ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2015
Seria: ORGANIZACJA I ZARZĄDZANIE z. 79 Nr kol. 1930

Adam HEYDUK, Sergiusz BORON, Jarosław JOOSTBERENS, Joachim PIELOT
Politechnika Śląska, Katedra Elektryfikacji i Automatyzacji Górnictwa
adam.heyduk@polsl.pl; sergiusz.boron@polsl.pl; jaroslaw.joostberens@polsl.pl; joachim.pielot@polsl.pl

EMPIRYCZNY MODEL IMPEDANCJI CIAŁA LUDZKIEGO NA POTRZEBY OCENY ZAGROŻENIA NIEBEZPIECZNYM DLA ZDROWIA I ŻYCIA PORAŻENIEM PRĄDEM ELEKTRYCZNYM

Streszczenie. Impedancja ciała ludzkiego jest jednym z podstawowych parametrów decydujących o wartości prądu rażeniowego, a zatem i o patofizjologicznych skutkach porażenia. Badania takiej impedancji ciała muszą być jednak prowadzone w sposób zapewniający bezpieczeństwo osób badanych. Na podstawie badań laboratoryjnych został opracowany model impedancji umożliwiający badanie przepływu prądu rażeniowego w szerokim zakresie napięć. Wyniki badań mogą zostać wykorzystane do sprecyzowania oceny zagrożeń porażeniem śmiertelnym dla konkretnej osoby w określonych warunkach środowiskowych.
Słowa kluczowe: zarządzanie bezpieczeństwem elektrycznym, zagrożenie rażeniowe, impedancja ciała człowieka

EMPIRICAL MODEL OF HUMAN BODY IMPEDANCE FOR NEEDS OF ASSESMENT OF HAZARD OF DANGEROUS TO HEALTH AND LIFE ELECTRIC SHOCK

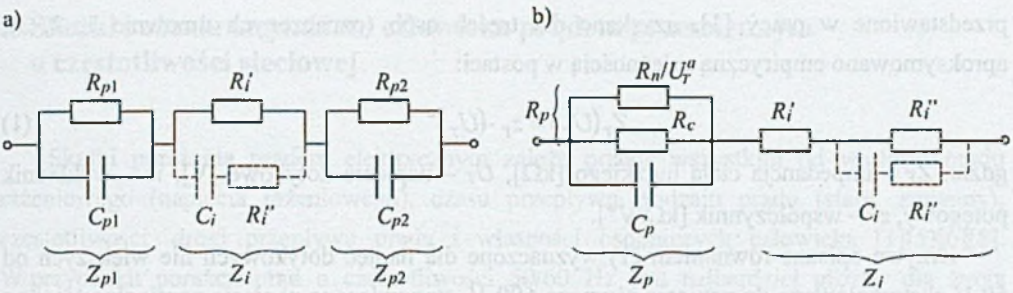
Summary. The human body impedance is one of the main factors determining the value of the body current, and therefore the pathophysiological effects of its flow. Research on the body impedance – however – must be conducted in a manner that ensures the safety of the subjects. On the basis of laboratory tests there has been developed an impedance model for measuring the body current flow throughout a wide voltage range. These test results can be used to specify a lethal electric shock risk assessment for a particular person in certain environmental conditions.
Keywords: Electrical safety management, electric shock hazard, human body impedance

1. Wprowadzenie

Współczesne instalacje elektryczne – zarówno zasilające, jak i sterownicze – składają się zwykle z dwóch podsystemów: zasilania, którego celem jest dostarczenie energii elektrycznej i zasilanie odbiorników, a w przypadku układów sterowniczych aktywacja lub dezaktywacja elementów wykonawczych, oraz ochrony, który musi gwarantować bezpieczeństwo ludzi, urządzeń i stosowanych procedur. Obydwie te funkcje (zasilająca i ochronna) powinny być realizowane na najwyższym uzasadnionym ekonomicznie poziomie. Poziom ten jest zależny od ważności sieci i zasilanych z niej odbiorników oraz wymaganego poziomu bezpieczeństwa. We współczesnych obiektach przemysłowych charakteryzujących się znaczną liczbą i różnorodnością instalacji elektrycznych i sterowniczych, od których zależy w dużym stopniu bezpieczeństwo ludzi i całego zakładu, zagadnienia bezpieczeństwa elektrycznego muszą być uwzględniane zarówno na etapie projektowania, jak i realizacji oraz eksploatacji instalacji. Na etapie projektowania brakuje jednak możliwości prowadzenia badań doświadczalnych. Prowadzi to do konieczności wykorzystania wcześniej zgromadzonej wiedzy, opartej na wynikach badań doświadczalnych prowadzonych w warunkach laboratoryjnych lub przemysłowych i zagregowanej w postaci odpowiedniego modelu (liniowego lub nieliniowego).

