć działania elektryzacji. Jeżeli natężenie prądu będzie się nadal zwiększać (strefa 2), to wystąpią drętwienie, ból i skurcze włókien mięśniowych. Przy określonej, osobniczo zmiennej wartości natężenia prądu skurcze mięśni są tak silne, że uniemożliwiają otwarcie dłoni. Wartość natężenia prądu  $\sim 10$  mA, przy której jest jeszcze możliwe rozwarcie palców, nosi nazwę prądu samouwolnienia. W strefie 3 pomiędzy krzywymi „b” i „c<sub>1</sub>” - w miarę wzrostu natężenia prądu - nasila się ból, występują skurcze mięśni poprzecznie prążkowanych oraz mięśni oddechowych. Występujący niekiedy w tym stadium skurcz naczyń wieńcowych może doprowadzić do zawału mięśnia serca [68]. Obserwuje się też inne zaburzenia w pracy serca, z migotaniem przedsionków włącznie. W strefie 4 powyżej krzywej c<sub>1</sub>, oprócz skutków opisanych w strefie 3, prąd rażenia płynący przez okolice serca może wywołać migotanie komór serca, co jest równoznaczne z zatrzymaniem jego czynności i ustaniem krążenia krwi. Ten rodzaj zaburzeń pracy serca jest uważany za podstawową przyczynę zgonów podczas porażeń prądem elektrycznym.

Przepływ prądu rażenia o gęstości prądu do  $10 \text{ mA/mm}^2$  nie powoduje żadnych zmian w skórze [3]. Niekiedy jest widoczne, że naskórek pod elektrodą posiada o szarobiały kolor oraz szorstką papilarną powierzchnię. Przy gęstości prądu rażenia większej niż  $10 \text{ mA/mm}^2$  obserwuje się przy obrzeżu elektrody niewielkie wzniesienie na naskórku. Gęstość prądu rażenia powyżej  $32 \text{ mA/mm}^2$  powoduje przebicie elektryczne naskórka [23]. Stwierdzić można na skórze punktowe szarobiałe znamiona prądowe. Przy dłuższym działaniu prądu w miejscu dotyku do elektrody tworzy się czerwony obrzęk. Przepływ prądu o gęstości większej od  $50 \text{ mA/mm}^2$  powoduje w okolicy dotknięcia ciała z elektrodą powstanie brązowych plam, które przeobrażają się w pęcherze [23]. Przekroczenie gęstości prądu ponad  $70 \text{ mA/mm}^2$  powoduje zwęglenie skóry [23]. Suchy naskórek posiada większą tendencję do zwęglania, zaś wilgotny do pęcherzy. Przy rażeniu na dużej powierzchni dotyku mogą wystąpić niebezpieczne skutki rażenia, nawet gdy gęstość prądu jest niewielka.



Rys. 2.7. Zmiana rezystancji obuwia roboczego elektromonterów w czasie ich użytkowania na dole kopalni  
 Fig. 2.7. Resistance's change of work shoes of wireman during their utilization in coal-mine



Rys. 2.8. Strefy czasowo-prądowe skutków rażenia prądem przemiennym o częstotliwości 15-100 Hz; t - czas trwania rażenia,  $I_r$  - prąd rażenia

Fig. 2.8. Time - current zones of effects of a.c. currents (15 Hz to 100 Hz) on persons; t - Duration of current flow,  $I_r$  - Body current

## 2.6. Metoda badań impedancji ciała człowieka

Większość badań wartości impedancji ciała człowieka przeprowadzonych w różnych okresach i przez różnych badaczy była wykonywana poprzez pomiary na drodze rażenia: ręka - ręka lub ręka - nogi. Uwzględniając zagrożenia oraz szczególnie trudne warunki klimatyczne i organizacyjne w czynnych wyrobiskach podziemia kopalni, wykonywanie pomiarów impedancji ciała człowieka na pomiarowej drodze rażenia: ręka - ręka lub ręka - noga uważa się za zbyt ryzykowne dla osób badanych. Należało opracować takie warunki badań, aby pomiary nie stwarzały zagrożenia dla zdrowia i życia badanych. Wobec tego dla badań zmian wartości impedancji ciała człowieka pod wpływem wybranych uciążliwości ergonomicznych przyjęto tak zwaną standardową drogę pomiarowego rażenia, metodę możliwie najbezpieczniejszą i uwzględniającą zjawiska mikroklimatyczne i środowiskowe występujące na dole kopalni.

W wykonywanych pomiarach przyjęto jako drogę standardową odcinek od opuszka palca środkowego do opuszka kciuka tej samej ręki. Wartość tak określonej standardowej impedancji ciała  $Z_0$  mierzono metodą techniczną, dociskając opuszki palców do miedzianej elektrody płaskiej. Powierzchnia dotyku palca do elektrody wynosiła  $330 \text{ mm}^2$  przy sile docisku 6 N.

W celu wyznaczenia impedancji ciała dla rzeczywistej (typowej - tabela 2.2) drogi rażenia wprowadzono współczynnik transformacji  $\xi$ , umożliwiający przeliczenie wartości impedancji standardowej  $Z_0$ , określonej na drodze przyjętej jako standardowa, na impedancję ciała  $Z$  dla typowych dróg rażenia. Wartość współczynnika transformacji  $\xi$  określono wzorem:

$$\xi = \frac{Z_0}{Z}, \quad (2.5)$$

gdzie:  $\xi$  - współczynnik transformacji drogi rażenia,  
 $Z_0$  - wartość impedancji ciała dla standardowej drogi rażenia,  
 $Z$  - wartość impedancji ciała dla typowych dróg rażenia prądem.

Wartości współczynników  $\xi$  transformacji impedancji standardowej ciała człowieka w odniesieniu do impedancji ciała dla typowych dróg rażenia w wypadkach wyznaczone zostały metodą empiryczną [16] i przedstawione w tab. 2.3. Przeprowadzone badania wartości impedancji ciała  $Z_0$  i  $Z$  zostały wykonane w stałych warunkach środowiskowych, napięciem rażenia (50 Hz) o wartościach do 25 V. Pomiary wartości impedancji ciała  $Z$  dla typowych dróg rażenia wykonano stosując miedziane- elektrody pomiarowe: płaskie dla nóg o wymiarach 300 × 300 mm, płaską o wymiarach 25 × 48 mm dla tułowia oraz tulejkę o średnicy 22 mm i długości 67 mm zaciskaną w dłoni badanej osoby. Dla każdej typowej drogi rażenia wykonano 48 pomiarów na górnikach w wieku 28 – 40 lat.

Tabela 2.3

Wartość współczynników  $\xi$  transformacji impedancji standardowej ciała do rzeczywistej impedancji ciała

Typ drogi	Droga przepływu prądu rażenia	Współczynnik transformacji $\xi$	Przedział ufności dla estymacji
A	ręka - ręka	6	4,5 ÷ 6,2
B	ręka - nogi	10	8,6 ÷ 12,1
C	ręka - plecy ręka - tułów	9	8,7 ÷ 10,9

Uwzględniając fakt, że nie wszystkie czynniki wpływające na wartość impedancji ciała są znane, a z tych, które są znane, nie wszystkie są mierzalne, weryfikację współczynnika  $\xi$  transformacji drogi rażenia przeprowadzono metodami statystyki matematycznej [79]. W celu zbadania rodzaju rozkładu wartości badanego współczynnika zastosowano zgodnie z normą PN-83/N-01052.07 [81] test  $\lambda$ -Kołomogorowa. Na podstawie wyników testu przeprowadzonego oddzielnie dla każdej badanej drogi rażenia wyznaczono wartość statystyki  $\lambda$  oraz wartość krytyczną rozkładu  $\lambda_\alpha$  zgodnie z normą [80]. Po porównaniu wartości statystyki  $\lambda$  z wartością krytyczną  $\lambda_\alpha$  dla poziomu istotności  $\alpha = 0,05$  postawiono wniosek, że badany rozkład jest zgodny z rozkładem normalnym [16][20].

W celu przeprowadzenia estymacji współczynnika  $\xi$  określono liczbowo taki przedział, na podstawie wykonanych pomiarów, aby z dostatecznym stopniem uzasadnienia probabilistycznego można było przypuszczać, że szacowany współczynnik  $\xi$  znajduje się wewnątrz przedziału [61]. Przedział ten, zwany przedziałem ufności Neymana, określony został przy założonym współczynniku ufności  $1-\alpha$  wynoszącym 0,95 (tab. 2.3). Współczynnik ufności  $1-\alpha$  wg teorii Neymana określa prawdopodobieństwo, że wartość badanego współczynnika znajduje się wewnątrz przedziału. Oznacza to, że tylko  $\alpha \cdot 100\%$  przypadków wartości szacowanego parametru przypadnie poza przedziałem ufności. Weryfikacja hipotez statystycznych polega na zastosowaniu testu istotności, który rozstrzyga, w jakich warunkach przyjętą hipotezę należy odrzucić, a przy jakich nie ma podstawy do jej odrzucenia. Po przeprowadzeniu testu istotności zgodnie z normą PN-83/N-01052.02 [80] dla poziomu istotności  $\alpha = 0,01$  wysunięto wniosek [16][20], że nie istnieje podstawa do odrzucenia przyjętej hipotezy o wartościach współczynnika  $\xi$ .

Wyznaczona tą metodą wartość impedancji ciała dla rzeczywistej (typowej) drogi przepływu prądu rażenia prowadzi do wyników porównywalnych z danymi w raporcie [68] opracowanym przez Międzynarodową Komisję Elektrotechniki IEC [16].



Przeprowadzone przez Biegelmeiera [5] badania zmian impedancji ciała człowieka zależnie od napięcia rażenia i powierzchni dotyku ciała do elektrody wykazały, że przy napięciu powyżej 220 V pole powierzchni dotyku nie odgrywa większej roli. Z analiz wypadków porażen na dole kopalni i praktyki dołowej można określić, że powierzchnia dotyku podczas porażen prądem w kopalniach zazwyczaj jest mniejsza niż 400 mm<sup>2</sup>, stąd wniosek, że przyjęta do badań powierzchnia standardowa dotyku odpowiada prawdopodobnej powierzchni dotyku podczas faktycznych porażen w górnictwie.

Wartość impedancji skóry człowieka zmienia się w czasie przepływu prądu rażenia. Według opracowań Kupfera i Teresiaka [45] stan nieustalony prądu rażenia stabilizuje się po 0,1s. W wypadkach, gdy czas rażenia prądem jest dłuższy od 0,1s, można pominąć zależność impedancji ciała od czasu rażenia.

Drażnienie prądem elektrycznym systemu nerwowego człowieka powoduje w jego organizmie wystąpienie procesów zmian biofizycznych [5]. Naturalne zawilgocenie naskórka w miejscu styku z elektrodą w wyniku przepływu prądu rażenia powodowane jest tzw. odruchem skórno - galwanicznym. Odruch ten powoduje zmiany parametrów elektrycznych pomiędzy ciałem człowieka a powierzchnią dotyku elektrody. Przy dłuższym czasie przepływu prądu wzrasta nagrzanie w miejscu przejścia prądu z elektrody do ciała człowieka, skóra poci się, a impedancja naskórka maleje.

W celu uniknięcia błędów metodycznych w prowadzonych badaniach impedancji ciała człowieka przeprowadzono pomiary wpływu zjawiska odruchu skórno - galwanicznego na wartość mierzonej impedancji. W tym celu przeprowadzono pomiary zmian wartości impedancji i rezystancji standardowej ciała człowieka w funkcji czasu przepływu prądu rażenia. Badania przeprowadzono na przyjętym odcinku drogi standardowej w klimacie wynoszącym 14,5 katastopni wilgotnych. Wartość impedancji mierzone w czasie 140 s przepływu prądu rażenia. Pomiary wykonano napięciem prądu przemiennym ( 50 Hz ) o wartościach: 14 V, 27 V, 40 V oraz napięciem stałym 20 V i 25 V. Dla każdej wartości pomiarowego napięcia rażenia przeprowadzono 24 serie pomiarów w funkcji czasu. Wartości średnie mierzonej impedancji i rezystancji standardowej w czasie przepływu prądu rażenia przedstawia tab. 2.4. Graficzny przebieg zmian impedancji standardowej i rezystancji standardowej ciała w czasie przepływu prądu elektrycznego pokazano na rys. 2.9.

Tabela 2.4

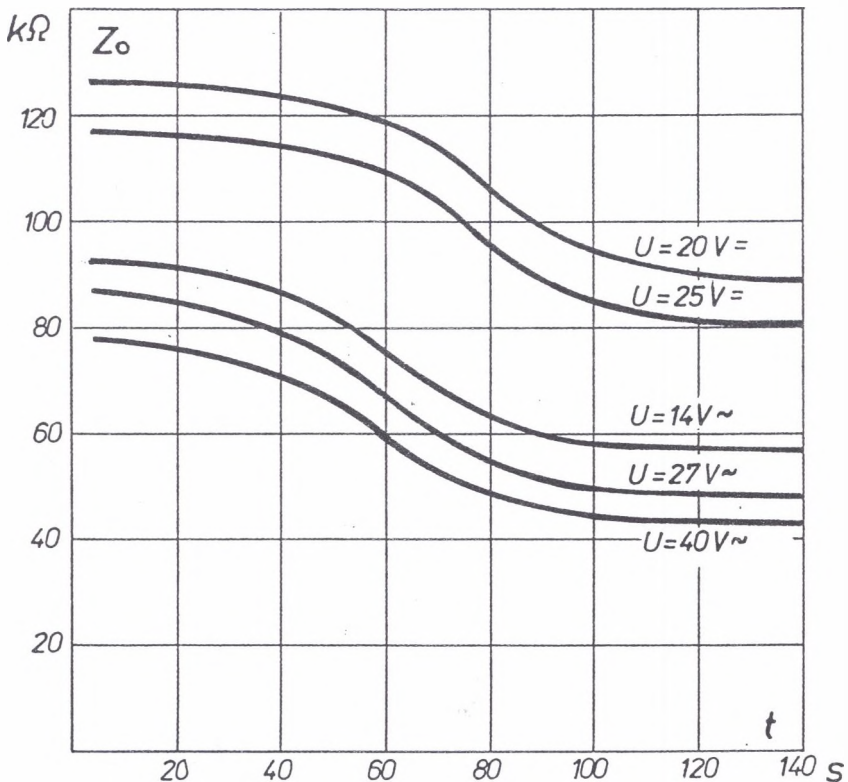
Zmiana wartości impedancji i rezystancji standardowej ciała człowieka w czasie przepływu prądu rażenia oraz wartość odchylenia standardowego (s)

Czas rażenia	U=14V ~		U=27V ~		U=40V ~		U=20V =		U=25V =	
	Z <sub>0</sub>	s	Z <sub>0</sub>	s	Z <sub>0</sub>	s	R <sub>0</sub>	s	R <sub>0</sub>	s
s	kΩ		kΩ		kΩ		kΩ		kΩ	
2	91	12	87	10	80	12	127	11	118	12
5	91	11	86	11	79	10	127	12	118	12
10	91	10	86	8	79	9	126	12	117	12
15	91	7	85	6	78	9	126	13	117	11
20	90	8	84	10	77	11	126	11	117	11
30	90	7	83	9	76	9	125	9	116	10
40	88	7	79	7	72	7	124	8	115	7
50	84	9	74	8	67	7	122	8	113	8
60	75	9	69	8	61	9	119	7	110	9
80	62	7	55	8	48	6	105	7	95	7
100	58	6	49	5	44	7	98	8	84	9
120	57	5	48	6	43	5	89	7	81	7
140	57	6	48	6	43	4	89	7	81	7

Po zakończeniu pomiarów i odjęciu opuszków palców od elektrod zauważono każdorazowo na miedzianej elektrodzie obrys powierzchni dotyku pokryty mikrokropelkami rosy. Zmiana wartości impedancji ciała człowieka dotykającego do elektrody w czasie przepływu prądu rażenia oraz występowanie rosy na elektrodzie spowodowane są zjawiskiem odruchu skórno - galwanicznego.

Przeprowadzone pomiary zmian wartości impedancji ciała człowieka w czasie przepływu prądu rażenia przy napięciu dotyku do 40V wykazały, że do 30 sekund wartość impedancji jest praktycznie stała. Po upływie tego czasu prąd rażenia powoduje wystąpienie odruchu skórno - galwanicznego, który obniża impedancję skóry o 40%. Pomiary wartości impedancji standardowej ciała w pracy zostały wykonane podczas pomiarowego rażenia prądem w czasie dłuższym od 0.1s, a znacznie krótszym od 30 s, co eliminuje błąd pomiaru spowodowany odruchem skórno - galwanicznym.

Ciało człowieka jako element obwodu elektrycznego stanowi przewodnik prądu o charakterystyce nieliniowej. Uwzględniając wiedzę z podstaw elektrotechniki, wykazać należy problem terminologiczny, jakim jest „impedancja ciała człowieka”, charakteryzująca nieliniowy obwód elektryczny. Nieliniowy charakter związany z anizotropową budową ciała człowieka utrudnia sposób postępowania, gdyż metody analizy są bardziej złożone niż obwodu liniowego. Stwierdzić należy, że terminem „impedancja ciała człowieka” posługują się wszyscy badacze zagadnienia oraz autorzy dostępnej literatury światowej, którzy pomijają konsekwencje z tym związane. Termin „impedancja ciała człowieka” stosuje również w swych opracowaniach Międzynarodowy Komitet Elektrotechniki IEC [68].



Rys. 2.9. Zmiana wartości impedancji ciała człowieka w czasie przepływu prądu rażenia  
Fig. 2.9. Value's change of impedance of human's body during flow of electrocution

### **3. WPŁYW KLIMATYCZNYCH WARUNKÓW PRACY NA IMPEDANCJĘ CIAŁA CZŁOWIEKA**

#### ***3.1. Wpływ klimatu dołowego na pracującego człowieka i impedancję jego ciała***

Podatność organizmu człowieka na skutki działania prądu elektrycznego jest zależna od wartości natężenia prądu uwarunkowanego napięciem i impedancją ciała w chwili rażenia. Ważną przyczyną zwiększającą prawdopodobieństwo wystąpienia niebezpiecznych skutków rażenia prądem elektrycznym jest wpływ specyficznych warunków klimatycznych [67]. W warunkach klimatycznie trudnych pogorszone jest oddawanie ciepła z organizmu do otoczenia. Wpływa to na zmiany parametrów fizycznych ciała, między innymi na jego impedancję elektryczną.

Głównym czynnikiem środowiska górniczego, oddziałującym na pracujących tam ludzi, jest klimat dołowy. Na klimat ten składają się warunki występujące w wyrobiskach górniczych, takie jak: wilgotność, temperatura, prędkość przepływu powietrza oraz promieniowanie ciepłe górotworu [10] [70]. Samopoczucie i szybkość występowania zmęczenia oraz obfitość pocenia się człowieka zależą od wzajemnego układu temperatury, wilgotności i prędkości powietrza w pomieszczeniu [11]. Klimatyczne warunki pracy w danym środowisku oprócz parametrów fizycznych powietrza i otoczenia uwzględniają wydatek energetyczny organizmu człowieka, zależny od wykonywanych czynności [10].

Organizm człowieka jest wyposażony w mechanizmy fizjologiczne utrzymujące stałą temperaturę środowiska wewnętrznego na poziomie 37°C bez względu na temperaturę otoczenia. Jest to możliwe dzięki mechanizmom termoregulacyjnym, dostosowującym ilość ciepła wytwarzanego przez ustrój człowieka do potrzeb bilansu cieplnego w zimnym lub gorącym środowisku. Organizm wykrywa zmiany temperatury środowiska dzięki termoreceptorom znajdującym się w różnych częściach ciała, głównie w skórze. Ciepło w organizmie wytwarzane jest przez pracę mięśni, przyswajanie pokarmów oraz procesy przemiany materii. W wyniku wykonywanej pracy następuje w organizmie przemiana energii pożywienia na ciepło, które przez termoregulację jest w większości odprowadzane do otoczenia. Utrata ciepła z organizmu do otoczenia o niższej temperaturze następuje przez skórę oraz układ oddechowy.

Człowiek powinien pracować w warunkach komfortu cieplnego, w których odczuwa stan zadowolenia z parametrów cieplnych środowiska, a jego gospodarka cieplna przebiega najbardziej ekonomicznie. Stan ten osiąga się w różnych kombinacjach wzajemnych temperatury, wilgotności względnej oraz prędkości przepływu powietrza. Warunki mikroklimatu odbiegające od granic komfortu (dyskomfort) stają się dla człowieka uciążliwe i wymagają przeciwdziałania mechanizmów termoregulacyjnych [12]. Praca w warunkach dyskomfortu cieplnego jest dopuszczalna dzięki bardzo dużym możliwościom termoregulacyjnym organizmu człowieka. W mikroklimacie zimnym organizm człowieka dąży do zachowania równowagi cieplnej przez zmniejszenie utraty ciepła i zwiększenie jego produkcji. Pobudzeniu podlega ośrodek zwiększający metabolizm i produkcję ciepła przez mięśnie [35]. Skurczeniu ulegają naczynia krwionośne skóry zmniejszając ilości przepływającej krwi, co ogranicza utratę ciepła [12].

Podczas pracy człowieka w trudnych warunkach klimatycznych przy podwyższonej temperaturze otoczenia maleje przenikanie ciepła do otoczenia, a organizm zwiększa wydzielanie potu. W warunkach normalnych człowiek wydziela  $0,75 \pm 1$  litra potu w ciągu doby [10]. Przy ciężkiej pracy dołowej w klimacie ciepłym organizm może wydzielać ponad 1 litr potu na godzinę [63]. Stała praca ludzi w termicznie trudnych warunkach przyzwyczajają organizm do zwiększonej ilości wydzielanego potu. Zwiększone wydzielanie potu występuje pod pachami, na twarzy, dłoniach i stopach. Intensywne pocenie się powoduje nasączenie zrogowaciałej warstwy naskórka elektrolitami zawartymi w pocie. Odparowanie wody z potu powoduje zasolenie naskórka i zmniejszenie jego rezystancji przejścia podczas rażenia prądem elektrycznym [21].

Pot może parować i pochłaniać ciepło z powierzchni ciała, jeżeli otaczające powietrze jest na tyle suche, by mogło wchłaniać parę wodną. Przy wysokiej wilgotności powietrza proces parowania potu słabnie, a ciało człowieka staje się całe mokre i bardzo podatne na skutki rażenia prądem elektrycznym. Duża wilgotność powietrza i wysoka temperatura powodują znaczne zahamowanie odparowania wody z powierzchni skóry, co prowadzi do przegrzania organizmu i udaru ciepłego.

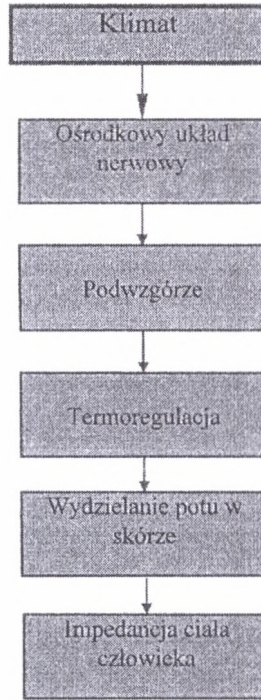
Ośrodek termoregulacji znajduje się w podwzgórzu organizmu człowieka i pobudzany jest sygnałami pochodzącymi z wrażliwych na temperaturę neuronów w przednim podwzgórzu oraz przez receptory skórne [43]. Schemat oddziaływania klimatu na organizm człowieka powodujący zmianę impedancji jego ciała przedstawia rys. 3.1.

Podwyższona temperatura otoczenia powoduje podrażnienia termoreceptorów skórnych oraz rozszerzenie naczyń skórnych i zwiększenie przepływu krwi przez skórę [35]. Równocześnie następuje pobudzenie ośrodka termoregulacyjnego w podwzgórzu i przemieszczenie jonów sodu i wody z łożyska naczyniowego do komórek gruczołów potowych, co wzmaga wydzielanie potu [12]. Rozszerzenie naczyń skórnych powoduje obniżenie się ciśnienia tętniczego krwi i przyśpieszenie akcji serca [12]. Te mechanizmy regulacyjne powodują wystąpienie zaburzeń w organizmie, których konsekwencją jest obniżona impedancja ciała człowieka.

Przy obniżonej temperaturze otoczenia poniżej  $12^{\circ}\text{C}$  następuje skurcz naczyń [50]. Skurcz tętniczek powoduje zablokowanie krwinek w naczyniach włosowatych [35]. Utrata przez te krwinki tlenu powoduje zblednięcie skóry i wzrost impedancji ciała. W takich warunkach, występujących głównie w szybach i podszybiach, organizm jest bardziej odporny na skutki rażenia prądem.

Skład chemiczny atmosfery dołowej powoduje zmiany w organizmie człowieka czyniąc go podatnym na działanie prądu [40]. Przy obniżeniu wartości tlenu  $\text{O}_2$  w powietrzu tętno ulega przyśpieszeniu, występują bóle głowy i uczucie duszności [40]. Nadmiar dwutlenku węgla,  $\text{CO}_2 > 2\%$ , powoduje zaburzenie w oddychaniu, wzrost ciśnienia krwi oraz wzrost czucia na percepcję prądu elektrycznego w organizmie [40]. Tlenek azotu oraz dwutlenek siarki reagują z potem przy odłoniętej powierzchni ciała tworząc elektrolity. Pył węglowy zawarty w powietrzu dołowym osadza się na wilgotnej spoczonej skórze tworząc powierzchnię ciała o małej rezystancji przejścia.





Rys. 3.1. Schemat oddziaływania klimatu na organizm człowieka powodujący zmiany jego impedancji  
 Fig. 3.1. Schema of climate's influence on human's body which causes changes his impedance

### 3.2. Metoda określania klimatu dla badań zmian wartości impedancji ciała

Klimat na dole kopalni określa się katatermometrem Hilla, który mierzy w danym otoczeniu intensywność chłodzenia ciała pod wpływem wspólnego działania temperatury, wilgotności i prędkości przepływu powietrza [10]. Katatermometr jest termometrem alkoholowym o rozszerzonej u góry rurce kapilarnej z oznaczonymi temperaturami 35°C i 38°C. Pomiary mogą być wykonywane katatermometrem suchym lub wilgotnym. W górnictwie klimat określa się katatermometrem wilgotnym. W celu wykonania pomiarów katatermometrem wilgotnym dolne naczynie katatermometru owija się wilgotnym muslinem. Pomiar klimatu wykonuje się mierząc czas opadania słupa alkoholu na skali pomiędzy cechami 38°C a 35°C.

Mierzony klimat (K) jest wprost proporcjonalny do stałej katatermometru (Q) i odwrotnie proporcjonalny do mierzonego czasu (t).

$$K = \frac{Q}{t}, \quad (3.1)$$

gdzie : K - klimat ( $^{\circ}K_w$ ),  
 Q - stała katatermometru,  
 t - czas (s).

Jednostką klimatu jest „katakastopień wilgotny” ( $^{\circ}K_w$ ), odpowiadający natężeniu chłodzenia środowiska, które pozwala odbierać 1 mcal ciepła z powierzchni 1 cm<sup>2</sup> katatermometru w ciągu 1 s.

$$1^{\circ}K_w = \text{mcal/cm}^2\text{s} = 42 \text{ W/m}^2$$

Największy komfort pracy na dole kopalni występuje przy 17 katastopniach wilgotnych [11]. Normalne warunki klimatyczne określa klimat w zakresie od 12-17 katastopni wilgotnych [11]. Obowiązujące w górnictwie rozporządzenie [89] w § 270 określa, że w miejscu pracy intensywne chłodzenie nie powinno być mniejsze od 11 katastopni wilgotnych.

### **3.3. Badania eksperymentalne zmian wartości impedancji ciała człowieka pod wpływem klimatu i napięcia rażenia**

Głównymi czynnikami wpływającymi na wartość impedancji ciała człowieka są: klimat środowiska i wartość napięcia rażenia [18]. Uwzględniając utylitarny cel wykonywanych badań dla potrzeb techniki ochrony przeciwporażeniowej, istotne jest określenie wpływu klimatu łącznie z uwzględnieniem wpływu napięcia rażenia na zmiany wartości impedancji ciała [25].

Opis matematyczny zmian wartości impedancji ciała człowieka w funkcji napięcia rażenia i klimatu środowiska należy rozpatrywać w kategoriach probabilistycznych. Oznacza to, że mierzone wartości impedancji są wartościami zaobserwowanymi zmiennych losowych. Rozpatrując związek pomiędzy impedancją ciała człowieka a czynnikami, które jej wartość kształtują, stwierdzić należy, że gdyby możliwe było uwzględnienie wszystkich czynników kształtujących wartość impedancji, 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 impedancję ciała człowieka są znane, a z tych, które są znane, nie wszystkie są mierzalne. Spośród wielu czynników mierzalnych ze względów na złożoność zjawisk fizjologicznych nie można dokładnie określić ich wpływu na wartość impedancji ciała. Ponieważ zmienne niezależne klimatu ( $K$ ) i napięcia ( $U$ ) ze względów fizycznych nie spełniają stochastycznej zależności, to uważać należy, że są one niezależne korelacyjnie. Można jedynie rozpatrywać związek korelacyjny pomiędzy napięciem rażenia, czy też klimatem wobec wartości empirycznej impedancji ciała człowieka.

W celu wyznaczenia zależności zmian impedancji ciała człowieka od zmian napięcia rażenia i klimatu dołowego przeprowadzono pomiary wartości impedancji w różnych warunkach. Pomiary wykonywano na standardowej drodze rażenia dociskając opuszką palca środkowego i opuszką kciuka tej samej ręki do miedzianych elektrod płaskich. Osoby poddane badaniom impedancji ciała stanowili elektrycy dołowi w wieku od 29 do 41 lat. Badane osoby poddane były działaniu prądu przemiennego o częstotliwości 50 Hz, przy napięciu rażenia: 14V, 27V, 40V, 52V, 82V, 95V. Wykonano pomiary w klimacie dołowym, określonym od 7 do 22 katastopni wilgotnych. Obserwowani wolontariusze podczas pomiarów impedancji byli w stanie wypoczynku i nie wykonywali prac zwiększających ich wydatek energetyczny. Do badań wybrano takie miejsca, które były właściwie oświetlone i nie występował hałas od pracujących maszyn. Pomiary poprzedzał 20-minutowy okres aklimatyzacji w klimacie badanego środowiska. Miejskami wykonywania pomiarów były: podszycia, warsztaty i komory dołowe, drogi transportowe oraz wyrobiska oddziałów robót górniczych. Pomiary wykonywano przez okres czterech lat w różnych porach roku. W klimacie zimnym powyżej 20 katastopni wilgotnych pomiary wykonano porą zimową na podszyciach szybów wdechowych, gdzie prędkość przepływającego powietrza jest duża. Natomiast pomiary w klimacie ciepłym o mierzonej katatermometrem małej liczbie katastopni wilgotnych wykonywano w przodkach przewietrzanych wentylacją odrębną.

