

NAPIĘCIOWE KRYTERIA SKUTECZNOŚCI OCHRONY PRZECIWPORAŻENIOWEJ PRZY USZKODZENIU W LINIACH ORAZ INSTALACJACH ELEKTRYCZNYCH NISKIEGO I WYSOKIEGO NAPIĘCIA

1. Wstęp

Współczynnik wypadków śmiertelnych porażen elektrycznych (liczba porażen śmiertelnych na 1 milion ludności w ciągu roku) w Polsce wprawdzie zmniejsza się od kilkunastu lat, ale jest wciąż znacznie większy od takich współczynników podawanych w rozwiniętych krajach zachodniej Europy. Np. wartość takiego współczynnika jest w Polsce, od wielu lat, około trzykrotnie większa od wartości notowanej w Niemczech. Główną przyczyną takiej sytuacji w Polsce jest brak odpowiedniego uświadomienia osób postronnych, jakie mogą być skutki niewłaściwego zachowania się przy obiektach i urządzeniach elektroenergetycznych. Osoby te często są przekonane, że techniczne środki ochrony przeciwporażeniowej powinny im zapewnić stu-procentowe bezpieczeństwo. Warto tym osobom przytaczać definicje terminu „bezpieczeństwo” podaną w normie PN-EN 45020 „Normalizacja i dziedziny związane – Terminologia [5]: „**bezpieczeństwo – brak nieakceptowanego ryzyka szkód**”. Akceptowane ryzyko w zakresie bezpieczeństwa elektrycznego jest osiąganym przez zastosowanie odpowiednich technicznych środków oraz stosowanie wymagań dotyczących prawidłowego użytkowania urządzeń elektrycznych.

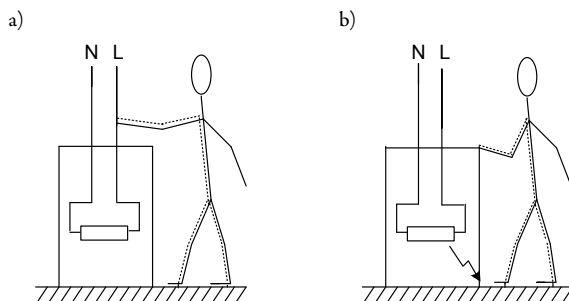
Osoby postronne, ale i wielu elektryków nie wie, jakie akceptowalne ryzyko porażenia przyjęte zostało przy ustalaniu napięciowych kryteriów skuteczności środków technicznych ochrony przy dotyku pośrednim oraz że ryzyko to przyjęte inne dla urządzeń niskiego i wysokiego napięcia. Świadczy o tym chociażby pisemna propozycja (skierowana w 2013 r. do autorów nowelizowanej normy dotyczącej ochrony przeciwporażeniowej w liniach niskiego napięcia), aby w liniach niskiego napięcia zastosować kryteria ochrony przy uszkodzeniu wymagane przez normę PN-EN 50341 [6] dotyczącą linii wysokiego napięcia. Osoba ta była przekonana, że największe dopuszczalne długotrwałe napięcie dotykowe rażeniowe U_{Tp} w urządzeniach wysokiego napięcia ($U > 1$ kV) powinno być mniejsze (stawiające ostrzejsze wymagania) od największego dopuszczalnego napięcia dotykowego spodziewanego U_1 przyjętego w normie dotyczącej linii niskiego napięcia ($U \leq 1$ kV). W swoim piśmie osoba ta napisała: „Przecież nie może być tak, że norma dla linii do 1 kV w zakresie od porażen będzie stawiała ostrzejsze wymagania niż norma dla linii powyżej 1 kV”. Autor tego zdania to elektryk na stanowisku specjalisty w dużym zakładzie elektroenergetycznym. Dlatego warto wyjaśnić dlaczego ta wypowiedź jest błędna.

W niniejszym artykule zostały przytoczone zasady tworzenia kryteriów napięciowych skuteczności ochrony przy uszkodzeniach (przy dotyku pośrednim) w liniach oraz instalacjach niskiego i wysokiego napięcia.

2. Rażenia prądem elektrycznym i ich skutki

Rażenie elektryczne następuje, gdy człowiek dotknie jednocześnie dwóch części o różnych potencjałach elektrycznych i przez jego ciało płynie prąd elektryczny. Najczęściej rażenie rozpatruje się na drodze ręka (ręce) – stopy lub ręka – ręka. Rozróżnia się przy tym rażenie przy dotyku bezpośrednim i pośrednim.

Rażenie prądem elektrycznym przy dotyku pośrednim i bezpośrednim na drodze ręka – stopy przedstawione są na rysunku 1.

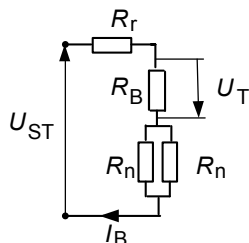


Rys. 1. Rażenie: a) przy dotyku bezpośrednim, b) przy dotyku pośrednim

Rażenie przy dotyku bezpośrednim na drodze ręka – stopy to rażenie przez dotknięcie części czynnej, czyli części będącej w czasie normalnej pracy urządzenia pod napięciem spowodowane dotknięciem żyły przewodu o uszkodzonej izolacji, lub spowodowane dotknięciem części czynnej wewnątrz urządzenia podczas nieostrożnej pracy pod napięciem lub na skutek uszkodzenia obudowy urządzenia.

