

Porażenia prądem elektrycznym o częstotliwościach wyższych niż częstotliwość przemysłowa

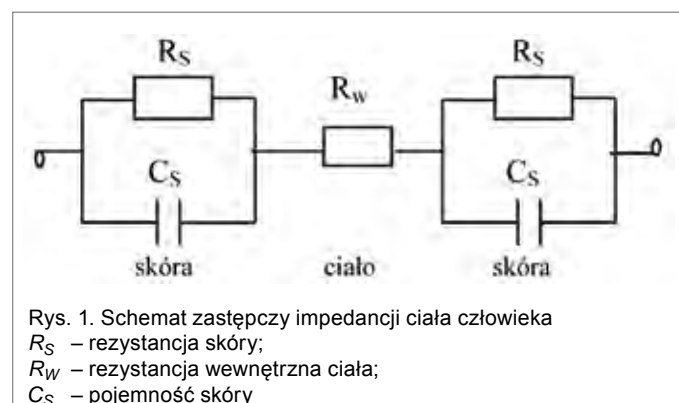
Stefan Gierlotka

Rozwój urządzeń energoelektronicznych i telekomunikacyjnych, który dokonał się w ostatnich latach, spowodował powszechność stosowania napięć o częstotliwości większej od przemysłowej. W niektórych urządzeniach przemysłowych stosowane są zasilania napięciami o bardzo wysokiej częstotliwości, jak chociażby przemysłowe piece indukcyjne (do 100 MHz), wysokoczęstotliwościowe spawarki – do 28 MHz czy też przemysłowe kuchnie mikrofalowe do 2,45 GHz. Skutki urazu elektrycznego u człowieka powodowane prądem rażeniowym o wysokiej częstotliwości różnią się znacznie od skutków, które wywołuje prąd przemienny 50 Hz.

Właściwości elektryczne ciała człowieka

Ciało człowieka jako element obwodu elektrycznego nie stanowi przewodnika jednorodnego, lecz ma charakter przewodnika anizotropowego. Wartość impedancji ciała człowieka jest funkcją napięcia rażeniowego, jego częstotliwości oraz czynników środowiskowych, głównie klimatycznych. Na całkowitą impedancję ciała człowieka składa się impedancja skóry oraz rezystancja organów wewnętrznych. Ponieważ wartość impedancji organów wewnętrznych jest bardzo mała w porównaniu z wartością impedancji skóry, o wartości całkowitej impedancji ciała decyduje suchy zrogowaciały naskórek. Czynniki środowiskowe, jak również stany patologiczne i fizjologiczne człowieka mogą powodować zwiększenie czynności gruczołów potowych w skórze. Stopień napełnienia potem kanalików potowych w skórze człowieka wpływa na zmianę wartości impedancji ciała [3].

Impedancja ciała człowieka ma charakter rezystancyjno-pojemnościowy. Organy wewnętrzne człowieka mają charakter rezystancyjny, natomiast skóra posiada charakter rezystancyjno-pojemnościowy. Schemat zastępczy ciała człowieka pokazany na rys. 1.



Streszczenie: W artykule opisano skutki rażenia człowieka prądem o częstotliwości większej od 50 Hz. Zagrożenie takie występuje przy urządzeniach energoelektronicznych stosowanych między innymi we współczesnych napędach elektrycznych.

THE RESULTS OF HIGH FREQUENCY ELECTRIC SHOCK

Abstract: The author presents the results of electric shock in people, caused by high frequency current.

They differ from the results caused by 50 Hz alternating current.

Impedancja skóry, na którą składa się rezystancja skóry R_S i pojemność skóry C_S , zależy od powierzchni dotyku elektrody oraz właściwości elektrycznych naskórka. Wartość rezystancji skóry można oszacować ze wzoru:

$$R_S = \frac{\rho_s \cdot d_n}{S}$$

gdzie:

R_S – rezystancja skóry [k Ω];

S – powierzchnia dotykającej elektrody [m²];

d_n – grubość naskórka wynosząca średnio $4 \cdot 10^{-4}$ m;

ρ_s – rezystywność naskórka określona w przedziale 10^4 – 10^6 Ω m.