Wykonano łącznie 688 pomiarów impedancji ciała człowieka w klimacie dołowym określonym od 7 do 22 katastopni wilgotnych przy pomiarowym napięciu rażenia od 14V do 95V. Nie przeprowadzono pomiarów impedancji ciała przy napięciu rażenia 95V w klimacie ciepłym określonym: 7, 8, 9, 10 katastopni wilgotnych, gdyż pomiary dla badanych osób były bardzo bolesne. Obniżona w tym klimacie wartość impedancji ciała człowieka czyniła pomiary niebezpiecznymi dla badanych osób. Na podstawie wykonanych pomiarów wyznaczono za pomocą programu komputerowego wartości empiryczne (medialne) impedancji ciała człowieka. Wyniki empirycznych wartości impedancji ciała podano w tab. 3.1.

Tabela 3.1

Wyniki empirycznych wartości impedancji standardowej ( $Z_m$ ) ciała człowieka w ( $k\Omega$ )

Klimat	Napięcie rażenia												Liczba badań
	14V		27V		40V		52V		82V		95V		
	$Z_m$	s	$Z_m$	s	$Z_m$	s	$Z_m$	s	$Z_m$	s	$Z_m$	s	
7	22	2	19	2	15	3	13	2	10	2			6
8	23	2	19	1	17	1	14	1	12	1			8
9	32	5	27	4	20	4	16	1	14	1			7
10	36	9	33	8	30	8	25	8	17	6			17
11	46	9	36	8	36	9	27	6	21	6	18	4	17
12	50	7	42	6	39	8	31	6	26	6	21	5	10
13	65	10	52	9	45	8	38	8	32	9	27	8	8
14	82	5	68	7	66	4	56	5	54	6	41	5	11
15	92	9	90	9	77	8	67	7	59	5	48	6	5
16	115	8	105	7	100	11	79	5	69	2	55	1	5
17	128	8	117	9	104	8	87	9	77	7	62	1	4
18	138	9	120	8	110	7	95	8	87	6	71	8	4
19	168	12	158	12	138	10	112	10	98	9	86	8	4
20	179	13	168	11	164	11	133	10	113	10	96	9	4
21	204	11	195	10	180	9	151	9	130	9	105	8	4
22	220	14	200	13	185	12	170	8	150	9	140	11	4

K - klimat określony w katastopniach wilgotnych ( $^{\circ}K_w$ ) $Z_m$  - wartość empiryczna impedancji standardowej ciała człowieka ( $k\Omega$ )

s - odchylenie standardowe

Wykorzystując wyniki przeprowadzonych pomiarów impedancji ciała człowieka dokonano ujęcia badanego zjawiska w sposób analityczny. Do wyznaczenia zależności między zależną wartością impedancji ciała a niezależną wartością napięcia rażenia i klimatu posłużono się statystyczną funkcją regresji [21][22]. Po weryfikacji metodą najmniejszych kwadratów otrzymano zależność:

$$Z_0 = 0,45 \cdot K^{2,3} \cdot U^{-0,33}, \quad (3.2)$$

gdzie:  $Z_0$  - impedancja standardowa ciała człowieka ( $k\Omega$ ),K - klimat określony w katastopniach wilgotnych ( $^{\circ}K_w$ ),

U - napięcie rażenia (V).

Graficzny przebieg funkcji impedancji standardowej  $Z_0 = f(U, K)$  pokazano na rys. 3.2.

Wartości impedancji ciała człowieka wyliczone ze wzoru (3.2) przedstawiono w tabeli 3.2.

Tabela 3.2

Wartości impedancji standardowej ( $Z_0$ ) ciała człowieka w ( $k\Omega$ )

Napięcie (U)	Klimat (K)														
	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
14 V	21	29	36	40	53	68	82	93	110	127	141	164	181	204	228
27 V	18	24	31	37	45	54	66	79	89	108	115	132	149	176	186
40 V	16	20	27	33	39	47	57	68	78	91	103	119	142	150	171
52 V	14	18	24	28	35	42	53	62	72	82	84	107	119	136	152
82 V	12	16	20	25	31	37	46	54	61	71	80	92	107	113	131
95 V	11	15	19	23	28	34	42	49	57	65	76	86	96	108	122

K - klimat określony w katastopniach wilgotnych ( $^{\circ}K_w$ )

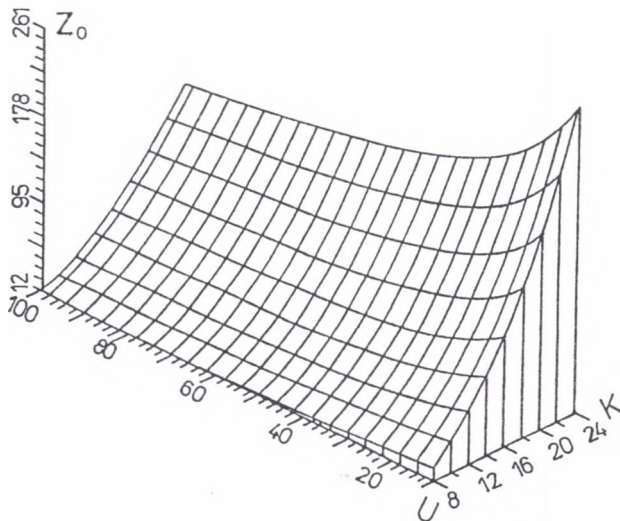
Porównanie wyliczonej wartości impedancji standardowej ze wzoru (3.2) z wartościami empirycznymi oraz ich kwadraty odchyłeń przedstawia tab. 3.3. Graficzny przebieg zmian wartości impedancji standardowej od zmian klimatu pokazano na rys. 3.3.

Tabela 3.3

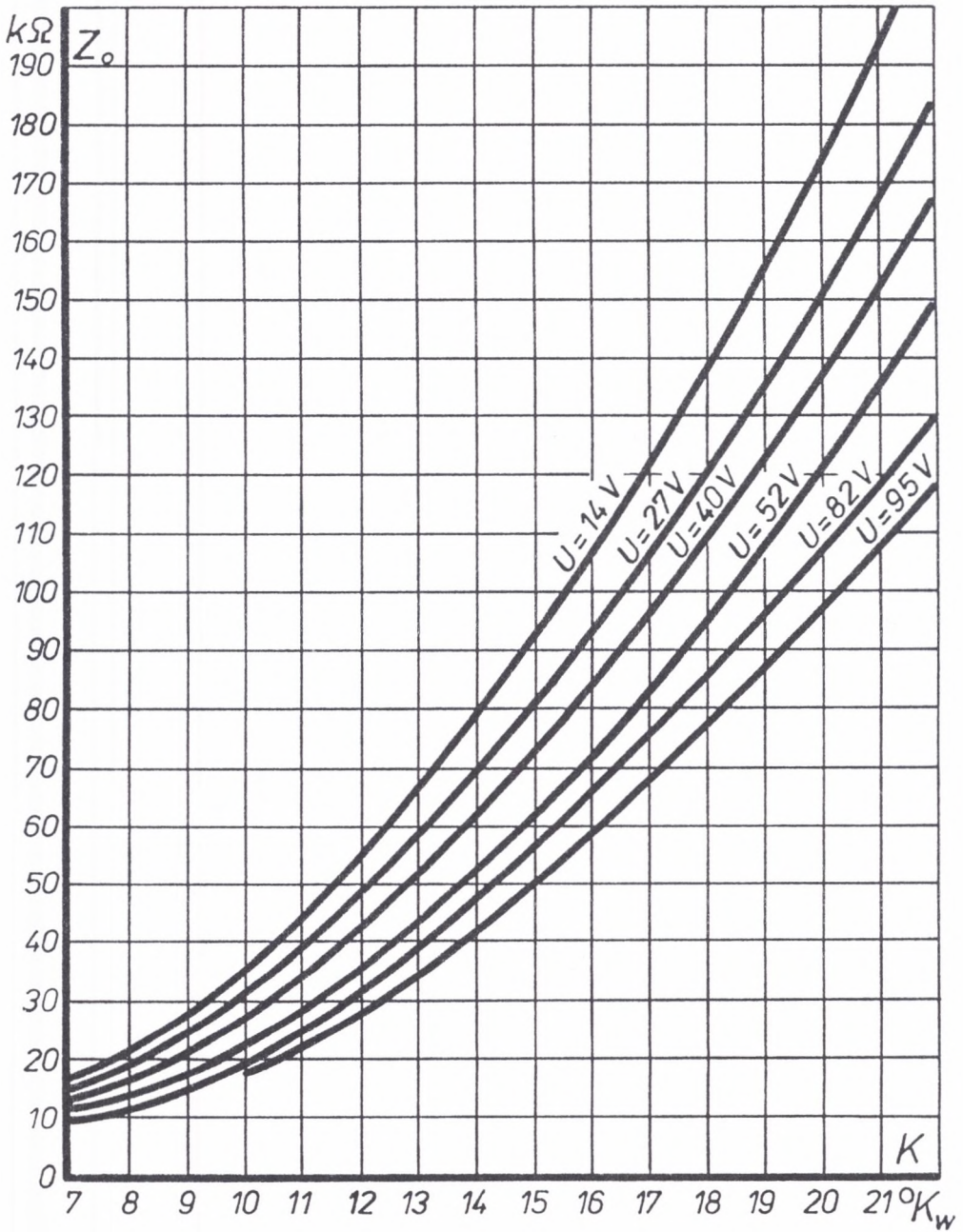
Porównanie wartości empirycznej impedancji standardowej ( $Z_m$ ) z wartościami funkcji ( $Z_0$ ) oraz różnice wartości  $\Delta$

U	14V			27V			40V			52V			82V			95V			$\Sigma(Z_m - Z_0)^2$
	$Z_m$	$Z_0$	$\Delta^2$	$Z_m$	$Z_0$	$\Delta^2$	$Z_m$	$Z_0$	$\Delta^2$	$Z_m$	$Z_0$	$\Delta^2$	$Z_m$	$Z_0$	$\Delta^2$	$Z_m$	$Z_0$	$\Delta^2$	
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	64
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	164	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

$$\Delta = Z_m - Z_0$$

Rys. 3.2. Funkcja impedancji standardowej ciała człowieka  $Z_0 = f(U, K)$ Fig. 3.2. Function of standard human body impedance  $Z_0 = f(U, K)$





Rys. 3.3. Przebieg funkcji impedancji standardowej ( $Z_0$ ) od zmian klimatu ( $K$ )

Fig. 3.3. Dependence of function of standard impedance ( $Z_0$ ) to climate's changes ( $K$ )

### 3.4. Spodziewane wartości impedancji ciała człowieka dla znamionowych napięć stosowanych w górnictwie

Wyznaczone wartości impedancji standardowej ciała człowieka (tab. 3.2) nie są przydatne w tej postaci do celów praktycznych w ochronie przeciwporażeniowej. Dla praktycznej przydatności wyników celowe jest wyznaczenie wartości impedancji ciała dla napięć znamionowych stosowanych w sieciach elektroenergetycznych oraz uwzględnienie drogi przepływu prądu rażenia w ciele poszkodowanego.

Wykorzystując wzór empiryczny (3.2) określający wartość impedancji standardowej ciała człowieka wyznaczyć można przez ekstrapolację wartości dla wyższych napięć znamionowych stosowanych w sieciach elektroenergetycznych, dla których przeprowadzenie pomiarów „in vivo” stanowi niebezpieczeństwo dla życia i zdrowia badanych. Hipotetyczny charakter zależności empirycznej warunkuje fakt, że jest ona nieskończonym zbiorem punktów, zaś zbiór danych empirycznych jest zawsze skończony oraz że na tej podstawie antycypuje się doświadczenia nie eksplorowanej dziedziny badań. Ekstrapolacja funkcji  $Z_0 = f(U, K)$  polega na wyznaczeniu wartości tej funkcji na zewnątrz przedziału badań empirycznych dla napięć znamionowych, których prowadzenie badań „in vivo” stanowi zagrożenie dla organizmu żywego. Wartości impedancji standardowej ciała człowieka  $Z_0 (U, K)$  otrzymane przez ekstrapolację przedstawia tab. 3. 4.

Tabela 3.4

Wartości impedancji standardowej ciała człowieka w (k $\Omega$ ) dla napięć znamionowych

Napięcie rażenia	Klimat (K)														
	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
24 V	18,6	24,4	31,2	38,8	47,4	57,0	68,2	79,2	91,9	105	120	136	153	171	191
42 V	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
127 V	10,7	14,0	17,9	22,3	27,2	32,7	39,1	45,4	52,7	60,6	69,1	78,2	88,0	98,5	109
220 V	8,9	11,7	14,9	18,5	22,6	27,2	32,6	37,8	43,8	50,4	57,5	65,1	73,3	82,0	91,3
500 V	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
1000 V	5,4	7,1	9,1	11,2	13,6	16,4	19,6	22,8	26,4	30,4	34,5	39,3	44,4	49,4	55,0

K - klimat określony w katastopniach wilgotnych ( $^{\circ}K_w$ )

W celu określenia rzeczywistej impedancji ciała dla typowych dróg przepływu prądu rażenia przez ciało poszkodowanego należy uwzględnić współczynnik  $\xi$  transformacji drogi rażenia, przeliczający wartość impedancji standardowej ciała człowieka ( $Z_0$ ) na rzeczywistą wartość impedancji ciała ( $Z$ ). W celu wyznaczenia wartości spodziewanej impedancji ciała na drodze rażenia przyjętej jako typową (wg tab. 2.3) należy we wzorze (3.2) uwzględnić wyznaczony współczynnik  $\xi$  transformacji drogi rażenia.

$$Z = \frac{Z_0}{\xi} = \frac{0,45 \cdot K^{2,3} \cdot U^{-0,13}}{\xi} = \frac{0,45 \cdot K^{2,3}}{\sqrt[3]{U} \cdot \xi} \quad (3.3)$$

Wartość współczynnika  $\xi$  dla typowych dróg rażenia (wg tab. 2.4) wynosi :

ręka - ręka  $\xi = 6$

ręka - nogi  $\xi = 10$

ręka - plecy  $\xi = 9$

Wyznaczone wartości impedancji ciała człowieka dla typowych dróg rażenia w wypadkach porażenia prądem elektrycznym zależnie od klimatu i napięcia rażenia przedstawiono w tab. 3.5, 3.6, 3.7. Przedstawione w tabelach wartości impedancji ciała dotyczą ludzi zaaklimatyzowanych i

niepracujących. Graficzna zależność impedancji ciała człowieka dla przyjętych za typowe drogi przepływu prądu rażenia pokazano na rys. 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8.

Tabela 3.5

Wartości impedancji ciała dla drogi przepływu drogi rażenia ręka - ręka ( $k\Omega$ ) typ A

Napięcie rażenia	Klimat (K)														
	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
24 V	3,10	4,06	5,20	6,46	7,90	9,50	11,3	13,2	15,3	17,5	20,0	22,6	25,5	28,5	31,8
42 V	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
127 V	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
220 V	1,48	1,95	2,48	3,08	3,76	4,53	5,43	6,31	7,31	8,40	9,58	10,8	12,2	13,6	15,2
500 V	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
1000 V	0,90	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
6000 V	0,48	0,65	0,81	1,01	1,25	1,51	1,80	2,08	2,32	2,78	3,18	3,6	4,05	4,53	5,05

Tabela 3.6

Wartości impedancji ciała dla drogi przepływu drogi rażenia ręka - nogi ( $k\Omega$ ) typ B

Napięcie rażenia	Klimat (K)														
	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
24 V	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
42 V	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
127 V	1,08	1,40	1,79	2,23	2,72	3,27	3,91	4,54	5,27	6,06	6,91	7,82	8,80	9,85	10,9
220 V	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	8,20	9,13
500 V	0,67	0,88	1,13	1,40	1,72	2,07	2,48	2,88	3,34	3,84	4,37	4,95	5,57	6,24	6,94
1000 V	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	5,50
6000 V	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

Tabela 3.7

Wartości impedancji ciała dla drogi przepływu drogi rażenia ręka - plecy tułów ( $k\Omega$ ) typ C

Napięcie rażenia	Klimat (K)														
	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
24 V	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
42 V	1,72	2,25	2,87	3,57	4,36	5,25	6,28	7,31	8,46	9,74	11,1	12,5	14,1	15,1	17,5
127 V	1,18	1,51	1,98	2,47	3,02	3,64	4,34	5,04	5,85	6,73	7,67	8,65	9,77	10,9	12,1
220 V	0,98	1,30	1,65	2,05	2,51	3,23	3,62	4,21	4,87	5,60	6,38	7,23	8,14	9,10	10,1
500 V	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	7,10
1000 V	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	5,43	6,11
6000 V	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

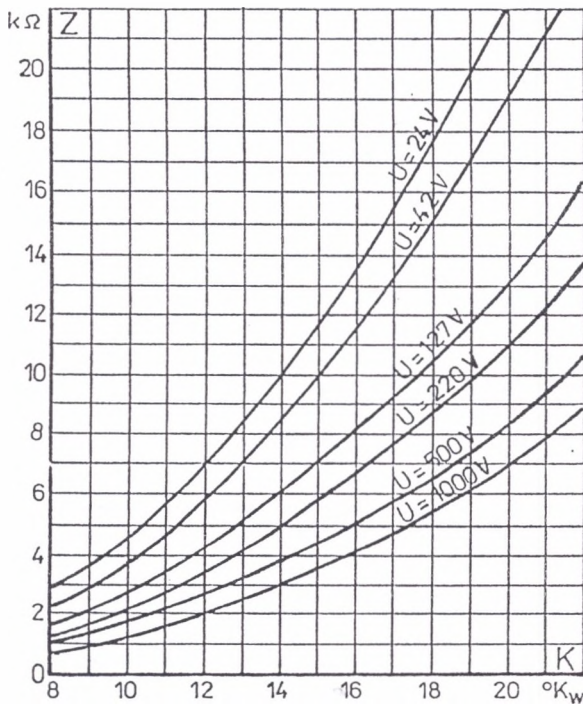
W celu weryfikacji otrzymanych wyników wartości impedancji ciała człowieka przeprowadzono porównanie z wynikami wartości impedancji podanymi przez innych badaczy. Utrudnieniem w takim porównaniu jest brak informacji o warunkach klimatycznych, w jakich badania były prowadzone. Założono więc, że porównywane wyniki pomiarów innych badaczy były wykonywane w pomieszczeniu ciepłym o normalnych warunkach klimatycznych i wolnym od innych uciążliwości ergonomicznych. Takim warunkom klimatycznym można przyporządkować klimat w zakresie 10-13 katastopni wilgotnych. Porównanie wyznaczonych w pracy wartości impedancji ciała człowieka dla



klimatu 11 katastopni wilgotnych na drodze przepływu prądu rażenia ręka - nogi z wynikami badań podanymi przez Teresiaka [39], Biegelmaiera oraz IEC [68] i Krasuckiego [40] podaje tab. 3.8.

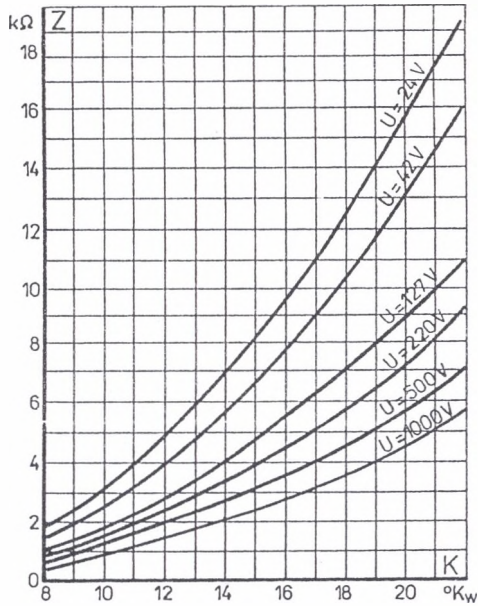
Tabela 3.8  
Porównanie otrzymanych wyników wartości empirycznych impedancji ciała człowieka z wynikami badań Teresiaka, Biegelmeiera i Krasuckiego

Napięcie rażenia	Wartość impedancji ciała człowieka ( $\Omega$ )			
	Teresiak	Biegelmeier oraz IEC	Krasucki	Gierlotka
25 V	3382	3250	2370	3373
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



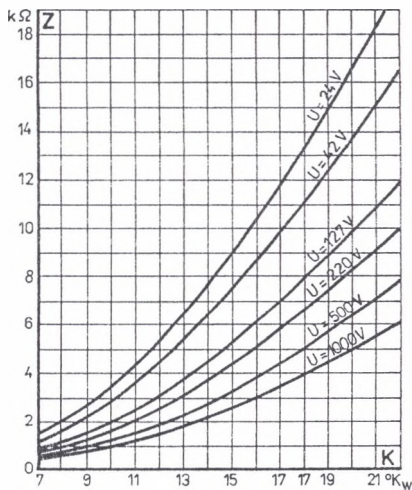
Rys. 3.4. Wpływ klimatu (K) i napięcia rażenia (U) na wartość impedancji ciała człowieka na drodze rażenia ręka-ręka – dla ludzi niepracujących

Fig. 3.4. Climate's influence (K) and electrocution's tension (U) on value impedance of human's body on electrocution's way : hand - hand



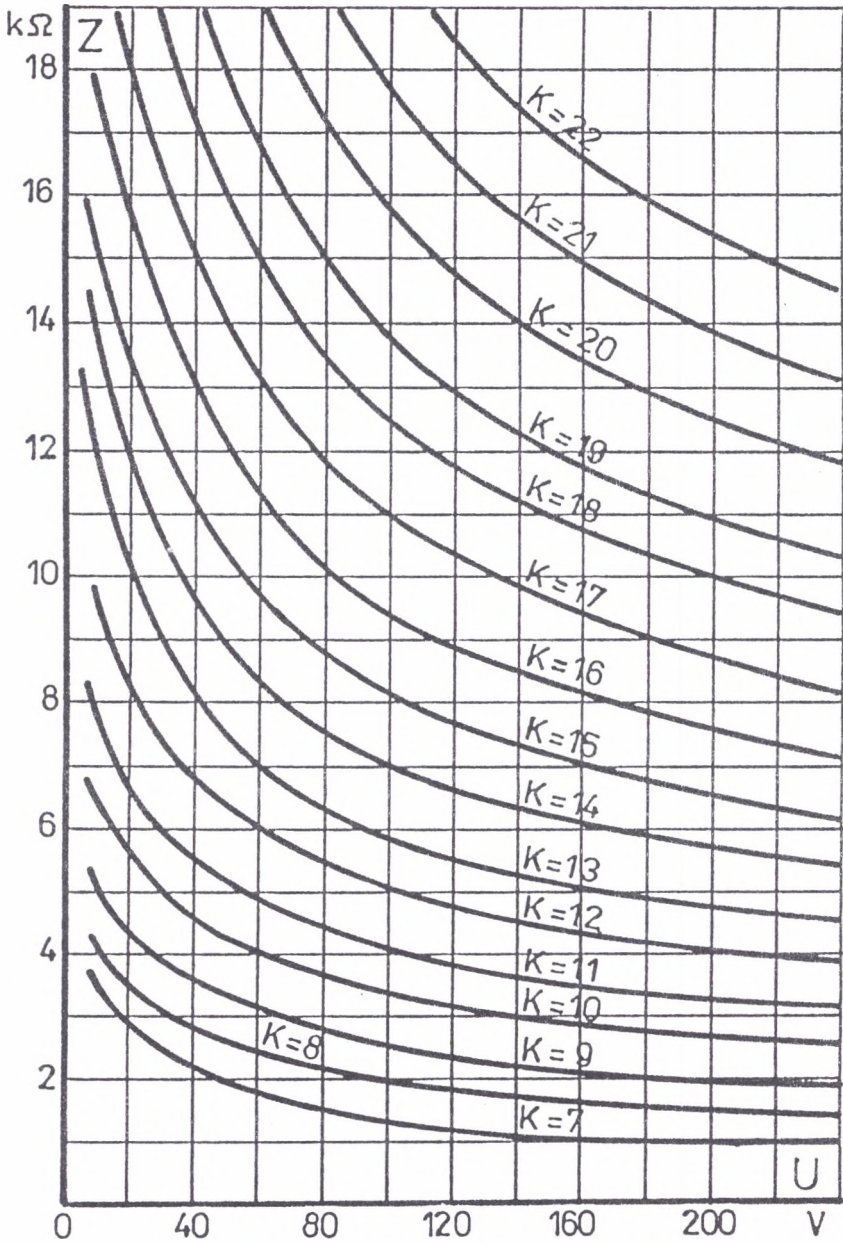
Rys. 3.5. Wpływ klimatu (K) i napięcia rażenia (U) na wartość impedancji ciała człowieka na drodze rażenia ręka-nogi – dla ludzi niepracujących

Fig. 3.5. Climat's influence (K) and electrocution's tension (U) on value impedance of human's body on electrocution's way : hand - feet



Rys. 3.6. Wpływ klimatu (K) i napięcia rażenia (U) na wartość impedancji ciała człowieka na drodze rażenia ręka-tulów – dla ludzi niepracujących

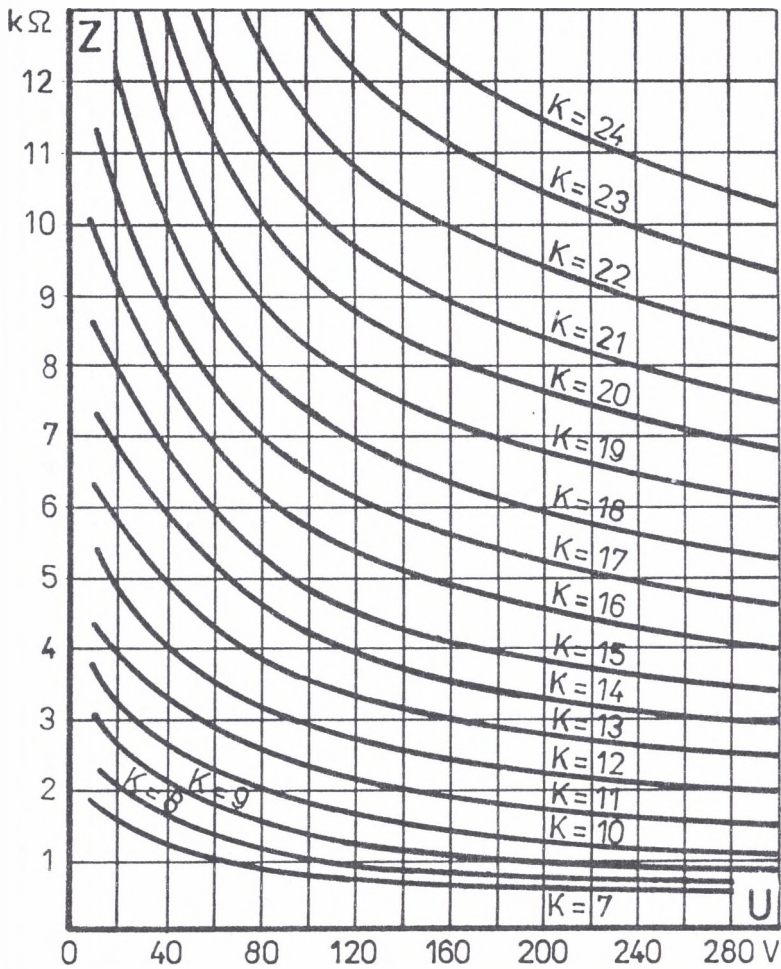
Fig. 3.6. Climat's influence (K) and electrocution's tension (U) on value impedance of human's body on electrocution's way : hand - trunk



Rys. 3.7. Wartość impedancji ciała człowieka ( $Z$ ) dla różnych warunków klimatycznych ( $K$ ) na drodze rażenia ręka - ręka - dla ludzi niepracujących

Fig. 3.7. Value of human's body impedance ( $Z$ ) for different climatic conditions ( $K$ ) on the mode of electrocution (hand - hand)





Rys. 3.8. Wartość impedancji ciała człowieka (Z) dla różnych warunków klimatycznych (K) na drodze rażenia ręka-nogi – dla ludzi niepracujących

Fig 3.8. Value impedance of human's body (Z) for different climatic conditional (K) on electrocution's way hand - feet

### 3.5. Zmiany wartości impedancji ciała człowieka pod wpływem warunków klimatycznych

Rozważania w p.3.3 i 3.4 oparte zostały na parametrach mikroklimatu określonego w katastroficznych wilgotnych, które uwzględniają wspólne działanie temperatury, wilgotności i prędkości przepływu powietrza. Szerszym pojęciem od mikroklimatu są tzw. klimatyczne warunki pracy panujące w danym środowisku [10]. Do określenia klimatycznych warunków pracy służy wskaźnik obejmujący mikroklimat i wydatek energetyczny pracownika zależny od rodzaju i intensywności pracy. Warunki klimatyczne w środowisku o danym mikroklimacie będą odczuwane przez różnych ludzi w różny sposób, głównie ze względu na rodzaj czynności, jakie wykonują.

Z rodzajem i intensywnością wykonywanej pracy wiąże się odpowiednia ilość ciepła metabolicznego wytwarzanego przez organizm człowieka w jednostce czasu, czyli wydatek energetyczny organizmu. Organizm człowieka musi wytwarzać ciepło metaboliczne, aby prawidłowo zachodziły w nim procesy fizjologiczne oraz utrzymywała się stała temperatura wewnętrzna ciała. Człowiek pracuje z różną częstotliwością wysiłkową, zmieniając swój wydatek energetyczny w zależności od samopoczucia. Wydatek energetyczny człowieka zależy od rodzaju intensywności pracy jest miarą stopnia obciążenia energetycznego organizmu i podaje się go w watach na metr kwadratowy powierzchni ciała ludzkiego ( $W/m^2$ ) [10]. W zależności od wydatku energetycznego pracownika dokonuje się podziału pracy na lekką ( $65 < M \leq 130 W/m^2$ ), umiarkowaną ( $130 < M \leq 200 W/m^2$ ), ciężką ( $200 < M \leq 260 W/m^2$ ) i bardzo ciężką ( $M > 260 W/m^2$ ) [10]. Dla stanu spoczynku człowieka wydatek energetyczny wynosi  $M \leq 65 W/m^2$ . Odzież stanowi izolację cieplną pomiędzy człowiekiem a otoczeniem. Zmniejsza ona prędkość oddawania ciepła przez człowieka w środowiskach chłodnych. W analizie przewodzenia ciepła przez odzież wprowadzono wielkość zwaną oporem cieplnym odzieży, której jednostką jest  $1 \text{ Clo} = 0,155 (m^2K)/W$  [55]. Dla typowego ubioru roboczego wg Fangera [10] wartość oporu cieplnego wynosi  $1 \text{ Clo}$ .

