

# PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY

ORGAN STOWARZYSZENIA ELEKTRYKÓW POLSKICH

Rok XXI.

21 Kwietnia 1939 r.

Zeszyt 8.

Redaktor inż. WŁODZIMIERZ KOTELEWSKI

Warszawa, Królewska 15, tel. 690-23.

## Porażenia prądem oraz zabezpieczenia w świetle nowych badań

Prof. Mieczysław Pożaryski

### Statystyka wypadków porażenia

Nowoczesne urządzenia elektryczne muszą być nie tylko doskonale pod względem celowości działania oraz oszczędności w kosztach budowy i w gospodarce energetycznej, lecz również i bezpieczne. Przepisy budowy i ruchu urządzeń elektrycznych, stale udoskonalane, uwzględniają zawsze wymagania bezpieczeństwa. Wskazówki dotyczące obsługi urządzeń elektrycznych dokładnie pouczają, jak należy obchodzić się z urządzeniami elektrycznymi, aby nie doznać porażenia.

Rady i wymagania, zawarte w przepisach i wskazówkach, oparte są na wynikach doświadczeń, jakie zostały poczynione w dziedzinie działania prądu elektrycznego na organizm ludzki.

Pierwszy wypadek śmiertelny porażenia prądem elektrycznym zdarzył się, podobno, we Francji w roku 1879 [1]\*).

W Polsce w ciągu lat czterech od r. 1933 do r. 1936 [2] statystyka podaje liczbę porażań w wysokości 291, w tym śmiertelnych 145. Przeciętnie więc na rok przypada porażań 73, w tym śmiertelnych 36.

Przyczyny porażań prądem podane w statystyce wskazują, że 21% wypadków zostało spowodowane przez wady w urządzeniach elektrycznych, 20,3% — przez nieostrożność osób porażonych, reszta zaś — 58,7% — pochodziła od braku dozoru, nieświadomości, przypadku, a wreszcie od zamiarów samobójczych. Porównując liczby statystyczne polskie z liczbami najlepiej opracowanych statystyk — szwajcarskich, przychodzimy do wniosku, że liczby zawarte w tych statystykach są podobne. W ciągu 10 lat (od 1925 do 1934 r.) w Szwajcarii [3] wypada przeciętnie rocznie 97 porażań prądem elektrycznym, w tym 28 osób porażonych śmiertelnie.

Z biegiem lat liczba osób porażonych nie wzrasta — pomimo rozszerzania się zasięgu elektryfikacji. Świadczy to zarówno o podniesieniu stopnia bezpieczeństwa urządzeń, jak i zwiększaniu się uświadomienia co do właściwej ich obsługi i wykorzystania. Mimo to jednak musimy przyznać, że mamy porażań, nawet śmiertelnych, sporo i, że w tych warunkach ważną jest sprawą pracować w dalszym ciągu nad udoskonalaniem bezpieczeństwa urządzeń elektrycznych oraz odpowiednim uświadomianiem osób obsługujących te urządzenia oraz korzystających z tych urządzeń. Prace w tym kierunku mogą być prowadzone skutecznie tylko wtedy, gdy będą wykorzystane wszystkie wiadomości, jakie ludzkość zdobyła w dziedzinie porażań prądem. Z tą właśnie myślą podaję,

w zwięzły i usystematyzowany sposób, wyniki badań i spostrzeżeń dokonanych w ciągu lat ostatnich oraz wypływające stąd wnioski.

### Działanie prądu na organizm ludzki

Ciało ludzkie stanowi zespół rozmaitych tkanek i naczyń zawierających w dużej obfitości płyny. Opór właściwy tkanek wynosi 80  $\Omega$  cm, krwi — 185  $\Omega$  cm [4, str. 9]. Liczby te podają Malow i Rszewkin — na podstawie pomiarów dokonanych prądem o częstotliwości 365 okr./sek. i więcej. Stąd wniosek, że prąd płynie głównie przez tkanki, a nie przez krew. Mówiąc o tkankach, należy mieć na myśli tkanki wewnętrzne, gdyż skóra, jak to wynika z licznych badań, ma niewątpliwie opór właściwy znacznie większy.

