

PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY

ORGAN STOWARZYSZENIA ELEKTROTECHNIKÓW POLSKICH.

WYCHODZI 1-go i 15-go KAŻDEGO MIESIĄCA.

PRZEDPŁATA: na kwartał IV-ty. Mk. 3000,— Cena zeszytu pojedynczego Mk. 500,— Sprzedaż numerów pojedynczych we wszystkich większych księgarniach. Nakład pierwszego kwartału jest całkowicie wyczerpany.	Biuro Redakcji i Administracji: Warszawa, Czackiego № 5 m. 24, I piętro, (Gmach Stowarzyszenia Techników), telefon № 90-23. Administracja otwarta codziennie od godziny 12 do 4 pp. i od 6 do 7 wieczorem. - Redaktor przyjmuje we wtorki od godziny 7-ej do 8-ej wieczorem. - Konto № 363 Pocztovej Kasy Oszczędności.	CENNIK OGŁOSZEŃ: Ogłosz. jednoraz. na 1/1 str. Mk. 60000 " " na 1/2 " " 35000 " " na 1/4 " " 20000 " " na 1/8 " " 12000 Strona tytułowa (I) 50 proc. drożej, " okładki zewn. (II) 20% " wewn. (II) i (III) 20% droż. Ogłoszenia strony tytułowej przyjmowane są tylko całostronicowe. Podwyżka cennika ogłoszeń obowiązuje wszystkie już zleczone ogłoszenia od dnia zmiany cen bez uprzedniego zawiadom.
--	--	---

Rok IV.

Warszawa, dnia 1 Października 1922 r.

Zeszyt 19.

TREŚĆ: Przepięcia i urządzenia przeciwprzepięciowe, Kazimierz Drewnowski. — Normy i przepisy bezpieczeństwa. — Z gospodarki elektrycznej. — Z gospodarki cieplnej. — Wiadomości techniczne. — Wiadomości bieżące. — Różne. — Kącik językowy. — Nowe wydawn. — Kalendarzyk. — Stowarzysz. i organizacje. — Przemysł i handel. — Pytania i odpowiedzi.

Przepięcia i urządzenia przeciwprzepięciowe.

Inż. pułk. Kazimierz Drewnowski.

(Ciąg dalszy).

II. Przyczyny powstawania i rodzaje przepięć.

Zależnie od przyczyn, jakie powodują powstawanie przepięć, możemy je podzielić na 4 grupy:

- 1) przepięcia atmosferyczne,
- 2) " rezonansowe,
- 3) " łączeniowe,
- 4) " zwarciove.

Przepięcia te przybierają postać różną, nieraz różnorodną, przechodzą więc z jednej postaci, o których była mowa w poprzednim rozdziale, w drugą, zależnie od zjawisk, im towarzyszących.

1. Przepięcia atmosferyczne.

Przepięcia, powstające skutkiem wpływów elektryczności atmosferycznej, mają swe źródła:

- a) w nierównomiernym rozdziale potencjałów warstw atmosfery, otaczającej przewody;
- b) w udzielaniu ładunków statycznych przewodom;
- c) w indukowaniu ładunków statycznych w przewodach przez wpływ;
- d) w uderzeniach pioruna w przewody.

a) Nierównomierny rozdział potencjałów atmosfery. — Przestrzeń, otaczająca ziemię, jest polem elektrycznym. Wykazuje ona normalnie, stosownie do pory roku i dnia, dodatnie spadki potencjału, wynoszące 100 — 500 V na 1 m odstępu dwóch powierzchni ekwipotencjalnych. W razie zaburzeń atmosferycznych spadek potencjału

zwiększa się i dochodzi nawet do 10000 V. Opady atmosferyczne udzielają ziemi ładunków elektrycznych, dochodzących do 10^{12} A/cm^2 .

W razie, gdy pole jest niezmiennie, na przewodach napowietrznych znajduje się ładunek elektrostatyczny, odpowiadający różnicy potencjałów między przewodem a ziemią, a dodający się do znajdującego się tam normalnie (odpowiadającego napięciu sieci). Skoro równowaga atmosferyczna zostanie naruszona, przewód otrzymuje nowy ładunek, który stara się wyrównać wobec ładunku ziemi. Skutkiem tego powstaje na przewodach przepięcie.

Naruszenie równowagi może nastąpić nawet podczas zupełnie pogodnej pory, np. wskutek oświetlenia intensywnego części linii elektrycznej przez wschodzące słońce; podobne zjawiska obserwowano przy zachodzie słońca.

Ukształtowanie terenu ma tu również wpływ. W górach powierzchnie ekwipotencjalne są gęstsze, niż w dolinach; wobec tego linja elektryczna, przechodząca z doliny przez górę, spotyka tam większy potencjał, niż w dole; stąd wyrównanie ładunków z góry na dół.

Ponieważ tylko w wyjątkowych przypadkach spadek potencjału przy ziemi przenosi 10 kV/m , przeto można jako granicę górną przepięć tego rodzaju przyjmując dla przewodów w wysokości np. 6 — 8 m nad ziemią 60 — 80 kV, które dodają się do istniejącego napięcia w linii.