Rażenie przy dotyku pośrednim na drodze ręka – stopy to rażenie przez dotknięcie części przewodzącej dostępnej, czyli części, która w czasie normalnej pracy urządzenia nie znajduje się pod napięciem, a na której napięcie pojawiło się na skutek uszkodzenia izolacji roboczej urządzenia.

Na rysunku 2 przedstawiony jest schemat elektryczny obwodu rażeniowego na drodze ręka – stopy.

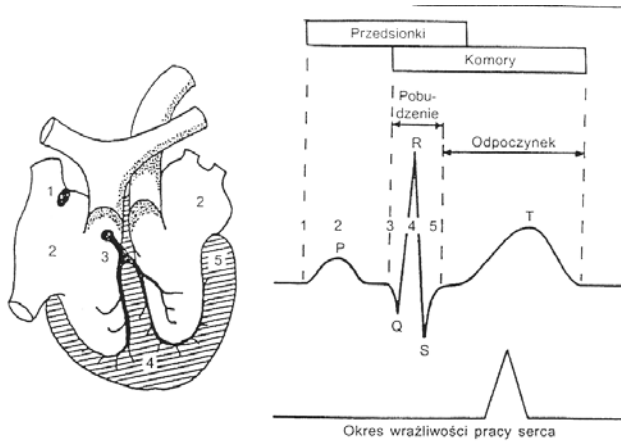


Rys. 2. Schemat elektryczny obwodu rażeniowego. Oznaczenia: U_{ST} – napięcie dotykowe spodziewane, U_T – napięcie dotykowe rażeniowe, I_B – prąd rażeniowy, R_B – rezystancja ciała człowieka (Z_T), R_r – rezystancja przejścia między dłońią a częścią dotykana, R_n – rezystancja przejścia między stopą a stanowiskiem

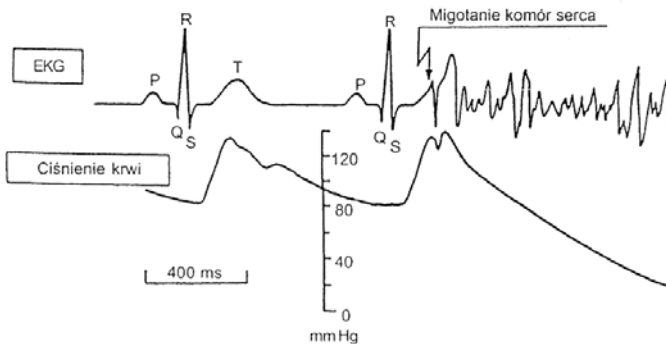
Odczuwalne skutki rażenia prądem elektrycznym to:

- ból i skurcze mięśni, co może prowadzić do uniemożliwienia samowolnienia,
- zaburzenia krążenia krwi, oddechu, funkcjonowania zmysłów wzroku, słuchu i utrzymania równowagi,
- oparzenia skóry i organów wewnętrznych,
- elektroliza krwi i płynów ustrojowych,
- utrata przytomności,
- migotanie komór serca (fibrylacja), zazwyczaj prowadzące do śmierci.

Na rysunku 3 przedstawiony jest zapis EKG zdrowego człowieka, a na rysunku 4 – w czasie migotania komór serca.



Rys. 3. Budowa serca oraz przebieg jednego cyklu



Rys. 4. Przebieg zjawiska migotania komór serca EKG. Numery określają kolejne stadia rozprzestrzeniania się pobudzenia [1] w okresie wrażliwości. Skutki wykazane przez elektrokardiogram (EKG) i pomiar ciśnienia krwi [1]

Odczuwalne skutki rażenia człowieka prądem elektrycznym mogą nie wywoływać skutków patofizjologicznych (nie zagrażać zdrowiu i życiu człowieka) albo wywoływać takie skutki. Rażenia wywołujące skutki patofizjologiczne nazywa się **porażeniem elektrycznym**.

Należy też zwrócić uwagę, że nawet rażenia, przy których prąd rażeniowy nie wywołuje skutków patofizjologicznych mogą spowodować pośrednio zagrożenia zdrowia i życia osoby rażonej. Mogą w takich przypadkach wystąpić:

- urazy mechaniczne ciała w wyniku upuszczenia trzymanego przedmiotu,
- upadki z wysokości,
- oparzenia spowodowane oddziaływaniem termicznym elementów nagranych wskutek przepływu prądu zwarciovego,
- pożary,
- skutki oddziaływania łuku elektrycznego.

