

Rażenie człowieka prądem stałym i jego skutki

Stefan Gierlotka

Wprowadzenie

Na przełomie XIX i XX wieku pojawiły się pierwsze udokumentowane śmiertelne wypadki porażen prądem elektrycznym w przemyśle. Początkowo uważano, że przyczyną śmierci porażonych jest uduszenie spowodowane zaprzestaniem oddychania. Wkrótce jednak stwierdzono, że przyczyną śmierci spowodowanej elektrycznością jest zakłócenie w pracy serca. W 1934 roku H. Freiburger opublikował w Niemczech pierwszą monografię o działaniu prądu elektrycznego na ludzi, która przez wiele lat była podstawą w ochronie przeciwporażeniowej. W końcu lat sześćdziesiątych ub.w. w ramach Międzynarodowej Komisji Elektrotechniki IEC pojawiły się dążenia do ujednoczenia wiedzy z zakresu bezpieczeństwa użytkowania energii elektrycznej. Powołana komisja, kierowana przez G. Biegelmeiera, opracowała w 1974 roku raport IEC – Publikacja nr 479 pt. „Działanie prądu elektrycznego na ludzi”. Publikacja ta nie uwzględniała wszystkich wyników prowadzonych wtedy badań elektropatologicznych. Braki te usunięto w kolejnych nowelizacjach. Ostatni najaktualniejszy raport komisji IEC wydano w 2005 roku [9].

Skutki działania prądu stałego na organizm człowieka różnią się od skutków, które wywołuje prąd przemienny. W miejsce skurczów mięśni kończyn obserwuje się kłujące bóle tylko w chwilach włączenia i wyłączenia prądu stałego. 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.

Wpływ czynników środowiskowych na rezystancję ciała człowieka

Skutki elektropatologiczne w organizmie człowieka powodowane prądem stałym rozpatrywać należy w oparciu o rezystancję jego ciała. Dla rażeń prądem przemiennym uwzględniać należy impedancję ciała, która oprócz składowej rezystancyjnej zawiera reaktancję pojemnościową wynikającą z dielektrycznych właściwości błon komórkowych.

Bogate w elektrolity środowisko wewnątrz organizmu posiada bardzo małą rezystancję w porównaniu z rezystancją skóry, której wartość zmienia się pod wpływem czynników zewnętrznych. Szczególną właściwością tkanek żywych jest nieliniowa zmiana wartości ich rezystancji od napięcia rażeniowego. Wartości rezystancji ciała o suchym naskórku, zależnie od napięcia, zostały opracowane przez Komitet IEC i podane w tabeli 1. Wartości te są kwantylami prawdopodobieństwa mniejszego niż 5%, 50% oraz 95% wartości rezystancji ciała w populacji. Po-

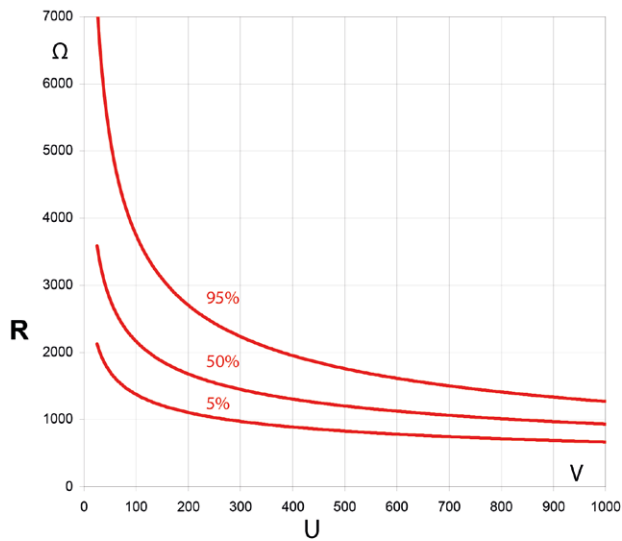
Streszczenie: W artykule opisano skutki występujące w organizmie człowieka powodowane działaniem prądu stałego. Uwzględniono wpływ czynników środowiska na wartość rezystancji ciała człowieka.

Tabela 1. Wartość rezystancji ciała człowieka dla rażeń prądem stałym przepływającym od ręki do ręki

Napięcie rażeniowe (V)	Rezystancja ciała człowieka (Ω), przy prawdopodobieństwie wystąpienia wartości niższych od:		
	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

dane w tabeli 1 wartości dotyczą rażenia na drodze ręka – ręka, natomiast dla drogi rażenia ręka – stopy wartości rezystancji są o 10–30% niższe.

