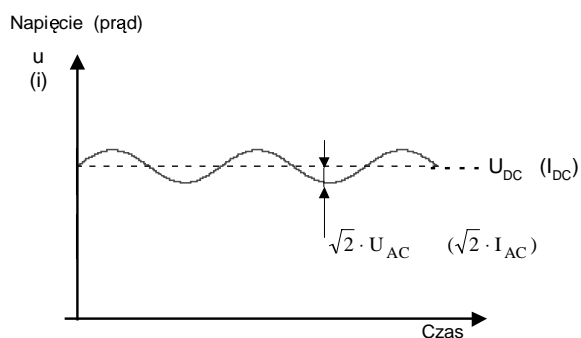


## OCHRONA PRZECIWPORAŻENIOWA W OBWODACH PRĄDU STAŁEGO

Normy i przepisy o ochronie przeciwporażeniowej dotyczą urządzeń elektrycznych zarówno prądu przemiennego, jak i stałoprądowych. Aczkolwiek ogólne zasady ochrony są jednakowe dla obu grup urządzeń, to w kwestiach szczegółowych bywają formułowane odmienne wymagania, na ogół bez podawania motywów, choćby były one uzasadnione, bo taka jest logika redagowania tekstów przepisowych. Różne są też w obu grupach urządzeń i obwodów warunki pracy zabezpieczeń i urządzeń wyłączających, co może mieć wpływ na ich charakterystyki działania ważne w systemach ochrony. Referat przedstawia specyfikę niskonapięciowych obwodów prądu stałego z punktu widzenia zagrożenia porażeniem, kryteriów bezpieczeństwa, stosowanych środków ochrony oraz zasad ich doboru bądź wymiarowania.

### 1. Wstęp

Ponad sto lat temu, kiedy u zarania elektroenergetyki najwybitniejsi ówczesni elektrycy spierali się o wybór rodzaju prądu, zwolennicy prądu przemiennego, wśród innych argumentów, wysuwali fałszywą tezę, że porażenia prądem stałym są groźniejsze. Wkrótce okazało się, że jest raczej odwrotnie, ale przez długie lata wiedza na temat mechanizmu rażenia była wrywkowa i słabo był rozpoznany wpływ nań przebiegu prądu w czasie, a zwłaszcza – powody takiej zależności. Obecnie, po serii badań w różnych krajach, również w Polsce, i po próbach uporządkowania tematyki przez Międzynarodową Komisję Elektrotechniczną (IEC), wiedza jest znacznie obszerniejsza, ale pozostały liczne kwestie niezupełnie wyjaśnione.



Rys. 1. Określanie tętnienia napięcia (prądu) stałego

$$\text{tetnienie} = \frac{U_{AC}}{U_{DC}} \quad \left( \frac{I_{AC}}{I_{DC}} \right)$$

O ile dawniej rozpatrywano i porównywano porażenia prądem tylko o dwóch ściśle określonych przebiegach: prąd przemienny sinusoidalny scharakteryzowany wartością skuteczną oraz prąd stały jednokierunkowy o nieziennej wartości, to obecnie różnorodność spotykanych przebiegów jest niemal nieograniczona.

W braku dodatkowych uwag jako prąd stały rozumie się prąd jednokierunkowy o wartości chwilowej praktycznie niezmiennej, tzn. o pomijalnie małym tętnieniu (nie przekraczającym 0,10 czyli 10%). **Tętnienie** napięcia (prądu) stałego definiuje się stosunkiem wartości skutecznej składowej przemiennej sinusoidalnej AC do wartości średniej napięcia (prądu) stałego DC (rys. 1). Przy zagrożeniu rażeniowym prądem stałym (i konsekwentnie – napięciem dotykowym stałym) o większym tętnieniu obowiązują kryteria bezpieczeństwa, jak przy prądzie (napięciu) przemiennym.

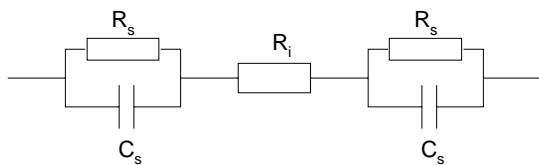
Tablica 1. Roczna liczba wypadków porażenia prądem elektrycznym w Austrii w latach 1999-2000 według rodzaju prądu rażeniowego

| Rodzaj prądu                      | 1999             |                       | 2000             |                       |
|-----------------------------------|------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
|                                   | wypadków łącznie | wypadków śmiertelnych | wypadków łącznie | wypadków śmiertelnych |
| Prąd stały                        | 13               | 0                     | 5                | 0                     |
| Prąd przemienny jednofazowy       | 66               | 3                     | 61               | 2                     |
| Prąd przemienny trójfazowy        | 46               | 1                     | 48               | 2                     |
| Piorun                            | 0                | 0                     | 7                | 0                     |
| Elektryczność statyczna, indukcja | 3                | 0                     | 1                | 0                     |
| Niewiadomy                        | 15               | 1                     | 3                | 0                     |
| <b>R a z e m</b>                  | <b>145</b>       | <b>5</b>              | <b>125</b>       | <b>4</b>              |

W krajach, w których prowadzi się rzetelne statystyki wypadków porażenia, jest ich tak mało (tabl. 1), że traci sens wnioskowanie metodami statystycznymi o zagrożeniu ze strony różnych urządzeń. Niewielki udział prądu stałego w łącznej liczbie porażenia, a zwłaszcza w odsetku śmiertelnych porażenia (0,3 % na niskim i 2,4 % na wysokim napięciu [3]) wynika nie tyle z łagodniejszego oddziaływania prądu stałego, co z mniejszej styczności z urządzeniami prądu stałego. Znacznie mniej jest instalacji i sieci prądu stałego, niektóre operują bardzo niskim napięciem (elektrochemia, oświetlenie bezpieczeństwa), do wielu ma dostęp tylko personel wykwalifikowany. Osoby postronne, skłonne do nierozważnych bądź zdolne do nieodpowiedzialnych zachowań, miewają styczność z urządzeniami trakcji elektrycznej prądu stałego i z nielicznymi liniami przesyłowymi prądu stałego (HVDC – *high voltage direct current*).