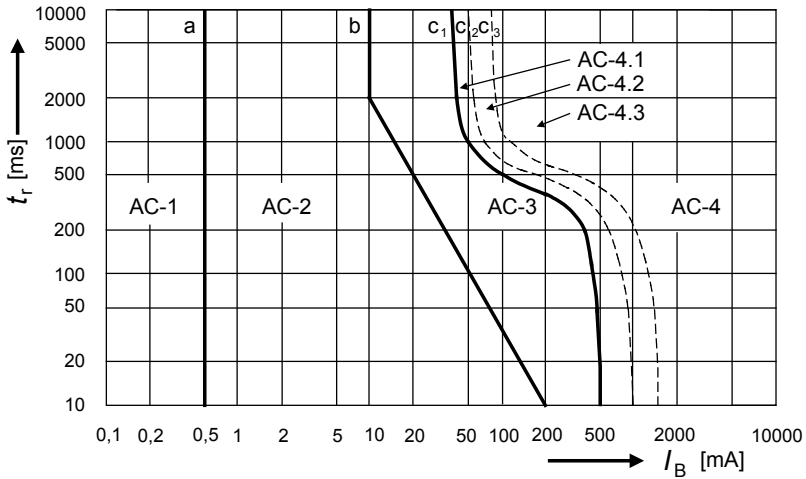
Skutek działania prądu elektrycznego na ciało człowieka zależy od:

- natężenia prądu rażeniowego,
- czasu przepływu prądu rażeniowego,
- drogi przepływu prądu przez ciało człowieka,
- rodzaju prądu rażeniowego (prąd przemienny, impulsy prądowe, prąd stały, częstotliwość prądu przemiennego),
- stanu psychofizycznego porażonego.

Skutki fizjologiczne działania prądu elektrycznego na organizm ludzki badane są od początkowych lat XX wieku. Wyniki tych badań są ogłaszane w raporcie technicznym typu 2 wydawanym przez Międzynarodową Komisję Elektrotechniczną (IEC/TR2 60479-1 [1]) pt. „Skutki działania prądu na ludzi i zwierzęta domowe”. Autorzy raportu IEC rozpatrywali prądy rażeniowe w zakresie od dziesiątych części miliampera do kilku amperów, tzn. prądy, które mogą wystąpić w sieciach i instalacjach niskiego napięcia. Powinny one być brane pod uwagę również w sieciach i instalacjach wysokiego napięcia w tych przypadkach, w których prąd rażeniowy jest jedynie niewielką częścią prądu uszkodzenia doziemnego. Wyniki badań zawarte w tym raporcie są podstawą kryteriów skuteczności ochrony przeciwporażeniowej zamieszczonych w aktualnych polskich normach (tłumaczeniach norm międzynarodowych i europejskich). Raport ten doczekał się nowej wersji [2], ale zmiany interpretacji badań są niewielkie i będą uwzględnione w polskich normach dopiero za kilka lat.

W raporcie [1] są podane wyniki badań skutków rażeń prądem przemiennym (a.c.), jak i prądem stałym (d.c.). Poniżej będą omówione skutki rażenia prądem przemiennym.

Strefy czasowo-prądowe skutków fizjologicznych prądów rażeniowych przemiennych o wartości do 10 A i częstotliwości od 15 do 100 Hz, płynących na drodze lewa ręka – obie stopy są przedstawione poniżej na rysunku 5 i w tablicy 1.



Rys. 5. Strefy czasowo-prądowe skutków fizjologicznych prądów rażeniowych przemiennych o wartości do 10 A i częstotliwości od 15 do 100 Hz, płynących na drodze lewa ręka – obie stopy. Oznaczenia granic stref: a – próg odczuwania i reakcji, b – granica samouwolnienia, c – próg fibrylacji komór serca [1]

Tablica 1. Rażenie prądem i skutki fizjologiczne przepływu prądu przemiennego przez ciało człowieka w strefach czasowo-prądowych przedstawionych na rysunku 5 [1]

Oznaczenie strefy	Granice strefy	Skutki rażenia prądem elektrycznym
AC – 1	< a	Zwykle brak reakcji.
AC – 2	a do b ¹⁾	Zwykle brak szkodliwych skutków fizjologicznych.
AC – 3	b do c ₁	Zwykle brak uszkodzeń organicznych. Prawdopodobieństwo pojawienia się skurczów mięśni i trudności w oddychaniu przy czasach rażenia dłuższych od 2 s. Odwracalne zakłócenia przy powstawaniu bodźców i pobudzeniu serca. Możliwość powstawania przejściowego migotania przedsionków serca i przejściowego zatrzymania pracy serca (zakłócenia wzrastające wraz ze wzrostem prądu).
AC – 4	> c ₁	Niebezpieczeństwo wystąpienia skutków patofizjologicznych takich jak: zatrzymanie pracy serca, zatrzymanie oddechu, poważne oparzenia (niebezpieczeństwo rośnie wraz ze wzrostem prądu).
AC – 4.1	c ₁ do c ₂	Prawdopodobieństwo migotania komór serca wzrasta do ok. 5%.
AC – 4.2	c ₂ do c ₃	Prawdopodobieństwo migotania komór serca wzrasta od ok. 5–50%.
AC – 4.3	> c ₃	Prawdopodobieństwo migotania komór serca wzrasta powyżej 50%.

1) Dla czasów rażenia krótszych od 10 ms linia graniczna b ma stałą wartość 200 mA.

Przy prądach rażeniowych większych od podanych na rysunku 5, fibrylacja komór sercowych może nie wystąpić lub może być przejściowa.

Większe prądy mają zdolność defibrylacji serca. Prądy o wartości kilku amperów w czasie dłuższym od 1 s oraz prądy większe, rażąc w krótszym czasie, mogą wywołać groźne dla zdrowia, a nawet życia **skutki elektrotermiczne i elektrochemiczne**. Skutki elektrotermiczne prowadzą do głębokich oparzeń i spaleń, zaś skutki elektrochemiczne najczęściej objawiają się niewydolnością nerek.

