

3.3. Wpływ prądu na organizm ludzki oraz sposób działania prądu na człowieka

„Prąd rażeniowy, płynący przez ciało człowieka powoduje zaburzenia w funkcjonowaniu wielu układów, szczególnie układów: nerwowego, oddechowego i krwionośnego. Każde takie zaburzenie stanowi zagrożenie dla zdrowia i życia człowieka, a skutki wywołane prądem rażeniowym mogą ujawnić się nawet po wielu latach” [8].

Przepływ prądu, jak i dowolne zjawisko fizyczne może oddziaływać na organizmy żywe, zarówno niszcząco jak i wręcz odwrotnie. Ze względu na sposoby działania prądu na człowieka, rozróżnić można bezpośredni oraz pośredni sposób oddziaływania:

Bezpośredni – w wyniku bezpośredniego dotknięcia części czynnych urządzeń znajdujących się normalnie pod napięciem.

Pośredni – w wyniku zetknięcia się z częściami przewodzącymi dostępnymi, na których napięcie pojawiło się wskutek uszkodzenia izolacji podstawowej [9].

3.3.1. Skutki przepływu prądu przez ciało człowieka

Skutki fizyczne – są to zmiany fizyczne zachodzące w ciele człowieka pod wpływem prądu prądu elektrycznego, wywołane w układzie:

- 1) oddechowym (zablokowanie pracy płuc);
- 2) nerwowym (skurcze mięśni);
- 3) krwionośnym (migotanie komór sercowych, zatrzymanie akcji serca, niedotlenienie mózgu);
- 4) całym ciele (skutki cieplne: poparzenia, zwęglenia tkanki, nadtapianie kości, itp.);
- 5) upadek z wysokości;
- 6) uszkodzenie wzroku [8].

Skutki chemiczne – są to następujące zmiany chemiczne zachodzące w ciele człowieka pod wpływem prądu:

- 1) ścinanie białka (w wyniku wzrostu temperatury);
- 2) rozkład płynów (elektroliza).

Skutki biologiczne – są to zmiany biologiczne wywołane działaniem prądu: wydzielanie w nerkach płynu (mioglobina) zatykającego kanaliki nerkowe [8].

Czynniki, które wpływają na stopień porażenia:

- a) natężenie prądu,
- b) czas przepływu prądu,

- c) częstotliwość prądu,
- d) rodzaj prądu.
- e) droga przepływu prądu przez człowieka,
- f) rezystancja ciała człowieka oraz jego naskórka,
- g) warunki środowiskowe,

3.3.2. Natężenie oraz czas przepływu prądu rażeniowego

„Natężenie prądu rażeniowego jest wprost proporcjonalne do napięcia rażeniowego i odwrotnie proporcjonalne do rezystancji ciała człowieka. Reakcje organizmów na przepływający prąd są różne i w dużej mierze zależne od indywidualnych cech osób porażonych” [10].

Na podstawie badań, stwierdzono zależność skutków rażenia od natężenia prądu rażeniowego (wartości uśrednione dla mężczyzn):

Tabela 3.1 Skutki rażenia zależne od natężenia prądu rażeniowego przemiennego [10]

Natężenie prądu w mA	Objawy
0,5	brak widocznych reakcji
1-1,5	początek odczuwania
1-3	odczuwanie bezbolesne
3-6	początek skrzów mięśni i odczucie bólu
10-15	trudności z oderwaniem rąk od przewodu, silne bóle w palcach, ramionach
15-25	bardzo silne skrócze i bóle, samodzielne oderwanie jest niemożliwe, trudności z oddychaniem
30	początek paraliżu dróg oddechowych
75	początek migotania komór serca
250	migotanie komór serca w czasie powyżej 0,4 s
4000	zatrzymanie akcji serca
>5000	zwęglenie się tkanek