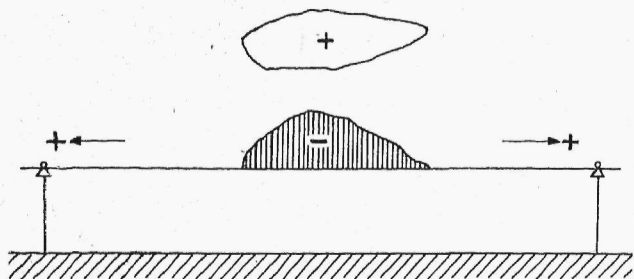
Jasne jest z tego, że linje o napięciach niższych są stosunkowo więcej naprężane, niż przy wyższych napięciach. Tem się tłumaczy, że w liniach o niższym napięciu, skutki takich przepięć pojawiają się częściej.

b) Bezpośrednie udzielanie ładunków przewodom jest zbliżone do poprzedniego. Jeśli w pobliżu linii elektrycznej przeciąga chmura, mgła, śnieg, tunany piasku i t. p., tak, że dotykają przewodów, to oddają część ładunku przewodom, które się przez to ładują. Podobne zjawisko obser-

wowano podczas wiatru; przypisuje się je tarcie cząsteczek powietrza o przewody.

W obu przypadkach a) i b), jeżeli zmiany te odbywają się powoli i jeżeli istnieją w sieci odpowiednie ochronniki upływowe, wyrównanie ładunków następuje powoli i przepięcie znika.

c) Indukowanie ładunków statycznych przez wpływ. — Chmura, naładowana elektrycznością np. dodatnią, przeciąga nad przewodem (rys. 6), indukuje w nim ładunek o znaku przeciwnym



Rys. 6.

nym i wiąże go z sobą, podczas gdy ładunek dodatni odpływa po za obszar wpływu chmury i albo gromadzi się, o ile dalej iść nie może, albo odpływa przez ochronniki upływowe do ziemi.

W takim razie występuje tylko lokalne zwiększenie napięcia w sieci, — największe mniej więcej pod środkiem chmury, — które znika o ile chmura powoli ustępuje.

Wyładowania, powoli się odbywające, są zwykle dosyć rzadkie. O wiele częściej zachodzi przypadek, że chmura, która udzieliła przewodowi ładunku, zostaje nagle przez błyskawicę wyładowana. Wtedy ładunek przewodu, któremu odpowiada jakieś napięcie, zostaje uwolniony, nie może jednak istnieć sam na przewodzie i musi się wyrównać z ładunkiem przeciwnym, znajdującym się na ziemi. Ponieważ zmiana nastąpiła nagle, przeto bezpieczniki upływowe, jako działające za wolno, nie mogą tego wyrównania dokonać, tak, że ładunek, znajdujący się swobodnie na przewodzie, — który wyobrażamy sobie jako rozłożony nierównomiernie na pewnej długości — w tej postaci nie może tam istnieć, lecz musi się natychmiast rozejść — z prędkością światła — ku obu końcom przewodu, w postaci fal wędrownych, o takim samym kształcie, lecz o amplitudzie dwa razy mniejszej. Te fale rozbiegają się i, natrafiwszy np. na otwarty koniec przewodu, zostają odbite, osiągając na tym końcu zdwojenie amplitudy. Fala odbita znowu wraca o takim samym kształcie i takiej samej amplitudzie (połowa pierwotnej fali). Podczas tego doznają tłumienia w obwodzie i stopniowo znikają.

Ponieważ kształt takiej fali jest raczej łagodny, niż stromy, zagrażają one izolacji tylko swą amplitudą. Sprawa jednak komplikuje się, o ile nastąpi skutkiem napięcia fali wędrownej przeskok iskry przez izolator. Wtedy mamy przypadek zwarcia z ziemią, który powoduje powstawanie fal uskokowych ładujących i wyładowujących o stromym tyle fali i amplitudzie, prawie równej wysokości napięcia przeskoku iskry.

To właśnie jest szczególnie groźne dla izolacji

i temu przypisujemy owe szkodliwe działania przepięć atmosferycznych.

Zależnie od rodzaju wyładowania chmur można liczyć się z jednorazowym lub wielokrotnym wyładowaniem. Pochodzi to od natury pioruna, jako iskry ciągłej, czy też oscylacyjnej i to znowu — o małej, czy dużej częstotliwości. Co do tego ostatniego, to niema jeszcze ustalonego poglądu, co do ilości oscylacji.

Istnieją tu różne hipotezy; jedne przyjmują częstotliwość prądu kilku tysięcy, inne — kilkudziesięciu i kilkuset tysięcy na sekundę. Więcej prawdopodobieństwa jest po stronie mniejszej częstotliwości. Ale tutaj nie tyle idzie o częstotliwość, ile o charakter wyładowania i jego przebieg. Powtarzające się wyładowania powodują opisane powyżej przebiegi i przepięcia, które skutkiem częstego powtarzania się, stają się dla izolacji tembardziej niebezpieczne; wiadomo bowiem, że wytrzymałość elektryczna maleje z częstotliwością występowania napiężeń, względnie z jego długością.

d) Uderzenie piorunu w przewody musi być od rozpatrywania wyłączone, gdyż powoduje zwykle zupełne zniszczenie części urządzenia. Natomiast uderzenie bezpośrednio w pobliżu przewodów może spowodować „muśnięcie” ich którąś z gałęzi pioruna, a więc udzielenie ładunków bezpośrednio przewodowi z wszystkimi jego konsekwencjami.

2. Przepięcia rezonansowe.

Przepięcia rezonansowe mogą mieć swe źródło w najrozmaitszych przypadkach rezonansu między drganiami źródła prądu a drganiami własnymi sieci lub części urządzenia.