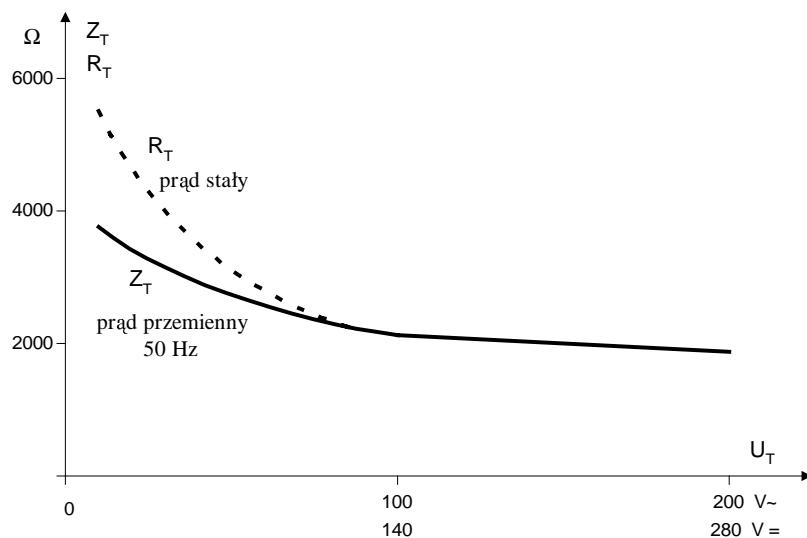
## 2. Rezystancja ciała

Znany model impedancji ciała ludzkiego (rys. 2) obejmuje rezystancję wnętrza ciała  $R_i$  oraz rezystancję  $R_s$  i pojemność  $C_s$  naskórka w miejscach, gdzie prąd wpływa i wypływa. Pojemność naskórka  $C_s$  sprawia, iż impedancja ciała  $Z_T$  (przy prądzie przemiennym) i rezystancja  $R_T$  (przy prądzie stałym) powinny się różnić przy małych wartościach napięcia dotykowego, kiedy ta pojemność w ogóle się objawia, nie jest przebita (napięcie przemiennie nie przekraczające 50÷75 V). Wyniki pomiarów (rys. 3) potwierdzają to przypuszczenie. Zatem przy rażeniu bardzo małym napięciem (o tej samej wartości AC i DC) prąd rażeniowy stały jest mniejszy niż prąd rażeniowy przemienny.



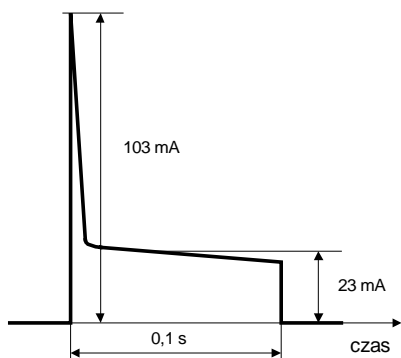
Rys. 2. Model impedancji ciała ludzkiego  
 $R_i$  – rezystancja wnętrza ciała,  $R_s$ ,  $C_s$  – rezystancja i pojemność naskórka w miejscach styczności z elektrodą

Przy dużych wartościach napięcia dotykowego, kiedy dochodzi do przebicia naskórka (powyżej ok. 100 V<sub>AC</sub>), zacierą się różnica między prądem stałym a przemiennym (rys. 3), przy czym operować trzeba tą samą wartością szczytową napięcia. Oznacza to, że przypisuje się tę samą wartość odpowiednio  $Z_T$  oraz  $R_T$  na przykład przy napięciu przemiennym 200 V i napięciu stałym  $\sqrt{2} \cdot 200 = 283 \approx 300$  V.



Rys. 3. Impedancja  $Z_T$  (rezystancja  $R_T$ ) ciała ludzkiego w zależności od napięcia dotykowego (o tej samej wartości szczytowej przy prądzie przemiennym i stałym) [1, 2, 11]

Pojemność naskórka daje o sobie też znać w pierwszej chwili rażenia małym napięciem, kiedy nie jest naładowana i wywołuje początkowy pik prądu rażeniowego (rys. 4). W sytuacji, jak na rys. 4, mówi się o rażeniu prądem stałym 23 mA i rozpatruje się skutki patofizjologiczne przepływu takiego prądu, a przecież pik początkowy 103 mA zapewne nie jest bez znaczenia.



Rys. 4. Przebieg prądu w czasie przy rażeniu napięciem stałym 70 V (ręka-ręka, dłonie suche) [1, 2, 11]

Z tego samego powodu podobny początkowy pik prądu rażeniowego obserwuje się również przy rażeniu napięciem przemiennym i ma on *ceteris paribus* zbliżoną wartość szczy-

ową, ograniczoną wartością początkową impedancji (rezystancji) ciała, która jest po prostu równa rezystancji wnętrza ciała  $R_i$ .