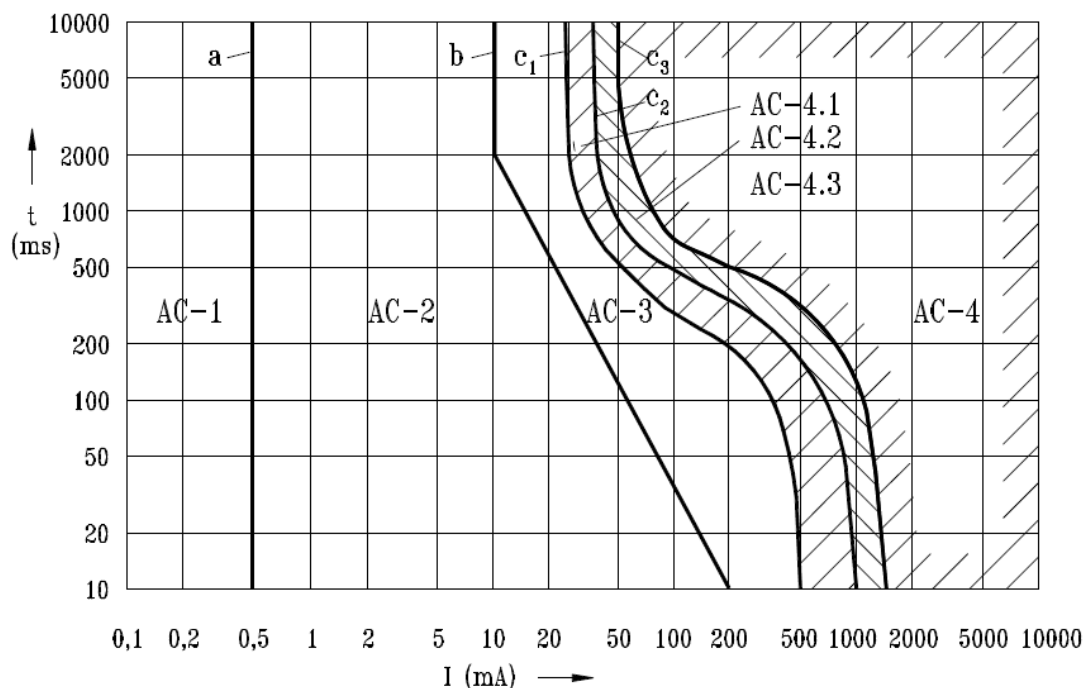
Tabela 3.2 Skutki rażenia zależne od natężenia prądu rażeniowego stałego [10]

Natężenie prądu w mA	Objawy
5-8	początek odczuwania przepływu prądu
10-15	uczucie ciepła
20-25	skrócze mięśni, znaczne odczuwanie ciepła
1200	powoduje śmierć

Skutki przepływu prądu, ze względu na natężenie prądu, są ściśle związane z czasem przepływu. Te same wartości natężenia prądu rażeniowego, ale przepływające w różnych czasach przez ciało, mogą powodować różne skutki.

„Czas przepływu prądu ma wpływ na oddziaływanie cieplne oraz na pojawienie się migotania komór sercowych. Badania dowiodły, że przy przepływie prądów rażeniowych w czasie poniżej 0,2 s wystąpienie migotania komór sercowych zdarza się bardzo rzadko, natomiast przy czasach powyżej 1 s bardzo często ”[10].

Strefy czasowo-prądowe reakcji organizmu:



Rys. 3.1. Strefy czasowo-prądowe reakcji organizmu przy rażeniu człowieka, na drodze lewa ręka-stopy prądem przemiennym o częstotliwości 50/60Hz [7]

Rysunek jest podzielony na kilka stref czasowo-prądowych, z których każda odpowiada pewnym skutkom oddziaływania przepływu prądu zmiennego na ciało.

Strefa AC-1 zabezpiecza brak reakcji organizmu, a linia "a", która dzieli strefy AC-1 i AC-2, jest granicą odczuwania przepływu prądu.

W strefie AC-2 nie występują szkodliwe skutki dla organizmu, natomiast w strefie AC-3 występuje już prawdopodobieństwo skurczów mięśni, uniemożliwiających samodzielne uwolnienie spod napięcia, linia "b" jest granicą samodzielnego uwolnienia się od części będących pod napięciem. W strefie AC-3 mogą wystąpić problemy z oddychaniem, istnieje możliwość migotania przedsionków serca oraz przejściowe zatrzymanie jego akcji.

Strefa AC-4 charakteryzuje się skutkami obecnymi w strefie AC-3, ale oprócz tego pojawia się niebezpieczeństwo wystąpienia oparzeń, migotania komór sercowych, zatrzymania oddechu, zatrzymania akcji serca.