Pojemność jednostkowa skóry człowieka jest proporcjonalna do przenikalności dielektrycznej ośrodka $\epsilon \cdot \epsilon_0$ oraz powierzchni dotyku do elektrody, zaś odwrotnie proporcjonalna do grubości naskórka. Wartość pojemności skóry można oszacować z wzoru:

$$C_S = \frac{\epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot S}{d_{zn}}$$

gdzie:

C_S – pojemność jednostkowa skóry [F];

S – powierzchnia dotykającej elektrody [m²];

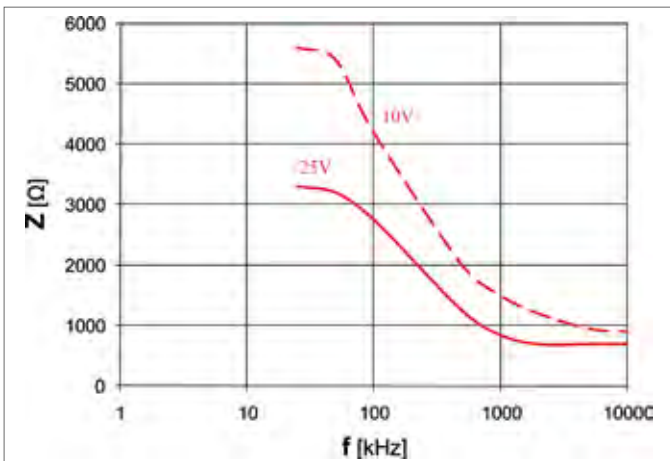
d_{zn} – grubość zrogowaciałej warstwy naskórka $\approx 1 \cdot 10^{-5}$ m;

ϵ – względna przenikalność dielektryczna naskórka $\epsilon = 150$;

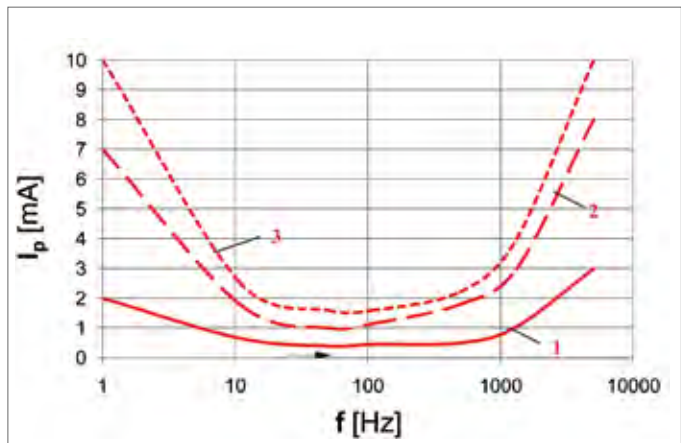
ϵ_0 – przenikalność elektryczna próżni równa $8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m.

Pojemność skóry zależnie od czynników patologicznych i fizjologicznych zmienia się od 0,0037 do 0,023 μ F/cm². Średnia pojemność skóry wynosi $C_S = 0,015$ μ F/cm².

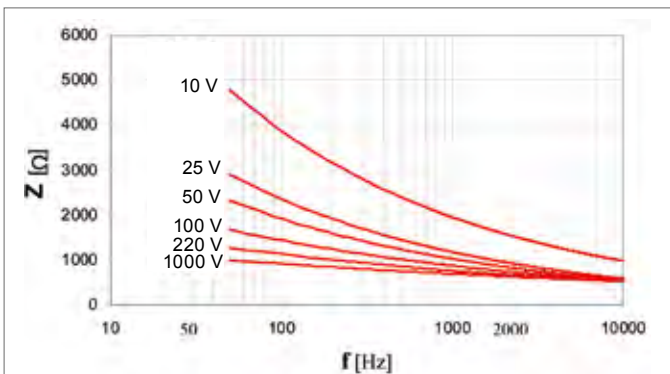
Rezystancja wewnętrzna ciała R_i jest stosunkiem chwilowej wartości napięcia rażeniowego u w początkowej chwili rażenia, do wartości szczytowej impulsu prądu rażeniowego I_{rm} .



Rys. 2. Zależność impedancji ciała człowieka (Z) od częstotliwości (f) dla napięcia dotyku 10 V i 25 V na drodze ręka-ręka (powierzchnia dotyku 8000 mm²)



Rys. 4. Zależność prądów percepcji I_p od częstotliwości: 1, 2, 3 – prawdopodobieństwo dla 0,5%; 50% i 99,5% populacji



Rys. 3. Zmiana impedancji ciała człowieka od częstotliwości prądu rażeniowego na drodze ręka-ręka

$$R_i = \frac{u}{I_{rm}}$$

gdzie:

R_i – rezystancja wewnętrzna ciała [Ω];

I_{rm} – wartość szczytowa prądu w początkowej chwili rażenia [A];

u – chwilowa wartość napięcia w początkowej chwili rażenia [V].

