

Zakład Miernictwa Elektrycznego i Wysokich Napięć Politechniki Warszawskiej

Publikacja Nr 84

KAZIMIERZ DREWNOWSKI

P R Z E P I Ę C I A
i
O C H R O N A P R Z E C I W P R Z E P I Ę C I O W A

Zeszyt I
Fale Wędrowne

Nakładem Koła Elektryków Studentów Politechniki Warszawskiej

W A R S Z A W A

1939

Zakład Miernictwa Elektrycznego i Wysokich Napięć
Politechniki Warszawskiej

Publ. Nr. 84.

Kazimierz Drewnowski

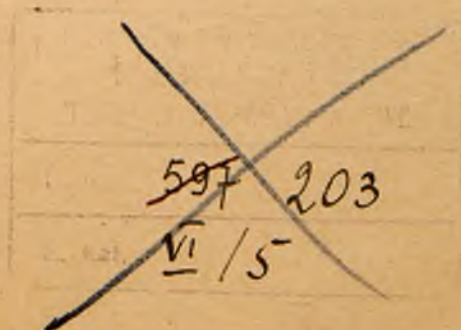
P R Z E P I Ę C I A

1

O C H R O N A P R Z E C I W P R Z E P I Ę C I O W A

Zeszyt I.

F a l e w ę d r o w n e



W a r s z a w a 1 9 3 9

Nakładem Koła Elektryków Studentów Politechniki Warszawskiej

Nr. Inw. W.8.2023

Skrypta niniejsze stanowią początek III części kursu " W y s o k i c h N a p i ę ć " , wykładanego na III roku studiów na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej.

Całość kursu stanowią następujące działy:

- I. Wytrzymałość dielektryczna
- II. Izolacje urządzeń elektrycznych
- III. Przepięcia i ochrona przeciwprzepięciowa
- IV. Pomiary wysokonapięciowe.

INSTYTUT WYSOKICH NAPIĘĆ

Nr inw. 735

Nr kat. XII

S p i s r z e c z y .

	Strona:
W S T Ę P - - - - -	5 - 8
1. OKREŚLENIA PODSTAWOWE - - - - -	9 - 23
a/ Powstawanie fal	10
b/ Kształt fali wędrownej	15
c/ Energia i moc oraz tłumienie fal wędrownych	21
2. PRZEBIEGI W OBWODACH O STAŁYCH ROZŁOŻONYCH - - - - -	23 - 32
a/ Odbicie fali na krańcu przewodu	23
b/ Przejście fali przez miejsce złączenia przewodów	26
c/ Rozdział fali w punkcie węzłowym	28
d/ Oscylacje fal wędrownych	29
3. WPŁYW STAŁYCH SKUPIONYCH NA FALE WĘDROWNE - - - - -	33 - 43
a/ Oporność skupiona	33
b/ Upływność skupiona	35
c/ Indukcyjność skupiona	37
d/ Pojemność skupiona	40
4. PRZEBIEGI ŁĄCZENIOWE W LINIACH - - - - -	43 - 53
a/ Ładunek w spoczynku	44
b/ Włączenie przewodu jałowego	45
c/ Zwarcie przewodu naładowanego	46
d/ Zwarcie przewodu przez opornik	47
e/ Przerwanie przewodu pod prądem	49
f/ Włączanie wsteczne /powrotne/	49
g/ Wyłączanie zwarcia międzyprzewodowego ..	50

W S T Ę P .

Zwiększenie napięcia, nadmierne w stosunku do napięcia panującego normalnie w obwodzie, nazywamy przepięciem elektrycznym. Przepięcia zjawiają się zwykle jako następstwo zakłóceń stanu ustalonego obwodu elektrycznego. Tu interesują nas przepięcia występujące w przewodach linii elektrycznej, w urządzeniach liniowych czy stacyjnych, w maszynach, transformatorach i t.d. Ponieważ zagrażają one izolacji tych urządzeń, w najszerszym tego słowa znaczeniu, będziemy się nimi zajmować głównie ze względu na wytrzymałość izolacji linii, maszyn, transformatorów, sprzętu przyrządów i t.d., pozostawiając na boku sprawy związane z ruchem i obsługą tych urządzeń.

Rozważenie praktyczne zjawisk, których wynikiem są przepięcia, ma jako punkt wyjścia przebiegi odbywające się w obwodzie elektrycznym w razie jakiegoś zakłócenia *) . Jako obwód elektryczny uważamy całą drogę, po której prąd może przepływać. Na tej drodze spotyka on różne składniki obwodu, jak źródło prądu, odbiornik, przewody i t.d., z których każdy posiada trzy charakterystyczne własności: oporność, indukcyjność i pojemność. Przy badaniu obwodu możemy je, dla uproszczenia, założyć jako niezmiennające się, czyli stałe obwodu. W zwykłych warunkach, w jakich obwód pracuje, można, celem pobieżnego obliczenia obwodu, te trzy stałe, zachodzące w każdej jego części, powzielać i połączyć w grupy jako: czystą oporność $/R/$, czystą indukcyjność $/L/$ i czystą pojemność $/C/$, połączone szeregowo. Obwód przedstawi się wtedy w postaci obwodu oscylacyjnego. Taki przypadek obwodu elektrycznego o stałych skupionych, który jest tylko teore-

*) Por. K. Drewnowski. Wytrzymałość dielektryczna. Rozdz. I, 3.

tycznie możliwy, zachodzi w praktyce n.p., gdy prądnicą zasila przez przewody napowietrzne otwarty kabel, gdy tworzy się obwód lokalny złożony z indukcyjności cewek transformatorów lub przekaźników i z pojemności szyn zbiorczych, i t.d.

Przy ścisłym obliczaniu obwodu nie możemy go w ten sposób przedstawić, lecz trzeba uwzględnić, że stałe obwodu są w rzeczywistości rozłożone. W istocie, nie tylko każda część urządzenia elektrycznego z osobna, lecz wogóle każdy kawałek obwodu, posiada oporność, indukcyjność i pojemność tak, że możemy go sobie wyobrazić jako złożony z nieskończonej sumy elementarnych R, L, C , połączonych ze sobą szeregowo, jak przy stałych skupionych. Oprócz tych trzech własności charakterystycznych występuje wtedy jeszcze czwarta, a mianowicie upływność $/A/$, przedstawiana jako oporność połączona równolegle do pojemności $/\text{por. Rys. 2}/$.

Takich ogniw jest na pewnej przestrzeni więcej lub mniej, zależnie od charakteru części obwodu. Celem zbadania takiego zagadnienia można w niektórych przypadkach przyjąć, że są one rozłożone równomierne, t.j., że każdy element długości przewodu posiada te same wielkości R, L, C, A . Wnioski, w ten sposób wyciągnięte, dadzą na ogół dostateczny pogląd na zjawiska, zachodzące w różnych obwodach.