### 3. Pierwotne kryteria bezpieczeństwa

Pierwotne kryteria bezpieczeństwa mają przedstawiać, wynikające z badań mechanizmu rażenia i bezpośrednich jego skutków, graniczne wartości prądu i czasu nie zagrażające (z określonym prawdopodobieństwem) wystąpieniem określonych bezpośrednich skutków rażenia: progu odczuwania przepływu prądu, granicy samouwolnienia, progu akceptowanego bólu, progu fibrylacji.

Przy rażeniu prądem stałym, podobnie jak przy rażeniu prądem sterowanym fazowo, otrzymuje się z badań wyniki inne niż przy prądzie przemiennym o częstotliwości zbliżonej do 50 Hz. Elektrycy są wtedy skłonni doszukiwać się jakiegoś kryterium równoważności, na przykład, że skutki są takie same, jeśli wartość skuteczna prądu rażeniowego jest jednakowa (oparzenia) albo wartość szczytowa prądu jest jednakowa (efekt skurczu mięśni, odczucie bólu), albo wartość międzyszczytowa przebiegu prądu jest jednakowa (fibrylacja,  $t > 0,75$  s). Jeśli nawet te przybliżenia są trafne i użyteczne, to są to tylko przybliżenia i niewiele wyjaśniają. Podobne skutki wywołane prądami o różnym przebiegu w czasie mogą mieć inny mechanizm. Procesy zachodzące w żywej elektropobudliwej tkance są zbyt złożone, by dały się odwzorować prostymi modelami elektrycznymi i prostymi mechanizmami przebiegu zjawisk.

Popełniano elementarne błędy w ocenie skutków rażenia prądem stałym, dopóki nie zrozumiano, że wnioski z laboratoryjnych badań na osobach poddawanych przepływowi prądu o wartości zwiększanej w sposób ciągły nie odpowiadają warunkom rzeczywistego rażenia z nagle wymuszonym prądem o znacznej wartości [1, 6]. Wynika to zarówno z pobudliwości mięśni szkieletowych na pojawienie się bodźca, jak i z początkowego piku prądowego (rys. 4).

Długo nie uwzględniano w trakcie badań kierunku przepływu prądu stałego, co – jeśli chodzi o przepływ wzdłużny (ręka-noga) – od dawna wykorzystuje się w fizykoterapii, przy elektryczno-wodnej kąpeli czterokomorowej<sup>1</sup>. Z punktu widzenia zagrożenia porażeniem bardziej niebezpieczny jest **prąd wstępujący** (od nóg do rąk); podobne skutki patofizjologiczne występują przy wartościach prądu 1,05÷4,4 razy mniejszych niż przy prądzie zstępującym (od rąk do nóg), zależnie od tego, o jakie efekty chodzi i o jaki czas rażenia. Inaczej niż przy prądzie przemiennym, znacznie różnią się też niektóre skutki rażenia przy przepływie wzdłużnym

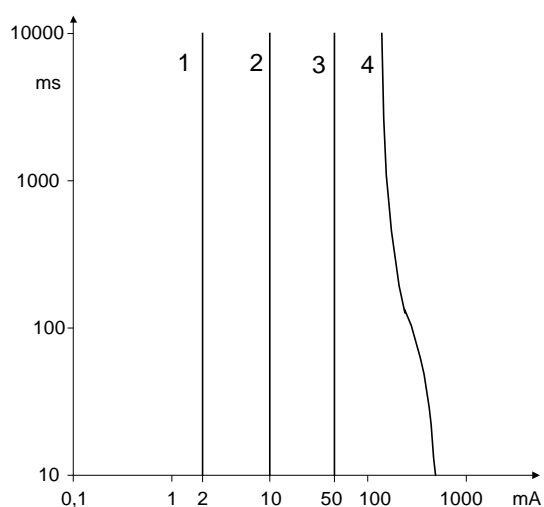
---

<sup>1</sup> Cztery kończyny pacjenta są zanurzone w osobnych, napełnionych letnią wodą, wanienkach z materiału izolacyjnego, wyposażonych w kieszenie z elektrodą. Wymusza się przepływ prądu stałego o niezmienniej wartości w granicach 10÷30 mA od lewej nogi do lewej ręki (lub odwrotnie) i podobnie – od prawej nogi do prawej ręki (lub odwrotnie). Efekty zabiegu, trwającego kilkanaście minut, zależą od kierunku przepływu prądu [9]. Przy **wstępującym** kierunku prądu „od nóg do rąk” następuje zwiększenie pobudliwości ośrodkowego układu nerwowego, nasila się odpływ krwi żyłnej z kończyn dolnych i narządów objętych „dorzeczem” żyły wrotnej, zwiększa się dopływ krwi tętniczej do płuc i kończyn górnych i odpływ krwi żyłnej z serca do płuc. Taką biegunowość aplikuje się pacjentom z nadciśnieniem tętniczym. Natomiast kąpiel przy **zstępującym** kierunku prądu „od rąk do nóg” obniża pobudliwość ośrodkowego układu nerwowego, zwiększa dopływ krwi żyłnej z krążenia małego do serca i odpływ krwi żyłnej z płuc i kończyn górnych oraz dopływ krwi tętniczej do narządów objętych „dorzeczem” żyły wrotnej oraz do kończyn dolnych. Taką biegunowość aplikuje się pacjentom z obniżonym ciśnieniem tętniczym.

w porównaniu z przepływem poprzecznym (ręka-ręka) prądu rażeniowego. Efekty te mają związek chociażby z kierunkami rozchodzenia się fali pobudzenia w mięśniu sercowym.

