

dr inż. STEFAN GIERLOTKA
Kopalnia Węgla Kamiennego WUJEK
w Katowicach

Skutki rażenia prądem stałym



Konrad Boksa – Konkurs na plakat bezpieczeństwa pracy „Elektryczność” – CIOPIB 2003

Wstęp

Skutki zdrowotne powodowane prądem stałym różnią się od skutków, które wywołuje prąd przemienny. Wypadki rażenia prądem stałym zdarzają się rzadziej niż rażenia prądem przemiennym, co jest związane z mniejszą liczbą stosowanych urządzeń stałoprądowych. Prąd stały oznacza prąd wolny od tętnień, w którym składowa okresowa stanowi nie więcej niż 15% składowej stałej.

Wartość impedancji ciała człowieka w chwili rażenia

Do określenia wartości natężenia prądu rażeniowego istotna jest wartość impedancji ciała człowieka w chwili rażenia. Wartość impedancji ciała istotna jest w przypadkach rażeń prądem przemiennym, natomiast w przypadkach rażeń prądem stałym analizę należy wykonywać z uwzględnieniem rezystancji ciała. Impedancja ciała człowieka, oprócz składowej rezystancyjnej, zawiera reaktancję pojemnościową, co wynika z dielektrycznych właściwości biologicznych błon komórkowych. Ciało człowieka jako element obwodu elektrycznego nie stanowi przewodnika jednorodnego, lecz ma charakter przewodnika anizotropowego.

W artykule opisano działania prądu stałego na człowieka skutkujące wypadkami. Omówiono zagadnienie wartości rezystancji ciała człowieka przy rażeniach prądem stałym.

Electric shock caused by dc voltage

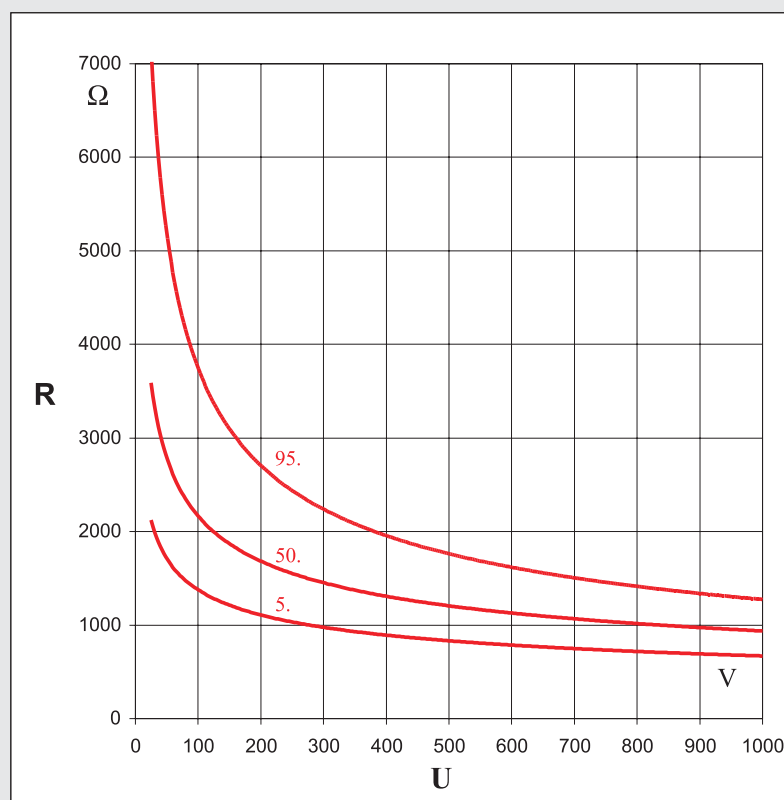
The paper presents the effect of direct current on the human body and the influence of environmental factors on human body resistance.