2. Empiryczny model impedancji ciała człowieka

W bibliografii spotyka się różne modele impedancji ciała człowieka [2][3][4][8]; jednak najczęściej przyjmowanym modelem jest model przedstawiony w raporcie IEC 479-1, a zaproponowany przez Biegelmeiera. Składa się z szeregowo połączonych impedancji skóry Z_{p1} i Z_{p2} oraz impedancji wewnętrznej Z_i. Zgodnie z elektrycznym schematem zastępczym (rys. 1a) impedancję skóry można przedstawić jako połączenie równoległe rezystancji i pojemności. Wartość impedancji skóry zależy od wartości napięcia dotykowego, częstotliwości i czasu przepływu prądu, stopnia wilgotności skóry, temperatury, typu i rodzaju skóry, powierzchni dotyku oraz nacisku przy dotyku [8]. Dla napięć dotykowych do ok. 50 V prądu przemiennego (50 Hz) wartość impedancji skóry ulega zmianie w szerokich granicach, natomiast dla napięć wyższych od 50 V impedancja skóry maleje [8]. Impedancja wewnętrzna ciała ludzkiego przy prądach rażeniowych o częstotliwości sieciowej (50 Hz) jest przedstawiana jako rezystancja, której wartość w istotny sposób jest uzależniona od drogi przepływu prądu, a w znacznie mniejszym stopniu zależy od powierzchni dotyku [7][8].



Rys. 1. Schemat zatępczy impedancji ciała człowieka: a) według G. Biegelmeiera podawany w raporcie IEC 479-1, b) zaproponowany przez W. Korniluka

Fig. 1. Human body equivalent impedance diagram a) by G. Biegelmeier according to IEC 479-1 report, b) by W. Korniluk

Źródło: Za [3][4][8].

Interesującym modelem impedancji ciała ludzkiego jest model zaproponowany przez Korniluka [3][4]. W odróżnieniu od modelu z rys. 1a w schemacie zastępczym (rys. 1b) impedancji ciała człowieka uwzględnia się jedną impedancję skóry Z_p i szeregowo z nią połączoną impedancję części wewnętrznej ciała człowieka Z_i. W modelu tym impedancja skóry jest przedstawiona jako połączenie równoległe pojemności naskórka C_p oraz dwóch rezystancji skóry – R_c, R_n. Rezystancja R_c jest stała i jej wartość jest uzależniona od wielkości elektrod (powierzchni dotyku), natomiast rezystancja R_n zależy od napięcia dotykowego (co uwidoczniono na rys. 1b). Impedancja części wewnętrznej ciała ludzkiego Z_i dla napięć dotykowych (rażeniowych) o częstotliwościach nieprzekraczających 10 kHz może być zastąpiona wypadkową rezystancją R_i [4]. Odwzorowanie impedancji części wewnętrznej ciała człowieka modelem uwzględniającym pojemność C_i (jak na rys. 1b) jest słuszne dla napięć o częstotliwościach wyższych niż 10 kHz oraz przy ocenie przebiegów prądów rażeniowych w stanach nieustalonych lub w sytuacji występowania niesinusoidalnych napięć dotykowych [4].