Pomiędzy strefą AC-3 i AC-4 występują też podstrefy AC-4.1, AC-4.2 oraz AC-4.3. Te podstrefy określają wystąpienie prawdopodobieństwa migotania komór sercowych:

- dla podstrefy AC-4.1: 5 % przypadków migotania komór serca;
- dla podstrefy AC-4.2: < 50% przypadków migotania komór serca;
- dla podstrefy AC-4.3: > 50% przypadków migotania komór serca [7].

Graniczna bezpieczna wartość prądu rażeniowego przemiennego, płynącego w dłuższym czasie przez ciało wynosi 30 mA [7].

Znajomość współczynnika prądu sercowego F pozwala na obliczenie prądu I_d na innych drogach przepływu niż lewa ręka – stopy.

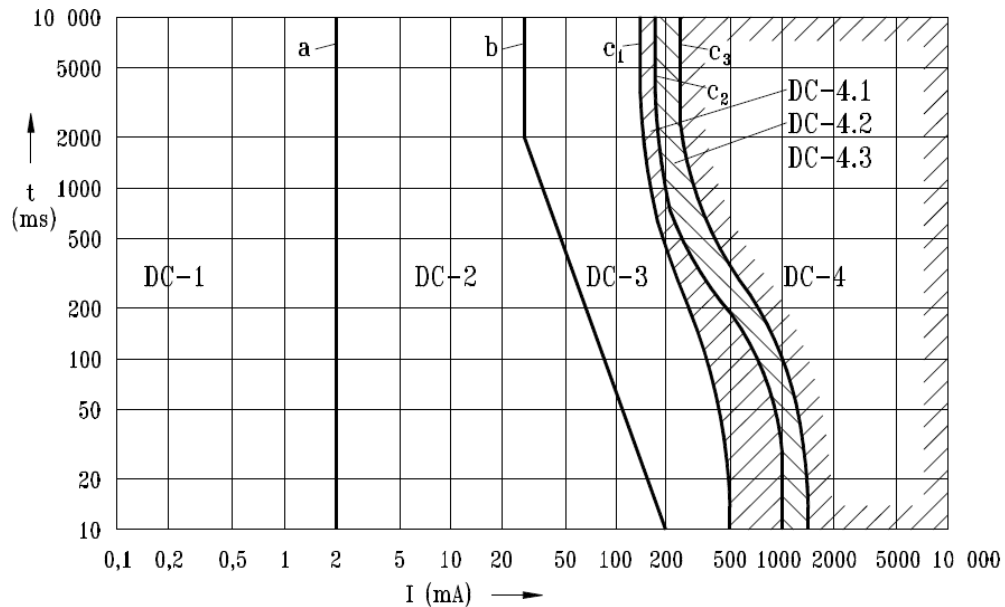
$$F = \frac{I}{I_d}, \rightarrow I_d = \frac{I}{F} \quad (3.1)$$

gdzie: I - prąd płynący przez ciało na drodze lewa ręka - stopy, I_d - prąd płynący przez ciało na drogach przedstawionych w tabeli 3.3, wywołujący te same skutki jak prąd I ,
 F - współczynnik prądu serca, o wartościach dla różnych dróg przepływu prądu I_d

Tabela 3.3 Współczynnik prądu serca dla różnych dróg przepływu prądu przez ciało ludzkie [7]

Droga przepływu prądu przez ciało ludzkie	Współczynnik prądu serca F
Lewa ręka do lewej stopy, prawej stopy lub obydwu stóp	1,0
Obydwie ręce do obydwu stóp	1,0
Lewa ręka do prawej ręki	0,4
Prawa ręka do lewej stopy, prawej stopy lub obydwu stóp	0,8
Plecy do prawej ręki	0,3
Plecy do lewej ręki	0,7
Klatka piersiowa do prawej ręki	1,3
Klatka piersiowa do lewej ręki	1,5
Pośladek do lewej ręki, prawej ręki lub obydwu rąk	0,7

Strefy czasowo-prądowe reakcji organizmu przy rażeniu człowieka, na drodze lewa ręka - stopy prądem stałym:



Rys.3.2. Strefy czasowo-prądowe reakcji organizmu przy rażeniu człowieka, na drodze lewa ręka-stopy prądem stałym [7]

Podobnie jak dla prądu przemiennego, rysunek jest podzielony na kilka stref czasowo-prądowych, z których każda odpowiada pewnym skutkom oddziaływania przepływu prądu zmiennego na ciało.