Przepluwając przez tkanki organizmu ludzkiego i zawarte w nich płyny, prąd elektryczny wytwarza ciepło według prawa Joule'a, rzadko się jednak zdarza, żeby ilości wytworzonego ciepła mogły być dla człowieka szkodliwe. Silne oparzenia lub nawet zwęglenia tkanek zdarzają się tylko w miejscach stykania się skóry z przewodami przy wysokich napięciach; wtedy często tworzą się łuki, spalające tkanki. Zaznaczyć przy tym należy, że oparzenia prądem goją się łatwo, w razie zaś uszkodzenia tkanek następuje nieraz bezbolesna samoamputacja [5]. Jedyne ścianki naczyń tracą nieco — na przeciąg czasu od 6 do 8 tygodni — na swej sprężystości [5] i z tego powodu należy unikać w tym czasie przewiązywania naczyń.

O wiele poważniejszą jest natomiast sprawa wywoływanych przez prąd zaburzeń funkcji organizmu. Najważniejszymi funkcjami są: obieg krwi — podtrzymywany przez ssąco-tłoczące działanie serca i oddychanie, wywoływane ruchami płuc. Prąd elektryczny może bowiem wstrzymać obieg krwi, wstrzymując działanie serca. Brak dopływu krwi do ośrodków nerwowych, rządzących ruchami płuc, wstrzymuje prawdopodobnie oddech.

Skutek działania prądu na funkcję organizmu zależy od częstotliwości prądu przepływającego przez organizm oraz od jego natężenia. Przy prądach znacznej częstotliwości rządzi znane w fizjologii prawo Nernsta, wg którego stopień oddziaływania prądu elektrycznego na organizm jest odwrotnie proporcjonalny do pierwiastka kwadratowego z częstotliwości prądu. Fizjology tłumaczą to zjawisko w następujący sposób: prąd oddziaływa na narządy przez wywoływanie zmian koncentracji w cieczach tkanek, stopień zaś zmian koncentracji maleje w miarę zmniejszania się okresu zmienności prądu, gdyż jony posiadają znaczną bezwładność [6].

Badania przeprowadzone nad wrażliwością serca u psów [7] wskazują, że prąd zatrzymujący bicie serca, posiada najmniejsze natężenie przy 40 okr./sek. Poza tym

\*) Cyfry w nawiasach kwadratowych mają swoje odpowiedniki w spisie literatury, który będzie podany w następnym zeszycie — po zakończeniu artykułu.



w innym źródle [8] znajdziemy wzmiankę, że najbardziej wrażliwy jest organizm ludzki na prądy o częstotliwości od 25 do 150 okr./sek., powyżej zaś 5000 okr./sek. staje się mało wrażliwy na działanie prądu.

Natężenie prądu wywiera, oczywiście, wpływ decydujący na skutek działania prądu. Wyniki wielu badań i spostrzeżeń w tym zakresie dadzą się sprecyzować w sposób następujący [9]:

Największe prawdopodobieństwo śmiertelnego porażenia prądem zmiennym o częstotliwości 50 okr./sek. zachodzi wtedy, gdy prąd ma natężenie ok. 0,14 A i przepływa np. od jednej ręki do drugiej, lub od ręki do nogi — słowem tak, aby na drodze prądu znajdowało się serce. Porażenie następuje tu skutkiem zatrzymania normalnego bicia serca i wprawienia ścianek komór w „drgawki faliste“ (Herzkammerflimmern, fibrillations ventriculaires); stąd, jako dalsza konsekwencja, następuje wstrzymanie oddechu i śmierć organizmu, gdyż po przerwaniu prądu, praca serca z powrotem nie występuje — śmierć jest na razie pozorna.

Sztuczne oddychanie oraz inne zabiegi używane przez lekarzy, zastosowane niezwłocznie, mogą pobudzić serce do bicia i przywrócić człowiekowi życie. Jeżeli jednak zatrzymanie obiegu krwi i oddechu trwa zbyt długo, człowiek umiera — na skutek uduszenia.

Co do czasu działania prądu, niezbędnego dla wywołania drgawek serca, to Alvensleben [10] wspomina, że u psów prąd o natężeniu dostatecznym dla spowodowania śmierci, przepływając w ciągu 0,5 sek., jeszcze nie wywoływał drgawek; powstawały one dopiero, gdy prąd przepływał dłużej. Jakkolwiek ilościowo przenosi tych wniosków na organizm ludzki nie można, to jednak wskazują one na to, że czas przepływu prądu posiada również pewne znaczenie.