3. Czynniki uwzględniane przy ustalaniu kryteriów zagrożenia porażeniowego

Na podstawie informacji zawartych w raporcie IEC/TR2 60479-1 [1] można stwierdzić, że **przy ustalaniu kryteriów bezpieczeństwa elektrycznego należy brać pod uwagę:**

- **skutki rażenia prądem** ludzi i zwierzęta domowe,
- **prawdopodobieństwo uszkodzenia** (izolacji), w wyniku którego może nastąpić zagrożenie porażenia (wystąpienia niedopuszczalnych skutków),
- **prawdopodobieństwa dotyku** części znajdujących się pod niebezpiecznym napięciem dotykowym spodziewanym,
- **stosunek napięcia dotykowego spodziewanego do napięcia dotykowego rażeniowego** (na podstawie tego stosunku można ocenić czy w obwodzie rażeniowym występują dodatkowe opory zmniejszające prąd rażeniowy),
- **kwalifikacje elektryczne osób** mających styczność z instalacjami lub liniami elektroenergetycznymi,
- **możliwości techniczne** wykonania ochrony przed zagrożeniami,
- **możliwości ekonomiczne** wykonania ochrony przed zagrożeniami.

Łatwo zauważyć, że kryteria bezpieczeństwa przy urządzeniach elektrycznych niskiego i wysokiego napięcia mogą być inne, gdyż inne mogą być prawdopodobieństwa uszkodzenia, dotyku części stwarzających zagrożenie i inne stosunki napięć dotykowych spodziewanych do napięć dotykowych rażeniowych.

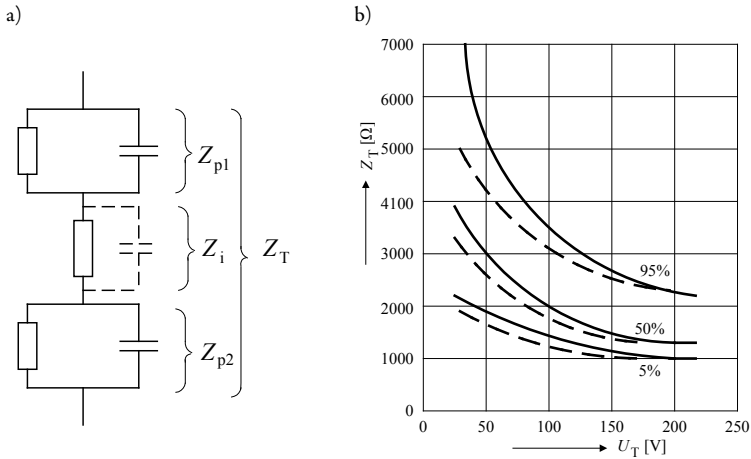
4. Impedancja ciała człowieka

W praktyce łatwiej jest posługiwać się dopuszczalnymi napięciami dotykowymi (spodziewanymi U_{ST} lub rażeniowymi U_T) niż dopuszczalnymi prądami rażeniowymi. Dla wyznaczenia tych dopuszczalnych napięć potrzebna jest znajomość oporu (impedancji) ciała człowieka.

Opór całkowity człowieka na drodze rażenia Z_T (Z_B) to szeregowo połączone impedancje: impedancja skóry Z_{p1} , impedancja wewnętrzna ciała Z_i oraz impedancja skóry Z_{p2} . W skład impedancji skóry wchodzi połączone równoległe rezystancja i pojemność. Schemat elektryczny impedancji ciała człowieka oraz wartości statystyczne impedancji ciała człowieka przedstawiono na rysunku 6.

Opór ciała człowieka zależy od wartości przyłożonego do ciała napięcia, częstotliwości prądu, stanu wilgotności skóry, drogi przepływu prądu przez ciało, powierzchni elektrod przylegających do ciała oraz siły docisku elektrod.

W tablicy 2 są zestawione wartości impedancji ciała człowieka Z_T (wartości statystyczne) przy przepływie prądu przemiennego 50/60 Hz na drodze ręka – ręka i przy dużej powierzchni dotyku (5000 mm^2 do 10000 mm^2) w warunkach suchych.



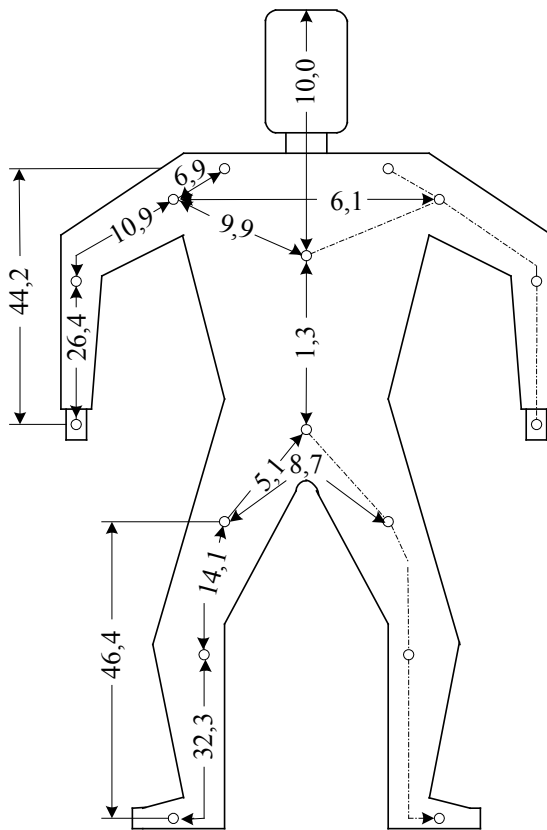
Rys. 6. Impedancja ciała człowieka: a) schemat elektryczny, b) impedancja Z_T na drodze ręka – ręka lub ręka – stopa dla prądu przemiennego (linie ciągłe) i prądu stałego (linie przerywane) w zależności od wartości napięcia przyłożonego do obwodu rażeniowego i prawdopodobieństwa wystąpienia wartości mniejszej. Oznaczenia: Z_{p1} , Z_{p2} – impedancja skóry, Z_i – impedancja wewnętrzna, Z_T – impedancja całkowita [1]