Tabela 1

WARTOŚCI REZYSTANCJI CIAŁA CZŁOWIEKA ODNOSZĄCE SIĘ DO RAŻEŃ PRĄDEM STAŁYM PRZEPLYWAJĄCYM OD RĘKI DO RĘKI OPRACOWANE PRZEZ IEC [1]

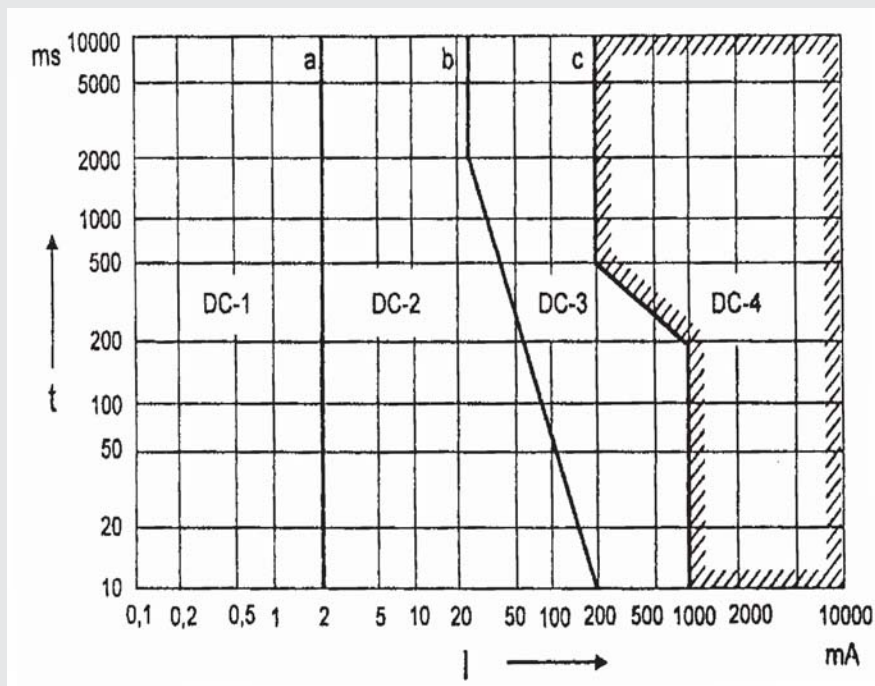
Human body resistance values referring to shocks by direct current flowing from hand to hand, developed by IEC [1]

Napięcie rażeniowe (V)	Rezystancja ciała człowieka (Ω), przy prawdopodobieństwie wystąpienia wartości niższych dla kwantyli populacji:		
	5.	50.	95.
25	2100	3875	7275
50	1600	2900	5325
75	1275	2275	4100
100	1100	1900	3350
125	975	1675	2875
150	875	1475	2475
200	800	1275	2050
225	775	1225	1900
400	700	950	1275
500	625	850	1150
700	575	775	1050
1000	575	775	1050
powyżej 1000	575	775	1050



Rys. 1. Zależność rezystancji ciała człowieka od napięcia rażeniowego (przebiegi zmian odpowiadają prawdopodobieństwu wystąpienia wartości niższych) dla kwantyli populacji: 5., 50. i 95. [1]

Fig. 1. Dependence of human body resistance on shock voltage (the alteration courses relate to the probability of the occurrence of lower values) for the population quantiles: 5th, 50th and 95th [1]



Rys. 2. Strefy czasowo-prądowe dla prądu stałego; DC-1 – brak reakcji organizmu, DC-2 – nie występują efekty patofizjologiczne, DC-3 – mogą wystąpić jedynie silne reakcje mięśniowe, DC-4 – możliwość wystąpienia migotania komór sercowych [1]

Fig. 2. Time-current zones for direct current; DC-1 – no body reactions, DC-2 – no pathophysiological effects, DC-3 – only strong muscle reactions possible, DC-4 – ventricular fibrillations possible [1]

Szczególną właściwością tkanek żywych jest nieliniowa zmiana wartości ich rezystancji w zależności od napięcia rażeniowego. Wartości rezystancji ciała o suchym naskórku, zależnie od napięcia zostały opracowane przez Komitet IEC [1]. Wartości rezystancji odnoszące się do rażeń prądem stałym przepływającym na drodze rażenia ręka – ręka zostały podane w tabeli 1. Wartości rezystancji odnoszące się do drogi rażenia ręka – stopa są o 10 – 30% niższe niż wartości podane w tabeli 1. (rys. 1.).

Natężenie prądu rażeniowego zależy również od rezystancji przejścia na styku skóry z elektrodą. Jej wartość zależy od zawilgocenia naskórka, powierzchni styczności oraz siły dotyku do elektrody [2].

Kierunek przepływu prądu stałego

W celu określenia skutków rażenia prądem stałym istotny jest kierunek przepływu prądu. Rozróżnia się kierunek prądu wzdłużny wstępujący, płynący od stopy spolaryzowanej potencjałem dodatnim, przez ciało człowieka do ręki oraz kierunek prądu wzdłużny zstępujący, przepływający od ręki do stopy spolaryzowanej ujemnie [3].