Prądy o natężeniu znacznie większym od 0,14 A — np. kilka amperów — zatrzymują bicie serca, nie wywołując przy tym drgawek [10]. O ile przepływ prądu trwał krótko, serce wraca samo do normalnych ruchów bicia; jeżeli natomiast trwał on dłużej, to powrót serca do normalnych czynności staje się trudniejszy, a więc prawdopodobnie, może ono w ogóle do bicia nie wrócić. W każdym bądź razie dzisiejsze spostrzeżenia wyraźnie wskazują, że prądy o większym natężeniu są nieraz mniej niebezpieczne, niż prądy o małym natężeniu — w pobliżu 0,1 A [5]. Wszystkie podane wyżej liczby, dotyczące natężenia prądu, odnoszą się do prądu o częstotliwości 50 okr./sek.

Co się tyczy prądu stałego, to dokładnych danych brak; można spotkać jedynie ogólne uwagi, że prąd stały dla wywołania podobnych objawów w organizmie ludzkim posiadać musi natężenie kilkakrotnie większe od zmiennego, skąd wynikałoby, że jest on dla organizmu ludzkiego mniej groźny. Powyższe dane, dotyczące natężenia prądu grożącego człowiekowi śmiercią, należy uważać za próbę określenia tej wielkości, jako pewnej wartości średniej — spośród wielu wypadków.

Wobec tego, że skutek działania prądu elektrycznego na organizm człowieka zależy w wysokim stopniu od stanu fizycznego tego organizmu, a nawet od stanu psychicznego człowieka (strach, osłabienie), zdarzają się więc nieraz śmiertelne porażenia, nawet przy prądach o natężeniach znacznie mniejszych od podanych wyżej — np. ok. 0,01 A [5, str. 4].

Rozważając sprawę niebezpiecznego dla organizmu natężenia prądu, nie można jednak poprzestać na określeniu natężenia prądu, mogącego spowodować śmierć. Należy pamiętać, że już są niebezpieczne prądy o natężeniu znacznie mniejszym od podanych wyżej, które wy-

wołują *skurcze mięśni* tak silne, że człowiek nie ma możliwości odłączyć się od źródła prądu. Taki stan może spowodować pośrednio różne nieszczęśliwe wypadki, albo nawet i śmierć, szczególnie, gdy pływający przez dłuższy czas — przez organizm — prąd zwiększy się skutkiem zmniejszenia się oporu styków (pocenie się dłoni itd.) oraz samego ciała. Badania wielkości prądu zmiennego (przy częstotliwości 50 okr./sek.), wywołującego skurcze tak silne, że człowiek nie jest w stanie wysiłkiem własnej woli otworzyć dłoni i rozprostować ręki, a więc odłączyć się od przewodów, wykazały, że najmniejsze natężenie prądu, które może wywołać tego rodzaju skurcze, wynosi 0,015 A [11] i [8]. Najdokładniejsze badania w tym zakresie przeprowadzono w Szwajcarii. L. Kervran, który przeprowadzał tego rodzaju doświadczenia we Francji [8] podaje, że gdy prąd o natężeniu 0,0116 A przepływał przez prawą rękę i prawą nogę, to noga zemdląła pierwsza, gdyż jest bardziej wrażliwa od ręki. Przy prądzie stałym, badania autora, przeprowadzone jeszcze przed kilkunastu laty, wykazały, że przy prądzie 0,016 A, skurcz nie występował, lecz jedynie silne „mrowie“. Jednakże doświadczenia przeprowadzone w Szwajcarii wskazują, że dla wielu osobników prąd stały o natężeniu 0,012 A [11] stanowił granicę natężenia, jakie można jeszcze było wytrzymać.

Na zakończenie rozważań co do wielkości natężenia prądu niebezpiecznego dla organizmu, należy dodać, że i w tym przypadku stan fizjologiczny oraz psychiczny człowieka wywiera zawsze wpływ na skutek działania prądu. Mocna budowa ciała oraz mocne nerwy sprzyjają wytrzymałości organizmu na prąd elektryczny. Alkohol wytrzymałość tę wybitnie osłabia.

Ponieważ decydujący wpływ na wielkość prądu, przepływającego przez człowieka, wywiera opór ciała ludzkiego, więc dla zdecydowania, jakie urządzenia i w jakiej mierze są niebezpieczne, konieczne jest uwzględnienie tego oporu; w tym celu należy zapoznać się z dokładnymi liczbami, wyrażającymi ten opór.