Przedstawione w pracy [1] wyniki pomiarów impedancji ciała człowieka, przeprowadzonych dla trzech osób, pozwalają zależność impedancji ciała człowieka od wartości napięcia dotykowego ocenić ilościowo, a nie tylko w ujęciu statystycznym, co jest szeroko opisywane w bibliografii [3][4][6][8]. Badania obejmowały pomiar impedancji ciała człowieka na drodze ręka – ręka przy dużej powierzchni dotyku (całe wewnętrzne powierzchnie dłoni) i zostały wykonane w pomieszczeniu suchym, w temperaturze 25°C. Przy prowadzonych pomiarach wartość prądu rażeniowego nie przekroczyła 4,6 mA przy prądzie przemiennym, a napięcia dotykowe ograniczono do napięcia dopuszczalnego, czyli $U_L = 50$ V. Identyfikacja modeli przedstawionych na rys. 1 jest zadaniem wysoce skomplikowanym, stąd czasem można się posłużyć zależnościami empirycznymi wiążącymi wartości impedancji ciała człowieka z wartościami napięć dotykowych. Wyniki pomiarów,

przedstawione w pracy [1], uzyskane dla trzech osób (oznaczonych umownie 1, 2, 3), aproksymowano empiryczną zależnością w postaci:

$$Z_T(U_T) = z_T \cdot (U_T)^w \tag{1}$$

gdzie: Z_T – impedancja ciała ludzkiego [kΩ], U_T – napięcie dotykowe [V], w – wykładnik potęgowy, z_T – współczynnik [kΩ/V^w].

Krzywe opisane równaniem (1) wyznaczone dla napięć dotykowych nie większych od 50 V ekstrapolowano do napięcia równego 690 V, stanowiącego napięcie nominalne sieci nn zgodne z normalizacją europejską [9]. Wartości współczynników modeli empirycznych opisanych równaniem (1) zestawiono w tabeli 1, a ekstrapolowane zależności $Z_T = f(U_T)$ przedstawiono graficznie na rys. 2.

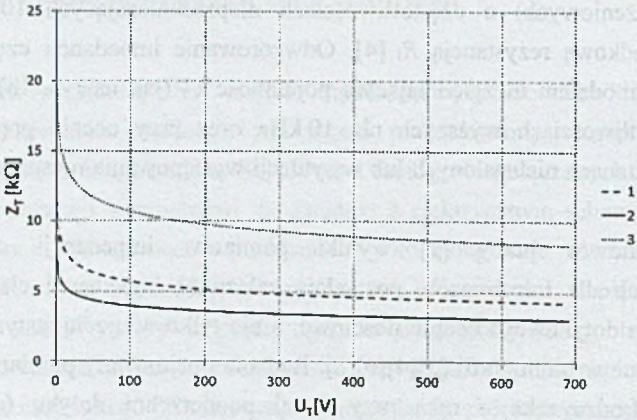
Tabela 1

Parametry modeli empirycznych zależności $Z_T = f(U_T)$ o postaci (1) wyznaczone dla trzech osób

Lp.	Osoba	z_T	w
1	1	11,459	-0,151
2	2	7,377	-0,135
3	3	19,397	-0,129

Źródło: Opracowanie własne.

Stwierdzono, że krzywe przedstawione na rysunku mają kształty zbliżone do krzywej zawartej w [2][3][4], co może świadczyć o słuszności przyjętych modeli empirycznych.



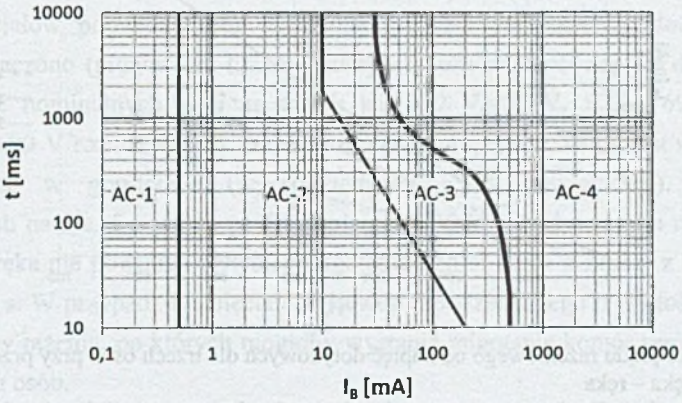
Rys. 2. Empiryczne zależności impedancji ciała człowieka na drodze ręka – ręka od napięć dotykowych dla trzech osób przy ekstrapolacji do napięcia 690 V

Fig. 2. Empirical dependencies of human body impedance on touch voltages for three persons at voltage extrapolation to 690 V

Źródło: Opracowanie własne.