Bogate w elektrolity środowisko wewnątrz organizmu człowieka powoduje, że rezystancja wewnętrzna ciała posiada bardzo małą wartość w porównaniu z wartością impedancji skóry [3]. Badania organów wewnętrznych człowieka wykazały, że wartość ich reaktancji pojemnościowej jest bardzo mała i nie uwzględnia się jej.

Wpływ częstotliwości prądu rażeniowego na wartość impedancji ciała

Wartość impedancji ciała człowieka zależy nie tylko od czynników środowiskowych, ale również od napięcia rażeniowego i jego częstotliwości. Zmiana wartości impedancji ciała od częstotliwości prądu rażeniowego uzależniona jest od pojemności elektrycznej skóry człowieka.

Ciało człowieka jest zbudowane z biologicznych komórek, których wnętrze otoczone jest błoną komórkową mającą wła-

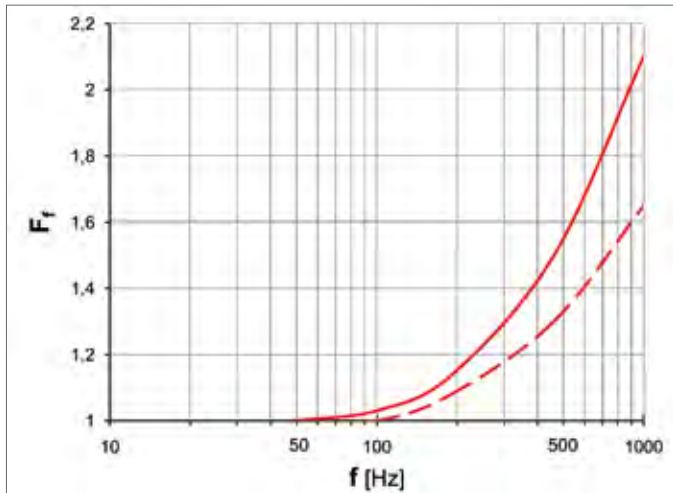
ści dielektryczne. Wewnątrz komórki znajduje się cytoplazma będąca elektrolitem, którego przewodność elektryczna zależy od koncentracji jonów. Zespół komórek można taktować jako układ kondensatorów zbudowany z elektrolitów wewnątrzkomórkowych oddzielonych od siebie warstwami błon biologicznych. Proces przewodzenia prądu elektrycznego wymusza gromadzenie jonów przy błonie, powodując jej polaryzację. Pod wpływem pola elektrycznego następuje rozdzielanie jonów zależne od częstotliwości zmian przyłożonego napięcia. Przy niskich częstotliwościach separacja jonów jest zupełna, a przewodność elektryczna mała. Jony poruszające się zgodnie z kierunkiem znaku ładunku gromadzą się przy wewnętrznej powierzchni błony komórkowej. Przy wyższych częstotliwościach rozdział jonów jest coraz mniejszy, a przewodność elektryczna wzrasta. Ze wzrostem częstotliwości napięcia rażeniowego rośnie przewodność elektryczna, a wartość impedancji ciała człowieka maleje.

Zmiany wartości impedancji ciała zależnie od częstotliwości natężenia prądu dla napięcia rażeniowego 10 V i 25 V pokazano na rys. 2. Dla wyższych napięć rażeniowych 10 V, 25 V, 50 V, 100 V, 220 V, 1000 V zmiany wartości impedancji ciała zależnie od częstotliwości prądu na drodze rażenia ręka-ręka i powierzchni dotyku 8000 mm² pokazano na rys 3. Dla częstotliwości prądu 20 000 Hz asymptota impedancji osiągnie wartość 600 Ω [1].

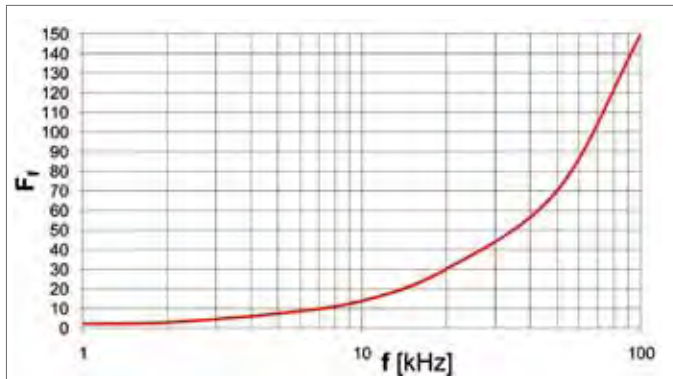
Skutki rażenia człowieka prądem o częstotliwości większej od 50 Hz