Przepięcia takie mogą powstać wszędzie tam, gdzie występuje skupiona indukcyjność i pojemność, a więc w obwodach, utworzonych z indukcyjności transformatorów pomiarowych, cewek przekąźników, dławików ochronnych i t. p. W niektórych przypadkach można brać pod uwagę także pojemność rozłożoną np. w kablu, zwłaszcza nieobciążonym.

Przepięcia rezonansowe mogą być:

główne — jeżeli w grę wchodzi główne części urządzenia, np. generator i przewody, transformator i kabel i t. p.,

lokalne — jeżeli dotyczy to tylko pewnej części urządzenia.

a) Przepięcia rezonansowe główne powstają w razie krytycznego stosunku indukcyjności i do pojemności.

W normalnych warunkach stosunek indukcyjności do pojemności jest tego rodzaju, że trzeba bardzo znacznego zwiększenia tej ostatniej, aby zaszedł rezonans (zwłaszcza przy przewodach napowietrznych). Może się to czasem — i to rzadko — zdarzyć w jakimś oddzielnym obwodzie sieci, w którym istnieje anormalny stosunek tych wielkości.

Również częstotliwość prądu roboczego jest zwykle znacznie mniejsza, niż częstotliwość własna obwodu tak, że i tutaj przypadek zrównania tych częstotliwości — co prowadzi do rezonansu — jest bardzo rzadki.

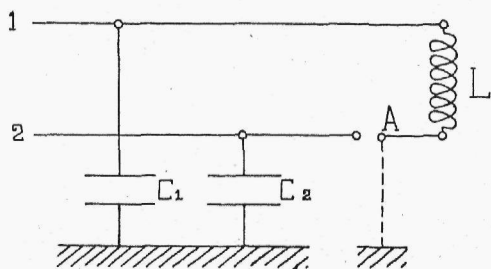
Częściej natomiast może się zdarzyć przypadek rezonansu między którąś z wyższych harmonicznych odkształconej krzywej prądu generatora, a drganiami

własnymi sieci całej lub jej części. Jakkolwiek amplitudy wyższych harmonicznych są znacznie niższe, niż fali głównej, to jednak w razie rezonansu mogą na cewce, wzgl. kondensatorze, wystąpić przepięcia, przewyższające napięcie, dopuszczalne dla izolacji. I z tym głównie przypadkiem należy się liczyć.

Stąd wniosek praktyczny: aby uniknąć przepięć rezonansowych, należy unikać odkształconych krzywych napięcia sieci oraz krytycznego stosunku indukcyjności i pojemności.

Taki przypadek odkształcenia krzywej napięcia występuje często w razie, gdy np. transformator, silnie obciążony, zostanie nagle odłączony po stronie wyższego napięcia, podczas gdy zasilający go generator pracuje pod silnym wzbudzeniem. Następuje wtedy nadmierne nasycenie magnetyczne generatora, które bardzo odkształca krzywą napięcia generatora i przez to transformatora, przyczem występują bardzo groźne wyższe harmoniczne częstokroć o dużej częstotliwości. Skutkiem tego jest narażenie izolacji tak z powodu stromego przebiegu krzywej napięcia, jak też z powodu możliwości rezonansu.

Inny, dość częsty, przypadek takiego rezonansu może zająć przy przerwaniu i zwarciu z ziemią w p. A (rys. 7) jednego z przewodów (2) linii, zasilającej



Rys. 7.

transformator o indukcyjności L . Wtedy może powstać obwód oscylacyjny z indukcyjności L i pojemności C_1 i C_2 przewodów względem ziemi. Przy słabym obciążeniu albo biegu jałowym transformatora, stosunek L i C może być łatwo tego rodzaju, że odpowiada to warunkowi rezonansu.

b) Przepięcia rezonansowe lokalne mogą częściej występować i to zwykle przy dużych częstotliwościach. Zjawiają się one w obwodach, gdzie panuje, — ze względu na podstawową falę napięcia, — normalny stosunek indukcyjności do pojemności. Natomiast przy wyższych harmonicznych, a zwłaszcza przy falach wędrownych o charakterze oscylacyjnym, może się łatwo zdarzyć, że fala o dużej częstotliwości uderzy w jakiś obwód, mający taką samą częstotliwość własną i wywoła tam drgania o przebiegu stromym ze wszelkimi nieміłami dla izolacji skutkami.

Stąd pochodzą najczęściej owe przebiecia izolacji cewek transformatorów pomiarowych lub przekazyńników, przeskoky iskier na izolatorach szyn zbiorczych, przewodów i t. p.

3. Przepięcia łączeniowe.

Przy wszelkiego rodzaju łączeniach w urządzeniach elektrycznych, które pociągają za sobą zmianę stanu ustalonego, trzeba się liczyć z występowaniem

przepięć. Jak poznaliśmy, mają one postać fal wędrownych t. zw. łączeniowych, będących zwykle falami uskokowemi.

a) Przepięcia, powstające przy włączaniu. — Przy włączaniu obwodu stałych skupionych mamy do czynienia z przebiegami aperiodycznymi lub oscylacyjnymi, zależnie od stosunku oporności do indukcyjności i pojemności. W najgorszym przypadku trzeba się liczyć z wystąpieniem najwyższej podwójnego napięcia na kondensatorze, co naogół nie jest groźne dla izolacji. Gorzej jest, jeżeli przebieg przejściowy jest o wielkiej częstotliwości, gdyż prowadzi to do stromego charakteru fal ze znanymi konsekwencjami.

Inaczej się przedstawia rzecz przy włączaniu obwodu o stałych rozłożonych, np. przewodu dalekoosiębnego lub kabla. Przebieg włączania napięcia odbywa się w postaci fal łączeniowych uskokowych.