3. Skutki rażenia organizmu człowieka prądem przemiennym o częstotliwości sieciowej

Skutki porażenia prądem elektrycznym zależą przede wszystkim od wartości prądu rażeniowego (napięcia rażeniowego), czasu przepływu, rodzaju prądu (stały, zmienny), częstotliwości, drogi przepływu prądu i własności osobniczych człowieka [1][5][6][8]. W przypadku porażeń prąd o częstotliwości 50/60 Hz jest najbardziej groźny dla życia człowieka. Za najczęstszą przyczynę śmierci w wyniku porażenia prądem elektrycznym uznaje się migotanie komór serca [8]. Do innych, rzadziej odnotowywanych przyczyn porażeń śmiertelnych zalicza się uduszenia i zatrzymanie akcji serca [8]. W raporcie IEC 479-1 przedstawiono strefy czasowo-prądowe skutków działania prądów przemiennych o częstotliwości od 15 Hz do 100 Hz, które stanowią kryteria bezpieczeństwa przy urządzeniach prądu przemiennego [6]. Krzywa przedstawiona na rys. 3 rozdzielająca strefy czasowo-prądowe AC-3 i AC-4 wskazuje progowe wartości prądów fibrylacji komór serca z odpowiednim stopniem prawdopodobieństwa [6]. W raporcie IEC 479-1 w strefie AC-4 wykreślono krzywe c_1, c_2, c_3 (o kształcie zbliżonym do krzywej rozdzielającej strefy AC-3 i AC-4) wyodrębniające obszary w strefie czasowo-prądowej AC-4, określające wystąpienia migotania komór serca z odpowiednim stopniem prawdopodobieństwa (5%, 50%, >50%). Przyjmuje się, że wartości wywołujące migotanie komór serca dla krótkich czasów rażenia (10÷100 ms) to 400÷500 mA, a dla czasów rażenia przekraczających 1 s to 40÷50 mA [8].



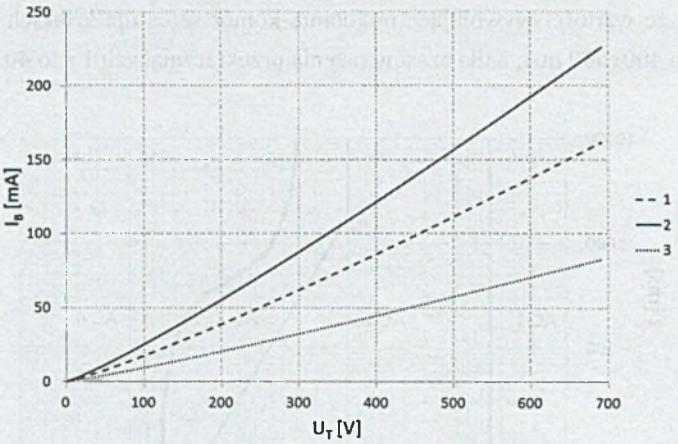
Rys. 3. Strefy czasowo-prądowe skutków działania prądów przemiennych o częstotliwości z zakresu od 15 Hz do 100 Hz na drodze przepływu prądu rażeniowego lewa ręka – obie stopy

Fig. 3. Time/current zones of effects of AC currents (15 Hz to 100 Hz) on persons

Źródło: Za IEC Technical Report 479-1 Effects of current on human beings and livestock, Part 1: General aspect.