Wartość rezystancji ciała człowieka zależy nie tylko do napięcia rażeniowego, ale również od klimatu środowiska. Podane w tabeli 1 wartości rezystancji ciała dotyczą naskórka suchego w normalnych warunkach klimatycznych. Podwyższona temperatura środowiska, jak też wysiłek pracy powodują wzmożoną czynność gruczołów potowych skóry. Stopień napełnienia potem gruczołów potowych wpływa na wartość rezystancji skóry. Klimat środowiska zależy od temperatury, wilgotności i przepływu chłodzącego powietrza. Wartość klimatu mierzy się katatermometrem, a jednostką klimatu jest katastopień wilgotny



Rys. 1. Zależność rezystancji ciała człowieka od napięcia rażeniowego (przebiegi zmian odpowiadają kwantylom 5%, 50%, 95% prawdopodobieństwa wystąpienia wartości niższych)

[5]. Normalne warunki klimatyczne zawarte są od 11 do 17 katastopni. Zmianę wartości rezystancji ciała (R) zależnie od klimatu (K) i napięcia rażeniowego (U) przedstawia równanie:

$$R = \frac{0,24 \cdot K^{2,7}}{\xi \cdot \sqrt[3]{U}}$$

gdzie:

R – wartość rezystancji ciała człowieka (kΩ);

U – napięcie rażeniowe (V);

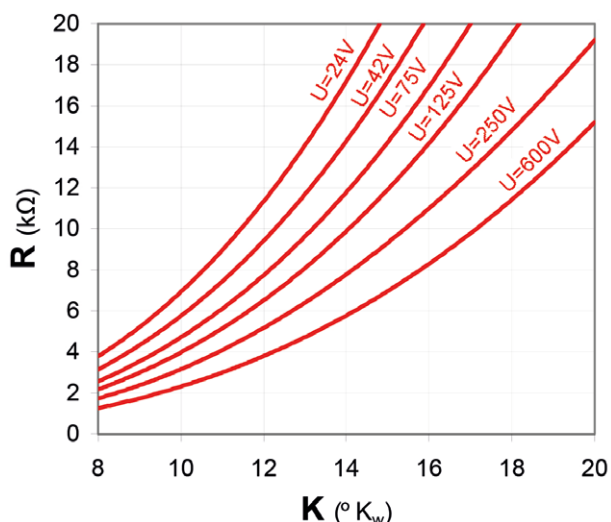
K – klimat określony w katastopniach ($^{\circ}K_w$);

ξ – współczynnik zależny od drogi rażenia. Dla drogi rażenia: ręka – ręka $\xi = 6$, ręka – nogi $\xi = 10$, ręka – tułów $\xi = 9$.

Wartości spodziewanej rezystancji ciała dla drogi rażeniowej ręka – ręka pokazano na rys. 2.

Rezystancja ciała jest bardzo zróżnicowana i duży wpływ na jej wartość mają czynniki antropogenne, konstytucjonalne oraz skłonności patologiczne. Kobiety posiadają wartość rezystancji ciała większą niż mężczyźni. Spowodowane to jest bardziej rozwiniętą podskórną tkanką tłuszczową oraz mniejszą gęstością gruczołów potowych niż u mężczyzn. Mężczyźni pocą się silniej pod wpływem bodźców cieplnych, natomiast kobiety silniej pod wpływem bodźców emocjonalnych.

Istnieją u ludzi stany patologiczne, które zmieniają wartość rezystancji ich ciała, a tym samym podatność na działanie prądu elektrycznego. Niedobór witaminy A w organizmie powoduje wysychanie naskórka i tworzenie się grubej zrogowiałej warstwy skóry o dużej wartości rezystancji. Nadczynność



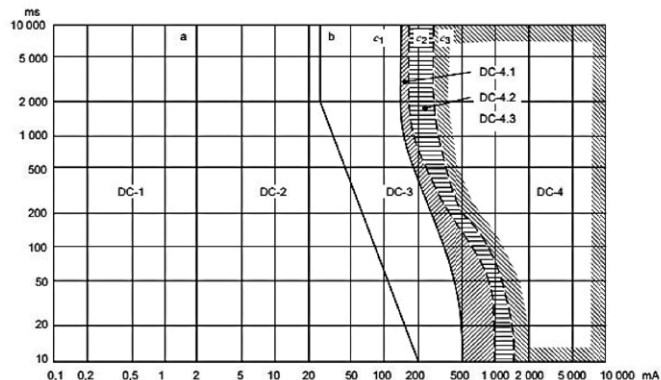
Rys. 2. Wpływ klimatu (K) i napięcia rażeniowego (U) na wartość rezystancji ciała człowieka na drodze rażenia ręka – ręka

tarczycy powoduje większe pocenie się, co obniża wartość rezystancji skóry. Natomiast niedoczynność tarczycy powoduje wzrost rezystancji ciała, gdyż skóra jest sucha i chłodna.

