

## DZIAŁ ELEKTROWNIANY.

### DRZEWO JAKO MATERJAŁ IZOLACYJNY W BUDOWIE LINII WYSOKIEGO NAPIĘCIA.

Inż. Stanisław Gleszczykiewicz.

Pomorska Elektrownia Krajowa „Gródek”.

**Streszczenie.** Na podstawie badań i doświadczeń, wykonanych i zebranych głównie w Ameryce, wykazano, że drzewo posiada znakomite własności izolacyjne dla fal udarowych. Wilgoć, zanieczyszczenie, rodzaj drzewa i nasycanie nie wpływa na te własności. Drzewo jest zatem nadzwyczaj cennym materiałem w budowie linii wysokiego napięcia, gdyż fale udarowe, powstające wskutek przepięć atmosferycznych, stanowią dla nich najgroźniejsze niebezpieczeństwo. Przy racjonalnej konstrukcji, umiejętnie wykorzystującej własności izolacyjne drewnianych części konstrukcji wsporczej, można uzyskać duży stopień bezpieczeństwa i uniknąć uszkodzeń. Podano główne wytyczne, jakimi można się kierować przy projektowaniu różnych typów linii elektrycznych napowietrznych.

#### I. Wstęp.

Stosowanie drzewa w budowie elektrycznych linii napowietrznych datuje się od samych początków przesyłania energii elektrycznej. Jednakże do niedawna traktowano drzewo przedewszystkiem jako tani materiał wsporczy, nie zdając sobie jasno sprawy z jego własności izolacyjnej, podkreślając natomiast często jego wady, a mianowicie możliwość spalania drewnianej konstrukcji wsporczej, zwłaszcza wskutek upływu prądu, jak również ograniczony okres trwałości, spowodowany gniciem. Dopiero badania, przeprowadzone w ostatnich latach na szerszą skalę (prawie wyłącznie w laboratoriach w Stanach Zjednoczonych), jak również celowe pomiary, próby i obserwacje, zebrane w praktyce, rzuciły dużo światła na tę ogromnie cenną właściwość drzewa, jaką jest jego zdolność izolacyjna zwłaszcza dla fal udarowych.

Badania, o których wspominałem, są u nas stosunkowo mało znane, to też w budowie linii wysokiego napięcia stosuje się często konstrukcje nieracjonalne pod względem elektrycznym albo też wykorzystuje się własności izolacyjne drzewa zupełnie przypadkowo. Sprawę własności izolacyjnych drzewa pomijają milczeniem również „Przepisy techniczne na linie elektryczne prądu silnego”, wydane przez Ministra Robót Publicznych 26 kwietnia 1932 r., które traktują drzewo jedynie jako drugorzędny materiał wsporczy i ograniczają możliwość stosowania go w pewnych wypadkach. Stanowisko to wobec nowszych badań nie jest, moim zdaniem, uzasadnione i wpływa na hamowanie postępu elektryfikacji.

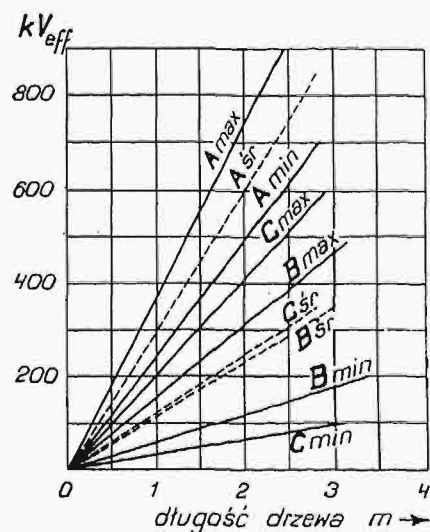
Zapatrzywania na budowę linii wysokiego napięcia, a w szczególności na ich izolację, uległy gruntownej zmianie, odkąd przeprowadzono pomiary i obserwacje w praktyce, umożliwiające bliższe poznanie zarówno jakościowe jak i ilościowe zjawisk przepięciowych, grających dominującą rolę w technice przesyłania energii elektrycznej przy pomocy przewodów napowietrznych. Stwierdzono, że wbrew daw-

niejszym przypuszczeniom przepięcia, powstające w ruchu wskutek łączeń i t. p., nie stanowią niebezpieczeństwa dla linii przesyłowych. Głównym źródłem zaburzeń są dla linii przepięcia, powstające wskutek uderzenia pioruna czy to w pobliżu linii, czy też bezpośrednio w linie elektryczną, przyczem te ostatnie stanowią dla ruchu niebezpieczeństwo znacznie poważniejsze. Z powyższego jasno wynika, iż podstawowym warunkiem bezpieczeństwa ruchu linii elektrycznej napowietrznej jest wykonanie takie, aby była ona zupełnie pewna na pioruny (lightning proof).

Na podstawie analizy statystyk i obserwacji zauważono, że linie wysokiego napięcia, wykorzystujące własności izolacyjne drzewa, dają wyniki lepsze, aniżeli linie z uziemionymi konstrukcjami wsporczy, przy zastosowaniu izolatorów porcelanowych tej samej wielkości i typu. Obserwacje te były powodem podjęcia gruntowniejszych studiów nad drzewem jako materiałem izolacyjnym.

#### II. Drzewo jako izolator dla prądu zmiennego.

Stwierdzono, że drzewo zachowuje się zupełnie inaczej przy próbach, przeprowadzonych przy zastosowaniu prądu zmiennego o częstotliwości 60 okresów na sekundę, inaczej przy próbach przy pomocy fal udarowych. W razie przyłączenia napięcia na stałe, własności izolacyjne drzewa zależą w dużej mierze od rodzaju drzewa, sposobu przygotowania go, zawartości wilgoci i zanieczyszczeń, przyczem istnieje niebezpieczeństwo, że upływ prądu może spowodować



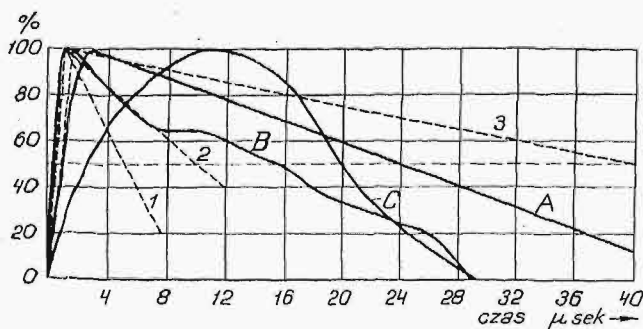
Rys. 1.

Napięcie przeskoku (wartość skuteczna) poprzeczek jodłowych, zmierzone prądem zmiennym o 60 okr./sek. Krzywe, oznaczone literą „A” dotyczą poprzeczek z drzewa wysuszonego, „B” — z drzewa surowego, „C” — z drzewa mokrego.

spalenie drzewa. Nasycając drzewa olejem smołowym nie wpływa znacznie na zmianę jego własności izolacyjnych. Na rys. 1 podano wyniki, osiągnięte przez inżynierów amerykańskich<sup>1)</sup> przy próbach, dokonanych na poprzeczkach drewnianych przy rozmaitym odstępie elektrod: przy zastosowaniu drzewa wysuszonego (seasoned), drzewa niewysuszonego (unseasoned) i drzewa mokrego. Widzimy, że dla drzewa suchego napięcie przeskoku dochodzi do jedenastokrotnej wartości napięcia dla drzewa mokrego. O ileby zatem chodziło o izolację dla prądu zmiennego, to byłoby zrozumiałe, że niewiele można spodziewać się od drzewa, którego wytrzymałość elektryczna jest tak zależna od wilgoci i różnych przypadkowych warunków. Zaznaczyłem jednak już poprzednio, że izolacja linii napowietrznej, jeżeli ma ona wytrzymać przepięcia atmosferyczne, nie zależy od napięcia ruchu, ale od całego szeregu czynników innych, jak: wysokość przewodów nad ziemią, wzniesienie i konfiguracja terenów, przez które przebiega linia, warunki atmosferyczne i geologiczne i t. d., a zatem od wszystkich czynników, decydujących o przepięciach atmosferycznych, na jakie linia będzie narażona w czasie pracy. Izolacja, jaką zapewniają w praktyce izolatory porcelanowe lub szklane, jest zazwyczaj wystarczająca, aby zapobiec zaburzeniom, spowodowanym przez przepięcia, zależne od napięcia ruchu.

### III. Fale udarowe w praktyce i w laboratorium.

Wskutek przepięć atmosferycznych na liniach powstają fale udarowe wędrowne. Przy pomocy oscylografów katodowych zarejestrowano cały szereg takich fal na liniach przesyłowych. Na rys. 2 przedstawiono charakterystyczny



Rys. 2.

Fale udarowe, zdjęte w praktyce w roku 1929 w Wallenpaupack, oraz fale laboratoryjne, znormalizowane przez AIEE. „A” fala o czole i grzbiecie równym średniej z 35 najwyższych zarejestrowanych. „B” typowa fala o czole stromym. „C” typowa fala o czole łagodnym. 1 fala znormalizowana  $1 \times 5$  mikrosekund; 2 fala znormalizowana  $1 \times 10$  mikrosekund; 3 fala znormalizowana  $1,5 \times 40$  mikrosekund.

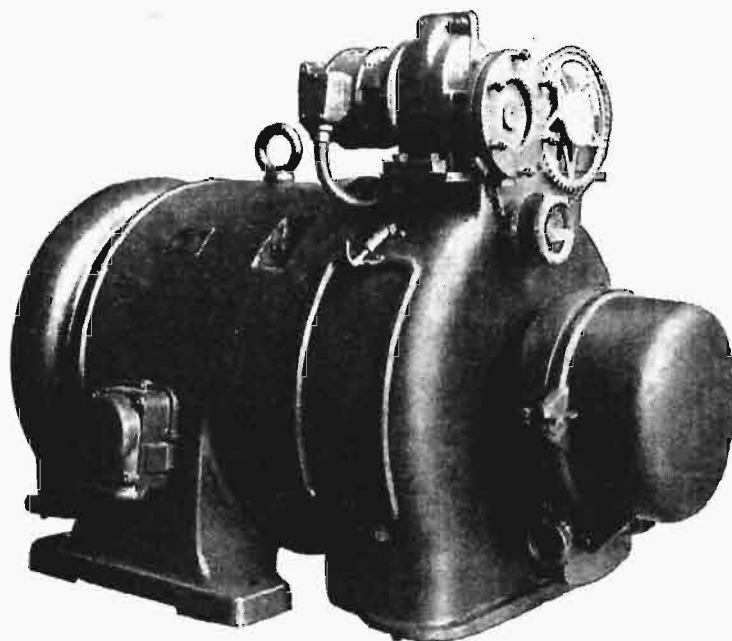
kształt fal, zdjętych na liniach Pennsylvania Power & Light Co w okolicy Wallenpaupack<sup>2)</sup>. Przebieg fali charakteryzuje się tak zwanym „czołem” (front), wysokością napięcia i „grzbietem” (tail) fali. Jak widać, fale zarejestrowane znacznie się od siebie różnią.

Aby zdać sobie sprawę z tego, jak zachowywać się będą pod wpływem przepięć linie o rozmaitej konstrukcji i w rozmaity sposób izolowane, konieczne jest przeprowadzenie prób, polegających na poddawaniu słupów danej konstrukcji normalnie uzbrojonych działaniu fal, których kształt odpowiada kształtowi fal, występujących w praktyce, przy czym korzystne jest również zbadanie, jak zachowywać się będzie łuk prądu zmiennego, następujący po łuku, wywołanym

nym falą udarową. Opierając się jedynie na tego rodzaju próbach, można konstrukcji nadawać odpowiednie wymiary i ustalać izolację całego ustroju. Zrozumiałe jest, że nie pomoże wysoka izolacja części ustroju, gdy dopuści się cały szereg punktów słabych, będących później powodem zaburzeń. Badanie izolacji przy pomocy fal udarowych przeprowadzono w dużym zakresie w różnorodny sposób w rozmaitych laboratorjach, próbując zarówno poszczególne czony ustroju, jak również badając je w różnych układach. Fale udarowe otrzymywano przy pomocy odpowiednich urządzeń, których główna zasada polega na tem, że ładuje się baterję kondensatorów równolegle, a następnie wyładowuje się ją szeregowo, przy czem szeregowo połączenie zostaje uskutecznione samoczynnie przez iskierniki, działające w chwili, gdy napięcie na kondensatorach dojdzie do odpowiedniej wysokości. Przez szeregowo połączenie otrzymuje się wielokrotność napięcia jednego kondensatora, odpowiadającą ilości kondensatorów, połączonych szeregowo. Przez różnorodną konstrukcję i dobór poszczególnych danych urządzenia można uzyskać rozmaite fale udarowe. Doniedawna panowała znaczna rozbieżność, przy czem wyników, osiągniętych w różnych laboratorjach, nie można było porównywać i korzystanie z nich dla celów konstrukcyjnych było znacznie utrudnione, gdyż napięcie przeskoku zależy zarówno od wysokości napięcia, szybkości podnoszenia napięcia, czasu trwania, jak i biegunowości fali, a zatem od tylu czynników, że rachunkowe uwzględnienie ich nie jest dziś możliwe. Z końcem roku 1932 Podkomitet przepięć atmosferycznych i izolatorów AIEE (Subcommittee on Lightning and Insulators) wystąpił z propozycją<sup>3)</sup> normalizacji fal udarowych, zalecając stosowanie fal  $0,5 \times 5$  mikrosek.,  $1 \times 10$  mikrosek.,  $1,5 \times 40$  mikrosek. Pierwsza cyfra oznacza czas w mikrosekundach od zera do osiągnięcia szczytu, druga od zera do punktu na „grzbiecie” fali, w którym napięcie równe jest połowie napięcia szczytowego. Z początkiem roku 1933 Podkomitet wydał instrukcje obszerniejsze<sup>4)</sup>, zmieniając fale, jak następuje:  $1 \times 5$  mikrosek.,  $1 \times 10$  mikrosek.,  $1,5 \times 40$  mikrosek. Uczyniono to z tego powodu, że osiągnięcie szczytu w ciągu ułamka mikrosekundy nastęczało w niektórych laboratorjach poważne trudności. Jak widać z rys. 2, fale te w stopniu dostatecznym odpowiadają falom, zarejestrowanym w praktyce. Ponieważ na liniach stwierdzono zarówno fale dodatnie, jak i ujemne, to, aczkolwiek napięcia przeskoku dla fal dodatnich są naogół niższe, zaleca się jednak przeprowadzenie pomiarów przy pomocy fal obu biegunowości, aby w ten sposób osiągnąć całkowity obraz własności izolacyjnych badanego obiektu. Pomiar można przeprowadzać w sposób rozmaity. Najbardziej celowe jest zdejmowanie charakterystycznych krzywych napięcia przeskoku izolacji (voltage flashover characteristic of insulation) w zależności od czasu, po którym następuje przeskok. Do zdjęcia tych krzywych należałoby właściwie użyć idealnych fal prostokątnych o czole prostopadłym, zwiększając stopniowo wysokość napięcia i na podstawie oscylogramów ustalając czas do przeskoku. Wykreślenie krzywej, zbudowanej na podstawie odnosnych oscylogramów, jest bardzo proste, jak to widzimy na rys. 3a. Ponieważ w praktyce osiągnięcie fali prostokątnej nie jest możliwe, przeto krzywą charakterystyczną można otrzymać, posługując się falą o czole pochyłym, zbliżoną do fali prostokątnej. Zwiększając amplitudę fali udarowej, uzyskuje się czasy przeskoku coraz krótsze; opierając się na oscylogramach, wykreśla się odpowiednią krzywą tak, jak pokazano na rys. 3b. Można wreszcie zbudować krzywą, posługując się falami o czole wznoszącym się ze stałą szybkością, przy czem zmienia się pochyłość czoła poszczególnych fal. Przeskok następuje na „czoło” fali, a nie na „grzbiecie”, jak w przypadku, pokazanym na rys. 3a i 3b. Sposób wy-

<sup>1)</sup> Spis części literatury, którą się posługiwałem, podałem na końcu artykułu.

# ASEA



Motor 3-fazowy budowy zamkniętej z pierścieniami okapturzonemi.

## SILNIKI KOMUTATOROWE

Trójfazowe silniki komutatorowe przedstawiają najtańszy sposób napędu we wszelkich wypadkach, gdzie zachodzi potrzeba napędu z regulacją obrotów. Zmiana ilości obrotów odbywa się za pomocą przesuwania szczotek po kolektorze. Powyższa regulacja nie powoduje strat energii elektrycznej. Nasze silniki komutatorowe są wynikiem wieloletnich doświadczeń i odznaczają się pewnością ruchu i celową konstrukcją; zdobywają one coraz większe rozpowszechnienie.

Przy zapotrzebowaniu silników do regulacji obrotów prosimy zwrócić się do nas, a chętnie służymy bezpłatnymi projektami i kosztorysami.

## POLSKIE TOWARZYSTWO ELEKTRYCZNE ASEA

Sp. Akc.

Warszawa,

Mazowiecka 1



*pompy  
Turbinowe*

**INŻ. STEFAN TWARDOWSKI**

WARSZAWA  
UL. GROCHOWSKA 37

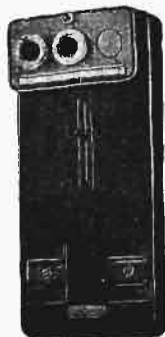
## MAKOWSKI i ZAUDER

SP. Z OGR. ODP.

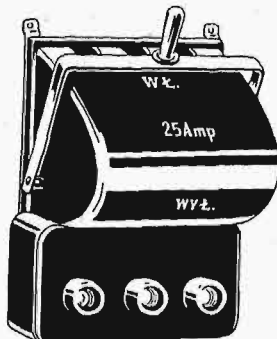
FABRYKA MATERJAŁÓW PRASOWANYCH  
I ELEKTROTECHNICZNYCH

ADRES TELEGRAFICZNY „FERELEKTRA — ŁÓDŹ” ULICA ŻWIRKI Nr. 5  
TELEFON Nr. 182-94

CENNIKI I PROSPEKTY WYSYŁAMY NA ŻĄDANIE



UNIWERSALNE  
TABLICE LICZNIKOWE  
Z MASY IZOLACYJNEJ



TABLICE MOTOROWE

ORAZ

WYŁĄCZNIKI DRAŹKOWE DO 500 V, OD 25 — 200 A

## BEZPIECZNIKI

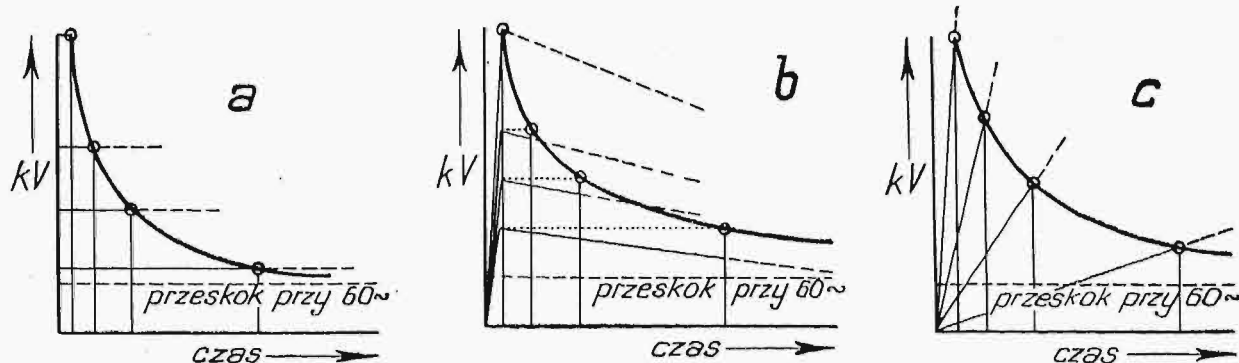
DO PRZYŁĄCZY DOMOWYCH CAŁKIEM OKAPTURZONE DO PŁOMBOWANIA Z ORYGINALNEGO BAKELITU  
SKRZYNECZKI (TABLICZKI) ROZDZIELCZE OKAPTURZONE DO PIONÓW DO PŁOMBOWANIA



NOWOCZESNE  
OGRANICZNIKI PRĄDU  
WŁASNY PRYWATNY PUNKT  
LEGALIZACYJNY



kreslenia tej krzywej pokazano na rys. 3c. Można wreszcie, posługując się rozmaitymi falami, ustalać najniższe napięcia, przy których, przy powtórnych próbach danym napięciem, przeskoczek nastąpić będzie w 50% na obiekcie badanym.



Rys. 3.

Charakterystyczne krzywe napięcia przeskoku, zdjęte przy pomocy fal udarowych; a) fali teoretycznej prostokątnej, b) fali praktycznie osiągalnej o stromym czole i płaskim grzbiecie, c) falami o różnym pochyleniu czola. Przeskok następuje na czole fali.

U w a g a: Liniami kreskowanymi poziomymi podano, przy jakich napięciach szczytowych następuje przeskoczek przy prądzie zmiennym o częstotliwości 60 okr./sek.

Ostatnia metoda nie wymaga stałego stosowania oscylografu katodowego i daje oczywiście charakterystyki odmienne, których nie można porównywać z poprzednimi.

Powyższe wskazania Podkomitetu spotkały się z krytyką i być może, iż w miarę zbierania większej ilości materiału doświadczalnego ulegną one odpowiednim zmianom.

#### IV. Badania drzewa jako izolatora dla fal udarowych.

Jak już zaznaczyłem, różni badacze przed wydaniem powyższych wskazań posługiwali się różnymi metodami, dlatego też badania te nie są kompletne i koniecznym jest zebranie większego materiału, aby móc, opierając się na nich i bez potrzeby uciekania się przy nowych układach do nowych seryj prób, budować celowo linie wysokiego napięcia.

Austin<sup>5)</sup> w swych badaniach nad drzewem jako materiałem izolacyjnym posługiwał się prądem o wysokiej częstotliwości 60 000 okresów na sek., przyczem porównywał przeskoczek, jaki osiągał na izolatorach, zmontowanych na uziemionej konstrukcji stalowej, z przeskokiem, otrzymywanym na izolatorach na konstrukcjach drewnianych. Zmieniając ilość izolatorów wisiorowych na konstrukcji żelaznej, można było w przybliżeniu porównywać otrzymane wyniki. Nie podaję bliżej wyników tych badań, gdyż mamy dziś wyniki późniejszych badań, przeprowadzonych przy pomocy fal udarowych i przy użyciu oscylografów katodowych.

Peek<sup>6)</sup>), streszczając badania swoje nad drzewem, podaje, że słupy drewniane mają wytrzymałość dla fal udarowych, wynoszącą od 330 do 990 kV/m; wartość 590 kV/m należy uważać za dobrą średnią wartość. Słup zatem o wysokości 10,7 m z ramieniem drewnianym 1,5 m długości ma wytrzymałość 7 200 kV. Izolator w tym przypadku bardzo mało dodaje drzewu wytrzymałości. Autor zwraca dalej uwagę na niebezpieczeństwo łupania drzewa przez pioruny, przyczem podaje sposób ochrony drzewa przed tem przy pomocy iskiernika. W dalszym ciągu szerzej omawiam tę sprawę, jak również sprawę częściowego przeskoku w wypadku drzewa mokrego, wreszcie niebezpieczeństwo spalania drzewa.

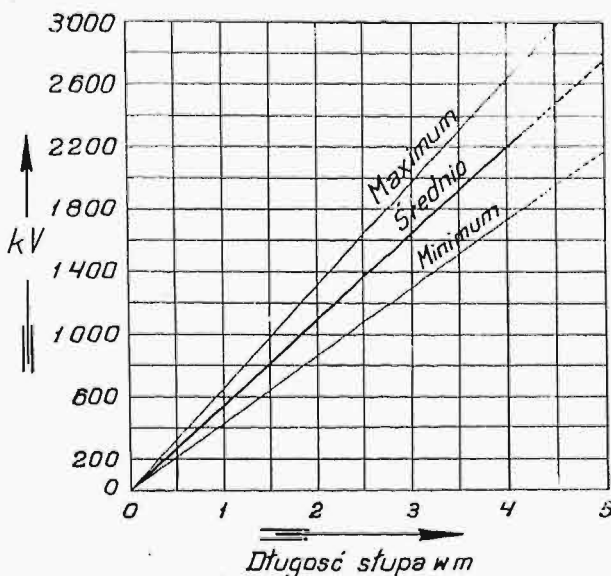
Badania nad własnościami izolacyjnymi drzewa prowadził dalej Melvin<sup>7)</sup>, wykonując doświadczenia w laboratoriach General Electric Co. w Pittsfield. W badaniach tych posługiwał się falą  $1/4 \times 20$  mikrosek., przyczem w krzy-

wych podawał najniższą wartość szczytu fali, przy którym następował przeskoczek na „grzbiecie”, nie podając czasu opóźnienia, t. zn. czasu, który upłynął od chwili powstania fali do chwili przeskoku. Do prób stosował on napięcie w

granicach 400 kV do 3000 kV. Krzywe podają średnie wartości, przyczem liniami przerywanymi podane są części krzywych ekstrapolowane.

Badania były przeprowadzone na słupach cedrowych (cedar, *Thuja occidentalis*), kasztanowych (chestnut, *castanea dentata*) sosnowych (pine) nasączonych; na poprzeczkach z jodły (fir) i z sosny nasączonej, na drążkach z twardego drzewa i sosny, i na różnych układach izolatorów z poprzeczkami oraz na różnych konstrukcjach słupów z poprzeczkami i izolatorami. Wymiary konstrukcji odpowiadały wymiarom, stosowanym w praktyce dla 66 kV i 132 kV, jedynie słupy były krótsze.

Szczególnie ciekawe są próby, mające wykazać wpływ wilgoci i zanieczyszczeń. A więc przeprowadzano próby na

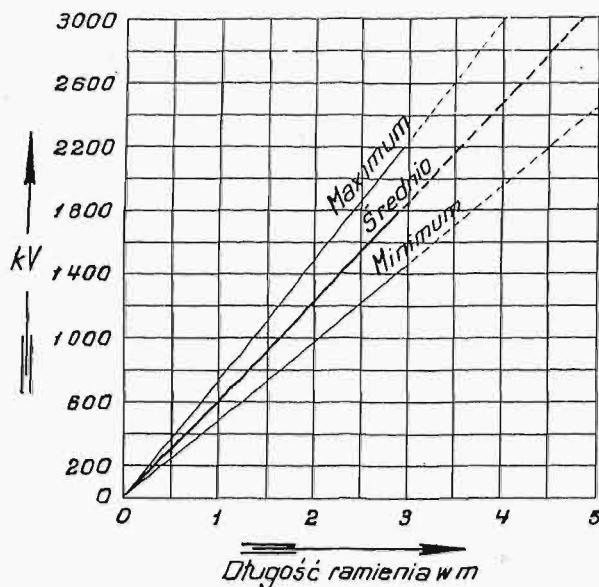


Rys. 4.

Napięcie szczytowe przeskoku falą udarową słupa drewnianego w zależności od długości słupa.

słupach, które przez ok. dwa tygodnie umieszczone były pod przykryciem tak, że reprezentowały suchy słup w praktyce, druga zaś partja słupów była zmoczona przed próbą, odpowiadała zatem warunkom, panującym w czasie silnego

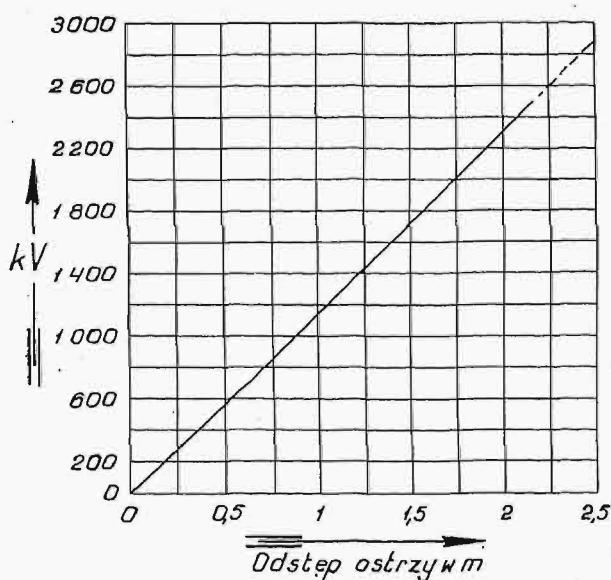
deszczu; trzecią partję moczone w kadzi przez dwa tygodnie przed próbą, czwartą moczone w słonej wodzie, piątą pokrywano warstwą mokrego cementu, imitującego zanieczyszczenia. Poprzeczki i drążki traktowano w podobny sposób.



Rys. 5.

Napięcie przeskoku falą uderową drążków i poprzeczek drewnianych w zależności od długości drzewa.