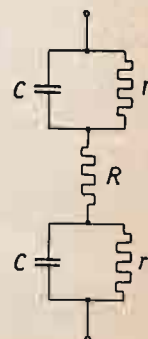
### Opór elektryczny ciała ludzkiego

Praktyczne znaczenie opór ciała ludzkiego posiada przede wszystkim przy przepływanym prądzie elektrycznym od ręki do ręki lub od ręki do nogi.

Pomiarów oporów ciała ludzkiego przeprowadzono bardzo wiele; najbardziej usystematyzowane pomiary w szerokich granicach napięcia przeprowadził Dr inż. H. Freiburger w laboratoriach Berlińskich Elektrowni Miejskich w r. 1934, omawiając następnie wyniki tych pomiarów łącznie z ich opisem [4]. Wyniki te są na ogół zgodne z innymi badaniami.

Szeroki zakres napięcia przy swych próbach osiągnął Dr Freiburger, badając przy niskich napięciach opór ciał ludzi żywych, przy wysokich zaś — ludzi umarłych. Ekstrapolując zmierzone wielkości oporu ciała nieżywego do temperatury 37°C ciała żywego oraz zwilżając odpowiednio skórę, autor zdołał nawiązać wyniki pomiarów dokonane na ludziach umarłych do wyników uzyskiwanych na ludziach żywych.

Ogólny schemat zastępczy ciała ludzkiego pod względem przewodności elektrycznej pokazany jest na rys. 1:  $R$  — jest to opór wewnętrzny ciała człowieka; opory  $r$  — rzeczywiste, łącznie z pojem-



Rys. 1.  
Schemat zastępczy ciała ludzkiego pod względem przewodności elektrycznej.



nościami  $C$  odpowiadają skórze człowieka na jednej i drugiej kończynie. Własności pojemnościowe skóry są właściwie pozorne, gdyż wynikają nie na skutek pojemności elektrostatycznej, lecz na skutek polaryzacji elektrochemicznej. Siła elektromotoryczna polaryzacji wyprzedza w fazie prąd o kąt większy od  $90^\circ$  i przez to, dodając się do rzeczywistego spadku napięcia z odwrotnym znakiem, sprawia, że prąd wyprzedza w fazie napięcie — podobnie, jak ma to miejsce w kondensatorze. Wartości pozornej tej pojemności  $C$  oraz oporu  $r$  przy różnych napięciach  $U$ , przyłożonych do ciała ludzkiego — dla pewnego przypadku — dla jednej warstwy skóry żywej na dłoniach, podane są poniżej w tabeli (według Freibergera [4, str. 60]).

skóra	$U$ (V)	$r$ ( $\Omega/\text{cm}^2$ )	$C$ ( $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ )
wilgotna	6,30	158,400	0,02
	15,5	94,500	0,024
	16,9	103,000	0,028
sucha	20,7	107,000	0,018
	27,4	95,400	0,017

W tych warunkach przeciętny opór rzeczywisty na powierzchni  $60 \text{ cm}^2$  wyniesie  $1850 \Omega$ , a opór urojony pojemnościowy  $2500 \Omega$ ; stąd opór pozorny przy równoległym połączeniu —  $1500 \Omega$ , mało różniący się od oporu rzeczywistego. Opory więc dla prądu stałego i zmiennego niewiele od siebie się różnią. Powyższa pozorna pojemność maleje w miarę wzrostu napięcia, skutkiem zmian własności skóry, — tak, że przy napięciach wyższych od  $250 \text{ V}$  opór ciała dla prądu zmiennego 50-okresowego i stałego jest ten sam [4]. Jak widzimy więc, na szczególną uwagę zasługuje zachowanie się skóry pod wpływem prądu.



Rys. 2. Przekrój skóry ludzkiej.

Na rys. 2 pokazany jest przekrój skóry, w którym rozróżniamy cztery warstwy, a mianowicie:

1. naskórek — warstwa zrogowaciała, posiadająca jednak pory, przez które przenika pot;
2. warstwę rozrodczą — miękką, soczystą, połączoną z nerwami i naczyniami;
3. tkankę łączną, sprężystą oraz
4. tkankę tłuszczową.