Jeżeli przez obwód płynie prąd roboczy i pod napięciem u , to obwód posiada pewien zasób energii. W polu elektrycznym obwodu znajduje się wtedy energia elektryczna $/1/2Cu^2/$, w polu magnetycznym energia magnetyczna $/1/2Li^2/$. Suma ich stanowi w każdej chwili energię całkowitą obwodu. Obie te energie zależą, przy danych stałych obwodu, jedna - od przyłożonego napięcia, druga od prądu, które to czynniki występują w obwodzie w pewnej zależności od siebie. W obwodzie zachodzi w każdej chwili ścisły rozdział obu tych energii, zależnie od wspomnianych czynników. Suma ich jest jednak stała tak, że zmiana jednej powoduje w tej samej chwili zmianę drugiej.

Te zmiany energii w obwodzie mogą występować normalnie, n.p. skut-

kiem periodycznego charakteru napięcia, albo też przejściowo, - skutkiem jakiegoś zakłócenia stanu ustalonego. Wszelkie zmiany stanu ustalonego pociągają za sobą zmiany energii, znajdujące się w polu elektrycznym, czy magnetycznym. Następstwem ich są nowe prądy i napięcia, występujące w obwodzie i przekraczające często wartości robocze, czyli p r z e t ę ż e n i a i p r z e p i ę c i a. Energia obwodu występuje tu jako nowe źródło prądu, nieraz sprawniej i szybciej działające niż źródło normalne. Z tego względu przy wszelkich rozważaniach tych zjawisk należy mieć na widoku wielkość tych energii.

Zakłócenia stanu ustalonego w obwodzie elektrycznym, są następstwem zmian przyłożonego napięcia lub zmian stałych obwodu. Mogą być one robocze lub przypadkowe. Zakłócenia robocze występują normalnie podczas ruchu przy wszelkiego rodzaju włączeniach i wyłączeniach prądu, przy zmianie obciążenia i t.p. Chwilę ich występowania można z góry przewidzieć i zastosować zawczasu środki, zabezpieczające urządzenie przed ich skutkami, czyli odpowiednio przygotować urządzenie. Natomiast zakłócenia przypadkowe pochodzą od zmian w obwodzie, nieprzewidzianych co do chwili wystąpienia, jak: zwarcia przewodów ze sobą lub z ziemią, zjawiska rezonansu w sieciach elektrycznych, wyładowania elektryczności atmosferycznej w pobliżu przewodów i t.r. Co do nich, to trzeba się przygotować, że mogą w każdej chwili wystąpić; należy więc urządzenie odpowiednio obliczyć i zabezpieczyć.

Zależnie od własności elektrycznych urządzenia, przepięcia przejawiają się w różnej formie. Jeżeli stałe charakterystyczne obwodu są skupione, to przepięcie przybiera postać drgań elektromagnetycznych. W obwodach o stałych rozłożonych /przewody, kable/ następują w razie zakłócenia drgania całego układu w postaci fal wędrownych, rozchodzących się ze skończoną prędkością wzdłuż obwodu. Te fale mogą ze swej strony wzbudzić drgania obwodów o stałych skupionych i zjawisko skomplikować.

Z charakteru przepięć wynika, że naprężają one izolację przez krótszy lub dłuższy czas, w sposób trwały lub dorywczy. W stosunku do napięć ustalonych przebiegi te są zawsze bardzo krótkie, często powtarzające się, przy czym napięcie zjawia się bardzo prędko, t.zn. naprężenie osiąga wartość maksymalną w przeciągu bardzo krótkiego czasu. Jak wiadomo izolacja może znieść naprężenie krótko trwające lepiej, niż długotrwałe. Jeżeli one jednak mają charakter udarowy, a zwłaszcza gdy się powtarzają, to naprężenie może stać się szczególnie groźne.

Skutkiem tego nagłego występowania różnic potencjałów między punktami obwodu elektrycznego, w najszerszym tego słowa znaczeniu, mogą być chwilowo naprężane nawet te części urządzenia, które przy długotrwałym naprężeniu nie wykazują nadmiernych różnic potencjałów, n.p. poszczególne zwoje lub cewki transformatorów, maszyn i t.d., skoro wpadnie do nich fala wędrowna o stromym czole. Przepięcia mogą zatem występować zarówno między przewodami linii elektrycznej lub na krańcach maszyn, przyrządów i t.d., jak między przewodem a ziemią i t.d.; albo też między punktami jednego i tego samego przewodu.

Przy projektowaniu więc urządzeń elektrycznych należy brać pod uwagę, że izolacja ich powinna znieść naprężenia pochodzące nie tylko od największego napięcia stale panującego w sieci, lecz również od chwilowych podskoków napięcia, czyli przepięć, pochodzących od różnych przyczyn wewnętrznych i zewnętrznych. Naogół przyjęto, że urządzenie musi znieść bez szkody podwójną wartość napięcia roboczego. Wobec tego, jako przepięcie uważamy napięcie przewyższające podwójne napięcie robocze.

Ponieważ przepięcia przejawiają się najczęściej w postaci fal wędrownych, przebiegających po przewodach linii elektrycznej, lub wpadających do uzwojeń różnych elementów urządzenia elektrycznego, zajmujemy się przede wszystkim przebiegami falowymi w liniach, przy czym będziemy mieli sposobność zaznajomienia się z najważniejszymi elementami ochrony przeciwprzepięciowej. Sprawa przepięć i zasad ochrony od nich będzie przedmiotem osobnej publikacji.

1. Określenia podstawowe.

Związek między wielkościami magnetycznymi i elektrycznymi w polu elektrycznym wyrażają, jak wiadomo, wzory*)

$$\int_1 \hat{H}.dl = \int \hat{J}.ds = \int \left[\gamma \hat{K} + \frac{\epsilon}{4\pi} \frac{\partial \hat{K}}{\partial t} \right].ds$$

oraz

$$\int_1 \hat{K}.dl = - \frac{\partial}{\partial t} \int \hat{B}.ds$$

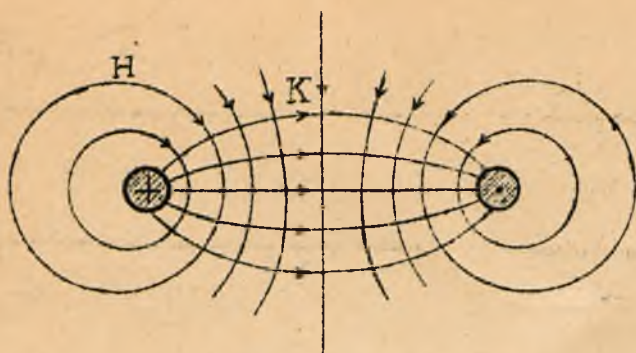
Tutaj oznacza: \hat{H} - natężenie pola magnetycznego, \hat{B} = jego indukcję, \hat{K} - natężenie pola elektrycznego, \hat{J} - gęstość prądu dielektrycznego, γ - przewodność właściwą, ϵ - przenikalność elektryczną, ds - element powierzchni prostopadły do kierunku pola, $\int \hat{H}.dl$ i $\int \hat{K}.dl$ - całki liniowe natężeń pola. Wzory te wyrażają, że między polem elektrycznym i magnetycznym istnieje ścisły związek. Skutkiem zmian strumienia magnetycznego powstaje strumień elektryczny, który powoduje ze swej strony powstawanie prądu przewodzenia i prądu przesunięcia płynącego przez dielektryk. Oba te prądy wytwarzają strumień magnetyczny. Zmiana jednego strumienia pociąga więc za sobą natychmiast zmianę drugiego. Z powyższego związku wynika, że wszelkie zmiany pola w środowisku mogą się odbywać tylko ze skończoną prędkością.