Tablica 2. Impedancja ciała człowieka Z_T przy przepływie prądu przemiennego na drodze ręka – ręka [1]

Napięcie dotykowe V	Wartości Z_T (Ω) przy których prawdopodobieństwo wystąpienia wartości mniejszych wynosi		
	5% populacji	50% populacji	95% populacji
25	1750	3250	6100
50	1450	2625	4375
75	1250	2200	3500
100	1200	1875	3200
125	1125	1625	2875
220	1000	1350	2125
700	750	1100	1550
1000	700	1050	1500
Wartość asymptotyczna	650	750	850

Uwaga: niektóre pomiary wykazują, że impedancja całkowita ciała człowieka przy przepływie prądu na drodze ręka – stopa jest niższa niż dla przepływu prądu na drodze ręka – ręka (10% – 30%)

Na rysunku 7 Przedstawiony jest procentowy rozkład impedancji wewnętrznej ciała ludzkiego przy przepływie prądu dotykowego (rażeniowego) na drodze ręka – dwie stopy. Na tym ostatnim rysunku zaznaczono wartości procentowe impedancji przypadające na kończynę górną i dolną.



Rys. 7. Procentowy rozkład impedancji wewnętrznej ciała ludzkiego [1]

Przyjmując, że impedancji na drodze ręka – ręka lub ręka – stopa wynosi 100%, to impedancja ciała człowieka na drodze:

- ręka – dwie stopy wynosi około 75%,
- ręka – ręka lub dwie ręce – dwie stopy wynosi około 50%,
- dwie ręce – tułów wynosi około 25%.

5. Podstawowe kryterium skuteczności ochrony przeciwporażeniowej w instalacjach i liniach niskiego napięcia

Przy ustalaniu kryteriów zagrożenia porażeniowego w instalacjach i liniach niskiego (i wysokiego) napięcia przyjęto, że to czy nastąpi rażenie i czy skutki rażenia nie okażą się groźne dla zdrowia i życia człowieka, zależy głównie od:

- **prawdopodobieństwa znalezienia się człowieka pod napięciem, w wyniku którego nastąpi porażenie,**
- **parametrów prądu rażeniowego** (głównie: wartości, czasu i drogi przepływu oraz jej impedancji).

W praktyce przyjmuje się, że wymienione wyżej prawdopodobieństwo rażenia zależy od:

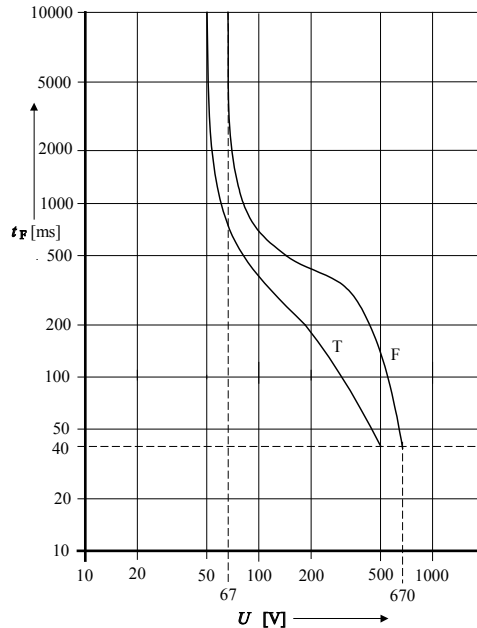
- sposób użytkowania odbiorników elektrycznych,
- kwalifikacje osób użytkujących instalacje i odbiorniki elektryczne,
- styczność ludzi z potencjałem ziemi.

Od ochrony przeciwporażeniowej w warunkach normalnych pracy instalacji i linii wymaga się, aby niebezpieczne części czynne były odpowiednio osłonięte albo umieszczone na odpowiedniej wysokości (były niedostępne).

Ochronę przy uszkodzeniu uznaje się za skuteczną, jeżeli napięcia dotykowe spodziewane U_{ST} nie przekroczą wartości dopuszczalnych U_{STp}

$$U_{ST} \leq U_{STp} \quad (1)$$

Zależność największych dopuszczalnych napięć dotykowych spodziewanych U_{ST} od czasu rażenia, przy uwzględnieniu prawdopodobnych wahań napięcia w sieci, przedstawia na rysunku 8 krzywa T.