Klimatyczne warunki pracy określa się wskaźnikiem dyskomfortu cieplnego  $\delta$ , którego wielkość jest bezwymiarowa [10]. Określa on, w jakim stopniu klimatyczne warunki pracy w danym środowisku różnią się od warunków komfortu cieplnego oraz od warunków klimatycznych granicznych pod względem bezpieczeństwa cieplnego. Ogólna ocena warunków klimatycznych według wskaźnika dyskomfortu cieplnego jest następująca:

$\delta < 0$	- środowisko chłodne
$\delta = 0$	- komfort cieplny
$0 < \delta < 1$	- praca bezpieczna dla zdrowia
$\delta \geq 1$	- praca niebezpieczna dla zdrowia

W celu wyznaczenia wskaźnika dyskomfortu cieplnego należy dla badanych warunków określić efektywną temperaturę amerykańską ATE. Wartości ATE odczytuje się z nomogramu rys. 3.9 przy znanej temperaturze suchej i temperaturze wilgotnej (temperatury psychometryczne) oraz prędkość przepływu powietrza [10]. Wartość wskaźnika dyskomfortu cieplnego wyznacza się na podstawie wykresu przebiegu izolinii wydatku energetycznego pracowników w zależności od efektywnej temperatury amerykańskiej ATE. Zależność wskaźnika dyskomfortu cieplnego od wydatku energetycznego i mikroklimatu dla ludzi zaaklimatyzowanych w powietrzu o wilgotności 80 % i ubranych w odzież o oporze cieplnym  $1 \text{ Clo}$  przedstawiono na podstawie opracowania [10] na rys.3.10. Na osi odciętych zaznaczona jest efektywna temperatura amerykańska ATE, określająca mikroklimat w danym środowisku. Proste skośne to izoliny średnich wydatków energetycznych dla spoczynku ( $65 W/m^2$ ) i pracy ciężkiej ( $230 W/m^2$ ). Na osi rzędnych odczytuje się wartość wskaźnika dyskomfortu cieplnego  $\delta$ .

W celu określenia zależności zmian wartości impedancji ciała od wskaźnika dyskomfortu cieplnego wykonano pomiary w warunkach środowiska, gdzie oprócz klimatu w katastroficznych wilgotnych zderminowano wartość temperatur mierzonych termometrem suchym i wilgotnym. Badania przeprowadzono w wyrobiskach, gdzie prędkość przepływającego powietrza wynosiła  $0,5 \text{ m/s}$ . Osoby badane były zaaklimatyzowane do warunków środowiska, w stanie wypoczynku i ubrane w typowy ubiór roboczy stosowany w górnictwie. Zastosowano tę samą metodę pomiaru wartości impedancji ciała człowieka jak w p. 3.3.

Znając wartość prędkości powietrza oraz wskazania termometrów suchego i wilgotnego za pomocą nomogramu (rys. 3.9) określono wartość efektywnej temperatury amerykańskiej ATE występującej w miejscu pomiarów. Badane osoby były zaaklimatyzowane w środowisku i znajdowały się w stanie spoczynku, w którym wydatek energetyczny wynosił  $65 W/m^2$ . Korzystając z wykresu



(rys. 3.10) przebiegu izolinii wydatku energetycznego dla pracowników zaaklimatyzowanych i w stanie sypoczynku, odczytano wartość wskaźnika dyskomfortu cieplnego  $\delta$ . Wyniki zmierzonych wartości impedancji ciała pogrupowano zależnie od wyznaczonej z badań wartości wskaźnika dyskomfortu cieplnego  $\delta$  oraz określono wartość średnią impedancji ciała dla poszczególnych napięć rażenia zastosowanych w pomiarach. Średnie wartości empiryczne impedancji ciała wolontariuszy zależnie od wyznaczonego wskaźnika dyskomfortu cieplnego i zastosowanego w pomiarach napięcia rażenia przedstawiono w tab. 3.9 oraz graficznie na rys. 3.11.

Tabela 3.9

Wartości średnie zmierzonej impedancji ciała człowieka zależnie od wskaźnika dyskomfortu cieplnego  $\delta$  oraz efektywnej temperatury amerykańskiej ATE

Wskaźnik dyskomfortu cieplnego $\delta$	-0,64	-0,42	-0,20	0,10	0,32	0,42	0,55	0,73
ATE ( $^{\circ}\text{C}$ )	13,2	16,3	18,2	20,5	24,2	25,0	26,4	28,5
Napięcie (V)	Impedancja ciała człowieka (k $\Omega$ )							
14	59	48	41	29	26	23	22	21
27	52	42	34	24	21	20	18	17
40	43	34	28	20	18	17	16	14
52	34	27	23	17	15	14	13	12
82	28	23	18	13	12	11	11	10

Korzystając z empirycznych wyników (tab. 3.8) pomiarów zmian wartości impedancji ciała od wskaźnika dyskomfortu cieplnego  $\delta$  opracowano obserwowane zjawisko w sposób analityczny. Posługując się funkcją regresji wyznaczono zależność, którą przedstawia równanie:

$$Z_0 = \frac{70(1 + \delta)^{0,7}}{\sqrt[3]{U}}, \quad (3.4)$$

gdzie:  $Z_0$  - impedancja standardowa ciała człowieka (k $\Omega$ ),

$U$  - napięcie rażenia (V),

$\delta$  - wskaźnik dyskomfortu cieplnego.

Równanie zostało zweryfikowane z funkcją empiryczną przy współczynniku korelacji  $\sigma = 0,977$ .

Zależność (3.4) pozwala wyznaczyć prawidłowo wartość impedancji ciała człowieka dla wskaźników dyskomfortu cieplnego  $\delta > -1$ .

Porównanie wartości empirycznych impedancji ciała człowieka (tab. 3.9) z wartościami wyliczonymi z równania (3.4) oraz różnice wyników przedstawia tab. 3.10.

Tabela 3.10

Porównanie wartości empirycznych impedancji standardowej ciała człowieka ( $Z_m$ ) z wyliczonymi wartościami funkcji ( $Z_0$ )

Napięcie (V)	$\delta = -0,64$			$\delta = -0,40$			$\delta = -0,20$			$\delta = 0,10$			$\delta = 0,32$			$\delta = 0,42$			$\delta = 0,55$			$\delta = 0,73$		
	$Z_m$	$Z_0$	$\Delta$	$Z_m$	$Z_0$	$\Delta$	$Z_m$	$Z_0$	$\Delta$	$Z_m$	$Z_0$	$\Delta$	$Z_m$	$Z_0$	$\Delta$	$Z_m$	$Z_0$	$\Delta$	$Z_m$	$Z_0$	$\Delta$	$Z_m$	$Z_0$	$\Delta$
14	59	56	3	48	43	5	41	34	7	29	31	2	26	24	2	23	23	0	22	21	1	21	20	1
27	52	46	6	42	35	7	34	27	7	24	25	1	21	19	2	20	18	2	18	17	1	17	16	1
40	43	40	3	34	30	4	28	24	4	20	22	2	18	17	1	17	16	1	16	15	1	14	14	0
52	34	36	2	27	27	0	23	23	0	17	20	3	15	15	0	14	14	0	13	13	0	12	12	0
82	28	31	3	23	23	0	18	19	0	13	17	4	12	13	1	11	12	1	11	11	0	10	10	0

$$\Delta = Z_m - Z_0$$

Spodziewane wartości impedancji standardowej ciała człowieka dla stosowanych napięć w zależności od wartości wskaźnika dyskomfortu cieplnego  $\delta$  przedstawiono w tab. 3.11 oraz graficznie na rys. 3.12.

Tabela 3.11

Spodziewane wartości impedancji standardowej ciała człowieka zależnie od wskaźnika dyskomfortu cieplnego  $\delta$  i napięcia rażenia

Wskaźnik dyskomfortu cieplnego $\delta$	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Napięcie (V)	Impedancja ciała człowieka (k $\Omega$ )														
15	43,0	36,6	34,5	31,2	29,5	27,6	25,8	24,0	23,1	22,2	21,4	20,5	19,5	18,3	17,6
25	36,2	30,5	30,2	26,5	24,0	22,4	21,0	20,0	18,8	18,2	17,3	16,8	16,0	15,2	14,7
30	32,3	28,0	27,6	24,3	22,5	21,0	19,8	18,7	18,1	17,0	16,2	15,5	15,1	14,3	13,8
40	30,8	26,2	24,0	22,0	20,4	19,1	18,0	17,0	16,2	15,5	14,6	14,1	13,8	13,0	12,5
50	28,2	24,7	22,2	20,4	19,0	17,6	16,7	15,8	14,9	14,3	13,6	13,1	12,8	12,1	11,6
70	24,2	22,3	19,6	18,2	16,9	15,8	14,8	14,1	13,4	12,7	12,2	11,6	11,2	10,8	10,4
80	23,4	21,0	18,8	17,3	16,1	15,2	14,2	13,3	12,5	12,2	11,7	11,2	10,8	10,3	10,0
90	22,8	20,2	17,8	16,5	15,5	14,6	13,7	12,8	12,0	11,7	11,2	10,7	10,2	9,9	9,6
100	21,3	19,3	17,2	15,8	15,0	14,1	13,2	12,3	11,2	10,8	10,4	10,2	9,9	9,6	9,2
120	20,1	18,2	16,6	15,2	14,1	13,2	12,5	11,5	10,8	10,6	10,2	9,8	9,4	9,0	8,7
150	18,6	16,5	15,4	14,2	13,2	12,3	11,6	10,9	10,1	9,9	9,4	9,0	8,7	8,4	8,1

Przedstawione powyżej wyniki badań wykonane zostały wśród wolontariuszy będących w stanie spoczynku (nie pracujących) i zaaklimatyzowanych w środowisku, których wydatek energetyczny wynosił 65 W/m<sup>2</sup>.

W celu weryfikacji otrzymanych wyników (tab. 3.11) wykonano dalsze pomiary wartości impedancji ciała w zdefiniowanym mikroklimacie wśród ludzi wykonujących pracę ocenianą jako ciężką. Badania wykonano wśród elektromonterów dołowych transportujących ręczną wciągarką ognioszczelną stację transformatorową typu IT3Sb 400/6/1 o masie 3300 kg. Temperatura w miejscu pracy mierzona termometrem suchym wynosiła 20,5 °C, a termometrem wilgotnym 18 °C przy prędkości powietrza w wyrobisku 0,5 m/s. Wilgotność określono na podstawie różnicy temperatur i wynosiła 81 %. Efektywna temperatura amerykańska ATE w takich warunkach wynosiła 18,3 °C. Wskaźnik dyskomfortu cieplnego określony z wykresu (rys. 3.10) izol linii wydatku energetycznego dla pracy ciężkiej ( $M = 230 \text{ W/m}^2$ ) wynosił  $\delta = 0,7$ , a dla wypoczynku ( $M = 65 \text{ W/m}^2$ )  $\delta = -0,2$ . Obserwacje przeprowadzono na czterech osobach. Wartości impedancji ciała człowieka zmierzone po 30 minutach pracy oraz spodziewane wyznaczone z opracowanej tab. 3.10, jak też wyniki różnice pomiędzy nimi przedstawiono w tab. 3.12. W tab. tej uwidoczniło również pomiary impedancji ciała tych samych osób przed rozpoczęciem pracy, podczas spoczynku, dla których wskaźnik dyskomfortu cieplnego wynosi  $-0,2$ .

Tabela 3.12

Porównanie wyników wartości impedancji standardowych ciała człowieka zmierzonych i spodziewanych dla stanu spoczynku oraz po 30 minutach ciężkiej pracy

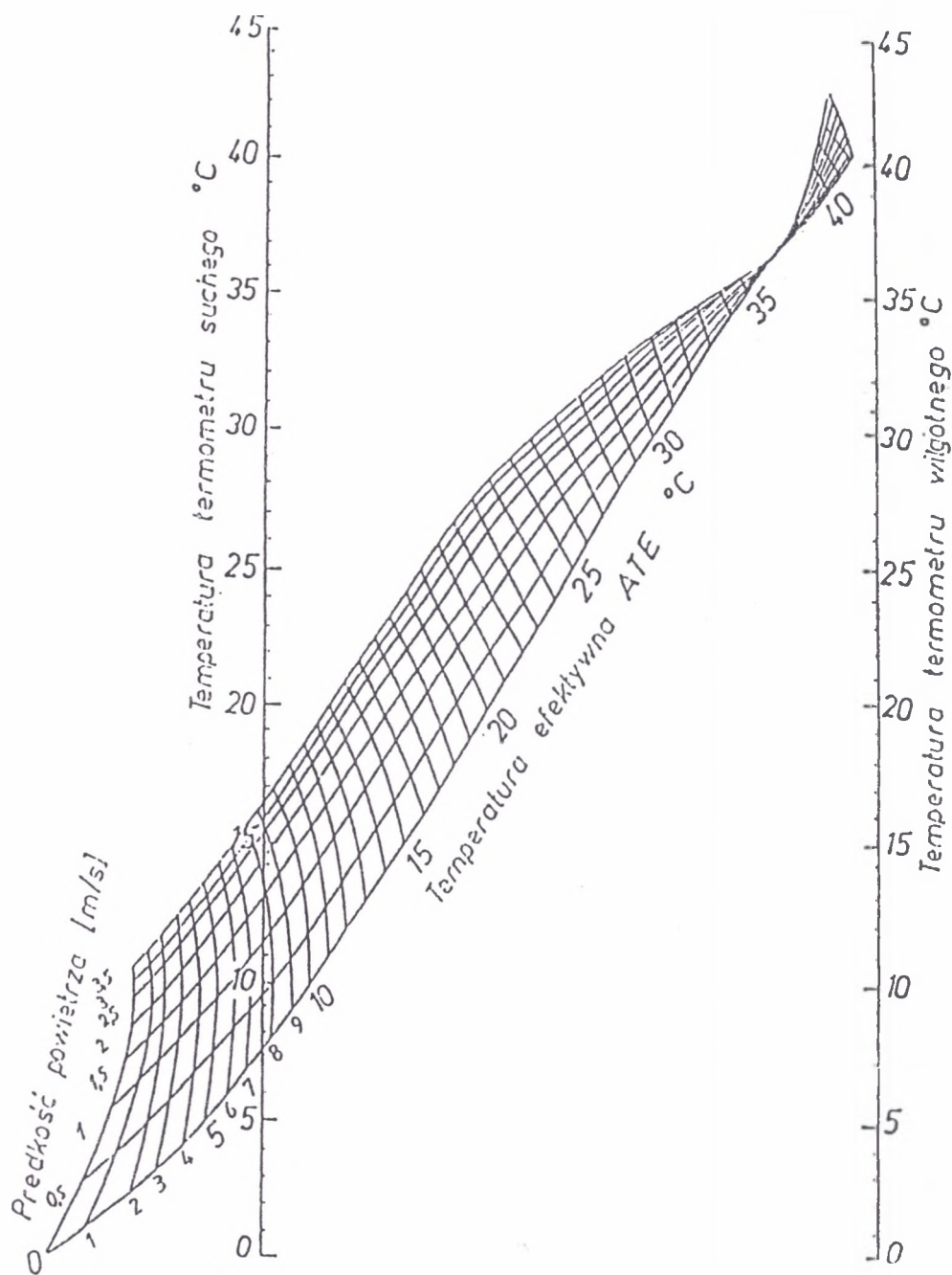
Badana osoba	Napięcie (V)	Impedancja ciała (kΩ)					
		Wypoczynek $\delta = -0,2$			Praca $\delta = 0,7$		
		Zmierzona	Spodziewana	Różnica	Zmierzona	Spodziewana	Różnica
I	14	39	34	5	27	20	7
	27	32	29	3	20	17	3
	40	26	24	2	16	14	2
II	14	40	34	6	24	20	4
	27	31	29	2	18	17	1
	40	25	24	1	15	14	1
III	14	38	34	4	26	20	6
	27	30	29	1	18	17	1
	40	25	24	1	16	14	2
IV	14	42	34	8	28	20	8
	27	33	29	4	22	17	5
	40	27	24	3	18	14	4

Powstałe różnice pomiędzy wartością impedancji ciała zmierzoną wśród pracujących osób a wartością spodziewaną wyliczoną ze wzoru (3.4) wynikają z niejednakowych wydatków energetycznych obserwowanych osób oraz osobniczo zmiennych predyspozycji na badane zjawisko.

Przeprowadzona weryfikacja pozwala zaakceptować opracowane wyniki w tab. 3.11 jako prognozę wartości spodziewanej impedancji ciała człowieka zależnie od klimatycznych warunków pracy określonych wskaźnikiem dyskomfortu cieplnego  $\delta$ .

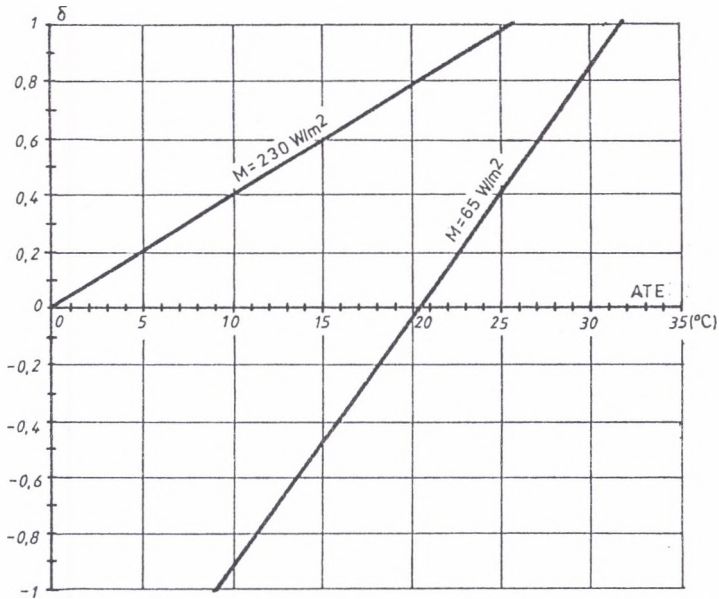
Wskaźnik dyskomfortu cieplnego  $\delta$  ma znaczenie uniwersalne, gdyż uwzględnia wydatek energetyczny człowieka zależnie od rodzaju wykonywanej pracy.

Opracowane wykresy i zależności funkcyjne zmiany wartości impedancji ciała człowieka od wpływu klimatu w katastroficznych wilgotnych dotyczą ludzi niepracujących i zaaklimatyzowanych, natomiast dla ludzi pracujących stosować należy wykresy i zależności zmian wartości impedancji ciała w funkcji wskaźnika dyskomfortu cieplnego  $\delta$ .



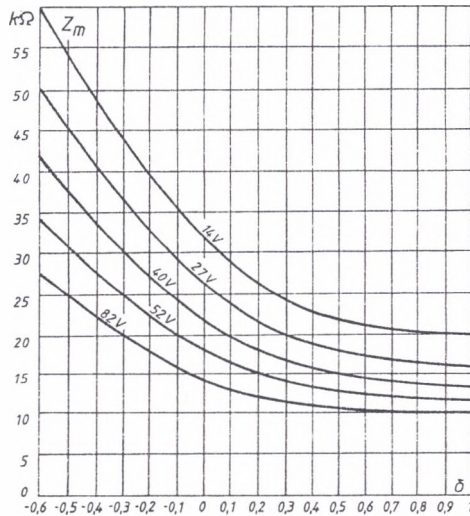
Rys. 3.9. Nomogram do wyznaczania efektywnej temperatury amerykańskiej (ATE) dla ludzi ubranych  
 Fig. 3.9. Nomogram for evaluating American Effective Temperatures (AFT) for in clothed men





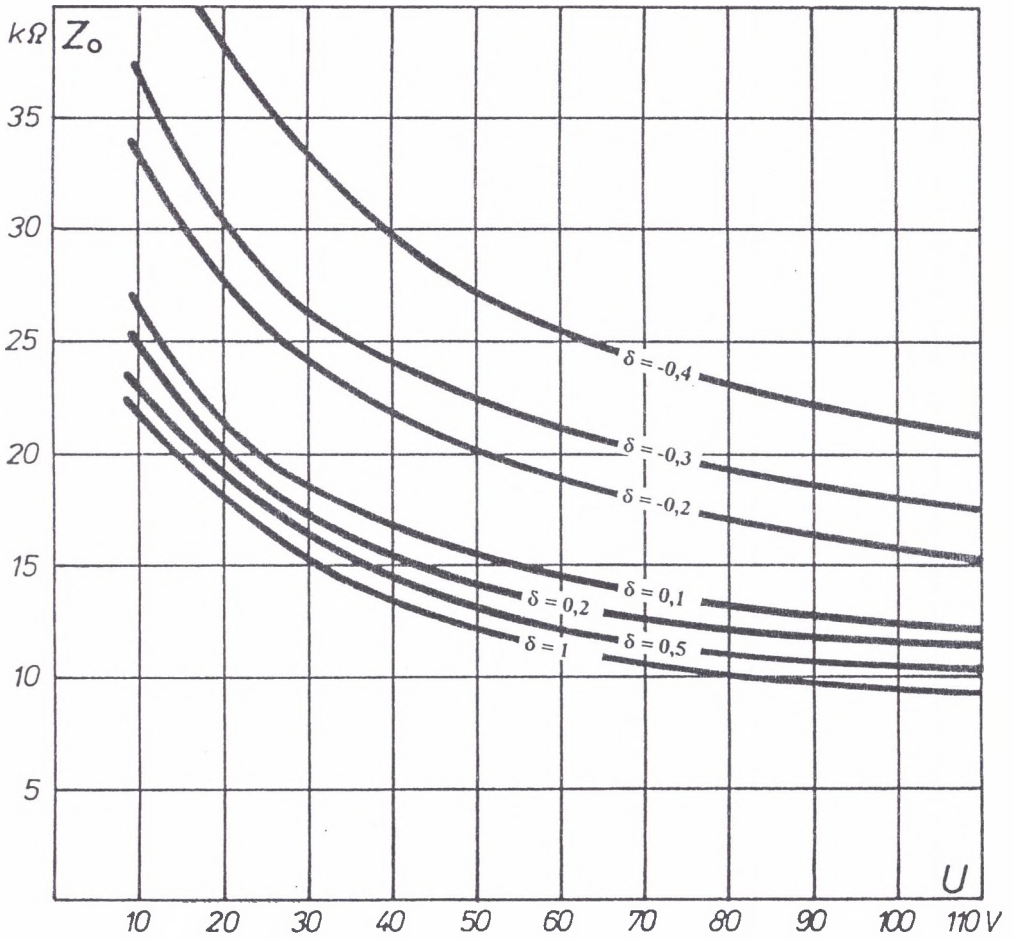
Rys. 3.10. Przebieg izol linii wydatku energetycznego dla spoczynku ( $65 \text{ W/m}^2$ ) i pracy ciężkiej ( $230 \text{ W/m}^2$ ) ludzi ubranych i zaaklimatyzowanych w powietrzu o wilgotności 80% zależnie od efektywnej temperatury amerykańskiej ATE

Fig 3.10. Energetical load workers constants lines for standby ( $65 \text{ W/m}^2$ ) and hard work ( $230 \text{ W/m}^2$ ). The workers were dressed and acclimatir moisture 80 % according to the effective american temperatures (ATE)



Rys. 3.11. Przebieg zmian wartości funkcji empirycznej impedancji ciała człowieka zależnie od wskaźnika dyskom-fortu cieplnego

Fig 3.11. Empirical function course of impedance of human body depends on termical discomfort pointer



Rys. 3.12. Wartość impedancji ciała człowieka zależnie od wskaźnika dyskomfortu cieplnego i napięcia raze-  
nia

Fig. 3.12. Value of impedance of human body depends on thermal discomfort pointer and shock tension coef-  
ficient

## 4. WPŁYW HAŁASU ORAZ WIBRACJI NA IMPEDANCJĘ CIAŁA CZŁOWIEKA

### 4.1. Charakterystyka bodźców akustycznych

Hałas jest zjawiskiem akustycznym, niepożądanym w określonym miejscu i czasie. Działanie hałasu na organizm człowieka może być nie tylko szkodliwe, ale także uciążliwe i irytujące oraz ma wpływ na bezpieczeństwo pracy. Hałas powoduje zmęczenie, rozprasza uwagę, zmniejsza zrozumiałość mowy, działa także ujemnie na psychikę. Praca fizyczna wykonywana w hałasie wymaga większego wydatku energetycznego w porównaniu z tą samą pracą wykonywaną w ciszy [46]. Praca umysłowa wykonywana w hałasie zmusza do dodatkowego wysiłku woli i większej koncentracji uwagi. Szkodliwość hałasu zależy przede wszystkim od jego natężenia oraz czasu oddziaływania na człowieka.

Aperiodycznie powtarzające się drgania wywołują wrażenie hałasu. W ocenie wpływu hałasu na narząd słuchu człowieka istotne znaczenie posiada zależność reakcji słyszenia dźwięków od tonu o częstotliwości 1kHz [46]. Poziom dźwięku, czyli natężenie hałasu w [dB], określa stosunek ciśnienia akustycznego lub natężenia dźwięku do wartości progu słyszalności, wyrażony w skali logarytmicznej.

Ciśnienie akustyczne, ( $p$ ) jest to przyrost ciśnienia środowiska ponad ciśnienie statyczne w wyniku powstawania i rozchodzenia się dźwięku. Najmniejsza wartość ciśnienia akustycznego powodująca wrażenie słuchowe (próg słyszalności) wynosi  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa przy częstotliwości 1 kHz [37]. Poziom ciśnienia akustycznego ( $L_p$ ) określa wzór [46]:

$$L_p = 10 \lg \frac{p^2}{p_0^2}, \quad (4.1)$$

gdzie :  $L_p$  - poziom ciśnienia akustycznego (dB),

$p$  - ciśnienie akustyczne mierzone (Pa),

$p_0$  - ciśnienie akustyczne dla progu słyszalności ( $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ ).

Natężenie dźwięku ( $I$ ) jest to ilość energii pola przenikającej w jednostce czasu przez powierzchnię prostopadłą do kierunku rozprzestrzeniania się fali akustycznej. Poziom natężenia dźwięku ( $L$ ) określa wzór [46]:

$$L = 10 \lg \frac{I}{I_0}, \quad (4.2)$$

gdzie :  $L$  - poziom natężenia dźwięku (dB),

$I$  - natężenie dźwięku ( $\text{W/m}^2$ ),

$I_0$  - natężenie dźwięku dla progu słyszalności ( $I_0 = 10^{-12} \text{W/m}^2$ ).

Natężenie dźwięku jest proporcjonalne do kwadratu ciśnienia akustycznego [44].

$$I = \frac{p^2}{\gamma c}, \quad (4.3)$$

gdzie : p - wartość ciśnienia akustycznego, (Pa),  
 c - prędkość rozchodzenia się dźwięku (m/s),  
 $\gamma$  - gęstość środowiska (powietrza) ( $\text{kg/m}^3$ ).

Dźwięki charakteryzują się różnym oddziaływaniem na człowieka w zależności od ich częstotliwości drgań. Pomiar wielkości akustycznych oddziałujących na człowieka wykonuje się z poprawkami uwzględniającymi wrażliwość narządu słuchu. W miernikach poziomu dźwięku stosuje się filtry korekcyjne (A, B, C), które uwzględniają zróżnicowane czułości słuchu na odbiór bodźców akustycznych o różnych częstotliwościach. Filtry korekcyjne są charakterystykami cechowania przyrządu pomiarowego w funkcji częstotliwości i przystosowują charakterystykę przyrządu do charakterystyki wrażliwości ucha w zakresie poziomów intensywności dźwięków dla tonów niskich, umiarkowanych i wysokich. W celu określenia narażenia człowieka na bodźce akustyczne mierzy się ciśnienie akustyczne i wprowadza odpowiednie poprawki [52]. Wprowadzono pojęcia: poziom dźwięku A, poziom dźwięku C, maksymalny poziom dźwięku A oraz szczytowy poziom dźwięku C [75].

- Poziom dźwięku A, ( $L_A$ ) jest to poziom ciśnienia akustycznego skorygowany według charakterystyki częstotliwościowej A.
- Poziom dźwięku C, ( $L_C$ ) jest to poziom ciśnienia akustycznego skorygowany według charakterystyki częstotliwościowej C.
- Maksymalny poziom dźwięku A, ( $L_{Amax}$ ) jest to maksymalna wartość skuteczna poziomu dźwięku A, występująca w czasie obserwacji.
- Szczytowy poziom dźwięku C, ( $L_{Cmax}$ ) jest to maksymalna wartość chwilowa poziomu dźwięku C, występująca w czasie obserwacji.

Do oceny hałasów niestacjonarnych lub przerywanych w przedziałach czasowych stosuje się równoważny poziom dźwięku A, ( $L_{Aeq}$ ) [69] [75], określane wzorem :

$$L_{Aeq, T_e} = 10 \lg \left[ \frac{1}{T_e} \int_0^{T_e} \left( \frac{p_A(t)}{p_0} \right)^2 dt \right], \quad (4.4)$$

gdzie :  $L_{Aeq, T_e}$  - równoważny poziom dźwięku A (dB),  
 $T_e$  - czas ekspozycji w ciągu określonego okresu (s),  
 $p_A$  - wartość chwilowa ciśnienia akustycznego, skorygowanego wg charakterystyki częstotliwościowej A, (Pa),  
 $p_0$  - ciśnienie akustyczne dla progu słyszalności  $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ ,  
 t - czas.

Dopuszczalny poziom ekspozycji hałasu odniesiony do 8-godzinnego dnia pracy ze względu na ochronę słuchu nie powinien przekroczyć 85 dB [76] [87]. Maksymalny poziom dźwięku A nie powinien przekraczać wartości 115 dB, natomiast szczytowy poziom dźwięku C nie powinien przekraczać wartości 135 dB [87].



## 4.2. Wpływ bodźców akustycznych na zmianę impedancji ciała człowieka

Drgania słuchowe powstają, gdy bodziec akustyczny w postaci fali dociera do narządu słuchu. Dźwięk jest powodowany przez podłużne drgania cząsteczek środowiska zewnętrznego, które uderzają o błonę bębenkową narządu słuchu człowieka. Ruchy cząsteczek zwane falami akustycznymi wywołują drgania błony bębenkowej o grubości 0,1 mm, zamykającej zewnętrzny przewód słuchowy. Drgania błony spowodowane falą akustyczną są przenoszone na błonę okienka owalnego przez kostny układ dźwigni dwuramiennej, składającej się ze strzemiączka, kowadełka i młoteczka. Ponieważ powierzchnia błony bębenkowej wynosi 60 mm<sup>2</sup>, a błona okienka owalnego tylko 3 mm<sup>2</sup>, występuje zjawisko wzmocnienia siły drgania kosztem jego amplitudy. Wzmocnienie to jest konieczne, ponieważ od okienka owalnego rozpoczyna się układ hydrauliczny narządu słuchu.

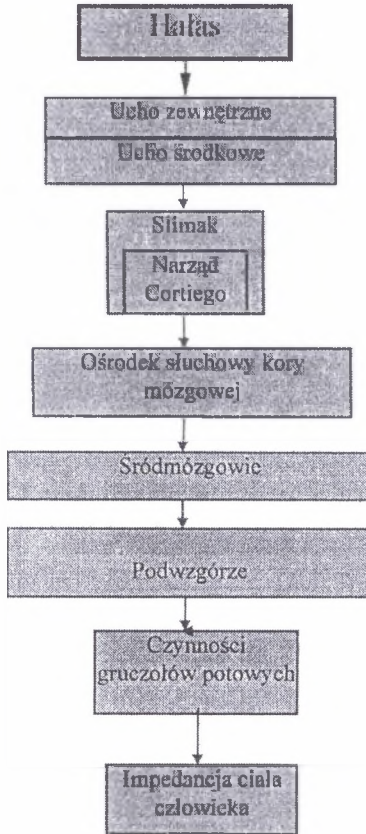
Drgania strzemiączka wywołują falisty ruch cieczy, zwanej przychłonką, która odkształca błonę podstawową ślimaka ucha. W kanale ślimaka na błonie podstawowej znajdują się właściwe receptory narządu słuchu. Są to podłużne, wrzecionowate komórki, zakończone delikatnymi rzęskami, stanowiące narząd Cortiego [12]. Drgająca błona podstawowa powoduje przyciskanie, względnie ocieranie rzęsek komórek narządu Cortiego. W komórkach tych powstaje pobudzenie, które w postaci ciągów impulsów nerwowych jest przekazywane za pośrednictwem nerwu słuchowego do mózgowia. Układ nerwowy człowieka rozróżnia dwie cechy doznań subiektywnych dźwięku: głośność i wysokość tonu. Głośność dźwięku związana jest z amplitudą fali akustycznej, a jego wysokość z częstotliwością. Częstotliwość dźwięków słyszanych przez człowieka zawarta jest w przedziale od 16 Hz do 16 kHz [44]. Największa wrażliwość słuchu człowieka odpowiada zakresowi częstotliwości 1000-4000 Hz [12].