Zmiany te odbywają się w postaci fal elektromagnetycznych, rozchodzących się w przestrzeni otaczającej miejsce, gdzie powstaje przyczyna tych zmian, czyli zakłócenie. Jako taką przyczynę uważamy n.p. każdą zmianę prądu lub napięcia w obwodzie. Fala elektromagnetyczna związana jest z polem elektrycznym i magnetycznym. W dostatecznej odległości od miejsca powstania fali jej linie elektryczne i magnetyczne stoją prostopadle do kierunku rozchodzenia się fali, można ją tam przeto uważać za falę płaską.

Przypadek taki zachodzi z dużym przybliżeniem n.p. przy przewodach elektrycznych /Rys.1/. Linie elektryczne przebiegają od jednego

*) Por. L. Staniewicz. - Teoria prądów zmiennych.

przewodu do drugiego, linie magnetyczne zamykają się naokoło przewodów.



Rys. 1.

Wektory natężenia pola magnetycznego i elektrycznego stoją prostopadle do siebie i do kierunku rozchodzenia się fal, t.j. do przewodów. W takim przypadku przebieg linii polowych jest taki sam, jak w polu statycznym. Działanie więc

Pole elektromagnetyczne długiej linii.

tych pól można rozpatrywać, jak przy polach wolnozmiennych.

Takie uproszczenie można uczynić dla tej części przewodów, która jest dosyć oddalona od miejsca zakłócenia, t.j. powstania fali, gdzie przebiegi są inne. Przy tym nie uwzględnia się, że natężenie pola elektrycznego ma pewną składową wzdłuż osi przewodu i że wobec tego działanie magnetyczne tej składowej prądu przesunięcia nie jest uwzględnione. Rachunek wykazuje, że te uproszczenia są dopuszczalne, jeżeli prędkość zmian pola nie jest większa, niż to odpowiada częstotliwości 10^7 Hz, co zachodzi właśnie przy zwykłych zjawiskach wysokonapięciowych.

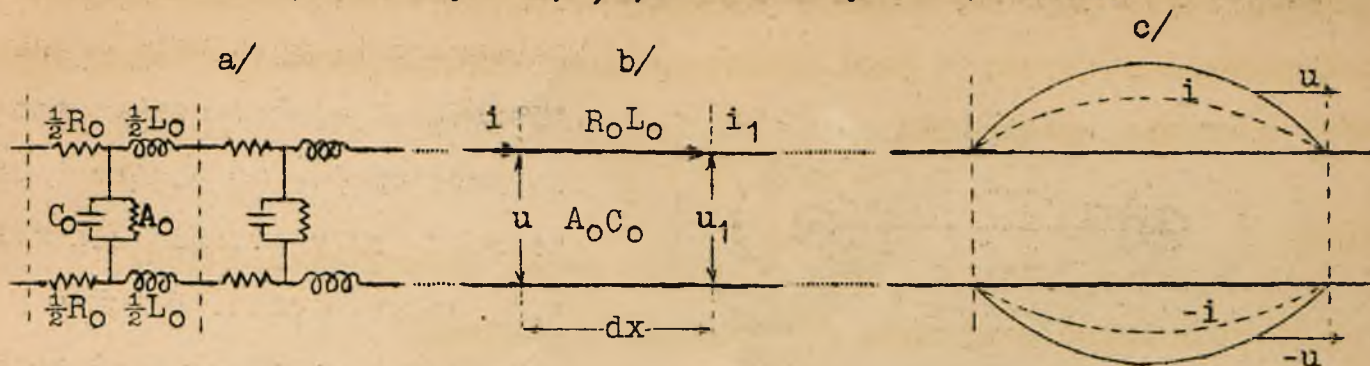
W dalszym ciągu zajmiemy się rozpatrywaniem tego rodzaju zjawisk ze względu na naprężenia występujące w układach izolacyjnych poddanych działaniu takich fal elektromagnetycznych. Przede wszystkim musimy przedstawić, w poglądowej formie, przebiegi fal wędrownych, które stanowią charakterystyczną postać przepięć w przeważającej liczbie przypadków. Pod tym względem trzymać się będziemy ujęcia wprowadzonego przez C.P. Steinmetza /1908/ i K.W. Wagnera /1908/, a dostosowanego do celów praktycznych przez R. Rüdemberga /1912/ *) .

a. Powstawanie fal.

Linia długa, n.p. dwuprzewodowa, przedstawia - jak wiadomo - ob-

*) C.P. Steinmetz: Electric discharges, waves and impulses, II wyd. Nowy York, 1914.
K.W. Wagner: Elektromagnetische Ausgleichsvorgänge in elektrischen Leitungen und Kabeln; Berlin, 1911.
R. Rüdemberg: Elektrische Schaltvorgänge, III wyd. Berlin, 1933.

wód elektryczny o stałych R, L, A, C rozłożonych /Rys.2a/*). Tutaj ozna-



Rys.2.

a. Element długiej linii; b. Napięcie i prądy w elemencie linii ;
c. Fala wędrowna napięcia /u/ i prądu /i/.

cza: R_0 - oporność, L_0 - indukcyjność, A_0 - upływność, C_0 - pojemność - odniesione do jednostki długości linii. Napięcia i prądy w takim elemencie przedstawione są na Rys.2b. Na podstawie znanych zależności można napisać

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = R_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t}$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = A_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t}$$

Każdej zmianie prądu lub napięcia w czasie odpowiada - jak z tego widać - zmiana napięcia lub prądu wzdłuż przewodu. Z powyższych równań można obliczyć u lub i w dowolnym punkcie linii i w dowolnej chwili, jeżeli będziemy mieli dostateczną liczbę dodatkowych danych, dotyczących wartości napięć i prądów w chwilach wiadomych i w miejscach określonych.

Jeżeli linia jest nieodkształcająca, t.zn. jeżeli $\frac{R_0}{L_0} = \frac{A_0}{C_0}$, co praktycznie zachodzi w liniach elektrycznych, to ogólne rozwiązania powyższych równań jest:

$$u = \left[f_1/x - vt/ + f_2/x + vt/ \right] e^{-\alpha t} \quad /1/$$

$$i = \left[f_1/x - vt/ - f_2/x + vt/ \right] \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot e^{-\alpha t}$$

gdzie: f_1 i f_2 stanowią, na ogół, dowolne funkcje odległości x i czasu t /Rys.2c/; $v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ jest prędkością z jaką rozchodzą się z jednego dowolnego punktu do drugiego te same wartości prądu i na-

* Por. L.Staniewicz - Teoria prądów zmiennych.

pięcia, czyli jest to prędkość rozchodzenia się po przewodach fal elektromagnetycznych; α jest współczynnikiem warunkującym zanikanie funkcji w czasie, przy czym

$$\alpha = \frac{1}{2} \left/ \frac{R}{L} + \frac{A}{C} \right/ \quad /2/$$

albo

$$\alpha = \frac{R}{L} \quad \text{- dla linii nieodkształcającej.}$$

Wobec tego można wyrażenia /1/ napisać w postaci:

$$u = \left[f_1/x - \frac{t}{\sqrt{LC}} + f_2/x + \frac{t}{\sqrt{LC}} \right] \cdot e^{-\frac{R}{L}t} \quad /1a/$$