Na podstawie empirycznych badań opracowano charakterystyki prądowo-czasowe rozdzielające strefy o różnych reakcjach organizmu na działanie prądu stałego [1]. Zostały one ustalone na drodze rażenia lewa ręka – stopy dla prądu wzdłużnego wstępującego (stopy spolaryzowane dodatnio) i przedstawione na rys. 2.

W strefie **DC-1** – pomiędzy początkiem układu współrzędnych i prostą **a** – nie występują żadne, odczuwalne czuciowo, reakcje organizmu. Prosta **a** określa granicę prądu percepcji, której przekroczenie powoduje reakcje czuciowe. Wartość prądu percepcji jest osobniczo zmienna i dla kobiet przyjmuje się średnio 1,5 mA, a dla mężczyzn 2,5 mA. Przy bardzo powolnym zwiększaniu natężenia prądu stałego, granica percepcji nie jest odczuwalna. Rażenie prądem stałym o wartości natężenia większej od wartości prądu percepcji zostaje stwierdzone tylko podczas załączania i wyłączania napięcia. Zjawisko to występuje w odróżnieniu od prądu przemiennego, gdzie po przekroczeniu granicy percepcji osoba przez cały czas rażenia odczuwa mrowienie, mimo że natężenie prądu nie ulega zmianie.

W strefie **DC-2** – pomiędzy prostą **a** i krzywą **b** – nie występują szkodliwe skutki przepływu prądu stałego. Podczas załączania i wyłączania prądu występuje

przykre odczucie mrowienia, drętwienie, ból i skurcze włókien mięśniowych. Wartość prądu samouwolnienia (krzywa **b**), możliwa do ustalenia również tylko w chwili załączania i wyłączania prądu stałego, wynosi 25÷70 mA. Przekroczenie wartości tego prądu powoduje skurcz mięśni, których pokonanie staje się niemożliwe lub tylko prawdopodobne. Występujący próg skurczów przy rażeniu prądem stałym o wartości natężenia 25 mA (DC) odpowiada reakcji właściwej dla rażeń prądem przemiennym 50 Hz o natężeniu 10 mA (AC). Przy rażeniach krótkotrwałych, o czasie do 10 ms, krzywa **b** przyjmuje tę samą wartość 200 mA zarówno dla prądu przemiennego 50 Hz, jak i prądu stałego.

W strefie **DC-3** – pomiędzy krzywymi **b** i **c** – występują reakcje mięśniowe, które mogą przejściowo lub trwale szkodzić zdrowiu osoby rażonej. Skurcz mięśni może być tak silny, że niemożliwe jest otwarcie dłoni. W miarę wzrostu wartości natężenia prądu i czasu rażenia dochodzi do odwracalnych zakłóceń w przewodnictwie impulsów i czynności mięśnia sercowego. Przy długotrwałym przepływie prądu rażeniowego mogą wystąpić zmiany termiczne w organizmie. Krzywa **c** oddziela strefę (DC-3), w której mogą wystąpić mniej szkodliwe skutki od strefy (DC-4), w której migotanie komór serca jest prawdopodobne.

W strefie **DC-4** – powyżej krzywej **c** – oprócz nasilenia zjawisk patofizjologicznych, które wystąpiły w obszarze DC-3, dodatkowo dochodzi prawdopodobieństwo wystąpienia fibrylacji komór serca oraz możliwość powstania oparzeń. Krzywa graniczna **c** określa granicę tolerowanego ryzyka wystąpienia migotania komór sercowych na poziomie prawdopodobieństwa poniżej 1% populacji, które rośnie wraz ze wzrostem natężenia prądu i czasu rażenia. Wartości

prądu stałego powodujące fibrylację komór sercowych są znacznie większe niż w przypadku prądu przemiennego. Oznacza to mniejsze prawdopodobieństwo wystąpienia migotania komór serca podczas rażeń prądem stałym niż przemiennym. Zjawisko fibrylacji komór serca występuje przy dwukrotnie większych wartościach natężenia prądu rażeniowego o kierunku wzdłużnym zstępującym (stopy spolaryzowane ujemnie) niż przy prądach wzdłużnych wstępujących (stopy spolaryzowanych dodatnio). Podczas rażenia prądem stałym o kierunku poprzecznym, płynącym od dłoni do dłoni, wystąpienie fibrylacji komór serca jest mało prawdopodobne.

Reakcja organizmu i skutki

Odczucia i reakcje organizmu żywego na działanie prądu przemiennego o częstotliwości 50 Hz przedstawiono w tabeli 2.