Znalezienie się w strefie DC-1 – znajdującej się pomiędzy początkiem układu współrzędnych i linią "a", nie powoduje żadnych odczuwalnych reakcji organizmu. Linia „a” jest granicą wartości prądów odczuwania. Wartość prądu odczuwania jest różna: dla kobiet, w przybliżeniu wynosi 1,5 mA, a dla mężczyzn - 2,5 mA.

Granicy strefy DC-1 i DC-2 określają linie "a" oraz "b". W strefie DC-3 zazwyczaj nie zachodzą szkodliwe skutki dla organizmu. Linia "b", podobnie jak dla prądu przemiennego, oznacza granicę samodzielnego uwolnienia spod części będących pod napięciem. W strefie DC-4 występuje prawdopodobieństwo migotania komór serca oraz inne szkodliwe skutki patofizjologiczne, takie jak oparzenia oraz fibrylacja komór serca.

Podobnie jak dla prądu przemiennego wyróżnia się 3 podstrefy, które wskazują na prawdopodobieństwo wystąpienia migotania komór sercowych:

- dla podstrefy DC-4.1: 5 % przypadków migotania komór serca;
- dla podstrefy DC-4.2: < 50% przypadków migotania komór serca;
- dla podstrefy DC-4.3: > 50% przypadków migotania komór serca [7].

Przyjęto, że bezpieczna wartość prądu rażeniowego stałego, płynącego w dłuższym czasie przez ciało człowieka, wynosi 70 mA [7].

3.3.3. Częstotliwość prądu rażeniowego oraz impedancja ciała człowieka

Najbardziej niebezpieczne są prądy rażeniowe o częstotliwościach 40 - 60 Hz. Wywołują one migotanie komórek sercowych, ponieważ są bliskie częstotliwości pracy serca.

Prąd stały powoduje rozkład krwi (zjawisko elektrolizy) i może powodować zablokowanie krwioobiegu. Prądy o wysokich częstotliwościach, nawet przy niezbyt dużych wartościach natężenia, mogą powodować oparzenia naskórka i skóry (zjawisko naskórkowości) [10].

Elektroliza – proces rozkładu struktury chemicznej substancji, zachodzący pod wpływem przyłożonego do niej zewnętrznego napięcia elektrycznego [6].

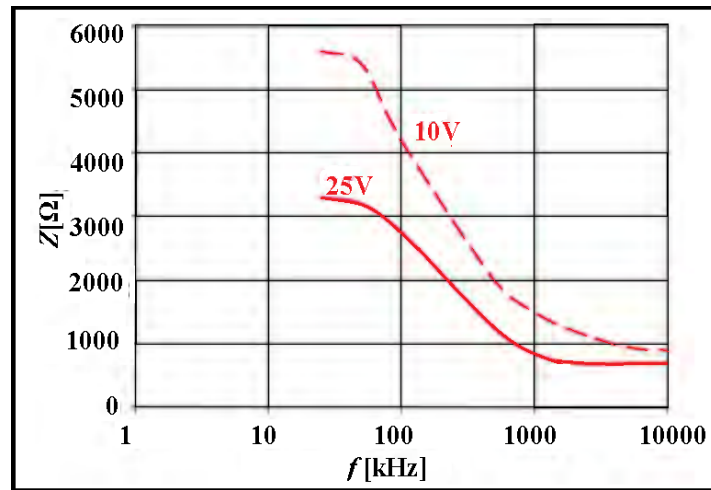
Naskórkowość – zjawisko występujące w obwodach prądu przemiennego, polegające na tym, że gęstość prądu przy powierzchni przewodnika jest większa niż w jego wnętrzu [6].

Ocenę zagrożenia porażeniowego oparto na dopuszczalnym napięciu, które wywołuje przepływ prądu rażeniowego. Ustalenie wartości tego napięcia wymaga znajomości impedancji ciała człowieka, która zależy od napięcia, częstotliwości prądu, stanu wilgotności skóry, drogi przepływu prądu przez ciało, powierzchni elektrod przylegających do ciała oraz siły ich docisku do ciała człowieka.