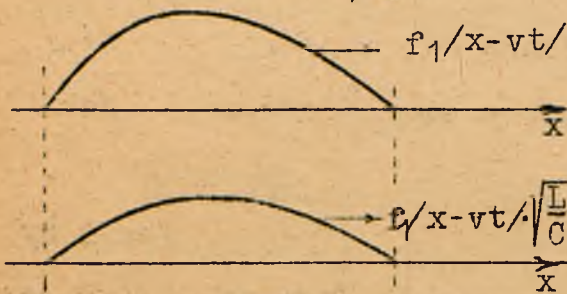
$$i = \left[f_1/x - \frac{t}{\sqrt{LC}} - f_2/x + \frac{t}{\sqrt{LC}} \right] \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$$

Napięcie, jakie powstaje skutkiem zakłócenia, można zatem przedstawić jako sumę dwóch fal rozchodzących się z tą samą prędkością, ale w kierunkach przeciwnych; prąd zaś - jako różnicę podobnych fal. Fale te podczas ruchu nie zmieniają kształtu, bo każdy punkt odpowiedniej funkcji przesuwa się z tą samą prędkością; występuje natomiast zmniejszenie ich rzędnych, w jednakowym stosunku z powodu tłumienia, a więc zanikania fali, według funkcji wykładniczej. Prędkość rozchodzenia się tych fal zależy od przenikalności środowiska: magnetycznej μ i elektrycznej ϵ :

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{c}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad /3/$$

gdzie c jest prędkością fal świetlnych $/3 \cdot 10^{10} \text{ cm/sek/}$.

Fale napięcia i prądu mają kształt podobny. Można łatwo udowodnić, że funkcja $f/x \pm \frac{t}{\sqrt{LC}}$ zachowuje wartość stałą, gdy $\frac{dx}{dt} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. Rys. 3 przedstawia obie fale f_1 biegnące w prawo. Rzędne ich różnią się od siebie czynnikiem $\sqrt{\frac{C}{L}}$ w ten sposób, że każdej rzędnej krzywej napięcia $/u/$ odpowiada rzędna krzywej prądu $/i/$ pomnożona przez $\sqrt{\frac{L}{C}} = Z$, którą nazywamy opornością falową. Podobnie otrzymujemy fale dla funkcji f_2 . Biegają one w stronę przeciwną niż f_1 $/+vt!/$; znaki ich są przeciwne $/+f_2$ i $-f_2!/$, kreślimy przeto $-f_2$ pod osią x ; oraz



Rys. 3.

Fale napięcia i prądu.

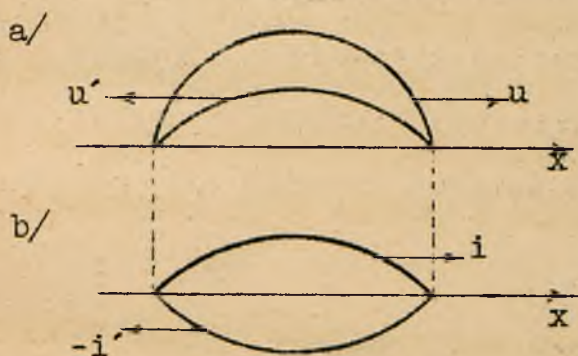
przyjmujemy, że u i i związane są znakiem -; może być więc zatem $u = -Zi$.

Mamy więc w ten sposób 2 fale: napięcia i prądu, których rzędne związane są ze sobą w postaci

$$u = \pm \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot i = \pm Zi \quad /4/$$

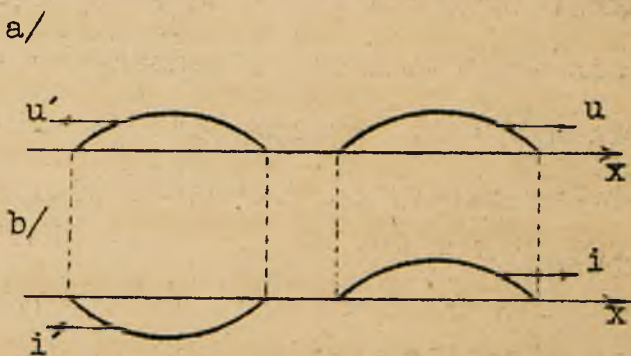
biegnące wspólnie wzdłuż przewodu z prędkością fal elektromagnetycznych, zależną od natury środowiska; dla przewodów napowietrznych przyjmujemy przy obliczeniach praktycznych $v = 3 \cdot 10^{10}$ cm/sek, dla kabli prędkość ta jest okragło o połowę mniejsza.

Jeżeli przyjmiemy, że para wielkości związana znakiem + przesuwa się w kierunku rosnących wielkości x /na rysunku w prawo/, a związanych znakiem - w przeciwnym /w lewo/*), to wyszedłszy z początkowego stanu zakłócenia, przedstawiciego na Rys.4, funkcje u i i zajmą po jakimś czasie położenie wskazane na Rys.5. Dla odróżnienia tych



Rys.4.

Fale wędrowne: a.-napięcia;
b.-prądu nałożone.



Rys.5.

Fale napięcia /a/ i
prądu /b/ rozdzielone.

par rzędnych oznaczać będziemy wielkości przesuujące się w lewo indeksami. Będziemy więc mieli, stosownie do wz./4/:

fala napięcia: $u = +Z \cdot i$ przesuwa się w prawo /4a/

fala napięcia: $u' = -Z \cdot i'$ przesuwa się w lewo /4b/

Podobnie przesuują się fale prądu:

$i = +\frac{u}{Z}$, oraz $i' = -\frac{u'}{Z}$ /4c i d/

Wielkości oznaczone znakiem "+" będziemy rysować /Rys.5/ u góry osi

*) Równie dobrze można przyjąć, że rzędne + przesuują się w lewo, a - w prawo; dla ujednostajnienia zatrzymamy pierwszy przypadek.

odciętych, wyobrażającej długi przewód elektryczny, a znakiem - u dołu osi. Strzałka umieszczona przy krzywej oznacza kierunek przesuwania się fali. Jeżeli fale nałożą się na siebie, to w pewnej chwili panuje na przewodzie

$$\text{napięcie} \quad U = u + u' \quad /5a/$$

$$\text{prąd} \quad I = i + i' \quad /5b/$$

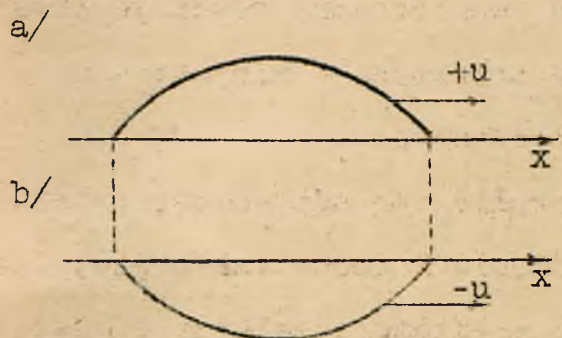
Każde zakłócenie stanu ustalonego napięcia lub prądu w liniach długich /lub podobnych układach o stałych rozłożonych/ powoduje powstawanie fal wędrownych, które zakłócenie to przenoszą - niejako - z miejsca, gdzie ono powstało - dalej po przewodach.