Prądy rażeniowe o wysokiej częstotliwości stanowią dla życia i zdrowia człowieka mniejsze niebezpieczeństwo niż prądy o częstotliwości przemysłowej 50–60 Hz. Działanie prądu rażeniowego o wysokiej częstotliwości nie powoduje w orga-

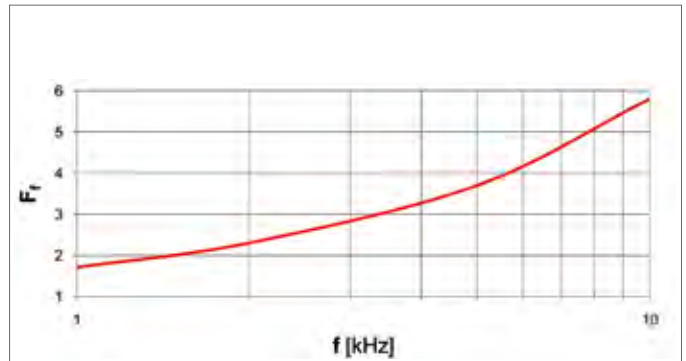
reklama



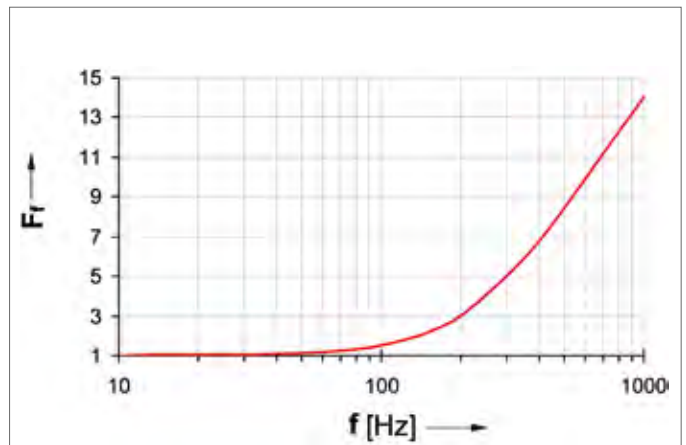
Rys. 5. Zmiany współczynnika częstotliwości F_f dla wartości prądu percepcji i samouwolnienia w zakresie zmian częstotliwości 50–1000 Hz
 — krzywa percepcji;
 - - - - krzywa samouwolnienia



Rys. 6. Zmiany współczynnika częstotliwości F_f dla wartości prądu percepcji w zakresie zmian częstotliwości 1–100 kHz



Rys. 7. Zmiany współczynnika częstotliwości F_f dla wartości progowych samouwolnienia w zakresie zmian częstotliwości 1–10 kHz



Rys. 8. Zmiany współczynnika częstotliwości F_f dla wartości prądu fibrylacji komór serca w zakresie zmian częstotliwości 50–1000 Hz

nizmie człowieka większych zmian, gdyż wymuszony ruch jonów w danym kierunku jest zbyt krótki i ciągle zmieniający się na przeciwny.

Najmniejszą wartość prądu wyczuwalną przez człowieka jako mrowienie nazywa się prądem odczuwania lub percepcji I_p . Wpływ częstotliwości napięcia rażeniowego na zmianę wartości prądu percepcji pokazano na rys. 4. Podane wartości są kwantylami prawdopodobieństwa wartości prądu percepcji mniejszej od 5%, 50% i 95% wartości zmierzonej w populacji. Dla częstotliwości napięcia rażeniowego mniejszego od 10 Hz oraz większego od 100 Hz wartość prądu percepcji wzrasta w odniesieniu do jego wartości przy częstotliwości 50 Hz. Wynika stąd, że prąd rażeniowy stały, jak też przemienny o częstotliwości mniejszej od 10 Hz oraz o częstotliwości większej od 100 Hz, jest bezpieczniejszy od prądu przemiennego 50 Hz [3].

Wartość natężenia prądu rażeniowego, przy której człowiek może się samodzielnie oderwać od elektrod, nazywa się prądem samouwolnienia. Ze wzrostem częstotliwości napięcia rażeniowego wzrastają wartości prądów wywołujących takie same skutki patologiczne jak prąd o częstotliwości 50 Hz. W celu wyznaczenia wartości progowych prądów percepcji, samouwolnienia i powodującego wystąpienia fibrylacji komór sercowych u porażonych dla napięć o częstotliwości większej od 50 Hz

stosuje się tzw. współczynnik częstotliwości F_f , który określa zależność:

$$F_f = \frac{I_{rf}}{I_{r50}}$$

gdzie:

F_f – współczynnik częstotliwości;

I_{rf} – wartość prądu rażeniowego przy częstotliwości $f > 50$ Hz;

I_{r50} – wartość prądu rażeniowego przy częstotliwości 50 Hz.