Impulsy nerwowe wysyłane do mózgowia przez komórki rzęstate narządu Cortiego docierają do ośrodków słuchowych kory mózgowej, w której powstają doznania słuchowe oraz procesy związane z percepcją dźwięków [52]. W korze mózgowej dokonuje się różnicowanie i rozpoznawanie sygnałów akustycznych. Część przesyłanych impulsów nerwowych dociera do śródmózgowia, które jest połączone z podwzgórzem [12]. Dzięki licznym powiązaniom wstępującej drogi słuchowej z innymi ośrodkami w ośrodkowym układzie nerwowym bodźce akustyczne nie tylko wywołują wrażenie słuchowe, ale zapoczątkowują wiele reakcji odruchowych [50]. Reakcje te wpływają między innymi na termoregulację organizmu, powodując rozszerzenie naczyń krwionośnych oraz zmiany czynności gruczołów skóry.

Pobudzony impulsami z kory mózgowej ośrodek termoregulacji mieszczący się w podwzgórzcu oddziałuje na czynność gruczołów potowych w skórze. Zwiększenie czynności gruczołów potowych w skórze jest przyczyną obniżenia wartości impedancji ciała. Wpływ hałasu na fizjologię organizmu, która powoduje zmiany wartości impedancji ciała człowieka, pokazano schematycznie na rys.4.1.

Bodźce akustyczne oddziałujące na podwzgórze wpływają również na częstość skurczów serca [12]. Pojawienie się przeraźliwego bodźca akustycznego o charakterze alarmowym powoduje przyspieszenie tętna serca [50].

Istnieją bodźce akustyczne, które są uciążliwe nie tylko ze względu na swe natężenie, ale również z uwagi na swój charakter. Należy tu wymienić bodźce o częstotliwości przekraczającej 5000 Hz, określane jako zgrzyty, piski, świsty. Wiele osób nie znosi hałasu towarzyszącego skrobaniu nożem blachy, tarciu styropianem o szybę. Reakcja człowieka na takie dźwięki powoduje pojawienie się gęsiej skóry, dreszczy oraz zmianę parametrów elektrofizjologicznych skóry.



Rys. 4.1. Schemat oddziaływania hałasu na organizm człowieka powodującego zmiany impedancji ciała  
 Fig. 4.1. Scheme of noise's influence on human's body which causes changes his impedance

### 4.3. Źródła hałasu w kopalniach

Charakteryzując kopalnie węgla kamiennego pod względem zagrożenia hałasem stwierdzić należy, że istnieje w nich szereg miejsc pracy, w których natężenie hałasu osiąga wartości szkodliwe dla organizmu człowieka.

Hałas wytwarzany przez maszyny górnicze napędzane silnikami elektrycznymi spowodowany jest przyczynami aerodynamicznymi i mechanicznymi. W praktyce występują często hałasy pochodzenia mieszanego, wywoływane zarówno źródłami mechanicznymi, jak i aerodynamicznymi.

Hałas pochodzenia mechanicznego wytwarzany jest wskutek tarcia, drgań i zderzeń części maszyn. W maszynach górniczych spowodowany jest głównie drganiami łożysk i niewyważeniem dynamicznym wirnika. Drgania łożysk (luzy, nieprawidłowość montażu) są wynikiem zmieniającego się obciążenia elementów łożyska w czasie pracy. Część energii tych drgań zamienia się

bezpośrednio na energię akustyczną, natomiast pozostała część pobudza do drgań elementy stykające się z łożyskami. Pośrednio na hałas mechaniczny wpływa sposób sprzęgania i posadowienia maszyny.

Hałas aerodynamiczny wywołany jest drganiem cząstek powietrza wprawionych w ruch przez wentylator i inne części wirujące. Widmo hałasu aerodynamicznego może być tonalne lub ciągłe, obejmujące cały zakres częstotliwości akustycznej [31]. Hałasy aerodynamiczne odgrywają istotną rolę w maszynach o dużych prędkościach obrotowych.

W procesie powstawania hałasu dużą rolę odgrywają układy rezonansowe, które mogą silnie wzmacniać dźwięki. Jeżeli nastąpi rezonans częstotliwości drgań wytwarzanych przez łożyska oraz drgań własnych elementów maszyny, to drgania i hałas zwiększają się. Częstotliwość drgań tworzy szerokie widmo, osiągające kilkadziesiąt tysięcy Hz.

Przeprowadzone pomiary i obserwacje wykazały, że głównymi źródłami hałasu w podziemiach kopalni węgla kamiennego są: wentylatory lutniowe, pompy wodne, przenośniki zgrzeblowe, urządzenia załadowni wozów oraz proces urabiania calizny węglowej. Na powierzchni zakładu górniczego istotnymi źródłami hałasu są: wentylatory głównego przewietrzania kopalni, przetwornice elektromaszynowe maszyn wyciągowych, sprężarki powietrza oraz urządzenia zakładu mechanicznej przeróbki węgla.

Przeprowadzone w 1998 roku badania [65] w wybranej kopalni węgla kamiennego wykazały, że 51,1 % zatrudnionych pracowników narażonych jest na nadmierny hałas. Obserwacje wykonano w kopalni zatrudniającej 3708 pracowników [65]. Wyniki analizy stanowisk w obserwowanej kopalni pod kątem wielkości narażenia, w zależności od poziomu ekspozycji na hałas w odniesieniu do 8 godzin, przedstawiono w tab. 4.1.

Tabela 4.1

Stopień narażenia pracowników dołowych kopalni na hałas [65]

Narażenie	poniżej 82 dB	82 – 85 dB	86 – 90 dB	powyżej 90 dB
Pracownicy narażeni na hałas - ogółem	15,2 %	27,2 %	51,6 %	6 %

Do oceny wielkości zjawiska hałasu w kopalni węgla kamiennego wykorzystano wyniki przeprowadzonych pomiarów hałasu na wybranych stanowiskach pracy. Pomiary przeprowadzono zgodnie z wymaganiami normy PN-81/N-01306 [75] całkującym miernikiem poziomu dźwięku typu IM-02m oraz IM-10 firmy SONOPAN. Wykonane pomiary określiły na badanym stanowisku wartość równoważnego poziomu dźwięku A, maksymalnego poziomu dźwięku A oraz szczytowego poziomu dźwięku C. Wyniki przeprowadzonych pomiarów hałasu w kopalni węgla kamiennego (wartości maksymalne) przedstawiono w tab. 4.2.

Tabela 4.2

Wynik pomiaru hałasu w wybranych miejscach kopalni węgla kamiennego

Źródła emisji hałasu	Równoważny poziom dźwięku A	Maksymalny poziom dźwięku A	Szczytowy poziom dźwięku C
	dB	dB	dB
Kombajn AM-65	93	99	112
Kombajn AM-50	93	99	109
Kombajn KGS-324	98	104	118
Kombajn KGS-445	94	100	114
Kombajn KGS-475	89	95	106

cd. tabeli 4.2

Kombajn KWB3RDU/B	93	99	112
Przeñośnik zgrzeblowy Rybnik 80	90	96	110
Przeñośnik Skat	91	98	108
Przeñośnik PTG	87	93	103
Kołowrót EKO-30	92	94	104
Wiertnica WUP-32	99	107	120
Lokomotywa dołowa LD 31	86	88	92
Pociąg z węglem	89	95	104
Załadownia wozów	91	94	105
Przetwornice maszyn wyciąg.	95	103	112
Pompy główn. odwadniania	85	89	99
Urządzenia skipowe	91	101	104
Wentylator główny	98	112	120
Pompy ciśnieniowe	98	114	118
Wentylator lutniowy WLE800	97	102	112

Widmo hałasu kształtowane jest przez częstotliwość drgania elementów mechanicznych. Analizę widmową dla maszyn i urządzeń górniczych przeprowadza Laboratorium Akustyki Technicznej w Głównym Instytucie Górnictwa w Katowicach. Na podstawie przeprowadzonych tam badań określono wartość średniego poziomu ciśnienia akustycznego w oktaowych pasmach częstotliwości o wartościach częstotliwości środkowej: 64, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Hz [75]. Zmierzone wartości hałasu emitowanego przez niektóre podstawowe maszyny górnicze przedstawia tab. 4.3.

Tabela 4.3

Wartość średniego poziomu ciśnienia akustycznego wytwarzanego przez wybrane maszyny górnicze

Zródło hałasu	Średnia częstotliwość pasm oktaowych (Hz)							
	64	125	250	500	1000	2000	4000	8000
	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB
Wentylator lutniowy WLE -800	86	90	93	106	115	108	102	91
Kombajn chodnikowy AM-50	78	76	71	78	83	89	68	62
Kombajn ścianowy KGS-315/B	70	76	72	78	80	75	68	69
Przeñośnik ścianowy Rybnik 80	68	78	80	88	79	76	68	65
Przeñośnik taśmowy Gwarek B-1000	62	68	79	85	85	82	78	68
Przeñośnik podścianowy Samson	76	84	86	90	88	86	76	72

#### 4.4. Badania eksperymentalne zmian wartości impedancji ciała człowieka narażonego na hałas

O zależności wartości impedancji ciała człowieka od narażenia na hałas pisali w swoich pracach: Manojłow [47] oraz Krasucki [40], [43]. Stwierdzenie to posiada charakter jakościowy i stanowi tylko informację o jednym z wielu czynników wpływających na modelowe wartości impedancji ciała człowieka, które nie zostało poparte badaniami ilościowymi.

Przedstawione w p.4.2 fizjologiczne powiązanie oddziaływania hałasu na zmiany w organizmie człowieka, powodujące zmianę wartości impedancji ciała, wymaga potwierdzenia empirycznego. W celu poznania wpływu hałasu na impedancję ciała człowieka przeprowadzono badania doświadczalne „in vivo”, polegające na pomiarze wartości impedancji standardowej ciała osób



eksponowanych na określone bodźce akustyczne. Badania wykonano w atestowanej komorze audiometrycznej typu GIG - AU1. Wykorzystana komora audiometryczna wyposażona była w generator tonów o zakresie częstotliwości od 250 Hz do 12000 Hz oraz regulator poziomu natężenia dźwięku. Sygnały akustyczne o zdeterminowanych częstotliwościach i poziomach natężenia dźwięku były doprowadzane do osoby badanej za pomocą słuchawek. W celu określenia zależności zmian wartości impedancji ciała człowieka od parametrów bodźców akustycznych stosowano w badaniach dźwięku o częstotliwościach: 250, 500, 1000, 2000, 3000, 4000, 6000, 8000, 10 000, 12 000 Hz, o poziomach natężenia dźwięku w zakresie od 50 dB do 100 dB.

Do badań zmian impedancji ciała pod wpływem hałasu wybrano wolontariuszy zatrudnionych na dole kopalni, którzy spełniali warunki zdrowotne do wykonywania pracy górniczej. Osoby wybrano w wieku od 24 do 48 lat, kierując się średnim wiekiem pracowników zatrudnionych w kopalniach węgla kamiennego. Wybrano do badań tylko te osoby zakwalifikowane przez lekarza, u których po wcześniejszym sprawdzeniu słuchu w komorze audiometrycznej stwierdzono słuch w normie. Badania wykonano w stałym klimacie, mierzonym katatermometrem, który wynosił 15 katastopni wilgotnych [28].

Pomiary impedancji ciała wykonano na standardowej drodze rażenia od opuszka kciuka do opuszka palca środkowego. W czasie wykonywania badań powierzchnia dotyku opuszka palca do elektrody płaskiej wynosiła 3,3 cm<sup>2</sup> i zapewniono stałą siłę docisku. Wartość impedancji ciała określono dla pomiarowego napięcia rażenia 27V o częstotliwości 50 Hz. Osoba badana przed pomiarem wartości impedancji jego ciała narażona była w czasie 5-minutowej adaptacji na działanie zdeterminowanego bodźca akustycznego.

Wykonano 28 serii pomiarów impedancji standardowej ciała wolontariuszy eksponowanych na bodźce akustyczne o zdeterminowanej częstotliwości i poziomie natężenia dźwięku. Na podstawie wykonanych empirycznych badań impedancji standardowej wyznaczono wartość średnią ( $Z_m$ ) badanej impedancji ciała oraz odchylenie standardowe (s). Wyniki wartości średniej przedstawia tab. 4.4. Graficzną zależność zmian funkcji empirycznej impedancji ciała od częstotliwości bodźca akustycznego pokazano na rys.4.2, natomiast od poziomu natężenia dźwięku na rys. 4.3.

Wykonywanie badań parametrów elektrofizjologicznych człowieka stanowi bardzo złożony problem ze względu na ich dużą zmienność. W związku z tym w zasadzie możliwe jest tylko ustalenie zależności zmian na podstawie metod statystycznych. Mając do dyspozycji odpowiednią ilość wyników pomiarów podjęto próbę uogólnienia zjawisk w formie zapisu empirycznego.

Tabela 4.4

Wyniki empirycznych wartości średniej impedancji standardowej ciała człowieka  
 $Z_m = f(f, L_1)$  dla zdeterminowanej częstotliwości i poziomu natężenia dźwięku (kΩ)

Częstotliwość (Hz)	Poziom natężenia dźwięku												Regresja liniowa	$\sigma$
	50 dB		60 dB		70 dB		80 dB		90 dB		100 dB			
	$Z_m$	s	$Z_m$	s	$Z_m$	s	$Z_m$	s	$Z_m$	s	$Z_m$	s		
250	71	12	64	10	58	12	54	13	49	11	45	12	Z=96,6-0,52L	0,994
500	67	10	62	9	56	11	52	12	46	10	42	11	Z=92,7-0,50L	0,998
1000	64	11	58	8	53	10	48	11	43	8	38	9	Z=89,3-0,51L	0,999
2000	64	8	54	9	49	7	44	9	40	9	35	8	Z=87,2-0,52L	0,990
3000	59	8	53	10	48	8	43	9	38	8	34	9	Z=83,8-0,50L	0,998
4000	58	10	52	9	47	8	42	8	37	10	33	9	Z=82,6-0,50L	0,998
6000	56	9	51	9	46	8	41	9	35	6	30	7	Z=80,4-0,51L	0,995
8000	56	9	51	9	45	8	40	6	35	7	31	6	Z=79,1-0,50L	0,998
10000	58	10	52	10	47	9	42	9	37	8	34	7	Z=81,4-0,48L	0,996
12000	60	10	55	11	49	10	44	8	40	9	35	9	Z=83,2-0,49L	0,998

$Z_m$  - średnia wartość empiryczna impedancji standardowej ciała człowieka (kΩ)

s - odchylenie standardowe

$\sigma$  - współczynnik korelacji

Korzystając z empirycznych wyników pomiarów (tab. 4.4) wartości średniej impedancji standardowej ciała człowieka opracowano badane zjawisko w sposób analityczny. Posługując się funkcją regresji wyznaczono zależność impedancji ciała człowieka od poziomu natężenia dźwięku dla zdeterminowanej częstotliwości bodźca akustycznego. Wyniki regresji liniowej podano w tab. 4.4. Empiryczna zależność zmian impedancji standardowej ciała narażonego na bodźce akustyczne o zdeterminowanym poziomie natężenia dźwięku (rys. 4.3) jest zależnością quasi-liniową i można ją określić równaniem liniowym  $Z_0 = a - b \cdot L$ . Współczynnik „a” równania otrzymanego przez regresję liniową, przedstawiony w tab. 4.4, zależy od częstotliwości bodźca akustycznego. Wobec powyższego stwierdzenia równanie zapisujemy:

$$Z_0 = a(f) - b \cdot L \quad (4.5)$$

Posługując się programem komputerowym wyznaczono kilka rodzajów zależności funkcyjnych  $Z_0 = f(f, L)$ , które podano w tab. 4.5. W celu wyboru równania najdokładniej opisującego badane zjawisko przeprowadzono weryfikację równań  $Z_0 = f(f, L)$  według zasady najmniejszych kwadratów [60]. Zasada ta żąda, aby parametry najodpowiedniejszego równania były takie, dla których suma kwadratów odchyłeń jest najmniejsza. Po wyliczeniu wartości funkcji impedancji standardowej ciała człowieka ( $Z_0$ ) dla każdego z rozpatrywanych równań w tab. 4.5 i porównaniu z wartościami empirycznymi ( $Z_m$ ) przedstawionymi w tab. 4.4 wyznaczono średnią sumę kwadratów odchyłeń. Wyliczoną wartość średniej sumy kwadratów odchyłeń  $\sum(Z_m - Z_0)^2/n$  podano w tab. 4.5. Kierując się zasadą najmniejszych kwadratów zdecydowano, że wzór nr 4 z tab. 4.5 jest równaniem najdokładniej ujmującym badane zjawisko.

Tabela 4.5  
Porozpozycje empirycznych równań zależności  $Z_0 = f(f, L)$   
oraz wyniki ich weryfikacji

Lp.	$Z_0 = a(f) - 0,5 L$	$\frac{\sum(Z_m - Z_0)^2}{n}$	Weryfikacja
1	$Z_0 = 79 + \frac{(f-7000)^2}{(1600)^2} - 0,5 L$	9,3	-
2	$Z_0 = 80 + \frac{(f-8000)^2}{(2000)^2} - 0,5 L$	6,4	-
3	$Z_0 = 130 - 6 \ln f - 0,5 L$	21,4	-
4	$Z_0 = 80 + \frac{(f-7000)^2}{(2000)^2} - 0,5 L$	2,4	+

Równanie najdokładniej opisujące zależność impedancji standardowej ciała od częstotliwości i poziomu natężenia dźwięku zostało określone:

$$Z_0 = 80 + \frac{(f - 7000)^2}{(2000)^2} - 0,5 L, \quad (4.6)$$

gdzie:  $Z_0$  - impedancja standardowa ciała człowieka (k $\Omega$ ),

$f$  - częstotliwość dźwięku (Hz),

$L$  - poziom natężenia dźwięku (dB).

Porównanie wartości empirycznych impedancji ciała z wartościami wyznaczonymi analitycznie na podstawie przyjętego równania (4.6) oraz różnice wyników  $\Delta$  przedstawia tab. 4.6.

Tabela 4.6

Porównanie wartości empirycznych impedancji standardowej ciała człowieka ( $Z_m$ ) z wartościami ( $Z_0$ ) wyliczonymi analitycznie

Często- tliwość (Hz)	Poziom natężenia dźwięku																	
	50 dB			60 dB			70 dB			80 dB			90 dB			100 dB		
	$Z_m$	$Z_0$	$\Delta$	$Z_m$	$Z_0$	$\Delta$	$Z_m$	$Z_0$	$\Delta$	$Z_m$	$Z_0$	$\Delta$	$Z_m$	$Z_0$	$\Delta$	$Z_m$	$Z_0$	$\Delta$
250	71	66	5	64	61	3	58	56	4	54	51	3	49	46	3	45	41	3
500	67	65	2	62	60	2	56	55	1	52	50	2	46	45	1	42	40	2
1000	64	64	0	58	59	1	53	54	1	48	49	1	43	44	1	38	39	1
2000	64	61	2	54	56	2	49	51	2	44	46	2	40	41	1	35	36	1
3000	59	59	0	53	54	1	48	49	1	43	44	1	38	39	1	34	34	0
4000	58	57	1	52	52	0	47	47	0	42	42	0	37	37	0	33	32	1
6000	56	55	1	51	50	1	46	45	1	41	40	1	35	35	0	30	30	0
8000	56	55	1	51	50	1	45	45	0	40	40	0	35	35	0	31	30	1
10000	58	57	1	52	52	0	47	47	0	42	42	0	37	37	0	34	32	2
12000	60	61	1	55	56	1	49	51	2	44	46	2	40	41	1	35	36	1

$$\Delta = (Z_m - Z_0)$$

Zależność zmian wartości impedancji ciała wyznaczoną ze wzoru (4.6) w funkcji częstotliwości stosowanego bodźca akustycznego pokazano na rys. 4.4, natomiast w zależności od poziomu natężenia bodźca pokazano na rys. 4.5.

Otrzymane wyniki badań zostały wykonane dla pomiarowego napięcia rażenia 27V oraz dla klimatu 15 katastopni wilgotnych. Ponieważ wiadomo z wyników badań (p.3.3), że wartość impedancji ciała zależy od napięcia rażenia i klimatu środowiska, uwzględnic należy tę zależność w równaniu (4.6). Porównując część stałą równania (4.6) z wartościami impedancji standardowej z tab. 3.2 uważać należy, że jest ona funkcją klimatu i napięcia rażenia. Uwzględniając powyższe, równanie (4.6) przyjmuje postać:

$$Z_0 = Z_0(K, U) + \frac{(f - 7000)^2}{(2000)^2} - 0,5 L \quad (4.7)$$

Korzystając z równania (3.2) ujmującego zależność  $Z_0 = f(K, U)$ , równanie (4.7) można przedstawić:

$$Z_0 = \frac{0,45 K^{2,3}}{\sqrt[3]{U}} + \frac{(f - 7000)^2}{(2000)^2} - 0,5 L, \quad (4.8)$$

gdzie:  $Z_0$  - impedancja standardowa ciała człowieka (k $\Omega$ ),  
 $K$  - klimat środowiska ( $^{\circ}K_w$ ),  
 $L$  - poziom natężenia dźwięku (dB),  
 $U$  - napięcie rażenia (V),  
 $f$  - częstotliwość bodźca akustycznego (Hz).

Równanie (4.8) pozwala wyznaczyć prawidłową wartość impedancji ciała dla określonych warunków klimatycznych, których wartość zmierzona katatermometrem jest większa od 14 katastopni wilgotnych oraz dla napięcia rażenia  $U < 52$  V. Wobec przedstawianych ograniczeń należało prze-

przewodząc dalsze pomiary badanego zjawiska w różnym klimacie i przy różnych napięciach rażenia. Badania przeprowadzono w tej samej komorze audiometrycznej. Dodatkowe pomiary impedancji ciała wykonano w klimacie o wartościach od 13 do 16 katastopni wilgotnych oraz dla napięć rażenia 14 V, 27 V, 40 V i 52 V. Otrzymane wyniki pomiarów (tab. 4.8) pozwoliły za pomocą programu komputerowego wyznaczyć kilka równań opisujących badane zjawisko. Po ich weryfikacji zdecydowano, że najważniejszą wartością impedancji ciała eksponowanego na hałas o określonej częstotliwości i poziomie natężenia zależnie od klimatu i napięcia rażenia opisuje równanie:

$$Z_0 = \frac{0,45 K^{2,3} - 1,3 L e^{-0,006(f-7)^2}}{\sqrt[3]{U}}, \quad (4.9)$$

gdzie:  $Z_0$  - impedancja standardowa ciała człowieka (k $\Omega$ ),

$K$  - klimat środowiska ( $^{\circ}K_w$ ),

$U$  - napięcie rażenia (V),

$L$  - poziom natężenia dźwięku (dB),

$f$  - częstotliwość bodźca akustycznego (kHz).

Równanie (4.9) jest bardziej uniwersalne od (4.8) i pozwala wyznaczyć prawidłową wartość impedancji ciała uwarunkowaną klimatem środowiska, którego wartość jest większa od 11,7 katastopni wilgotnych. Porównanie wartości empirycznych impedancji ciała zmierzonych napięciem 27 V w klimacie  $15^{\circ}K_w$  (tab. 4.4) z wartościami wyznaczonymi analitycznie z równania (4.9) oraz różnice wyników  $\Delta$  przedstawia tab. 4.7.

Tabela 4.7

Porównanie wartości empirycznych impedancji standardowej ciała człowieka ( $Z_m$ ) z wyliczonymi analitycznie wartościami ( $Z_0$ ) w funkcji częstotliwości i poziomu natężenia dźwięku

Częstotliwość (kHz)	Poziom natężenia dźwięku																	
	50 dB			60 dB			70 dB			80 dB			90 dB			100 dB		
	$Z_m$	$Z_0$	$\Delta$	$Z_m$	$Z_0$	$\Delta$	$Z_m$	$Z_0$	$\Delta$	$Z_m$	$Z_0$	$\Delta$	$Z_m$	$Z_0$	$\Delta$	$Z_m$	$Z_0$	$\Delta$
0,25	71	61	10	64	58	6	58	54	4	54	51	3	49	47	2	45	44	1
0,5	67	60	7	62	57	5	56	53	3	52	50	2	46	46	0	42	43	1
1	64	59	5	58	56	2	53	52	1	48	48	0	43	45	2	38	42	4
2	64	58	5	54	54	0	49	50	1	44	47	3	40	43	3	35	39	4
3	59	57	2	53	53	0	48	49	1	43	45	2	38	41	3	34	37	3
4	58	56	2	52	52	0	47	48	1	42	44	2	37	40	3	33	36	3
6	56	55	1	51	51	0	46	46	0	41	42	1	35	38	3	30	34	4
8	56	55	1	51	51	0	45	46	1	40	42	2	35	38	3	31	34	4
10	58	56	2	52	52	0	47	48	1	42	44	2	37	40	3	34	36	2
12	60	58	2	55	54	1	49	50	1	44	47	3	40	43	3	35	39	4

$$\Delta = (Z_m - Z_0)$$

Porównanie zmierzonej wartości empirycznej impedancji standardowej ciała człowieka i wyliczonej ze wzoru (4.9) jak również warunki środowiska badań i pomiarowe napięcia rażenia przedstawia tab. 4.8.

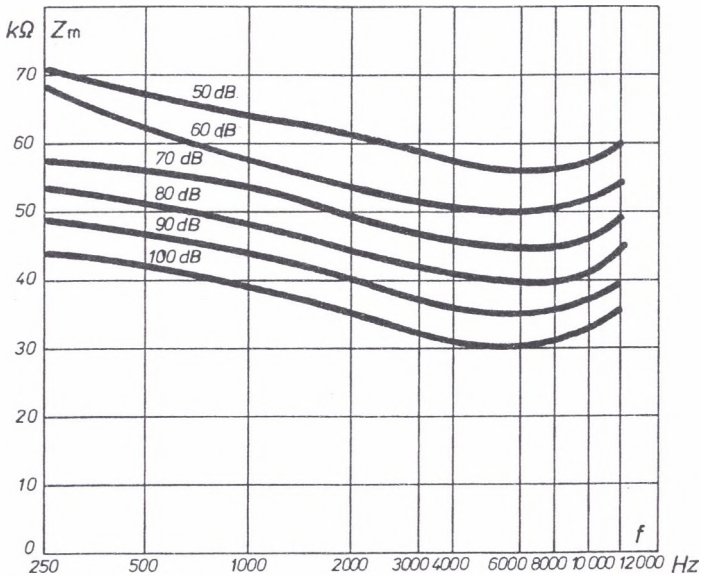


Porównanie wartości impedancji standardowej ciała człowieka zmierzonej oraz wyliczonej z równania (4.9) dla różnych napięć rażenia i warunków środowiska

Klimat	Napięcie rażenia	Częstotliwość dźwięku	Poziom natężenia dźwięku	Wartość empiryczna impedancji ciała	Wartość wyliczona impedancji ciała	Różnica wartości impedancji
<sup>0</sup> Kw	V	kHz	dB	kΩ	kΩ	kΩ
13	14	3	70	41	34	7
		4	70	39	33	6
		4	80	34	28	6
	27	3	70	25	27	2
		4	70	23	26	1
		4	80	21	24	3
		6	70	19	23	4
	40	6	80	17	20	3
		3	70	17	24	7
		4	70	14	22	7
		4	80	13	19	6
	14	14	6	70	18	21
3			70	50	48	2
4			70	51	46	5
4			80	49	41	8
27		6	80	45	39	6
		3	70	41	38	3
		4	70	34	36	2
		4	80	30	32	2
40		6	80	28	30	2
		4	70	30	32	2
		4	80	25	28	3
		6	80	20	27	7
15	14	3	70	68	61	7
		4	80	62	56	6
		6	80	53	53	0
	27	3	70	48	49	1
		4	70	47	48	1
		4	80	42	44	2
		6	80	41	42	1
		6	90	35	38	3
	40	3	70	39	43	4
		4	80	33	37	4
		6	70	37	40	3
		6	80	30	36	6
6		90	25	33	8	

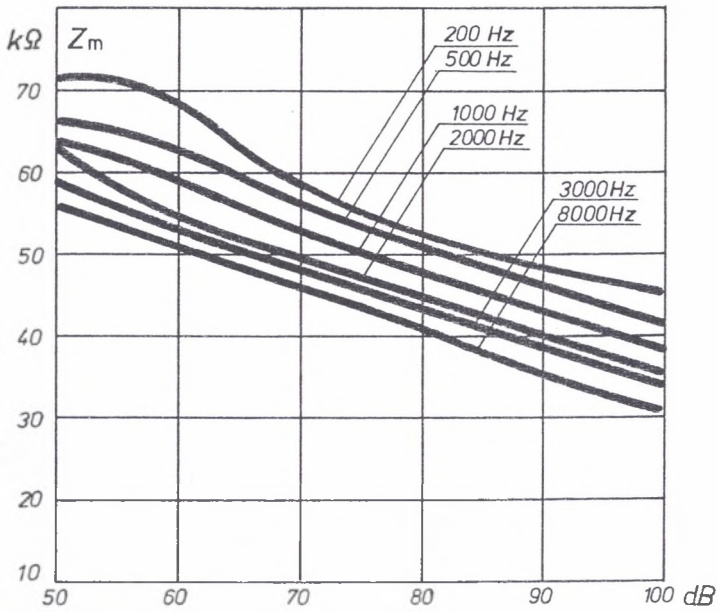
Klimat	Napięcie rażenia	Częstotliwość dźwięku	Poziom natężenia dźwięku	Wartość empiryczna impedancji ciała	Wartość wyliczona impedancji ciała	Różnica wartości impedancji
<sup>0</sup> Kw	V	kHz	dB	k $\Omega$	k $\Omega$	k $\Omega$
16	14	4	70	80	75	5
		4	80	75	70	5
		6	80	71	68	3
		6	90	70	64	7
	27	3	70	64	61	2
		4	80	58	56	2
		6	80	52	54	2
		6	90	45	48	3
	40	3	70	44	52	6
		4	70	42	51	9
		4	80	40	47	7
		6	80	38	46	8
	52	6	90	36	42	6
		3	70	43	47	4
		4	80	38	42	4
		6	80	35	41	6

Przeprowadzone badania zmian impedancji ciała pod wpływem narażenia na hałas oraz ich interpretacja analityczna potwierdzają słuszość przyjętej hipotezy.