Występują wtedy dwie fale: ładująca, biegnąca do przewodu o więcej lub mniej stromem czole, zależnie od warunków włączania, oraz fala wyładowująca, również uskokowa, biegnąca do źródła prądu. Tak jedna, jak i druga zagrażają izolacji transformatorów względnie izolatorów. Jak później poznamy, zależnie od oporności falowej przewodów, przeważa napięcie jednej albo drugiej fali; w każdym razie jedna albo druga część urządzenia znajdzie się pod przepięciem, którego absolutna wysokość nie przekroczy wprawdzie podwójnej wysokości napięcia, ale zato stromość przebiegu jest niebezpieczna. Przez zastosowanie wyłączników z opornikiem dodatkowym można spowodować złagodzenie przebiegu fali.

b) Przepięcia, powstające przy wyłączeniu. — Po odłączeniu obwodu od źródła prądu energia elektryczna i magnetyczna, nagromadzona w tym obwodzie, musi przejść w inną formę, np. w ciepło. Nie może się to stać momentalnie. Zwykle występuje na kontaktach wyłączników iskra wzgl. łuk świetlny, który wskutek oddalania się kontaktów rozciąga się i wreszcie gaśnie. Podczas tego prąd zmniejsza się wskutek zwiększenia się oporu łuku i wreszcie znika.

Skutkiem znikania prądu i jego pola magnetycznego, wytwarza się siła elektromotoryczna tem większa, im jest większą indukcyjność obwodu, gdyż skutkiem indukcyjności prąd przy znikaniu maleje z początku wolniej, a dopiero przy końcu szybciej, co powoduje duże napięcia indukcyjne. Tem tłumaczy się powstawanie przepięć przy odłączaniu uzwojeń magnesów i t. p.

Przy prądzie zmiennym przebieg odłączania jest następujący: Łuk świetlny, powstający między stykami wyłącznika, powinien zgasnąć przy pierwszym przejściu krzywej prądu przez zero. Gdy zachodzi przesunięcie faz między napięciem a natężeniem, napięcie, istniejące w chwili, gdy prąd ma wartość zero, zapala na nowo łuk tak, że on trwa podczas kilku i więcej okresów tak długo, dopóki styki wyłącznika za bardzo się nie oddalą.

Zależnie od przebiegu prądu w chwili znikania, t. j. od bardziej lub mniej stromego przebiegu krzywej prądu, występują większe lub mniejsze napięcia na łuku, przekraczające wielkość napięcia roboczego i powodujące przepięcia.

O ile przesunięcie faz jest duże i o ile prąd jest stosunkowo mały, np. przy odłączaniu transfor-

matorów nieobciążonych, to przy zastosowaniu silnych i bardzo szybko działających wyłączników olejowych działanie chłodzące oleju może być tak intensywne, że przerwie prąd przed normalnym przejściem jego przez zero. Przebieg znikania prądu będzie wtedy przyspieszony t. j. bardziej stromy i powstaną duże przepięcia. Przy dużych prądach niebezpieczeństwo to nie zachodzi; wyłączniki olejowe przerywają wtedy normalnie, t. j. przy przejściu przez zero, stosownie do przebiegu sinusoidy. Nowoczesne wyłączniki olejowe są w stanie przerwać prąd już w pierwszym półokresie.

Przy wyłączeniu obwodów o dużej pojemności występuje zjawisko t. zw. samowłączania powrotnego, powodujące przepięcia. W takich obwodach napięcie i natężenie są przesunięte prawie o 90° . W momencie, kiedy krzywa prądu przechodzi przez zero i prąd się przerywa, napięcie ma prawie największą wartość. Po przzerwaniu prądu pozostaje na odłączonym obwodzie ładunek, odpowiadający napięciu v_m , jakie było w chwili odłączenia. Tymczasem po drugiej stronie wyłącznika, napięcie panuje dalej i odbywa normalny sinusoidalny przebieg. Po upływie pół okresu osiągnie ono wartość przeciwną — v_m , tak, że na stykach wyłącznika powstaje napięcie podwójne, prawie $2v_m$, które może spowodować zapalenie się łuku z powrotem, a więc włączenie powrotne obwodu odłączonego, o ile styki wyłącznika zanadto się jeszcze nie oddaliły.

Rezultatem tego włączenia jest przebieg oscylacyjny ładowania obwodu o stałych skupionych, co prowadzi do podwójnego napięcia, a w razie stałych rozłożonych, fale łączeniowe uskokowe o wysokości $4v_m$.

Na to zjawisko, którym tłumaczymy sobie przepięcia, występujące przy odłączaniu przewodów napowietrznych, a zwłaszcza kabli nieobciążonych, zwrócił uwagę i wytłumaczył je prof. Petersen w 1919 r.

We wszystkich tych przypadkach z powodzeniem stosuje się jako ochronę od przepięć wyłączniki z opornikiem dodatkowym.

4. Przepięcia zwarciove.

Rozróżniamy dwojakiego rodzaju zwarcie: zwarcie przewodów między sobą i zwarcie przewodów z ziemią. Przebiegi charakterystyczne tych zjawisk różnią się znacznie od siebie.