4. Ocena zagrożenia porażenia prądem elektrycznym o częstotliwości sieciowej niebezpiecznego dla zdrowia i życia

Na podstawie uzyskanych empirycznych modeli impedancji ciała człowieka postaci (1) i parametrach zestawionych w tabeli 1 możliwe jest wyznaczenie wartości prądów rażeniowych przy różnych napięciach dotykowych spodziewanych na drodze ręka – ręka w odniesieniu do konkretnej osoby. Zależność prądów rażeniowych płynących na drodze ręka – ręka od napięcia dotykowego zilustrowano na rys. 4. Jak widać na tym rysunku, wartości prądu rażeniowego rosną nieliniowo wraz ze wzrostem napięcia dotykowego, a różnice pomiędzy wartościami dla trzech osób przy tych samych napięciach wynikają z osobniczych właściwości osób badanych, a więc różnej wartości impedancji na drodze ręka – ręka. Wyznaczone zależności prądu rażeniowego od napięcia dotykowego mogą być wykorzystane do określenia maksymalnego czasu przepływu prądu rażeniowego na drodze ręka – ręka, który nie spowoduje u osoby rażonej skutków zagrażających życiu, czyli nie wystąpi migotanie komór serca. Znając wartości maksymalnego czasu rażenia oraz wartości prądu, można określić funkcję opisującą zależność spodziewanych napięć dotykowych od maksymalnych czasów rażenia. Do tego celu można wykorzystać krzywą przedstawioną na rys. 3.



Rys. 4. Zależność prądu rażeniowego od napięć dotykowych dla trzech osób przy przepływie prądu na drodze ręka – ręka

Fig. 4. Dependencies of body current on touch voltages for three persons at hand-to-hand current flow

Źródło: Opracowanie własne.

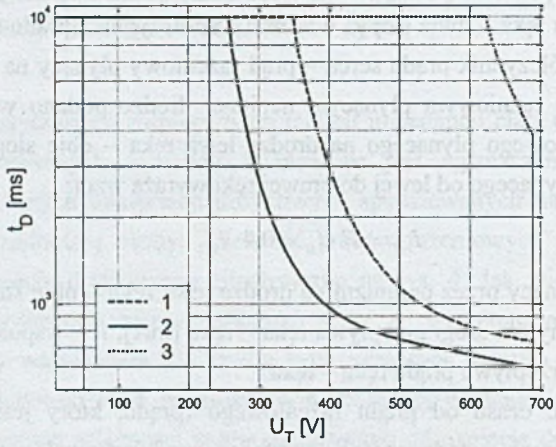
W strefie czasowo-prądowej AC-4, powyżej krzywej reprezentującej granicę między strefami AC-3 i AC-4, rażenie prądem może skutkować zatrzymaniem pracy serca, oddychania, oparzeniami, a przede wszystkim wzrasta prawdopodobieństwo migotania komór serca. Z uwagi na fakt, iż strefy czasowo-prądowe określono dla drogi przepływu lewa ręka – dwie stopy, należy zastosować współczynnik prądu serca w celu przeliczenia prądów

rażeniowych wyznaczonych dla drogi ręka – ręka na równoważny (pod względem skutków przepływu) prąd lewa ręka – dwie stopy. Wartości współczynnika prądu serca oraz równanie wiążące – przez współczynnik prądu serca – prąd rażeniowy płynący na drodze lewa ręka – obie stopy z prądem rażniowym płynącym na innej drodze podano w [8]. Obliczeniową wartość prądu rażeniowego płynącego na drodze lewa ręka – obie stopy przy znajomości prądu rażeniowego płynącego od lewej do prawej ręki wyraża wzór:

$$I_{ref} = F \cdot I_B = 0{,}4 \cdot I_B \tag{2}$$

gdzie: I_{ref} – prąd płynący przez organizm na drodze lewa ręka – obie stopy [mA], I_B – prąd rażeniowy wyznaczony dla drogi przepływu ręka – ręka [mA], F – współczynnik prądu serca równy 0,4 dla drogi przepływu prądu ręka – ręka.