Skutki rażenia człowieka powodowane prądem stałym

Prąd stały jest odczuwany przez człowieka tylko podczas załączania i wyłączania prądu rażeniowego. Zjawisko to występuje w odróżnieniu od prądu przemiennego, gdzie po przekroczeniu granicy percepcji osoba rażona odczuwa elektryzację jako mrowienie. Wartości natężenia prądu powodujące skutki patologiczne w organizmie człowieka są dla prądu stałego trzy do cztery razy wyższe niż dla prądu przemiennego. Odczucia i reakcje organizmu człowieka na działanie prądu stałego przedstawiono w tabeli 2.

Międzynarodowa Komisja IEC opracowała charakterystyki prądowo-czasowe rozdzielające strefy o różnych reakcjach organizmu na działanie prądu stałego. Zostały one ustalone na drodze przepływu prądu rażeniowego od lewej ręki do stóp spolaryzowanych biegunem dodatnim. Przedstawiona na rys. 3 charakterystyka prądowo-czasowa skutków w organizmie jest oparta o ostatni najaktualniejszy raport komisji IEC [9], opracowany w 2005 roku.



Rys. 3. Strefy czasowo-prądowe dla prądu stałego: DC-1 – brak efektów; DC-2 – nie występują szkodliwe efekty patofizjologiczne; DC-3 – mogą wystąpić skurcze mięśniowe; DC-4 – zagrożenie wystąpienia migotania komór serca

W strefie DC-1 – leżącej pomiędzy początkiem układu współrzędnych i prostą *a* – nie występują żadne odczuwalne reakcje organizmu. Prosta *a* określa granicę prądu percepcji, której przekroczenie powoduje reakcje czuciowe. Wartość prądu percepcji jest osobniczo zmienna. Dla kobiet przyjmuje się ją średnio jako 1,5 mA, a dla mężczyzn 2,5 mA. Przy bardzo wolnym zwiększaniu natężenia prądu stałego granica percepcji jest nieodczuwalna. Rażenie prądem stałym o wartości natężenia większej od prądu percepcji zostaje stwierdzone tylko podczas załączania i wyłączania napięcia.

W strefie DC-2 – pomiędzy prostą *a* i krzywą *b* – nie występują szkodliwe skutki rażenia. Podczas załączania i wyłączania prądu występują przykre odczucia mrowienia, drętwienia, ból oraz skurcze włókien mięśniowych. Wartość prądu samowolnienia (krzywa *b*), możliwa do ustalenia tylko w chwili załączania i wyłączania prądu stałego, wynosi 25–70 mA. Przekroczenie wartości tego prądu powoduje skurcz mięśni, którego pokonanie staje się niemożliwe lub tylko prawdopodobne. Występujący próg skurczów przy rażeniu prądem stałym o wartości natężenia 25 mA (DC) odpowiada reakcji dla rażeń prądem przemiennym 50 Hz o natężeniu 10 mA (AC). Dla rażeń krótkotrwałych o czasie do 10 ms, krzywa *b* przyjmuje tę samą wartość 200 mA zarówno dla prądu przemiennego 50 Hz, jak i prądu stałego.

Tabela 2. Odczucia i reakcje organizmu człowieka powodowane rażeniem prądem stałym

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

W strefie DC-3 – pomiędzy krzywymi b i c – występują reakcje mięśniowe u osoby rażonej. Skurcz mięśni może być tak silny, że niemożliwe jest otwarcie dłoni. W miarę wzrostu wartości natężenia prądu i czasu rażenia dochodzi do zakłóceń w powstawaniu i przewodnictwie impulsów w obrębie mięśnia sercowego. Przy długotrwałym przepływie prądu rażeniowego mogą wystąpić zmiany termiczne w organizmie.

W strefie DC-4 – powyżej krzywej c_1 – oprócz nasilenia zjawisk patofizjologicznych, które wystąpiły w obszarze DC-3, dochodzi możliwość powstania oparzeń oraz prawdopodobieństwo wystąpienia fibrylacji komór serca. Krzywa graniczna c_1 określa granicę tolerowanego ryzyka wystąpienia migotania komór serca na poziomie prawdopodobieństwa poniżej 1% populacji. W strefie DC-4.1 występuje zagrożenie migotania komór serca z prawdopodobieństwem mniejszym niż 5%. W strefie DC-4.2 występuje zagrożenie migotania komór serca z prawdopodobieństwem do 50%, a w DC-4.3 – powyżej 50%.