Rys. 8. Największe dopuszczalne napięcia dotykowe spodziewane U_{STp} (krzywa T) w zależności od czasu trwania zwarcia doziemnego t_F w instalacjach niskiego napięcia [9]

Należy przy tym pamiętać, że w układach TN niebezpieczne napięcie dotykowe spodziewane może pojawić się w obwodzie nieuszkodzonym na skutek przeniesienia takiego napięcia przewodami ochronnymi z obwodu uszkodzonego; aby uniknąć takich zagrożeń, wymagane jest wykonywanie w określonych przypadkach połączeń wyrównawczych oraz uziemień.

Dla warunków normalnego zagrożenia porażeniowego przyjęto, że przy ustalaniu zależności największych dopuszczalnych napięć dotykowych U_{STp} czasu rażenia t_F w urządzeniach niskiego napięcia należy brać pod uwagę:

- graniczne prądy rażeniowe nie wywołujące fibrylacji komórek sercowych – krzywa c_1 przedstawiona na rysunku 5,
- impedancja obwodu rażeniowego Z_1 obliczoną z zależności:

$$Z_1 = 1000 + 0,5Z_{T5\%}, \quad (2)$$

w której liczba 1000 to przyjęta rezystancja obuwia i stanowiska, a $Z_{T5\%}$ jest zależną od napięcia dotykowego rażeniowego statystyczną impedancją ciała człowieka na drodze ręka – stopa przy 5% prawdopodobieństwie wystąpienia wartości mniejszej (rys. 6), zaś współczynnik 0,5 uwzględnia rażenie na drodze dwie ręce – dwie stopy.

Takie założenia uwzględniają prawdopodobieństwo porażenia równe 1 i niewielki opór ciała ludzkiego (mały opór na skutek przyjętej drogi rażenia).

W praktyce nie korzysta się bezpośrednio z zależności (1), a z kryteriów wtórnych opartych na dopuszczalnym czasie wyłączenia obwodu uszkodzonego, niedopuszczeniu do pojawienia się napięć dotykowych rażeniowych lub zmniejszeniu wartości prądu rażeniowego przez włączenie do obwodu rażeniowego dodatkowych oporów.

Nie wymaga się ochrony przy uszkodzeniu, jeżeli napięcia dotykowe spodziewane w warunkach normalnych nie mogą długotrwale przekroczyć wartości największych dopuszczalnych długotrwale napięć dotykowych spodziewanych U_L ($U_{ST} \leq U_L$).

Wartości U_L dla urządzeń prądu przemiennego a.c. i prądu stałego d.c. wynoszą w warunkach normalnego zagrożenia: 50 V a.c. i 120 V d.c.

6. Kryteria ochrony przy uszkodzeniu w liniach i stacjach elektroenergetycznych wysokiego napięcia (powyżej 1 kV a.c.)

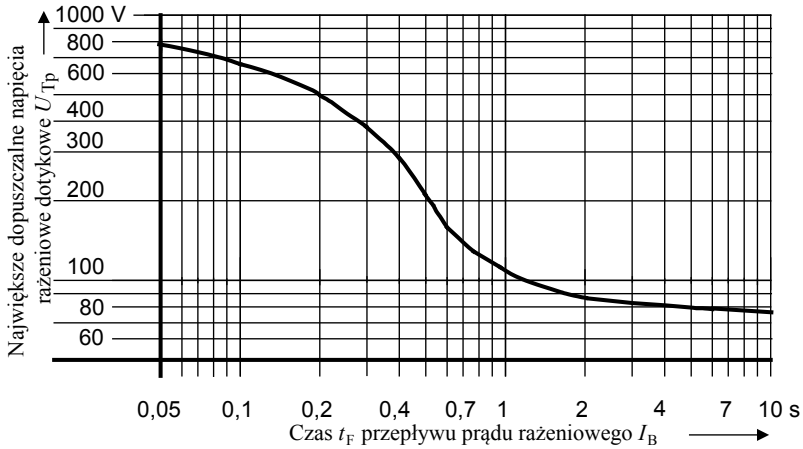
W elektroenergetycznych liniach i stacjach wysokiego napięcia, w których wymagany jest dobór i sprawdzenie skuteczności środków ochrony przy uszkodzeniu, napięcie dotykowe rażeniowe U_T nie powinno przekraczać wartości dopuszczalnych U_{Tp} (w normie PN-EN 50341-1 [6] napięcie U_{Tp} oznaczono jako U_{D1}):

$$U_1 \leq U_{Tp} \quad \text{lub} \quad U_1 \leq U_{D1}. \quad (3)$$

Największe dopuszczalne napięcia dotykowe rażeniowe U_{Tp} przedstawiono na rysunku 9 i w tabelicy 3.

Powyższą zależność ustalono przyjmując, że:

- prąd rażeniowy płynie na drodze ręka – stopy,
- prawdopodobieństwo wystąpienia założonej impedancji ciała człowieka wynosi 50% ($Z_{T50\%}$ parz tab. 2),
- prawdopodobieństwo wystąpienia fibrylacji komór serca wynosi 5% (krzywa c_2 – patrz rys. 5),
- w obwodzie rażeniowym nie występują dodatkowe rezystancje.