Próby, przeprowadzone na tak przygotowanych obiektach o długości od 1300 mm do 4600 mm, wykazały, że ani rodzaj drzewa ani wilgoć, ani zanieczyszczenia ani też ilość słonej wody wessanej nie wpływa istotnie na napięcie przeskoku falami uderowymi. Nie od rzeczy będzie zaznaczyć, że napięcie przeskoku falą uderową na izolatorach porcelanowych przy krótkim opóźnieniu czasowym nie za-



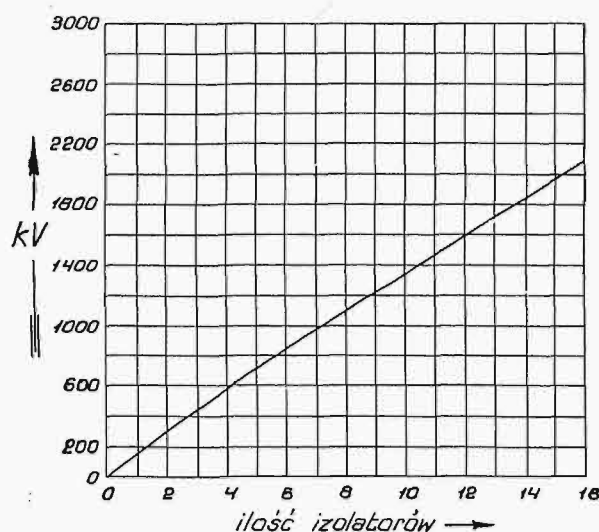
Rys. 6.

Napięcie szczytowe przeskoku falą uderową iskiernika ostrzowego w zależności od odstępów ostrzy.

leży również od tego, czy pomiar przeprowadzany jest pod deszczem, czy też na sucho<sup>\*)</sup>. Przy dłuższym opóźnieniu (t. zn. gdy przeskoc następuje dalej na grzbiecie fali wskutek zastosowania niższego napięcia) różnica wynosi załed-

wie 5% przy zastosowaniu deszczu o opadzie 5,08 mm na min.

Badanie Melvina wykazuje jedynie, że cedr, moczony w słonej wodzie, ma niższe wartości przeskoku od innych. Ciekawe jest, że przy niektórych okazach mokrych

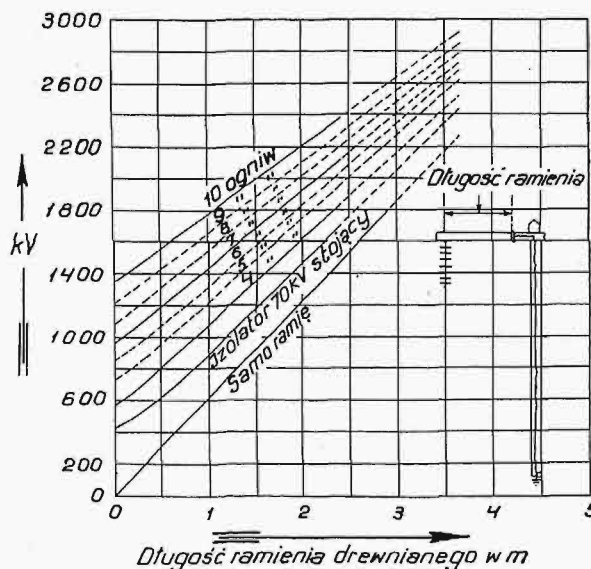


Rys. 7.

Napięcie szczytowe przeskoku falą uderową łańcucha izolatorów wisiorowych, talerzowych, złożonych złożonego z ogniów o średnicy 254 mm o długości ogniwa 146,1 mm w zależności od ilości izolatorów w łańcuchu.

i moczonych w słonej wodzie osiągnięto wyższe wartości przeskoku, aniżeli przy suchych. Opór 200 omów, szeregowo połączony ze słupem, naśladujący opór uziemienia, również nie wpływał na wartości przeskoku.

Dane, uzyskane przez Melvina, podano w formie wykresów na rys. 4, 5, 6, 7, 8, 9, przy czym rys. 7 podany jest wg. Peek'a<sup>\*)</sup>.

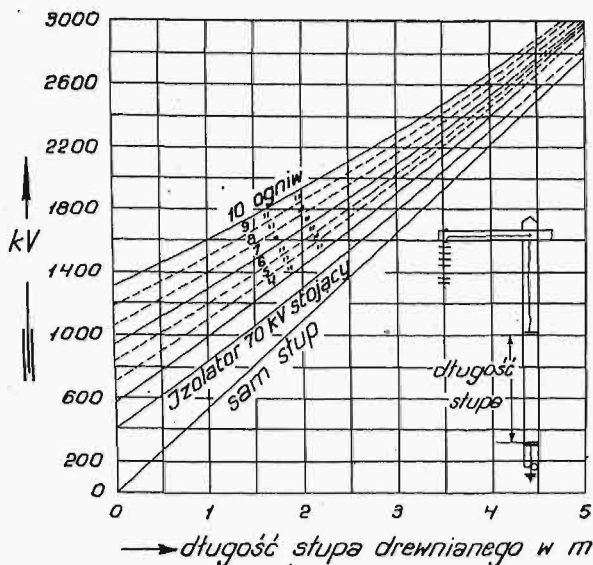


Rys. 8.

Napięcie szczytowe przeskoku falą uderową słupa z poprzeczką drewnianą przy różnej ilości izolatorów w zależności od długości poprzeczki.

Jak to już z poprzedniego wyniku, badania Melvina nie są wyczerpujące, gdyż przeprowadzone są jedynie przy pomocy fali o tym samym kształcie bez uwzględnienia opóźnienia czasowego. Charakterystyczne krzywe napięcia

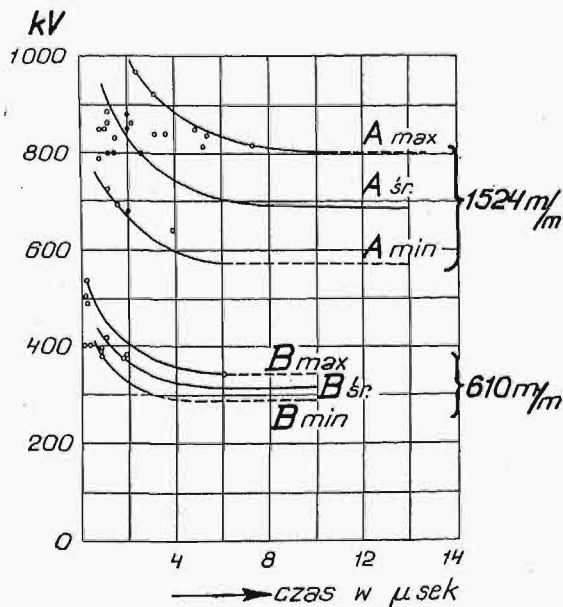
przeskoku, uwzględniając wpływ opóźnienia czasowego, podaje Torok<sup>8)</sup> oraz autorzy już cytowani poprzednio<sup>4)</sup>. Ze względu na ograniczone miejsce podaję za nimi<sup>1)</sup> jedy-



Rys. 9.

Napięcie szczytowe przeskoku falą uderową słupa drewnianego przy różnej ilości izolatorów w zależności od długości drzewa.

nie dwie krzywe przeskoków dla poprzeczki z jodły (fir) nasycanej o przekroju  $102 \times 127$  mm, bez omówienia szczegółów (rys. 10 i 11). Zaznaczyć jednak wypada, że dane, zawarte w powyższej pracy<sup>1)</sup>, przedstawiają cenny materiał dla projektowania linii 26 kV. Krzywe przeskoku, podane na rys. 10, są to krzywe charakterystyczne, zdjęte podobnie,

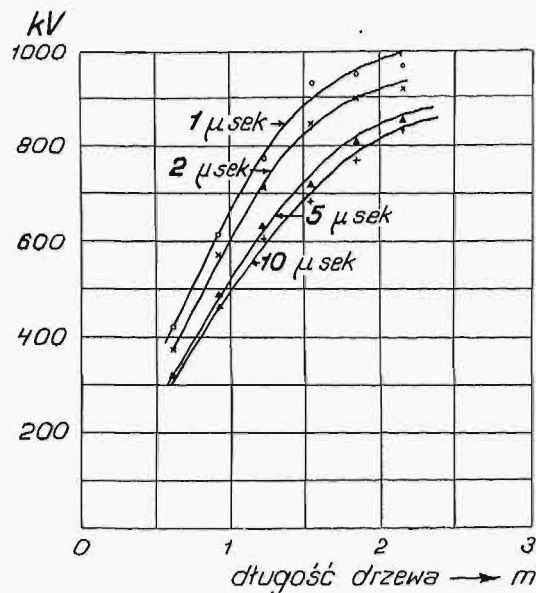


Rys. 10.

Charakterystyczne krzywe napięcia szczytowego przeskoku falą uderową poprzeczek jodłowych w zależności od czasu opóźnienia, t. zn. czasu, mierzonego od początku fali do chwili przeskoku. „A” krzywe dla poprzeczek o długości 1524 mm; „B” krzywe dla poprzeczek o długości 610 mm.

jak opisano i zilustrowano na rys. 3b, jedynie sposób oznaczenia opóźnienia czasowego był trochę inny, aniżeli zalecony przez „Podkomitet przepięć atmosferycznych i izolatorów AIEE”, co jednak nie wpływa znacznie na wyniki. Do prób stosowano falę dodatnią 0,5 do  $0,75 \times 60$  mikrosek.

Cytowani autorowie<sup>1)</sup> również wypowiadają się, że wg. ich badań wilgoć i nasycanie nie ma znacznego wpływu na wartość przeskoku falą uderową dla drzewa.



Rys. 11.

Krzywe przeskoku falą uderową poprzeczek jodłowych, przy różnym czasie opóźnienia, t. zn. czasie, mierzonym od początku fali do chwili przeskoku w zależności od długości poprzeczek.

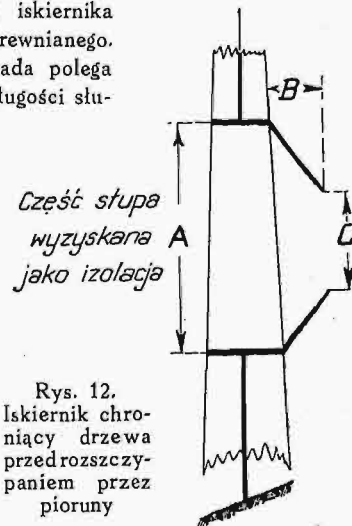
#### V. Niebezpieczeństwo uszkodzenia drzewa przez pioruny.

Drzewo jako materiał izolacyjny ma jednak ujemne strony, gdyż ulega uszkodzeniu przez pioruny, zostaje mianowicie rozszczępione, przy czym uszkodzenie może być bardzo znaczne, powodując dłuższą przerwę ruchu. Zapobiec temu można przez zastosowanie odpowiednich iskierników ochronnych. Na rys. 12 pokazano zasadniczy schemat iskiernika ochronnego dla słupa drewnianego. Jak z rysunku widać, zasada polega na tym, że jedynie część długości słupa „A” wyzyskana jest jako izolacja, dalsza zaś część słupa jest zwarta przez przewód metalowy. Część izolacyjna słupa ochroniona jest przez iskiernik, wykonany z dwóch prętów metalowych z końcami, odstającymi od słupa na odległość „B”, przy czym odstęp końców prętów „C” jest mniejszy, niż „A”.

Peeke<sup>9)</sup> podaje stosunek  $\frac{C}{A} = \frac{3}{6}$ ;  $\frac{B}{A} = \frac{1}{6}$ ;

Melwin<sup>7)</sup> zaś podaje stosunek  $\frac{C}{A} = \frac{2,1}{6}$ ;  $\frac{B}{A} = \frac{1,2}{6}$ , przy którym można osiągnąć odpowiednie bezpieczeństwo nawet w najniekorzystniejszych warunkach.

Badania Melwina<sup>7)</sup> wykazują, iż może nastąpić częściowy przeskok z izolatorów do drzewa, użytego jako materiał izolacyjny, zwłaszcza o ile drzewo jest mokre; jednak natężenie przeskoku jest znacznie zmniejszone. Zwrócić należy uwagę na ciekawe zjawisko<sup>1)</sup>, polegające na tym, że łuk prądu zmiennego, następujący po przeskoku

Rys. 12.  
Iskiernik chroniący drzewa przed rozszczępianiem przez pioruny

fali udarowej, zostaje zdławiony o ile przechodzi przez drzewo. Zjawisko to proponowano wykorzystać dla dławienia łuku, trwającego po przeskoku wskutek napięcia ruchu. Ze względu na brak obszerniejszego materiału doświadczalnego ograniczam się jedynie do wzmianki o tem. Zagadnienie to wymaga jeszcze badań i obserwacji celem wyjaśnienia.

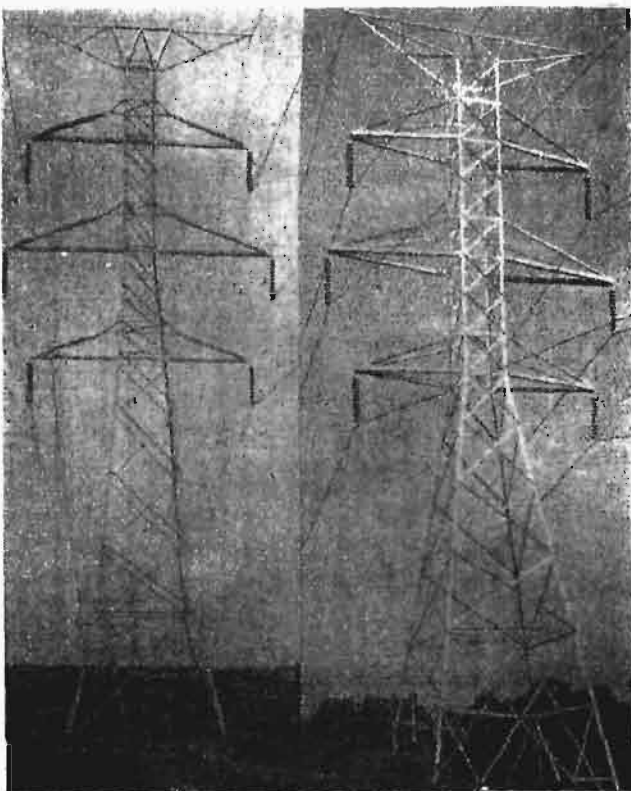
#### VI. Niebezpieczeństwo spalenia drzewa.

Dalszym poważnym niebezpieczeństwem, jakie przedstawia drzewo, jest jego palność. Zapalenie drzewa wskutek uszkodzenia izolatorów nie przedstawia groźniejszego niebezpieczeństwa, gdyż można je prawie zupełnie usunąć przez zastosowanie izolatorów pewnych na przebiecie. Obawiać się należy natomiast wpływu prądu zmiennego, który może nastąpić w okolicach, gdzie tworzy się dużo osadu na izolatorach i gdzie panują silne mgły. W tych wypadkach może być celowe zastosowanie słupów żelaznych lub też środków zapobiegawczych.

#### VII. Zastosowanie wyników badań w praktyce.

Opierając się na wynikach prac laboratoryjnych, wiele przedsiębiorstw zastosowało konstrukcje drewniane słupów i poprzeczek, mając na celu zwiększenie pewności ruchu. Podaję pokrótce opis niektórych ciekawszych konstrukcji.

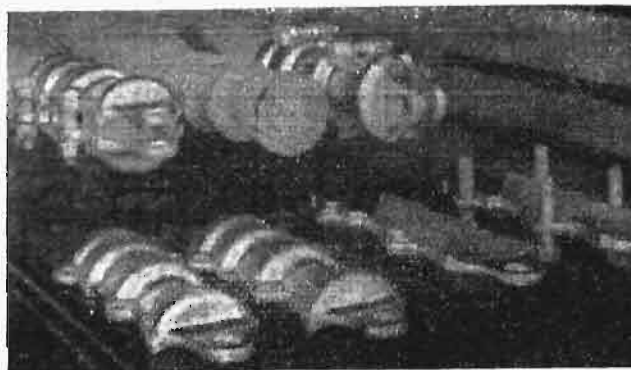
Union Electric Light and Power Co. zastosowało na linii 190 km długiej z Osage do Rivermines ramiona drewniane na słupach stalowych<sup>10)</sup>. Celem tej konstrukcji jest osiągnięcie możliwej niezawodności ruchu. Ramiona są umocowane przegubnie w łożyskach. Część ramion, narażona na ciągnięcie, umocowana jest tak, iż uniknięto bolców, przechodzących przez drzewo (p. rys. 13 i 14) dla zapobieżenia rozszczepiania drzewa przez pioruny. Linja ta o napięciu 132 kV izolowana jest przy pomocy 11 izolatorów talerzowych o średnicy 254 mm i długości ogniwa



Rys. 13.

Słupy stalowe kratowe z ramionami drewnianymi, zastosowane na linii Osage-Rivermines o napięciu 132 kV.

146,1 mm. Badanie, przeprowadzone przy pomocy fali udarowej 1,5×60 mikrosek., wykazało, że dla osiągnięcia równoważnej izolacji na ramionach stalowych trzeba zasło-



Rys. 14.

Armatura dla uchwycenia części drzewa, narażonego na ciągnięcie w ramieniu drewnianym, zastosowanym na słupie kratowym linii Osage-Rivermines.

sować na górnym ramieniu 17 izolatorów (napięcie przeskoku szczytowe 1350 kV), na środkowym — 22÷23 izolatorów (napięcie przeskoku szczytowe 1720 kV), na dolnym — 20 izolatorów (napięcie przeskoku szczytowe 1550 kV). Druga linja tego towarzystwa również zasługuje na uwagę<sup>11)</sup> (rys. 15). Linja ta wyposażona jest w dwie linki ochronne uziemione, przyczem uziemienia wykonane są w ten sposób, że odgałęziają się od linek ochronnych w odległości ok. 3 m od słupów, poczem przechodzą do słupa około 4,8 m poniżej poprzeczki i biegną dalej do ziemi. Przez takie urządzenie wyzyskuje się ramiona oraz część słupa dla izolacji linii. Napięcie przeskoku dla fali 1,5×60 mikrosek. przy tej konstrukcji, wyzyskującej ok. 2,47 m długości ramienia i 0,84 m długości słupa (do linki ochronnej), wynosiło ok. 1500 kV (szczyt). Konstrukcja tak była wykonana, że przeskok nastąpiłby raczej od przewodów do linki uziemionej przez powietrze, aniżeli przez drzewo.

Na obu liniach przez 1½ sezonu burzowego (pół w r. 1931 i cały 1932) nie nastąpił ani jeden przeskok.

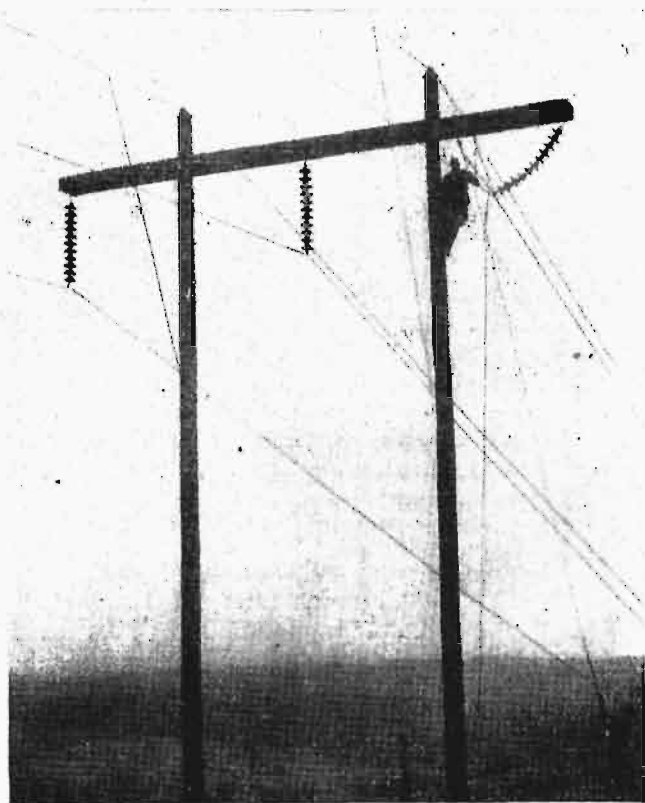
Bardzo ciekawe zastosowanie znalazło drzewo na linii Wallenpaupack - Siegfried 220 kV<sup>12)</sup>. Linja ta, zbudowana na słupach stalowych, była narażona na bezpośrednie uderzenia pioruna. Aby zapobiec temu, umieszczono na słupach stalowych 12-metrowe słupy drewniane, umocowane przy pomocy odciałek do ziemi. Na tak podniesionej konstrukcji przeprowadzono dwie linki uziemione, aby zapobiec bezpośrednim uderzeniom piorunów w przewody prądowe (rys. 16). Słupy drewniane użyte są jako izolacja, zapobiegająca aby wyładowania następowały przez słup stalowy. W ciągu 2½ sezonów burzowych stwierdzono dwa, a prawdopodobnie trzy, bezpośrednie uderzenia pioruna w linki ochronne bez wyłączenia linii<sup>13)</sup>.

Możnaby przytoczyć znacznie większą ilość przykładów nadzwyczaj ciekawych konstrukcji, ze względu jednak na ograniczone miejsce odsyłam czytelników do odnośnych opisów, znajdujących się w „Electrical World”, publikacjach AIEE oraz innych wydawnictwach technicznych z lat ostatnich.

Nie wszędzie osiągnięto od razu wyniki zadowalające. Niejednokrotnie w razie zastosowania nieodpowiednich konstrukcji następowało uszkodzenie słupów, poprzeczek, izolatorów drewnianych w odciażkach. Na liniach drewnianych wysoko izolowanych zarejestrowano<sup>14)</sup> falę przepięciową ujemną o szczycie 5000 kV, w odległości około 6,5 km od



miejsca uderzenia pioruna. Wskutek tej fali nastąpił przebieg na linii, połączony z lekkim nadszczypaniem poprzeczki i słupów, prócz tego nastąpił od tej samej fali prze-



Rys. 15.

Słup portalowy drewniany na linii Osage-Page o napięciu 132 kV z poprzeczkami drewnianymi, z linkami ochronnymi, przyczem poprzeczka drewniana i część słupa wyizolowana jest jako izolacja.

skok ze środkowego przewodu do linii telefonicznej, przechodzącej w odstęp pionowym ok. 6,6 m pod linią wysokiego napięcia w prześle skrzyżowania. Jak z tego widać, nie jest celowe zastosowanie zbytnej izolacji na linii, gdyż to nie zapobiega przeskokowi przy bezpośrednich uderzeniach pioruna.

Z powodu uszkodzeń, jakie następowały w praktyce, istniała duża różnorodność zapatrywań i wysuwano zastrzeżenia co do linii na słupach drewnianych<sup>14)</sup>. Ostatnio jednakże panuje coraz większa dążność do stosowania drzewa na słupy, poprzeczki, wsporniki i izolatory w odciażkach<sup>15)</sup>. Przy wysokich napięciach nie stosuje się jedynie drzewa na trzony izolatorowe, co dawniej było niekiedy praktykowane, ze względu na niekorzystny rozkład pola i częste uszkodzenia trzonów.

Nadzwyczaj ciekawe jest sprawozdanie Melvina<sup>12)</sup>, oparte na obserwacjach, zebranych w ciągu ostatnich lat na liniach, wyzyskujących własności izolacyjne drzewa, o łącznej długości, wynoszącej 2100 km, położonych w różnych terytorjach Stanów Zjednoczonych. Z powyższej pracy podają niektóre tylko dane. Wg. zapatrywania Melvina, o ile proporcjonalna zależność wytrzymałości elektrycznej drzewa zostaje zachowana przy jeszcze wyższych napięciach, to napięcia na całkowitej konstrukcji drewnianej o normalnej wysokości mogą dochodzić do rzędu 12000 kV do 15000 kV. Izolacja sama nie zapobiega jednak wyładowaniom na liniach. Zapobiec niepożądanym skutkom przebieg

mogą wg. Melvina trzy zasadnicze typy konstrukcji, w których drzewo może być z dużą korzyścią zastosowane.

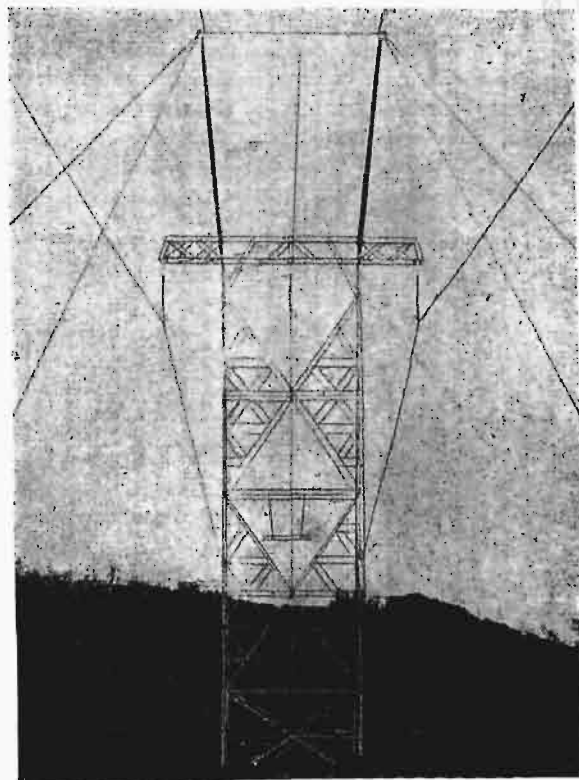
1) Charakterystyczną cechą konstrukcji pierwszego typu jest osłonięcie przewodów prądowych zapomocą odpowiednich linek chroniących je przed bezpośrednimi uderzeniami piorunów. Metoda ta nadaje się zwłaszcza dla napięć wyższych, wymaga jednak dalszych studiów.

2) Konstrukcje drugiego typu charakteryzuje odprowadzenie fal uderowych z przewodów przez urządzenia, zapobiegające powstawaniu łuku prądu zmiennego. W Stanach Zjednoczonych zastosowano do tego celu urządzenie specjalne o zupełnie nowych zasadach działania. Zaznaczyć muszę, że, moim zdaniem, znakomicie nadają się do tego celu cewki dyssonansyjne, które również ostatnio w Stanach Zjednoczonych dały znakomite wyniki<sup>16)</sup>.

Konstrukcje tego typu nadają się przy napięciach średnich, gdzie zastosowanie konstrukcji pierwszego typu ze względów technicznych i ekonomicznych nie jest wskazane.

3) Trzeci typ konstrukcji polega na tem, iż nie staramy się usunąć wyładowań, a dążymy jedynie do ograniczenia ich ilości, jak również zmniejszenia uszkodzeń izolatorów, przewodów i konstrukcji wsporczych przez celowe zaprojektowanie zarówno całości, jak i szczegółów. Osiąga się przez to pewność, że linia po wyłączeniu natychmiast jest gotowa do ruchu.

Badania te w naszych warunkach, uważam, powinny wzbudzić duże zainteresowanie. W świetle tych badań zupełnie nieracjonalnym wydaje się przepis Ministerstwa, wymagający stosowania słupów kratowych stalowych jako narożnych przy obostrzeniu trzeciego stopnia. Oczywiście jest, że w tym przypadku miejsca skrzyżowania, pomimo zastosowania izolatorów o napięciu przeskoku na mokro,



Rys. 16.

Słup kratowy na linii Wallenpaupack 220 kV. Na słupach kratowych umieszczono słupy drewniane 12-metrowe z przewodami chroniącymi przed bezpośrednimi uderzeniami pioruna. Przewody ochronne uziemione są zapomocą odciażek.

wyższemu o 15%, będą pod względem elektrycznym najslabszymi punktami w linii na konstrukcjach drewnianych, wyzyskującej racjonalnie własności izolacyjne drzewa, co chyba nie było zamiarem przepisów.

Zaznaczyć trzeba, że „Gródek”, budując swoje linie do Torunia i do Gdyni dla napięcia 100 kV (pracują one obecnie przy 60 kV), wzorował się do pewnego stopnia na liniach amerykańskich, stosując słupy drewniane portalowe, poziomy układ przewodów i t. p. Przez kilkoletni okres ruchu osiągnięto bardzo dobre wyniki na tych liniach. Uszkodzenia linii pomimo częstych burz są nadzwyczaj rzadkie, przerwy, powstające wskutek wyładowań atmosferycznych, skrócono ostatnio do ułamka sekundy przez samoczynne włączanie wyłącznika olejowego natychmiast, gdy tylko osiągnie on położenie wyłączone po wyzwoleniu przez przekładniki. Wspomnieć można również, że „Gródek” posiada laboratorium, umożliwiające wytwarzanie fal udarowych o napięciu 600 kV.