Zakłócenie stanu ustalonego przewodów długich odbywa się przeto zawsze w postaci dwóch fal wędrownych napięcia i dwóch fal prądu, biegnących po przewodach w przeciwne strony z prędkością zależną od natury środowiska, niezależnie od siebie i niezależnie od stanu przewodów. Z praw ogólnych dla stanów nieustalonych wynika, że fale te, jako obraz stanu przejściowego, nakładają się na istniejące na przewodzie napięcie czy prąd, tak że na przewodzie w rozpatrywanym miejscu i w danej chwili panuje napięcie zwiększone i płynie prąd zwiększony, co może wywołać dodatkowe naprężenia.

Przebiegi fal wędrownych odbywają się w czasie naogół niezmiernie krótkim; liczymy je w mikrosekundach. Czas ten jest więc bardzo krótki w porównaniu do zmian napięcia ustalonego w linii. Przy częstotliwości technicznej, n.p. 50 okr/sek, długość fali odpowiadającej temu wynosi 6000 km, t.zn., że dla linii n.p. 60 km długiej różnica napięć w tej samej chwili na początku i końcu linii wynosi mniej niż 1%. Można więc uważać, że normalne zmiany prądu czy napięcia w przewodzie odbywają się bardzo wolno w stosunku do fal wędrownych, że więc napięcie na o całej linii ma tę samą wartość w każdej chwili /stan nibyustalony/. Można zatem w takich przypadkach nie interesować się chwilowymi zmianami napięcia roboczego a zjawiska fal wędrownych rozpatrywać oddzielnie i potem nakładać na tamte. Jest więc również obojętne, czy

przewód jest pod napięciem i prądem, lub tylko pod napięciem, albo też wogóle bez napięcia. Rozpatrywać tu zatem będziemy tylko przebiegi fal wędrownych, nie interesując się naogół, co się dzieje poza tym na przewodach.

Fala napięcia znajdująca się na przewodzie /Rys.5/ przedstawia połowę napięcia panującego w danej chwili między punktami tego przewodu i ziemi, lub też drugiego przewodu, zależnie od tego, jak po-



Rys.6.

Fala wędrowna /u/ na jednym przewodzie i jej odpowiednik /-u/ na drugim.

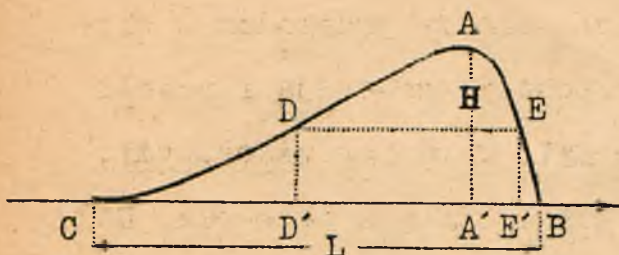
ze druga fala istnieje również. Można wykreślić także wzdłuż przewodu całe napięcie fali, lecz wówczas różnica rzędnych dla 2 punktów tego samego przewodu będzie podwójnym napięciem panującym między tymi punktami.

b. Kształt fali wędrownej.

Fale wędrowne zjawiające się w urządzeniu elektrycznym wywołują dodatkowo naprężenia jego elementów, w stosunku do naprężeń normalnie występujących. Z nauki o wytrzymałości dielektrycznej wiemy, iż wytrzymałość izolacji zależy od przebiegu i czasu trwania naprężenia. W odniesieniu do naprężeń pochodzących od fali wędrownej interesuje nas przeto nie tylko największa wartość jej napięcia, czyli wysokość fali, lecz również czas, w jakim ona osiąga tę wysokość, oraz czas trwania fali. Stosunki te uzmysławia Rys.7. Rzędna $H=AA'$ jest wysokością fali. Odcinek fali odpowiadający czasowi, w jakim ona osiąga

wstawiało zakłócenie. W każdym razie istnieć musi w tym drugim przewodzie, czy w ziemi, odpowiednik fali napięcia w przewodzie w postaci takiej samej fali, lecz o znaku przeciwnym $-u$, biegnącej z taką samą prędkością /Rys.6/. Przebiegi, jakim podlega ta druga fala, są takie same, jak w fali pierwszej. Wobec tego będziemy tutaj zajmować się naogół tylko jedną falą, przyjmując milcząco,

swą wysokość, nazywamy czołem fali /AB/; jest to więc przednia część fali rozpatrywana w kierunku jej ruchu. W podobny sposób rozróżniamy tył fali /AC/ rozumiejąc przez to część fali zwróconą w stronę przeciwną do kierunku ruchu fali. Odcinek $L=CB$ jest długością fali, $A'B$ - długością czoła, $A'C$ - długością tyłu.



Rys.7.

Elementy charakterystyczne fali wędrownej.

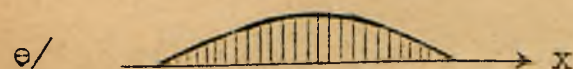
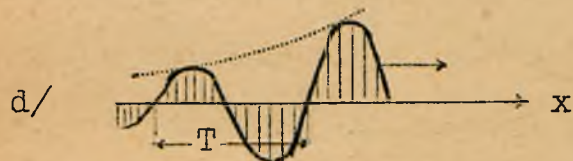
Przy falach o kształcie zbliżonym do Rys.7. interesuje nas więcej grzbiet fali, t.j. odcinek DAE, w którym rzędne fali przekraczają połowę jej wysokości $1/2 H$. Ze względów praktycznych, o których później będzie mowa, interesuje nas nie tyle długość grzbietu /DE/, ile odcinek $D'B$, który nazywamy

długością do półszczytu. Wysokość fali, długość czoła i długość do półszczytu są głównymi cechami charakterystycznymi fali wędrownej. Ważną cechą jest również stromość czoła, t.j. zmiana funkcji wzdłuż czoła: $s = \frac{df}{dx}$. Fale o tej samej wysokości, a mające czoła krótsze, są bardziej strome.