A. Zwarcie przewodów.

Zwarcie przewodów powoduje nagłe przetężenie i wyłączenie ich za pomocą bezpiecznika czy wyłącznika samoczynnego. Napięcie w miejscu zwarcia opada do zera lub w pobliżu zera, stosownie do oporu miejsca zwarcia. Wtedy możemy taki obwód podzielić na 3 części (rys. 8): jedną z generatorem, drugą z odłączoną częścią przewodów, trzecią z odbiornikiem, w których występują następujące zjawiska:

- wyłączenie obwodu, zwartego na końcu,
- samowłączanie powrotne takiego samego obwodu,
- wyładowanie obwodu oscylacyjnego.

Części obwodu można badać oddzielnie, ponieważ są rozdzielone wyłącznikiem wzgl. miejscem

zwarcia, gdzie panuje napięcie zero, t. zn. przez to miejsce fala napięcia nie może przejść.

Wyłączenie obwodu, zwartego na końcu, powoduje dla generatora zjawiska, opisane w poprzednim ustępie; w odłączonej zaś części tego obwodu powstają fale uskokowe, przebiegające od wyłącznika do miejsca zwarcia tak długo, dopóki nie zostaną zabsorbowane w naturalnych oporach.

Wysokość napięcia takiej fali nie przenosi $I Z$, gdzie I jest prądem pozostałym na przewodach po wyłączeniu, zwykle tak małym, że napięcie nie jest duże.

O ile podczas okresu wyłączania nastąpi samowłączenie powrotne, to mamy zjawisko włączania obwodu zwartego na końcu, które odbywa się w postaci fal wędrownych o okresie, odpowiadającym podwójnej długości przewodu.

Trzecie zjawisko t. j. wyładowanie obwodu oscylacyjnego, złożonego z linii i transformatora, może prowadzić do przepięć rezonansowych i oscylacyjnych.

Widać z tego, że zjawisko zwarcia przewodów może być dosyć skomplikowane; nie prowadzi ono jednak do nadmiernych przepięć, a przez zastosowanie wyłączników z opornikiem dodatkowym można się od nich dostatecznie zabezpieczyć.

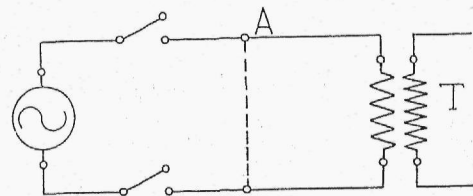
Natomiast znacznie bardziej skomplikowane i groźniejsze jest:

B. Zwarcie z ziemią.

Zwarcie przewodu z ziemią występuje przy przzerwaniu się przewodu i dotknięciu jednego końca jego do ziemi, przy przebicciu izolatora, przy przeskoku iskry przez izolator i t. p. W dobrze urządzonych liniach najczęściej występuje tylko to ostatecznie zjawisko, trwające może krótko, ale w znaczeniu elektrycznym dostatecznie długo, aby wywołać niemiłe skutki.

Zwarcie z ziemią może być trwałe, jeżeli połączenie przewodu z ziemią jest bezpośrednie i trwałe, albo też dorywcze, jeżeli powoduje powstawanie łuku świetlnego naprzemian zapalającego się i gasnącego, występującego między przewodem a ziemią.

W razie zwarcia z ziemią w p. A jednego przewodu układu trójfazowego (rys. 8), spada jego na-



Rys. 8.

pięcie fazowe do zera, napięcie fazowe innych faz podnosi się do wysokości napięcia międzyprzewodowego. Przez miejsce zwarcia popłynie prąd ładowania obufaz nieuziemionych, wyprzedzający napięcie, t. zw. prąd zwarcia z ziemią.

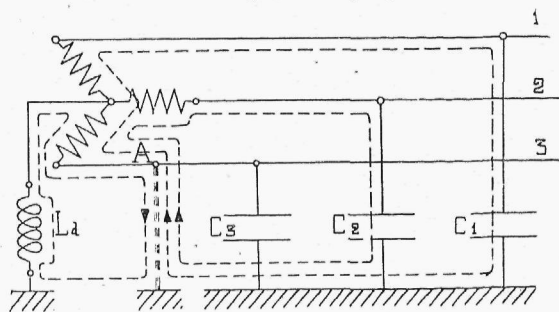
Łuk świetlny gasnie w tym momencie, kiedy prąd przechodzi przez zero; wtedy napięcie ma największą wartość (rys. 9), skutkiem czego na uzziemionym poprzednio przewodzie znajduje się ładunek, odpowiadający temu napięciu, i najpóźniej po następ-

nym półokresie panuje na miejscu zwarcia podwójne napięcie fazowe, które powoduje powrotne zapalenie się łuku i drgania swobodne o podwójnej amplitudzie, czyli o powrotnym napięciu fazowym.

To potęguje się dalej, ale tylko do pewnej granicy z powodu działania pojemności międzyfazowej i strat tak, że w końcu liczymy się — według Petersena — z występowaniem przepięć 2,6 do 3 razy większych, niż robocze napięcie międzyfazowe.

Zjawisko to powtarza się po każdym przejściu krzywej prądu przez zero, a więc np. 100 razy na sekundę; za każdym razem występują fale uskokowe o podanem wyżej przepięciu, uderzające o uzwojenia maszyn i transformatorów. Jest to najgroźniejsza forma przepięcia, działająca wysokością napięcia, stromością czoła fali i częstotliwością powtarzania się; ten ostatni wzgląd ma tu największe znaczenie.

Dalszym skutkiem tego zjawiska jest podtrzymywanie łuku świetlnego, który prowadzi wreszcie



Rys. 9.

do zwarcia trwałego z ziemią, albo w razie przeskokowania na inne fazy — do zwarcia przewodów.