Rys. 9. Największe dopuszczalne napięcia dotykowe rażeniowe U_{Tp} w zależności od czasu t_F przepływu prądu rażeniowego

Tablica 3. Największe dopuszczalne napięcia dotykowe rażeniowe U_{Tp} dla różnych czasów t_F trwania doziemienia (rażenia) [3]

Czas t_F [s]	Napięcie U_{Tp} [V]	Czas t_F [s]	Napięcie U_{Tp} [V]
0,04	800	0,49	220
0,08	700	0,64	150
0,14	600	0,72	125
0,20	500	1,1	100
0,29	400	10	80
0,39	300	-	-

Powyższe założenia pozwalają wyznaczyć zależność największych dopuszczalnych napięć dotykowych rażeniowych w zależności od czasu t_F przy określonym ryzyku (prawdopodobieństwie), wystąpienia niebezpiecznych skutków rażenia, uwzględniającym doświadczenie, specjalne przeszkolenie personelu (kwalifikacje), uzasadnione wydatki inwestycyjne itp., które są możliwe do przyjęcia w warunkach doziemienia w urządzeniach wysokiego napięcia. Są to założenia znacznie łagodniejsze od przyjętych przy wyznaczaniu kryteriów zagrożenia w instalacjach niskiego napięcia, gdzie przyjęto, że rażenie występuje na drodze dwie ręce – dwie nogi, impedancja ciała człowieka jest równa $Z_{T5\%}$, a prawdopodobieństwo fibrylacji komór serca jest równe 0% (krzywa c_1). W założeniach przyjętych przy wyznaczaniu napięć U_{Tp} zawarto mniejsze prawdopodobieństwo wystąpienia porażenia elektrycznego w urządzeniach wysokiego napięcia w porównaniu z takim prawdopodobieństwem w urządzeniach niskiego napięcia.

Kryterium zapisane wzorem (3) powinno być spełnione w każdej stacji nie będącej stacją słupową. Kryterium to uznaje się za spełnione, jeżeli napięcie uziomowe U_E instalacji uziemiającej (w postaci otoku lub kraty) spełnia warunek:

$$U_E \leq 2U_{Tp} \quad \text{lub} \quad U_E \leq 2U_{D1}, \quad (4)$$

w którym: U_{Tp} (U_{D1}) to największe dopuszczalne napięcie dotykowe rażeniowe.

W instalacjach wysokiego napięcia kryterium zapisane wzorem (3) uznaje się również za spełnione, jeżeli (szczegóły w normie [11]):

- uziom rozpatrywanej instalacji jest częścią zespolonej instalacji uziemiającej lub
- napięcie uziomowe uziomu U_E nie przekracza $4U_{Tp}$ i równocześnie wykonano odpowiednie uzupełniające środki ochrony przy uszkodzeniu.

Warunki zapisane wzorami (3) nie muszą być spełnione w każdej **stacji słupowej i linii elektroenergetycznej wysokiego napięcia**.

Stacje słupowe powinny mieć uziemienia opisane w Załączniku F (F4) normy PN-E-05115 [4], a spełnienia kryteriów zapisanych wzorami (3) jest konieczne w przypadkach, w jakich wymaga się spełnienia tego kryterium w liniach napowietrznych.

Elementy elektroenergetycznych **linii kablowych średniego napięcia ułożone w ziemi** są niedostępne dla ludzi postronnych i nie wymagają stosowania ochrony przeciwporażeniowej przy uszkodzeniu (przy dotyku pośrednim). Zagrożenie porażeniowe w takich liniach mogą stwarzać ich elementy nadziemne (np. głowice kablowe). Ponieważ nadziemne części kabli średniego napięcia łączą się z elementami instalacji elektroenergetycznych średniego napięcia (np. stacji), wymagania stawiane ochronie przeciwporażeniowej powinny być takie same, jak stawiane instalacjom (stacjom).

Wymagania dotyczące ochrony przeciwporażeniowej przy uszkodzeniu (przy dotyku pośrednim), spełniające kryteria zapisane wzorami (3) lub (4), **w liniach napowietrznych wysokiego napięcia** (podane są w normie PN-EN 50423-1 [7] i PN-EN 50341-1 [6]) **dotyczą słupów** stalowych, wykonanych z betonu zbrojonego lub z innych materiałów uznanych za przewodzące, które:

- znajdują się na terenach sporadycznie (nie często) uczęszczanych i należą do linii, w których zwarcia doziemne nie są automatycznie wyłączane w krótkim czasie,
- znajdują się na terenach, na których ludzie mogą przebywać w bezpośrednim sąsiedztwie słupa:
 - przez stosunkowo długi czas (kilka godzin dziennie) lub
 - przez krótki czas, ale bardzo często (wiele razy dziennie).

Są to słupy, przy których zachodzi istotne prawdopodobieństwo jednoczesnego wystąpienia zwarcia doziemnego i dotknięcia części słupa stwarzającego zagrożenie porażeniowe. Do takich miejsc zalicza się tereny zamieszkałe, tereny na których mogą gromadzić się ludzie (np. tereny rekreacyjne, place zabaw, tereny handlowe, boiska, dworce oraz tereny znajdujące się w pobliżu wcześniej wymienionych).

Oznacza to, że **nie stawia się wymagań dotyczących ochrony przeciwporażeniowej** przy uszkodzeniu dla słupów rozpatrywanych linii wykonanych:

- z materiału przewodzącego, znajdujących się na terenach rzadko (sporadycznie) uczęszczanych, należących do linii wyposażonych w automatykę zabezpieczeniową lub
- z materiału izolacyjnego, bez jakichkolwiek części metalowych, na których mogłoby pojawić się niebezpieczne napięcie dotykowe spodziewane i które człowiek może dotknąć (np. urządzeń rozdzielczych) niezależnie od tego, jak często mogą znaleźć się przy nich ludzie (słupy takie należy traktować tak jak stacje słupowe).