Wszystkie te subtelne różnice są istotne przy dłuższym czasie przepływu prądu rażeniowego, bo przecież przy rażeniu prądem jednokierunkowym w czasie na przykład 10 ms nie ma znaczenia, czy prąd ten pochodzi z obwodu prądu przemiennego 50 Hz, z obwodu prądu stałego, czy z generatora udarów prądowych.

Wartość progowa **prądu odczuwania** jest związana z pojawieniem się bodźca, czyli nagłym zapoczątkowaniem przepływu prądu albo jego przerwaniem, a przy ciągłym jego zwiększaniu od zera – z podrażnieniem receptorów ciepła. Prąd stały (o pomijalnym tętnieniu!) nie jest w stanie wywołać skurczu tężcowego<sup>1</sup> mięśni szkieletowych, a zatem nie zachodzi obawa występowania **granicy samowolnienia** [1, 3, 6, 10].



Rys. 5. Pierwotne kryteria bezpieczeństwa przy rażeniu prądem stałym

1 – próg odczuwalności przepływu prądu,  
2 – próg wrażenia bólu (przy włączaniu i wyłączaniu prądu), 3 – próg dolegliwego odczucia bólu i zakłóceń rytmu serca,  
4 – granica prądów niefibrylacyjnych

Pacjenci w trakcie kąpieli czterokomorowej bezboleśnie, chociaż odczuwając przepływ prądu, tolerują prąd do 30 mA, ale pamiętać trzeba, że duża jest powierzchnia styczności kończyn z wodą. W trakcie badań Dalziela i innych mężczyźni wytrzymywali przepływ prądu do 100 mA mogąc samodzielnie uwolnić się od uchwyconej elektrody. Przepływowi prądu towarzyszy odczucie bólu, a przedłużanie grozi skutkami cieplnymi i ew. elektrochemicznymi.

Najważniejszym kryterium są wartości graniczne  **$t$ - $I$  prądów niefibrylacyjnych** w funkcji czasu. To nie tylko problem wartości prądu i czasu rażenia (rys. 5). Według Brinkmanna [3] skoro fibrylację może zapoczątkować tylko bodziec pojawiający się w czasie szczególnej wrażliwości mięśnia sercowego (ang. *vulnerable period*), czyli w okresie refrakcji względnej objawiającym się załamkiem T elektrokardiogramu, to prawdopodobieństwo wywołania fibrylacji przez prąd o wartości nadprogowej jest równo stosunkowi okresu refrakcji względnej do okresu pracy serca, a więc około 5 %. Zakładając ostrożnie, że fibrylację może wywołać również zanik takiego prądu, otrzymuje się prawdopodobieństwo dwukrotnie większe, zaledwie 10 %, co może tłumaczyć niegroźne skutki wielu porażań prądem stałym o znacznej wartości.

Przy porównywaniu zagrożenia prądem stałym i prądem przemiennym 50 Hz, zwłaszcza fibrylacją serca, wprowadza się pojęcie współczynnika bezpieczeństwa (niem. *Sicherheitsfak-*

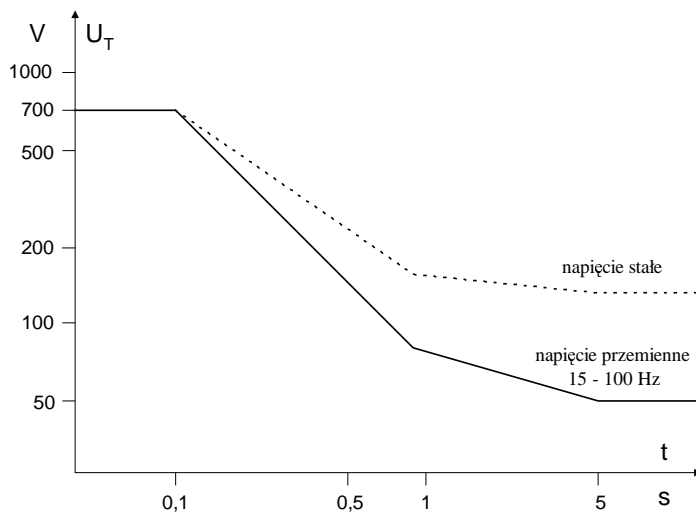
<sup>1</sup> **Skurcz tężcowy zupełny** mięśni szkieletowych (np. ręki) trwa tak długo, jak długo płynie prąd rażeniowy i występuje przy prądzie przemiennym o częstotliwości 10÷300 Hz. Zanim, po wystąpieniu skurczu, dojdzie do chociażby częściowego rozkurczu mięśnia, pojawia się nowa półfala prądu rażeniowego, stanowiąca nowy bodziec podtrzymujący depolaryzację mięśnia.

tor). Jest to stosunek wartości prądu stałego  $I_{DC}$  do wartości prądu przemiennego  $I_{AC}$  wywołującej podobny skutek ( $k = I_{DC}/I_{AC}$ ). Dla czasu rażenia nie przekraczającego jednego okresu pracy serca (0,75 s przy tętnie  $90 \text{ min}^{-1}$ )  $k = 1,05 \div 1,27$ , a przy czasach poniżej 0,1 s praktycznie  $k = 1$  i trudno mówić o mniejszym zagrożeniu rażeniem prądem stałym. Natomiast przy czasie rażenia przekraczającym jeden okres pracy serca  $k = 2,5 \div 4,4$ , co oznacza dużą różnicę na korzyść prądu stałego.

Skutki cieplne rażenia, poczynając od banalnego znamienia prądowego aż po zagrażające życiu wewnętrzne **oparzenia** elektrotermiczne, przebiegają podobnie, jak przy prądzie przemiennym o tej samej wartości skutecznej.