Znając zależność czasu od prądu rażeniowego (prądu, który jeszcze nie powoduje migotania komór serca) i jednocześnie wartości spodziewanych prądów rażeniowych w konkretnej instalacji i sytuacji wypadkowej, można opracować zależność maksymalnego czasu rażenia t_D od napięć dotykowych U_T dla konkretnej osoby. Wyznaczone zależności maksymalnego czasu rażenia od spodziewanych napięć dotykowych przedstawiono graficznie na rys. 5. Z uwagi na duże powierzchnie dotyku podczas przeprowadzonych pomiarów przy opracowaniu zależności $t_D = f(U_T)$ dla trzech osób nie uwzględniono (zgodnie z [8]) zmian skóry ludzkiej od gęstości prądu i czasu przepływu prądu. Krzywe przedstawione na rys. 5 pozwalają wyznaczyć wartości czasów rażenia, które jeszcze nie spowodują migotania komór serca, a więc zagrożenia życia, w sytuacji wystąpienia rażenia wynikającego z dotknięcia przez konkretną osobę dwóch elementów o różnym potencjale obiema dłońmi, przy czym różnica potencjałów pomiędzy tymi elementami równa jest napięciu dotykowemu U_T. Na rys. 5 zaznaczono (pionowymi liniami przerywanymi) wartości napięć: dopuszczalnego U_L oraz napięć nominalnych sieci nn takich jak 230 V/400 V, 500V, 690 V. Napięcia 230 V/400 V, 690 V rozważono jak znormalizowane europejskie, natomiast napięcie 500 V jako stosowane w górnictwie (w podziemiach i na powierzchni). Z krzywych przedstawionych na rys. 5 wynika, że dla napięć do 230 V przepływ prądu rażeniowego na drodze ręka – ręka nie powinien wywołać migotania komór serca u żadnej z badanych osób w czasie do 10 s. W przypadku napięcia dotykowego spodziewanego o wartości większej od ok. 250 V czasy rażenia, po których mogłoby wystąpić migotanie komór serca, są różne dla poszczególnych osób.



Rys. 5. Przybliżona zależność maksymalnego czasu rażenia od spodziewanych napięć dotykowych dla drogi przepływu prądu rażeniowego ręka – ręka dla trzech osób

Fig. 5. Approximate dependency of maximum duration of current flow on expected touch voltages for hand–to–hand current flow for three persons

Źródło: Opracowanie własne.

Tabela 2

Wartości maksymalnych czasów rażenia t_D w zależności od spodziewanych napięć dotykowych równych wybranym napięciom nominalnym sieci, wyznaczone dla trzech badanych osób

Lp.	Osoba					
	1		2		3	
	U_n [V]	t_D [s]	U_n [V]	t_D [s]	U_n [V]	t_D [s]
1	50	≤10,00	50	≤10,0	50	≤10,0
2	230	≤10,00	230	≤10,0	230	≤10,0
3	400	3,00	400	0,97	400	≤10,0
4	500	1,14	500	0,75	500	≤10,0
5	690	0,74	690	0,60	690	3,87

Źródło: Opracowanie własne.

Wartości maksymalnych czasów rażenia obliczonych dla poszczególnych osób przy wybranych wartościach napięć nominalnych sieci zestawiono w tabeli 2. Oceniając powyższe wyniki, należy podkreślić, że krzywe prezentowane na rys. 4 i 5 nie uwzględniają rozmiarów innych skutków patofizjologicznych (skurcze mięśni, trudności w oddychaniu, wzrost ciśnienia krwi, zatrzymanie akcji serca bez migotania komór serca, oparzenia), które mogą wystąpić podczas rażenia, w szczególności przy przepływach prądu rażeniowego o czasie dłuższym niż 1 s. Jednak w przypadku czasów rażenia dłuższych niż 2 s, uwzględniając współczynnik prądu serca $F = 0{,}4$, a więc wartości prądów rażeniowych większych niż 25 mA (ale w granicach wartości prądów obejmujących strefę czasowo-prądową AC-3), co dla poszczególnych badanych osób odpowiada napięciom dotykowym >135 V(1), >100 V(2),

>240 V(3), można stwierdzić, że występuje ryzyko pojawienia się skutków fizjologicznych utożsamianych ze strefą AC-3 (rys. 3). Możliwe jest zatem wystąpienie skurczu mięśni, trudności w oddychaniu, a nawet migotania przedsionków i przejściowego zatrzymania pracy serca [8]. Z kolei dla czasów rażenia powyżej 0,6 s i prądów rażeniowych większych niż (25÷50 mA), ale nie większych niż wartości wynikające z krzywej opisującej wartości progowe prądów fibrylacji komór serca (dostosowanej do drogi przepływu prądu rażeniowego ręka – ręka), wzrasta ryzyko zatrzymania oddychania i pracy serca oraz wystąpienia oparzeń. Taka sytuacja dla poszczególnych badanych osób może wystąpić np. dla czasu rażenia większego niż 0,6 s i prądu rażeniowego 50 mA, co odpowiada napięciom dotykowym >250 V(1), >180 V(2), >440 V(3).