Znaczny opór właściwy posiada jedynie naskórek (1), jak to wynika wyraźnie z przeprowadzonych pomiarów [4, str. 32 — 36]. W pewnym przypadku otrzymano przy pomiarach następujące opory ciała pomiędzy lewą dłońią a prawą stopą:

Napięcie prądu	Opór ciała
10 V	143.000 $\Omega$
772 V	741 $\Omega$

Po zdjęciu naskórka opór ciała wyniósł:

Napięcie prądu	Opór ciała
10 V	641 $\Omega$
752 V	579 $\Omega$

Po zdjęciu całej skóry opór ciała wyniósł:

Napięcie prądu	Opór ciała
10 V	636 $\Omega$
766 V	582 $\Omega$

Sledząc przebieg zmian oporu w zależności od zmiany napięcia, przekonano się, że ze wzrostem napięcia opór ciała ludzkiego maleje — początkowo powoli, po czym — w granicach zmiany napięcia od  $100 \text{ V}$  do  $300 \text{ V}$  — spadek oporu jest bardzo znaczny, potem zaś stopniowo coraz mniejszy, powyżej zaś  $700 \text{ V}$  opór jest już niemal stały. Znikają również ze wzrostem napięcia własności pojemnościowe; najwidoczniej naskórek ulega stopniowemu przebicciu prądem. Szybkie przebiccie naskórka na dłoniach i stopach ciała odbywa się właśnie przy napięciach prądu w granicach od  $100$  do  $300 \text{ V}$ .

Na skórkach cieńszych, w innych częściach ciała, stwierdzono początek przebiccia przy napięciach znacznie niższych — od  $10$  do  $20 \text{ V}$ ; przy  $200 \text{ V}$  przebiccie jest już tu kompletne.

Doświadczenia przeprowadzone w Szwajcarii na ludziach żywych przy napięciach kilkudziesięciu woltów [11] dały wartości graniczne na opór skóry dłoni i stopy od  $22.500 \Omega/\text{cm}^2$  do  $180.000 \Omega/\text{cm}^2$ . Rozumowano przy tym w następujący sposób: skoro prąd płynie przez ciało ludzkie, przenikając dwukrotnie przez skórę, która stanowi główny opór, — można więc opór ciała wewnątrz skóry pominąć i obliczyć — w przybliżeniu — ogólny opór ciała, jako podwójny opór skóry. Dla powierzchni styku  $30 \text{ cm}^2$  wypadnie:

opór największy:

$$\frac{180.000}{30} \times 2 = 12.000 \Omega;$$

opór najmniejszy:

$$\frac{22.500}{30} \times 2 = 1.500 \Omega.$$

Dla ciała zanurzonego w kąpielii można przyjąć wielkość powierzchni styku z wodą  $15.000 \text{ cm}^2$ ; ponieważ zaś powierzchnia styku dłoni z przewodnikiem wynosi —  $30 \text{ cm}^2$ , więc opór ciała w tych warunkach wypadnie:

$$\frac{22.500}{15.000} + \frac{22.500}{30} = 751,5 \Omega.$$

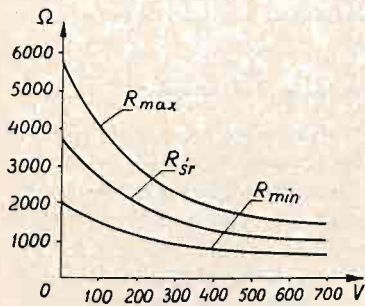
Bardziej szczegółowe badania [4, str. 85], dokonane przy napięciach powyżej  $150 \text{ V}$ , wskazują, że wówczas opór ciała wewnątrz skóry odgrywa główną rolę, gdyż skóra jest przebita. Gdy prąd płynie od ręki do nogi, to większa część oporu ciała ześrodkowana jest w rękę i w nodze.

Czas przepływu prądu przy średnich napięciach powoduje następujące zmiany w oporze ciała: w pierwszych sekundach opór znacznie maleje, gdyż odbywa się stopniowe przebijanie naskórka; po upływie 2 czy 3 sekund opór, na razie, ustala się. Potem dalej opór stopniowo maleje — skutkiem ogrzewania się głównie stawów i miejsc styku z elektrodami. Po pewnym czasie opór może jednak znów wzrosnąć — z powodu wysychania styków.

Jako wartości przeciętne, do dalszych rozważań przyjmijmy dane z wykresów Freibergera [4], wyrażające — w zależności od napięcia — opory ciała ludzkiego, obliczone, jako średnie wartości z wielu pomiarów nad osobnikami rozmaitej wielkości i tuszy, po upływie kilku sekund od chwili włączenia prądu. W myśl poprzednio podanych uwag opory te są miarodajne zarówno dla prądu stałego, jak i dla prądu zmiennego 50 okr./sek.