#### 4. Wtórne kryteria bezpieczeństwa

O ile pierwotne kryteria bezpieczeństwa mają znaczenie raczej poznawcze, to wtórne kryteria bezpieczeństwa, czyli zależność dopuszczalnego napięcia dotykowego od czasu rażenia (rys. 6), który utożsamia się z czasem trwania zwarcia doziemnego, są bezpośrednio wykorzystywane przy projektowaniu urządzeń i ocenie ich stanu. Tworzy się je w oparciu o kryteria pierwotne z uwzględnieniem rezystancji ciała odpowiadającej rozważanej wartości napięcia dotykowego.



Rys. 6. Największe dopuszczalne wartości napięcia dotykowego stałego i przemiennego w zależności od czasu trwania (według przepisów szwajcarskich [5])

Przedstawione wcześniej rozważania tłumaczą zbliżone bądź jednakowe dopuszczalne wartości napięcia dotykowego stałego i przemiennego przy krótkim czasie rażenia i duże (2,5-krotne) różnice długotrwale dopuszczalnych wartości (tabl. 2).

Tablica 2. Największe dopuszczalne długotrwale wartości napięcia dotykowego

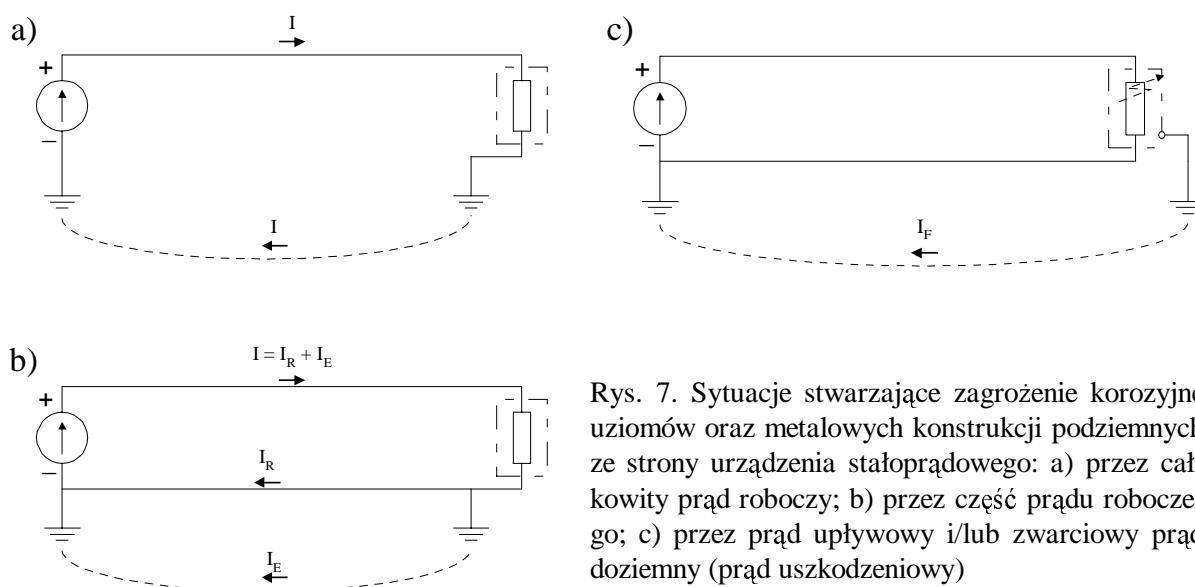
| Rodzaj prądu     | Napięcie dotykowe w warunkach środowiskowych <sup>1)</sup> |      |      |
|------------------|--|------|------|
|                  | 1  | 2    | 3    |
| Przemienny 50 Hz | 50 V   | 25 V | 12 V |
| Stały            | 120 V  | 60 V | 30 V |

<sup>1)</sup> Warunki środowiskowe: 1 – pomieszczenia suche, 2 – pomieszczenia wilgotne i mokre, stanowiska na wolnym powietrzu, 3 – człowiek zanurzony w wodzie (baseny pływackie, balneoterapia)

## 5. Narazenia korozyjne uziomów

Ewentualny tor ziemnopowrotny obwodu prądu stałego stwarza zagrożenie korozją elektrochemiczną wszelkich uziomów sztucznych i naturalnych oraz metalowych rurociągów i innych konstrukcji podziemnych choćby przypadkowo znajdujących się na drodze przepływu prądu. W miejscach wypływu prądu jonowego do gruntu o elektrolitycznym charakterze przewodnictwa, czyli w strefach anodowych, metal ulega korozji w tempie wynikającym z prawa Faradaya<sup>1</sup>.

Z tych powodów w zasadzie niedopuszczalne są **obwody prądu stałego bez przewodu powrotnego** (rys. 7a), w których całkowity prąd roboczy wracałby do źródła poprzez ziemię (lub wodę). Tak sobie „ułatwiają” pracę spawacze-partacze, chcący uniknąć prowadzenia przewodu powrotnego; narażają na korozję uziomy i upalają przewody PE i/lub PEN pobliskich instalacji. Tak pierwotnie miało być wykonane połączenie stałoprądowe HVDC ( $\pm 450$  kV) Polski ze Szwecją, zaniechane w wyniku protestów ekologów. Tym niemniej w wielu dwuprzewodowych połączeniach HVDC na świecie dopuszcza się awaryjną pracę z torem ziemnopowrotnym w razie uszkodzenia jednego z przewodów. Wymaga to jednak specjalnych wykonawczych uziomów i/lub przeciwwagi na całej trasie linii.