Jeżeli urządzenie ma uziemiony punkt zerowy, to zwarcie z ziemią przechodzi w zwykłe zwarcie, co raczej jest pożądane, gdyż odbiera mu charakter dorywczości, która jest szczególnie groźna.

Jako środek ochronny stosuje się obecnie dla wlk przeciwzwarciový syst. Petersena, załączony (L_d) między punkt zerowy a ziemią, który, wysyłając prądy opóźniające się względem napięcia, kompensuje prądy zwarcia z ziemią i uniemożliwia podtrzymanie łuku świetlnego. O tem będzie jeszcze później mowa.

III. Zasada działania elementów ochronników.

Urządzenia przeciwprzepięciowe polegają na odpowiednim i celowym wyzyskaniu charakterystycznych własności obwodu elektrycznego t. j. oporności, upływności, indukcyjności i pojemności, każdej z osobna lub w połączeniu z innymi.

Jak poznaliśmy przepięcia przyjmują postać ładunków statycznych, drgań rezonansowych i swobodnych lub fal wędrownych. Stosownie do tego trzeba rozpatrywać działanie każdej z wyżej wymienionych własności charakterystycznych.

1. Działanie oporności falowej.

Aby zrozumieć przebiegi, odbywające się w przewodach, gdzie stałe obwodu są rozłożone — w związku z występowaniem fal wędrownych, jako następstwa

zakłóceń w takich obwodach — trzeba poznać wpływ, jaki ma oporność falowa na fale wędrownie.

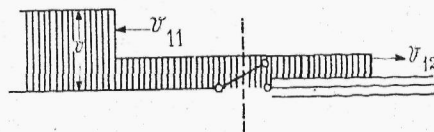
Poznaliśmy już, że na oporze falowym nieskończenie wielkim, t. j. na otwartym przewodzie, następuje całkowite odbicie fali napięcia przy tym samym znaku, a znikanie fali prądu; amplituda fali napięcia podwaja się. Na oporze falowym nieskończenie małym, t. j. w razie zwarcia, następuje znikanie fali napięcia, t. j. odbicie przy zmienionym znaku i zdwojenie prądu.

W razie przejścia fali napięcia v_1 z jednego przewodu o oporności falowej Z_1 do drugiego — Z_2 , muszą wystąpić zjawiska pośrednie. Na podstawie prawa o przemianach energii magnetycznej i elektrycznej, można łatwo obliczyć napięcie fali odbitej v_{11} i fali przepuszczonej v_{12} jako

$$v_{12} = 2v_1 \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}, \quad v_{11} = v_1 \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

gdzie $\frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$ nazywamy współczynnikiem odbicia fali, a $\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$ współczynnikiem przepływu.

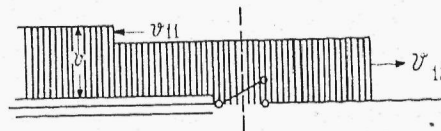
Wielkość fali napięcia, ładującej przewód (przepuszczonej) względnie wyladowującej (odbitej), zależy więc od stosunku oporności falowej obu przewodów. Jeżeli fala przebiega od przewodu o większej oporności falowej — np. przewodów napowietrznych — (rys. 10) do przewodu o mniejszej — np. kabla, to



Rys. 10.

fala przepuszczone jest znacznie niższa od biegnącej do przewodu. Rzecz się ma przeciwnie, jeżeli do kabla pod napięciem przyłączymy przewód napowietrzny (rys. 11).

Z tego można łatwo poznać łagodzący wpływ kabla, załączonego między źródło prądu a od-



Rys. 11.

biornik (transformator), który jest wtedy naprężany tylko małym przepięciem, oraz wyciągnąć różne praktyczne wnioski, np.:

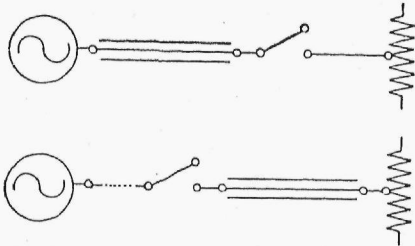
dla ochrony generatora włączyć (rys. 12) między niego a transformator kabel, t. zn. włączać transformator przez kabel w porządku: generator — kabel — wyłącznik — transformator.

Wyłącznik, umieszczony przeciwnie, a mianowicie jak na (rys. 12 b), gdzie ponadto między generatorem a wyłącznikiem leży przewód napowietrzny, powoduje przepięcia na generatorze. Wyłącznik

z opornikiem dodatkowym może złagodzić przepięcie w tym przypadku.

2. Działanie oporności.

Oporność występuje w każdym obwodzie, czy to w postaci osobnych oporników, czy też jako opór przewodów, uzwojeń i t. p. W każdym oporze następuje przemiana energii prądu w ciepłą,



Rys. 12.

pociągająca za sobą zmniejszenie napięcia. Przy każdym przebiegnięciu fali napięcia następuje tłumienie oscylacji, które tem prędzej zanikają, im obwód ma większą oporność.

Jest to więc własność szczególnie ważna, gdyż w ten sposób można spowodować absorpcję energii i zniżenie przepięcia.

Wobec fal wędrownych oporność skupiona powoduje — jak każda zmiana oporności falowej — częściowe odbicie a częściowe przepuszczenie fali. Fala o napięciu v_1 trafia na opornik R , włączony szeregowo między przewody (rys. 13) o różnych opornościach falowych Z_1 i Z_2 , i zostaje częściowo odbita (wala v_{11}) a częściowo przepuszczona. Podczas przejścia przez opornik następuje częściowa absorpcja fali tak, że do przewodu Z_2 wchodzi tylko fala przepuszczana o napięciu v_{12} .