Dla rażeń prądem stałym zagrożenie wystąpienia migotania komór serca jest mniejsze niż podczas porażenia prądem przemiennym. Występuje jednak silniejszy stan skurczowy mięśni oddechowych z zatrzymaniem oddechu. Przyjmuje się dopuszczalną wartość 70 mA prądu rażeniowego DC, która nie powoduje szkodliwych skutków patofizjologicznych u człowieka.

Warunki środowiskowe mają decydujący wpływ na wybór dopuszczalnych wartości napięcia uznawanego w danych warunkach za 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 .

Długotrwałe działanie prądu stałego na człowieka


Długotrwały przepływ prądu rażeniowego przez organizm człowieka może powodować w nim oparzenia elektrotermiczne. Prąd elektryczny płynący przez ciało człowieka powoduje wydzielanie energii cieplnej, która jest proporcjonalna do kwadratu natężenia prądu rażeniowego oraz czasu jego przepływu i rezystancji tkanek. Wytwarzane ciepło na drodze przepływu prądu rażeniowego powoduje nagrzanie tkanek, które może doprowadzić do ich termicznego uszkodzenia. Największe uszkodzenia termiczne tkanek występują w okolicy powierzchni dotyku ciała do elementu pod napięciem. Przy rażeniu o dużej powierzchni dotyku ciała do elektrody mogą wystąpić szkodliwe skutki patologiczne wewnątrz organizmu, nawet gdy gęstość prądu jest niewielka.

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 właściwości biologicznych. Działanie temperatury 50°C w ciągu 3 minut wywołuje martwicę naskórka, a w temperaturze 55°C takie zmiany następują po 1-minutowym prze-

grzaniu. Produkty rozpadu oparzonych tkanek są wchłaniane przez organizm i działają toksycznie. Uszkodzenia termiczne mięśni i kości mogą mieć charakter oparzeń lub zwyrodnienia. Prąd stały długotrwałe przepływający przez organizm człowieka może spowodować zmiany patologiczne u rażonego nawet wtedy, gdy nie jest odczuwany.

Literatura

- [1] ANTONI H., BIEGELMEIER G., KIEBACK D.: *Conventional threshold values of tolerable risks for the appearance of ventricular fibrillation caused by electric shocks with alternating current 50/60 Hz and direct current respectively*. ESF – Technical Publication Series No. 3E. ESF – Vienna 2002.
- [2] BIEGELMEIER G., BACHL H., MÖRX A., RABITSCH G.: *Neue Messungen des Körperwiderstands lebender Menschen mit Wechselstrom 50 Hz sowie mit höheren Frequenzen und mit Gleichstrom*. „Elektrotechnik und Informationstechnik” 3/1991.
- [3] BIEGELMEIER G., GRAISS J., MÖRX A., KIEBACK D.: *Neues Wissen über die Wirkungen des elektrischen Stroms auf Menschen und Nutztiere*. „VEO Journal” 11/1995.
- [4] GIERLOTKA S.: *Elektropatologia porażenia prądem elektrycznym*. Wyd. Śląsk, Katowice 2006.
- [5] GIERLOTKA S.: *Wpływ wysiłku oraz dyskomfortu cieplnego środowiska pracy na zmiany impedancji ciała człowieka*. „Przegląd Elektrotechniczny” 2/2003.
- [6] GIERLOTKA S.: *Rażenie człowieka prądem stałym i jego skutki*. XVI Konferencja Naukowo-Techniczna ELSAF 2007 „Bezpieczeństwo elektryczne”. Szklarska Poręba wrzesień 2007.
- [7] MARKIEWICZ H.: *Bezpieczeństwo w elektroenergetyce*. WNT, Warszawa 1999.
- [8] IEC – Raport 479 – Part 1 – Draft February 2002: *Effects of current on human beings and live stock*. ESV – Vienna 2002.
- [9] IEC – Raport IEC/TS 60479-1 ed4.0 *Effects of current on human beings and livestock – Part 1: General aspects*. 2005 rok.

 **dr hab. inż. Stefan Gierlotka** – biegły sądowy z zakresu wypadków porażenia prądem elektrycznym oraz instalacji i urządzeń elektrycznych

reklama