### VIII. Zakończenie.

Reasumując powyższe wywody, stwierdzić trzeba:

1) Drzewo posiada wybitne własności izolacyjne dla fal udarowych. Własności te nie zależą od rodzaju drzewa, zawartości wilgoci i zanieczyszczeń. Własności izolacyjne drzewa można wyzyskać nadzwyczaj celowo w budowie linii wysokiego napięcia.

2) Konstrukcje powinny być oparte na badaniach laboratoryjnych, przyczem przy opracowywaniu konstrukcji można w zależności od rodzaju linii i jej ważności kierować się różnymi wytycznymi.

3) Przy konstrukcjach racjonalnych można uniknąć rozłupywania drzewa przez pioruny.

4) W okolicach, w których istnieje niebezpieczeństwo upływu prądu wskutek osadów, powstających na izolatorach, jak również mgieł, zastosowanie drzewa dla linii wysokiego napięcia może być ograniczone ze względu na możliwość zapalenia się słupów, o ile nie zastosuje się przytem środków, chroniących przed tem.

### Spis literatury.

<sup>1)</sup> Impulse and Dynamic Flashover Studies on 26 kV Wood Pole Transmission Construction A. S. Brookes; R. N.

Southgate; E. R. Whitehead Quarterly Transactions of the AIEE. Vol. 52. June 1933, p. 494.

<sup>2)</sup> Lightning and its Effect on the Design of Transmission Lines and Apparatus from the Economic and Engineering Standpoint F. W. Peek. jr.

Gesamtbericht zweite Weltkonferenz Berlin 1930, Band XIV, S. 481.

<sup>3)</sup> Quart. Transactions of the AIEE. Vol. 51 December 1933 p. 1107.

<sup>4)</sup> Quart. Transactions of the AIEE. Vol. 52, June 1933, p. 466.

<sup>5)</sup> Avantages et limitations de l'emploi du bois dans les installations à haute tension A. O. Austin.

Conférence Internationale des Grands Réseaux électriques. Session de 1927, tome I, p. 1018.

<sup>6)</sup> Progress in Lightning research in the field and in the laboratory. F. W. Peek jr. Quart. Trans. of the AIEE., Vol. 48, April 1929, p. 436.

<sup>7)</sup> Impulse insulation characteristics of wood pole lines. H. L. Melvin. Quart. transaction of the AIEE, Vol. 49, January 1930, p. 21.

<sup>8)</sup> Surge characteristics of insulators and gaps. J. J. Torok. Quart. Transactions of the AIEE. Vol. 49, July 1930, p. 866.

<sup>9)</sup> Hinged Wooden Arms Used on Osage - Rivermines Line. S. Stokes; L. O. Waite; H. E. Gove; L. T. Byars Electrical Engineering. February 1932, p. 121.

<sup>10)</sup> 1½ years without flashover. L. O. Waite. Electrical World, April 29, 1933, Vol. 101, p. 557.

<sup>11)</sup> Diverting Direct Strokes. A. E. Silver. Electrical World August 16, 1930, Vol. 96, p. 313.

<sup>12)</sup> Operating experience with wood utilized as lightning insulation. H. L. Melvin Quart. Transactions of the AIEE. Vol. 52, June 1933, p. 503.

<sup>13)</sup> Lightning investigation on a Wood pole transmission line. R. R. Pittman, J. J. Torok. Quart. Transactions of the AIEE. Vol. 50, June 1931, p. 568.

<sup>14)</sup> Wide Diversity of opinion on wooden pole lines. Electrical World, October 3, 1931, Vol. 98, p. 605.

<sup>15)</sup> Transmission and Overhead Distribution. Electrical World, January 3, 1934, Vol. 103, p. 41.

<sup>16)</sup> Petersen Coil Tests on 140 kV System J. R. North, J. R. Eaton, Electrical Engineering January 1934, p. 63.

## ZAGADNIENIE ZWARCIA Z ZIEMIĄ W SIECI KABLOWEJ ELEKTROWNI WARSZAWSKIEJ.

Wiesław Szwander, inż. Elektrowni Warszawskiej.

**Streszczenie.** Zjawisko zwarcia z ziemią, rozpatrzone ogólnie, zilustrowane graficznie zapomocą wykresów wektorowych i linjowych, pozwala odtworzyć obraz przebiegu zwarcia z ziemią w sieci miejskiej w Warszawie.

Obliczenia wielkości prądu zwarcia z ziemią poparte są opisem i wynikami pomiarów bezpośrednich wielkości tego prądu.

### I. Wstęp.

Prądy pojemnościowe „zdrowych faz”, większe w chwili zwarcia, niż przed jego wystąpieniem, płynąc do ziemi z przewodów, niedotkniętych zwarcie z ziemią, skupiają się w

drodze powrotnej w miejscu zwarcia, tworzą poważne nieraz obciążenie cieplne i wywołują szereg wtórnych szkodliwych skutków.

Strona ilościowa, a więc znaczenie zjawiska, rośnie ze wzrostem pojemności linii względem ziemi i ze wzrostem napięcia roboczego, nie mówiąc o wpływie częstotliwości, którą przyjmujemy stałe:  $f = 50$  okr./sek.

Sieć kablowa posiada wskutek znacznie większej wartości pojemności względem ziemi, niż sieć napowietrzna, wielokrotnie (20—25-krotnie) większy prąd zwarcia z ziemią.

Sieć zasilająca i sieć rozdzielcza wielkiego miasta, dla której długość ułożonych kabli wynosi setki lub nawet tysiące kilometrów, może mieć prąd zwarcia z ziemią tak



wielki, że konieczne się staje dokładne poznanie tak ilościowej, jak i jakościowej strony tego zagadnienia, przeanalizowanie istniejących środków zabezpieczających, wreszcie rozpatrzenie wchodzących w grę zabezpieczeń specjalnych.

To wszystko było bodźcem do zajęcia się zagadnieniem zwarcia z ziemią w sieci Elektrowni Warszawskiej, bodźcem tem słusznym, że konieczność utrzymania jaknajwiększej pewności ruchu nakazuje raczej przedwcześnie i nieraz nawet bez widocznych konkretnych rezultatów rozpatrywać nasuwające się zagadnienia, niż dopuszczać do tego, aby zjawiska te, przez groźne swe nieraz konsekwencje, wymagały natychmiastowej i kosztownej interwencji.

Ponieważ zagadnienie zwarcia z ziemią mniej jest znane, gdy dotyczy nie pojedynczej linii napowietrznej, lecz całej rozczłonkowanej sieci kablowej, jak to ma miejsce w naszym szczególnym wypadku, uważałem przeto za pożyteczne podzielić się osiągniętymi wynikami z szerszym gronem czytelników.

## II. Opis sieci miejskiej w Warszawie.

A. Sieć rozdzielcza niskiego napięcia w śródmieściu ma napięcie nominalne 122 woltów, na krańcach miasta — 211 woltów (na transformatorach odpowiednio 125 i 216 woltów).

Jest ona podzielona na dwieście kilkadziesiąt niezależnych obszarów, wyodrębnionych z całej sieci przez odpowiednie „podziały sieci”. Sieć zasilana jest przez transformatory, ustawione w stacjach transformatorowych. W dniu 1.VIII. 1933 r. liczba stacji wynosiła 1334, w czem 304 stacji kioskowych ulicznych, 54 stacji podziemnych i 976 stacji piwnicznych „prywatnych”; czynnych w sieci było 1370 transformatorów o ogólnej mocy 79 794,5 kVA. Liczba stacji w każdym obszarze waha się od 1 do 14, najmniejsze obszary są w śródmieściu, gdzie jest największe skupienie odbiorców energii.

W śródmieściu stosuje się zasadniczo, na krańcach miasta w miarę możliwości — zasadę dwustronnego zasilania odbiorców.

Na krańcach miasta jest też pewna liczba (ok. 60 km) linii napowietrznych niskiego napięcia o charakterze przejściowym; w dalszych rozważaniach oczywiście nie będziemy ich uwzględniać ze względu na małą pojemność.

B. Sieć rozdzielcza wysokiego napięcia (5 000 V) zasilą poprzez stacje transformatorowe sieć niskiego napięcia.

Podziały sieci dzielą ją na 46 odrębnych obszarów zamkniętych, zasilanych t. zw. „kablami zasilającymi” bezpośrednio z rozdzielni w centrali lub z podstacji 15/5 kV.

W każdym obszarze wysokiego napięcia mieści się całkowita liczba obszarów niskiego napięcia; żaden z nich więc nie leży w dwóch różnych obszarach wysokiego napięcia.

C. Sieć 15 kV składa się z kabli, łączących rozdzielnię z pięcioma podstacjami 15/5 kV, i z kabli, łączących niektóre podstacje między sobą. W rozdzielni sieć ta zasilana jest przez transformatory wprost z szyn zbiorczych 5 kV, z podstacji zaś przez transformatory, obniżające napięcie, zasilają one część obszarów sieci 5 kV, położonych na krańcach miasta.

D. Długości i przekroje kabli, tworzących wymienione 3 rodzaje sieci, podaje tablica I wg. stanu w dniu 1.VIII 1933 (bez uwzględnienia kabli niskiego napięcia na przyłączach domowych i lampowych).

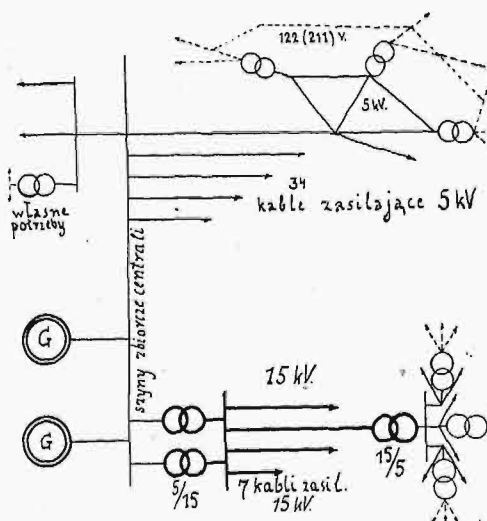
Obecnie przekroje kabli są ujednolicono i kładzie się w sieci niskiego napięcia 50 i 70 mm<sup>2</sup>, w sieci wysokiego napięcia — 16 i 35 mm<sup>2</sup>, a kable zasilające i 15 kV — 95 mm<sup>2</sup>.

Tablica I.

Przekrój	Sieć nisk. nap.	Sieć 5 kV	Sieć 15 kV
1 mm <sup>2</sup> Cu	25 260,0 m	— m	— m
6 „ „	207,3 „	1 111,0 „	— „
10 „ „	3,8 „	128,5 „	— „
16 „ „	9 296,3 „	361 173,4 „	— „
25 „ „	4 896,0 „	4 435,3 „	— „
25 „ Fe	— „	831,9 „	— „
35 „ Cu	96 504,5 „	17 186,2 „	— „
50 „ „	213 395,2 „	— „	— „
50 „ Fe	— „	2 156,6 „	— „
70 „ Cu	223 962,9 „	1 873,9 „	— „
95 „ „	8,2 „	91 011,45 „	49 029,0 „
120 „ „	— „	4 491,3 „	— „
Razem . .	573 608,0 m	484 399,55 m	49 029,0 m
Razem . . .			1 107 036,55 m

E. Z powyższego pobieżnego opisu możemy już wysnuć następujące wnioski, dotyczące zagadnienia zwarcia z ziemią.

1) Zwarcie z ziemią może nastąpić w każdej z wymienionych trzech sieci (niskiego napięcia, 5 kV, 15 kV), które są sprzęgnięte między sobą za pomocą transformatorów, wg. uproszczonego schematu rys. 1.



Rys. 1.

Należy więc w równej mierze rozpatrzyć przebieg zwarcia w każdej sieci, oraz zbadać, jaki wpływ ono wywiera na sieci, nie dotknięte w danej chwili zwarcie z ziemią.

2) Zwarcie z ziemią w sieci niskiego napięcia, wobec podziału jej na dwieście kilkadziesiąt zupełnie niezależnych obszarów, rozprzestrzenia się tylko na ten obszar sieci, w którym nastąpiło, a więc zaledwie na 3 do 5‰ całej sieci.

Pomijamy tu chwilowo jakiegokolwiek oddziaływanie tego zwarcia z ziemią na sieci innych napięć, czemu poświęcimy oddzielne rozważanie.

Wobec powyższego oraz wobec niskiego napięcia tej sieci wielkość występujących prądów zwarcia z ziemią będzie minimalna, nawet jeżeli uwzględnić dodatkowo pojemność względem ziemi przyłączonych instalacji.

3) Na ogólną ilość 46 obszarów zasilania sieci 5 kV wprost z rozdzielni jest zasilanych 34, czyli 34 obszary mają z szynami zbiorczymi trwałe metaliczne połączenie przez kable zasilające. Zwarcie z ziemią w tej części sieci roz-

przestrzeni się więc w przybliżeniu na  $\frac{34}{46} \cdot 100 = 74\%$  całej sieci 5 kV.

Pozostałych 12 obszarów rozpada się na 5 niezależnych części, zasilanych z osobna z 5 podstacji 15/5 kV. Największa z tych części składa się z 6 obszarów. Tu zwarcie z ziemią rozprzestrzenia się jedynie na daną część (obszary łączą się przez szyny zbiorcze 5 kV wspólnej podstacji). Wielkość prądu zwarcia z ziemią nie przekroczy  $\frac{6}{34} \cdot 100 = 17,6\%$

prądu zwarcia w sieci, zasilanej z rozdzielni. Ten prąd wobec obejmowania tak znacznej części całej sieci i wobec wysokiego napięcia przedstawia największe niebezpieczeństwo.

4) W sieci 15 kV zwarcie z ziemią rozprzestrzenia się na całą sieć, stanowiącą jedną całość wraz z szynami zbiorczymi 15 kV w rozdzielni. Przy stosunkowo niewielkiej długości kabli: 49 029 m, dużą wartość prądu zwarcia z ziemią powodować będzie wysokie napięcie 15 000 woltów.

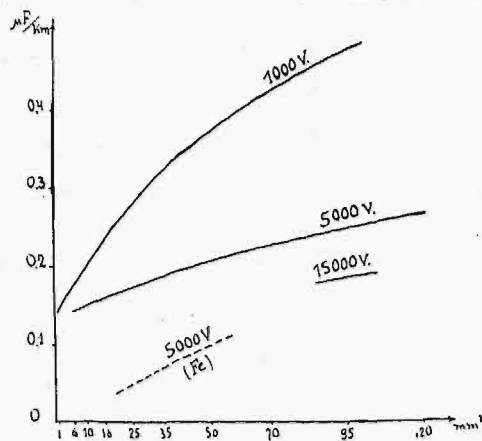
F. Pomiary pojemności kabli dokonywane były dla odcinków, ułożonych już w ziemi od lat 26. Wyzyskane są też dane laboratorjów fabrycznych dostawców kabli.

Oczywiście wyniki wykazują znaczną rozbieżność w zależności od czasu fabrykacji, rodzaju izolacji i t. d. W ocenie pojemności sieci kablowej względem ziemi niepodobniestwem byłoby wymagać dokładności, uwzględniającej te wszystkie czynniki. Byłoby to również zbędne, bo wobec zawiłości zagadnienia i wielu ubocznych, w grę wchodzących, czynników i tak może być nie może o wynikach absolutnie ścisłych. Osiągnięty stopień przybliżenia wystarczy do technicznego potraktowania zagadnienia. Opierać się będziemy na danych tabeli II, gdzie podane są wartości pojemności jednej żyły względem ziemi w mikrofaradach na kilometr.

Tabela II.

Przekrój kabla	do 1 000 V	5 000 V	15 000 V
	mikrofaradów na kilometr		
1 mm <sup>2</sup> Cu	0,142	—	—
6 „ „	0,177	0,143	—
10 „ „	0,200	0,150	—
16 „ „	0,230	0,161	—
25 „ „	0,282	0,175	—
25 „ Fe	—	0,051	—
35 „ Cu	0,325	0,188	—
50 „ „	0,375	0,206	—
50 „ Fe	—	0,100	—
70 „ Cu	0,430	0,227	—
95 „ „	0,480	0,251	0,187
120 „ „	—	0,267	—

Wartości powyższej tabeli są wzięte z krzywych (rys. 2), wypośredkowanych dla wielkiej ilości pomiarów. (Kable



Rys. 2.

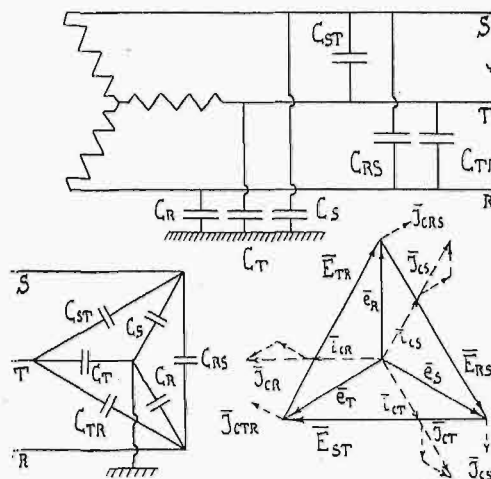
nowszej fabrykacji wykazują naogół większą pojemność wobec cieńszej izolacji lepszym papierem).

Krzywe powyższe słuszne są oczywiście jedynie dla sieci warszawskiej, wg. pomiarów której zostały zbudowane.

### III. Przebieg zwarcia z ziemią.

Rys. 3 ilustruje stan sieci „zdrowej”, przed zwarcie z ziemią.

Układ trójfazowy, trójprzewodowy (bez przewodu zerowego) zasilany jest np. przez wtórne uzwojenie transfor-



Rys. 3.

matora, albo przez generator. Źródło energii daje napięcie symetryczne, którego wykres wektorowy przedstawia rys 3, gdzie  $\vec{e}_R, \vec{e}_S, \vec{e}_T$  oznaczają napięcia fazowe, a  $\vec{E}_{RS}, \vec{E}_{ST}, \vec{E}_{TR}$  odpowiednie napięcia międzyprzewodowe.

Sieć zasadniczo nie jest uziemiona, to znaczy, że punkty zerowe transformatorów oraz generatorów są izolowane od ziemi (powyższe założenia odpowiadają właściwościom sieci Elektrowni Warsz.).

Pojemności poszczególnych faz względem ziemi  $C_R, C_S, C_T$  i wzajemne pojemności faz względem siebie  $C_{RS}, C_{ST}, C_{TR}$ , faktycznie rozłożone linowo wzdłuż kabli, przyjmujemy w naszym rozważaniu za skupione w środku rozważanego odcinka sieci czy linii (lub częściami w kilku punktach).

Możemy to przedstawić, jak na rys 3, w postaci odbiornika pojemnościowego, z uziemionym punktem zerowym, przytem odbiornik ten będzie zupełnie symetryczny, bo w kablu pojemności jednostkowe (na jednostkę długości) są równe.

$$C'_R = C'_S = C'_T \\ C'_{RS} = C'_{ST} = C'_{TR}$$

Na wykresie wektorowym  $\vec{J}_{CR}, \vec{J}_{CS}, \vec{J}_{CT}$  przedstawiają prądy ładowania linii (sieci) — konstrukcja zrozumiała z rysunku, z uwzględnieniem zależności:

$$\vec{E}_{RS} = \vec{e}_S - \vec{e}_R \quad \text{i} \quad \vec{i}_R = \vec{i}_{TR} - \vec{i}_{RS}$$

Prądy te płyną w sieci stale, niezależnie od obciążenia, o ile tylko sieć jest pod napięciem. Z symetrii napięcia i układu pojemności wynika zupełna symetria prądów pojemnościowych ładowania.

Założmy teraz, że faza R uległa zwarcie z ziemią w dowolnym punkcie A.

Oczywiste jest, że napięcia na pojemnościach międzyprzewodowych  $C_{RS}, C_{ST}, C_{TR}$  nie zmienia się od tego, bo



napięcia międzyprzewodowe, uzależnione od źródła energii, nie zmieniają się; w dalszych więc rozważaniach pominiemy te pojemności, gdyż zależy nam jedynie na wyodrębnieniu zjawisk, związanych z samym zwarcie z ziemią.

Pojemność „chorej” fazy  $R$  jest zwarta na krótko przez połączenie z ziemią samego przewodu.

Różnica potencjałów między ziemią z jednej strony, a punktem zerowym i fazami  $S$  i  $T$  z drugiej — odpowiada różnicy potencjałów między fazą  $R$  z jednej, a punktem zerowym i fazami  $S$  i  $T$  z drugiej strony, czyli potencjał punktu zerowego względem ziemi równa się napięciu fazowemu  $e_R$ , a napięcia faz  $S$  i  $T$  względem ziemi równają się napięciom skojarzonym  $E_{RS} = E_{TR}$  (wobec napięcia fazowego  $e_S = e_T$  przed momentem zwarcia).

Zatem pojemności  $C_T$  i  $C_S$  są pod napięciem  $\sqrt{3}$  razy większym, niż poprzednio, podczas gdy na pojemności  $C_R$  nie ma napięcia wcale.

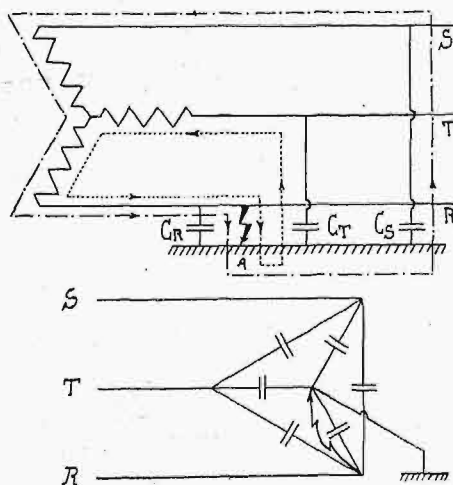
Z rys. 4 widzimy, że przy symetrycznym nadal układzie napięcie odbiornik pojemnościowy stał się niesymetrycznym, niesymetryczne więc będzie obciążenie źródła energii.

Prądem zwarcia z ziemią nazywamy ten prąd pojemnościowy, który przez pojemność względem ziemi „zdrowych” faz płynie do nich z ziemi, dalej przewodami do źródła napięcia, skąd fazą „chorą” przez miejsce zwarcia — do ziemi. Na rys. 4 widoczne jest, jak się zamyka obwód prądu zwarcia z ziemią.

Rys. 5 ilustruje, jak prąd zwarcia z ziemią rozchodzi się w sieci 5 kV.

Z miejsca zwarcia w fazie  $R$  całkowity prąd zwarcia z ziemią płynie kablem zasilającym na szyny zbiorcze w rozdzielni, skąd rozdziela się na poszczególne czynne w danej chwili prądnice. Z prądnicy wraca fazami  $S$  i  $T$  w wysokości  $\frac{1}{\sqrt{3}} \sim 58\%$  poprzedniej wielkości na szyny i rozpląta się wszystkimi 34-ma kablami zasilającymi, proporcjonalnie do pojemności obszarów zasilania, aby przez te pojemności przeniknąć do ziemi. Wartości liczbowe, podane na rysunku, odpowiadają wielkościom wyliczonym w dalszym ciągu.

Ze względu na asymetrię, kora jest charakterystyczną cechą zjawiska zwarcia z ziemią, bardzo dogodną metodą rozpatrywania zagadnienia tego jest t. zw. „rachunek skła-

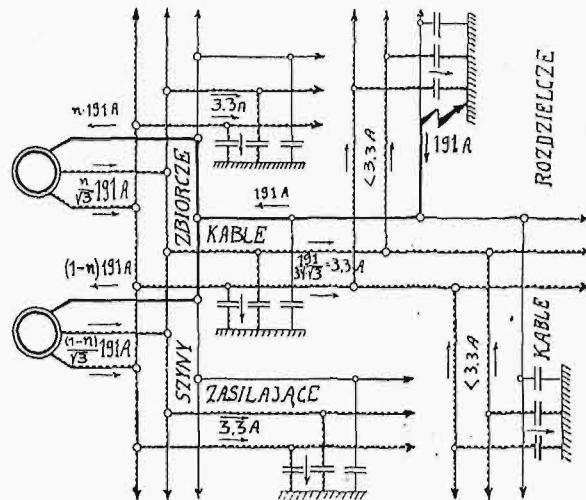


Rys. 4.

dowych symetrycznych” (metoda Fortescue). Podstawą jego jest fakt, że każdy układ trójfazowy niesymetryczny można zawsze rozłożyć na 3 składowe układy symetryczne, a mianowicie na dwa układy symetryczne trójfazowe o przeci-

wnych kierunkach wirowania wektorów i na układ jedno-fazowy.

Wyniki rozpatrzenia każdego z trzech układów zosobna sumujemy dla otrzymania rezultatu ostatecznego. (Oczy-



Rys. 5.

wiście nie zawsze można rozkład wogóle stosować, np. tam, gdzie w grę wchodzi nasycenia — otrzymalibyśmy wyniki fałszywe; dla zjawiska zwarcia z ziemią jednak metoda ta daje b. dobre rezultaty).

Nie wdając się tu w szczegóły, gdyż rachunek ten, posługując się metodą symboliczną, jest dosyć złożony — podamy wyniki w praktycznym oświetleniu, aby jak najwięcej wniosków móc wyciągnąć dla rozważanego zagadnienia w sieci warszawskiej.

W najogólniejszym przypadku metoda wspomniana wprowadza wzory z uwzględnieniem oporności pozornej miejsca zwarcia  $Z_N$  oraz impedancji linowej  $Z$ . Bliższe rozważanie wskazuje możliwość zaniedbania obu tych wielkości, jako w większości wypadków niewielkich i wywierających mały stosunkowo wpływ. (Z zastrzeżeniem, że nie mamy do czynienia ze zwarcie przez mur lub drzewo, gdzie  $Z_N$  będzie duże — które to zastrzeżenie odpowiada możliwym zwarcie z ziemią w sieci kablowej. Impedancja linowa  $Z$  dla kabli jest mała wobec niewielkiej indukcyjności).

Na rys. 6-a  $\bar{I}_{CR}$ ,  $\bar{I}_{CS}$ ,  $\bar{I}_{CT}$  przedstawiają prądy ładowania pojemności sieci względem ziemi, wywołane napięciami fazowymi  $\bar{e}_R$ ,  $\bar{e}_S$ ,  $\bar{e}_T$ . W momencie wystąpienia zwarcia z ziemią, jak to wyżej widzieliśmy, przez pojemność „zdrowych” faz względem ziemi popłyną prądy  $\bar{I}_T$  i  $\bar{I}_S$ , wywołane już napięciami skojarzonymi  $\bar{E}_{RS}$  i  $\bar{E}_{RT}$ , a więc  $\sqrt{3}$  razy większe od poprzednich i odpowiednio zmienione w kierunku na wykresie wektorowym. Rozważając linę tuż przy źródle napięcia, znajdziemy oczywiście wartość prądu  $\bar{I}_R$  w fazie „chorej”, jako równą i przeciwną co do kierunku sumie  $\bar{I}_S + \bar{I}_T$ . Tę sytuację ilustruje właśnie rys. 6-a. Zjawisko się komplikuje, gdy uwzględnimy fakt, iż pojemności w sieci nie są skupione, lecz rozłożone wzdłuż linii przeważnie linowo. Wykresy wektorowe na rys. 6 są otrzymane drogą analityczną właśnie zapomocą metody Fortescue, przytem a) odpowiada linii przy samym źródle energii (transformator, generator), b) — bezpośrednio przed miejscem zwarcia, licząc od źródła, c) — bezpośrednio za miejscem zwarcia.