Kształt fali zależy od zjawiska wywołującego zakłócenie. Zależnie od przebiegu napięcia, czy prądu, powstają podczas tego zjawiska odpowiednie fale na przewodach połączonych z miejscem zakłócenia. Przebiegi łączeniowe /włączanie, zwarcie i t.d. przewodów/ powodują fale o bardzo prędkim wzroście napięcia /stromo czoło/ i praktycznie nieskończenie długim czasie zanikania, a więc o stałej wysokości grzbietu fali /równej n.p. napięciu roboczemu/. Wyładowania piorunowe, bezpośrednio w przewod dają fale o czole bardzo stromym, a o grzbiecie opadającym nieco wolniej. Fale wędrowne powstające jako następstwo drgań obwodów o stałych skupionych mają najczęściej postać drgań silnie tłumionych /zmijek/. Wszystkie powyższe przypadki powodują powstawanie fal wędrownych, których część początkowa, t.zn. zależna od warunków powstawania zakłóceń, ma znacznie szybszy przebieg, niż dalsza,

zależna od warunków istnienia fali. Znając stałe obwodu, w którym takie fale powstają, można określić analitycznie ich kształt. Inne znów fale mają kształt niedający się wyprowadzić ze zjawisk w obwodzie drgań; n.p.fale powstające skutkiem indukowania ładunków na przewodzie przez chmurę naładowaną i zwolnienia ich przez rozładowanie chmury bez doprowadzenia do wyładowania między przewodem a ziemią. Fale te mają przebieg łagodny, t.zn.powoli wzrastają i powoli opadają. W przeciwieństwie do nich tamte fale nazywamy uskokowymi, jeżeli wykazują duży spadek napięcia na małym odcinku przewodu. Najbardziej typową falą uskokową jest fala prostokątna, mająca czoło pionowe a grzbiet nieskończenie długi; pionowy przebieg czoła jest tylko teoretycznie możliwy.

Na Rys.8 przedstawione są fale typowe, najczęściej spotykane w technice wysokich napięć:



a. - fala prostokątna, nieskończenie długa; czas trwania czoła = 0; przypadek tylko teoretycznie możliwy.

b. - fala uskokowa, nieskończenie długa; czas trwania czoła fali - rzędu mikrosekundy.

c. - fala udarowa; czas trwania czoła fali rzędu mikrosekundy, czas grzbietu fali rzędu kilku, kilkudziesięciu mikrosekund.

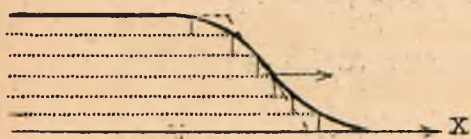
d. - fala udarowa drgająca; częstotliwość drgań kilkadziesiąt lub kilkaset tysięcy okresów na sekundę.

e. - fala łagodna, samotna, o nie-

Rys.8.
Typowe fale wędrowne.

określonym bliżej kształcie; długość fali rzędu kilkuset metrów lub kilku tysięcy metrów.

Fala typu b. może być zastąpiona falą prostokątną, jeżeli długość czoła fali jest bardzo znacznie mniejsza od grzbietu. Jeżeli zaś czoło jej jest stosunkowo długie, można ją rozłożyć na fale prostokątne według Rys.9;

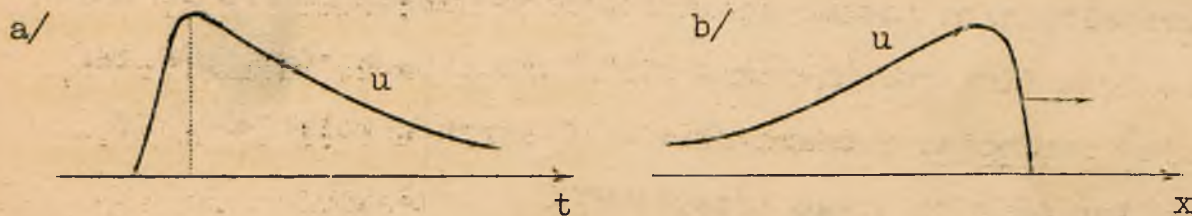


Rys.9.

Fala uskokowa rozłożona na fale prostokątne.

te składowe fale można rozpatrywać niezależnie, wynik zaś otrzymuje się przez ich nałożenie. Można ją również zastąpić falą trójkątną, przedstawioną linią kreskowaną na Rys.9, która jest łatwiej dostępna do traktowania analitycznego. Również i fale o innym kształcie mogą być odpowiednio rozłożone na fale składowe. Z tego względu przyjmujemy falę prostokątną jako podstawową przy rozważaniu przebiegów fal wędrownych.

Najważniejsze znaczenie w technice wysokich napięć ma fala udarowa /typ c/, gdyż taki właśnie przebieg mają fale na przewodach, będące następstwem wyładowań piorunowych. Kształt fali odpowiada, jak wiadomo *) , przebiegowi aperiodycznemu w obwodzie drgań /o stałych skupionych/ /Rys.10a/. Na przewodach przyłączonych do tego obwodu zjawia się fala, której przebieg w przestrzeni można przedstawić w takiej



Rys.10.

- a. Przebieg napięcia w obwodzie drgań /aperiodyczny/.
- b. Fala wędrowna, temu odpowiadająca, na przewodach przyłączonych od obwodu.

samej postaci, jeżeli przyjmie się odpowiednią skalę odciętych przy

*) Por.K.Drewnowski: Wytrzymałość dielektryczna. Rozdz.I, 3b.

uwzględnieniu, że $x = vt$. Przebieg napięcia fali udarowej /w czasie/ można przedstawić w postaci różnicy 2 funkcji

$$u = A/e^{-at} - e^{-bt} /6/$$

gdzie A, a i b są stałymi odpowiadającymi stałym obwodu drgań *) ; A odpowiada napięciu początkowemu, a - stałej czasu pojemnościowej, warunkującej zanikanie napięcia, a więc tutaj - przebieg tyłu fali, b - stałej czasu indukcyjnej, warunkującej wzrost napięcia, a więc tutaj - przebieg czoła fali. Zwykle $b \gg a$, tak że tył fali jest na ogół niezależny od czoła fali wtedy

$$u = A \cdot e^{-at}$$

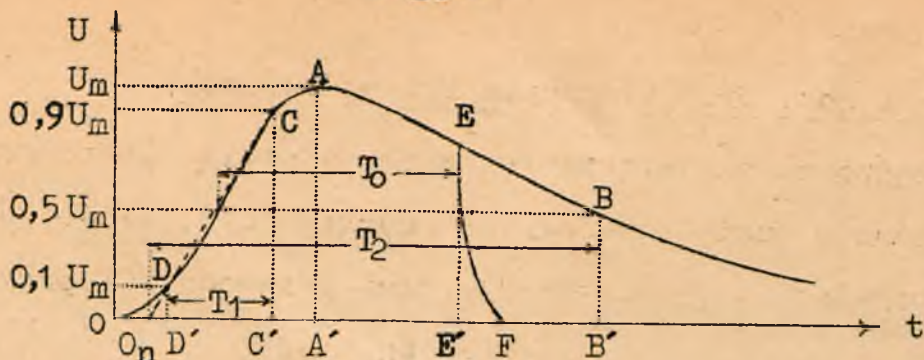
Wzór /6/ można zastosować także do innych typowych fal, przez dobór odpowiednich parametrów A, a i b. N.p. dla fali prostokątnej będzie $a=0$, $b=\infty$, $A=1$, - jest to przypadek fali łączeniowej ładującej przewód, o napięciu $u=U$ i czasie włączania nieskończenie krótkim. Przez powiększanie stałej a czoło fali się wydłuża, przez zmniejszenie b wydłuża się tył fali. Dla danego czasu trwania czoła i grzbietu fali, oraz dla założonej wysokości fali $/A=U_{\max}/$ można obliczyć wyrażenie charakterystyczne dla danej fali, a więc według wz. /6/ **).