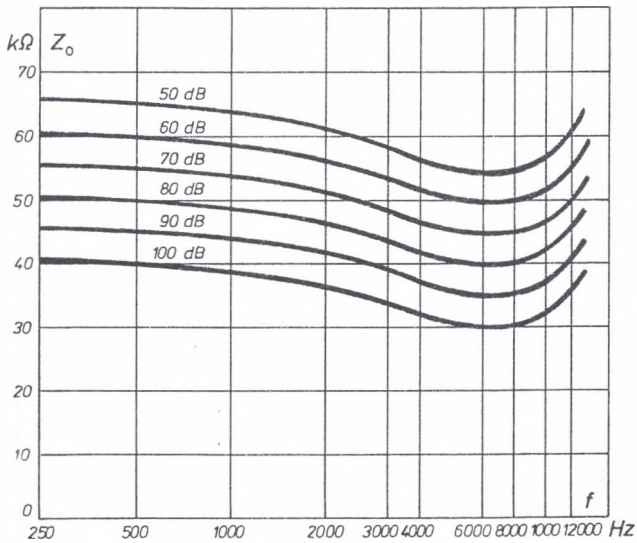
Rys. 4.2. Zależność zmian funkcji empirycznej impedancji ciała człowieka od częstotliwości bodźca akustycznego

Fig. 4.2. Dependence of changes of empirical function impedance of human's body to frequency of acoustic stimulus



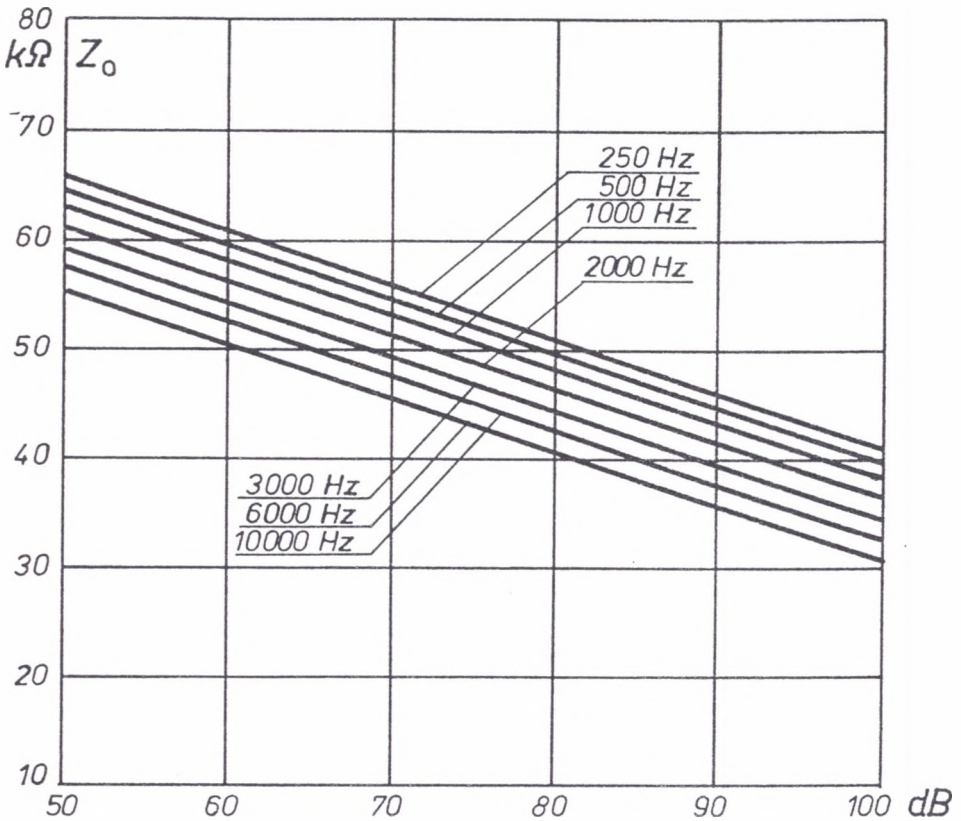
Rys. 4.3. Zależność zmian funkcji empirycznej impedancji ciała człowieka od poziomu natężenia bodźca akustycznego

Fig. 4.3. Dependence of changes of empirical function of impedance of human's body to level of acoustic stimulus's current



Rys. 4.4. Zależność zmian impedancji ciała człowieka od częstotliwości bodźca akustycznego

Fig. 4.4. Dependence of changes of human's body's impedance to frequency of acoustic stimulus



Rys. 4.5. Zależność zmian impedancji ciała człowieka od poziomu natężenia bodźca akustycznego  
 Fig. 4.5. Dependence of changes of human's body's impedance to level of acoustic stimulus's current

#### 4.5. Zmiany wartości impedancji ciała człowieka powodowane czasem ekspozycji na uciążliwe bodźce akustyczne

Narażenie pracującego człowieka na hałas powoduje wiele niekorzystnych zmian i reakcji jego organizmu. Prowadzi to do zmian parametrów elektrycznych ciała człowieka pracującego w hałasie. Przeprowadzone w p.4.4 badania zmian wartości impedancji ciała eksponowanego na bodźce akustyczne zostały wykonane w komorze audiometrycznej. W celu potwierdzenia hipotezy o zmianie wartości impedancji ciała pod wpływem czynników środowiska górniczego wykonano dalsze badania „in situ” na dole kopalni węgla kamiennego w miejscach pracy, na których pracownicy byli narażeni na hałas.

Badania wartości impedancji ciała przeprowadzono wśród elektromonterów dołowych podczas wykonywania czynności w hałasie. Elektromonterzy, stanowiący obiekt badań impedancji ciała, wykonywali czynności łączeniowe przy mufowaniu kabla elektroenergetycznego w wyrobisku chodnikowym lub prace łączeniowe w ognioszczelnym wyłączniku stycznikowym. Pomiarów wykonano w wyrobiskach kopalni węgla kamiennego, w miejscach o dużej emisji hałasu wytwarzanego przez: pracujące wentylatory lutniowe, przenośniki transportu urobku w oddziale oraz pompy wodne.



Wartość impedancji standardowej ciała mierzono napięciem 27 V o częstotliwości 50 Hz. Pomiar wartości impedancji ciała wolontariuszy wykonywano co 30 minut w ciągu 2 godzin pracy w hałasie. W celu uniknięcia błędów metodycznych określono w miejscu badań klimat oraz wartość natężenia oświetlenia. Osoby badane wykonywały pracę w wyrobiskach kopalni w klimacie od 13 do 17 katastopni wilgotnych. Ponieważ klimat dołowy wpływa na wartość impedancji ciała [22], wyniki pomiarów pogrupowano według klimatu. Na każdym stanowisku badań wykonywano pomiary impedancji ciała trzech pracujących elektromonterów, z których wyznaczono wartość średnią impedancji podaną w tab. 4.9. Wyniki przeprowadzonych pomiarów wartości impedancji ciała uwidaczniają wpływ klimatu na początkową wartość impedancji ciała przed rozpoczęciem pracy w hałasie.

W celu określenia zmian impedancji ciała w czasie pracy wykonywanej w hałasie wyznaczono średnią względną wartość impedancji ciała ( $Z/Z'$ ) po czasie narażenia na: 0,5 godz., 1 godz., 1,5 godz. i 2 godz. w odniesieniu do średniej wartości impedancji ciała przed rozpoczęciem pracy w narażeniu. Wartości te przedstawia tab. 4.10. Graficzny przebieg zmiany impedancji ciała podczas pracy w hałasie o natężeniu 85 dB względem początkowej wartości impedancji ciała przed narażeniem na hałas pokazano na rys. 4.6.

Tabela 4.9

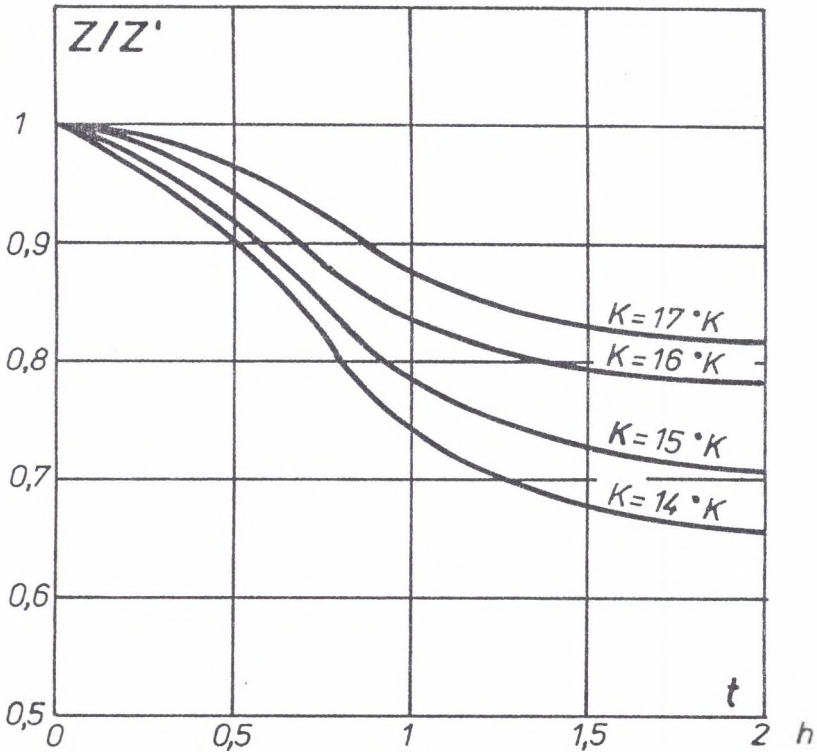
Wyniki pomiarów zmian impedancji ciała w czasie wykonywania pracy w hałasie

Klimat	Natężenie oświetlenia	Równoważny poziom hałasu A	Wartość impedancji ciała w czasie pracy				
			0 h	0,5h	1 h	1,5 h	2 h
$^{\circ}K_w$	lx	dB	k $\Omega$	k $\Omega$	k $\Omega$	k $\Omega$	k $\Omega$
13	34	97	66	58	44	36	34
14	38	91	72	65	52	46	45
14	34	93	70	64	50	41	41
14	36	82	68	60	51	43	42
14	34	78	69	62	49	42	40
14	40	84	68	59	50	43	41
14	38	82	71	66	58	52	51
15	41	83	81	73	65	61	60
15	38	82	79	70	53	47	45
15	39	92	82	74	62	58	57
15	42	93	84	78	68	65	64
15	36	91	80	72	64	58	58
15	34	90	78	70	68	64	64
16	34	87	94	88	76	73	72
16	33	78	96	91	82	77	76
16	37	82	98	94	83	78	78
16	45	85	94	85	74	74	73
16	40	79	97	92	83	77	76
16	38	85	98	94	83	79	78
16	46	79	105	98	92	87	86
16	36	82	102	96	87	80	77
17	42	91	110	105	98	93	91
17	42	81	108	103	94	88	88
17	40	79	114	110	102	95	94
17	38	78	106	102	93	87	86
17	40	85	112	107	97	92	90

Zmiana wartości impedancji ciała podczas pracy w hałasie względem początkowej wartości impedancji

Klimat	Średni poziom hałasu		Wartość średnia impedancji przed narażeniem		Wartość względna impedancji ciała w czasie pracy				
	dB	s	kΩ	s	0	0,5h	1 h	1,5 h	2 h
14 °K <sub>w</sub>	85 dB	5	69,6 kΩ	3	1	0,90	0,76	0,67	0,65
15 °K <sub>w</sub>	88 dB	5	80,6 kΩ	2	1	0,91	0,78	0,72	0,71
16 °K <sub>w</sub>	84 dB	4	97,4 kΩ	3	1	0,93	0,84	0,79	0,78
17 °K <sub>w</sub>	84 dB	5	110,2 kΩ	3	1	0,97	0,88	0,83	0,82

s - odchylenie standardowe



Rys. 4.6. Zmiana impedancji ciała człowieka podczas wykonywania pracy w hałasie o natężeniu 85 dB  
 Fig. 4.6. Change of human body's impedance during working in noise

#### **4.6. Wpływ drgań i wibracji środowiska technicznego kopalni na zmiany wartości impedancji ciała człowieka**

Człowiek w środowisku pracy może być narażony nie tylko na drgania akustyczne odbierane przez narząd słuchu, ale również na wibracje o dużej energii, wywierające niekorzystny wpływ na organizm. Drgania te mogą wystąpić w paśmie częstotliwości odbieranej przez ucho, stając się źródłem dźwięków słyszalnych, jak również w pasmach częstotliwości powyżej lub poniżej drgań akustycznych.

Energia przekazywana człowiekowi przez techniczne źródło drgań działa na powierzchnię ciała, skąd jest przenoszona w głąb organizmu. W skórze i tkance podskórnej człowieka znajdują się receptory, które mogą być pobudzane za pomocą drgającego przedmiotu [15]. Główną rolę w odbieraniu drgań odgrywają receptory zlokalizowane na pograniczu skóry i tkanki podskórnej tzw. ciałałka blaszkowate Paciniego [44]. Receptory te wykazują największą czułość przy częstotliwości drgań do 200 Hz [44]. Drgania o wyższej częstotliwości wnikają do organizmu i pobudzają dodatkowo receptory zlokalizowane w tkankach głębokich organizmu człowieka [44]. Zdolność do przenoszenia drgań przez różne tkanki jest niejednakowa. Drgania rozchodzą się dobrze w tkance kostnej, chrzęstnej i mięśniowej [44]. Wnikająca do wnętrza organizmu energia drgań o częstotliwości powyżej 500 Hz jest znacznie ograniczona i wytłumiona w tkankach stykających się ze źródłem [44]. Największą wrażliwość na wibrację wykazują palce rąk i skóra brzucha [44].

Zasadnicze zmiany w organizmie człowieka wywołane działaniem wibracji dotyczą układu krążenia i nerwowego. Wibracje powodują w ciele człowieka wzrost ciśnienia krwi oraz zwiększone ukrwienie skóry [44]. Obserwuje się również wzrost aktywności gruczołów wydzielania. Pod wpływem narażenia na drgania występuje wzmożona czynność gruczołów potowych w skórze człowieka [53].

Nadmierne i długotrwałe drgania wywołują u człowieka wzrost ogólnej nerwowości, stany niepokoju oraz oddziałują na zmysł równowagi. Znajduje się on w części ucha zwanej błędnikiem. Pobudzenie błędników przez przyspieszenie liniowe powoduje przekazanie informacji do ośrodkowego układu nerwowego. Długotrwała praca z narażeniem na wibracje powoduje zaburzenia w układzie nerwowym człowieka, a głównie zaburzenia czucia.

W zależności od drogi przenoszenia drgań na człowieka możemy wyodrębnić w kopalniach węgla kamiennego drgania o oddziaływaniu ogólnym i miejscowym [83]. Oddziaływanie o charakterze ogólnym występuje, kiedy drgania przenoszone są na korpus człowieka przez nogi, miednicę, plecy lub boki. Dotyczy to obsługi maszyn urabiających, maszynistów lokomotyw dołowych i niektórych stanowisk w zakładzie mechanicznej przeróbki węgla. Oddziaływanie o charakterze miejscowym występuje, kiedy drgania przenoszone są na korpus człowieka przez ręce. Dotyczy to pracowników, którzy posługują się w pracy narzędziami ręcznymi, a głównie obsługi wiertarek górniczych oraz młotków pneumatycznych. W kopalniach węgla kamiennego źródłem największych drgań oddziałujących na człowieka przez kończyny górne są ręczne wiertarki, zwłaszcza wiertarki udarowe pneumatyczne typu WUP-22 oraz wiertarki elektryczne.

Dopuszczalne wartości przyspieszeń drgań oddziałujących na organizm człowieka przez kończyny górne, dla różnej wartości współczynnika szczytu  $k$ , nie powinny przekraczać wartości podanych w tab. 4.11 [87][84]. Współczynnik szczytu jest stosunkiem wartości szczytowej przyspieszenia drgań do jego wartości skutecznej [82].

Tabela 4.11

Dopuszczalne wartości przyspieszenia drgań oddziałujących na człowieka przez kończyny górne [87]

Składowe drgań	Dopuszczalne wartości przyspieszenia drgań ( $m/s^2$ )		
	$k \leq 2$	$2 < k \leq 3$	$k > 3$
X, Y, Z	0,8	1,8	2,8

Do badań zmian wartości impedancji ciała człowieka narażonego na wibracje wybrano osoby obsługujące ręczną wiertarkę udarową typu WUP-22, która jest źródłem największych drgań wśród stosowanych narzędzi w kopalniach węgla kamiennego. Wybór ten uzasadniony jest również silnym dociskiem dłoni górnika do wiertarki, co powoduje dobry kontakt narażonego człowieka ze źródłem drgań.

Dla określenia wibracji generowanych przez wiertarkę udarową WUP-22 produkcji „Fasing”, dokonano pomiaru przyspieszeń drgań zgodnie z wymogami norm [84][85]. Pomiary przyspieszeń wykonano miernikiem CMD-3, posiadającym aktualne świadectwo legalizacyjne. W celu określenia współczynnika szczytu  $k$  zgodnie z normą [83] wykonano pomiary wartości szczytowej oraz wartości skutecznej przyspieszeń drgań. Współczynnik szczytu  $k$  dla składowych X, Y i Z posiadał wartość  $k > 3$ . Zmierzone wartości przyspieszeń drgań oraz krotność przekroczenia wartości dopuszczalnej dla człowieka przedstawiono w tab. 4.12.

Tabela 4.12

Wartość przyspieszeń drgań wiertarki udarowej pneumatycznej WUP 22

Składowa drgań	Zmierzona wartość skuteczna przyspieszenia drgań	Wartość szczytowa przyspieszenia drgań	Wartość dopuszczalna przyspieszenia drgań	Krotność przekroczenia
X	9,7 $m/s^2$	35,7	2,8 $m/s^2$	3,4
Y	8,8 $m/s^2$	25,4	2,8 $m/s^2$	3,1
Z	11,2 $m/s^2$	37,2	2,8 $m/s^2$	4,0

Pomiary wartości impedancji ciała górników obsługujących wiertarkę udarową wykonano metodą techniczną, napięciem przemiennym 14 V, 27 V i 40 V. Elektrody pomiarowe dotykały opuszka palca środkowego oraz opuszka kciuka ręki obsługującej wiertarkę. Wolontariusze podczas pracy wiertarką nie stosowali rękawic ochronnych. W miejscu pracy określono katatermometrem wartość klimatu, który wynosił 14,2 katastopni wilgotnych, a natężenie oświetlenia 42 lx. Ponieważ wiertarka WUP 22 wytwarza podczas wiercenia znaczny hałas, wolontariusze stosowali nauszники mocowane na hełmie typu H7A, produkcji PELTOR, w celu wyeliminowania wpływu hałasu. Wartości średnie impedancji ciała określone z pomiaru wartości impedancji dla ręki lewej oraz ręki prawej badanej osoby przedstawiono w tab. 4.13.



Wyniki pomiarów impedancji ciała osób narażonych na drgania od wiertarki udarowej  
WUP-22

Badana osoba	Napięcie (V)	Wartość impedancji ciała w czasie pracy (kΩ)			
		0	10 min.	20 min.	30 min.
I	14	80	74	71	67
	27	66	61	58	54
	40	58	52	48	46
II	14	82	77	74	70
	27	67	64	61	57
	40	58	51	47	45
III	14	76	72	67	62
	27	60	54	50	48
	40	52	45	43	41
IV	14	83	75	70	69
	27	67	60	56	52
	40	57	51	46	44

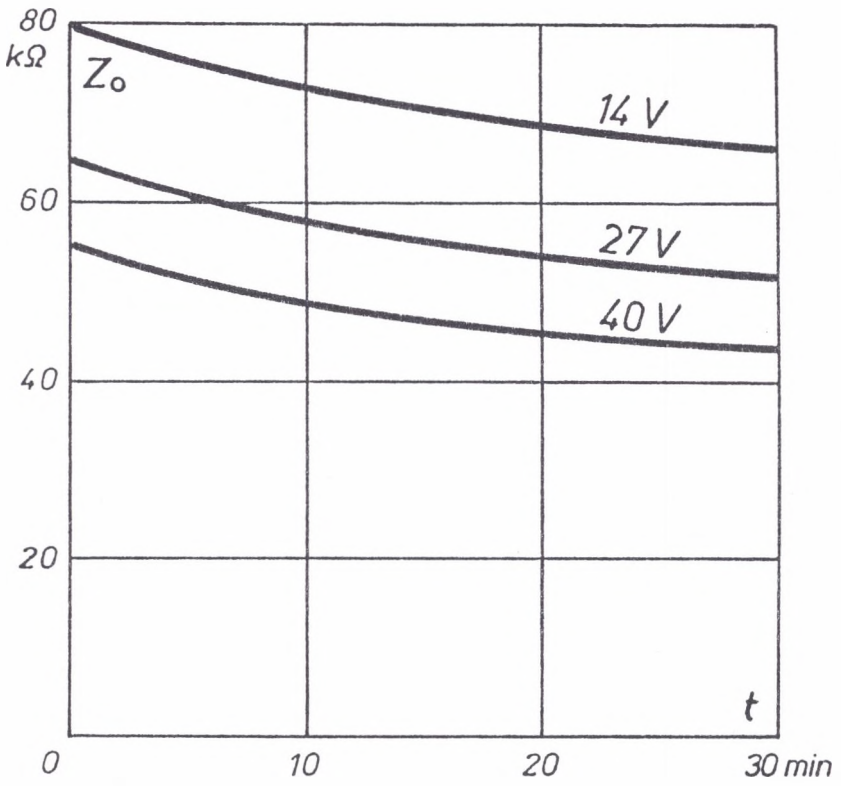
Zmianę wartości impedancji ciała osób narażonych na drgania w czasie pracy wyznaczono ze średniej wartości impedancji zmierzonej u czterech obserwowanych wolontariuszy pracujących wiertarką udarową. Wyniki dla napięć pomiarowych 14 V, 27 V i 40 V przedstawiono w tab. 4.14 oraz graficznie na rys. 4.7.

Tabela 4.14

Zmiana wartości impedancji ciała osób narażonych drganiami w czasie pracy

Napięcie (V)	Wartości impedancji w czasie pracy (kΩ)			
	0	10 min	20 min	30 min
14	80	73	70	67
27	65	58	56	52
40	56	49	46	44

Ponieważ drgania wpływają na układ nerwowy narażonego człowieka, informacyjnie zmierzono wartość prądu percepcji, czyli minimalnej wartości natężenia prądu rażenia odczuwanej przez wolontariusza. Wyczuwalność minimalnego prądu rażenia przepływającego pomiędzy elektrodami dotkniętymi do opuszka palca środkowego oraz opuszka kciuka badanej osoby wynosiła przed narażeniem na drgania około 0,6 mA. Obserwowane osoby po kilkunastu minutach pracy wiertarką udarową odczuwały zdrętwienie rąk. Po 30 minutach pracy średnia wartość minimalnego prądu percepcji wywołującego wrażenie elektryzacji wzrosła u badanych osób z 0,6 mA do 2,2 mA.



Rys. 4.7. Zmiana wartości impedancji ciała osób narażonych na drgania w czasie pracy  
Fig. 4.7. Change of impedance of human body for people exposed on vibration while working

## 5. WPŁYW BODŹCÓW OPTYCZNYCH NA IMPEDANCJĘ CIAŁA CZŁOWIEKA

### 5.1. Wpływ natężenia oświetlenia na pracę człowieka w kopalni

Oświetlenie jest jednym z podstawowych czynników środowiska pracy człowieka, które oddziałuje zarówno na psychikę, jak i na fizjologię człowieka. Uciążliwość pracy górników polega również na tym, że miejsca ich pracy pod ziemią są pozbawione oświetlenia dziennego. Najdoskonalsze oświetlenie sztuczne nie zastępuje naturalnego, dziennego, a stosowane oświetlenie w podziemiach kopalń dalekie jest od doskonałości. Właściwe oświetlenie wpływa zarówno na dobre samopoczucie człowieka, jak i na zmniejszenie zmęczenia narządu wzroku podczas wykonywania pracy. Oświetlenie jest właściwe, gdy zdolność rozróżnienia szczegółów jest tak duża, że nie prowadzi do odczucia przykrości i nadmiernego zmęczenia. W praktyce górniczej nie przywiązuje się specjalnej uwagi do oświetlenia, pomimo że przepisy tego wymagają. Statystyki wypadków w kopalniach zazwyczaj nie podają, że pośrednią przyczyną jest złe oświetlenie miejsca pracy. Analiza przyczyn wypadków tylko w nielicznych przypadkach uwzględnia wpływ niedostatecznego oświetlenia.

Oświetlenie osobiste stanowiące obowiązkowe wyposażenie górników ze względu na małą wydajność świetlną nie jest uwzględniane przy ocenie stanu oświetlenia na dole kopalni. Spełnia ono swoje zadanie jedynie przy oświetleniu samych miejsc pracy i to w ograniczonym zakresie. Normy dotyczące wymaganego poziomu oświetlenia w podziemiach kopalń nie uwzględniają oświetlenia uzyskanego z lamp osobistych. Lampy na hełmach, rzucające skupioną wiązkę świetlną na obserwowane przedmioty, powodują występowanie bardzo dużej różnicy luminancji pomiędzy tłem a oświetlanym miejscem.

Optymalne spostrzeganie polega na sprawnym i bezwysiłkowym powstawaniu wrażeń wzrokowych. Zakładając odpowiedni stan narządu wzroku osoby wykonującej pracę wzrokową można stwierdzić, że czynnikiem warunkującym prawidłowe spostrzeganie jest właściwe oświetlenie stanowiska pracy, które realizowane jest przez:

- zapewnienie oświetlenia o odpowiednich parametrach dostosowanych do wymagań psychofizjologicznych człowieka i do charakteru zadania wzrokowego,
- likwidowanie lub ograniczanie niepożądanych zjawisk, mogących upośledzić funkcje narządu wzroku.

Widzenie jest procesem fizyczno - fizjologicznym, gdyż światło i jego barwa wywierają wpływ na psychikę człowieka. Dobre oświetlenie aktywizuje układ nerwowy człowieka, sprzyja spostrzeganiu i rozróżnianiu szczegółów. Przebywanie w warunkach niedostatecznego oświetlenia prowadzi do zmęczenia oczu i powoduje zmęczenie psychiczne. Jest to rezultatem nadmiernego napięcia nerwowego, wynikającego z ciągłej koncentracji uwagi. Wśród czynników mających decydujący wpływ na szybkie narastanie zmęczenia wzroku wymienić należy: duże różnice luminancji, olśnienie spowodowane przez źródło światła znajdujące się w polu widzenia, mały kontrast obserwowanych przedmiotów i niewłaściwy skład widmowy światła. Ilość światła potrzebnego do dobrego widzenia jest uzależniony od rodzaju wykonywanej pracy i wielkości obserwowanych przedmiotów. Wymagany poziom natężenia oświetlenia określa się, biorąc pod uwagę zdolność

rozdzielania szczegółów, odczucia komfortu i względy energetyczne [1]. Skład widmowy światła jest uzależniony od zastosowanego źródła. Stosowane w kopalniach lampy posiadają źródła światła o optymalnym składzie widmowym [56]. Ostrość wzroku polepsza się, gdy jasność otoczenia wzrasta do poziomu jasności miejsca pracy [44].

Jednym z niepożądanych czynników środowiska świetlnego, mogących mieć negatywny wpływ na procesy spostrzegania, jest zjawisko oślnienia. Zjawisko oślnienia występuje, gdy natężenie światła docierającego do siatkówki przekroczy możliwości adaptacyjne oka [66]. Polega ono na odczuwaniu niewygodności widzenia i jest wywołane pojawieniem się w polu widzenia niepożądanego źródła światła zakłócającego równomierny rozkład luminancji. Oślnienie chwilowo osłepia, może wywołać bóle oczu, a powtarzane jest przyczyną złego samopoczucia.

Oko ludzkie ma stosunkowo dużą zdolność przystosowania się do zmiennych warunków oświetlenia. Adaptację oka do zmieniających się warunków świetlnych osiąga się z jednej strony dzięki rozszerzaniu się źrenicy przy słabym świetle i zwężaniu jej przy silnym bodźcu świetlnym, z drugiej zaś dzięki siatkówce ujawniającej niewielką czułość (czułość czopków siatkówki) przy silnym bodźcu świetlnym, natomiast wysoką czułość (czułość pręcików) przy słabym świetle. Oczy człowieka wykonującego daną pracę wzrokową są zaadaptowane do warunków oświetlenia pola widzenia. Przy dużej zmianie jasności oświetlanej powierzchni oko musi się przystosować w określonym czasie do nowych warunków. Nagłe pojawienie się silnego bodźca świetlnego powoduje zaburzenie dotychczasowego stanu adaptacji oka wskutek niedostosowania średnicy źrenicy i wcześniej ustalonej czułości siatkówki do tej nowej, nadmiernej luminancji. Osoba doznaje wówczas nieprzyjemnego uczucia, które odczuwa jako niewygodę, dyskomfort wzrokowy. W czasie przystosowania wzrok jest mniej wrażliwy na światło i człowiek widzi znacznie gorzej. Jeżeli luminancja obserwowanego obiektu nadmiernie przewyższa luminancję otoczenia, to wrażliwość na kontrast i dokładność percepcji wzrokowej jest upośledzona i prowadzi do zmęczenia oczu. Zmęczenie oczu to stan organizmu powstający wskutek intensywnego obciążenia poszczególnych funkcji oka i zmniejszenia zdolności do wykonywania pracy wzrokowej.

Podstawowym parametrem charakteryzującym jakość oświetlenia jest natężenie oświetlenia. Natężenie oświetlenia ( $E$ ) jest to stosunek strumienia świetlnego ( $d\Phi$ ) padającego na oświetlaną powierzchnię ( $dA$ ). Strumień świetlny ( $\Phi$ ) jest mocą promieniowania (światła) emitowanego przez źródło [77].

$$E = \frac{d\Phi}{dA}, \quad (5.1)$$

gdzie:  $A$  - oświetlana powierzchnia ( $m^2$ ),  
 $E$  - natężenie oświetlenia ( $lx$ ),  
 $\Phi$  - strumień świetlny ( $lm$ ).

Natężenie oświetlenia danej powierzchni maleje odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu odległości [71]. Wymagane średnie eksploatacyjne natężenie oświetlenia stałego na płaszczyźnie roboczej w wyrobiskach górniczych określa norma [78].

## 5.2. Wpływ bodźców optycznych na zmianę impedancji ciała człowieka

Widzenie jest zdolnością odbierania bodźców świetlnych przez narząd wzroku oraz ich oceny na podstawie wrażeń zmysłowych. Światło jest energią promieniowania elektromagnetycznego o długości fali od 380 nm do 780 nm, mające zdolność pobudzenia narządu wzroku do widzenia [69]. Oko ludzkie jest wyposażone w układ optyczny służący do skupiania promieni świetlnych na receptorach wzrokowych. Soczewka oka w wyniku akomodacji dostosowuje swój kształt, powodując możliwość dobrego widzenia z bliska i z daleka. Wielkość źrenicy zależy od natężenia promieni

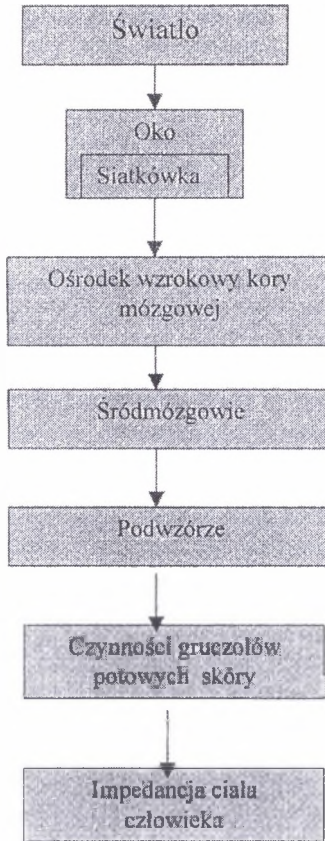


światlnych padających na siatkówkę. Przy zmianach jasności następuje zwężenie lub rozszerzenie źrenic. Światło docierając do oka przechodzi przez rogówkę, ciecz wodnistą, soczewkę i ciało szkliste, tworząc obraz na siatkówce [12].