5. Podsumowanie

Kompleksowe zarządzanie bezpieczeństwem elektrycznym wymaga stosowania metod umożliwiających ocenę skuteczności stosowanych procedur oraz środków ochrony. Przedstawiony w artykule model impedancji ciała ludzkiego może być dogodnym narzędziem analizy i wyboru wymagań dotyczących zarządzania bezpieczeństwem elektrycznym w warunkach przemysłowych. Został on stworzony na podstawie wyników badań empirycznych przeprowadzonych na grupie trzech osób. Nieliniowość modelu umożliwia stosowanie go w szerokim zakresie napięć (zarówno w obwodach sterowniczych, jak i w obwodach zasilających). Przeprowadzone badania wykazały zasadniczą zgodność z wynikami przedstawionymi w raporcie IEC 479-1, ukazując jednak znaczące zróżnicowanie pomiędzy poszczególnymi osobami. Przeprowadzone obliczenia pozwoliły na uzyskanie bezpośrednich (dotychczas niepublikowanych) zależności wiążących maksymalny czas rażenia i występujące w układzie napięcie dotykowe. Podstawowym kryterium było tu zjawisko fibrylacji serca, zwrócono jednak również uwagę na inne skutki patofizjologiczne. Otrzymane wyniki odniesiono do szeregu napięć znamionowych stosowanych w Unii Europejskiej oraz w polskim górnictwie (w sieciach dołowych i powierzchniowych).

Bibliografia

1. Boron S., Heyduk A., Joostberens J., Pielot J.: Wyniki eksperymentalnego wyznaczania impedancji ciała człowieka. XV Krajowa Konferencja Elektryki Górniczej, Szczyrk, 24-26.09.2014, s. 269-274.
2. Gierlotka S.: Metody badań impedancji ciała człowieka. Wiadomości Elektrotechniczne, nr 8, 2011, s. 18-20.

3. Korniluk W.: Probabilistyczne metody oceny skuteczności ochrony przeciwporażeniowej w urządzeniach elektrycznych niskiego napięcia. Wyd. Politechniki Białostockiej, Białystok 1993.
4. Korniluk W., Sajewicz D.: Probabilistyczny model impedancji ciała ludzkiego. Wiadomości Elektrotechniczne, nr 12, 2006, s. 23-29.
5. Markiewicz H.: Zagrożenia i ochrona od porażeń w instalacjach elektrycznych. WNT, Warszawa 2000.
6. Musiał E.: Zagrożenia pochodzące od urządzeń elektrycznych. Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 1992.
7. Saferna J. (red.): Porażenia i oparzenia prądem i łukiem elektrycznym. Etiologia i pomoc przedlekarska. WNT, Warszawa 1993.
8. IEC Technical Report 479-1:1994 Effects of current on human beings and livestock, Part 1: General aspect.
9. PN-EN 50160:2008 Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych (oryg.)

Abstract

The human body impedance is one of the most important factors determining the value of the body current, and therefore the pathophysiological effects of its flow. Research on the body impedance – however – must be conducted in a manner that ensures the safety of the subjects. On the basis of laboratory tests there has been developed an impedance model for measuring the body current flow throughout a wide voltage range. These test results can be used to specify a lethal electric shock risk assessment for a particular person in certain environmental conditions. Nonlinear model structure makes possible to use this model in wide voltage range (both control and power supply networks). The results are generally compatible to IEC 479-1 report, but there have been also noticed significant differences between particular persons. There have been calculated (non-published before) direct dependencies of maximum duration of current flow on available touch voltage. These dependencies have been based on probability of ventricular fibrillation, but other pathophysiological effects have been also taken into consideration.