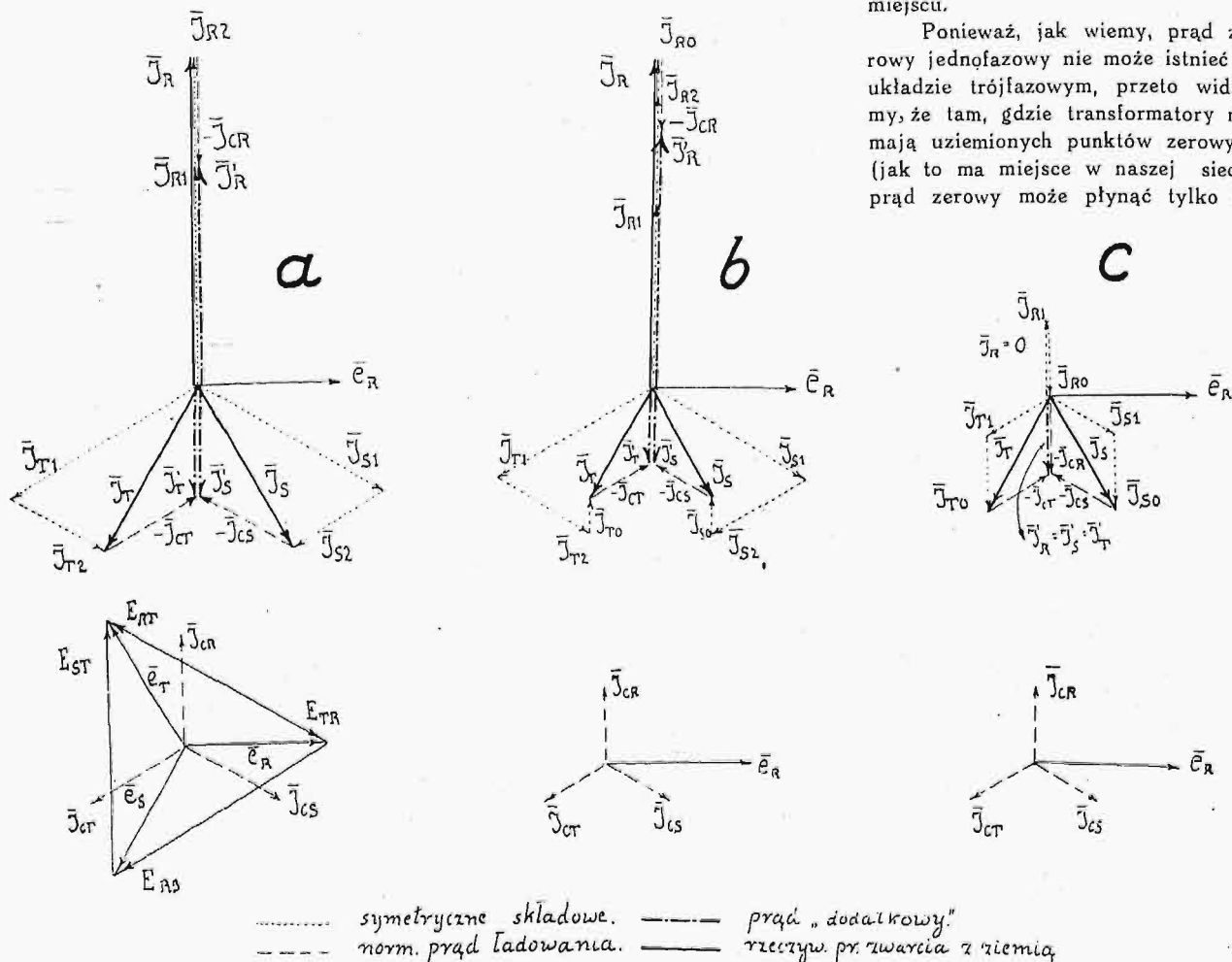
Wektory prądów rzeczywiście w przewodach płynących w poszczególnych fazach  $\bar{I}_R$ ,  $\bar{I}_S$ ,  $\bar{I}_T$  przedstawione są jako sumy geometryczne „składowych symetrycznych”.

$$\bar{I}_R = \bar{I}_{R_0} + \bar{I}_{R_1} + \bar{I}_{R_2} \text{ i t. d.}$$

Ilościowo mamy odwzorowane wielkości dla linii o pojemności jednostajnie rozłożonej i dla zwarcia z ziemią w odległości  $1/3$  całej długości linii od źródła.  $\bar{I}_{R0}, \bar{I}_{S0}, \bar{I}_{T0}$  są składowymi jednofazowymi t. zw. zerowymi,  $\bar{I}_{R1}, \bar{I}_{S1}, \bar{I}_{T1}$

W przewodach płyną oprócz prądu zerowego jeszcze prądy obu układów trójfazowych symetrycznych, w sumie mamy system trójfazowy niesymetryczny, w którym suma prądów w każdej chwili równa się nie zero, lecz sumie prądów zerowych trzech faz w danym miejscu.

Ponieważ, jak wiemy, prąd zerowy jednofazowy nie może istnieć w układzie trójfazowym, przeto widzimy, że tam, gdzie transformatory nie mają uziemionych punktów zerowych (jak to ma miejsce w naszej sieci), prąd zerowy może płynąć tylko na



Rys. 6 a, b, c.

tworzą układ trójfazowy symetryczny o kierunku wirowania, zgodnym z przyjętym dla napięć w sieci,  $\bar{I}_{R1}, \bar{I}_{S1}, \bar{I}_{T1}$  mają kierunek wirowania przeciwny. Godne zaobserwowania jest, że przy źródle składowa zerowa zanika.

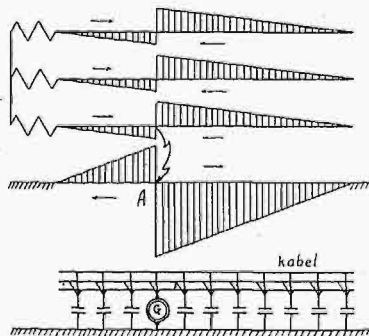
Najbardziej charakterystyczne dla zwarcia z ziemią jest właśnie wystąpienie składowej jednofazowej zwanej „prądem zerowym”. Można sobie wyobrazić, że w miejscu zwarcia z ziemią pracuje „generator zerowy” jednofazowy, włączony między ziemię z jednej, a trzy przewody z drugiej strony. Rys. 7 przedstawia faktyczny rozptył tej składowej jednofazowej prądu zwarcia z ziemią, czyli prądu zerowego. „Generator zerowy” zasilają położone z jego obu stron „odbiorniki”, którymi są pojemności przewodów względem ziemi.

Ten prąd zerowy, przepływając przez miejsce zwarcia z ziemią, stanowi całkowity prąd zwarcia z ziemią i wynosi:

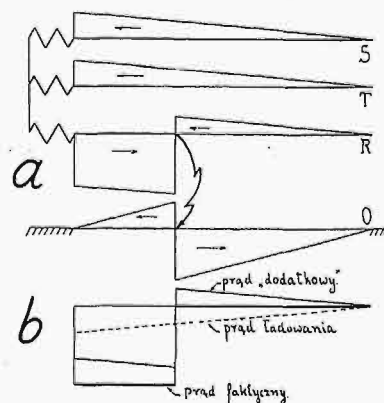
$$\bar{I}_E = -3 \bar{e}_R j \omega C l$$

(gdzie  $C$  — oznacza pojemność na jednostkę długości, a  $l$  — długość linii).

tych odcinkach, gdzie ziemia, sprzężona pojemnościowo, stanowi czwarty przewód powrotny. Przez uzwojenie trans-



Rys. 7.



Rys. 8.

formatorów płynie więc tylko minimalny prąd zerowy, odpowiadający pojemności tych uzwojeń względem ziemi, bo transformator znajduje się zawsze w końcu linii lub w odgałęzieniu od niej.

Faktycznego prądu w linii nie możemy odwzorować

tak, jak na rys. 7 prąd zerowy, bo nie jest on w fazie w poszczególnych przewodach; okazuje się jednak, że jeżeli od tego faktycznego prądu odjąć wektorowo prądy ładowania pojemności poszczególnych faz względem ziemi, takie, jakie płynęły przed momentem zwarcia, to otrzymamy „dodatkowy prąd”, wywołany zwarcie, który znów będzie w fazie we wszystkich przewodach (rys. 8).

Obraz ten bardzo przejrzysto odwzorowuje jakościowo i ilościowo stronę zwarcia z ziemią.

Jedynie w fazie R, która podlega zwarcia z ziemią, normalny prąd ładowania jest w fazie z „prądem dodatkowym” (i oczywiście z faktycznym prądem zwarcia z ziemią). Te dwa prądy są przytem skierowane przeciwnie (na prawo od miejsca zwarcia).

Rys. 8-b przedstawia sumę tych dwóch prądów, czyli obraz faktycznego prądu, płynącego w „chorej” fazie R, obraz zgodny z rzeczywistością: na prawo od miejsca zwarcia nie płynie żaden prąd, między miejscem zwarcia i źródłem energii płynie cały prąd zwarcia z ziemią.

Odwzorowanie wektorowe na rys. 6 i linjowe na rys. 7 i 8 wykazują zupełną zgodność.

Po odjęciu od  $\vec{I}_R, \vec{I}_S, \vec{I}_T$ , czyli od prądów rzeczywistych na rys. 6, prądów ładowania pojemności względem ziemi przed zwarcie:  $\vec{I}_{CR}, \vec{I}_{CS}, \vec{I}_{CT}$  — otrzymuje się prądy „dodatkowe”  $\vec{I}_R, \vec{I}_S, \vec{I}_T$  które są rzeczywiście w fazie dla wszystkich 3 przewodów. W powyższym w myśl uprzednich założeń pominięty jest prąd ładowania pojemności międzyprzewodowych, który się nie zmienia w chwili zwarcia z ziemią.

Ilościowo rys. 8 odpowiada rys. 6.

#### IV. Wielkość prądu zwarcia z ziemią.

Wielkość prądu zwarcia z ziemią w sieci Warszawskiej wyliczymy na podstawie dotychczasowych danych:

1) dla sieci niskiego napięcia: z danych tablic I i II pojemność całej sieci niskiego napięcia wynosi:

$$\sum C_n I_n = 214,87 \mu F$$

Prąd zwarcia z ziemią, w założeniu, że cała sieć jest połączona razem, to znaczy, że nie ma podziałów sieci — wyniosłby:

$$I_E = 3 e_R \omega \sum C I = 3 \frac{1}{\sqrt{3}} (2 \cdot 122 + 211) 314 \cdot 214,87 \cdot 10^{-6} \approx 17,75 A$$

(W powyższym założyliśmy dowolnie, że kable o napięciu 122 V jest dwa razy więcej, niż kable o napięciu 211 V i posiłkowaliśmy się napięciem średnim).

Potwierdza się przewidywanie (patrz II E 2), że w sieci niskiego napięcia prąd zwarcia z ziemią nie ma znaczenia: wynosi on dla wypadku, zgodnego ze stanem faktycznym, to znaczy przy istniejących podziałach sieci, 3 do 5<sup>0/00</sup> wyżej wyliczonej wielkości czyli w wartości bezwzględnej:

$$I_E^{NN} = 0,05 \text{ do } 0,09 A$$

2) dla sieci 5 kV, przy pojemności całej sieci względem ziemi (na jedną fazę)  $\sum C_n I_n = 87,06 \mu F$ , prąd zwarcia z ziemią wyniosłby

$$I_E = 3 \frac{5000}{\sqrt{3}} 314 \cdot 87,06 \cdot 10^{-6} = 236,2 A$$

Według II E 3 widzieliśmy, że prąd zwarcia z ziemią, ze względu na podział sieci może wynieść najwyżej 74% otrzymanej wyżej wartości czyli

$$I_E^{5 kV} = 0,74 \cdot 236,2 = 175 A$$

3) dla sieci 15 kV otrzymamy analogicznie:

$$\sum C_n I_n = 9,168 \mu F$$

$$I_E^{15 kV} = 3 \frac{15000}{\sqrt{3}} 314 \cdot 9,168 \cdot 10^{-6} = 74,8 A$$

4) Wzajemne oddziaływanie na siebie poszczególnych sieci uwzględnimy w założeniu, że może ono powstawać jedynie przez transformatory, którymi te sieci są powiązane.

Zagadnienie to trzeba rozpatrzyć w sposób trojaki:

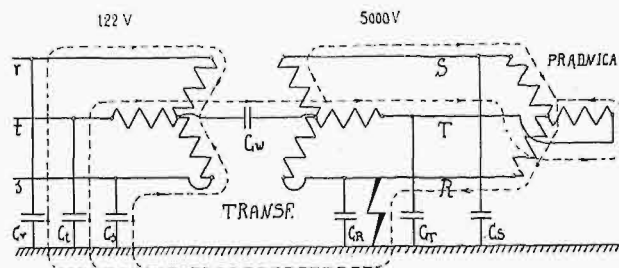
a) Wpływ zwarcia z ziemią w jednej sieci na sieć, która ją zasilą (np. wpływ zwarcia w sieci niskiego napięcia na sieć 5 kV, zwarcia w sieci 5 kV na sieć 15 kV albo zwarcia 15 kV na sieć 5 kV w rozdzielni) — ograniczy się do asymetrycznego obciążenia transformatorów i generatorów, spowodowanego zakłóceniem symetrii pojemności faz względem ziemi (rys. 4) i niejednakowymi spadkami napięć w linjach i transformatorach wskutek przepływu prądu zwarcia z ziemią (wykresy rys. 6).

Powyższe nie przedstawia żadnego niebezpieczeństwa, zwłaszcza na tle dużego stosunkowo obciążenia roboczego, prawie zupełnie symetrycznego.

b) Wpływ zwarcia z ziemią w sieci zasilającej na sieć zasilaną nie ma również praktycznego znaczenia. Ma tu co najwyżej miejsce minimalne zniekształcenie symetrycznego doładowania trójkątą napięć, dostarczanego sieci zasilanej, wskutek nierównych spadków napięć.

c) Najważniejszy jest dodatkowy wpływ, jaki wywiera na wielkość prądu zwarcia z ziemią w danej sieci pojemność sprzężonych z nią przez transformatory sieci, wpływ, wywierany za pośrednictwem pojemności wewnętrznej transformatorów (pojemności między jednym a drugim uzwojeniem transformatora).

Jeżeli wyobrazimy sobie tę pojemność, jako skupioną w formie kondensatora, włączonego między punkty zerowe obu uzwojeń transformatora, to będzie zrozumiałe, że powstanie dodatkowy prąd zwarcia z ziemią (rys. 9) wywołany tak,



Rys. 9.

jak normalny prąd zwarcia z ziemią napięciem punktu zerowego względem ziemi i przepływający przez pojemność wzajemną transformatora  $C_w$  oraz połączoną z nią szeregowo grupą trzech pojemności  $C_r, C_s, C_t$ , między sobą połączonych równolegle.

Istoty zjawiska nie zmienia oczywiście okoliczność, że jedno lub oba uzwojenia transformatora są połączone w trójkąt, bo obraz powyższy stworzyliśmy jedynie celem ułatwienia rozumowania.

Wielkość tego dodatkowego prądu zwarcia będzie:

$$I_{Ed} = \frac{E_R}{\sqrt{3}} \omega C_d$$

gdzie

$$C_d = \frac{C_w C_N}{C_w + C_N}$$

i  $C_N = C_r + C_s + C_t = 3 C_r$  bo  $C_r = C_s = C_t$

$J_{Ed}$  oczywiście będzie w fazie z  $J_E$ , bo są to prądy pojemnościowe, wzniecone tem samym napięciem  $e_R$ .

Wpływ napięć fazowych  $\vec{e}_r, \vec{e}_s, \vec{e}_t$ , pominięliśmy, bo wpływ ten znosi się w sumowaniu.

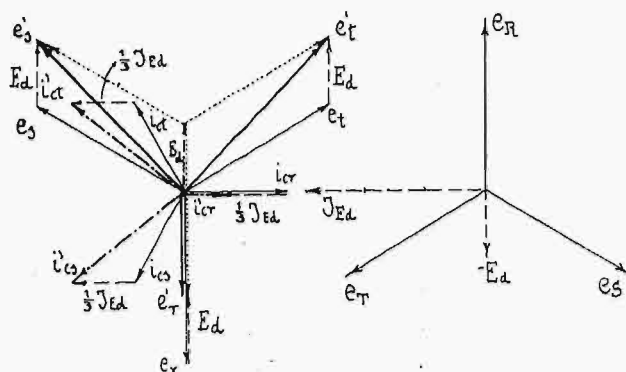
Również pominięliśmy wpływ oporu indukcyjnego uzwojeń transformatora, bo, jeżeli rozproszenie transformatora wynosi około 2% dla pełnego obciążenia, to dla tak minimalnego prądu (około 0,02 A), jaki tu wchodzi w grę — nie może odgrywać większej roli.

Należy wreszcie zauważyć, że w sieci „zdrowej”, sprzężonej przez transformatory z siecią, dotkniętą zwarcie z ziemią, nastąpi pewne przesunięcie potencjału punktu zerowego względem ziemi, uwarunkowane wielkością prądu

$$J_{Ed} \text{ i oporu pojemnościowego } \frac{1}{\omega C_N}.$$

$$E_d = I_{Ed} \cdot \frac{1}{\omega C_N}$$

Zachodzące stosunki ilustruje wykres wektorowy (rys. 10)  $\vec{J}_{Ed}$  — dodatkowy prąd zwarcia z ziemią, wzbudzony w obwodzie z rys. 9 napięciem  $\vec{e}_R$ ;  $-\vec{E}_d$  wywołany tym prądem spadek napięcia na pojemności  $C_N$ ; odwrotność tego spadku, czyli  $\vec{E}_d$ , jest napięciem, występującym faktycznie na tej pojemności.  $\vec{E}_d$  dodaje się do napięć względem ziemi po drugiej stronie transformatora  $\vec{e}_r, \vec{e}_s, \vec{e}_t$ ; teraz te napięcia wyniosą  $\vec{e}'_r, \vec{e}'_s, \vec{e}'_t$ . Zamiast poprzednich równych prądów ładowania  $\vec{i}_{cr}, \vec{i}_{cs}, \vec{i}_{ct}$  mamy obecnie prądy  $\vec{i}'_{cr}, \vec{i}'_{cs}, \vec{i}'_{ct}$ , które



Rys. 10.

od poprzednich są geometrycznie większe o  $1/3 \vec{I}_{Ed}$ . Te trzy prądy  $1/3 \vec{I}_{Ed}$  dodają się w punkcie zerowym, tworząc prąd dodatkowy  $\vec{I}_{Ed}$ . W razie złej izolacji sieci  $\vec{E}_d$  będzie znacznie mniejsze, bo z pojemnościami  $C_r, C_s, C_t$  równolegle załączone są niewielkie opory upływności.

5) Ostatecznie ustalimy wielkość prądu zwarcia z ziemią dla sieci 5 kV, zasilanej z rozdzielni. (W tym przypadku właśnie mamy do czynienia z największym w ogóle możliwym prądem zwarcia z ziemią w naszej sieci).

Pomiary pojemności międzyuzwojeniowej dla transformatorów powietrznych o mocach 5—200 kW, stosowanych przy przejściu z sieci 5 kV na niskie napięcie, dały wartość przeciętną około 0,018  $\mu F$  na 1 transformator.

W założeniu, że 74% transformatorów i 74% ogólnej długości sieci niskiego napięcia przypada na tę część sieci 5 kV (patrz II, E, 3) — otrzymamy:

$$C_r = C_s = C_t = 0,74 \cdot 214 \cdot 87 = 159 \mu F$$

$$C_N = 3 C_r = 3 \cdot 159 = 477 \mu F$$

$$C_W = 0,74 \cdot 1370 \cdot 0,018 = 18,26 \mu F$$

$$C_d = \frac{C_W \cdot C_N}{C_W + C_N} = \frac{18,26 \cdot 477}{18,26 + 477} = 17,58 \mu F$$

$$I_{Ed} = \frac{E_R}{\sqrt{3}} \omega C_d = \frac{5000}{\sqrt{3}} \cdot 314 \cdot 17,58 \cdot 10^{-6} = 15,95 \approx 16 A$$

Ostatecznie więc faktyczny prąd zwarcia z ziemią wyniesie:

$$I_E^{5kV} = 175 + 15 = 191 A.$$

czyli o  $\frac{16}{175} 100 = 9,15\%$  więcej, niż bez uwzględnienia wpływu sieci niskiego napięcia.

Dodatkowe napięcie punktu zerowego strony niskiego napięcia wyniesie:

$$|E_d| = I_{Ed} \cdot \frac{1}{\omega C_N} = \frac{16 \cdot 10^6}{314 \cdot 477} = 107 V.$$

Oczywiście obliczenia powyższe mają charakter przybliżony, mowy bowiem niema o dokładnym ustaleniu rozplywu prądu w sieci złożonej. Analogicznie, przy zwarcie z ziemią w sieci 15 kV, trzeba uwzględnić wpływ pojemności całej sieci 5 kV poprzez 18 transformatorów na podstacjach i w centrali, dla których pomiary dały średnią wartość pojemności międzyuzwojeniowej 0,05  $\mu F$ .

$$C_N = 3 C_r = 3 \cdot 87,06 = 261 \mu F$$

$$C_W = 18 \cdot 0,05 = 0,9 \mu F$$

$$C_d = \frac{261 \cdot 0,9}{261 + 0,9} \approx 0,9 \mu F$$

$$I_{Ed} = \frac{15000}{\sqrt{3}} \cdot 314 \cdot 0,9 \cdot 10^{-6} = 2,45 A$$

$$E_d = \frac{2,45 \cdot 10^6}{314 \cdot 261} = 29,9 V.$$

Wpływ jest tu minimalny, prąd zwarcia z ziemią będzie o  $\frac{2,45}{74,8} 100 = 3,3\%$  większy i wyniesie:

$$J_E^{15kV} = 74,8 + 2,45 = 77,3 A.$$

W powyższych obliczeniach pominęliśmy zupełnie wpływ pojemności sieci 15 kV na zwarcie z ziemią w sieci 5 kV, bo nie przekroczy  $1,1\% \left( \frac{3,3}{3} = 1,1 \right)$ .

## V. Skutki zwarcia z ziemią.

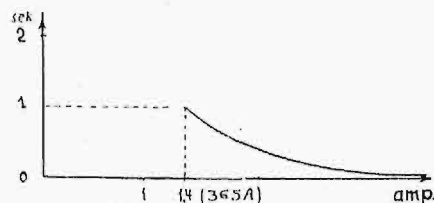
Przedewszystkiem przedstawimy stosowane zabezpieczenia sieci. Każdy kabel zasilający wyposażony jest obustronnie w wyłączniki olejowe automatyczne. Przekazniki w rozdzielni (lub podstacji) działają z opóźnieniem 2 sekund, niezależnym od prądu, i nastawione są na prąd 240 Amp. przy kablach 95 mm<sup>2</sup> i na mniejszy przy mniejszych przekrojach.

Przekazniki w punktach zasilających reagują na prąd przekraczający 365 A i mają czas wyłączania 1 sekundę przy tym prądzie. Czas jest zależny od prądu, i jest tem mniejszy im większy prąd (patrz rys. 11).

Sieć rozdzielcza zabezpieczona jest olejowymi bezpiecznikami topikowymi, dawnego typu Lahmayer'a, przyczem dla osiągnięcia pewnej selektywności: 1) bezpieczniki znajdują się tylko w stacjach rozgałęźnych, z których wychodzą najmniej 3 kable wysokiego napięcia (w stacjach przelotowych na miejscu bezpieczników są wkładki metalowe); 2) odcinki kable mają w bezpośrednim sąsiedztwie punktów zasilających zabezpieczenie o jeden stopień silniejsze; w naszym przypadku dla kabli 3×16 mm<sup>2</sup> normalne bezpieczniki 60 A, przy punktach zasilających — 80 A.

Rozważmy dwie ewentualności zwarcia z ziemią:

1) Zwarcie z ziemią w sieci rozdzielczej. „Chory” kabel jest obustronnie zabezpieczony bezpiecznikami. Wielkość prądu, będącego sumą geometryczną prądu



Rys. 11.

zwarcia (191 A) i prądu obciążenia (kilkadziesiąt amp.), zapewnią momentalne (ułamki sekundy) spalanie się bezpieczników i odcięcie miejsca uszkodzonego. Gdyby bezpieczniki działały idealnie, to selekcja byłaby niemal zupełna. Odłączona zostałaby tylko faza uziemiona, bo w pozostałych ma miejsce minimalny wzrost prądu wskutek prądu pojemnościowego, rozplywającego się przez pojemność do ziemi w tej części sieci. Spaliłyby się tylko bezpieczniki najbliższe zwar-



cia leżące, jeżeli dalej prąd zwarcia z ziemią ma kilka dróg równoległych. Automat w punkcie zasilającym nie powinien reagować, o ile zwarcie z ziemią nie przejdzie szybko w normalne dwu lub trzybiegunowe zwarcie, bo suma geometryczna prądu ziemnozwarciowego 191 A i maksymalnego dopuszczalnego prądu obciążenia kabla zasilającego (160 A, zwykle znacznie mniej) nie przekroczy 365 A.

Wogóle obserwacja wypadków, zachodzących w praktyce, poucza nas, że w 99 wypadkach na 100 zwarcie z ziemią przechodzi w pełne krótkie zwarcie, zanim jakiekolwiek zabezpieczenia zaczną działać i „chore” miejsce odizolują. Zasadniczą i decydującą rolę odgrywa tu wielkość prądu zwarcia z ziemią i związana z nią siła cieplna łuku wytworzonego.

W sieciach rozdzielczych, zasilanych z podstacji, składających się z 2 do 6 obszarów zasilania, mających więc prąd zwarcia z ziemią od  $\frac{2}{34} 191 = 11,3$  A do  $\frac{6}{34} 191 = 33,9$  A, mało jest prawdopodobne tak duże obciążenie kabli rozdzielczych, aby wystąpienie niewielkiego prądu zwarcia z ziemią mogło wystarczyć do wywołania palenia się bezpieczników. Długotrwały prąd zwarcia z ziemią ostatecznie doprowadzi do zwarcia zwykłego.

## 2) Zwarcie z ziemią w kablu zasilającym.

Przez każdy kabel zasilający płynie na szyny zbiorcze  $\frac{191}{34 \cdot \sqrt{3}} \approx 3,3$  A. Przez kabel uszkodzony płynie z szyn jedną fazą do miejsca zwarcia 191 A. W większości wypadków prąd ten łącznie z prądem obciążenia nie wystarczy do wyłączenia automatu na rozdzielni. W razie, gdy wystarcza, może też nieraz nie nastąpić wyłączenie, jeżeli zwarcie z ziemią nastąpi w fazie S, niechronionej przełącznikami (które są w fazach R i T). Wyłączenie nastąpi dopiero po powstaniu zwykłego zwarcia.

W razie zwarcia z ziemią w kablu zasilającym z podstacji, okres trwania zwarcia z ziemią jest dłuższy, wobec mniejszej wartości prądu zwarcia z ziemią.

Zwarcie z ziemią w sieci 15 kV nie stanowi w żadnym razie dostatecznego bodźca do wyłączenia automatów. Zwarcie zwykłe, będące nieodłączną konsekwencją zwarcia z ziemią, nie powoduje w sieci 15 kV przerw w ruchu, wobec podwójnego, równoległego zasilania podstacji i selektywnego zabezpieczenia kabli.

W obecnej chwili zwarcia z ziemią w sieci Warszawskiej nie dają się zbyt dotkliwie we znaki, a pewność i ciągłość ruchu są zupełnie zadowalające.

Dotychczas braliśmy pod uwagę jedynie zjawiska przeładowaniowe, związane ze zwarcie z ziemią. Na szczególną uwagę zasługuje jednak również i strona przepięciowa.

Wszelki łuk ziemnozwarciowy w momencie przerywania się pozostawia na pojemności, kórą zwierał, duży ładunek statyczny, bo dla prądu pojemnościowego napięcie osiąga swe maksimum w momencie przejścia chwilowej wartości prądu przez zero. Przy dalszym wzroście prądu, po przejściu jego wartości przez zero, następuje zwykle ponowny zapłon łuku. Łuk zapala się i gaśnie w takt częstotliwości prądu, dopóki dostateczne nagrzanie ośrodka nie zapewni mu ciągłości. Pozostawione za każdym razem ładunki sumują się, powodując przepięcia w wysokości 4—4,5-krotnego napięcia normalnego w fazach „zdrowych”, a 3—3,5-krotnego w fazie uziemionej.

Gwałtowne podskoki i spadki napięcia w momentach zapłonu i gaśnięcia łuku powodują powstawanie napięciowych fal wędrownych o bardzo stromym czole. Zbyteczne byłoby uzasadniać, jak szkodliwy będzie wpływ tych przepięć na wszystkie części sieci. W równej mierze zagrożone

są transformatory, urządzenia rozdzielcze, jak również i kable.

Proces uszkodzania kabli może następować stopniowo: słabe miejsce izolacji, zaatakowane przez przepięcie i nadwątłone jeszcze bardziej przy następnych przepięciach, jest tembardziej narażone na ich wpływ szkodliwy. Czas trwania tego niszczącego procesu może się przedłużać na tygodnie i miesiące przy sprzyjających warunkach atmosferycznych (susza, mróz).

Do możliwie dokładnej oceny znaczenia, jakie ma dla nas zagadnienie zwarcia z ziemią, pomocną nam będzie jeszcze analiza statystyki uszkodzeń w sieci 5 kV. W ciągu ubiegłych lat dziesięciu wogóle zanotowano 63 wypadki; w tem: 6 spowodowanych zalaniem wodą stacji transformatorowych, 12 wskutek uszkodzeń kabli przy robotach ziemnych gazowych, wodociągowych i t. d., 45 wypadków nie miało przyczyn ściśle określonych.