Zjawisko /w czasie/, którego następstwem jest fala udarowa /w przestrzeni/ nazywamy udarem. Ze względu na szczególne znaczenie jakie mają te zjawiska przy badaniu wytrzymałości sprzętu wysokonapięciowego, kształt udaru został ujednostajniony międzynarodowo. Międzynarodowa Komisja Elektrotechniczna /CEI/ ustaliła w 1939 r. t.zw. udar normalny napięcia. Stowarzyszenie Elektryków Polskich /SEP/ wprowadziło ten udar do swych przepisów***).

*) Por. K. Drewnowski: Wytrzymałość dielektryczna. Rozdz. I.3b.

***) Por. L.V. Bewley: Traveling Waves on Transmission Lines, 1933, str.23.

****) CEI. Publik. Nr.60/1938.
SEP. PNE-81/1939.



Rys. 11.

Udar normalny.

Cechy charakterystyczne udaru.

- Początek udaru - O .
- Początek udaru nominalny - O_n /wyznaczony tak, aby $1,25 \cdot O_n C' = OA'$
- Szczyt udaru - A .
- Czoło udaru - OA.
- Grzbiet udaru - AB.
- Wartość szczytowa udaru / U_m w kV/ - AA'.
- Długość czoła / T_1 w μsek / - OA'.
- Długość czoła nominalna $T_1 = 1,25T'$ w μsek .
- Długość do półszczytu / T_2 w μsek / - OB'.
- Długość do półszczytu nominalna / T_2 w μsek / - $O_n B'$.
- Stromość czoła w danym punkcie $s = \frac{du}{dt}$ w kV/ μsek .
- Stromość czoła nominalna = stromość prostej $O_n C'$ w kV/ μsek .
- Udarowe napięcie przeskoku lub przebicia = wartość szczytowa udaru w kV, powodującego przeskok lub przebicie n.p. w p.E.
- Spółczynnik udaru = stosunek udarowego napięcia przeskoku do wartości szczytowej napięcia zmiennego o częstotliwości technicznej $\beta = U_o / U_n$.
- Opóźnienie przeskoku - czas T_0 w μsek .

Udar określa się stosunkiem czasów T_1 i T_2 . Jako udar normalny przyjęto udar o czole $1 \mu\text{sek}$ i długości do półszczytu $50 \mu\text{sek}$; znamię takiego udaru: $1/50$. Jeżeli potrzebny jest udar krótszy, to zaleca się $1/5$. W Ameryce stosuje się udary $1,5/40$ i $1/5$ według nieco odmiennych określeń od CEI; na ogół te udary są jednak zgodne z udarami CEI. Wytrzymałość udarowa zależy w dużym stopniu od biegunowości fali udarowej. Wobec tego należy zawsze podawać, z jaką falą się ma do czynienia: dodatnią czy ujemną.

c/ Energia i moc, oraz tłumienie fal wędrownych.

Fala wędrowna zawiera pewien zasób energii elektrycznej i magnetycznej, która w sumie przedstawia energię fali. Ilość energii, odpowiadająca pojemności jednostki długości przewodu /C/ przy napięciu u:

$$w_e = \frac{1}{2} C_0 u^2 ,$$

a odpowiadająca podobnej indukcyjności L_0 i prądowi i:

$$w_m = \frac{1}{2} L_0 i^2 .$$

Ponieważ

$$\frac{L_0}{C_0} = Z^2 = \frac{u^2}{i^2} ,$$

przeto po podstawieniu:

$$\frac{1}{2} C_0 u^2 = \frac{1}{2} L_0 i^2 ,$$

czyli

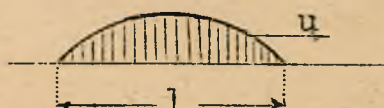
$$w_e = w_m ;$$

energia elektryczna i magnetyczna fali są jednakowe. Wobec tego cała energia, jaką przedstawia długość fali,

$$w = C_0 u^2 = L_0 i^2 .$$

Jeżeli długość fali jest l , to całą energię fali otrzymamy, całkując w granicach obszaru krzywej /Rys.12/

$$W = \int w \cdot dl = C_0 \int u^2 \cdot dl = L_0 \int i^2 \cdot dl \quad /7/$$



Rys.12.

Ładunek fali wędrownej.

Energię fali możemy praktycznie przedstawić jako energię ładunku, znajdującego się na odcinku przewodu, zajęтым przez fale, a rozłożonego w sposób odpowiadający kształtowi fali /Rys.12/. Powierzchnia obszaru fali napięcia lub prądu, podniesionej

do kwadratu, przedstawia zatem, w odpowiedniej skali, jej energię.

Ładunek przesuwa się przez przekrój przewodu z prędkością v . Odpowiada temu moc fali jako iloczyn energii i prędkości. Moc przepływająca przez pewien przekrój przewodu, gdzie gęstość energii wynosi

$$w = \frac{dW}{dl} :$$

$$p = w \cdot v = C_0 u^2 \cdot \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} = \frac{u^2}{Z} \quad /8a/$$

albo
$$p = L_0 i^2 \cdot \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} = Zi^2 \quad /8b/$$

Moc fali zależy zatem także od oporności falowej. Dla przewodów napowietrznych jest więc przy tym samym napięciu znacznie mniejsza, niż dla kabli. Przy wysokich napięciach moc fal może osiągnąć duże wartości.

Przykład. Fala napięcia na przewodzie napowietrznym o oporności falowej $Z=600 \Omega$ przedstawia przy napięciu $U=60$ kV, prąd $I = \frac{60000}{600} = 100$ A, a moc $P = \frac{60000^2}{600 \cdot 10^3} = 6000$ kW, a więc bardzo dużo. Jeżeli fala jest prostokątna i zajmuje długość: jeden km, to jej energia $W = P \cdot t = \frac{P \cdot l}{v} = \frac{6000 \cdot 10^3 \cdot 10^5}{3 \cdot 10^{10}} = 20$ Wsek, a więc stosunkowo bardzo mało. Czas przejścia przez przekrój przewodu całej fali $t = \frac{l}{v} = \frac{10^5 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^{10}} = 3,3$ μ sek. Działanie więc tak dużych mocy jest stosunkowo nieznaczne, bo w każdym miejscu trwa tylko bardzo krótki czas.

Fale wędrowne biegnące po przewodach doznają tłumienia z powodu oporności i upływności przewodów, które powodują straty energii, oraz z powodu ulotności, jeżeli ta występuje.

Strata mocy w elemencie dl przewodu o oporności R_0 i upływności

A_0
$$dp = /R_0 i^2 + A_0 u^2/. dl$$

ponieważ $u^2 = Z^2 \cdot i^2$ przeto $dp = /R_0 + A_0 Z^2/ i^2 dl$

Ta strata mocy musi być równa zmniejszeniu mocy całkowitej, jaką przedstawia element przewodu: $p = Z \cdot i^2$; a więc

$$-dp = - 2Zi \cdot di$$

Z obu ostatnich równań

$$\frac{di}{i} = - \frac{1}{2} \cdot \frac{R_0}{Z} + A_0 Z / \cdot dl$$

Po scałkowaniu

$$i = i_0 e^{-\alpha l}$$

gdzie i_0 przedstawia wartość początkową prądu, a $\alpha = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_0}{Z} + A_0 Z /$.