Wielkości podanych oporów są te same dla drogi prądu od ręki do nogi, jak i między rękami. Elektrody dotykały tu całej dłoni oraz całej gołej stopy. Opór ciała



Rys. 3.

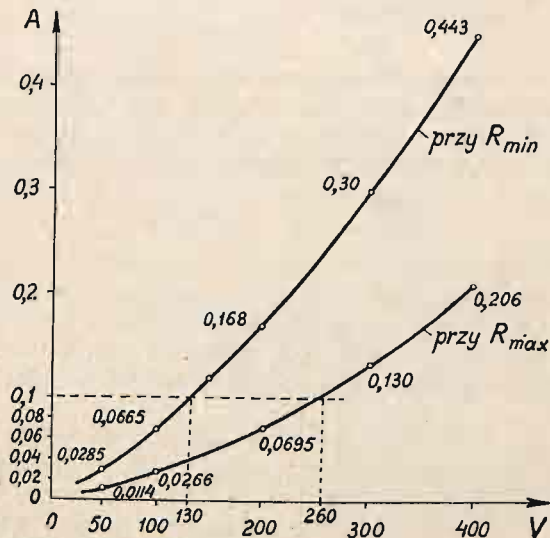
Wykresy oporu ciała ludzkiego w zależności od przyłożonego napięcia.

gdzie:  $R$  — opór,  $k$  — stała,  $U$  — napięcie przyłożone do oporu.

Pomiędzy krzywą  $R_{max}$  a  $R_{sr}$  (rys. 3) zawarte są opory przy stykach suchych i stawach słabych; pomiędzy  $R_{sr}$  i  $R_{min}$  — zawarte są opory przy stykach zwilżonych oraz mocnych stawach.

### Jakie napięcie prądu grozi śmiercią?

Posługując się oporami podanymi na wykresie (rys. 3), obliczymy przy odpowiednich napięciach wielkości prądów. Prądy w ten sposób obliczone podane są na wykresie rys. 4, który przedstawia zmianę natężenia prądów odpowiednio do zmiany przyłożonego napięcia. Z przebiegu krzywych widać, że prądy rosną szybciej, aniżeli przyłożone napięcie. Przy najmniejszych oporach prądy wypadną jeszcze większe, o ile uwzględnimy, że w porównaniu do danych z rys. 3, opór ciała ludzkiego może być jeszcze o 25% mniejszy przy przejściu prądu od ręki do obu stóp.



Rys. 4.

Zależności prądu od wysokości przyłożonego napięcia dla  $R_{min}$  i  $R_{max}$ .

Mając to wszystko na względzie, oraz założywszy, że ciało człowieka niczym nie jest chronione od prądu i ma dobre styki z obu biegunami, prąd zaś wywołujący porażenie śmiertelne wynosić będzie okrągło 0,1 A, otrzymamy *granice napięcia grożącego śmiercią*:

od 98 do 260 V.

Napięcia niższe od 98 V i wyższe od 260 V są w powyższych warunkach mniej niebezpieczne.

Na uwagę zasługuje zestawienie śmiertelnych porażań, jakie zdarzyły się przy wysokim i niskim napięciu za 4 lata w Polsce.

Rodzaj napięcia	Ogólna liczba porażań	Liczba porażań śmiertelnych	% śmiert.
Napięcie wysokie .	81	32	39
Napięcie niskie . .	174	94	54

Procentowe liczby porażań śmiertelnych wskazują na większe niebezpieczeństwo napięć niskich dla człowieka. Nie zawsze jednak dane statystyczne dają podobne wyniki. Na podstawie statystyki szwajcarskiej wypadło na przykład:

Rodzaj napięcia	Ogólna liczba porażań	Liczba porażań śmiertelnych	% śmiert.
Napięcie wysokie .	70	15	21,4
Napięcie niskie . .	48	11	23,0

Na podstawie danych statystycznych, zebranych w Niemczech dla zawodu mechaników precyzyjnych i elektrotechników za trzy lata [4] wypadło:

Rodzaj napięcia	Ogólna liczba porażań	Liczba porażań śmiertelnych	% śmiert.
Napięcie wysokie .	517	124	24
Napięcie niskie . .	661	80	12

W każdym razie należy zabezpieczać starannie przewody wysokiego napięcia, gdyż przy wysokim napięciu łatwiej o wypadek; tu bowiem prąd groźny dla życia ludzkiego popłynie już przez styk słaby, przez słabą izolację lub nawet przez iskrę, która przeskoczy do ciała ludzkiego. Powstają tu również znaczne prądy pojemnościowe. Można więc np. ulec porażeniu, dotykając przewodów wyłączonych z pod prądu, o ile przebiegają one na znacznej długości w pobliżu innych przewodów, znajdujących się pod prądem wysokiego napięcia.