Oczywiście w ogromnej większości tych wypadków początkiem uszkodzenia było zwarcie z ziemią, które jednak tak szybko przechodziło w normalne zwarcie, że bezpieczniki paliły się już nie na jednej, lecz na 2 lub 3 fazach. W jednym tylko wypadku spaliły się bezpieczniki jednej fazy — czyli było czyste zwarcie z ziemią. Następnie godne jest zanotowania, że 12 z pośród wyżej wymienionych 45 wypadków miało miejsce równocześnie z innem, lecz w zupełnie innem, odległym zwykle miejscu, co by wyraźnie wskazywało na przepięcia, jako ich przyczyny. Również dla wszelkich wypadków, niespodowodowanych wyraźnymi przyczynami, można z dużym prawdopodobieństwem przyjąć, że przy pewnych przyczynach pierwotnych, jak: wady izolacji, uszkodzenia jej przy układaniu kabli, niedokładności montażu, powodujące zawilgocenie, dopiero powtarzające się przepięcia, wywołane między innymi zwarciami z ziemią w innych częściach sieci, doprowadziły ostatecznie do zupełnego przebiccia izolacji.

Dla lepszego zapoznania się z przebiegiem zwarcia z ziemią oraz dla sprawdzenia wyników obliczeń dokonana została próba zwarcia z ziemią drogą bezpośredniego uziemienia jednej fazy szyn zbiorczych 5 kV w rozdzielni.

Uziemienie było wykonane przez zmontowanie na marowym końcu kabla, wychodzącego z rozdzielni, rękawa kablowego, z którego wypuszczono 3 żyły i przyłutowano je do płyty uziemiającej, zakopanej na głębokości 2,5 m. Włączanie na ziemię dokonywane było wyłącznikiem olejowym, przy każdorazowym załączaniu odłącznika, przed nim w szereg wbudowanego, tylko na 1 fazę. Pomiar prądu zwarcia z ziemią różnymi przyrządami i w różnych fazach dał wartości, wahające się od 97 do 120 A. Jest to wielkość mniejsza od obliczonej (191 A) ponieważ:

a) wartość pojemności kabli, użyta w obliczeniach, jest dosyć dowolna; należy przypuszczać, że kable, kładzione przed dwudziestu kilku laty, miały znacznie mniejszą pojemność — na co jednak brak danych liczbowych;

b) wskutek mrozów opór uziemienia był dość znaczny i wynosił 8,2  $\Omega$  (próby będą powtórzone w lecie).

c) wszelkie uproszczenia i przybliżenia, stosowane w obliczaniu, zmierzały do otrzymania raczej za dużej, niż za małej wartości (np. pominięcie impedancji linowej), bo z punktu widzenia ochrony i zabezpieczenia sieci interesuje nas właśnie największa możliwa wielkość prądu zwarcia z ziemią, względnie granica górna, której ta wielkość napewno nie przekracza.

W czasie próby zwarcia z ziemią żadnych zjawisk przepięciowych nie zaobserwowaliśmy, raz, że były one znacznie stłumione przez dobre gaszenie łuku ziemnozwarciowego w wyłączniku olejowym, i powtórę wskutek braku

dość czułych urządzeń do zaobserwowania tych zjawisk. (Obserwowano wzrokowo i słuchowo rozłuki trójk./gwiazda siemensowskie na sieci 5 i 15 kV).

Wreszcie przewidywane przesunięcie względem ziemi potencjału punktu zerowego sieci niskiego napięcia nie dało też się stwierdzić wskutek przeważającego wpływu znacznej pojemności sieci nad jej pojemnością.

#### Dodatek.

Poniżej podamy opis ciekawych obserwacji, poczynionych w sieci, w związku z uszkodzeniem w kablu zasilającym 5 kV. Zjawiska zaobserwowane dadzą się wyjaśnić właśnie dzięki poznaniu przebiegu zwarcia z ziemią. Przy poszukiwaniu uszkodzenia w kablu, odkopano na nim cały szereg muf łącznych. Przy wszystkich (na przesłuzeniu przeszło 2000 m) stwierdzono, że są popalone druty uziemiające (są to druty miedziane cynowane o przekroju  $2 \times 1 \text{ mm}^2$ , gołe, łączące płaszcz ołowiany kabla z obu stron mufy z korpusem mufy i ze sobą, — mają na celu uzie-



Rys. 12.

mienie tych części). Ostatecznie znalezione uszkodzenie miało postać mufy łącznej zupełnie rozsądzonej. Należy wnioskować, że zwarcie, które spowodowało to uszkodzenie było następstwem zwarcia z ziemią, spowodowanego np. zawilgoceniem mufy. Prąd zwarcia o znanej nam już wielkości stukilkudziesięciu amperów w swej drodze do ziemi wybrał sobie drogę najmniejszego oporu — płaszczem ołowianym kabla w obie strony od miejsca uszkodzenia (przejście z korpusu mufy do ziemi jest utrudnione przez warstwę smoły i rdzę). Cienkie druty uziemiające, przez które prąd ten omijał następne mufy, musiały się popalić. Musimy więc się liczyć z tem, że w sieci bardzo wiele muf nie ma uziemień, bo przecież nie wszystkie mufy się odkopuje po każdym wypadku. W danym wypadku jednak zaobserwowano jeszcze ważniejsze zjawisko. Oto przy jed-

nej z odkopanych muf obok przepalonego drutu uziemiającego była w kablu wypalona dziura o powierzchni 3—4  $\text{cm}^2$ , dziura, która nie sięgała aż do żył: drut był przyszwesowany do kabla.

Okazuje się więc, że po przepaleniu się drutu w punkcie a (rys. 12) prąd zwarcia z ziemią w tym drucie, przepływając bezpośrednio do płaszcza ołowianego w punkcie b, wytworzył łuk, będący sprawcą tego wtórnego uszkodzenia, albo że łuk, powstały wskutek przepalenia się drutu, wypalił bezpośrednio dziurę w kablu.

W każdym razie jest niewątpliwe to, że drut uziemiający, nie będąc dość grubym dla przepuszczenia prądu zwarcia z ziemią, może powodować uszkodzenie kabla tem szkodliwsze, że nie występujące odrazu, lecz z biegiem czasu (kiedy wilgoć dostałaby się do wypalanej w ołowiu dziury). W danym wypadku odnalezienie tego uszkodzenia było czysto przypadkowe.

Dla zapobieżenia powyższemu należałoby albo zupełnie zarzucić stosowanie uziemień muf, albo używany drut musiałby mieć przekrój dostosowany do wielkości występującego prądu zwarcia z ziemią.

Zaniechanie stosowania uziemień byłoby w zasadzie rozwiązaniem najłatwiejszym, a to tembardziej, że celowość uziemień i ich skuteczność i tak wydają się problematyczne.

Ciekawe też będzie przytoczyć tu opinię Rüdenberga (Elektrische Schaltvorgänge 1933, str. 186): „Gdy zwarcie z ziemią powstaje w linii kablowej, to prąd zwarcia z ziemią przeważnie przechodzi w metalowe uzbrojenia kabla i dopiero stopniowo rozchodzi się w ziemi. Gdy przewodność tego uzbrojenia nie wystarcza dla wielkości prądu, a zwłaszcza gdy są przy mufach, między poszczególnymi odcinkami kabli, złe przejścia, to mogą spowodować groźne zjawiska przepalania się kabli. Jest więc konieczne dbać przy rozległych sieciach kablowych o dobre metaliczne połączenie poszczególnych odcinków płaszczy ołowianych kabli, albo też należy całkowicie je od siebie odizolować”.

Wskutek wyżej przytoczonych obserwacji i rozważań zaniechane zostało w sieci kablowej stosowanie połączenia metalicznego między płaszczykami ołowianymi kabla z obu stron muf łącznych lub rozgałęźnych.

## KONTROLA IZOLACJI W URZĄDZENIACH ELEKTRYCZNYCH.

Inż. Bogusław Tittenbrun.

**Streszczenie.** Po wyjaśnieniu pojęć zasadniczych omówiono znaczenie zagadnienia oraz czynniki, mające wpływ na stan izolacji, wreszcie podano ogólną charakterystykę stosowanych metod. Dzieląc metody kontroli na okresowe i ciągłe, podano szereg układów, stosowanych przy różnych systemach prądu. Wreszcie wskazano warunki, jakim powinny odpowiadać sieci dla ułatwienia skutecznej kontroli, wymaganej przez odnośne przepisy.

W początkach rozwoju elektrotechniki nie zdawano sobie dokładnie sprawy z własności materiałów, używanych do budowy urządzeń elektrycznych i dzielono je pod względem przewodności na przewodniki i izolatory. Podział ten utrzymał się poniekąd i do dnia dzisiejszego, pojęcie jednak izolatora bezwzględnie dziś już nie istnieje. Porównyując materiały izolacyjne między sobą, operujemy przedewszys-

tkiem pojęciem oporu, odnosząc je przytem do warunków, w jakich dany materiał się znajduje. Jeżeli mówimy o stanie izolacji przewodów, maszyn, przyrządów czy też całej sieci, mamy przedewszystkiem na myśli opór materiałów izolacyjnych, oddzielających różnobieżunowe części urządzenia od siebie oraz części urządzenia, przeznaczone do pozostawiania pod napięciem, od tych, które mogą — ale nie powinny — prądu przewodzić. Ostatnie bywają w niektórych wypadkach uziemione, ogólnie zaś nie są umyślnie od ziemi izolowane — zatem pomiar oporu między przewodnikiem a ziemią daje nam przybliżony obraz stanu izolacji urządzenia względem tych jego części, które zamierzamy chronić od przedostania się do nich napięcia. Obraz stanie się dokładny, gdy te wszystkie części będą dobrze uziemione; ogólnie jednak dobra izolacja względem ziemi łącznie z dobrą izolacją biegunów względem siebie nie jest jeszcze wskazówką, że urządzenie jest pod względem stanu izolacji

bez zarzutu. Jak widzimy, zagadnienie stanu izolacji jest ściśle związane z kwestią uziemień. Wyniki pomiarów oporu izolacji zależą w dużym stopniu od ilości i dobroci uziemień ochronnych. Możemy się łatwo o tem przekonać, odłączając dla próby wszystkie lub choćby część tylko uziemień ochronnych danej sieci: pomiar wykaże natychmiast wzrost oporu izolacji względem ziemi, przez co urządzenie nie stanie się oczywiście lepsze, lecz wprost przeciwnie — pogorszy się. W praktyce stosujemy oprócz pomiarów izolacji biegunów względem siebie wyłącznie prawie pomiary względem ziemi; musimy jednak pamiętać, że wynik może być fałszywy, jeżeli uziemienia ochronne nie będą w porządku.

Opór izolacji danego urządzenia nie jest wielkością stałą, lecz zależy w dużym stopniu od wielu czynników. Wilgotność i temperatura powietrza, zawartość w niem gazów i pyłów należą do czynników, oddziałujących trwale na izolację; uszkodzenia mechaniczne wszelkiego rodzaju, zużycie się czy rozluźnienie części przyrządów, pozostających pod napięciem, zwłaszcza wyłączników, powodować mogą stałe lub przejściowe zmiany stanu izolacji. Ta właśnie wielka zmienność liczb, charakteryzujących stan izolacji, utrudnia znacznie zadanie utrzymania urządzenia w należytych stanie, szczególnie gdy sieć przewodów jest rozległa i gdy zachodzą w jej obrębie różnorodne i często powtarzające się procesy. Najwięcej z pewnością sprawiają kłopotu krótkotrwałe, nieraz ułamek sekundy trwające, pogorszenia się stanu izolacji, powstające np. przy uruchamianiu wyłączników; wyszukiwanie tego rodzaju błędów jest niełatwe.

Dobry stan izolacji ma przede wszystkim pierwszorzędne znaczenie dla pewności ruchu. Każda niemal wada izolacji ma tendencję do potęgowania się, czyli prowadzi w konsekwencji do zwarcia z ziemią lub między biegunami, zwarcia zaś z kolei pociągają za sobą przebiecia i przetężenia, nadwerężające miejsca słabszej izolacji. Drugim, nie mniej ważnym punktem jest wzgląd na zwiększone niebezpieczeństwo porażenia. Wreszcie, przy złej izolacji sieci występują niepożądane zakłócenia, np. w telefonach i innych urządzeniach pomocniczych. Dlatego przepisy budowy i ruchu wszystkich krajów poświęcają zagadnieniom izolacji wiele uwagi, a jeśli dokładne liczbowe określenie wymagającego jej oporu spotyka się rzadko, to dzieje się to tylko ze względu na wspomnianą wyżej zależność jej od wielu czynników, wykluczającą prawie możliwość praktycznego stosowania norm ogólnych. Przepisy polskie wymagają, jak wiadomo, aby oporność izolacji odcinka sieci przewodów izolowanych, zawartego między dwoma bezpiecznikami lub za ostatnim bezpiecznikiem, wynosiła najmniej 1000 omów na 1 wolt napięcia roboczego; dla miejsc wilgotnych, a także dla maszyn, transformatorów, akumulatorów, przyrządów, przewodów napowietrznych żaden określony opór izolacji nie jest przepisany. Dalej przepisy wymagają, aby pomiary izolacji wykonywane były możliwie napięciem, równym napięciu robocznemu, a w żadnym razie nie niższym, niż 100 woltów. Jest to zrozumiałe, jeżeli ważmiemy pod uwagę, że wyniki pomiarów przy użyciu różnych napięć mogą być różne, a chodzi nam przecie przede wszystkim o zorientowanie się co do stanu izolacji w normalnych warunkach ruchu. W razie użycia do pomiarów zbyt niskiego napięcia może wiele błędów, występujących przy napięciu roboczym, pozostać nieujawnionych; zbyt wysokie napięcie może natomiast spowodować niepotrzebne uszkodzenie tych punktów izolacji, które w normalnych warunkach mogłyby zapewne jeszcze dobrze spełniać swoje zadanie.

Wiadomo z praktyki, że większa część wypadków uszkodzenia izolacji dotyczy izolacji między przewodem

a ziemią; wady izolacji międzyprzewodowej są o wiele rzadsze. Pochodzi to stąd, że ilość i intensywność oddziaływania czynników zewnętrznych jest nierównie większa od przyczyn, występujących wewnątrz samego urządzenia, i że rozporządzamy lepszymi środkami dla zapobieżenia lub stłumienia w zarodku przyczyn natury wewnętrznej, jakimi są np. przetężenia i przebiecia. Z tego względu przywiązujemy większą wagę do kontroli izolacji przewodów względem ziemi, niż do sprawdzania izolacji międzyprzewodowej, a rozwój metod kontroli szedł również więcej w tym kierunku. Ogólnie rozróżniamy dwie metody kontroli: kontrolę okresową, uskutecznianą przez pomiary w ustalonych zgóry terminach oraz kontrolę ciągłą przy pomocy stale włączonych przyrządów, które mogą być skombinowane z przekazywanymi rejestrującymi, alarmującymi lub wyłączającymi. O ile pierwsza z tych metod nadaje się do urządzeń „spokojnych”, podlegających przeważnie wpływom powoli działających czynników zewnętrznych, o tyle w urządzeniach bardziej skomplikowanych, o wielkiej liczbie różnorodnych odbiorników i przy większej możliwości powstawania niespodziewanych uszkodzeń mechanicznych wskazane jest stosowanie metody drugiej. Kontrola ciągła daje pełniejszy obraz stanu izolacji, jest jednak znacznie kosztowniejsza, a wyniki pomiarów są naogół mniej dokładne, nadto, będąc zazwyczaj scentralizowana w większych rozdzielniach, obejmuje znaczniejsze kompleksy urządzeń; jeżeli więc chodzi o kontrolę szczególnie pieczołowitą, wskazane jest stosowanie obu metod naraz.

Do pomiarów oporności izolacji nadaje się najlepiej prąd stały. Prąd zmienny znajduje sobie bowiem drogę równoległą do drogi oporu izolacji poprzez pojemność sieci; można więc ten rodzaj prądu stosować tylko w urządzeniach o bardzo małej pojemności, lub gdy rezygnuje się z większej dokładności, a chodzi tylko o wykrycie znacznych błędów. Nie należy jednak zapominać, że przyrząd, najczęściej używany do badania izolacji — induktor, wytwarzający prąd tętniący, zawierający zatem składową zmienną, która również płynie poprzez opory pojemnościowe. Składowa ta powinna być możliwie mała i możliwie zbliżona do sinusoidy; miarą jej, a zarazem poniekąd miarą dobroci induktora jako źródła prądu, jest stosunek najwyższej wartości krzywej napięcia do średniej jej wielkości. Stosunek ten w dobrych induktorach wynosi około 1,5 i mniej, w gorszych dochodzi do 3 i 4.

Urządzenia prądu stałego znajdują się w odniesieniu do kontroli izolacji w lepszych warunkach, niż urządzenia prądu zmiennego, gdyż do pomiarów daje się doskonale stosować własne napięcie sieci; jest tu szczególnie ułatwiona kontrola ciągła; również łatwiejsze jest określenie stanu izolacji poszczególnych biegunów oddzielnie. Tem się też tłumaczy, że w starszych urządzeniach prądu stałego spotykamy tak często na tablicach mierniki izolacji, gdy obecnie, przy całkowitem niemal przejściu na prąd trójfazowy widzimy ich mało; zastąpiły je przeważnie wskaźniki zwarcia z ziemią, dające tylko zgruba pojęcie o stopniu uszkodzenia izolacji. I te jednak, nieraz stosunkowo proste i tanie przyrządy, bywają przy projektowaniu urządzeń często pomijane, choć zasługują one na uwagę ze względu na znaczenie, jakie do stanu izolacji powinno się przywiązywać.

Przejdziemy teraz do krótkiego przeglądu metod pomiarowych, stosowanych przy kontroli stanu izolacji.

Badania okresowe najwygodniej jest przeprowadzać w urządzeniach, wyłączonych z pod napięcia. Używamy wówczas prostego układu, polegającego na utworzeniu obwodu ze źródła prądu, badanej izolacji i woltomierza lub galwa-



nomietru. Przy znanym oporze woltomierza i niezmiennym napięciu może być skala woltomierza wprost cechowana w omach. Niewygodnym jest, że skala omów zgęszcza się w kierunku dodatnim, stosownie do wzoru

$$x = g \left( \frac{E}{E'} - 1 \right),$$

gdzie  $E$  jest napięciem źródła prądu,  $E'$  napięciem, odczytywanym przy pomiarze, i  $g$  oporem woltomierza. Najkorzystniejsze jest użycie specjalnie do tego celu przeznaczonego obcego źródła prądu (induktora, baterji), możliwe jest jednak stosowanie własnego napięcia sieci. W ostatnim razie wyniki są mniej dokładne, ponieważ sieć, z której pobieramy prąd dla pomiaru, posiada sama też niedoskonałą izolację; jeszcze mniej dokładne wyniki będą, oczywiście, przy pomiarze prądem zmiennym. Jako miernik służy przy prądzie stałym najlepiej woltomierz z ruchomą cewką, przy prądzie zmiennym zaś miernik elektrodynamiczny lub elektromagnetyczny. Dla dokładnego pomiaru opór woltomierza powinien być rzędu mierzonego oporu izolacji, dlatego pożądane są przyrządy z oporami przełączalnymi. Przy induktorze jako źródle prądu trudność sprawia nadanie twornikowi równomiernej szybkości, i to tem bardziej, im wyższe jest napięcie pomiaru. Powstający stąd błąd często niweczy korzyści, które daje stosowanie wyższego napięcia. Istnieją konstrukcje zatrzymujące samoczynnie wskazówkę woltomierza przy osiągnięciu żądanej szybkości twornika induktora. Ponieważ jednak wskazówka o wiele szybciej podąża za zmianą napięcia, niż wyzwalaający zapadkę regulator odśrodkowy, nie wydaje się, żeby dokładność pomiaru na tem urządzeniu zyskiwała. Innym sposobem zmniejszenia wpływu wahań napięcia jest przy woltomierzach z ruchomą cewką zastąpienie sprężynki, przeciwdziałającej momentowi cewki mierniczej, przez drugą cewkę, umieszczoną na tej samej osi. Prąd, płynący przez tę cewkę, zamyka się przez stały opór i źródło prądu. Sposób ten jest bardzo skuteczny i w połączeniu z dobrym induktorem daje dostateczną dokładność pomiarów. Induktorem, zaopatrzonym w woltomierz z cewką ruchomą, można badać też urządzenia prądu zmiennego pod napięciem, o ile, oczywiście, napięcie robocze sieci nie jest zbyt wysokie w stosunku do wytrzymałości elektrycznej przyrządu. Aby nie wystąpił przytem rezonans mechaniczny ruchomego systemu mierniczego woltomierza, nie może być okresowość drgań własnych tego systemu wielokrotnością częstotliwości sieci.

Induktor jest przyrządem niezbędnym w każdym urządzeniu elektrycznym. Przy zakupie tego przyrządu należy zwrócić uwagę na wytwarzane napięcie, które nie powinno być za wysokie, a tylko być dostosowane do napięcia sieci, na system woltomierza, na dobrą izolację (zła izolacja powoduje fałszywe wyniki pomiarów!), na zrównoważenie twornika, wreszcie na ciężar i wymiary przyrządu.

Przy kontroli ciągłej stanu izolacji korzystamy zasadniczo z napięcia własnego sieci. Teoretycznie byłoby możliwe, oczywiście, zastosowanie przy prądzie zmiennym opisanego ostatnio sposobu; byłby to jednak już zbytek, wymagający zainstalowania stale działającego źródła prądu o odpowiednim napięciu i izolacji. W urządzeniach prądu stałego mamy do rozporządzenia oddawna opracowane metody pomiarów napięciem sieci, na których też bywają oparte stale działające wskaźniki. Według metody Frischa włączamy między każdy biegun a ziemię po woltomierzu o znanym oporze. Z ich odchyłów, proporcjonalnych do oporu izolacji odpowiedniego bieguna, można, znając napięcie sieci, obliczyć zarówno te opory oddzielnie, jak i odra-

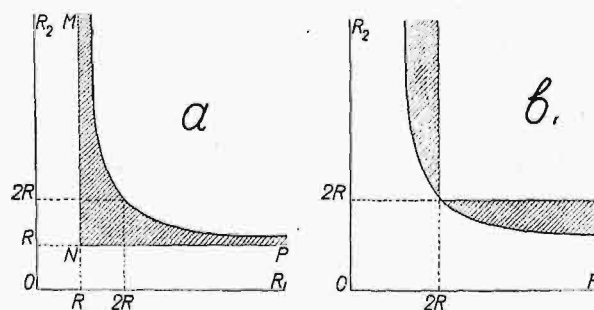
zu ich oporność wypadkową. I tu pożądane jest dla dokładności pomiaru, aby opór woltomierza i opór izolacji były jednego rzędu. Na powyższej zasadzie oparte też bywają przyrządy do kontroli ciągłej, mierzące zazwyczaj izolację wypadkową obu przewodów według wzoru

$$x = g \left( \frac{E}{E_1 + E_2} - 1 \right).$$

Woltomierz posiada w tym celu dwie cewki i skalę w omach, a także często kontakt, włączający obwód sygnałowy przy pewnym określonym odchyśle. Mimochoodem zauważymy, że właściwiej jest stawiać pewne wymagania co do stanu izolacji dla każdego bieguna z osobna. Gdy bowiem w ostatnim wypadku granicą obszaru dopuszczalnych ( $R$ ) i niedopuszczalnych wartości izolacji będzie linia MNP (rys. 1a), to w wypadku takiego samego nastawienia kontaktu alarmowego w aparacie, mierzącym izolację wypadkową, granicą tych obszarów będzie hiperbola

$$R_2 = \frac{R R_1}{R_1 - R},$$

a w obszarze zakreskowanym przyrząd będzie wykazywał nadczułość, dochodzącą do 100%. Odwrotnie, gdy zwiększymy wymagania co do stanu izolacji, nie zmieniając nastawienia przyrządu, czułość jego będzie niedostateczna (obszar zakreskowany na rys. 1b). Niektóre przyrządy bywają zaopatrzone w przełączniki, włączające co pewien czas samoczynnie to jedną to drugą cewkę woltomierza. I przy tym jednak układzie, z przyczyn nieco bardziej skomplikowanych, idealna charakterystyka czułości według linii MNP nie da się osiągnąć.



Rys. 1.

Według Frölicha włączamy między biegunem a ziemią woltomierz o znanym oporze oraz bocznik o również znanym oporze. Znając napięcie sieci, możemy z odchyłu woltomierza bez bocznika i z bocznikiem obliczyć opór izolacji każdego bieguna. Sposób ten jest bardzo wygodny, wymaga jednak dwóch kolejnych odczytów i wskutek tego nie nadaje się do kontroli ciągłej. Przy dość dobrej izolacji najwygodniejsze jest użycie woltomierza o dużym oporze, ewentualnie woltomierza elektrostacyjnego. Idea Frölicha rozwinięta została przez Sahulkę w zastosowaniu do prądu zmiennego i w szczególności do sieci trójfazowych. Według tej metody włącza się między przewodami sieci trójfazowej a ziemią znane opory, poczem dokonywa się pomiarów napięcia przewodów względem ziemi woltomierzem elektrostacyjnym. Dla różnych oporów otrzymuje się szereg równań, z których można obliczyć opór izolacji sieci, całkowicie eliminując wpływ pojemności. Jest to prawdopodobnie jedyna dokładna metoda, posługująca się prądem zmiennym, zresztą dla celów praktycznych bez znaczenia. Metodami zaś Frischa i Frölicha posługiwać się można przy prądzie zmiennym ze względu na pojemność tylko wtedy, gdy chodzi o grube przybliżenie.



Przechodząc do sieci prądu zmiennego, a w szczególności trójfazowych, zauważymy, że stosowane tu metody i przyrządy nie tyle mają na celu ujęcie liczbowe stanu izolacji, ile samo tylko wykrycie grubszych błędów, lub zgola zwarc z ziemią. Stanem izolacji międzyprzewodowej nie zajmujemy się już zupełnie. Skala cechowanych w omach nie spotykamy; najwyżej będą one wskazywały „procent uziemienia” — pojęcie dość płynne, stworzone ad hoc dla ruchu; korzystamy przeważnie ze skal jak i ze wskaźników optycznych i t. p. dla porównania z pewnymi stanami normalnymi.

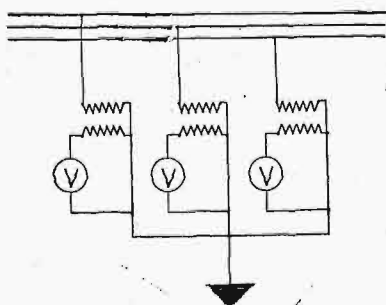
Pod względem sposobów wykrywania uszkodzeń izolacji czy zwarc z ziemią\*) musimy rozróżniać sieci trójfazowe z nieziemionym i uziemionym punktem zerowym oraz sieci z przewodem zerowym i bez niego.

Przy nieziemionym punkcie zerowym najprostszym sposobem wykrycia zwarcia z ziemią jest włączenie wskaźnika napięcia między punkt zerowy a ziemię. Wskaźnikiem takim może być nawet odpowiednio dobrana żarówka, najczęściej zaś woltomierz lub przekaźnik. Jeżeli punktu zerowego nie ma (transformator połączony w trójkąt), albo jest trudno dostępny (daleko położony), można stworzyć sztuczny punkt zerowy, łącząc w gwiazdę jednakowe opory, kondensatory lub dławiki. W tym wypadku prądy, płynące do takiego sztucznego punktu zerowego, muszą być znaczne w porównaniu z prądem, pobieranym przez wskaźnik. Przy normalnej pracy sieci wskaźnik stoi na zerze, w razie zwarcia z ziemią jednej fazy potencjał punktu zerowego różni się od potencjału ziemi i następuje odchył woltomierza. Częściej używa się układ z trzech woltomierzy, połączonych w gwiazdę, której punkt zerowy łączy się z ziemią. Normalnie wszystkie trzy woltomierze wskazują napięcie fazowe sieci, w razie zwarcia z ziemią odchyły jednego zbliżają się do zera, dwóch pozostałych — do napięcia międzyprzewodowego. Układ ten jest korzystniejszy od poprzedniego, ponieważ od razu wskazuje, w której fazie nastąpiło zwarcie z ziemią, pozatem jest on czulszy. Przy układzie jednouwoltomierzowym wskazówka przyrządu, stojąca przez dłuższy czas na zerze, łatwo może się zatrzeć; przytem skala woltomierza jest w pobliżu zera zazwyczaj

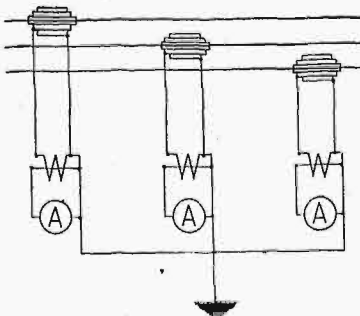
bowiem sposoby polegają na wykrywaniu przesunięcia się potencjału punktu zerowego względem ziemi, prądy zaś upływowe, o ile są we wszystkich fazach równe, utrzymują do pewnego stopnia potencjał ten w jego położeniu normalnym. Układy są więc czulsze w sieciach o małej pojemności. Dla tej samej przyczyny nie jest możliwe wycechować zgóry skale woltomierzy w omach na stan izolacji. Mogłoby to być zrobione tylko na podstawie doświadczeń w istniejącej sieci i byłoby ważne tylko dopóty, dopóki dane elektryczne sieci pozostałyby bez zmiany.