Warstwą światłoczułą oka jest siatkówka zawierająca około 130 milionów elementów światłoczułych, zwanych czopkami i pręcikami [35]. Czopki, których jest około 7 milionów, rozmieszczone są w centralnej części siatkówki. Posiadają wysoki próg pobudliwości oraz zdolność odróżniania długości fal światła, czyli widzenie barw. Pręciki, których jest około 123 milionów, są bardziej wrażliwe na światło i umożliwiają bezbarwne widzenie w ciemności [35]. Światło, które dotarło do siatkówki, wzbudza w niej specyficzne reakcje biochemiczne. Czopki i pręciki pochłaniają światło i przekazują energię komórkom nerwowym siatkówki. Pochłanianie promieni świetlnych powoduje zmiany stanu substancji światłoczułej, wzbudzając czynność neuronalną. Impulsy nerwowe od receptorów z siatkówki przekazywane są przez układ włókien nerwowych do ośrodków wzrokowych kory mózgowej [12].

W polu wzrokowym kory mózgowej przebiegają procesy nerwowe związane z odbiorem i percepcją obrazu z siatkówki. Część przesyłanych impulsów nerwowych dociera do śródmózgowia, skąd wyzwalane są odruchy źrenic na światło [53]. Ośrodek śródmózgowia jest połączony aferentnie i eferentnie z podwzgórzem [12]. Czynność podwzgórza powoduje określone reakcje odruchowe wywołane przez pobudzające bodźce. Reakcje te oddziałują między innymi na czynność gruczołów potowych w skórze [35]. Pobudzone przez podwzgórze gruczoły potowe powodują nasączenie potem kanalików potowych w skórze, co prowadzi do zmiany impedancji ciała człowieka [12]. Zjawisko oddziaływania bodźców świetlnych na fizjologię człowieka, która powoduje zmiany wartości impedancji jego ciała, pokazano schematycznie na rys. 5.1.

Światło może być rażące nawet przy niskiej jasności. Jeżeli osoba przebywająca w jaskrawo oświetlonym pomieszczeniu przejdzie do pomieszczenia słabo oświetlonego, siatkówka adaptuje się do ciemności stając się bardziej czuła na światło. Zjawisko adaptacji do ciemności trwa około 20 minut [12]. Jeżeli osoba przebywająca w słabo oświetlonym otoczeniu przejdzie do otoczenia jaskrawo oświetlonego, światło staje się bardziej intensywne i nieprzyjemnie jaskrawe dopóty, dopóki oczy nie zaadaptują się do nadmiernego oświetlenia. Taki rodzaj adaptacji do światła trwa około 5 minut [12]. Zjawisko adaptacji polega na zdolności zmniejszenia lub zwiększenia czułości elementów siatkówki. W ciemności cała siatkówka ma największą czułość i wtedy słabe źródło światła jest bodźcem silnym. Im wyższa jest jaskrawość pola widzenia, tym mniejsza jest czułość siatkówki. Zmiana czułości siatkówki wymaga czasu. Zachodzące w tym czasie procesy nerwowe powodują reakcję w polu wzrokowym kory mózgowej, która połączona z podwzgórzem powoduje zmiany parametrów fizycznych skóry człowieka.



Rys. 5.1. Schemat oddziaływania na człowieka bodźców świetlnych powodujących zmiany impedancji jego ciała

Fig. 5.1. Scheme of light's influence on human's body which causes changes in his impedance

### 5.3. *Badanie zmian wartości impedancji ciała człowieka spowodowanych ekspozycją na oświetlenie o różnym natężeniu*

Zależność wartości impedancji ciała człowieka od warunków oświetleniowych w kopalniach przedstawił F.Krasucki z Politechniki Śląskiej w Gliwicach [40], [43]. Stwierdzenie to posiada charakter jakościowy i stanowi tylko informacje o jednym z wielu czynników wpływających na modelowe wartości impedancji ciała, które nie zostało poparte badaniami ilościowymi.

W celu zbadania zjawiska oddziaływania bodźców świetlnych na elektrofizjologię organizmu przeprowadzono pomiary zmian wartości impedancji ciała w czasie ekspozycji wzroku na światło o zdeterminowanej wartości natężenia. Badania wykonano podczas ekspozycji wzroku człowieka na światło o natężeniu: 40, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 350 luksów. Natężenie oświetlenia mierzono luksomierzem typu L-20, produkcji Sonopan (max błądem pomiaru 8%). Pomiar impedancji standardowej ciała osoby ekspozowanej na określone światło wykonano prądem rażenia o częstotliwości 50 Hz i napięciu 27V. Badania wykonano w środowisku wolnym od innych uciążliwości ergonomicznych w klimacie normalnym o wartości 16 katastopni wilgotnych [29].

Przed rozpoczęciem pomiarów impedancji ciała wzrok badanych wolontariuszy został przez 10 minut adoptowany do ciemności. Po zaadaptowaniu wzroku do ciemności określono początkową wartość impedancji standardowej ciała badanej osoby. Następnie badaną osobę ze wzrokiem przywykłym do ciemności ekspozowano na światło o określonej wartości natężenia oświetlenia. Pomiar wartości impedancji ciała wolontariuszy wykonywano co 60 sekund od chwili rozpoczęcia ekspozycji na światło. Badania zmian wartości impedancji przeprowadzano w czasie 600 sekund (10 minut), który wynika z fizjologii adaptacji do światła [12]. W każdych przyjętych do badań warunkach ekspozowania wzroku światłem o ustalonym natężeniu wykonano 15 serii badań, co łącznie uczyniło 1200 pomiarów impedancji ciała. Wartości średnie impedancji standardowej ciała ( $Z_m$ ) oraz odchylenia standardowe (s) z przeprowadzonych pomiarów przedstawia tab. 5.1. Przebieg funkcji zmian wartości średniej impedancji ciała w czasie ekspozycji na bodźce świetlne o zdeterminowanym natężeniu oświetlenia pokazano na rys. 5.2.

Z wykonanych pomiarów wynika, że wartość impedancji ciała człowieka o wzroku przywykłym do ciemności po ekspozycji na stosowane bodźce świetlne zmalała w pierwszych 60 sekundach jej trwania. Najmniejszą wartość funkcja osiąga w czasie pomiędzy 60 a 120 sekundą czasu ekspozycji na światło. Po upływie 120 sekund (2 minut) wartość funkcji impedancji ciała wzrasta. Wartość ustaloną osiąga funkcja impedancji ciała po czasie 460 sekund (8 minut) i jest równa wartości początkowej impedancji po adaptacji wzroku do ciemności.

Analizując przebieg funkcji impedancji ciała wolontariuszy  $Z_0 = f(E)$  zależnie od zmian wartości natężenia oświetlenia (rys.5.3) widoczna jest zależność liniowa. Ponieważ badane zjawisko osiąga ekstremum pomiędzy 60 - 120 sekundą narażenia narządu wzroku na bodźce świetlne, analityczną zależność określono dla tych warunków. Korzystając z funkcji regresji liniowej oraz empirycznych wartości impedancji standardowej ciała (tab. 5.1) określono współczynniki równania liniowego opisującego badane zjawisko.

$$Z_0 = 95,6 - 0,1 E, \quad (5.2)$$

gdzie:  $Z_0$  - wartość impedancji standardowej ciała ( $k\Omega$ ),  
E - natężenie oświetlenia (lx).

Równanie to zweryfikowano z funkcją empiryczną przy współczynniku korelacji  $\sigma = 0,995$ .

Tabela 5.1

Wartości impedancji standardowej ciała człowieka ( $Z_m$ ) zmierzone w czasie (t) ekspozycji na światło o natężeniu oświetlenia (E)

Natężenie oświetlenia (lx)	Czas ekspozycji na bodziec świetlny (s)																							
	0		1x60		2x60		3x60		4x60		5x60		6x60		7x60		8x60		9x60					
	$Z_m$	s	$Z_m$	s	$Z_m$	s	$Z_m$	s	$Z_m$	s	$Z_m$	s	$Z_m$	s	$Z_m$	s	$Z_m$	s	$Z_m$	s	$Z_m$	s		
40	98	3	91	3	91	4	93	3	95	2	97	2	98	2	98	2	98	2	98	2	98	2		
75	98	2	86	5	86	5	90	5	92	4	95	3	97	5	97	4	98	4	98	4	98	4		
100	98	4	82	5	82	5	87	6	91	5	93	5	96	5	97	4	97	4	98	4	98	4		
150	98	3	78	6	77	4	82	4	88	5	92	4	95	5	96	5	97	5	98	5	98	5		
200	98	3	73	7	73	6	77	6	84	7	90	5	93	3	95	3	96	3	98	5	98	5		
250	98	2	68	8	68	6	72	7	80	6	88	5	93	5	94	5	96	4	98	4	98	4		
300	98	3	64	8	65	7	68	6	77	6	84	5	91	4	93	5	95	4	97	4	97	4		
350	98	3	60	8	61	7	64	7	73	7	82	7	90	4	93	4	95	4	97	4	97	4		

$Z_m$  - empiryczna wartość impedancji standardowej ciała człowieka ( $k\Omega$ )  
s - odchylenie standardowe

Przeprowadzone badania zostały wykonane w klimacie 16 katastopni wilgotnych oraz pomiarowym napięciu rażenia 27 V. Wartość impedancji ciała w środowisku kopalni węgla kamiennego jest zdeterminowana klimatem określonym w katastopniach wilgotnych oraz wartością napięcia rażenia [22], [25], [29]. Ponieważ impedancja ciała zależy od napięcia rażenia i klimatu, uwzględnic należy czynniki te w równaniu (5.3). Porównując część stałą równania (5.3) z wartością impedancji standardowej ciała człowieka z tab. 3.2 dla napięcia pomiarowego rażenia 27V i klimatu 16 katastopni wilgotnych uznać należy, że jest ona funkcją napięcia i klimatu. Uwzględniając zależność części stałej równania (5.2) od napięcia rażenia oraz warunków klimatycznych, równanie określające impedancję ciała przyjmuje postać:

$$Z_0 = Z_0(K,U) - 0,1 E, \quad (5.3)$$

gdzie:  $Z_0(K,U)$  - wartość impedancji standardowej ciała człowieka zależna od klimatu i napięcia rażenia ( $k\Omega$ ),

$E$  - natężenie oświetlenia (lx).

Równanie (5.3) określające zależności impedancji standardowej ciała człowieka od natężenia oświetlenia opisuje zjawisko dla warunków ekstremalnych występujących pomiędzy 60 -120 sekundą narażenia. Korzystając z równania (3.2) ujmującego zależność  $Z_0 = f(K,U)$ , równanie (5.3) prowadzi do poprawnych wyników w zakresie przeprowadzonych badań doświadczalnych. Funkcja (5.3) w postaci wielomianu może w szczególnych przypadkach prowadzić do wyników błędnych, a zwłaszcza, gdy wartość klimatu jest mniejsza niż 12 katastopni wilgotnych, napięcie rażenia większe od 52 V, a natężenie oświetlenia przekracza 300 lx. Wobec powyższych ograniczeń należało przeprowadzić pomiary badanego zjawiska w różnym klimacie i przy różnych napięciach rażenia. Wyniki dodatkowo wykonanych pomiarów wartości impedancji ciała wyznaczone na czterech wolontariuszach po 1 minucie ekspozycji określonym natężeniem oświetlenia przedstawione są w tab. 5.2. Otrzymane wyniki pomiarów pozwoliły za pomocą programu komputerowego wyznaczyć kilka równań opisujących badane zjawisko. Po ich weryfikacji metodą najmniejszych kwadratów zdecydowano, że najwłaściwiej zjawisko opisuje wzór:

$$Z_0 = \frac{0,45 K^{2,3} - 0,05 E}{\sqrt[3]{U}}, \quad (5.4)$$

gdzie:  $Z_0$  - impedancja standardowa ciała człowieka ( $k\Omega$ ),

$E$  - natężenie oświetlenia (lx),

$K$  - klimat środowiska ( $^{\circ}K_w$ ),

$U$  - napięcie rażenia (V).

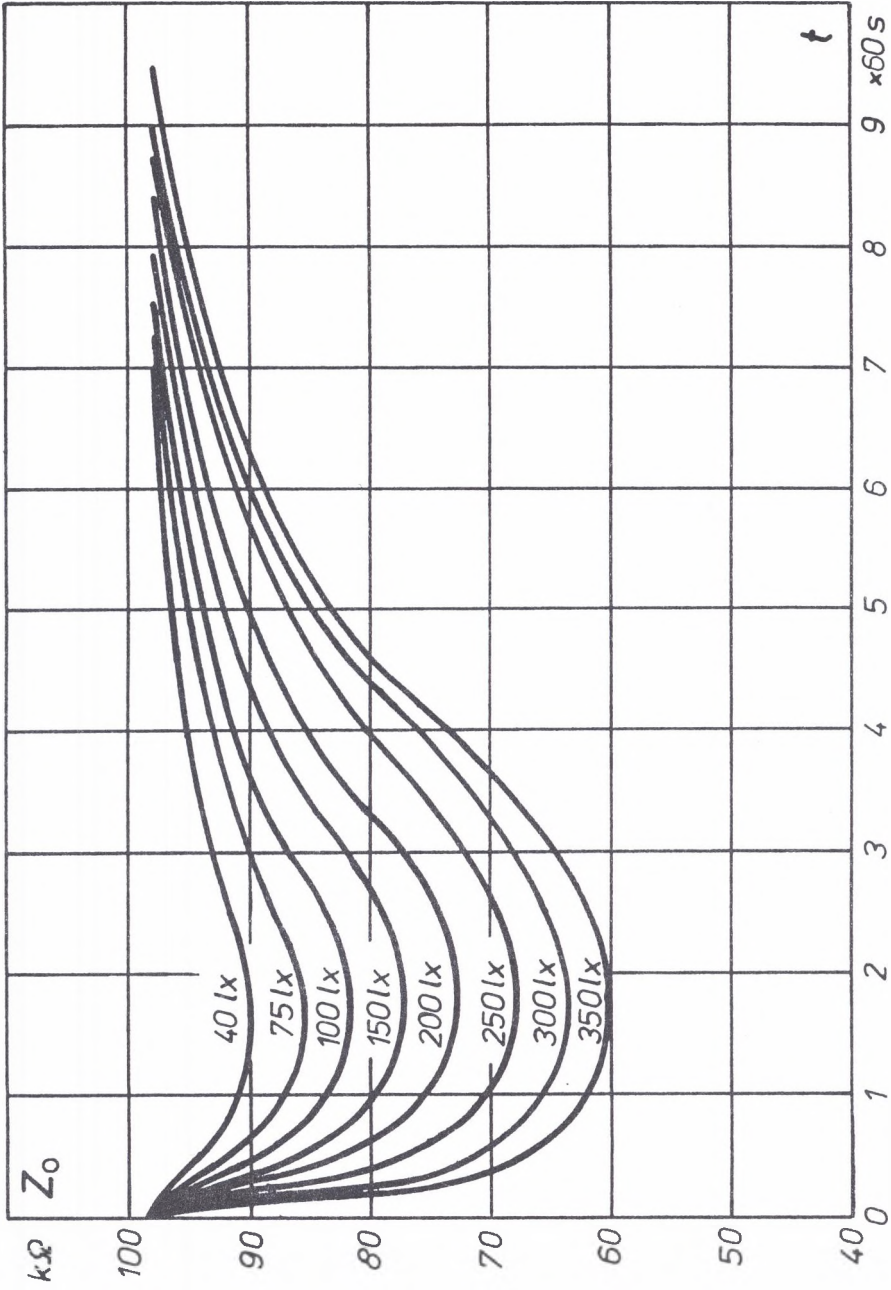
Porównane wartości empirycznych impedancji ciała człowieka i wyliczonych ze wzoru (5.4) oraz różnicę wyników, jak również warunki środowiska badań przedstawia tab. 5.2.

Porównanie wartości impedancji standardowej ciała człowieka zmierzonej oraz wyliczonej w różnych warunkach środowiska

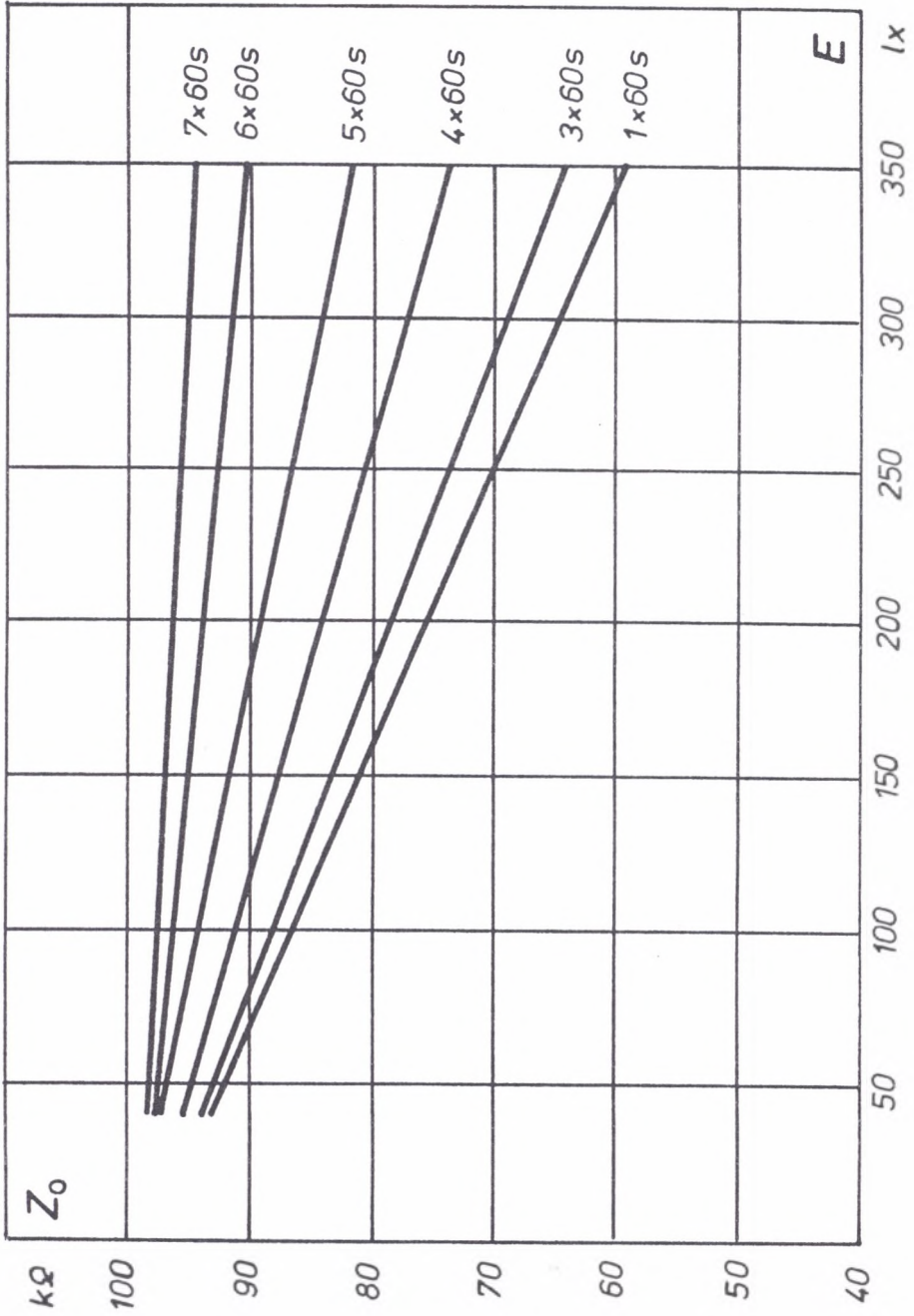
Klimat	Napięcie razenia	Natężenie oświetlenia	Wartość empi- ryczna impe- dancji ciała	Wartość wyli- czona impe- dancji ciała	Różnica wartości impedancji
<sup>o</sup> Kw	V	lx	kΩ	kΩ	kΩ
13	14	75	71	66	5
		150	62	65	3
		200	60	64	4
		300	58	62	4
	27	75	58	53	5
		150	52	52	0
		200	49	51	2
		300	47	49	2
	40	75	55	47	8
		150	48	45	3
		200	46	45	1
		300	43	43	0
	52	75	51	43	8
		150	45	42	3
		200	43	41	2
		300	39	40	1
14	14	75	82	79	3
		150	79	77	2
		200	74	76	2
		300	73	74	1
	27	75	64	64	0
		150	61	62	1
		200	59	61	2
		300	57	59	2
	40	75	57	56	1
		150	54	54	0
		200	49	54	5
		300	46	52	6
	52	75	54	51	3
		150	51	50	1
		200	49	49	0
		300	47	48	1
15	14	75	90	93	3
		150	86	91	5
		200	83	90	7
		300	80	88	8
	27	75	80	74	6
		150	77	73	4
		200	72	72	0
		300	68	71	3
	40	75	70	66	4
		150	62	64	2
		200	58	64	6
		300	55	62	7



Klimat	Napięcie rażenia	Natężenie oświetlenia	Wartość empi- ryczna impe- dancji ciała	Wartość wyli- czona impe- dancji ciała	Różnica wartości impedancji
° Kw	V	lx	kΩ	kΩ	kΩ
15	52	75	64	60	3
		150	60	59	1
		200	58	58	0
		300	56	57	1
16	14	75	110	108	2
		150	105	107	2
		200	102	106	4
		300	98	104	6
	27	75	86	86	0
		150	78	85	7
		200	73	84	11
		300	69	83	14
	40	75	78	76	2
		150	70	75	5
		200	66	74	8
		300	65	73	8
	52	75	77	70	7
		150	74	69	5
		200	70	68	2
		300	67	67	0
17	14	75	130	125	5
		150	125	123	2
		200	122	122	0
		300	118	120	2
	27	75	110	100	10
		150	102	98	4
		200	98	98	0
		300	95	96	1
	40	75	90	88	2
		150	88	87	1
		200	88	86	2
		300	83	85	2
	52	75	83	81	2
		150	81	80	1
		200	78	79	1
		300	76	78	2



Rys. 5.2. Zmiana wartości impedancji ciała w czasie ekspozycji bodźcem świetlnym  
 Fig. 5.2. Value change of impedance of human's body during light stimulus's exposure



Rys. 5.3. Zmiana wartości impedancji ciała (Z) od natężenia bodźca świetlnego (E) w czasie ekspozycji  
 Fig. 5.3. Value change of impedance of human's body (Z) to light stimulus's current during exposure

#### **5.4. Zmiany wartości impedancji ciała człowieka w czasie wykonywania pracy w miejscu o niewłaściwym natężeniu oświetlenia**

Niewłaściwe oświetlenie w miejscu pracy wywołuje wiele niekorzystnych zmian i reakcji organizmu człowieka. Wykonywanie pracy w niewłaściwych warunkach oświetleniowych prowadzi do zmęczenia wzroku i pogorszenia stanu psychicznego człowieka. W celu zbadania tego zjawiska przeprowadzono pomiary zmian wartości impedancji standardowej ciała człowieka na dole kopalni w miejscu oświetlonym światłem o różnej wartości natężenia podczas wykonywania pracy. Badane osoby były poddane działaniu prądu przemiennego o częstotliwości 50 Hz przy napięciu rażenia 27V. Pomiary wykonano na standardowej drodze rażenia dociskając opuszkami palca środkowego i kciuka tej samej ręki do miedzianych elektrod płaskich.

Badania przeprowadzono wśród elektromonterów dołowych w czasie wykonywania mufy na kablu energetycznym. Pomiary wartości impedancji ciała wykonywano podczas pracy obserwowanych elektromonterów co 30 minut w ciągu 2 godzin. Stanowisko pracy było oświetlone światłem o natężeniu mającym wartość mniejszą niż zalecane w normie [78] oraz zgodne z normą, które powinno wynosić 200 lx. Dla uniknięcia błędów metodycznych w miejscu pracy określono każdorazowo wartość klimatu w katastopniach wilgotnych. Na tych stanowiskach elektromonterzy nie byli eksponowani na inne czynniki ergonomiczne, np. hałas.

Badania przeprowadzono w dwóch grupach. Pierwszą grupę pomiarów wykonano w nieoświetlonym stacjonarnymi lampami wyrobisku chodnikowym. Elektromonterzy wykonywali prace łączeniowe przy oświetleniu z indywidualnych lamp nabełmowych. Jedna lampa nabełmowa oświetlała przedmiot pracy światłem o natężeniu 12 lx. Stanowisko pracy oświetlone z lamp indywidualnych dwóch elektromonterów wykonujących czynności monterskie oświetlone jest światłem o natężeniu od 15 do 25 lx. Badania wykonano w klimacie 13-16 katastopni wilgotnych.

Drugą grupę pomiarów przeprowadzono w warsztacie elektrycznym na dole kopalni na stanowisku pracy oświetlonym lampami stacjonarnymi. Natężenie oświetlenia na stanowisku pracy wynosiło 180 lx i 200 lx. Zmierzony katatermometrem klimat na stanowisku badań wynosił 15 katastopni wilgotnych. Pomiary w warunkach warsztatowych przy prawidłowej wartości natężenia oświetlenia zgodnej z normą [78] wykonano dla porównania z wynikami badań grupy pierwszej, w której natężenie oświetlenia było niewłaściwe.

Otrzymane z badań wyniki wartości impedancji ciała przedstawiono w tab. 5.3. Analiza wyników zmierzonych wartości impedancji ciała uwidacznia wpływ klimatu na wartość początkową impedancji przed rozpoczęciem pracy (badań). Z pogrupowanych według klimatu wyników pomiarów w tab. 5.3 wyznaczono wartość średnią impedancji ciała oraz odchylenie standardowe. W tab. 5.4 przedstawiono względną zależność ( $Z/Z'$ ) wartości średniej impedancji ciała w czasie pracy ( $Z$ ) od wartości początkowej impedancji ciała ( $Z'$ ) przed rozpoczęciem pracy. Graficzny przebieg zmian względnej wartości impedancji ciała w czasie pracy o różnym natężeniu oświetlenia pokazano na rys. 5.4.

Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że wykonywanie prac na dole kopalni w warunkach niewłaściwego oświetlenia, a szczególnie prac precyzyjnych wymagających wysiłku psychicznego, powoduje zmęczenie człowieka. Zmęczenie pracą wzrokową powoduje w organizmie człowieka szereg zmian fizjologicznych, których efektem są zmiany parametrów fizycznych skóry. Wykonane pomiary zmian wartości impedancji ciała człowieka pracującego w warunkach oświetleniowych zgodnych oraz niezgodnych z wymaganiami obowiązującej w górnictwie normy [78] potwierdzają słuszność przyjętej tezy.

Tabela 5.3

Wyniki pomiarów wartości impedancji standardowej ciała człowieka  
w czasie wykonywania pracy przy różnym natężeniu oświetlenia

Klimat	Natężenie oświetlenia	Wartość impedancji ciała w czasie				
		0	0,5h	1h	1,5h	2h
$^{\circ}K_w$	lx	k $\Omega$	k $\Omega$	k $\Omega$	k $\Omega$	k $\Omega$
13	15	61	59	55	50	47
14	20	64	61	57	53	50
14	18	67	65	59	54	51
14	24	67	64	58	55	54
14	24	65	64	57	54	54
14	18	71	69	62	56	52
15	25	74	72	66	64	62
15	20	76	75	72	68	64
15	19	82	80	76	72	67
15	14	85	84	80	73	72
15	23	81	78	72	68	68
15	19	88	86	82	78	74
16	28	94	92	84	80	78
16	26	94	93	85	81	78
16	32	97	95	88	83	80
16	28	92	90	82	79	75
16	23	95	93	84	80	78
16	22	94	92	87	84	83
15	200	87	85	85	85	86
15	200	81	81	80	80	81
15	180	84	84	82	83	83
15	180	92	91	90	90	90

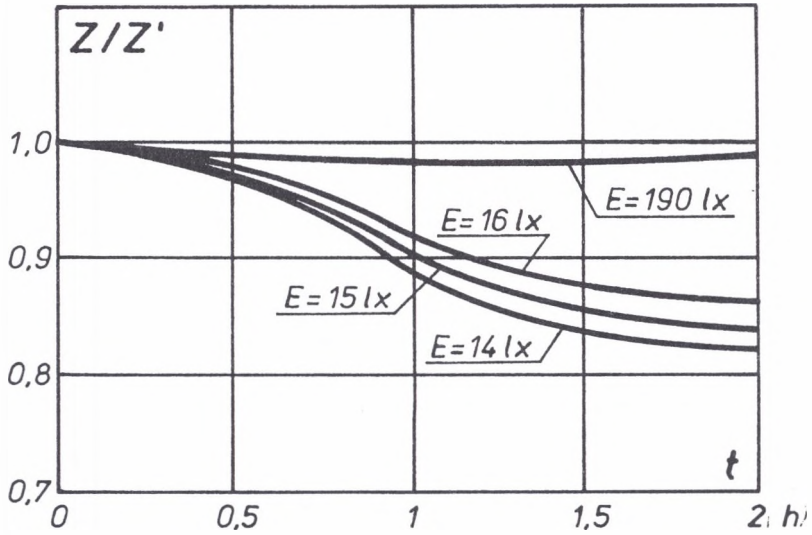
Tabela 5.4

Zmiana impedancji ciała człowieka w czasie pracy względem początkowej wartości impedancji ciała

Klimat	Średnie natężenie oświetlenia		Początkowe wartości impedancji		Względna wartość impedancji ciała w czasie pracy							
	lx	s	k $\Omega$	s	0,5 h	s	1 h	s	1,5 h	s	2 h	s
14 $^{\circ}K_w$	20 lx	3	67 k $\Omega$	4	0,97	3	0,88	2	0,83	1	0,82	2
15 $^{\circ}K_w$	20 lx	3	81 k $\Omega$	5	0,97	5	0,90	5	0,86	4	0,84	4
16 $^{\circ}K_w$	27 lx	4	94 k $\Omega$	2	0,98	2	0,91	2	0,87	2	0,86	2
15 $^{\circ}K_w$	190 lx	10	86 k $\Omega$	4	0,99	4	0,98	4	0,98	4	0,99	3

s - odchylenie standardowe





Rys. 5.4. Zmiana impedancji ciała człowieka w czasie pracy przy różnym natężeniu oświetlenia stanowiska pracy;  $Z$  - impedancja ciała w czasie badań,  $Z'$  - początkowa impedancja ciała przed badaniami,  $t$  - czas badań (h)

Fig. 5.4. Change of impedance of human's body while work by different current of lighting in work's place. impedance of human's body during observation,  $Z'$  - initial impedance of human's body before observation,  $t$  - time of observation (h)

## 6. WPŁYW POLA ELEKTROMAGNETYCZNEGO W GÓRNICTWIE NA IMPEDANCJĘ CIAŁA CZŁOWIEKA

### 6.1. Oddziaływanie pól elektromagnetycznych na organizmy żywe

Oddziaływanie pól elektromagnetycznych niskiej częstotliwości na organizmy żywe jest przedmiotem badanym w światowych ośrodkach naukowych. W celu określenia szkodliwości biologicznego oddziaływania pól elektromagnetycznych na organizmy żywe przeprowadzono doświadczenia na ludziach i zwierzętach [9][58]. Badane były zaburzenia objawów neurologicznych, sercowo - naczyniowych, układu nerwowego i niektórych wartości hematologicznych. Stwierdzono wpływ tych pól na przebiegi reakcji biochemicznych, przenikanie jonów przez błony komórkowe, powstawanie białych ciałek krwi [64]. Stwierdzono, że pole magnetyczne wpływa na rytm pracy gruczołów dokrewnych [54]. Doszukuje się związku między oddziaływaniem pola elektromagnetycznego a niektórymi chorobami nowotworowymi, takimi jak: białaczka lub nowotwory mózgu [64]. Studia te nie dają wyników jednoznacznych. Należy bowiem odróżnić skutki odległe w czasie od skutków natychmiastowych. Do badania skutków występujących po czasie używa się metod stosowanych w epidemiologii, które pozwalają ustalić związki między wybranymi czynnikami a występowaniem określonych chorób [30]. Stwierdzono większą zachorowalność na nowotwory u pracowników, którzy w pracy zawodowej byli narażeni na znaczne natężenia pola magnetycznego [36]. Obserwacje statystyczne wymagają w tym przypadku innych potwierdzeń badawczych. Związek statystyczny nie może być utożsamiany z dowodem w logice przyczynowo-skutkowej.