We wszystkich wymienionych wyżej przypadkach, przy wysokim napięciu na przewodach urządzenia elektrycznego, na ciełe człowieka wypaść może napięcie niskie — w podanych wyżej granicach, grożące śmiercią.

Poza tym zwarcie przewodów przez ciało ludzkie przy wysokim napięciu, nawet nie powodując porażań śmiertelnych, łatwo wywołać może łuki o wysokiej temperaturze, całkowicie spalające tkankę żywą — tak, że czasem trzeba dokonywać amputacji spalonych członków ciała.

### Jakie napięcie prądu jest niebezpieczne?

W podobny sposób, jak obliczyliśmy granice napięcia, grożącego śmiercią, znajdziemy również najniższe napięcie niebezpieczne.

Ze względu na silne skurcze mięśni, których nie można przezwyciężyć, prąd znacznie mniejszy od 0,1 A staje się już niebezpieczny. Na zasadzie poprzednio podanych wyników doświadczeń można przyjąć — zarówno dla prądu zmiennego, jak i dla stałego, niebezpieczną wartość natężenia prądu — 0,015 A.



Z wykresów na rys. 4 według linii dolnej wypada że prąd 0,015 A powstanie przy napięciu 66 V i oporze ciała 4.400  $\Omega$ , a według linii górnej taki sam prąd powstanie już przy napięciu 27 V i oporze ciała 1.800  $\Omega$ , jeżeli jednak uwzględnić możliwość obniżenia się oporu jeszcze o 25%, to najniższe napięcie wywołujące prąd niebezpieczny będzie: 21 V.

Badania szwajcarskie wskazują, że najniższe napięcie, przy którym mogą powstać niebezpieczne prądy, gdy ręce są mokre, wynosi 22,5 V.

Dla osoby znajdującej się w wannie opór obwodu elektrycznego według poprzednich obliczeń, obniża się do 752  $\Omega$ , więc w tym wypadku niebezpieczne napięcie wyniesie już tylko: 11,3 V. Zazwyczaj jednak ciało człowieka jest mniej lub więcej chronione od prądu przejściowymi oporami, przeto napięcia urządzeń elektrycznych mogą być wyższe od poprzednio obliczonych.

Kiedy te napięcia staną się niebezpieczne, zależy od różnych okoliczności, w jakich mogą się znaleźć ludzie obsługujący lub korzystający z urządzeń elektrycznych. Tę sprawę poruszamy szczegółowo w dalszych naszych rozważaniach.

### Jak człowiek znaleźć się może pod działaniem prądu?

Można wyróżnić siedem ważniejszych przypadków, jakie spowodować mogą znalezienie się człowieka pod działaniem prądu elektrycznego.

— 1. Człowiek ujmując rękoma przewody przeciwnych biegunów, co jednak zdarza się w praktyce bardzo rzadko. Skutki działania prądu przy pospolicie stosowanych napięciach są w tym wypadku groźne: przeważnie prąd powoduje wstrzymanie działania serca, więc na razie śmierć „pozorna“, która — w razie braku natychmiastowej pomocy i dłuższego czasu przepływu prądu może łatwo przejść w stan ostateczny, z którego człowieka już się nie da uratować.

Skutki działania prądu w tych warunkach zależą w znacznej mierze od doskonałości styku rąk z przewodami, od grubości naskórka na dłoniach oraz od czasu stykania się rąk z przewodami.

— 2. Człowiek, stojąc na ziemi, dotyka ręką lub jakąkolwiek górną częścią swego ciała jednego przewodu urządzenia elektrycznego. Skutek takiego dotknięcia zależy od doskonałości styku z przewodem, od kontaktu nóg z ziemią oraz od stanu izolacji wszystkich przewodów.