Do prądów, pomagających potencjałowi punktu zerowego utrzymywać się w jego położeniu normalnym, należą, oczywiście, także prądy, płynące przez same woltomierze. Nie jest więc rzeczą obojętną zużycie własne prądu przez układ mierniczy. Zasadniczo korzystniejsze są przyrządy o małym własnym zużyciu, jednak korzyść ta mniej się uwydatnia przy większej pojemności sieci, gdy prądy układu mierniczego są małe wobec prądów pojemnościowych. Dlatego przy sieciach o małej pojemności wskazane jest użycie woltomierzy elektrostatycznych, gdy przy większej pojemności wybór systemu nie gra większej roli.

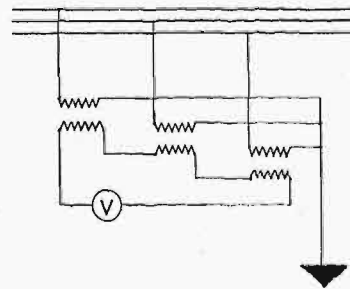
Na zasadzie trzech woltomierzy oparte są liczne układy, służące do wykrywania zwarc z ziemią. Przy wyższych napięciach woltomierze przyłącza się nie wprost do sieci, lecz przez transformatoriki napięciowe. Normalny układ tego rodzaju przedstawiony jest na rys. 2. Przy bardzo wysokich napięciach osiąga się oszczędność na kosztach instalacji przez wyzyskanie do tego celu (składających się z kilku warstw) okładzin izolatorów przepustowych (rys. 3). Prąd pojemnościowy, płynący między okładzinami, a zależny od wysokości napięcia każdej fazy względem ziemi, przenosi się przez transformatoriki, podwyższające natężenie, na amperomierze o odpowiednim zakresie mierniczym. Kiedy indziej łączy się wtórne uzwojenia transformatorów napięciowych w szereg, przyczem woltomierz wskazuje geometryczną sumę napięć wtórnych (rys. 4). Woltomierze układu rys. 2, zastępuje się niekiedy przez żarówki. Żarówki te, umieszczone we wspólnej oprawie za szkłem matowym, dają charakterystyczne efekty świetlne dla ruchu normalnego i dla różnego stopnia i rodzaju



Rys. 2.



Rys. 3.



Rys. 4.

ściśniona, przez co mniejsze uszkodzenia izolacji mogą wywoływać zaledwie trudno dostrzegalne odchyły, wreszcie układ trójwoltomierzowy jest jednocześnie wskaźnikiem obecności napięcia w sieci. Czulość obu układów zależy w dużym stopniu od pojemności sieci, ściślej mówiąc — od natężenia upływających prądów pojemnościowych, ewentualnie także od normalnego upływu poprzez izolację. Oba

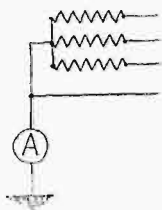
zwarc z ziemią\*). Wszystkie te układy mogą być uzupełnione urządzeniami alarmującymi lub rejestrującymi.

Przy uziemionym punkcie zerowym transformatora w wielu przypadkach dostateczną wskazówką zwarcia z ziemią jest reagowanie przekaźników nadmiarowych lub nierównomierne obciążenie faz. Pewniejszym i czulszym sposobem jest umieszczenie wskaźnika między punktem zerowym, a ziemią. Wskaźnik ten, np. odpowiednio czuły amperomierz lub przekaźnik, reaguje na prąd, płynący od miejsca uszkodzenia izolacji przez ziemię do punktu zero-

\*) Dalsze rozważania będą dotyczyć zarówno uszkodzeń izolacji względem ziemi, jak i kompletnych zwarc z ziemią; aby nie powtarzać za każdym razem obu tych określeń, będziemy używać tylko jednego wyrażenia „zwarcie z ziemią”.

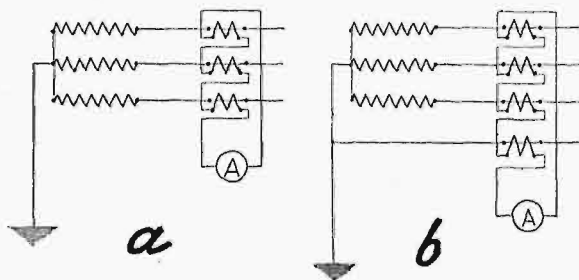
\*) Ciekawe fotografie takich efektów świetlnych zamieścił „Electrical World” na str. 770 rocznika 1925.

wego. Sposób ten nadaje się również do sieci z przewodem zerowym, pod warunkiem wszakże, że przewód ten jest uziemiony tylko w jednym miejscu, przy transformatorze, na całej zaś pozostałej długości jest dobrze izolowany (rys. 5). Opisany przez p. B. Szapirę w Nr. 5 „Przeglądu Elektrotechnicznego” z r. 1933 łącznik kontrolny należy do tej kategorii wskaźników.



Rys. 5.

Sposoby ujawnienia zwarcia z ziemią, oparte na przesunięciu potencjału punktu zerowego, mają tę wspólną wadę, że nie dają możliwości bezpośredniego wykrycia, w której części sieci względnie w której z linii odchodzących z punktu rozdzielczego, gdzie prowadzimy obserwacje, błąd się znajduje. Dla wykrycia uszkodzonej linii musimy kolejno wylączyć poszczególne linie dopóty, dopóki wskaźnik zwarcia nie powróci do swego położenia normalnego. Metody, usuwające tę niedogodność, oparte są na sumowaniu geometrycznym prądów, płynących w poszczególnych przewodach linii odchodzącej. Układy takie dla sieci o uziemionym punkcie zerowym z przewodem zerowym i bez niego przedstawia rys. 6a i 6b. W stanie normalnym suma geometryczna prądów w obu



Rys. 6.

układach równa jest zeru i przez wskaźnik żaden prąd nie płynie. Przy zwarcu z ziemią część prądu między miejscem uszkodzenia a punktem zerowym zamyka się przez ziemię, prądy w obwodzie wskaźnika już się wzajemnie nie znoszą i wskaźnik reaguje. Jeżeli na tablicy dla każdej linii odchodzącej mamy taki wskaźnik, od razu widzimy, która linia jest uszkodzona. I tu przy sieci czteroprzewodowej konieczna jest dobra izolacja przewodu zerowego. W sieciach trójprzewodowych prądu stałego stosuje się podobny układ przy użyciu amperomierza różnicowego.

Gdy punkt zerowy sieci nie jest uziemiony, sprawa jest nieco trudniejsza. Zadowalające rozwiązanie jej można osiągnąć tylko przy większej pojemności sieci, gdyż tylko wtedy płynie przez punkt zwarcia znaczniejszy prąd. Dla większej czułości buduje się wskaźnik na zasadzie watomierzowej, przyczem przez jedną jego cewkę płynie prąd odpowiadający upływowi przez miejsce zwarcia, w drugiej natomiast wykorzystuje się występujący jednocześnie wzrost potencjału punktu zerowego. Schemat zasadniczy takiego urządzenia przedstawia rys. 7; na rysunku tym opuszczone zostało dodatkowe połączenie służące do sztucznego odwrócenia o 90° fazy jednego z prądów obwodów mierniczych, co jest konieczne dla uzyskania momentu obrotowego watomierza.

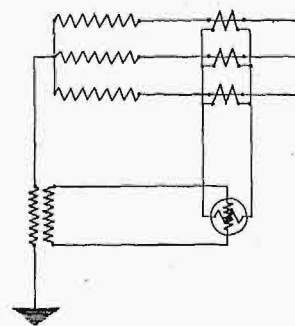
Zamiast trzech sumujących transformatorów prądowych, jak na rys. 6 i 7, może być użyty przyrząd, jak na rys. 8. Jako pierwotne uzwojenie służą wprost żyły kabla, otoczone obwodem magnetycznym w postaci rdzenia żelaznego, na którym mieści się uzwojenie wtórne. Z chwilą, gdy suma geometryczna prądów w żyłach kabla staje się

różną od zera, w żelazie występuje strumień magnetyczny i przez amperomierz płynie prąd. Układ ten jest jednak mniej czuły od poprzednich, ponieważ znaczna część i tak już małego (wskutek obecności tylko jednego zwoju) strumienia magnetycznego zamyka się przez pancierz kabla.

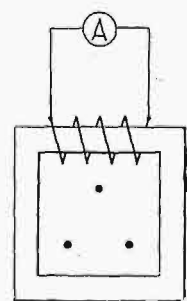
Każdemu praktykowi znane jest zjawisko brzęczenia w słuchawkach telefonów, występujące przy zwarcia z ziemią w urządzeniach prądu silnego. W większości wypadków przyczyną tego zjawiska jest również niecałkowite skompensowanie pola magnetycznego linii trójfazowej. Zaobserwowano niejednokrotnie, że telefony reagują już na takie błędy izolacji, których w układzie trójwoltomierzowym zupełnie jeszcze zauważyć nie można. Sieć telefoniczna może więc być nieraz cenną pomocą przy wykrywaniu błędów izolacji. Użyteczne być mogą i specjalne aparaty podsluchowe, zwłaszcza ze wzmacnianiem lampowym, choć właściwym ich przeznaczeniem jest zwykle wyszukiwanie samego miejsca uszkodzenia.

Dla uzupełnienia powyższego przeglądu wspomniemy jeszcze o elektroskopach kieszonkowych, opartych na zjawisku Johnsona-Rahbecka. Są to aparaciki, używane przy napięciu do 700V do rozpoznania części urządzeń, będących pod napięciem. Nadają się one z powodu znikomego zużycia prądu również do wykrywania błędów izolacji zwłaszcza w takich wypadkach, kiedy niema uziemienia ochronnego lub jest ono niedostateczne. Np. przy dołączeniu takiego przyrządu do nieuziemionego kadłuba silnika o złej izolacji zauważymy odchył wskaźnika. Przyrządy te zasługiwałyby na jaknajszersze rozpowszechnienie, niestety jednak są one dość wrażliwe na wstrząsy i łatwo się psują.

Powyżej opisane metody i przyrządy do kontroli stanu izolacji służą do bezpośrednich obserwacji zjawisk, zachodzących w tej dziedzinie. Pomocą w tej mierze, dla stwierdzenia zarówno obecności błędów izolacji, jak i następującego potem zazwyczaj drugiego stadium roboty, a mianowicie wyszukiwania miejsca błędu, jest właściwe zaprojektowanie i utrzymanie sieci. Uwzględnić tu należy takie okoliczności, jak: wydzielenie dostatecznej liczby linii odchodzących z punktów rozdzielczych, zaopatrzenie tych linii, jak i odbiorników w odpowiednio dobrane organy przetężeniowe, podział dłuższych linii na sekcje z łatwo dostępnymi punktami przejściowymi, zaopatrzenie większych rozdzielni w pod-



Rys. 7.



Rys. 8.

wójne systemy szyn zbiorczych, prowadzenie w razie potrzeby linii rezerwowych i okrężnych i t. p. Ważne jest również posiadanie i utrzymywanie w aktualnym stanie planu sieci z zaznaczeniem na nim długości, przekroju i materiału przewodów. Zaniedbanie lub zły stan uziemień ochronnych prowadzi, jak to już zaznaczyliśmy, do optymistycznej oceny stanu izolacji. Podobnie rzecz się ma z łączaniem, w punktach połączeń kabli, płaszczów, panczerzy i muf kablowych między sobą.

„Przepisy budowy i ruchu” nakazują prowadzenie w urządzeniach o mocy powyżej 20 kW specjalnych ksiąg kontroli. Do najważniejszych zapisów w tych księgach należą niewątpliwie wyniki kontroli stanu izolacji. Zapiski takie, regularnie prowadzone, oddają znaczne usługi, kierując

uwagę osób dozorujących na słabsze pod względem izolacji części urządzenia. Należy tylko dbać o dostateczne zróżniczkowanie badanych obiektów i unikać łączenia w jedną grupę przy pomiarze przewodów z odbiornikami, transformatorami i t. p.

## STATYSTYKA PORAŻEŃ ELEKTRYCZNYCH W POLSCE W ROKU 1933 I ICH ANALIZA NA TLE NASZYCH PRZEPISÓW BEZPIECZEŃSTWA.

Inż. Zdzisław Rychlik.

**Streszczenie.** Na wstępie autor omawia sposoby zbierania wypadków porażenia prądem elektrycznym w Polsce w roku 1933. Następnie omawia korzyści, płynące ze statystyki wypadków. W części II podaje zestawienia statystyczne zebranych wypadków i porównywa je z danymi szwajcarskimi. W części III podane są szczegółowe opisy niektórych lepiej znanych lub bardziej charakterystycznych wypadków, uporządkowanych według zawodu osób porażonych. Przy każdym opisie autor zajmuje stanowisko co do najprawdopodobniejszej przyczyny wypadku i analizuje go z punktu widzenia zachowania lub niezachowania przepisów S. E. P. W niektórych razach wyciąga wnioski co do poprawek, jakie można by wprowadzić do tych przepisów. W części IV omówiona jest szkodliwość prądu elektrycznego dla organizmu ludzkiego.

### I. Wstęp.

Prowadzenie statystyki wypadków elektrycznych nie jest zadaniem wdzięcznym i dlatego niechętnie bywa zazwyczaj podejmowane. Szczególnie zakłady i instytucje, w interesie których leży rozwój elektryfikacji, są nieraz zdania, że ujawnianie wypadków porażenia elektrycznych szkodzi ich celom. Nie potrzeba udowadniać, że stanowisko takie jest krótkowzroczne. Każdy, kto ma styczność z elektrycznością wie, że z prądem elektrycznym związane jest pewne niebezpieczeństwo. W dzisiejszym stanie techniki uważać należy jednak to niebezpieczeństwo za opanowane w dużej mierze, a ta niewielka liczba porażenia, jaka zachodzi przy urządzeniach elektrycznych, z pewnością nie powstrzyma rozwoju elektryfikacji, jak w swoim czasie większa liczba wypadków nie zdołała powstrzymać rozwoju kolejnictwa, samochodów, lotnictwa i innych działów techniki. W interesie rozwoju elektryfikacji leży wszakże, aby to niebezpieczeństwo starać się zmniejszyć jaknajwięcej. Ten cel ma właśnie na oku Stowarzyszenie Elektryków Polskich, podejmując się zbierania danych statystycznych o porażeniach elektrycznych. Zebrany materiał będzie następnie wykorzystany przy układaniu i nowelizacji przepisów.

Statystyka porażenia elektrycznych była podejmowana przez S. E. P. już kilkakrotnie, ale dotąd niestety chybiała celu, gdyż zebrane za pewien okres czasu dane byłyby tylko fragmentaryczne, albo obejmowałyby tak znikomą liczbę wypadków, że nie można ich było nazwać statystyką. Dopiero szczęśliwy pomysł wyzyskania informacji prasowej do zbierania wiadomości o wypadkach elektrycznych pchnął sprawę statystyki porażenia elektrycznych na tory właściwe. Za rok 1933 otrzymano za pomocą informacji prasowej zgórą 100 doniesień o wypadkach, do których dołączono jedno

przesłane przez Inspekcję Pracy, oraz kilka zebranych osobicie. Zebrane doniesienia dotyczyły razem 63 wypadków, z których jednak 6 musiano odrzucić, gdyż albo wydarzyły się poza Rzeczpospolitą Polską, albo nie w roku 1933, albo nie dotyczyły osób, albo wreszcie nie były wogóle natury elektrycznej. (Jeden z tych wypadków dotyczył konia; opis podano na końcu). Pozostaje zatem do rozpatrzenia 57 wypadków porażenia elektrycznych.

Celem zebrania bliższych szczegółów o tych znanych już wypadkach zasięgnięto informacji u tego źródła, o którym można było sądzić, że rozporządza fachowymi siłami do zbierania i właściwej oceny towarzyszących wypadkowi okoliczności. Niestety należy zgóry powiedzieć, że nie znaleziono jeszcze właściwej drogi do należytego ujęcia tej sprawy. W 20% nie otrzymano mimo przypomnień odpowiedzi wogóle. Z pośród pozostałych przeszło połowa zwróconych kwestionariuszy zawiera dane, które są przeważnie potwierdzeniem notatki dziennikarskiej, ujętej tylko nieco krócej i bardziej fachowo.

Tem większe zatem wyrazić należy podziękowanie tym wszystkim, którzy zadali sobie trud należytego zbierania wypadku i fachowej jego oceny. Szczególne podziękowanie należy się jednakże niektórym osobom, które oprócz szczegółowego opisu wypadku przesłali pod adresem S. E. P. wnioski, dotyczące zmiany lub ulepszenia przepisów. Wnioski te przekazano oddzielnym Komisjom przepisowym, gdzie będą wzięte pod rozwagę w stosownym czasie. Zasługują także na wzmiankę niektóre, zresztą nieliczne, przypadki, w których kierownicy, zwłaszcza mniejszych elektrowni, zwracają się do S. E. P. z prośbą o poradę fachową na tle wypadku. Nie trzeba chyba nikogo zapewniać ani co do dyskrekcji, ani co do tego, że S. E. P. nie odmówi w razie możliwości swej porady.

Jako zaszczycony z ramienia Komisji Bezpieczeństwa S. E. P. obowiązkiem referenta statystyki wypadków elektrycznych pragnę przy tej sposobności zwrócić się do wszystkich, zwłaszcza zaś do tych, którzy są szlonymi zarządcami oddziałów S. E. P., z prośbą o popieranie akcji S. E. P. w zbieraniu informacji o porażeniach elektrycznych. Jestem zdania, że każdy wypadek porażenia elektrycznego powinien być zbierany u źródła przez fachowca - elektryka. Rozumiem bowiem, że w ten sposób osiągnąć można korzyść wielokrotną. Przedewszystkiem, o ile fachowiec może interwenjować natychmiast po wypadku, może on przez należyte udzielenie pierwszej pomocy jeszcze przed przybyciem lekarza przyczynić się do zmniejszenia skutków porażenia, a nawet do przywrócenia do życia pozornie zmarłego. Jak mało zaś znane są zasady ratowania porażonych prądem elektrycznym, dowiedzieć się można, studiując przebiegi wypadków



ze sprawozdań dziennikarskich; w dalszym ciągu referatu zajmę się jeszcze tą sprawą więcej szczegółowo.

Następnie elektryk niewątpliwie ograniczy ewentualne szkodliwe skutki wypadku dla samych urządzeń i postara się usunąć te odstępstwa od przepisów, które były przyczyną wypadku. Może nawet stwierdzi pewną niedoskonałość przepisów i właśnie nieszczęśliwy wypadek nasunie mu nowe myśli, nowe konstrukcje lub celowe zarządzenia. Szczególnie wdzięczne pole do działania istnieje tutaj dla osób, pracujących w elektrowniach. Elektrownie bowiem poza swymi własnymi zakładami wykonywują także z natury rzeczy pewnego rodzaju nadzór nad urządzeniami elektrycznymi swych odbiorców i mają wgląd do tych urządzeń zwłaszcza z okazji wypadku. Toteż nie dziwnego, że przeważna część szczegółowych opisów wypadków wpłynęła właśnie od elektrowni. To obywatelskie stanowisko elektrowni, które rozumieją, że doświadczeń, płynących z każdego wypadku, nie należy ukrywać pod korcem, ale przeciwnie, należy je analizować i podawać do wiadomości ogółu elektryków polskich, aby również i inni odnosili z nich korzyść, pragnę na tem miejscu podkreślić tem więcej, że z zasady wszystkie statystyki, a także opisy poszczególnych wypadków ogłaszane są anonimowo, a więc niesposób wymienić żadnego zakładu lub osoby, która zajmowała się opracowaniem poszczególnego wypadku. Z tej analizy wypadków, wniosków stąd płynących, a wreszcie uchwał, zbieranych w ogólnej skarbnicy, zwanej przepisami, płyną dalsze korzyści, które oczywiście zapisać należy już głównie na konto S. E. P.

Jeżeli wypadek może być badany dopiero po pewnym czasie, to tylko fachowiec może wyluskać ziarno prawdy na podstawie oględzin miejsca wypadku oraz na podstawie sprawdzenia zwykle bardzo napuszonych notatek prasowych. Uważam zatem, że jest obowiązkiem każdego, a szczególnie członków S. E. P., nie dozwolić, aby nauka, płynąca z każdego wypadku, zwłaszcza śmiertelnego, przepadła i nie była wyzyskana dla dobra ogółu \*).

## II. Statystyka za rok 1933.

Wypadków objętych statystyką było 66, w tem śmiert. 32  
w tem porażonych było mężczyzn . . . 57, „ „ 29  
kobiet . . . . 9, „ „ 3

Według podziału terytorjalnego Rzeczypospolitej wypadki te wydarzyły się, jak następuje.

	Liczba wypad- ków	Liczba porażonych osób	
		wogóle	śmiertel- nie
W mieście stoł. Warszawie	2	2	—
W woj. warszawskim . .	6	6	3
„ pomorskiem . . .	10	10	7
„ poznańskim . . .	5	6	3
„ łódzkim . . . .	3	3	2
„ kieleckim . . . .	3	4	1
„ śląskim . . . .	12	16	7
„ krakowskim . . .	3	3	2
„ lwowskim . . . .	5	5	3
„ stanisławowskim .	1	1	1
„ tarnopolskim . .	2	3	2
„ poleskim . . . .	1	1	—
„ wileńskim . . . .	3	4	1
„ białostockim . .	1	2	—
Razem . .	57	66	32

\*) Poza akcją prasową, która rozpoczęta została dopiero w r. 1933, zdołano uzyskać również pewne dane statystyczne, odnoszące się do porażen elektrycznych w Polsce w zakładach przemysłowych w latach 1931—1932. Dane te, uzyskane z Zakładów Ubezpieczeń Społecznych, będą przedmiotem osobnego artykułu.

Jak widać, nierzadko tylko województwa wolne były od wypadków i to oczywiście województwa najslabiej zelektryfikowane, chociaż nie można być zupełnie pewnym, że i tam wypadków wogóle nie było, a brak wiadomości może być wywołany tylko skutkiem wadliwego i niedokładnego zbierania wypadków przez agencje prasowe; oczywiste jest, że w tych województwach, których dzienniki są przez agencje pilniej przeglądane, stosunek zebranych wypadków do rzeczywistości zaszytych będzie większy. Że liczba wypadków zależy także od stopnia zelektryfikowania danego województwa, jest również oczywiste, jako przykład tego mogą służyć województwa śląskie i pomorskie, w których stan samych urządzeń nie pozostaje z pewnością w tyle za innymi województwami. W odniesieniu do województwa śląskiego zauważyć należy, że liczba wypadków, zebranych poza agencją prasową, wynosi 4 i dotyczy 4 osób, z których porażonych śmiertelnie było 3. Wynikałoby z tego, że gdyby to miały być wszystkie wypadki porażen elektrycznych zaszłe w r. 1933, to całkowitą liczbę porażen elektrycznych należałoby ocenić na ok. 50% wyższą od liczby podanej przez agencje prasowe. Przypuszczam jednakże, że procent ten jest jeszcze wyższy.

Pod względem skutków, jakie pociągnęły za sobą wypadki porażen elektrycznych, można je podzielić na śmiertelne oraz ciężkie i lekkie. Jako lekkie określam takie, które spowodowały jedynie lekkie, przemijające poparzenie, a czasem nawet tylko przestraszyć lub omdlenie i które nie pozostawiły skutków trwałych. Wypadki te nie zawsze można dobrze odróżnić, zwłaszcza na podstawie notatek dziennikarskich, które są zwykle przejawiskawione. Z pośród 66 osób odniosło:

	p o r a ż e n i a		
	lekkie	ciężkie	śmierteln.
przy wysokim napięciu	22 os.	12 os.	32 os.
„ niskim „	8 „	6 „	8 „
„ napięciu nieznanem	14 „	4 „	22 „
	—	2 „	2 „

Uderza wielka liczba wypadków śmiertelnych przy niskim napięciu oraz ciężkich przy wysokim napięciu. Ostatnie polegają przeważnie na ciężkim poparzeniu kończyn, niejednokrotnie zakończonem amputacją, jak o tem będzie mowa poniżej. O ile wziąć pod uwagę tylko liczbę wypadków, a nie poszkodowanych osób, to przypada:

		w tem śmiertel- nych
na wysokie napięcie prądu trójfazowego	17 wypadków	8
„ „ „ „ stałego . . .	2 „	—
napięcie 380/220 V prądu trójfazowego	14 „	9
„ 220 V „ „	17 „	12
„ 220/127 V „ „	2 „	—
„ 250 V „ stałego . .	1 „	1
„ nieznanne . . . . .	4 „	2
Razem	57 wypadków	32

Co do napięcia 220 V, to nie zawsze można było na podstawie posiadanego materiału stwierdzić dokładnie, czy wchodzi w rachubę prąd trójfazowy 380/220 V, czy 220/127 V, czy też 220 V w innym połączeniu lub też prąd zmienny 220 V. Te przypadki, w których to nie podlegało wątpliwości, obliczono oddzielnie dla 380/220 V lub też 220/127 V. Punkt zerowy zaznaczono w przeważającej liczbie przypadków jako uziemiony, oporu uziemienia nie podano jednak ani razu. Prąd stały zanotowano tylko 3 razy, z tego dwa razy przy kolejkach.



Przy wysokim napięciu przeważają wypadki przy przewodach napowietrznych lub urządzeniach rozdzielczych; przy niskim napięciu również przy przewodach napowietrznych i lampach; szczegółowy podział podaje następująca tabelka:

	Liczba wypadków	Liczba osób porażonych	
		wogóle	śmiertelnie
Przy przewodach izolowanych w budynkach . . .	4	6	2
Przy przewodach napowietrznych niskiego napięcia . . .	14	15	11
Przy przewodach napowietrznych wysokiego napięcia . . .	7	9	4
Przy przewodach gołych wewnątrz budynków . . .	1	1	—
Przy drutach roboczych kolejek . . .	1	1	1
Przy kablach (podziemnych i gumowych) . . .	3	4	2
Przy licznikach elektryczn. . .	1	1	—
Przy urządzeniach rozdzielczych (szynach zbiorczych i t. p.) . . .	4	4	—
Przy wyłącznikach . . .	4	5	3
„ odłącznikach . . .	2	2	—
„ silnikach . . .	4	5	3
„ lampach ręcznych . . .	2	2	2
„ innych lampach . . .	5	6	2
Blżej niewyjaśnionych . .	5	5	2
Razem . .	57	66	32

W następnych 2 tabelkach zestawiono osoby porażone z podaniem ich wieku oraz zawodu:

Liczba osób porażonych		do 10 lat	od 11 do 20	od 21 do 30	od 31 do 40	od 41 do 50	ponad 50	wiek nieznany	Ogółem
ogółem	mężczyzn . .	3	10	7	16	8	1	12	57
	kobiet . . .	1	1	2	—	2	—	3	9
	razem . . .	4	11	9	16	10	10	15	66
śmiertelnie	mężczyzn . .	4	3	5	6	3	1	7	29
	kobiet . . .	—	2	—	—	1	—	—	3
	razem . . .	4	5	5	6	4	1	7	32

Liczba osób porażonych	fachowców		pom. elektry- ców, praktyk, maszyn. ślusarzy	robotników	rzemieślników	pracown. umysł.	inne zawody	nieznane	dzieci	razem
	inż. elektry- ków	elektromon- terów								
ogółem . . .	2	11	6	18	3	3	11	5	7	66
śmiertelnie , ,	—	2	4	12	3	—	4	2	5	32

Pod względem miejsca wypadku można wypadki podzielić, jak następuje:

Miejsce wypadku	Liczba wypadków	Liczba osób porażonych	
		wogóle	śmiertelnie
Elektrownie, podstacje i t. p.	10	11	3
Fabryki lub warsztaty . .	8	8	6
Kopalnie na powierzchni . .	3	4	1
„ „ pod ziemią . .	1	1	1
Ulice i place . . . . .	8	8	6
Pola orne . . . . .	3	5	1
Lasy lub ogrody . . . . .	4	5	3
Podwórza . . . . .	4	4	3
Mieszkania (biura) . . . .	3	4	—
Piwnice . . . . .	5	6	3
Łaźnie . . . . .	1	2	—
Dachy budynków . . . . .	2	2	2
Budowy . . . . .	1	1	1
Stodoły lub obory . . . . .	2	3	2
Blżej niewyjaśnione . . .	2	2	—

Najważniejszym z punktu widzenia przepisów jest jednak podział wypadków według przyczyn. Niestety, zupełnie ściśle i jednoznaczne ustalenie przyczyny wypadku jest bardzo rzadko możliwe. Kto miał kiedykolwiek do czynienia z wypadkami, a szczególnie wypadkami elektrycznymi, wie dobrze, że na każdy wypadek składa się kilka przyczyn; bardzo często wypadek powstaje właśnie wskutek niepomysłnego zbiegu naraz kilku różnych okoliczności. Bardzo często mała nieostrożność poszkodowanego jest w danych warunkach przyczyną wypadku, podczas gdy takie samo zachowanie się go w innych warunkach nie spowodowałoby wypadku. Dlatego też określenie bezwzględnej przyczyny wypadku pozostaje rzeczą dosyć subiektywną. W następującym zestawieniu starałem się zawsze wziąć za kryterjum najważniejszą, moim zdaniem, przyczynę wypadku, przy czym rozróżniałem nieostrożność, lekkomyślność i nieuwagę, jakkolwiek różnice, jakie zachodzą między nimi, są dość drobne.