Aby odbicie nie nastąpiło, musi być $R = Z_1$, t. j. opornik musi mieć oporność, równą oporności falowej przewodu, skąd fala nadbiega. Wtedy następuje całkowita absorpcja fali w oporniku tak, że do przewodu Z_2 nie już z fali wędrownej nie wejdzie.

Jest to teoretycznie doskonały sposób zabezpieczenia się od przepięć fal wędrownych, ale wymagający stałej straty energii podczas normalnego ruchu. Ochronników tego rodzaju nie stosuje się.

Natomiast własność tę można wykorzystać przy wyłącznikach z opornikiem dodatkowym i przy ochronnikach rozładowych. Opornik, połączony w szereg z rozłkami, a więc równolegle do obiektu chronionego, musi mieć oporność równą oporności falowej przewodu, a więc zwykle nie przekraczającą 500 — 700 omów przy przewodach napowietrznych, a 50 — 70 przy kablach; wartości więc zbyt małe, jeżeli się ma do czynienia z bardzo wysokim napięciem.

Zauważyć jeszcze trzeba, że oporniki nie wpływają na kształt fali, nie mają więc własności łagodzenia czoła fali względnie jej rozciągania, lecz tylko zniżanie jej amplitudy.

3. Działanie upływności i ulotności.

Każde urządzenie elektryczne pod napięciem ma w większym lub mniejszym stopniu upływy

prądu elektrycznego. Przewody pod bardzo wysokim napięciem wykazują ponadto zjawisko ulotu elektrycznego, upływność zaś ich jest stosunkowo mniejsza, ponieważ posiadają zwykle lepszą i staranniejszą izolację.

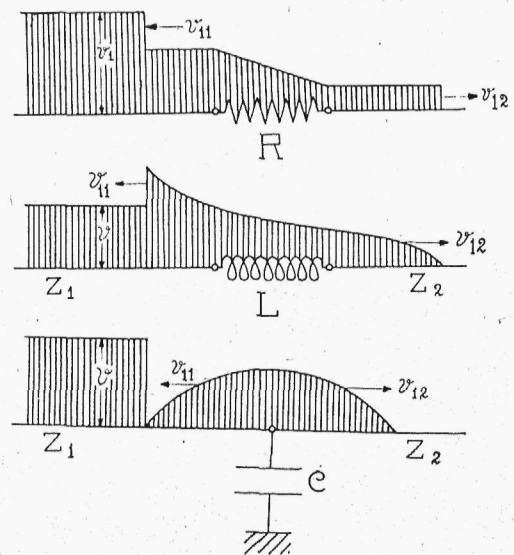
Oba te zjawiska działają tłumiąco na wszelkie ruchy ładunków elektrycznych po przewodach, a zatem i na fale napięcia sprawiające przepięcie. Powodują one stopniowe zmniejszanie się amplitudy napięcia, nie wpływają natomiast na przebieg fali, a więc na jej uskoki.

Jest to zatem rodzaj tłumienia naturalnego, które występuje zawsze i jest pomocne przy ogólnym układzie urządzeń przeciwprzepięciowych, polegających na odbijaniu fal od obiektów ochraniających i spowodowaniu ich stopniowego zanikania przez absorpcję skutkiem oporności, upływności i ulotności.

Można również wyzyskać wzgl. spotęgowań te własności przez zastosowanie osobnych urządzeń upływowych, jak oporniki i dławiki upływowe i ulotowych, jak kolce ulotowe — o czym będzie później mowa.

4. Działanie indukcyjności.

Cewka indukcyjna L , załączona (rys. 14) między dwa przewody Z_1 i Z_2 , stanowi przeszkodę dla fal nadbiegających, podobnie jak opornik, przez którą jednak fala może przejść. Ponieważ energia magnetyczna, odpowiadająca indukcyjności, nie może się zmienić momentalnie, przeto nie pozwala na uskokowe przejście fali przez cewkę, lecz łagodzi jej charakter. Prócz tego w cewce nie następuje przemiana energii elektrycznej w ciepło; dzieje się to jedynie tylko w małym oporze omowym cewki.



Rys. 13, 14 i 15.

Skutkiem tego przebiegi, odbywające się przy przejściu fali przez cewkę, są zupełnie odmienne od poznawanych w oporniku. W pierwszym momencie uderzenia fali o cewkę następuje odbicie fali przy zdwojeniu prawie amplitudy, bo w tym momencie oporność falowa cewki jest prawie nieskończenie wielka. W dalszym ciągu jednak fala przechodzi przez cewkę ładując ją, t. zn. wytwarzając wokół pole magnetyczne. Skutkiem powolnego dzia-

łania indukcyjności, fala przechodząca traci swój stromy charakter i wydłuża się. Skoro cewka zostanie już naładowana całą falą, przez nią przechodzącą, następuje wyładowanie w formie dodatkowych fal. Napięcie fali przepuszczonej wynosi:

$$v_{12} = 2v_1 \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \left(1 - e^{-\frac{Z_1 + Z_2}{L} t} \right),$$

gdzie e jest podstawą logarytmów naturalnych, a t czasem w sekundach, jaki upłynął od pierwszego momentu uderzenia fali o cewkę. Z tego wzoru widać, że fala zmniejsza się według krzywej wykładniczej i to tembardziej, im większa jest indukcyjność cewki L .