Wartości natężenia prądu powodujące skutki patologiczne w organizmie człowieka są w odniesieniu do prądu stałego trzy, cztery razy wyższe niż dla prądu przemiennego.

Prąd elektryczny płynący długotrwanie przez ciało człowieka powoduje wydzielanie energii cieplnej, która zgodnie z prawem Joule'a jest proporcjonalna do kwadratu natężenia prądu rażeniowego oraz czasu jego przepływu i rezystancji tkanek. Zmiany patologiczne spowodowane wydzielonym ciepłem występują w wyniku parowania płynów wewnątrzkomórkowych. Jeżeli temperatura przekracza 43 °C, to ulega ścięciu białko zawarte w komórkach organizmu człowieka. Dochodzi wtedy do „inaktywacji” enzymów i zahamowania niektórych procesów metabolicznych oraz do denaturacji białek. Denaturacja jest nieodwracalnym procesem zmiany struktury cząsteczki białka i jego właści-

wości biologicznych. Produkty rozpadu oparzonych tkanek są wchłaniane przez organizm i działają toksycznie. Uwolniona z uszkodzonych mięśni mioglobina doprowadza niekiedy do wystąpienia niewydolności nerek [4].

Przepływający przez drogi układu nerwowego prąd elektryczny powoduje zagęszczanie jonów na granicy struktur biologicznych w miejscach o różnej rezystywności. Pobudliwość układu nerwowego zależy od zgromadzonych jonów na granicy różnych środowisk. Reakcje organizmu człowieka na rażenie prądem stałym są silniejsze w przypadku dotyku do anody (ma większe właściwości drażniące) niż do katody. Wiąże się to ze zjawiskiem polaryzacji i repolaryzacji włókien nerwowych.

Warunki środowiskowe mają decydujący wpływ na wybór dopuszczalnych wartości napięcia, uznawanego w danych warunkach jako napięcie bezpieczne. Dla prądu stałego napięcie dotykowe uważa się za bezpieczne, jeżeli jego wartość nie przekracza 120 V, a w warunkach zwiększonego zagrożenia czynnikami środowiskowymi napięcie jest obniżone do 60 V. Warunki zwiększonego zagrożenia czynnikami środowiskowymi są wtedy, gdy rezystancja ciała ludzkiego w stosunku do ziemi jest mniejsza od 1000 Ω.

Podsumowanie

Działanie prądu stałego na organizm człowieka różni się od skutków, jakie powoduje prąd przemienny. Prąd stały długotrwanie płynący w organizmie człowieka może powodować zmiany patologiczne u rażonego, nawet gdy nie był odczuwany. Rażenie prądem stałym może spowodować fibrylację komór sercowych przy wartościach natężenia znacznie większych niż dla prądu przemiennego. Długotrwały przepływ prądu rażeniowego powoduje koagulację tkanek organizmu, co prowadzi do martwicy.

Tabela 2

ODCZUCIA I REAKCJE ORGANIZMU CZŁOWIEKA POWODOWANE RAŻENIEM PRĄDEM STAŁYM [1]

Sensations and reactions of the human body caused by direct current shock [1]

Reakcja organizmu i skutki	Natężenie prądu rażeniowego
Próg odczuwania prądu przez kobiety	1,5 mA
Próg odczuwania prądu przez mężczyzn	2,5 mA
Uczucie ciepła, mrowienie oraz skurcze w dłoni podczas załączania i wyłączania	3 – 10 mA
Kłujące bóle w przegubach dłoni, grzanie w całej ręce	10 – 25 mA
Silne skurcze mięśni, trudności w oddychaniu, parzenie na powierzchni styku	25 – 70 mA
Możliwość utraty przytomności, wystąpienia migotania komór sercowych oraz znamion prądowych	70 – 200 mA

PIŚMIENNICTWO

[1] IEC – Raport 479 – Part 1 – Draft February 2002: Effects of current on human beings and live stock. ESV – Vienna 2002

[2] Gierlotka S. *Wpływ uciążliwości ergonomicznych występujących w kopalniach węgla kamiennego na impedancję elektryczną ciała człowieka*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śl., Górnictwo, z. 252, Gliwice 2002, praca habilitacyjna

[3] Markiewicz H. *Bezpieczeństwo w elektroenergetyce*. WNT, Warszawa 1999

[4] Gierlotka S. *Elektropatologia porażeń prądem*. Wyd. Śląsk, Katowice 2006