Przyczyną wypadku była

nieostrożność poszkodowanego w 10 wypadkach (4 śmiertelne)		
nieuwaga lub omyłka . . . .	5	(4 „ )
lekkomyślność . . . . .	6	(1 „ )
nieszczęśliwy zbieg okoliczn. . .	2	(1 „ )
przypadek . . . . .	6	(— „ )
niedbalstwo obcych . . . . .	4	(3 „ )
zamach samobójczy . . . . .	2	(1 „ )
wadliwa instalacja . . . . .	14	(10 „ )
nieznana lub niewyjaśniona . . .	8	(8 „ )

Razem 57 wypadków (32 śmiertelne)

Wreszcie zestawiono wszystkie wypadki porażenia prądem elektrycznym z zaznaczeniem, kiedy nie były zachowane przepisy S. E. P., przy czym brano pod uwagę głównie przepisy budowy i ruchu. Stwierdzono zatem na podstawie szczegółowych opisów, że

nie były zachowane przepisy budowy SEP w 16 wypadkach (11 śmiertelnych),  
nie były zachowane przepisy ruchu SEP w 17 wypadkach (5 śmiertelnych),  
nie wiadomo w 13 wypadkach (11 śmiertelnych),  
zamach samobójczy w 2 wypadkach (1 śmiertelny),  
przepisy SEP były zachowane w 9 wypadkach (4 śmiertelne).

Chciałbym przytem zauważyć, że przy każdym wypadku rozrząsałem skrupulatnie, czy przepisy S. E. P. były zachowane, czy też nie, i zdanie moje było niejednokrotnie inne, aniżeli to podano w kwestjonariuszu, zwłaszcza jeśli piszący nie poparł w kwestjonariuszu swej opinii żadnym

argumentem, a z opisu przebiegu wypadku nasuwały się inne wnioski. W wypadkach wątpliwych zaliczałem wypadek raczej do niewyjaśnionych.

Na tle ostatniego zestawienia widać, że w przeważającej większości wypadków (33 na 44) przepisy S. E. P. nie były zachowane, przyczem nieprzestrzeganie przepisów budowy i przepisów ruchu spowodowało w przybliżeniu tę samą liczbę wypadków. Jeśli wziąć pod uwagę tylko wypadki śmiertelne, to przeważają wypadki, spowodowane nieprzestrzeganiem przepisów budowy (11 na 21). Moim zdaniem jednak należy brać pod uwagę wszystkie wypadki, a nie tylko śmiertelne, gdyż każdy z wypadków tak lekkich, jak i ciężkich mógł stać się śmiertelnym, a że się nim nie stał, zależało najczęściej od okoliczności zupełnie przypadkowych i nie stojących w związku z przepisami, jak np. odporność fizjologiczna porażonego i t. p. Do kwestji tej powrócę w rozdziale ostatnim. Tutaj zaś chcę zwrócić uwagę na fakt, że zachodzi stosunkowo znaczna liczba wypadków (ok. 75%) z powodu niezachowania przepisów S. E. P., a przy wypadkach śmiertelnych aż ponad 50% spowodowanych jest nieprzestrzeganiem przepisów budowy. Uprawnia to do apelu o popieranie przepisów budowy i ruchu S. E. P. celem wprowadzenia ich także tam, gdzie dotychczas nie zostały wprowadzone lub gdzie nie są dostatecznie przestrzegane, gdyż przez należyte ich przestrzeganie będzie można liczbę wypadków porażenia elektrycznego bardzo znacznie zmniejszyć.

O ile, pomimo zachowania przepisów S. E. P., zachodzą wypadki porażenia, to jest to dowodem albo ich niedoskonałości, albo też niedoskonałości stosowanych materiałów, albo też siły wyższej. Z dwiema pierwszymi przyczynami musimy walczyć przez doskonalenie siebie i doskonalenie naszego przemysłu; zdaje mi się, że na tem polu jest także jeszcze wiele do zrobienia.

Dla porównania pozwolę sobie przytoczyć liczby, odnoszące się do porażen elektrycznych według statystyk państw obcych. I tak np. w Szwajcarii, gdzie te statystyki prowadzone są najwięcej wyczerpująco przez t. zw. Inspekcję prądu silnego, liczba wypadków śmiertelnych od szeregu lat nie zmienia się zbyt silnie i to mimo rozwoju elektryfikacji i rozrostu sieci elektrycznych. Świadczy to o coraz lepszym stanie samych urządzeń. Liczba wypadków śmiertelnych wynosi w ostatnich 12 latach ok. 28 rocznie. Ogólna liczba wypadków jest natomiast coraz większa, co należy tłumaczyć coraz lepiej działającym meldunkom. Liczba porażen (bez śmiertelnych) doszła w r. 1928 do 73.

Liczb tych nie można oczywiście porównywać bezpośrednio z naszymi przedewszystkiem dlatego, że co do uchwycenia u nas wszystkich wypadków trzeba mieć jeszcze poważne wątpliwości, a powtórę dlatego, że stopień zelektryfikowania obu krajów jest różny. Szwajcaria ma przy 41 tys. km<sup>2</sup> i ok. 4 milj. mieszkańców okrągło 1 milion kW zainstalowanych, Polska zaś przy 388 tys. km<sup>2</sup> i ok. 32 milj. mieszk. okrągło 1,5 milj. kW zainstalowanych.

Szczegółowe zestawienie wypadków z uwzględnieniem zawodu osób porażonych podaje tabela obok.

Jak widać, liczby te są u nas mniejsze dla kategorii monterów, a nawet i robotników, natomiast większe dla dzieci oraz innych osób, jak rzemieślników, urzędników i osób o nieznanym zawodzie.

### III. Opisy wypadków i ich analiza.

Z materiału rozporządzalnego nie wszystkie wypadki wykozystano do szczegółowego opisu i zanalizowania na tle polskich przepisów bezpieczeństwa. Mianowicie, gdy podobnych wypadków było kilka, opisywano szczegółowo i

O s o b y	Dla Szwajcarii (za lata 1925 - 1928)				Dla Polski za 1933 r.		
	porażen		razem	za 1 rok	porażen		Ogółem
	nie- śmier- tel.	śmier- tel.			nie- śmier- tel.	śmier- tel.	
Inżynierowie i technicy . .	5	5	10	2,5	2	—	2
Maszyniści i dozorczy . . . .	42	12	54	13,5	2	2	4
Monterzy i pomocnicy oraz instal. . . . .	72	20	92	2,3	8	5	13
Inni robotnicy w elektrowniach	15	6	21	10,2	2	—	2
Robotnicy fabryczni . . . .	48	18	66	14,5	3	6	9
Robotnicy budowlani . . . . .	20	13	33	8,2	—	1	1
Rolnicy i ogrodnicy . . . . .	2	9	11	2,7	2	5	7
Strażacy . . . .	3	5	8	2	3	—	3
Służba domowa	4	7	11	2,7	1	1	2
Dzieci . . . . .	5	4	9	2,2	2	5	7
Inne osoby . . . .	9	2	11	2,7	9	7	16
Razem . . . . .	225	101	326		34	32	66

analizowano tylko jeden z nich, niektóre zaś nie nadawały się do opisu ze względu na szczupłość danych lub brak ważnych okoliczności. Dla łatwiejszej orientacji uporządkowano opisane wypadki według osób, których dotyczyły, z wyjątkiem wypadków przy przewodach napowietrznych i przy lampach ręcznych, które ujęto w osobne grupy, jako szczególnie liczne i typowe.

### A. WYPADKI INŻYNIERÓW ELEKTRYKÓW.

#### 1. Porażenie na radiostacji.

W czasie pracy radiostacji kierownik jej objaśniał monterom prace, które miały być wykonane, dotknął przytem przez nieostrożność gołego przewodu, będącego pod napięciem 8500 V prądu stałego, trzymając drugą rękę na uziemionej barjerze. Wskutek skurczu ręki zaciśnięty został silnie przewód w ręce, przyczem przepłynął przez ciało porażonego prąd ok. 300 do 400 mA, co zarejestrował automat. Automat wskutek przeciążenia wyłączył prąd po 3 sekundach, poczem porażony przyszedł zaraz do siebie i mógł pracować dalej. Przewód był pod napięciem 8500 V prądu stałego, a składowa zmienna modulacji wynosiła ok. 5000 V maksymalnie.

Przyczyną wypadku była nieostrożność porażonego.

#### 2. Ciężkie poparzenie prądem trójfazowym 3000 V.

Inżynier elektrowni, będąc w mieście, zauważył duże wahania napięcia w sieci. Pośpieszył więc do elektrowni, gdzie stwierdził, że jest to wywołane zwarcie na sieci napowietrznej wysokiego napięcia. Równowaga na sieci wysokiego napięcia została wkrótce przywrócona, poczem inżynier wydał maszyniście dyspozycję do zbadania przyczyny braku prądu w aparatach wtórnych. Po chwili poszedł również sam do rozdzielni i zauważył, że maszynista zbliża się z lampą probierczą do przewodów wysokiego napięcia. Przerażony tem inżynier ostrzegł maszynistę i odciągnął go, poczem zabrał mu lampę, aby zbadać osobiście stan bezpieczników niskiego napięcia. Trzymając lampę w lewej ręce, potknął się o kabel, skutkiem czego przewody od lampy spowodowały na szynach 3000 V zwarcie, które objęło

wszystkie trzy fazy. Łuk elektryczny poparzył ciężko całą jego lewą rękę i wierzchnią część prawej ręki, którą zasłonił sobie oczy.

Przyczyną wypadku był zbieg różnych okoliczności, jak np. zbyt długie przewody przy lampie, niewłaściwie ułożony kabel, a zwłaszcza łatwa do zrozumienia w opisanych okolicznościach nerwowość. Z opisanego wyżej wypadku płynnie kilka cennych wskazówek dla przepisów bezpieczeństwa. Przedewszystkiem co do układania kabli w rozdzielniach wysokiego napięcia. Wprawdzie zwykle kable układane są (ze względu na możliwość uszkodzenia samych kabli) w specjalnie do tego celu przewidzianych kanałach kablowych, przepis ten nie jest jednak w przepisach PNE-10 dostatecznie jasno zredagowany. Należałoby moim zdaniem wyraźnie zaznaczyć w rozdziale III w § 15, iż przejścia przed i za skrzynkami rozdzielczymi muszą być swobodne i nie mogą być zastawione żadnymi przedmiotami, tamującymi komunikację.

Brak również wzmianki, która tam moim zdaniem winna się znajdować, o manipulowaniu w rozdzielniach długimi przedmiotami lub narzędziami, zwłaszcza w pobliżu niedostatecznie chronionych urządzeń rozdzielczych wysokiego napięcia. Wzmianka taka powinna się znajdować w przepisach PNE-10 w § 54 lub 55.

## B. WYPADKI FACHOWCÓW ELEKTRYKÓW.

### 1. Zranienie i poparzenie prądem trójfazowym 60 kV.

Wbrew wyraźnej instrukcji monter K. „ułatwił” sobie robotę przy szynach zbiorczych 60 kV w ten sposób, że zamiast wchodzić w każdym polu po drabinie, chodził w górę po desce, ułożonej na przewodach. System przewodów, przy którym pracował, był wyłączony, zwarty i uziemiony, drugi system jednakże znajdował się pod napięciem. Podczas przechodzenia K. przybliżył się prawdopodobnie zbyt blisko do jednego z odłączników i wskutek tego powstał łuk zwarcia, który monterowi poparzył lewą dłoń, lewą stopę, podudzie i kolano, pozatem K. stracił przytomność i zleciał na murek, a następnie na ziemię, przyczem złamał nogę w udzie. Zastosowano natychmiast sztuczne oddychanie, poczem K. przyszedł do siebie.

Przyczyną wypadku jest nieprzestrzeganie instrukcji przez montera, a zatem własna nieostrożność. Przepisy S. E. P. były w pełni zachowane, gdyż było obecnych przy tej pracy 2 monterów; obaj jednak umówili się, że będą przechodzili górą.

### 2. Lekkie poparzenie prądem 15 000 V.

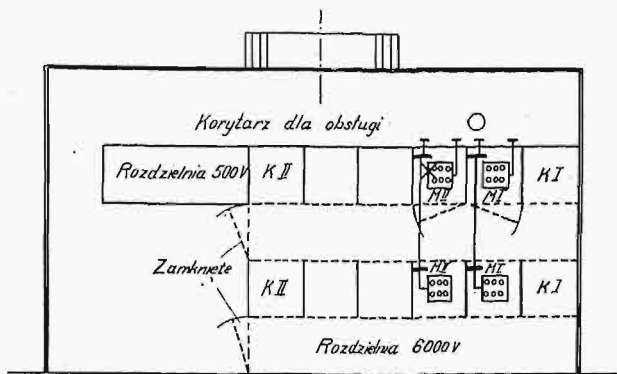
Starszy monter W. chciał nastawić przekątniki wyłącznika olejowego, ale zapomniał wyłączyć odłączniki; wskutek tego doznał lekkiego poparzenia 2 palców lewej ręki i małego palca lewej nogi. Należy zauważyć, że: 1) zetknięcie palców z przekątnikiem w chwili porażenia nie było zupełne, 2) część przekątnika (cewka), której chciał dotknąć, była izolowana, 3) w chwili porażenia został odzrucony w bezpieczne miejsce. Kierownictwo elektrowni jest zdania, że tym właśnie okolicznościami zawdzięcza W. ocalenie. Przypuszczam, że tylko ostatnia okoliczność jest istotna, gdyż dzięki niej czas przepływu prądu był krótki, a oparzenie nieznaczne.

Przyczyną wypadku było niewyłączenie noży odłączników (PNE-10 § 56).

### 3. Śmierć i poparzenie prądem trójfazowym 3 000 V.

Elektromonter M. zatrudniony był wraz z pomocnikiem K. w podstacji doprowadzaniem do porządku napędu wyłącznika olejowego. Napęd ten składał się, z powodu pewnej odległości samego wyłącznika od miejsca przeznaczonego

do obsługi, z kółka ręcznego, kółek zębatych, połączonych łańcuszkiem, z osi pośredniej, z którą był znowu połączony zamek wyłącznika zapomocą kółek zębatych i łańcuszka (por. rys. 1). Umocowanie tych części było już nieco obluźnione.



Rys. 1.

M I, M II — pola rozdzielcze, ... — ściany z siatki, K I, K II — kable zasilające, O — miejsce, w którym stał M. — ściany pełne, X — miejsce wypadku.

Przed przystąpieniem do pracy M. wyłączył wszystkie odpowiednie odłączniki i przekonał się, że nie ma napięcia ani w łączniku, ani wogóle w żadnej z komór, w których mieli pracować. Kiedy napęd został już naprawiony, M. kazał nieco naoliwić łańcuszki, sam zaś stanął w korytarzu, oddzielonym pełną blachą, i kręcił kółkiem ręcznym w obie strony. Tymczasem K., nabrawszy oleju do pakuł, trafił przez pomyłkę zamiast do właściwej komórki rozdzielczej do sąsiedniej, w której wyłącznik znajdował się pod napięciem. Tam spowodował zwarcie, a łuk był tak silny, że poparzył K. bardzo ciężko na całym ciele, a nawet wygiął blachę i poparzył M. twarz i ręce. K. stanął w płomieniach i ogień ugaszono z trudem. K. zmarł z poparzenia w kilka godzin później, M. zaś wyleczył się z oparzenia.

Przyczyną wypadku jest omyłka. Przepisy S. E. P. były zachowane. Wszystkie pola rozdzielcze były osłonięte drzwiczkami z siatki drucianej i wyraźnie oznaczone tabliczkami z przodu i z tyłu. Wobec tego, że omyłki tego rodzaju nie są odosobnione, zachodzi pytanie, czy nie byłoby wskazane oznaczać wyłączone pole, w którym się pracuje lub ma się pracować, w sposób jeszcze wyraźniejszy i bardziej wpadający w oko.

### 4. Ciężkie okaleczenie napięciem 6 000 V.

Pomocnik elektromontera J. otrzymał polecenie oczyszczenia wyłączników i urządzeń rozdzielczych 6 000 V. W tym celu kierownik ruchu wyłączył kabel zasilający i wyjął noże odłączników, poczem sprawdził, że w szynach zbiorczych nie ma napięcia. J. czyścił komórkę jedną po drugiej, aż doszedł do komórki, w której znajdował się wyłącznik olejowy drugiego kabla zasilającego, który normalnie nie był używany. Kabel jednak znajdował się pod napięciem, a odłączniki nie były wyłączone. Toteż zaciski na izolatorach na tylnej stronie wyłącznika olejowego znajdowały się pod napięciem. J. odniósł ciężkie poparzenia prawej dłoni, łokcia i ramienia, którem opierał się o uziemioną konstrukcję żelazną. W szpitalu stwierdzono, że całe ramię musi być odjęte.

Przyczyną wypadku była nieostrożność poparzonego, albo też cudze niedopatrzenie. Przepisy S. E. P. były o tyle niespełnione, że nie odłączono także drugiego kabla zasilającego, na co wskazuje P. N. E. — 10 § 56 p. 2. Przy badaniu tego wypadku okazało się także, jak ważnym jest ścisłe wydawanie zarządzeń o robotach, jakie mają być wykonane



(§ 54 p. 1). W danym wypadku zachodziły np. wątpliwości co do tego, czy zarządzenie odnosiło się tylko do jednej komórki, którą otworzył kierownik ruchu, czy też także do następnych komórek, które otwierał poszkodowany klucza-  
mi, pozostawionymi przez kierownika.

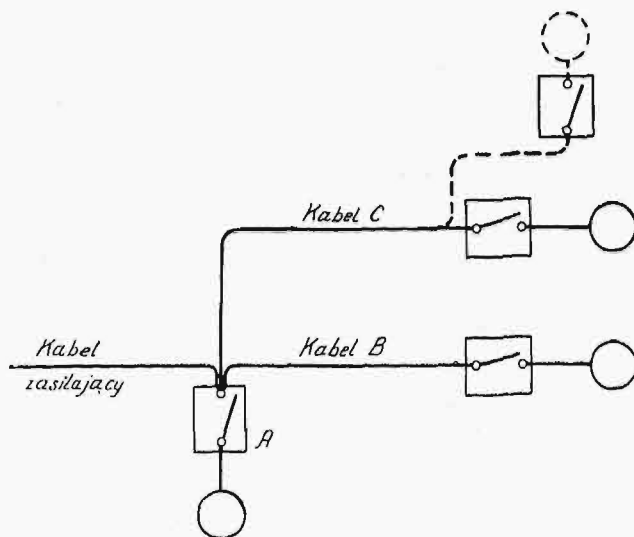
#### 5. Śmierć od prądu trójfazowego 5 500 V.

Wypadek wydarzył się na kopalni. Maszynista M. uważał, że wyłącznik olejowy wysokiego napięcia nie funkcjonuje. Przy sprawdzaniu przyczyny defektu dotknął jakiejś części wyłącznika i spowodował zwarcie i zniszczenie wyłącznika. M. został znaleziony martwy w komórce wyłącznika.

Przyczyną wypadku było niewyłączenie odłączników, które znajdowały się przed wyłącznikiem. Odłączniki te należało tem bardziej otworzyć, że M. pracował sam i że pomieszczenie wyłącznika olejowego było bardzo skąpo oświetlone.

#### 6. Poparzenie prądem trójfazowym 2 000 V w kopalni.

Z rozdzielni głównej wychodził jeden kabel, który dochodził do zacisków wyłącznika A (por. rys. 2). Od zaci-



Rys. 2.

sków tego wyłącznika odgałęzione były jeszcze 2 kable B i C, idące do nieczynnego od dłuższego czasu silnika i innego jeszcze odbiornika. Odbiornik C miał być przeniesiony do odleglejszego miejsca i wskutek tego kabel C miał być przedłużony. W tym celu jeden z monterów otworzył wyłącznik C oraz wyłącznik główny w rozdzielni, poczem miał odłączyć kabel C na zaciskach wyłącznika A, gdyż odbiornik A miał być w czasie robót utrzymany w ruchu. Tymczasem przez omyłkę zamiast kabla C odłączył kabel B, prowadzący do nieczynnego silnika, i zabrał się do roboty przy przedłużaniu kabla. Na początku dla pewności zwał dwie żyły kabla C w wyłączniku kawałkiem drutu, trzymanym w cęgach. Powstał wtedy łuk elektryczny, który oparzył montera W. oraz jego pomocnika M. na twarzy i rękach.

Przyczyną wypadku była nieuwaga montera, jakkolwiek przyczyną trzeba, że działał on zgodnie z przepisami ruchu i tylko dzięki temu wypadek nie miał groźniejszych następstw.

#### 7. Lekkie poparzenie prądem trójfazowym 2 000 V.

Wypadek wydarzył się na kopalni i był o tyle podobny do opisanego pod B 5, że przyczyną było również niewyłączenie odłączników. Inne okoliczności były jednak od-

mienne. Mianowicie w wyłączniku olejowym obluźował się izolator i silnik znajdował się po otworzeniu wyłącznika olejowego jednobiegunowo pod napięciem. Monter K., mierząc szczelinę, otrzymał lekkie uderzenie prądem, które go ostrzegło i doprowadziło do wykrycia uszkodzenia w wyłączniku.

#### 8. Poparzenie prądem trójfazowym 380/220 V.

Podczas sprawdzania licznika prądu trójfazowego w elektrowni, monter K. zdejmował przykrywkę zacisków licznika. Czynność tę wykonywał, jak to się zwykle robi, nie odłączając licznika, a więc zaciski były pod napięciem. Podczas swej czynności prawdopodobnie przycisnął metalową przykrywkę zacisków zbyt mocno i przez to spowodował zwarcie, wskutek czego zarówno przykrywka, jak i osłona licznika została odrzucona i uderzyła montera w twarz, poparząwszy go przytem dotkliwie. Bliższe badanie wykazało, że odległość przykrywki metalowej od zacisków była istotnie bardzo mała i wynosiła zaledwo 1—2 mm, co powstało zapewne wskutek tego, że licznik był przeznaczony na 50 A, a modele użyte przez firmę były takie same, jak dla liczników 5 amperowych.

Przyczyną wypadku była niewłaściwa konstrukcja licznika. Odnosne normy nie zostały jeszcze przez S. E. P. wydane; cały materiał wraz z rysunkami i wnioskami, dostarczonymi przez sprawozdawcę, przesłało do Głównej Komisji Przepisowej. Przepisy budowy i ruchu urządzeń elektrycznych były pozatem zachowane.

#### 9. Śmierć od prądu stałego 250 V.

Wypadek wydarzył się w kopalni pod ziemią przy kolejce elektrycznej. Ładowacz S. układał wielkie bryły węgla, t. zw. kęsy, tuż pod drutem jezdnym kolejki, i, nie mogąc dosięgnąć ręką środka wózka, wszedł na zderzak i dotknął przy tem głową czy szyją drutu roboczego.

Przyczyną wypadku była nieostrożność poszkodowanego, gdyż drut jezdny znajdował się na przepisanej wysokości (PNE-17 § 11).

### C. WYPADKI ROBOTNIKÓW.

#### 1. Poparzenie prądem trójfazowym 35 000 V.

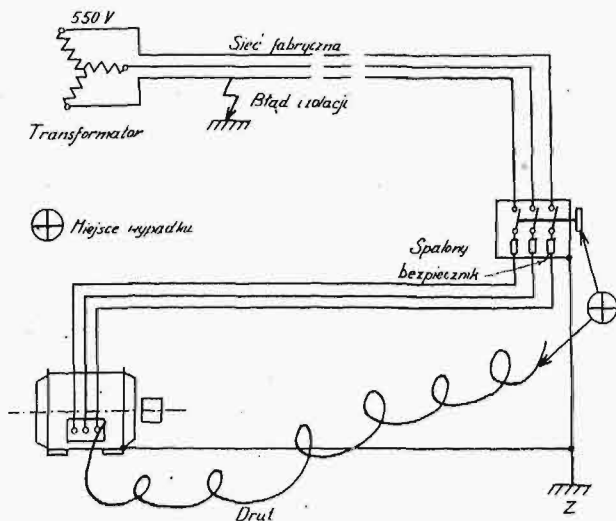
Poparzony robotnik S. przyglądał się próbom na podstacji 35 kV. Gestykulując zbyt żywo, zbliżył rękę do odłącznika nożowego na odległość około 20 cm i wtedy nastąpił przeskok iskry elektrycznej do palców lewej ręki. S., padając w tył, trzymał rękę wyciągniętą przed siebie i iskra miała się rzekomo wydłużyć aż do ok. 1,5 m. Porażony nie stracił przytomności, mimo to jednak zastosowano sztuczne oddychanie w ciągu kilku minut. Skutki poparzenia widoczne były jako opalenie naskórka lewej dłoni i guz (?) wielkości orzecha nad lewą piętą.

Przypuszczam, że podane przez świadków obie odległości są nieco przesadzone, w każdym razie jednak przyczyną wypadku była nieostrożność porażonego. O zachowaniu się osób obcych w pomieszczeniach ruchu elektrycznego mówi § 55 p. 2.

#### 2. Śmierć od prądu trójfazowego 550 V.

Robotnik fabryczny M. zatrudniony był przy nawijaniu drutu na bębny. Nawinawszy cały bęben, odciał kawałek ok. 10 m, który rzucił w kierunku drugiego stołu. Drut rozwinął się i koniec jego upadł na silnik elektryczny, a nawet prawdopodobnie dostał się pod osłonę silnika. Widząc to, czy też z innych bliżej nieznanых powodów, M. podszedł do wyłącznika, trzymając drugi koniec drutu w ręku. W chwili, gdy dotknął rączki wyłącznika, został śmiertelnie rażony.

Szczegółowe badanie wykazało, że zarówno kadłub silnika, jak osłona wyłącznika były dobrze uziemione, natomiast jeden z bezpieczników w wyłączniku był spalony, a jedna z faz sieci miała błąd izolacji, zresztą zmienny i niezawsze widoczny (por. rys. 3). Robotnik M. znalazł się więc



Rys. 3.

pod napięciem ok. 550 V przez goły drut, trzymany w ręku; ponieważ jednak stał na suchej ceglanej podłodze, a opór izolacji w punkcie błędu był dość znaczny, nie czuł prądu; dopiero gdy chwycił drugą ręką za dobrze uziemioną rączkę wyłącznika, otrzymał śmiertelne uderzenie. Wymieniony bezpiecznik spalił się prawdopodobnie od razu, gdy drut dostał się pod osłonę i buczenie silnika skłoniło M. do wyłączenia.

Wypadek jest więc dość skomplikowany i powstał wskutek nieszczęśliwego zbiegu okoliczności. Inżynier - elektryk, badający ten wypadek, polecił w każdym razie usunąć wspomniany błąd izolacji oraz osłonić należycie doprowadzenie prądu do silnika tak, aby nawet drut nie mógł się tam przedostać.

### 3. Poparzenie prądem trójfazowym 380/220 V.

Podczas mycia okien w fabryce robotnik S. wszedł na drabinę i zwał gołą ręką wskutek nieostrożności gołe przewody 380 V. Przewody znajdowały się w pobliżu okna i prowadziły do instalacji silnikowej.

Przyczyną wypadku była własna nieostrożność; do ułatwienia wypadku przyczyniło się też częściowo kierownictwo ruchu fabryki z powodu niewyłączenia na czas mycia okien gołych przewodów w ich sąsiedztwie. W razie, gdyby z ważnych względów przewody musiały pozostać w czasie mycia okien pod napięciem (ze sprawozdania nie można wywnioskować, czy taka okoliczność zachodziła), wówczas należało zastosować wszelkie możliwe środki ostrożności i robotę zlecić osobom, obeznanym z niebezpieczeństwem (PNE-10 § 58). Przepisy S. E. P. prawdopodobnie więc nie były zachowane.