Uznaje się, że przy słupach, dla których nie podaje się wymagań dotyczących ochrony przy uszkodzeniu prawdopodobieństwo zagrożenia porażeniowego można uznać za pomijalnie małe.

Za słupy izolacyjne uznaje się słupy drewniane oraz wykonane z innego materiału, który można uznać jako izolacyjny (bez dostępnych części przewodzących mogących stwarzać zagrożenie porażeniowe).

Należy też pamiętać, że w stacjach wysokiego napięcia zasilających linie elektroenergetyczne niskiego napięcia punkt neutralny uzwojeń zasilanej sieci niskiego napięcia można łączyć z uziomem stacji, jeżeli zwarcie doziemne w urządzeniach wysokiego napięcia stacji nie spowoduje:

- zagrożenia porażeniowego w zasilanych liniach i instalacjach niskiego napięcia pracujących w układach TN oraz
- zagrożenia uszkodzenia izolacji w zasilanych liniach i instalacjach niskiego napięcia pracujących w układach TT.

Zagrożenie porażeniowe w przypadkach wyżej wymienionych nie wystąpi, jeżeli będzie spełniony warunek:

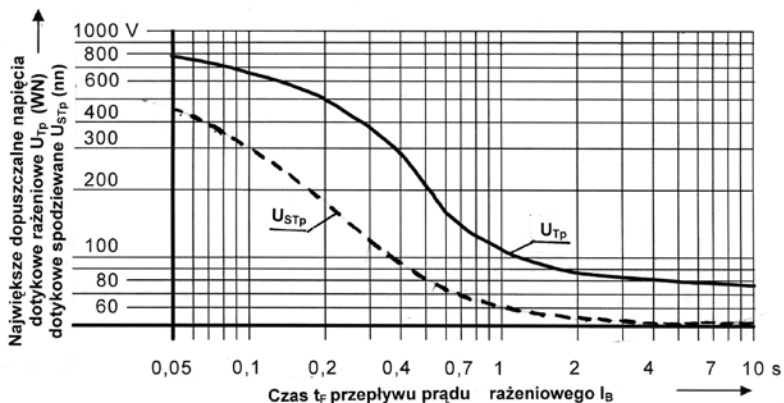
$$U_E \leq U_F \quad (5)$$

w którym U_E jest napięciem uziomowym stacji, a U_F – największym dopuszczalnym napięciem uszkodzeniowym, występującym przy zwarcia doziemnych w urządzeniach wysokiego napięcia stacji (patrz norma N-SEP-E-001 [3]).

7. Porównanie kryteriów skuteczności ochrony przeciwporażeniowej przy uszkodzeniach w instalacjach i liniach niskiego i wysokiego napięcia

Na rysunku 10 przedstawione są największe dopuszczalne napięcia dotykowe rażeniowe U_{Tp} uwzględniane przy projektowaniu i sprawdzaniu skuteczności ochrony przy uszkodzeniu w obiektach wysokiego napięcia ($U > 1$ kV a.c.) oraz największe dopuszczalne napięcia dotykowe spodziewane U_{STp} uwzględniane przy projektowaniu i sprawdzaniu skuteczności ochrony przy uszkodzeniu w obiektach niskiego napięcia ($U \leq 1$ kV a.c.). Przedstawione największe dopuszczalne napięcia zostały przyjęte przy założeniu znacznie większego prawdopodobieństwa wystąpienia nieakceptowanego ryzyka porażenia w instalacjach i liniach niskiego napięcia niż w instalacjach i liniach wysokiego napięcia. Dlatego wartości największych dopuszczalnych napięć

U_{STP} (w obiektach niskiego napięcia) są mniejsze niż wartości największych dopuszczalnych napięć U_{TP} (w obiektach wysokiego napięcia).



Rys. 10. Największe dopuszczalne napięcia: dotykowe rażeniowe w obiektach wysokiego napięcia (linia ciągła) oraz największe dopuszczalne napięcia dotykowe spodziewane w obiektach niskiego napięcia (linia przerywana)

8. Literatura

1. IEC/TR2 60479-1:1993. Effects of current on human beings and livestock – Part 1: General aspects.
2. IEC/TS 60479-1:2005 Effects of current on human beings and livestock – Part 1: General aspects.
3. N SEP-E-001:2013 Sieci elektroenergetyczne niskiego napięcia. Ochrona przeciwporażeniowa.
4. PN-E-05115:2002 Instalacje elektroenergetyczne prądu przemiennego o napięciu wyższym od 1 kV.
5. PN-EN 45020:2009 Normalizacja i dziedziny związane – Terminologia ogólna.
6. PN-EN 50341-1:2009 Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 45 kV. Część 1. Wymagania ogólne – Specyfikacje wspólne.
7. PN-EN-50423-1:2007 Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV do 45 kV łącznie. Wymagania ogólne – Specyfikacje wspólne.
8. PN-HD 60364 Instalacje elektryczne niskiego napięcia (norma wielozeszytowa).
9. PN-IEC 60364 Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych. (norma wielozeszytowa).