Rys. 7. Sytuacje stwarzające zagrożenie korozyjne uziomów oraz metalowych konstrukcji podziemnych ze strony urządzenia stałoprądowego: a) przez całkowity prąd roboczy; b) przez część prądu roboczego; c) przez prąd upływowy i/lub zwarciovowy prąd doziemny (prąd uszkodzeniowy)

Z tych samych powodów w zasadzie niedopuszczalne są **obwody prądu stałego o wielokrotnym uziemieniu przewodu powrotnego** (rys. 7b) celowo wykonanym bądź przypadkowym, w których część prądu roboczego stale wracałaby do źródła poprzez ziemię. Jeżeli uniknąć tego nie można, to stosuje się różne środki ograniczające **prądy błądzące** wpływające poza właściwy obwód elektryczny, np. w trakcji elektrycznej kolejowej szyny są jak najstarszanniej izolowane od ziemi.

**Obwód prądu stałego o pojedynczym uziemieniu roboczym** nie eliminuje zagrożenia korozyjnego uziomów (rys. 7c). Stwarza je stale płynący prąd upływowy przewodów oraz urządzeń rozdzielczych i odbiorczych oraz – co trzeba akceptować – krótkotrwałe zwarciovowe prądy doziemne.

<sup>1</sup> Roczny ubytek żelaza wynosi 9 g/mA·a, a cynku – 11 g/mA·a.

Inaczej niż kiedyś, prąd stały można dziś łatwo wytworzyć w miejscu zapotrzebowania za pomocą przekształtnika o dość dowolnych parametrach. Nie są już potrzebne rozległe przemysłowe i inne sieci prądu stałego z centralnym źródłem, zasilające liczne odbiory i zawierające liczne uziemienia dla celów ochronnych i/lub funkcjonalnych. Należy zatem preferować krótkie lokalne **obwody prądu stałego bez uziemienia roboczego** i tylko w razie wyraźnych przeciwwskazań postępować inaczej. Pozwala to zminimalizować omówione wyżej zagrożenia korozyjne.

## 6. Przegląd środków ochrony

W niskonapięciowych obwodach prądu stałego teoretycznie wchodzi w rachubę wszelkie środki ochrony przewidziane przez normę IEC 60364-4-41, aczkolwiek z pewnymi zastrzeżeniami bądź ograniczeniami w stosunku do analogicznych środków ochrony stosowanych w urządzeniach prądu przemiennego. Pamiętać też trzeba, że wspomniane grupy urządzeń bywają połączone galwanicznie poprzez przekształtniki (bez transformatora izolacyjnego) i bywają też połączone konstrukcyjnie w jedną całość, tworzą konstrukcję zespoloną. Jeżeli silnik prądu stałego ma nabudowany przekształtnik zasilany z instalacji trójfazowej, to zachodzi wątpliwość, czy ten blok jest urządzeniem prądu przemiennego, czy urządzeniem prądu stałego.

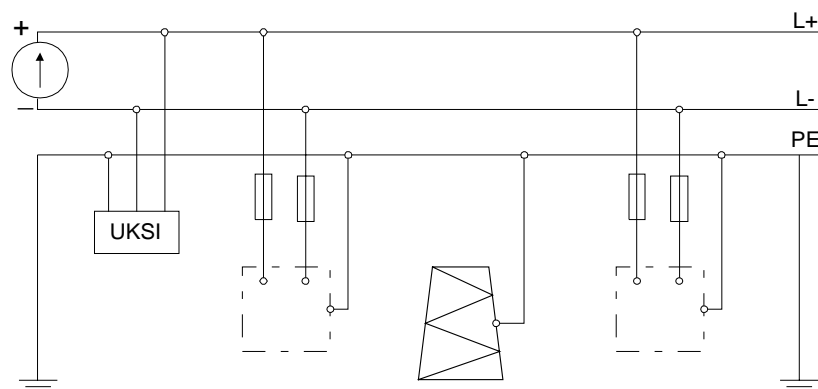
Aby uniknąć uziemionych przewodów ochronnych PE, dobrze jest zawsze rozważyć możliwość stosowania takich środków ochrony, które ich nie wymagają:

- Bardzo niskie napięcie ze źródła bezpiecznego (obwody SELV, PELV i analogiczne, ale nie FELV). Okolicznością bardzo korzystną – ze względu na spadki napięć i straty mocy – są 2,5-krotnie wyższe wartości bardzo niskich napięć stałych (120, 60 i 30 V) w porównaniu z przemiennymi (50, 25 i 12 V), które w określonych warunkach środowiskowych mogą być użyte. Bardziej kłopotliwe jest źródło bezpieczne, bo nie wystarcza prosty transformator bezpieczeństwa.
- Izolacja ochronna. Ten sposób ochrony nadaje się dla wielu urządzeń rozdzielczych i odbiorczych niezależnie od wartości napięcia roboczego.
- Separacja odbiornika o napięciu znamionowym nie przekraczającym 500 V. Kłopotliwe jest źródło: przetwornica separacyjna maszynowa bądź energoelektroniczna.
- Izolowanie stanowiska. Również ten sposób ma ograniczone zastosowanie, nadaje się tylko w suchych pomieszczeniach; jeśli urządzeń jest więcej niż jedno, to wymagają nieuziemionych przewodów wyrównawczych.