### 4. Śmierć od prądu trójfazowego 380/220 V we młynie.

Robotnik młyński Z. wziął lampę ręczną do ręki i udał się z nią na żelazne schodki ratunkowe, znajdujące się w odległości ok. 7 m od gniazdka wtyczkowego. Na schodkach Z. został znaleziony martwy i przypuszczano, że został on śmiertelnie rażony prądem elektrycznym. Początkowo nie znaleziono jednak przyczyny porażenia, dopiero po skrupulatnych poszukiwaniach zauważono, że kabel był przełamany w odległości ok. 80 cm od ebonitowej oprawki żarówki. Przez to uszkodzenie przeszło napięcie na drut żelazny, którym kabel był nazewnątrz osłonięty dla ochrony przed zni-

szczeniem izolacji. Drut ten był też przełamany. Z. otrzymał więc uderzenie prądem prawdopodobnie przez ten drut.

Główną przyczyną wypadku jest prawdopodobnie niewłaściwy przewód, użyty do instalacji lampy ręcznej, bądź też niewłaściwe zainstalowanie tegoż przewodu. Do instalacji urządzeń przenośnych, takich jak lampa ręczna, winny być bowiem stosowane w myśl przepisów S. E. P. (por. PNE-10 § 31 p. oraz PNE-5 § 39-45) przewody jednego z typów oznaczonych SPW1, SW1, SW, Ol, O lub SP. Żaden z tych typów nie posiada zewnętrznego żelaznego drutu, służącego jako ochrona przed zniszczeniem izolacji. O ileby zaś przewód, starszego typu lub służący do pewnych specjalnych celów, posiadał wyjątkowo oplecenie z drutów, to oplecenie ten musiałby być starannie uziemiony lub przyłączony do wyłącznika ochronnego (PNE-10 § 45, p. 10). Przepisy S. E. P. zatem nie były zachowane.

### 5. Śmierć od prądu trójfazowego 220 V.

Robotnik S. zajęty był wraz z monterem i innymi pomocnikami przy wymianie przewodów sieci miejskiej rozdzielczej na przewody o większych przekrojach. S., jako były pracownik pocztowy, przywiązywał przewody na słupach do izolatorów. Pod koniec dniówki, kiedy inni pracownicy składali już narzędzia, został S. nagle porażony prądem elektrycznym od przywiązywanego przewodu. Okazało się, że maszynista uruchomił prądnice w elektrowni wcześniej, niż zwykle, gdyż potrzebował światła i włączył również wyłącznik sieci miejskiej mimo, iż wisiało na nim ostrzeżenie „nie włączać”.

Przyczyną wypadku było obce przewinienie. Przepisy S. E. P. (por. § 57) nie były zachowane.

### D. WYPADKI DZIECI.

#### 1. Oparzenie i zranienie przez linję napowietrzną 3 000 V.

Na krańcowy słup żelazny kratowy wspiął się 12-letni chłopiec i uległ oparzeniu podudzia, przyczem spadł ze słupa i złamał stopę. Słup był ustawiony prawidłowo i zaopatrzony w tabliczkę ostrzegawczą i wieniec kołców u góry.

Przyczyną wypadku była lekkomyślność porażonego.

#### 2. Śmierć od prądu trójfazowego 220 V.

4-letnia dziewczynka K. została śmiertelnie porażona prądem elektrycznym od rynny deszczowej, bądź też połączonego z nią drutu kolczastego (tuż obok wejścia do kina, a zatem na ruchliwej ulicy). Niestety nikt z przechodniów, ani z personelu kina nie umiał jej udzielić pomocy. Rynna deszczowa znajdowała się pod napięciem 220 V względem ziemi, które się tam przedostało z kabelka ołowianego, zasilającego żarówkę w przedsionku kina; kabelk wyprowadzony był nazewnątrz budynku i dotykał płaszczem ołowianym blaszanego daszka przybudówki, w której mieścił się przedsionek kina. Kabelk, zasilający reklamy nad kinem, również był uszkodzony; izolacja tego kabelka posiadała opór w stanie suchym ok. 1 000 Ω. Inne części instalacji również nie odpowiadały przepisom budowy i ruchu, skutkiem czego zarówno daszek, jak rynna i wszystkie stykające się z nimi druty znajdowały się pod napięciem 220 V wzgl. ziemi. Stan ten trwał zapewne dłuższy czas, gdyż kabelk miał w kilku miejscach uszkodzony płaszcz ołowiany, a niektóre z tych miejsc były załatane taśmą izolacyjną i przykryte rurką bergmanowską. Na rynnie stale napięcia nie było, lecz wystarczyło przycisnąć kabelk do daszka, aby ten znalazł się pod napięciem.

Przyczyną wypadku jest więc bezwątpienia niezachowanie przepisów budowy urządzeń elektrycznych prądu silnego.

Przedstawicielowi elektrowni dał powyższy wypadek sposobność wkroczenia i zarządzenia, by wszystkie niepra-

widlowo wykonane części instalacji zostały doprowadzone do porządku przed ponownym przyłączeniem do sieci.

Należy zauważyć, że bezpieczniki 6 A przy odgałęzieniu kabelka nie przepaliły się, mimo uziemionego punktu zerowego; oporu tego uziemienia nie podano, a sprawozdawca tłumaczy to jeszcze zbyt dużym oporem izolacji. Przez opór izolacji należy tu jednak rozumieć opór izolacji rynny daszku do ziemi, gdyż one to zamykały obwód pomiędzy punktem zerowym transformatora, a uszkodzoną fazą. Jeśli suma oporów, złożona z oporu uziemienia punktu zerowego sieci 380/220 V i oporu uziemienia rynny deszczowej, była zbyt duża, to prąd płynący przez bezpiecznik i ziemię był niewystarczający do stopienia go. Do stopienia stopki 6 A trzeba, jak wiadomo, prądu co najmniej 8,4 A, czyli, aby taki prąd przepłynął, opór obwodu musiałby być mniejszy od  $220 : 8,4$  omów, a nawet uwzględnwszy prąd żarówek reklamowych (1 000 W) od  $220 : 3,8 = 58$  omów. Opór izolacji rynny był prawdopodobnie nawet w czasie deszczu większy od tej liczby.

Wnioski, jakie sprawozdawca wyciąga z wyżej opisanego wypadku, są następujące: a) Personel techniczny kina powinien być obowiązkowo obznajmiony ze wskazówkami niesienia doraźnej pomocy w wypadkach porażenia prądem elektrycznym, co powinno być stwierdzone przez władze bezpieczeństwa; b) przepisy techniczne urządzeń kinematograficznych powinny określić dla starych kin, w ciągu jakiego czasu mają być usunięte wszystkie braki w instalacjach, które mogłyby narazić życie lub zdrowie ludzkie na niebezpieczeństwo.

Wnioski te przekazano komisji urządzeń kinematografów; żądanie analogiczne do b) zawarte jest już w PNE-10 § 69.

### 3. Śmierć dziecka od napięcia 220 V.

Przewody na podwórzu założone były na izolatorach wzdłuż ściany. Po pewnym czasie założono na tej samej ścianie rynną pionową, nie dochodzącą do ziemi. Rynna krzyżowała się z przewodami i po pewnym czasie przetarła lub uszkodziła izolację przewodów (typu haketalowskiego), co spowodowało, że rynna była stale pod napięciem, o czym zresztą wiedzieli wszyscy sąsiedzi i lokatorzy.

Pewnego dnia wieczorem jeden z lokatorów zdejmował antenę, biegnącą ponad dachem, ale nie zdjął jej całkowicie, lecz pozostawił ją zwisającą z dachu i opartą na rynnie; drut antenowy był więc pod napięciem. Następnego dnia 7 letnie dziecko zaplątało się w drut anteny i poniosło śmierć od prądu elektrycznego.

Wypadek jest, jak widać, nieco skomplikowany i współdziałało tu kilka przyczyn; najważniejsze z nich przedstawiają się, jak następuje. Przedewszystkiem nie były zachowane przepisy budowy (por. PNE-10 § 25 A p. 3). Winę tego ponosi jednak nie instalator, lecz przedsiębiorca, który później już zakładał rynny i nie zażądał odpowiedniego przerobienia instalacji elektrycznej; powtóre — lokatorzy, którym znana była okoliczność elektryzowania rynny i którzy zaniedbali zawiadomić o tem właściciela budynku czy też elektrownię, która niechybnie byłaby spowodowała usunięcie wadliwej instalacji; podkreślić należy również lekkomyślność sąsiada, który zdejmował antenę.

Przy tej sposobności należałoby zwrócić uwagę na różne komplikacje, które zachodzą przy zakładaniu anten radiowych w sąsiedztwie napowietrznych przewodów elektrycznych prądu silnego podczas ich pracy a szczególnie przy zdejmowaniu, ze względu na to, że te przewody często zakładane bywają pod drutami lub linkami antenowymi.

## E. WYPADKI PRZY PRZEWODACH NAPONOWYCH.

### 1. Porażenie 3 ludzi prądem trójfazowym 40 000 V.

W dniu świątecznym wywieszona została na przewodach napowietrznych wysokiego napięcia płachta komunistyczna. Celem zdjęcia tej płachty zajechała na żądanie posterunku P. P. fabryczna straż pożarna z drabiną strażacką, którą ustawiono pod przewodami; jeden ze strażaków wszedł na wyciągniętą drabinę, aby płachtę strącić. Przy szarpaniu płachty słychać było trzaski w drabinie, aż wreszcie strażak P. stojący na drabinie, oraz dwaj inni, przytrzymujący ją na dole, zostali porażeni prądem elektrycznym. Strażak P. stracił przytomność i upadł twarzą na drabinę, a z pozostałych dwóch jeden również stracił przytomność i upadł na ziemię, a drugi został tylko odepchnięty od drabiny. Starszy strażak H. i posterunkowy P. P. rzucili się do ratowania porażonych, ci jednak przyszli w kilka sekund sami do siebie, poczem P. zszedł sam z drabiny. Odnosił on niezbyt ciężkie poparzenia ręki i nogi, świadczące jednak o tem, że prąd, który przeszedł, był rzędu kilku amperów; nadto poszkodowany uskarżał się przez pewien czas na zaburzenia żołądkowe.

Ciekawszym szczegółem wypadku jest fakt, że przewody 40 kV, przy których wypadek nastąpił, należały do całkiem innego przedsiębiorstwa, które o całym tym wypadku nic nie wiedziało. Opisany wypadek wydarzył się w bardzo uprzemysłowionej okolicy, tem więcej więc podziwiać należy zimną krew i lekceważenie życia przez strażaków. Po wypadku bowiem starszy strażak H. wszedł powtórnie na drabinę i zapomocą biczyska zrzucił wreszcie płachtę z przewodów.

Przyczyną wypadku była nieświadomość niebezpieczeństwa; zadziwiający jest fakt, iż mimo niezachowania żadnych środków bezpieczeństwa skutki wypadku były tak nikłe. Zaskłaga to bodaj czy nie największa mechaniczna drabina strażackiej, której konstrukcja była tego rodzaju, iż wszystkie okucia i części metalowe zmontowane były na drewnianych ramach. Ważną okolicznością było również to, że praca odbywała się w suchy dzień przy ładnej pogodzie. Warto również wspomnieć, że opisany wypadek zaszedł ok. godz. 8-ej rano, a może nie jest całkiem rzeczą przypadkową, że z pośród 10 wypadków śmiertelnych, których godzinę ustalano, aż 9 przytrafiło się w godzinach popołudniowych (między godz. 14-tą a 2-ą), tylko 1 zaś w godzinach przedpołudniowych.

### 2. Śmierć od przewodów napowietrznych 15 000 V.

Chatupnik N., zbierając w lesie gałęzie, dotknął się konara, leżącego na opuszczonym przewodzie linii napowietrznej o napięciu 15 000 V, który odłamał się od ścinanego przez robotników leśnych drzewa.

Blizsze szczegóły wypadku nie są znane, dziwną wydaje się w każdym razie niezwykle lekkomyślność zatrudnionych przy robotach leśnych robotników (i ich dozorców), którzy przy robotach w pobliżu linii wysokiego napięcia nie tylko nie wyłączyli przewodów, ale pozostawili po ścięciu drzewa zawieszony na przewodach napowietrznych konar.

### 3. Śmierć od przewodów napowietrznych 500 V.

Robotnik F. zatrudniony był smarowaniem dachu smołą koło komina kręowego. Przewody przebiegały na wysokości ok. 1,20 m nad dachem. F. dotknął przewodów z niewiadomych powodów i uległ poparzeniu obu rąk. Zmarł w godzinę po wypadku.

Przepisy S. E. P., jak widać, nie były zachowane. Po wypadku przewody podniesiono na przepisową wysokość.

### 4. Śmierć dziecka od przewodu napowietrznego 220 V.

7 letni chłopiec R. wszedł podczas zabawy z kolegami na daszek stodoły o wysokości ok. 1,50 m nad ziemią i do-



tknął przewodów napowietrznych 220 V. Przewody te były tak nisko zawieszone, że omal dotykały daszku stodoły, a daszek pokryty był dachówką kamienną.

Przyczyną wypadku było niezachowanie przepisowej odległości przewodów od dachu.

#### 5. Śmierć od prądu trójfazowego 220 V.

Malarz K. wyszedł przez okno facjówki na dach i przypadkiem dotknął karkiem przewodu, będącego pod napięciem. Gdy go tyką odepchnięto od przewodu, spadł z dachu na betonowe schodki.

Przyczyną wypadku było przede wszystkim niedopatrzenie właściciela domu i malarza, którzy powinni byli przed rozpoczęciem roboty wyłączyć przewody napowietrzne z pod napięcia, zwłaszcza o ile były to przewody gołe. Następnie niesienie pomocy było nieumiejętne, wreszcie okoliczności były o tyle niepomyślnie, że malarz stał w skarpetkach na mokrym dachu. Co do rodzaju izolacji przewodów i ich wysokości nad dachem, nie podano bliższych danych.

#### 6. Porażenie od przewodów napowietrznych 220 V przez antenę.

Wypadek miał podobny przebieg, jak opisany pod D 3. Wypadek dotyczył jednakże dorosłego człowieka i zakończył się tylko chwilową utratą przytomności.

Przyczyną wypadku była niewłaściwie zmontowana antena. Zwracam uwagę, że wydane zostały przez SEP „Przepisy budowy napowietrznych anten odbiorczych” (PNE-25/32), przeciw którym grzeszy się jednak bardzo często. Z wielu stron podnoszą się głosy, iż konieczny jest większy nacisk władz państwowych przy wprowadzeniu i tych także przepisów. Przy coraz to większym rozpowszechnieniu radja przestrzeganie tych przepisów staje się coraz nieodzowniejsze.

### F. WYPADKI PRZY LAMPACH RĘCZNYCH.

#### 1. Śmierć od lampy ręcznej 220 V.

Pomocnika rzeźnickiego F. znaleziono w lodowni piwnicy martwego z lampą ręczną, trzymaną za trzonek żarówki i oprawkę. Przyczyną wypadku była wadliwa lampa ręczna. Sprawozdawca proponuje wprowadzenie przymusu w stosowaniu transformatorów na 24 czy też 42 V do lamp ręcznych. Zdaje mi się, że takie żądanie jest nieco za daleko idące, gdyż lampy ręczne, prawidłowo wykonane i używane w normalnych warunkach, nie przedstawiają niebezpieczeństwa. W miejscach zaś specjalnie niebezpiecznych już przepisy obecne nakazują stosowanie takich transformatorów (PNE-10 § 31 p. 1 f). Większość wypadków przy lampach ręcznych powstaje natomiast z tej prostej przyczyny, iż używane bywają bardzo często lampy ręczne, wykonane niezgodnie z przepisami, a więc bez klosza ochronnego lub bez osłonnego pierścienia izolacyjnego. Jakież często widuje się lampy ręczne nawet bez rękojeści, zwykła poprostu oprawka z 2 krótkimi drucikami i żarówką już się nazywa szumnie lampą ręczną lub lampą probierczą! Pewną niedoskonałość prawidłowych nawet lamp ręcznych stanowi brak kurka; jest to coprawda z innych względów zabronione (por. PNE-10 § 31 p. 1 d), ale jest często przyczyną, że dla zgaszenia lampy wykręca się żarówkę i można dotknąć wtedy przypadkowo nieochronionego trzona żarówki. Toteż na ten szczegół należy zwrócić szczególną uwagę przy lampach ręcznych (por. § 31, p. 1 b).

#### 2. Poparzenie 2 elektromonterów przez lampę probierczą 220 V.

Poparzenie nastąpiło przy sprawdzaniu przewodów za pomocą lampki probierczej. Żarówka uległa prawdopodobnie w czasie drogi uszkodzeniu, tworząc wewnątrz zwarcie, o czym monterzy nie wiedzieli. Podczas sprawdzania prze-

wodów żarówka pękła i powstał łuk, który poparzył jednemu z pracujących twarz i ręce, drugiemu zaś ręce.

Przyczyną wypadku był przypadek. Wniosek, żeby usunąć żarówki jako przyrząd do sprawdzania instalacji, byłby jednak zdaniem moim zbyt daleko idący, a to z tego powodu, że żarówka jest tak prostym i tanim, a zarazem wygodnym w użyciu przyrządem, że żadne zakazy nie odniosłyby skutku, a pozbawiłyby monterów użytecznego przyrządu. Natomiast wypadek ten i jemu podobne wskazują na to, że przyrząd ten wymaga technicznego opracowania, aby uniknąć niebezpieczeństw, które połączone są z używaniem żarówek probierczych w formie dzisiaj powszechnie używanej.

### G. WYPADKI INNYCH OSÓB.

#### 1. Śmierć od prądu trójfazowego 380/220 V.

Robotnik dniówkowy A. został porażony w piwnicy przy wkręcaniu żarówki w lampie ściennej. Przy badaniu stwierdzono, że denat upadając oderwał od ściany oprawkę wraz z rurką bergmanowską z gipsem na długości ok. 1/2 m. Cała instalacja była wykonana wadliwie, a mianowicie w rurkach bergmanowskich pod tynkiem na gipsie w pomieszczeniu tak wilgotnym, że gips po tygodniu był jeszcze całkiem miękkim. Oprawki były zwyczajne (niehermetyczne i nieizolowane), a ta, która stała się przyczyną śmierci, nie miała pierścieni (metalowego i porcelanowego). W kilku oprawkach przewód zerowy przyłączony był do spodka oprawki, zamiast do części gwintowanej (PNE-10 § 28 A p. 5 a).

Przyczyną wypadku była wadliwie wykonana instalacja, przyłączona do sieci bez wiedzy elektryka. Podkreślić należy również niezgodność instalacji z PNE-10 § 28 a i § 40. Sprawozdawca stawia na tle opisanego wypadku 2 wnioski: aby w pomieszczeniach wilgotnych zabezpieczać wszelkie urządzenia elektryczne przed przypadkowym dotknięciem, np. przez możliwie gęste siatki ochronne, oraz, aby zabronić wykonywania w takich pomieszczeniach instalacji pod tynkiem. Drugie żądanie, choć nieco w innej formie, przewidziane jest w § 40 p. 12, pierwsze zaś — w § 40 p. 2.

#### 2. Śmierć i porażenie od prądu trójfazowego 380/220 V w rolnictwie.

Przy młóceniu zboża silnikiem elektrycznym spadł pas, poczem robotnik K. wraz z robotnikiem F. schwycili drążkami ramę, na której zmontowany był silnik, dla lepszego napięcia pasa. Przy tej czynności K. otrzymał uderzenie prądem, a F. pozostał z rękami, zaciśniętymi na rączkach prężenia pasa. Przy tej czynności K. otrzymał uderzenie prądem. Wypadek zdarzył się na podwórzu gospodarskim, gdzie ziemia była wilgotna. Punkt zerowy transformatora był uziemiony, ale uziemienie ramy silnika było zerwane.

Przyczyną wypadku był błąd w izolacji silnika oraz zerwane uziemienie; przepisy SEP nie były więc zachowane. Przy okazji tego wypadku sędzia, który wypadek badał z urzędu miał polecić, aby „rączki od ramy silnika były izolowane i bezpieczniki były w porządku”. Instrukcja ta, wydana w najlepszej wierze przez człowieka niefachowego, ale cieszącego się w kołach rolników wielkim autorytetem, wskazuje dobitnie, jak potrzebna jest w takich wypadkach interwencja inżyniera - elektryka.

#### 3. Śmierć i poranienie od prądu zmiennego 250 V.

2 robotników dniówkowych zatrudnionych było w sadzie zrywaniem owoców. Przy tej sposobności dotknęli przypadkiem drutów nieizolowanych, zawieszonych w sadzie i pozostawionych po festynie od kilku tygodni. Jeden poniósł śmierć, drugi — lekkie porażenie.

Przyczyną jest prawdopodobnie obce zaniechanie.

#### 4. Porażenie 2 osób w łaźni.

Na sali ogólnej w łaźni osoba X dotknęła ręką zwisającego przewodu, pozbawionego w tym miejscu izolacji, o napięciu 220 V wzgl. ziemi. Gdy gwałtowny skurcz mięśni nie pozwolił jej puścić przewodu, przyszła jej z pomocą druga osoba Y i uległa temu samemu losowi. Obie osoby zostały uwolnione przez wyłączenie linii. Normalnie przewody wisiały na rolkach u sufitu, wykonane jednakże były w czasie wojny gorszym materiałem i oberwały się.

Przyczyną wypadku była wadliwa instalacja, a następstwa wypadku mogły być znacznie poważniejsze ze względu na zmniejszony opór ciała w łaźni.

#### 5. Poparzenie prądem stałym 600V.

Wypadek wydarzył się przy wsiadaniu do tramwaju. Podróżna wsiadając chwyciła za poręcz i w tej chwili została porażona prądem elektrycznym, przyczem równocześnie zgasło światło. Tramwaj został natychmiast wyłączony, a podróżna odniosła lekki tylko wstrząs nerwowy i opalenie, widoczne zwłaszcza na rękawiczkach. Kierownictwo tramwajów tłumaczy wypadek w ten sposób, iż w chwili, gdy podróżna dotknęła poręczy, wóz stał na zapiaszczonych szynach. Prąd był włączony, gdyż światło paliło się. Duży spadek napięcia z powodu zapiaszczonych szyn odczuła zatem pasażerka.

Przyczyną wypadku jest nieszczęśliwy zbieg okoliczności. Jest to zarazem wskazówką dla tramwajów, aby nie stosować poręczy metalowych.

### H. WYPADEK Z KONIEM.

#### 1. Zabicie konia od napięcia 60 V.

Koń węglarza drobnicowego został zabity wedle wszelkiego prawdopodobieństwa prądem elektrycznym w chwili, gdy wszedł w kałużę wody deszczowej. Inne konie w tym miejscu też podobno podskakiwały. Wobec tego zbadano bliżej, czy tam niema jakich napięć, i stwierdzono, że pomiędzy kałużą, a wodociągiem sąsiedniej kamienicy istnieje napięcie ok. 60 V. Przy szerokim rozstawieniu nóg można było również odczuć napięcie. Przy bliższym badaniu kabli niskiego napięcia (380/220 V) znaleziono w odległości ok. 200 m od miejsca wypadku mułę kablową, zalaną masą kablową nieco porowatą i to mogło powodować upływ prądu do ziemi.

Mułę tę przerobiono, uziemiając nietylko pancerz ołowiany, ale i pancerz stalowy kabla, i zalano ją na nowo. Po przeróbce żadnych napięć więcej w ziemi nie zauważono.

Przyczyną wypadku była prawdopodobnie niedoskonałość zalania masą. Z tego też względu połączenie pancerza żelaznego kabla oraz muły z uziemionym płaszczem ołowianym winno być uznane za obowiązkowe. W PNE-10/32 § 27 p. 10 uznane to jest jako pożądane.

### IV. Wpływ prądu elektrycznego na organizm.

Na tle opisanych wyżej wypadków widoczny jest szkodliwy wpływ prądu elektrycznego na organizm ludzki. Wpływ ten może być rozmaitego rodzaju. Po pierwsze może to być wpływ pośredni przez poparzenie w wysokiej temperaturze łuku elektrycznego, jaki powstaje przy zwarcia między fazami albo do ziemi. Poparzenia te nie bywają głębokie, bywają natomiast rozległe, gdyż przyłącza się do tego oparzenie od płonącego ubrania. Powtórę może to być oparzenie, powstałe bezpośrednio od przepływu prądu o dużym natężeniu przez ciało ludzkie. To natężenie prądu bywa nie raz dosyć duże (kilka amperów i więcej), co przy dłuższym czasie trwania może spowodować duże i głęboko sięgające rany od spalania tkanek prądem elektrycznym. Bezpośredni wpływ wywiera przez porażenie prąd elektryczny, dzia-

lając bezpośrednio na organy wewnętrzne, jak mózg i serce, i działanie to powoduje w takim razie niejednokrotnie śmierć. Jakie jest to działanie, jak wielkiego prądu potrzeba do zabicia, dlaczego działanie to jest czasem śmiertelne, a czasem nie, nie jest dotychczas dostatecznie wyjaśnione. Zdaje się, że duże znaczenie ma tu moment zaskoczenia, podczas gdy świadomość niebezpieczeństwa obniża ogromnie niebezpieczeństwo zabicia. Oprócz działania na centralny system nerwowy prąd elektryczny może oddziaływać również na system nerwowy wegetatywny i pozostawić przez pewien czas ujemne skutki. Naturalnie w praktycznym wypadku bywają zwykle skutki i pośrednie i bezpośrednie. Należy wreszcie wspomnieć także o zranieniach lub złamaniach, spowodowanych upadkiem w momencie porażenia.

Opisane wypadki są przykładem dla wszystkich kategorii. Jest rzeczą charakterystyczną, że wypadki, w którychby przeważało ciężkie oparzenie, czy to powierzchowne, czy też głębokie, zdarzają się najczęściej u elektromonterów i wogóle u ludzi, którzy mają zawodowo do czynienia z prądem elektrycznym; taki jest też często rezultat u samobójców. Śmierć jest tu najczęściej zjawiskiem wtórnym jako wynik poparzenia. Natomiast stosunkowo największy odsetek śmiertelności wykazują dzieci, rzemieślnicy i robotnicy.

W literaturze znaleźć można twierdzenie, że natężenie prądu w granicach od ok. 50 mA do 1 A jest dla ludzi najmniej niebezpieczne. Opisane wyżej wypadki nie wydają się tego potwierdzać. W opisanym bowiem przypadku pod A 1 zdołano w czasie wypadku odczytać natężenie prądu i czas jego trwania (300 mA i 3 sek); wypadek nie miał żadnych następstw mimo tak niebezpiecznego natężenia prądu. W przypadku E 1 natężenie prądu również było prawdopodobnie właśnie w tych niebezpiecznych granicach. Mimo to wszyscy 3 porażeni przyszli zaraz do siebie. Inne jednak wypadki, w których natężenie prądu z pewnością nie było większe, miały wynik śmiertelny (D 3, F 3, B 9).

Z drugiej strony można przytoczyć kilka takich wypadków, gdzie natężenie prądu, które przeszło przez ciało, było bardzo duże (B 3, B 4, D 1), a jednak porażeni nawet nie utracili przytomności.

O ile chodzi o wysokość napięcia, to w r. 1933 wypadków przy napięciu szczególnie niskim nie było, było natomiast kilka przy napięciach b. wysokich (60 kV, 40 kV, 35 kV), które dziwnym zbiegiem okoliczności miały przebieg dosyć lekki. Przy napięciach wysokich od 500 V do 15 kV ok. 1/3 miało przebieg śmiertelny. Natomiast przy napięciach niskich, a zwłaszcza 220 V liczba wypadków śmiertelnych przekracza 60% wypadków znanych. Dużą rolę grały tu niekorzystne okoliczności, np. wilgotne piwnice; na te więc pomieszczenia należy zwrócić szczególniejszą uwagę.

Wiele wypadków miało przebieg śmiertelny z tego powodu, że albo porażonemu nie udzielono wcale pomocy, albo też pomoc ta była niewłaściwa. Wogóle z opisów wypadków wynika, że sposoby ratowania porażonych prądem elektrycznym są bardzo mało znane; nadto z notatek dziennikarskich widać, że wśród najszerszych kół społeczeństwa, a nawet wśród ludzi, którzy się uważają za wykształconych, istnieją najszkodliwsze przesady. W razie wypadku zatem tylko w b. rzadkich razach znajduje zastosowanie natychmiast właściwa metoda ratowania i dlatego rzadko kiedy następuje uratowanie porażonego, — daleko rzadziej, niżby to być powinno. Toteż pragnę zakończyć apelem, aby w miarę możliwości dbano o wykształcenie całego personelu fachowego oraz wszystkich tych, którzy z wypadkami mogą mieć styczność w ratowaniu prądem elektrycznym (strażacy, pielęgniarze, dozorczy). Odnosne wskazówki zawierają przepisy PNE-9.