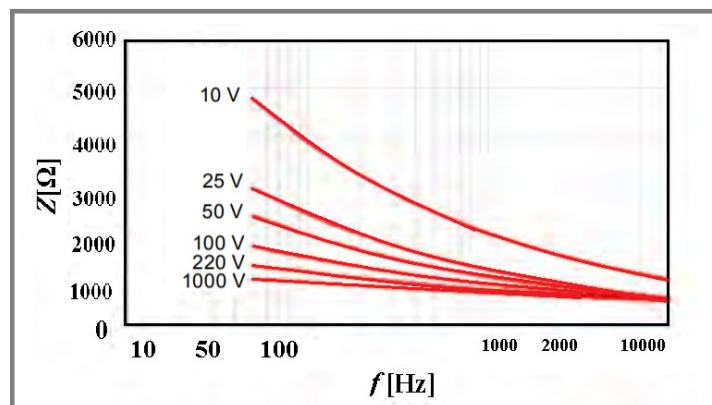
Wartość impedancji naskórka zależy od wartości napięcia dotykowego, wartości natężenia prądu, czasu przepływu prądu, temperatury i wilgotności skóry, powierzchni styku z przewodnikiem, siły docisku przewodnika.

Wartość impedancji naskórka zawiera się w szerokich granicach – od kilkuset do kilkunastu tysięcy Ω . Przy małych napięciach dotykowych ma ona znaczny wpływ na impedancję ciała [9].

Częstotliwość prądu rażeniowego ma również wpływ na impedancję ciała porażonego:



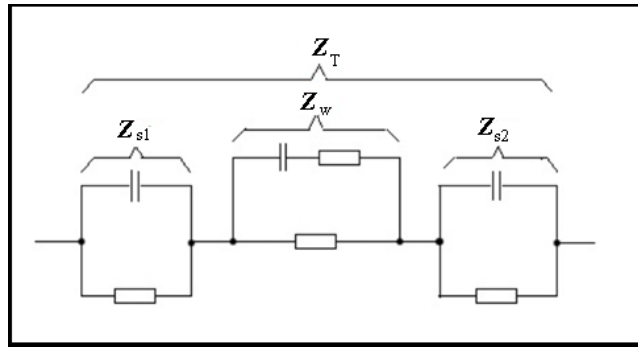
Rys. 3.3. Zależność impedancji ciała człowieka Z od częstotliwości f dla napięcia dotykowego 10 V i 25 V na drodze ręka–ręka (powierzchnia dotyku 8000 mm²) [4]



Rys. 3.4. Zależność impedancji ciała człowieka od częstotliwości prądu rażeniowego na drodze ręka–ręka [4]

Z wykresów zależności impedancji ciała od częstotliwości, z parametrem napięcia dotykowego rażeniowego, można zauważyć, że przy małych napięciach, ze zwiększeniem częstotliwości impedancja ulega znacznemu zmniejszeniu. Natomiast przy większych wartościach napięć zależność ta jest pomijalna.

Schemat zastępczy impedancji ciała człowieka:



Rys. 3.5. Schemat zastępczy impedancji ciała człowieka [9]

gdzie: Z_{s1}, Z_{s2} – impedancja skóry w miejscach zetknięcia się elektrodami, Z_w – impedancja wewnętrzna tkanek nadrodze przepływu prądu, Z_T – impedancja wypadkowa.

Impedancja wypadkowa Z_T jest zależna od jej części składowych (Rys.3.5). Przy wartościach napięć około 500 V wielkie znaczenie ma impedancja skóry; przy napięciach wyższych jej wpływ staje się pomijalnie mały, a impedancja wypadkowa przyjmuje wartości impedancji wewnętrznej. Największą impedancję dla przepływu prądu elektrycznego wykazuje wierzchnia warstwa naskórka o grubości 0,05-0,2 mm [9]. Rezystancja wewnętrzna ciała zależy głównie od drogi przepływu prądu i jest na drodze ręka – ręka i ręka – stopa. Najmniejsza wartość impedancji jest na drodze przepływu prądu ręka – kark.

Impedancja naskórka jest zmienna i zależy od stopnia zawilgocenia skóry oraz częstotliwości prądu, a więc zmienna jest też impedancja ciała. Przy wilgotności względnej powietrza powyżej 75% impedancja ciała nie zależy od impedancji naskórka i jest równa tylko rezystancji wewnętrznej [9].

Impedancja skóry maleje ze wzrostem wartości napięcia dotykowego, wilgotności skóry oraz częstotliwości prądu.