Jeśli wymienione wyżej środki ochrony nie mogą być użyte ze względów technicznych i/lub ekonomicznych, to kolejnym zalecanym rozwiązaniem jest **układ IT** wyposażony w urządzenie do stałej kontroli stanu izolacji i sieć uziemionych przewodów ochronnych PE łączących wszystkie części przewodzące dostępne i części obce (rys. 8). Po pierwszym zwarciu doziemnym ochrona jest zapewniona dzięki wyrównaniu potencjałów i stan taki jest sygnalizowany, a personel eksploatacyjny jest zobowiązany do szybkiego zlokalizowania i usunięcia uszkodzenia. Gdyby, mimo to, doszło do kolejnego uszkodzenia izolacji i zwarcia dwumiejscowego, to powinno być ono wyłączone w wymaganym czasie przez zabezpieczenia. Pętla zwarciorowa jest metaliczna, prąd ma dużą wartość, wystarczającą do pobudzenia zabezpieczeń nadprądowych. W układzie, jak na rys. 8, ani prądy upływowe ani prądy zwarcia doziemnych nie płyną poprzez ziemię, a więc nie narażają uziomów na korozję elektrochemiczną. Jest tak, bo zastosowano tzw. *zbiorowe uziemienie części przewodzących dostępnych* i tylko takie rozwiązanie powinno być stosowane w instalacjach prądu stałego. Łatwo prześledzić, że w razie za-

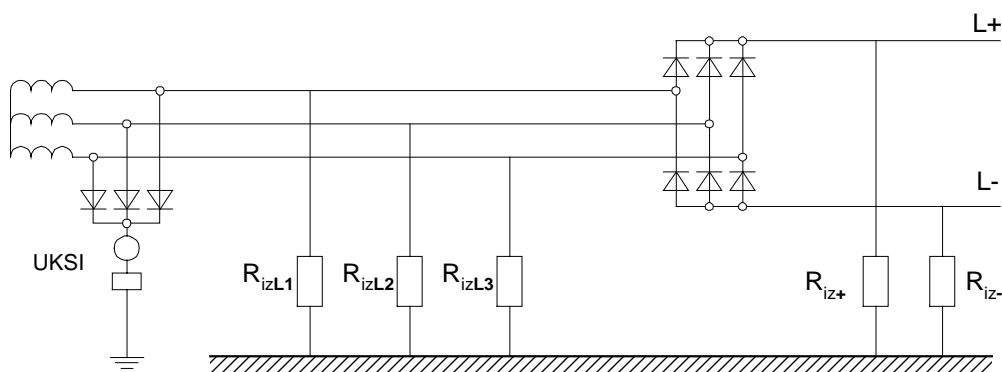


stosowania oddzielnych uziemień urządzeń przedstawionych na rys. 8 obwód prądu dwumiejscowego zwarcia zamyka się poprzez ziemię.



Rys. 8. Poprawnie wykonana instalacja prądu stałego o układzie IT

Dużej rozważki wymaga dobór urządzenia do stałej kontroli stanu izolacji UKSI zwłaszcza, jeżeli ma ono nadzorować zarówno układ prądu przemiennego, jak i układ prądu stałego galwanicznie połączone poprzez przekształtnik. Łatwo o błąd polegający na tym, że rezystancja izolacji jednego z biegunów prądu stałego nie jest nadzorowana (rys. 9). Są firmy (np. BENDER) oferujące kilkadziesiąt wykonañ UKSI pokrywających wszelkie potrzeby.



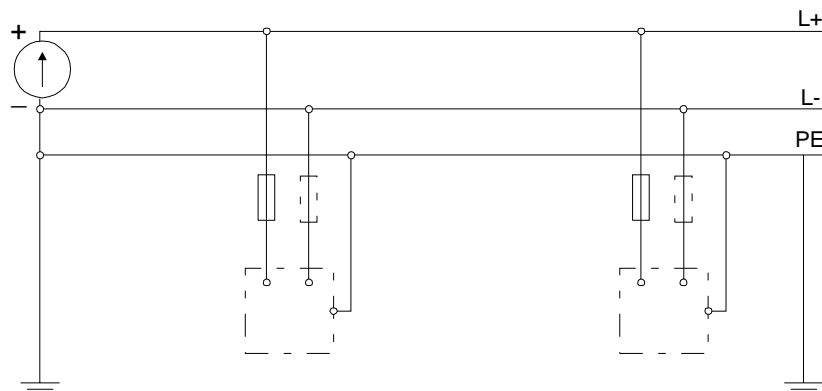
Rys. 9. Układ IT z obwodami prądu przemiennego i prądu stałego, w którym urządzenie do kontroli stanu izolacji nie nadzoruje rezystancji izolacji przewodu L+.

Układ TT oraz układ TN z samoczynnym wyłączaniem zasilania po pierwszym zwarciu doziemnym:

- nie jest zalecany, jeśli byłoby to związane z przepływem prądu zwarciovego poprzez ziemię,
- jest zabroniony w instalacjach bezpieczeństwa, a przecież jest to jedno z typowych zastosowań prądu stałego.

Przepływ prądów o znaczącej wartości poprzez ziemię można wyeliminować w układzie TN-S (rys. 10) zwłaszcza, jeżeli jego zasięg jest ograniczony do jednej budowli. Przedstawione na rys. 10 uzimienia są wtedy połączeniami z uzimioną konstrukcją budowli i z jej uziomem fundamentowym. W razie jakichkolwiek anomalii w samej instalacji prąd w ogóle nie wpływa do ziemi, nie przepływa przez rezystancję uzimienia i jej wartość jest bez znaczenia dla

ochrony w rozpatrywanej instalacji prądu stałego. Układ TN-C nie powinien być stosowany, a w obrębie jednej budowli, z metaliczną pętlą zwarcia doziemnego, układ TT jest po prostu niewykonalny.