Na tej zasadzie polegają cewki ochronne, jako przyrządy przeciwprzebiegiowe.

5. Działanie pojemności.

Kondensator, załączony równolegle (rys. 15) do obiektu ochraniającego, stanowi w pierwszym momencie punkt zwarcia z ziemią dla fali wędrowniej, która w tym momencie zniżyć musi swe napięcie do zera. W dalszym ciągu następuje ładowanie kondensatora i przepuszczanie fali dalej. Ponieważ napięcie kondensatora nie może nagle osiągnąć pełnej wartości, odpowiadającej całemu ładunkowi, przebieg przechodzącej fali napięcia staje się łagodnym, fala rozciąga się.

Na kondensatorze następuje jednak — tak, jak w miejscu zwarcia — w pierwszej chwili także odbicie fali napięcia przy zachowaniu jej amplitudy, a tylko przy odwróceniu znaku.

Napięcie fali przechodzącej obliczyć można ze wzoru

$$v_{12} = 2v_1 \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \left(1 - e^{-\frac{Z_1 + Z_2}{C Z_1 Z_2} t} \right).$$

Na tem polega stosowanie kondensatora ochronnego.

Działanie cewek i kondensatorów ochronnych jest więc podobne; łagodzą one czoło fali przechodzącej i rozciągają ją. Natomiast cewka odbija falę przy zdwojeniu jej amplitudy, a kondensator odbija ją przy zachowaniu jej wysokości. Po za tem w pierwszym momencie działania na cewce występuje prawie podwójne napięcie, a na kondensatorze prawie zero.

6. Urządzenia przeciwprzebiegiowe.

Powyżej podane własności charakterystyczne obwodu elektrycznego wyzyskać można z powodzeniem przy urządzeniach przebiegiowych, mających na celu ochronę od przebiegów, pochodzących od fal wędrownych, będących wedle dzisiejszych poglądów najczęstszą przyczyną zaburzeń przebiegiowych.

Prócz tego stosujemy jeszcze inne urządzenia, polegające na innych zjawiskach, jak osłona elektryczna, elektroliza i t. p.

Kwestja ochrony od przebiegów nie jest jednak jeszcze jednolicie rozwiązana, jakkolwiek stwierdzić można, że prawie osiągnięto ujednostajnienie teorii. Nie mamy dotychczas uniwersalnego środka ochronnego,

któryby w każdym przypadku mógł skutecznie działać; różnorodność bowiem zjawisk jest bardzo wielka. Zależy ona nie tylko od rodzaju napięcia, mocy, rozciągłości sieci, maszyn i t. p., lecz ta sama sieć jest różnorodnie narażana podczas ruchu, zależnie od włączania lub wyłączania jej części, zmian obciążenia i t. p. Tem tłumaczyć sobie można, że te same urządzenia przeciwprzebiegiowe w pewnych warunkach działają skutecznie, w drugich — szkodliwie. Stąd pochodzą owe głosy, wynoszące jedne urządzenia ponad wszystko, podczas gdy inne głosy te same urządzenia skazują na zagładę.

Urządzenia przeciwprzebiegiowe można podzielić na dwie grupy:

- a) zapobiegające powstawaniu przebiegów i
- b) usuwające skutki przebiegów.

Pierwsza grupa jest dotychczas jeszcze w zaniechaniu, jakkolwiek zdawałoby się, że uwagę przede wszystkim zwrócić należy na to, aby z urządzenia elektrycznego usunąć możliwość powstawania wszystkiego tego, co by zagrozało normalnemu ruchowi. Natomiast przyrządy, usuwające skutki przebiegów już w sieci powstałych, są tak rozliczne, że trudno nieraz wybrać właściwy i zrozumieć jego działanie.

W następstwie podam krótką charakterystykę urządzeń przeciwprzebiegiowych, zaczynając od usuwających przebiegi, oraz praktyczne uwagi co do stosowania tych urządzeń.

(Dok. nast.)

Normy i przepisy bezpieczeństwa.

Przepisy bezpieczeństwa dla trakcji elektrycznej (kolejek i tramwajów) dla napięć do 1500 V¹⁾.

I. SIEĆ.

1. Sieć robocza.

a) Druć roboczy i przewody zasilające, umocowane na słupach, jeżeli nie są prowadzone na izolatorach porcelanowych, powinny być od ziemi izolowane podwójnie: pomiędzy drutem roboczym i drutem poprzecznym i pomiędzy drutem poprzecznym i słupem, względnie rozetą.

¹⁾ Druć poprzeczny i odciągi, łatwo dostępne i mogące być dotknięte ręką, powinny być również podwójnie izolowane od drutu roboczego.

Słupów drewnianych nie należy uważać za izolację.

b) Wysokość zawieszenia sieci, przeprowadzonej nad ulicami lub miejscami łatwo dostępnymi, wynosić powinna co najmniej 5 m. od poziomu szyn.

W razach wyjątkowych, np. w przejazdach pod bramami, wiaduktami i t. p. dopuszczalne jest zawieszenie na mniejszej wysokości pod warunkiem umieszczenia w widocznych miejscach odpowiednich tablic ostrzegawczych.

c) Jeżeli drut roboczy zawieszony jest pod lub w pobliżu żelaznych konstrukcji, to należy je odpowiednio zabezpieczyć od krótkiego zwarcia z drutem roboczym.

d) W miejscach niedostępnych dla publiczności część sieci, będącą pod napięciem, można zawiesić na dowolnej

¹⁾ Z prac Komisji Przepisowej.