Najsilniejsze porażenie nastąpi wtedy, gdy przewód, do którego człowiek dotknął, będzie izolowany najlepiej, przewody zaś innego bieguna — najgorzej.

Należy tu również przypadek, gdy, dotykając jedną częścią ciała przewodu, dotykamy jednocześnie — inną częścią ciała — przedmiotu uziemionego.

— 3. Dotknięcie kadłuba, względnie osłony metalowej maszyn lub przyrządów elektrycznych może również wywołać porażenie, gdyż kadłub może mieć względem ziemi niebezpieczne napięcie. Skutki dotknięcia w tych warunkach zależą od stanu izolacji przewodów, będących pod prądem, od kadłuba, izolacji kadłuba od ziemi oraz izolacji przewodów względem ziemi.

— 4. Jednoczesne dotknięcie dwóch osłon, które mogą być chwilowo połączone z przeciwnymi biegunami urządzenia elektrycznego, jest równoznaczne z przypadkiem wymienionym w p. 1.

— 5. Dotknięcie przedmiotów czasowo stykających się z przewodami — np. słupów w czasie ustawiania, gałęzi drzew itp.

— 6. Znalezienie się w polu elektrycznym uziemień, przez które przepływa znaczny prąd; wówczas spadek napięcia pomiędzy stopami człowieka — w pobliżu uziemienia — może osiągnąć wartość niebezpieczną, wywołując prąd o niebezpiecznej wartości, przepływający po nogach.

— 7. Dotknięcie przewodu, który nie jest wprawdzie połączony ze źródłem prądu, lecz przebiega w pobliżu innego przewodu, będącego pod wysokim napięciem.

(Dokończenie nastąpi).

## Straty dodatkowe w uzwojeniach transformatorów w zależności od nagrzania

Inż. Zbigniew Kopczyński

Praca niniejsza jest dalszym ciągiem doświadczeń ogłoszonych w roku ub. w „Przeglądzie Elektrotechnicznym“ (\*). Chodzi w niej o ustalenie, jak zmieniają się straty dodatkowe w miedzi w zależności od nagrzania, doświadczenia bowiem na normalnych transformatorach siłowych wykazywały, że straty te bynajmniej nie maleją przy wzroście temperatury uzwojeń, jak to wynika ze wzorów la Coura, Richtera, Vidmara i inn., oraz jak to podają przepisy PNE-33.

Do doświadczeń został użyty transformator specjalny, opisany już poprzednio w wymienionej wyżej pracy\*), jednofazowy płaszczowy, suchy, o mocy 210 kVA, o przekładniach: napięcie 1200/1200V i prądów 175/175 A; uzwojenie transformatora — walcowe, składające się zarówno po stronie pierwotnej, jak i wtórnej, z 5-ciu warstw zwojów, które mogą być łączone równolegle lub szeregowo. Rys. 1 przedstawia omawiany transformator z zaznaczonymi na nim głównymi wymiarami.

Liczba zwojów w każdej warstwie  $n = 200$ . Do wykonania obu uzwojeń zastosowano przewód miedziany,

prostokątny, o wymiarach  $5,2 \times 2,1$  mm<sup>2</sup>, przy czym nawinięto go na płask, to znaczy, że szerszy jego bok ustawiono prostopadle do linii sił pola rozproszenia.

Wszystkie pomiary przeprowadzono przy połączeniu pięciu warstw równolegle z włączonymi w nie amperomierzami — celem ustalenia rozkładu prądów, przy czym zasilaną była zawsze strona wewnętrzna uzwojenia, zewnętrzna zaś — zwarta.

### Pomiar 1.

Pomiar ten przeprowadzono w temperaturze 20° C. Schemat połączeń pokazany jest na rys. 2. Oporność uzwojenia wewnętrznej z włączonymi w nie amperomierzami, wyniosła  $R_w = 0,0449$   $\Omega$ , zaś zewnętrznej  $R_z = 0,0623$   $\Omega$  tak, że oporność zwarcia  $R_{zw} = R_w + R_z = 0,1072$   $\Omega$ . Oporności poszczególnych warstw \*), wraz z amperomierzami, wynosiły przy temperaturze 20° C.:

\*) Wskaźnik 1 odnosi się do warstw najbardziej zbliżonych do szczeliny powietrznej  $\delta$ , zaś wskaźnik 5 — do warstw najbardziej oddalonych od tej szczeliny.

\*) Zeszyt 12/1938 r. (zjazdowy), str. 334.