Rys. 10. Poprawnie wykonana instalacja prądu stałego o układzie TN-S

Zważywszy, że niskonapięciowe instalacje prądu stałego mają obecnie niewielką rozległość i raczej ograniczają się do jednej budowli, podane zalecenia są łatwo zastosować. Jeśli instalacja obejmuje sąsiednie budowle, to równoległe z przewodami czynnymi należy między nimi ułożyć przewody ochronne i ew. wyrównawcze, co pozwoli uzyskać podobny efekt, jak w pojedynczej budowli.

## 7. Urządzenia dokonujące samoczynnego wyłączenia zasilania

Jeżeli ochrona polega na samoczynnym wyłączeniu zasilania przy pierwszym (rys. 10) lub przy drugim (rys. 8) zwarciu doziemnym, to zalecane rozwiązania z metaliczną pętlą zwarciovą w instalacjach o małej rozległości pozwalają polegać na niezawodnych i tanich zabezpieczeniach zwarciovych. Trzeba pamiętać, że warunki wyłączenia w obwodach stałoprądowych są trudniejsze niż w obwodach przemiennoprądowych o zbliżonym napięciu. Należy dokładnie sprawdzić **zdolność wyłączenia** bezpieczników bądź wyłączników nadprądowych w obwodzie prądu stałego o określonym napięciu i elektromagnetycznej stałej czasowej  $L/R$ . Kłopot może też sprawiać poprawne obliczenie wartości prądu zwarciovego i stałej czasowej jego narastania w obwodzie zasilanym z prądnicy i/lub z przekształtnika i/lub z baterii akumulatorów; to osobna obszerna problematyka.

W przypadku bezpieczników nie ulegają zmianie sporządzone dla obwodów prądu przemiennego charakterystyki czasowo-prądowe przedłukowe. Inne są jednak czasy łukowe, co ma wpływ na czas wyłączenia, istotny dla celów ochrony przeciwporażeniowej. Byłyby zatem potrzebne **charakterystyki czasowo-prądowe wyłączenia** w układach prądu stałego przy napięciu wyłączeniowym takim, jak w rozpatrywanym obwodzie, a co najmniej – krotności prądu znamionowego wkładki zapewniające wyłączenie w założonym czasie.

W przypadku wszelkich wyłączników nadprądowych z klasycznym **wyzwalaczem zwarciovym elektromagnesowym** pamiętać należy, iż o jego pobudzeniu lub nie decyduje wartość szczytowa prądu. Wyzwalacz znamionowany przy prądzie przemiennym i nastawiony na prąd  $I_{mr}$  w rzeczywistości jest nastawiony na szczytową wartość prądu, tzn.  $\sqrt{2} \cdot I_{mr}$  i taki jest faktyczny próg jego zadziałania w obwodzie prądu stałego.

Nowoczesne wyłączniki sieciowe i stacyjne miewają mikroprocesorowe przekaźniki nadprądowe przeciążeniowo-zwarcioowe nadające się do pracy tylko w obwodzie o określonym przebiegu prądu, wykluczają zmiennosc między obwodami prądu przemiennego i obwodami prądu stałego.

## 8. Zakończenie

Niniejszy referat jest próbą skróconego przedstawienia ogólnych problemów ochrony przeciwporażeniowej w niskonapięciowych instalacjach prądu stałego. Nie dotyka licznych zastosowań specjalnych, jak trakcja, elektrochemia bądź elektrotermia. Nie obejmuje specyfiki obwodów o prądzie jednokierunkowym tętniącym, zasad stosowania w nich zabezpieczeń nadprądowych i różnicowoprądowych oraz ich charakterystyk działania w tych warunkach. Jeśli czas pozwoli, a zdrowie dopisze, to obszerniejszą wersję referatu zainteresowani znajdą w przyszłości w Biuletynie SEP INPE.

## L i t e r a t u r a

1. Antoni H., Biegelmeier G.: Über die Wirkungen von Gleichstrom auf den Menschen. EuM, 1979, nr 2, s. 71-81.
2. Biegelmeier G.: Wirkungen des elektrischen Stroms auf Menschen und Nutztiere. VDE-Verlag, Berlin und Offenbach, 1986.
3. Brinkmann K., Schaefer H.: Der Elekrounfall. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1982.
4. Das J. C., Osman R. H.: Grounding of AC and DC Low-Voltage and Medium-Voltage drive systems. IEEE Trans. Ind. Appl., 1998, nr 1, s. 205-216.
5. Göbelhaider J.: Das Imaginäre beim Ermitteln der Erdungsspannung. Bull. SEV, 2001, nr 25, s. 32-34.
6. Guderski R., Teresiak Z.: Kryteria wymiarowania środków ochrony przeciwporażeniowej w urządzeniach prądu stałego. Prace Naukowe Instytutu Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej nr 12, Wrocław, 1972, s. 51-73.
7. Jellinek S.: Der elektrische Unfall. Franz Deuticke, Leipzig und Wien, 1927.
8. Hering E.: Neuer Standard für die Erdung in Gleichstromanlagen. Elektropraktiker, 1990, nr 3, s. 87-91.
9. Mika T., Kasprzak W.: Fizykoterapia. Wyd. Lekarskie PZWL, Warszawa, 2001.
10. Schumacher E. D.: Unfälle durch elektrische Starkströme. Eine klinische und gerichtlich-medizinische Studie. Verlag von J. F. Bergmann, Wiesbaden, 1908.
11. IEC-Report 479-1:1994 Effects of current on human beings and livestock.