Wartości współczynnika F_f dla prądów: percepcji I_p i samouwolnienia I_s w zakresie zmian częstotliwości do 1000 Hz przedstawiono na rys. 5, natomiast dla częstotliwości wyższych pokazano na rys. 6 i 7 [1].

Wartość prądu percepcji wzrasta ze wzrostem częstotliwości napięcia rażeniowego. Przy częstotliwości 1000 Hz prąd percepcji jest dwukrotnie większy od wartości prądu o częstotliwości 50 Hz. Prąd percepcji dla napięcia rażeniowego 10 kHz wynosi ok. 6 mA, natomiast dla napięcia o częstotliwości 100 kHz wartość prądu percepcji zwiększa się do ok. 60 mA.

Wartość prądu samouwolnienia dla częstotliwości 1000 Hz jest o 1,65 razy większa od wartości prądu o częstotliwości 50 Hz. Dla napięcia rażeniowego o częstotliwości 10 kHz wartość prądu samouwolnienia wynosi ok. 55 mA [3].

Wartości współczynnika F_f dla prądu rażeniowego w zakresie częstotliwości od 50 Hz do 1000 Hz powodującego u człowieka wystąpienie fibrylacji komór serca przedstawiono na rys. 8. Przedstawiona zależność współczynnika F_f dotyczy czasu rażenia dłuższego od 1 cyklu pracy serca i drogi przepływu prądu rażeniowego od ręki do stóp człowieka [1].

Przy częstotliwościach przekraczających 100 kHz stwierdzono, że prąd rażeniowy o wartości rzędu kilkuset miliamperów powoduje uczucie narastającego ciepła w miejscach styku ciała z elektrodami. Dalszy wzrost prądu rażeniowego do wartości kilku amper powoduje oparzenia skóry.

Prąd elektryczny o wysokiej częstotliwości (10–50 MHz) wykorzystuje się do celów leczniczych. Stosowane w diatermii elektrody posiadają duże powierzchnie styczności z ciałem, aby zapewnić małą gęstość prądu i zapobiec wystąpieniu niepożądanych zmian w naskórku.

Podsumowanie

Wartość impedancji ciała człowieka jest zmienna i zależy od wartości napięcia rażeniowego oraz jego częstotliwości. Ze wzrostem częstotliwości napięcia rażeniowego rośnie przewodność elektryczna, a wartość impedancji ciała człowieka maleje. Prąd rażeniowy o wysokiej częstotliwości nie powoduje w organizmie człowieka większych zmian patologicznych, gdyż wymuszony ruch jonów w danym kierunku jest bardzo krótki i ciągle zmieniający się na przeciwny. Rażenie człowieka prądem o wysokiej częstotliwości stanowi mniejsze zagrożenie dla jego życia niż w przypadkach rażeń prądem o częstotliwości

przemysłowej 50 Hz. Rażenie ciała człowieka prądem o częstotliwości powyżej 100 kHz może powodować uraz termiczny.

Literatura

- [1] BIEGIELMEIER G., GRAISS J., MÖRX A., KIEBACK D.: Neues Wissen über die Wirkungen des elektrischen Stroms auf Menschen und Nutztiere. VEO Journal, 1995 nr 11.
- [2] GANONG W.: *Fizjologia*. PZWL, Warszawa 1994.
- [3] GIERLOTKA S.: *Elektropatologia porażen prądem*. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 2006.
- [4] GIERLOTKA S.: *Human body impedance in climatically bad conditions*. „Przegląd Elektrotechniczny” 2008 nr 11.
- [5] KORNILUK W.: *Probalistyczne metody oceny skuteczności ochrony przeciwporażeniowej w urządzeniach elektrycznych niskiego napięcia*. Rozprawy naukowe Politechniki Białostockiej 1993, nr 17.
- [6] MARKIEWICZ H.: *Bezpieczeństwo w elektroenergetyce*. WNT, Warszawa 1999.

dr hab. inż. Stefan Gierlotka – biegły sądowy do spraw wypadków porażen prądem elektrycznym oraz instalacji i urządzeń elektrycznych

artykuł recenzowany