Pole elektromagnetyczne rozdziela się na: składową elektryczną i magnetyczną. Taki rozdział uzasadnia quasi-stacjonarność wolnozmiennych pól elektromagnetycznych, których długość fali dla częstotliwości  $f=50$  Hz jest tak znaczna ( $l = 6000$  km), że nie występuje zjawisko promieniowania [57]. Konieczność rozdzielenia obu składowych wynika z różnic, jakie występują w procesie oddziaływania tych składowych na organizmy żywe. Zawartość wody w strukturach tkankowych organizmów żywych powoduje, że działające na nie pole elektryczne ulega silnemu zniekształceniu już przy powierzchni struktury [69]. Natężenie pola elektrycznego wewnątrz obiektów biologicznych jest niższe niż działającego pola zewnętrznego [60]. W przypadku zaś składowej magnetycznej pole przenika struktury biologiczne bez przeszkód nie ulegając odkształceniu. Stwierdzono, że na poziomie struktur biologicznych pole magnetyczne przenikające tkanki powoduje spadki napięcia na błonach komórkowych [60]. Błona komórkowa spełnia funkcję kondensatora i jest zbudowana z dwuwarstwy lipidowej (estry kwasów tłuszczowych), której zadaniem jest wprowadzać do wnętrza komórki jony, zwłaszcza jony sodu. Na skutek wpływu do komórki kationów sodowych  $\text{Na}^+$  i wypływu potasowych  $\text{K}^+$  obserwuje się różnicę potencjałów między zewnątrz a wewnątrz błony [57]. Zjawisko to występuje, gdy na zewnątrz błony pojawia się ładunek elektryczny ujemny. Wymuszone działaniem pola elektromagnetycznego spadki napięcia na błonach komórkowych zakłócają proces przenikania jonów do wnętrza tych błon. Błona komórkowa w polach magnetycznych zmienia przepustowość membrany biologicznej oraz swe własności, powodując zmiany w funkcjonowaniu organizmów żywych [60].

Szereg ważnych procesów życiowych zachodzi na drodze elektrycznego przewodnictwa tzw. bioprądów przez neurony i włókna nerwowe [60]. Potencjał wnętrza neuronu w stanie spoczynku wynosi  $-90$  mV [60]. Depolaryzacja błony komórki nerwowej powoduje wzrost tego potencjału,

wytwarzając siłę elektromotoryczną powodującą przepływ prądów przez włókna nerwowe. Prąd ten może sterować czynnością innych komórek, np. mięśnia serca. Na zmiany potencjału włókien mięśnia sercowego nakładają się zmiany potencjału związane z pobudzeniem włókien nerwowych serca [60].

Stwierdzono, że pole elektryczne o natężeniu mniejszym od 10 kV/m nie wywołuje zmian w organizmie człowieka [59]. Pole o natężeniu od 10 do 15 kV/m wywołuje odchylenia, lecz statystycznie nieznamienne. Narazenie organizmu człowieka na pole o natężeniu 15-20 kV/m. może zakłócić funkcjonowanie organizmu oraz wywołać inne zmiany ogólnoustrojowe. Stwierdzono, że pola o natężeniu rzędu 100 kV/m i wyższych powodują w organizmie człowieka zakłócenia termoregulacji [59].

Urządzenia elektryczne wysokiego i średniego napięcia charakteryzuje wytwarzanie jonów, które tworzą chmurę ładunku przestrzennego. Przebywanie w chmurze dodatnich jonów wywołuje u człowieka wiele objawów, jak np.: niepokój, przyspieszenie rytmu serca, bóle głowy [64]. Intensywność objawów zależy od czasu przebywania w zjonizowanym powietrzu. Dotychczas nie poznano mechanizmu działania jonów na fizjologię człowieka [64]. Najbardziej istotny wydaje się być wpływ ładowania pojemności ciała człowieka, której zgromadzona energia zależy od kwadratu napięcia, jakie uzyskał człowiek pod wpływem prądu jonowego i rezystancji obuwia. Wytworzony w ciele człowieka potencjał elektryczny powoduje wstrząs elektrostatyczny w postaci przeskoku iskry przy zbliżeniu do uziemionych przedmiotów. W środowisku wybuchowym powstające wyładowania zapłonowe mogą spowodować wybuch mieszaniny wybuchowej.

## 6.2. Źródła pól elektromagnetycznych w górnictwie

Potencjalnym źródłem niebezpiecznych pól elektromagnetycznych w kopalniach mogą być wszystkie urządzenia elektroenergetyczne zasilane napięciem stałym lub przemiennym. Każde pracujące urządzenie elektryczne emituje do otoczenia energię w formie pola elektromagnetycznego. Niepokojącym zjawiskiem jest fakt stałego wzrostu natężeń pola elektromagnetycznego związanego wzrostem mocy urządzeń zainstalowanych w kopalniach, jak też podnoszeniem napięć zasilania. W kontekście licznych doniesień o możliwym niekorzystnym wpływie pól elektromagnetycznych na organizmy żywe zachodzi również w górnictwie konieczność przeanalizowania miejsc pracy z ekspozycją na pola wraz z wyznaczeniem ich parametrów.

Nośnikami wszystkich oddziaływań elektromagnetycznych jest pole elektromagnetyczne, które występuje powszechnie i odgrywa szczególną rolę w przyrodzie. Oddziaływaniem elektromagnetycznym są reakcje zachodzące między ładunkami elektrycznymi, zarówno nieruchomymi jak i będącymi w ruchu. Nieruchome ładunki oraz stałe prądy elektryczne są źródłem pól statycznych (elektrostatyczne, magnetostatyczne), natomiast ładunki i prądy zmienne powodują powstanie zmiennego pola elektromagnetycznego. Identyfikacja pola magnetycznego w przestrzeni otaczającej jego źródła sprowadza się na ogół do wyznaczenia przestrzennego rozkładu wektora natężenia pola magnetycznego ( $H$ ) lub indukcji magnetycznej ( $B$ ), które w środowiskach izotropowych są związane zależnością

$$\vec{B} = \mu * H_p, \quad (6.1)$$

gdzie:  $B$  - indukcja magnetyczna,

$H_p$  - natężenie pola magnetycznego,

$\mu$  - przenikalność magnetyczna środowiska.

Przestrzeń wokół pracującego urządzenia elektrycznego wypełniona jest energią pola elektrycznego o gęstości objętościowej ( $w_E$ ) i pola magnetycznego o gęstości ( $w_H$ ) [49], przy czym:

$$w_E = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon E_p^2, \quad (6.2)$$

$$w_H = \frac{1}{2} \mu_0 H_p^2, \quad (6.3)$$

gdzie:  $E_p$ ,  $H_p$  - natężenie pola elektrycznego i magnetycznego,  
 $w_E$  - gęstość objętościowa energii pola elektrycznego,  
 $w_H$  - gęstość objętościowa energii pola magnetycznego  
 $\epsilon_0$  - przenikalność elektryczna próżni ( $\epsilon_0 = 10^{-9}/36\pi$  F/m),  
 $\epsilon$  - względna przenikalność elektryczna powietrza,  
 $\mu_0$  - przenikalność magnetyczna próżni ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m).

Silne pola elektromagnetyczne o częstotliwości 50 Hz mogą być wytwarzane przez urządzenia elektroenergetyczne wchodzące w skład systemu elektroenergetycznego kopalni oraz urządzenia większej mocy zainstalowane zarówno na dole, jak i powierzchni zakładu górniczego. Oddziaływanie pól elektrycznych ujawnia się w przypadku linii średnich i wysokich napięć, natomiast oddziaływanie pól magnetycznych istotne jest przy przyptywie prądów o dużych natężeniach (zwarciovych, rozruchowych) występujących w sieci kopalnianej niskonapięciowej [42]. Przepływ dużych natężeń prądu w stanach zwarciovych sieci oraz prądów rozruchowych powoduje wzrost wartości natężenia pola magnetycznego. Silne pola magnetyczne generowane są głównie przez tory prądowe głównych urządzeń rozdzielczych oraz napędy urządzeń dużej mocy. W kopalniach węgla kamiennego największym źródłem pól magnetycznych są szyny zbiorcze w rozdzielniach, układy elektryczne maszyn wyciągowych, silniki pomp głównego odwadniania oraz urządzenia trakcji dołowej [27].

W celu zbadania zjawiska emisji pola elektromagnetycznego w górnictwie przeprowadzono w wybranych obiektach kopalni pomiary natężenia pola 50 Hz miernikiem typu MNP89 oraz dipolowym miernikiem pola typu DMP-1 [74]. Pomiary natężenia pola magnetycznego stałoprądowego wykonano teslomierzem, którego błąd pomiarowy określono do 10%. Wyniki pomiarów przedstawiono w tab. 6.1 oraz 6.2. Największe mierzalne pola magnetyczne stwierdzono w pomieszczeniach elektrycznych maszyn wyciągowych oraz ich elektromaszynowych przetwornic. Główne szyby kopalń wyposażone są w maszyny wyciągowe stałoprądowe zasilane tradycyjnie w układzie Leonarda lub układami tyrystorowymi. W tradycyjnych maszynach wyciągowych zbudowanych na układzie Leonarda silne pole magnetyczne generowane jest przez szynociąg łączący uzwojenie główne silnika wyciągowego z zespołem przetwornicy. Natężenie prądu płynącego w obwodzie głównym silnika wyciągowego zależy od rodzaju pracy ma wartość kilku kiloamperów. Obecność silnych pól magnetycznych mierzalna jest w najbliższym otoczeniu elektrycznych urządzeń obwodu głównego maszyny wyciągowej. Na stanowisku maszynisty wyciągowego nie występują pola magnetyczne o natężeniu przekraczającym czułość zastosowanej metody pomiarowej. Stanowisko maszynisty oddalone kilka metrów od silnika wyciągowego znajduje się w metalowej kabinie klimatyzowanej, stanowiącej ekran dla pól magnetycznych.

Urządzenia elektryczne trakcji dołowej powodują emisję pól magnetycznych w pomieszczeniu stacji prostownikowych oraz na drogach przewozowych. Stwierdzono występowanie pól nie tylko w najbliższym otoczeniu stacji prostownikowej, lecz również przy lokomotywach przewozowych w wyrobiskach z instalacją trakcyjnej elektrycznej. Wokół przewodów linii trakcyjnej występuje pole elektromagnetyczne. Składowa elektryczna pola wywołana jest różnicą potencjałów między przewodem jezdnym a szynami torowiska. Składowa magnetyczna pola jest wywołana przepływem prądu w przewodzie jezdny oraz w szynach torowiska i górotworze. Miejscem stwierdzonej



największej wartości pola magnetycznego w lokomotywach dołowych był komutator silnika oraz przy odbieraku prądu z przewodu jezdnego.

Zastosowanie w górnictwie układów tyrystorowych powoduje, że oprócz częstotliwości podstawowej pojawiają się w sieci także częstotliwości harmoniczne. Ich poziom może być na tyle duży, że powstałe natężenie pola elektromagnetycznego o częstotliwości wyższej niż podstawowa z konieczności określenia poziomu pola promieniowanego przez takie źródła nie może być zaniedbane.

Tabela 6.1  
Wyniki pomiarów indukcji pola magnetycznego emitowanego przez urządzenia prądu stałego w kopalni

Urządzenie	Moc urządzenia kW	Prąd znamionowy A	Miejsce pomiaru	Indukcja pola magnetycznego mT
Maszyna wyciągowa klatkowa 4 WL-3400/2400	2400	4000	uzwojenie silnika	4,0
			szynociąg	2,0
			komutator silnika	2,0
Maszyna wyciągowa skipowa K 6500/2400	2400	4000	uzwojenie silnika	3,0
			szynociąg	2,0
			komutator silnika	2,0
Maszyna wyciągowa klatkowa AEG 1913	1020	3700	uzwojenie silnika	3,0
			szynociąg	2,0
			komutator silnika	2,0
Przetwornica maszyny wyciągowej P1500/10/225	2 x 1300	4000	uzwojenie prądnicy	1,0
			szynociąg	2,0
			komutator prądnicy	2,0
Lokomotywa dołowa LD 30	2 x 41,5	120	silnik lokomotywy	0,5
			odbierak trakcyjny	0,1
Stacja prostownicza APS Pa 250/6-250	250	1000	wyłącznik prądu stałego	0,1
			otoczenie stacji	0,1

Tabela 6.2  
Wartości maksymalne natężenia pola elektrycznego oraz indukcji magnetycznej emitowanej przez elektryczne urządzenia w kopalni o częstotliwości 50 Hz [72]

Miejsce pomiaru	Natężenie pola elektrycznego	Indukcja pola magnetycznego
	kV/m	mT
Rozdzielnia główna kopalni	0,1	0,08
Dławiak rozdzielni głównej	1,6	0,35
Silniki maszyny wyciągowej	0,1	0,03
Silnik synchroniczny 6kV od przetwornicy maszyny wyciągowej	0,1	0,13
Rozdzielnia 6 kV	0	0,01



### 6.3. Normy prawne w zakresie ochrony przed oddziaływaniem pól elektromagnetycznych stałych i o częstotliwości 50 Hz

W 1998 roku zostało wydane rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej [88] dotyczące granicznych dopuszczalnych natężeń pól magnetycznych stałych i o częstotliwości 50 Hz, zgodnie z którym rozróżnia się trzy strefy:

- strefa niebezpieczna, w której przebywanie pracownika jest zabronione,
- strefa zagrożenia, w której dopuszczalny czas przebywania pracowników zależy od wartości natężenia działającego pola,
- strefa bezpieczna, w której przebywanie pracowników jest dozwolone bez ograniczeń czasowych.

Za strefę niebezpieczną uważa się obszar, w którym natężenie pola magnetycznego  $H_p$  o częstotliwości 50 Hz przekracza 4 kA/m, a indukcja B odpowiednio 5 mT, zaś dla pola magnetycznego stałego 80 kA/m, co odpowiada indukcji magnetycznej ok. 100 mT [87]. W przypadku gdy ekspozycja dotyczy wyłącznie kończyn (od stóp do kolan oraz od dłoni do łokci), granice strefy niebezpiecznej podwyższa się 5-krotnie [87].

Za strefę zagrożenia uważa się obszar, w którym natężenie pola magnetycznego przemiennego  $H_p$  lub indukcja B zawiera się w granicach:

$$0,4 \text{ kA/m} < H_p < 4 \text{ kA/m}, \quad (6.4)$$

$$0,5 \text{ mT} < B < 5 \text{ mT},$$

przy czym dopuszczalny czas przebywania pracowników w polu o natężeniu H nie powinien przekroczyć 8 h ani czasu t obliczonego (w godzinach) ze wzoru:

$$t = \frac{D}{H_p^2}, \quad (6.5)$$

w którym

$$D = 1,28 \text{ (kA/m)}^2 \cdot h$$

W przypadku pola magnetycznego stałego strefę zagrożenia wyznacza natężenie

$$8 \text{ kA/m} \leq H_p \leq 80 \text{ kA/m} \quad (6.6)$$

lub indukcja

$$10 \text{ mT} \leq B \leq 100 \text{ mT}$$

oraz

$$D = 512 \text{ (kA/m)}^2 \cdot h$$

W przypadku gdy narażenie w strefie zagrożenia dotyczy wyłącznie kończyn, od stóp do kolan lub od dłoni do łokci, dopuszcza się 25 - krotne podwyższenie wartości granicznych dopuszczalnych [88]. Za strefę bezpieczną uznaje się obszar, w którym natężenie pola magnetycznego przemiennego o częstotliwości 50 Hz nie przekracza 0,4 kA/m (0,5 mT) lub natężenie pola magnetycznego stałego - 8 kA/m (10 mT).

W 1998 roku wydano rozporządzenie Ministra Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa [88] które określa dopuszczalne poziomy natężenia pola elektromagnetycznego charakteryzowane przez wartości graniczne. Rozporządzenie to określa szczegółowe zasady ochrony ludzi i środowiska przed elektromagnetycznym promieniowaniem niejonizującym w postaci pól

elektrycznych i magnetycznych stałych oraz pól elektrycznych i magnetycznych o częstotliwości 50 Hz, wytworzonych przez stacje i linie elektroenergetyczne w środowisku. Wartości dopuszczalne przedstawia tab. 6.3.

Tabela 6.3

Dopuszczalne poziomy natężenia pola elektromagnetycznego charakteryzowane przez wartości graniczne [88]

Rodzaj pola elektromagnetycznego	Składowa elektryczna	Składowa magnetyczna
pole stałe	16 kV/m	8 kA/m
pole 50 Hz	10 kV/m	80 A/m

#### **6.4. Zmiany wartości impedancji ciała człowieka narażonego na emisję pola elektromagnetycznego**

Przeprowadzone w różnych ośrodkach naukowych badania wpływu pola elektromagnetycznego na organizmy żywe dotyczyły wyłącznie zmian patologicznych. Z dostępnej literatury wynika, że nie przeprowadzono badań wpływu pola elektromagnetycznego na zmiany impedancji ciała człowieka, co może mieć istotny wpływ na wartość prądu rażenia w wypadkach elektrycznych.

W celu poznania zjawiska zmian impedancji ciała człowieka eksponowanego na działanie pola elektromagnetycznego wykonano w kopalni pomiary „in vivo” wartości impedancji ciała w pobliżu urządzeń elektrycznych emitujących takie pole. Ponieważ jak wykazano w p.6.1 składowa elektryczna pola ulega silnemu zniekształceniu już przy powierzchni struktury biologicznej oraz znikomej wartości pola w środowisku zakładu górniczego, badania przeprowadzono ze szczególnym uwzględnieniem składowej magnetycznej pola elektromagnetycznego.

Pomiary impedancji ciała człowieka wykonano w miejscach, w których stwierdzono obecność pól o znacznej wartości. Wytypowano do badań miejsca, w których pola elektromagnetyczne wytwarzane były przez urządzenia elektryczne maszyn wyciągowych oraz w pobliżu dławika zwarcowego głównej rozdzielni kopalni. Pomiary impedancji ciała wolontariuszy wykonywano podobnie jak w poprzednich badaniach na standardowej drodze rażenia dociskając opuszki palca środkowego i kciuka tej samej ręki do miedzianych elektrod płaskich. Wartość impedancji standardowej ciała człowieka określano pomiarowym prądem przemiennym o częstotliwości 50 Hz przy napięciu rażenia 27V. Pomiary wykonano miernikiem cyfrowym typu M-3860D. Miejsca, w których wykonano pomiary, wolne były od innych uciążliwości ergonomicznych oraz aby uniknąć błędów metodycznych określono wartość klimatu w miejscu badań.

W wykonanych badaniach obserwowano zmianę wartości impedancji ciała człowieka w czasie ekspozycji polem elektromagnetycznym. Czas obserwacji człowieka eksponowanego na pole elektromagnetyczne wynosił 40 minut. Pomiary wartości impedancji standardowej ciała badanych osób wykonywano co 5 minut w czasie ekspansji polem elektromagnetycznym. Wyniki pomiarów wartości impedancji standardowej ciała wolontariuszy eksponowanych na pola elektromagnetyczne przedstawia tab. 6.4. Wartości średnie impedancji ciała człowieka eksponowanego na pole o indukcyjności magnetycznej 0,2 mT w klimacie 14 – 15 katastopni pokazano na rys.6.1.

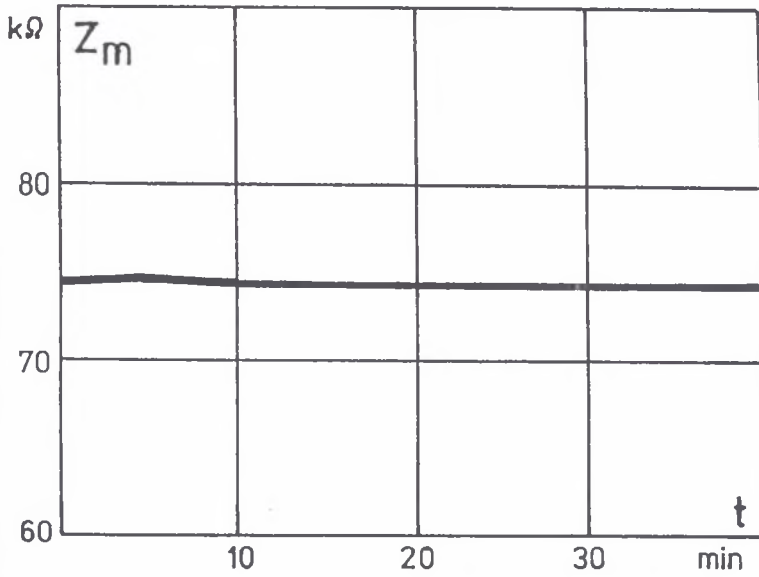
W wyniku przeprowadzonych badań impedancji ciała człowieka eksponowanego na pola elektromagnetyczne nie stwierdzono w czasie 40 minut zmian wartości impedancji. Wysłunięte wnioski dotyczą badań osób eksponowanych na pola elektromagnetyczne o częstotliwości  $f=50\text{Hz}$ , spotykanych powszechnie w zakładach górniczych wydobywających węgiel kamienny. Badane zjawisko zmiany impedancji ciała może przebiegać inaczej przy ekspozycji na bardzo silne pola i o innej częstotliwości. Nadmienić należy, że mimo niezmienniej wartości impedancji ciała badanych osób eksponowanych na pole elektromagnetyczne zauważono u tych osób reakcję na niższe wartości prądu percepcji niż podczas badań na obiektach nie narażonych na to pole.

Tabela 6.4

Wyniki pomiarów zmian wartości impedancji standardowej ciała człowieka w czasie ekspozycji na pole elektromagnetyczne o częstotliwości 50 Hz

Klimat (K)	Pole elektryczne ( $E_p$ )	Indukcja pola magnetycznego (B)	Wartość impedancji ciała w czasie (min)						
			0	5	10	15	20	30	40
$^{\circ}K_w$	kV/m	mT	k $\Omega$	k $\Omega$	k $\Omega$	k $\Omega$	k $\Omega$	K $\Omega$	k $\Omega$
14	0,1	0,2	66	65	64	66	67	66	67
14	0,1	0,2	69	71	69	69	70	70	70
14	0,1	0,2	70	68	69	69	70	69	69
14	0,2	0,2	70	69	69	69	69	69	69
14	0,2	0,2	72	72	70	72	70	72	72
15	0,1	0,2	74	75	75	74	74	75	75
15	0,1	0,1	78	80	80	78	78	78	79
15	0,1	0,2	78	78	77	77	78	77	78
15	0,1	0,2	79	79	77	77	77	78	77
15	0,1	0,2	80	82	80	81	79	79	79
15	0,1	0,2	80	80	81	80	79	78	78
15	0,1	0,1	81	80	81	81	83	80	81
15	0,1	0,2	73	74	74	73	73	74	73
15	0,2	0,1	72	72	71	71	71	72	72
15	0,1	0,2	72	72	71	71	71	71	71
15	0,1	0,2	71	71	71	71	71	71	71

Przeprowadzone badania wykazały, że ekspozycja człowieka na klimat, hałas oraz bodźce świetlne, które organizm odbiera przez odpowiednie zmysły, wpływa na zmiany wartości impedancji ciała. Natomiast pole elektromagnetyczne (w zakresie przeprowadzanych badań), które oddziałuje na cały organizm, nie powodowało istotnych zmian wartości impedancji ciała człowieka. Obecny stan zaawansowania badań nie uprawnia do rozprzestrzeniania poglądu o szkodliwości pola magnetycznego na pracującego człowieka w środowisku górniczym.



Rys. 6.1. Zmiana wartości impedancji standardowej ciała człowieka w czasie emisji pola elektromagnetycznego o częstotliwości 50 Hz

Fig. 6.1. Value change of standard impedance of human body during electromagnetic field emission with 50 Hz frequency

## 7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

Przedmiotem pracy było zbadanie oraz określenie wpływu wybranych uciążliwości ergonomicznych środowiska pracy w kopalni węgla kamiennego na zmiany wartości impedancji ciała człowieka. Wybrano do badań uciążliwe czynniki ergonomiczne występujące w kopalniach węgla kamiennego, takie jak: klimat określony w katastropniach wilgotnych, warunki klimatyczne pracy określone wskaźnikiem dyskomfortu cieplnego, hałas, wibracje, bodźce świetlne wywołane niewłaściwym natężeniem oświetlenia w miejscu pracy oraz ekspozycja na pole elektromagnetyczne. Czynniki te w dużym stopniu wpływają na wartość impedancji ciała człowieka.

Wykonywanie badań parametrów elektrycznych ciała człowieka stanowi bardzo złożony problem ze względu na ich dużą zmienność. W związku z tym w zasadzie możliwe jest tylko ustalenie zależności zmian na podstawie metod statystycznych. Mając do dyspozycji odpowiednią ilość wyników pomiarów impedancji ciała człowieka podjęto próbę uogólnienia zjawisk w formie zapisu empirycznego. Jej efektem są podane w pracy wzory empiryczne dobrane dla ustalonych doświadczalnie zależności funkcyjnych. Ponieważ na przebieg zjawisk elektrofizjologicznych w organizmie człowieka ma wpływ wiele parametrów, dlatego przedstawione w pracy pewne uogólnienia należy traktować jakościowo a nie ilościowo.

Wspomnieć również należy o niewystarczającej wiedzy z zakresu wpływu czynników środowiska pracy na organizm człowieka oraz wpływu tych czynników na wartość modelową impedancji ciała. Wszystkich tych czynników nie można uchwycić i poznać jednocześnie, trzeba je obserwować i badać jeden po drugim, aby móc wyciągać bardziej obiektywne i ogólniejsze wnioski.

Przyjmując, że ustrój człowieka rozpatrywany jest jako system czynnościowy nadzorowany przez wzajemnie powiązane ośrodki układu nerwowego, to oczywiste jest, że działanie uciążliwych czynników ergonomicznych środowiska pracy w kopalniach może w pewnych warunkach zmienić czynności któregoś z ośrodków. Taka zmiana czynności uruchamia u człowieka mechanizmy adaptacyjne, których zadaniem jest utrzymanie równowagi funkcjonowania organizmu. Uruchomienie mechanizmów adaptacyjnych u człowieka powoduje wystąpienie efektu biologicznego, który można zidentyfikować przez pomiar parametrów biofizycznych, między innymi impedancji elektrycznej jego ciała.

Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych stanowiących temat niniejszej pracy oraz opierając się na aktualnym stanie wiedzy sformułowano następujące wnioski :

1. Opracowana metoda wyznaczania „impedancji standardowej ciała człowieka” na drodze pomiarowej od opuszka palca środkowego do opuszka kciuka tej samej ręki jest bezpieczna dla wykonywania badań „in vivo” w trudnych warunkach środowiskowych na dole kopalni węgla kamiennego.
2. Warunki środowiska pracy, jak też czynniki związane z wysiłkiem fizycznym wywołują w skórze człowieka zwiększone wydalenie potu, co przyczynia się do obniżenia wartości impedancji ciała człowieka. Praca w takich warunkach jest szczególnie niebezpieczna ze względu na duże prawdopodobieństwo rażenia prądem elektrycznym. W tych środowiskach elektromonterzy dołowi winni zachować szczególną ostrożność i przestrzegać zasad bezpiecznej pracy przy urządzeniach elektrycznych.



3. Klimat dołowy oraz wartość napięcia rażenia głównie modyfikują wartość modelową impedancji ciała człowieka. Z wykonanych badań wynika, że wartość impedancji ciała człowieka maleje wykładniczo w miarę zmniejszania się wartości liczby katastrofni wilgotnych.
4. Wydatek energetyczny człowieka, zależny od rodzaju i intensywności pracy, wpływa na czynność gruczołów potowych w skórze człowieka. Klimatyczne warunki pracy określone wskaźnikiem dyskomfortu cieplnego obejmują mikroklimat i wydatek energetyczny pracownika. Badania wykazały, że ze wzrostem wskaźnika dyskomfortu cieplnego w środowisku pracy maleje wartość impedancji ciała.
5. Opracowane wykresy i zależności zmiany wartości impedancji ciała człowieka pod wpływem klimatu określanego w katastrofniach wilgotnych dotyczą ludzi niepracujących i zaaklimatyzowanych, natomiast dla ludzi pracujących stosować należy wykresy i zależności zmian wartości impedancji ciała w funkcji wskaźnika dyskomfortu cieplnego  $\delta$ .
6. Uciążliwy hałas występujący w środowisku pracy powoduje zmęczenie człowieka oraz reakcje psychofizjologiczne, które wpływają na zmianę wartości jego impedancji ciała. U człowieka eksponowanego na hałas zmienia się wartość impedancji ciała zależnie od częstotliwości i poziomu natężenia bodźca akustycznego. Na zmianę wartości impedancji ciała człowieka pracującego w hałasie istotny wpływ posiada czas oddziaływania uciążliwego bodźca. Badania wykazały, że wartość impedancji ciała po 2 godzinach pracy w hałasie maleje o 20 – 30 % jego wartości impedancji przed ekspozycją.
7. Do czynników uciążliwych w kopalniach należy ekspozycja człowieka na wibracje, które wpływają na jego układ nerwowy i aktywność gruczołów wydzielania. Wykazano, że po 30 minutach pracy człowieka eksponowanego na intensywne wibracje wartość jego impedancji ciała maleje o 20 %. Podczas obserwacji osób eksponowanych na wibracje zauważono trzykrotny wzrost prądu percepcji, czyli minimalnej wartości natężenia prądu wyczuwanego przez wolontariuszy.
8. Wykonywanie prac na dole kopalni w warunkach o niewłaściwym oświetleniu, a szczególnie prac precyzyjnych wymagających wysiłku psychicznego, powoduje zmęczenie człowieka. Zmęczenie to wywołuje w organizmie człowieka szereg zmian fizjologicznych, których efektem są zmiany parametrów fizycznych skóry. Wykazano, że po 2 godzinach pracy w środowisku o niewłaściwym natężeniu oświetlenia wartość impedancji ciała człowieka maleje do 20% jego wartości początkowej.
9. Wartość impedancji ciała człowieka o wzroku przywykłym do ciemności po ekspozycji na określony bodziec świetlny maleje w pierwszych 60 sekundach narażenia. Najmniejszą wartość impedancja osiąga w czasie pomiędzy 60 a 120 sekundą czasu adaptacji do światła. Po upływie 120 sekund wartość funkcji impedancji ciała wzrasta osiągając wartość ustaloną po czasie 480 sekund. Ustalona wartość impedancji ciała po adaptacji wzroku do światła jest równa wartości początkowej dla ciemności.
10. Wykonane pomiary impedancji ciała człowieka eksponowanego na pola elektromagnetyczne nie wykazały zmian wartości w czasie obserwacji działania tegoż pola. Pomiary przeprowadzono dla wartości pól spotykanych w kopalniach węgla kamiennego.
11. Przeprowadzone badania i obserwacje przedstawiają zjawisko zmian wartości impedancji ciała człowieka eksponowanego na uciążliwości ergonomiczne środowiska pracy w kopalniach węgla kamiennego, wśród których należy wymienić: klimat oraz warunki klimatyczne pracy określone wskaźnikiem dyskomfortu cieplnego, hałas, wibracje, wrażenia świetlne związane z niewłaściwym natężeniem oświetlenia miejsca pracy. Czynniki te wpływają na zmysły człowieka i wywołują zmiany wartości impedancji ciała. Natomiast pole elektromagnetyczne (w zakresie

przeprowadzanych badań), które oddziałuje na cały organizm, nie powoduje istotnych zmian wartości impedancji ciała. Otrzymane z wykonanych badań zależności uzasadniają postawioną tezę o zmianie wartości impedancji ciała człowieka pod wpływem czynników ergonomicznych środowiska pracy w kopalniach głębinowych.

12. Praca spełnia cele użyteczne, ponieważ otrzymane z przeprowadzonych badań wnioski znajdują zastosowanie w ochronie przed rażeniem prądem elektrycznym oraz w poprawie organizacji bezpiecznej pracy w kopalniach.
13. Wyniki pracy winny zostać wykorzystywane również poza górnictwem przy doborze parametrów wyłączników przeciwporażeniowych zabezpieczających instalacje elektryczne w obiektach pracy, gdzie występują zagrożenia czynnikami ergonomicznymi.

Uzyskane z przeprowadzonych badań wyniki oraz sformułowane wnioski pozwalają stwierdzić, że cel, jaki postawiono przed pracą, został osiągnięty, a wysunięte tezy pracy zostały uzasadnione. Znajomość czynników szkodliwych i uciążliwych, a szczególnie poznanie ich oddziaływania na organizm ludzki przyczyni się do podjęcia działań mających na celu ich eliminację oraz zastosowanie skutecznych działań profilaktycznych. Należy wyrazić nadzieję, że wnioski wynikające z tych badań znajdą aprobatę u konstruktorów systemów ochrony przed rażeniem prądem elektrycznym oraz w poprawie organizacji bezpiecznej pracy w kopalniach, jak i poza górnictwem.

## LITERATURA

1. Bąk J.: Oświetlenie wnętrz światłem elektrycznym. Wiadomości Elektrotechniczne 1998, nr 3.
2. Biegelmeier G., Hönninger E., Küttner J., Miksch J., Schny S.: Über Messungen des elektrischen Widerstandes der Körper lebender Menschen in Zusammenhang mit Normungsfragen bei den Schutzmaßnahmen gegen elektrische Unfälle in Niederspannungsanlagen. Elektrotechnik und Maschinenbau 1979, nr 2.
3. Biegelmeier G., Mikisch J.: Über den Einfluß der Haut auf die Körperimpedanz des Menschen. Elektrotechnik und Maschinenbau 1980, Heft 9.
4. Biegelmeier G.: Die Wirkung des elektrischen Stromes auf den Menschen und der elektrische Widerstand des menschlichen Körpers. ETZ – Report 20. 1987 vde-verlag gmbh Berlin und Offenbach.
5. Biegelmeier G.: Neue Erkenntnisse der Elektropathologie. Elektrotechnik und Informationstechnik 1989, Heft 1.
6. 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 1991, nr 3.
7. Biegelmeier G., Graiss J., Mörx A., Kieback D.: Neues Wissen über die Wirkungen des elektrischen Stroms auf Menschen und Nutztiere. VEO Journal 1995, nr 11.
8. Cichowski E.: Przyczynowość wypadków elektrycznych w górnictwie. Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa (334) 1998, nr 6.
9. David E.: Biologische Wirkungen elektromagnetischer Felder. Elektrizitätswirtschaft 1993, nr 16.
10. Drenda J.: Dyskomfort cieplny w środowiskach pracy kopalń głębinowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śl., s. Górnictwo z. 213, Gliwice 1993.
11. Frycz A.: Klimatyzacja kopalń. Wyd. Śląsk, Katowice 1981.
12. Ganong W.: Fizjologia. PZWL, Warszawa 1994.
13. Gawor P.: Wypadki spowodowane dotykem bezpośrednim w niskonapięciowych sieciach kopalń węgla kamiennego. XI Międzynarodowa Konferencja Naukowo - Techniczna „Bezpieczeństwo elektryczne”, tom 1, Wrocław 1997.
14. Gawor P.: Elementy ryzyka wypadków elektrycznych w warunkach kopalnianych. Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa (334) 1998, nr 6.
15. Geras G.: Elektrodermometria w psychologii i medycynie. Wyd. Uniw. Gdańskiego. Gdańsk 1985.
16. Gierlotka S.: Pomiar impedancji i rezystancji ciała ludzkiego w celu określenia zagrożenia porażeniowego w środowisku górniczym. Zeszyty Nauk. Politechn. Śl., s. Górnictwo z.218, Gliwice 1994.
17. Gierlotka S.: Wpływ wybranych czynników klimatycznych i napięcia rażenia na opór elektryczny ciała człowieka w podziemiach kopalń. Rozprawa doktorska. Politechnika Śląska, Gliwice 1994.
18. Gierlotka S.: Elektrofizjologia skóry człowieka w górniczych warunkach klimatycznie trudnych. Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa (296) 1995, nr 2.
19. Gierlotka S.: Wpływ czynnika ludzkiego na wypadki porażen prądem w górnictwie. Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa (304). 1995, nr 11.
20. Gierlotka S.: Zmiany impedancji ciała człowieka pod wpływem napięcia i klimatu środowiska górniczego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Górnictwo z. 225, Gliwice 1995.

21. Gierlotka S.: Wpływ klimatu dołowego kopalni na elektrofizjologię organizmu człowieka. Przegląd Górniczy 1995, nr 10.
22. Gierlotka S., Krasucki F.: Wpływ mikroklimatu podziemi kopalń na wartość impedancji ciała człowieka. X Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Ochrona przeciwporażeniowa w urządzeniach elektrycznych” Wrocław 1995.
23. Gierlotka S.: Urazy oparzenia ciała podczas wypadków elektrycznych w górnictwie. Miesięcznik WUG 1996, nr 5.
24. Gierlotka S.: Elektropatologia ciała człowieka jako problem badawczy i leczniczy. Wiadomości Elektrotechniczne 1996, nr 7.
25. Gierlotka S.: Der Einfluß des Grubenklimas auf die Elektrophysiologie des menschlichen Körpers. Glückauf - Forschungshefte 58 (1997) Nr 3.
26. Gierlotka S.: Zmiany reakcji ciała człowieka spowodowane klimatem i napięciem rażenia. XI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Bezpieczeństwo elektryczne”, tom 1. Wrocław 1997.
27. Gierlotka S.: Zagrożenie polem magnetycznym w górnictwie. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa (339) 1998, nr 11.
28. Gierlotka S.: Zmiany impedancji ciała człowieka spowodowane hałasem środowiska pracy. XII Międzynarodowa Konf. Naukowo-Techn. „Bezpieczeństwo elektryczne”, tom I. Wrocław 1999.
29. Gierlotka S.: Wpływ oświetlenia miejsca pracy na bezpieczeństwo obsługi urządzeń elektrycznych w kopalniach węgla kamiennego. Miesięcznik WUG 1999, nr 11.
30. Gierlotka S.: Pole elektromagnetyczne występujące w kopalniach węgla kamiennego i jego wpływ na człowieka. Przegląd Górniczy 2000, nr 1.
31. Gierlotka S.: Wpływ hałasu występującego w kopalniach węgla kamiennego na bezpieczeństwo obsługi urządzeń elektrycznych. Miesięcznik WUG 2000, nr 5.
32. Gierlotka S.: Electrophysiology of human's skin in difficult conditions. Polish Journal of Medical Physics and Engineering. Official Publication of Polish Society of Medical Physics 2000, nr 4.
33. Gierlotka S.: Wykorzystanie elektropatologii do ochrony człowieka przed porażeniem prądem elektrycznym. Wiadomości Elektrotechniczne 2000, nr 6.
34. Gładilin Ł.W., Mienszow B.G., Szczuckij W.J., Antonow J.P., Borodin N.J.: Izolacja podziemnych elektroustanowok szacht i elektrobezpieczność. Izdat. Niedra, Moskwa 1966.
35. Gołąb B., Traczyk W.: Anatomia i fizjologia człowieka. PZWL, Warszawa 1986.
36. Grzesik J., Zieliński G.: Źródła pól magnetycznych o znaczeniu higienicznym. Ochr. Pracy 1988, nr 9.
37. Grzesik J.: Bódcze akustyczne. PWN, Warszawa 1977.
38. Kieback D.: Ergebnisse von Forschungsarbeiten und statistischen Untersuchungen des Instituts zur Erforschung elektrischer Unfälle. Elektrotechnik und Informationstechnik 1989, nr 1.
39. Korniluk W.: Probabilistyczne metody oceny skuteczności ochrony przeciwporażeniowej w urządzeniach elektrycznych niskiego napięcia. Rozprawy naukowe Politechniki Białostockiej 1993, nr 17.
40. Krasucki F.: Zagrożenia elektryczne w górnictwie. Wyd. Śląsk, Katowice 1984.
41. Krasucki F.: Deterministyczne i probabilistyczne modele zagrożeń elektrycznych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śl., s. Górnictwo z. 125, Gliwice 1984.
42. Krasucki F.: Wybrane zagadnienia kompatybilności elektromagnetycznej w górnictwie. PWN, Warszawa 1988.
43. Krasucki F.: Elektryfikacja podziemnych zakładów górniczych, tom II. Wyd. Politechniki Śl., Gliwice 1998.
44. Krause M.: Ergonomia. Śląska Organizacja Techniczna, Katowice 1992.
45. Kupfer J., Teresiak Z.: Wartości graniczne wielkości warunkujących fizjologiczne zagrożenie porażeniem elektrycznym. Przegląd Elektrotechniczny 1986, nr 10-11-12.
46. Lipowczan A.: Podstawy pomiarów hałasu. GIG, Katowice 1987.
47. Manojłow W. E.: Osnovy elektrobezopastnosti. Energoatomizdat. Leningrad 1991.



48. Markiewicz H.: Bezpieczeństwo w elektroenergetyce. WNT, Warszawa 1999.
49. Morawski T., Gwarek W.: Teoria pola elektromagnetycznego. WNT, Warszawa 1985.
50. Nowakowski B.: Zasady higieny pracy w przemyśle. PZWL, Warszawa 1964.
51. Rassner G.: Dermatologia. Wrocław, Wyd. Med. 1994.
52. Rączkowski B.: BHP w praktyce. ODDK Gdańsk 1997.
53. Sperling A.: Psychologia. Wyd. Zysk 1995.
54. Stanoszek J., Ludyga K., Lewandowska A.: Biologiczne i medyczne skutki oddziaływania pól elektrycznych 50 Hz na organizmy żywe. Energetyka 1982, nr 5.
55. Sułkowski J., Drenda J. inni: Badania warunków klimatycznych wewnątrz klimatyzowanych kabin zabudowanych na stanowiskach pracy oraz ocena uregulowań prawnych i organizacyjnych pracy górników w trudnych warunkach klimatycznych kopalń rud miedzi. Praca badawcza nr 64/U/NW/99 – Wydział Górnictwa i Geologii – Instytut Eksploatacji Złóż Politechniki Śl. – Gliwice 2000.
56. Szparaga B.: Oświetlenie podziemnych wyrobisk górniczych. Poradnik nr 2/1996 - EMAG Katowice.
57. Szuba M.: Oddziaływanie pól elektromagnetycznych w ochronie pracy i środowiska. Wiadomości Elektrotechniczne 1998, nr 3.
58. Teresiak Z., Szuba M.: Pole elektromagnetyczne sieci i urządzeń elektromagnetycznych w środowisku naturalnym człowieka. X Międzynarodowa Konferencja „Ochrony przeciwporażeniowej w urządzeniach elektrycznych”. Wrocław 1995.
59. Teresiak Z., Szuba M.: Pola elektromagnetyczne a środowisko. XI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Bezpieczeństwo elektryczne”, tom II, Wrocław 1997.
60. Tomczuk B.: Wpływ pól elektromagnetycznych na organizmy żywe. Energetyka 1996, nr 7.
61. Trajdos S.: Poradnik Inżyniera Matematyka, tom II. WNT, Warszawa 1987.
62. Villet C., Berg L., Solomon E., Martin D.: Biologia. Multico - Warszawa 1996.
63. Waclawik J., Cygankiewicz J., Knechtel J.: Warunki klimatyczne w kopalniach głębokich. Wyd. III. PAN – Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią. Kraków 1998.
64. Wajs K.: Pola elektromagnetyczne a zdrowie. Wiadomości Elektrotechniczne 1996, nr 11.
65. Waroński K.: Problemy rzetelnej oceny narażenia górników wybranej kopalni węgla kamiennego na hałas środowiska. Wiadomości Górnicze 1999, nr 10.
66. Wolska A.: Ryzyko zawodowe - oświetlenie wnętrz światłem elektrycznym. Bezpieczeństwo pracy - nauka i praktyka 1997, nr 7-8.
67. Zabusow W.: Kompleksowa ocena warunków bezpiecznej eksploatacji urządzeń elektrycznych z uwzględnieniem klimatyczno-geograficznej specyfiki rejonu. X Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techn. „Ochrona przeciwporażeniowa w urządzeniach elektrycznych”, Wrocław 1995.
68. Effects of current passing through the human body. Raport 1984 r. Publication 479 - 1.
69. Encyklopedia Fizyki Współczesnej. PWN, Warszawa 1983.
70. Leksykon Górniczy, Wyd. Śląsk, Katowice 1989.
71. Poradnik inżyniera elektryka. Tom III, rozdz. 10.: Technika świetlna. WNT, Warszawa 1997.
72. Sprawozdanie z pomiarów natężenia pola elektromagnetycznego 50Hz w wybranych obiektach na terenie kop. „Wawel”, wykonanych przez Energopomiar-Gliwice.
73. PN-90/N-0151 Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna. Terminologia.
74. PN-90/T-06584: Mierniki i metody pomiaru natężenia pola magnetycznego o częstotliwości 50Hz.
75. PN-81/N-01306 Hałas: Metody pomiaru.
76. PN-94/N-01307. Hałas: Dopuszczalne wartości hałasu w środowisku pracy. Wymagania dotyczące wykonywania pomiarów.
77. PN-64/E-10005: Technika świetlna. Podstawowe pojęcia i wielkości.
78. PN-G-02600: Oświetlenie podziemnych wyrobisk zakładów górniczych.
79. PN-82/N-01052.00: Badania statystyczne. Zasady prowadzenia badań statystyki.
80. PN-83/N-01052.02: Badania statystyczne. Estymacja i test istotności dla wartości średniej.
81. PN-83/N01052.07: Badania statystyczne. Badanie zgodności rozkładu własności w populacji z rozkładem teoretycznym.



82. PN – 82/N – 01350: Drgania. Terminologia.
83. PN – 91/N – 01352: Drgania. Zasady wykonywania pomiarów na stanowisku pracy.
84. PN – 91/N – 01353: Drgania. Dopuszczalne wartości przyspieszenia drgań oddziałujących na organizm człowieka przez kończyny górne i metody oceny narażenia.
85. PN – 91/N – 01354: Drgania. Dopuszczalne wartości przyspieszenia drgań o ogólnym oddziaływaniu na organizm człowieka i metody oceny narażenia.
86. PN-G-03100: Ochrona pracy w górnictwie. Warunki klimatyczne kopalń podziemnych. Wyznaczenie temperatury zastępczej klimatu.
87. Rozp. Min. Pracy i Polityki Soc. z dnia 17.06.1998r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia i środowiska pracy. Dz. U. 1998r. nr 79.
88. Rozp. Min. Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa z dnia 11.08.1998 r. w sprawie szczegółowych zasad ochrony przed promieniowaniem szkodliwym dla ludzi i środowiska, dopuszczalnych poziomów promieniowania, jakie mogą wystąpić w środowisku oraz wymogów obowiązujących przy wykonywaniu pomiarów kontrolnych promieniowania.
89. Rozporządzenie Ministra Przemysłu i Handlu z dnia 14.04.1995 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych (Dz.U Nr 3 z 1998 r.).
90. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 17.09.1999 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy urządzeniach i instalacjach energetycznych (Dz.U. nr 80 z 1999 r.).

# WPLYW UCIAŻLIWOŚCI ERGONOMICZNYCH WYSTĘPUJĄCYCH W KOPALNIACH WĘGLA KAMIENNEGO NA IMPEDANCJĘ ELEKTRYCZNĄ CIAŁA CZŁOWIEKA

## Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań wpływu wybranych uciążliwości ergonomicznych środowiska pracy w kopalni węgla kamiennego na zmiany wartości impedancji ciała człowieka. Do badań wybrano takie czynniki ergonomiczne środowiska pracy na dole kopalni, do których należą: warunki klimatyczne, hałas, wibracje, niewłaściwe natężenie oświetlenia oraz narażenie na wpływ pola elektromagnetycznego. Czynniki te w dużym stopniu wpływają na wartość impedancji ciała.

Uwzględniając zagrożenie oraz szczególnie trudne warunki klimatyczne i organizacyjne w czynnych wyrobiskach podziemia kopalń, należało opracować takie warunki badań, aby pomiary nie stwarzały zagrożenia dla życia i zdrowia badanych. Do badań impedancji ciała pod wpływem, wybranych narażeń ergonomicznych przyjęto tak nazwaną standardową drogę pomiarowego rażenia, aby metoda była najbezpieczniejsza i uwzględniała zjawiska środowiskowe występujące w górnictwie. W pomiarach impedancji jako drogę standardową przyjęto odcinek od opuszka palca środkowego do opuszka kciuka tej samej ręki.

W celu wyznaczenia zależności zmian impedancji ciała od zmian klimatu dołowego i napięcia rażenia wykonano pomiary na dole kopalni w klimacie od 7 do 22 katastopni wilgotnych. Badane osoby były zaaklimatyzowane i w stanie spoczynku. Pomiary impedancji ciała człowieka wykonano pomiarowym napięciem rażenia o wartościach od 14 do 95 V. Korzystając z metod statystyki matematycznej wyznaczono zależność funkcyjną impedancji ciała człowieka od klimatu i napięcia rażenia. Otrzymana zależność pozwala przeprowadzić ekstrapolację wartości impedancji ciała dla stosowanych w górnictwie napięć znamionowych, wyższych niż dopuszczalne dla badań organizmu żywego. W celu określenia zmian impedancji ciała człowieka pod wpływem warunków klimatycznych wykonano pomiary impedancji przy zdefiniowanym wskaźniku dyskomfortu cieplnego  $\delta$ . Wskaźnik dyskomfortu cieplnego  $\delta$  uwzględnia wydatek energetyczny człowieka zależnie od wysiłku i rodzaju wykonywanej pracy.

Przeprowadzono badania wpływu natężenia oświetlenia w miejscu pracy na zmianę impedancji ciała człowieka. Wykazano, że bodźce świetlne odbierane przez narząd wzroku powodują wystąpienie reakcji psychofizjologicznych, które przyczyniają się do zmian wartości impedancji ciała człowieka. Zbadano zmiany wartości impedancji ciała w czasie wykonywania pracy przez elektromonterów w wyrobisku górnictwym oświetlonym światłem o natężeniu właściwym zgodnie z wymogami dla rodzaju wykonywanej pracy, jak również przy oświetleniu niewłaściwym.

W celu określenia zmian impedancji ciała człowieka w zależności od ekspozycji na hałas przeprowadzono pomiary w atestowanej komorze audiometrycznej. Pomiary wartości impedancji ciała wykonano eksponując badane osoby na dźwięki o określonej częstotliwości w zakresie od 250 Hz do 1200 Hz oraz poziomie natężenia dźwięku od 50 dB do 100 dB. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów wyznaczono zależność zmian impedancji ciała człowieka od stopnia narażenia na działanie dźwięków o określonej częstotliwości i poziomie natężenia. Wykonano również badania

zmian wartości impedancji ciała podczas wykonywania prac przez elektromonterów dołowych w wyrobiskach, które były narażone na hałas. Określono zmiany wartości ich impedancji ciała w czasie dwugodzinnej pracy w hałasie o poziomie natężenia 85 dB.

Przedstawiono wyniki badań wpływu wibracji na zmiany impedancji ciała człowieka. Badania przeprowadzono wśród osób ekspozowanych na drgania podczas pracy wiertarką udarową stosowaną w kopalniach.

W ramach badań wykonano pomiary zmian wartości impedancji ciała człowieka ekspozowanego na pola elektromagnetyczne. Przeprowadzone badania nie wykazały zmian wartości impedancji w czasie ekspozycji wartościami pól spotykanymi w kopalniach węgla kamiennego.

Przeprowadzone badania zmian wartości impedancji ciała przy ekspozycji na: klimat, hałas oraz bodźce świetlne, które wpływają na zmysły człowieka, wykazały powiązanie deterministyczne. Natomiast pole elektromagnetyczne w zakresie przeprowadzonych badań, które oddziałuje na cały organizm, nie powoduje istotnych zmian wartości impedancji ciała.

Prace zakończono wnioskami dotyczącymi wpływu wybranych czynników środowiska górniczego na modelowe wartości impedancji ciała człowieka. Wnioski oraz opracowane zależności badanych zjawisk powinny być wykorzystane do poprawy ochrony przeciwporażeniowej oraz kształtowania bezpiecznych warunków pracy w kopalniach.

# THE INFLUENCE OF CHOSEN ERGONOMICAL ARDUOUSNESS, WHICH APPEARS IN COAL, MINES ON ELECTRICAL IMPEDANCE OF HUMAN BODY

## Summary

This work presents the results of the research which has been conducted to show the influence of certain chosen ergonomic arduous factors of the work environment in a coal mine on the value of the human body impedance. For the research purpose the following factors have been included: climatic conditions, noise, vibrations, inappropriate intensity of light and the exposure to electromagnetic field. All those factors determine impedance significantly.

Considering the exposure and especially difficult climatic and managing conditions in active excavation, one had to establish such conditions of research not to put anybody's life or health in danger. For the purpose of determining impedance under the influence of given ergonomic threats; to make the method as safe as possible but at the same time reliable, we assumed so called standard way of blows. In all calculations we assumed this way to equal the distance between the middle finger tip and tip of the thumb in the same hand.

To establish the dependence between the change of impedance and the change of the ground climate as well as between the intensity of the blow, conducted the measuring at the temperature of 7-22 katadegrees of moist. The people taking part in the experiment were acclimatized and relaxed. The impedance of the human body was measured by the means of gauging blow intensity 14-95 V of value. Further, by the means of mathematical statistics we have determined the functional human body dependence on climate and intensity of the blow. Received dependence allows us to extrapolate the values of the human body impedance for the nominal intensity applied in coal mining, higher than permissible to perform upon the human being. To define the alternation of the human body impedance under the influence of the climate we measured the impedance for the defined warmth discomfort index  $\delta$ . The defined warmth discomfort index  $\delta$  considers the energetic output depending on the effort and the kind of work being performed.

The influence of the light intensity at work place on the human impedance has also been measured. We have proved experimentally that the light impression received by eye cause psychotropic reaction which lead to altering the value of human body impedance. We have tested the value of the impedance during working at the properly lit excavation as well as working at the ineptly lit one.

To define the alternation of the human body impedance caused by noise we have conducted testing inside an attested audiometric chamber. The people were tested under the determined frequency ranging from 250Hz to 1200 Hz and at the level of sound intensity ranging from 50 dB to 100 dB. On the basis of these measurements we determined analytically the function of changes of the human body depending on the degree of the exposure to sounds at the given frequency and level of intensity. We have also tested the change of the impedance during working in the environment exposed to noises. It was measured at the excavation site during works generating noises. The change of the impedance value was determined during the two-hour work with the intensity of noise 85 dB.

The work also presents the results of the vibrations influence upon the human body impedance. We conducted the experiment testing people working with the pneumatic drill used in coal mines.

Furthermore, we have also measured the changes of the impedance value while exposed to electromagnetic field. The research did not find any changes of impedance value while testing at the exposure present in coal mines.

The researches conducted at the exposure to: climate, noise, and light intensity-all of which influence human senses-showed deterministic connections. Whereas the electromagnetic field, which effects the whole body, does not cause any significant changes of the impedance.

At the end author presents some conclusions about the influence of chosen factors of the coal mining environment and how to model the value of the human body impedance. These conclusions and defined dependences should be used to improve fire-control security as well as for creating safe conditions of work inside the coal mine.



# **EINFLUSS AUSGEWÄHLTER ERGONOMISCHER BESCHWERLICHKEITEN AUF DIE ELEKTRISCHE IMPEDANZ DES MENSCHLICHEN KÖRPERS IN KOHLEGRUBEN**

## **Zusammenfassung**

In der Arbeit hat man die Ergebnisse durchgeführter Untersuchungen ausgewählter erschwerter ergonomischer Arbeitsortfaktoren, die die Menschenkörperimpedanzwerte in der Steinkohlegrube beeinflussen, vorgestellt. Bei den Untersuchungen wurden solche ergonomischen Arbeitsortfaktoren in der Steinkohlegrube ausgesucht, zu denen Klima, Lärm, fehlerhafte Beleuchtung und Gefahr vom Einfluß des elektromagnetischen Feldes zählen. Die Eigenschaften determinieren im hohen Maße Körperimpedanzwerte.

Bei der Berücksichtigung der besonderen Gefahren und der besonders schweren Klima- und Organisationsbedingungen im betriebenen Grubenabbauraum, musste man solche Testbedingungen erarbeiten, die keine Gesundheitschäden bzw. Lebensgefahr hervorrufen könnten. Für die Körperimpedanzuntersuchungen, unter Einfluß ausgewählter ergonomischer Gefahren, hat man die standardisierten Wege für den elektrischen Schlag gewählt. Die Methode ist eine der Sichersten unter Berücksichtigung des Geschehens im Bergbau.

Bei den Messungen hat man als Schlagweg den Weg vom Mittelfinger bis zum Daumen der selben Hand angenommen.

Zum Zwecke der Bestimmung der Impedanzänderungen in Abhängigkeit von den Grubenklimaveränderungen und Schlagspannungen hat man die Untertagemessungen bei 7 bis 22 Feuchtkatagrad durchgeführt. Impedanzmessungen am Menschenkörper hat man mit einem Spannungsschlag von 14 bis 95 V durchgeführt. Unter der Einbeziehung der mathematischen Statistiklehre hat man die funktionelle Abhängigkeit der Menschenkörperimpedanz von Klima und Schlagspannung bestimmt. Die gewonnene Abhängigkeit läßt eine Extrapolation der Menschenkörperimpedanz für alle zugelassenen Nennspannungen im Bergbau, welche für die Testzwecke an lebenden Menschen verboten sind, zu. Zu Bestimmtheit der Körperimpedanz Wechslung unter der Wirkung des Klimaverhältnissen hat man die Impedanzvermessungen ausgeführt mit dem Wärmediscomfortanzeiger.

Man hat die Abhängigkeit der Beleuchtungsstärke der Arbeitsstelle von Impedanzveränderungen des Menschenkörpers untersucht. Anhand der Untersuchungen hat man bewiesen, dass vom Sehorgan empfangene Lichtreize das Auftreten von psychotropischen Reaktionen hervorrufen, welche Einfluß auf die Veränderungen der Menschenkörperimpedanz haben. Man hat auch die Menschenkörperimpedanz während der Arbeitsausführung der Elektromonteuere im Abbauraum bei richtigen Eigenschaften der Beleuchtung entsprechend der ausgeführten Arbeitart, sowie bei mißbefüllten Eigenschaften untersucht.

Zum Zwecke der Bestimmung der Menschenkörperimpedanz in Abhängigkeit von Geräuschen hat man die Untersuchungen in einer attestierten Audiokammer durchgeführt. Die Messungen der menschlichen Körperimpedanz bei den Testpersonen hat man bei determinierter Frequenz im Bereich von 250 Hz bis 1200 Hz bei einer Schallstärke von 50 dB bis 100 dB durchgeführt. Aufgrund der durchgeführten Messungen hat man analytisch eine Funktion der

Menschenkörperimpedanzveränderungen in Abhängigkeit vom Gefahregrad der Auswirkung der determinierten Frequenz und Stärke des Lärms ermittelt.

Es wurden auch Messungen der Menschenkörperimpedanz während der ausgeführten Verbindungstätigkeiten der Untertagemonteur im lärmgefährdeten Kohleabbauraum durchgeführt. Man hat ihre Körperimpedanzveränderung innerhalb 2 Stunden unter Lärmstärke von 85 dB bestimmt.

Im Umfang der Untersuchungen hat man auch Messungen der Körperwertimpedanzveränderung unter Einfluß des elektomagnetischen Feldes durchgeführt. Die Messungen haben bewiesen, dass unter normalen Bedingungen für den Kohleabbauraum keine Körperwertimpedanzveränderungen vorkommen.

Die durchgeführten Untersuchungen haben bewiesen, dass Gefahren von Klima, Lärm und Lichtstärke die Menschensinne beeinflussen, welche deterministischen Charakter haben.

Im Gegenteil ruft ein auf den ganzen Körper wirkendes elektomagnetisches Feld im Umfang der Untersuchungen keine wesentlichen Körperimpedanzveränderungen hervor.

Die Untersuchungen hat man mit der Schlußfolgerung betreffend dem Einfluß ausgewählter Kohlengrubenumgebungsfaktoren auf den Musterwert der menschlichen Körperimpedanz abgeschlossen. Schlußfolgerung und gewonnene Abhängigkeiten der untersuchten Erscheinungen sollen für die Verbesserung des Stromschlagschutzes sowie für die Gestaltung sicherer Arbeitsbedingungen Anwendung (Verwertung) finden.