W podobny sposób dostaniemy napięcie

$$u = u_0 e^{-\alpha l}$$

Ogólnie więc możemy napisać

$$\frac{u}{u_0} = \frac{i}{i_0} = e^{-\frac{1}{2} \cdot \frac{R_0}{Z} + A_0 Z / l}$$

Tutaj α przedstawia współczynnik tłumienia fal wędrownych przy ich przebieganiu po przewodach. Przy stałych wartościach R , A i Z tłumienie zależy tylko od przebiegniętej drogi. Po przebyciu więc pewnej drogi rzędne fali napięcia i prądu maleją według funkcji wykładniczej, czoło fali staje się niższe, stromość jego się zmniejsza, zasadniczy jednak kształt fali pozostaje ten sam. Powyższe stałe nie mają zatem wpływu na kształt fali, lecz tylko na jej wielkość.

Zamiast długości l można do powyższych wzorów podstawić czas $t = \frac{l}{v}$, wtedy $l = vt = \frac{t}{\sqrt{LC}}$.

A zatem
$$\frac{u}{u_0} = \frac{i}{i_0} = e^{-\beta t} = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{R_0}{L_0} + \frac{A_0}{C_0} \right) t} \quad /10/$$

gdzie β jest znanym czynnikiem tłumienia w czasie.

Wzory powyższe wskazują, że tłumienie fal wędrownych zależy przede wszystkim od oporności i upływności linii. Przy napięciach niższych upływność nie gra dużej roli u przewodów napowietrznych, natomiast gra większą rolę u kabli. Skoro jednak wystąpi zjawisko ulotu, warunki się zmieniają i ulot powiększający upływność, określa tu wielkość tłumienia; jest o tym mowa na innym miejscu.

2. Przebiegi falowe w obwodach o stałych rozłożonych.

Fala wędrowna, jak długo przebiega po przewodach o tej samej oporności falowej, nie zmienia kształtu, lecz tylko wielkość wskutek tłumienia. Skoro jednak trafi na inną oporność falową, musi doznać zmiany, podobnie jak fale innego rodzaju przy przejściu z jednego środowiska do drugiego. Rozpatrzmy naprzód przypadki krańcowe, kiedy fala uderza o kraniec przewodu otwarty $/Z = \infty/$, lub zwarty $/Z = 0/$ następnie przejście fali z jednego przewodu do drugiego o innej oporności falowej i wreszcie przypadek odbijania się fali na obu krańcach przewodu.

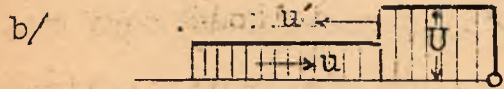
a/. Odbicie fali na krańcu przewodu.

Po przewodzie przesuwają się fala u i i , nieskończenie długa /fa-

la zasilana, Rys.13/, której część przednia jest widoczna na rysunku; dla uproszczenia zagadnienia przyjmujemy, że fala ta jest prostokątna.



Jeżeli kraniec przewodu jest otwarty, to spotyka ona tam oporność $Z=\infty$, nie może więc dalej płynąć. Prąd staje się tam równy zeru



$$I = i + i' = 0$$

skąd $i = -i'$ /11/

Może się to stać więc, jeżeli zjawi się tam prąd o tej samej wielkości, lecz przeciwnego znaku /i'/, który będzie znosić prąd płynący z falą /i/. Tym prądom odpowiadają napięcia

Rys.13.

Odbicie fali na krańcu otwartym.

$$Z_i = -Z_i'$$

czyli

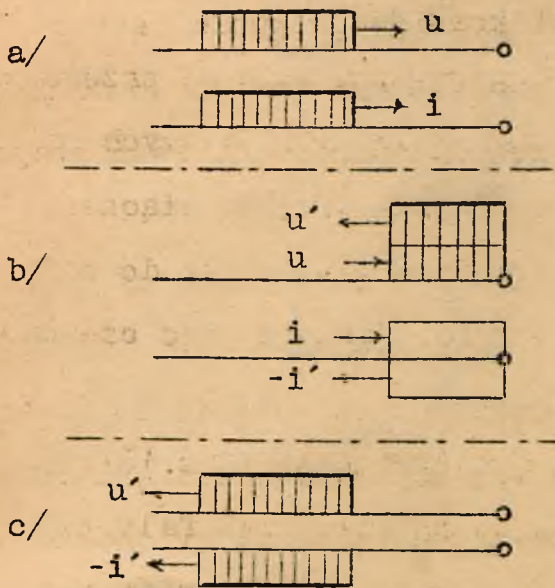
$$u = u'$$

/12/

Prąd przy odbiciu zmienia znak, ponieważ ładunek tworzący falę zmienia kierunek ruchu, natomiast biegunowość tego ładunku nie ulega zmianie, a zatem napięcie odbite będzie tego samego znaku co padające; u' nakłada się więc na u , istniejące na przewodzie, w postaci fali biegnącej wstecz. W rezultacie nastąpi odbicie fali od otwartego krańca przewodu, skutkiem czego powstaną fale prądu i napięcia płynące wstecz. Na przewodzie zapanuje stopniowo stan określony prądem $I=0$ i napięciem $U=2u$.- Na otwartym końcu przewodu następuje więc odbicie fali napięcia przy zdwojeniu jej amplitudy, a znikanie fali prądu.

W przypadku fali o ograniczonej długości /fala samotna/ zjawisko odbicia fali trwa tak długo, aż cała fala dojdzie do końca przewodu. Przez ten czas fala napięcia odbita nakłada się na razie na falę padającą, a następnie biegnie z powrotem jako fala o tym samym znaku; fala prądu zaś stopniowo znika, a na jej miejsce zjawia się fala prądu odbitego o znaku przeciwnym. Przebieg ten w powyższych 3 stadiach /a., b., c./ przedstawia Rys.14. Na otwartym końcu przewodu fala na-

pięcia odbija się więc przy zachowaniu znaku, a fala prądu - przy zmianie znaku.



Rys. 14.

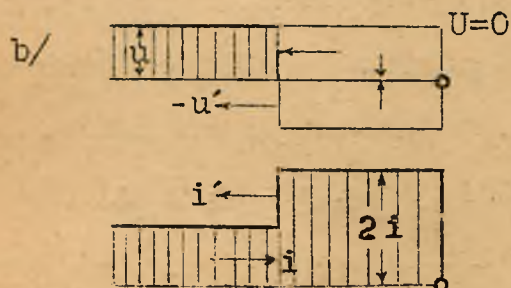
Odbicie fali samotnej na krańcu otwartym.

Zjawia się więc fala o przeciwnym znaku, znosząca napięcie fali padającej. Napięciom u i u' odpowiadają prądy $\frac{u}{Z} = \frac{u'}{Z}$

czyli

$$i = i' \quad /14/$$

Powstaje więc odbita fala prądu nakładająca się na padającą. Na przewodzie nastaje przeto stopniowo stan charakteryzujący się przez $U=0, I=2i$. - Na zwartym końcu przewodu zachodzi zanikanie napięcia, a zdwojenie prądu.



Rys. 15.

Odbicie fali na krańcu zwartym.

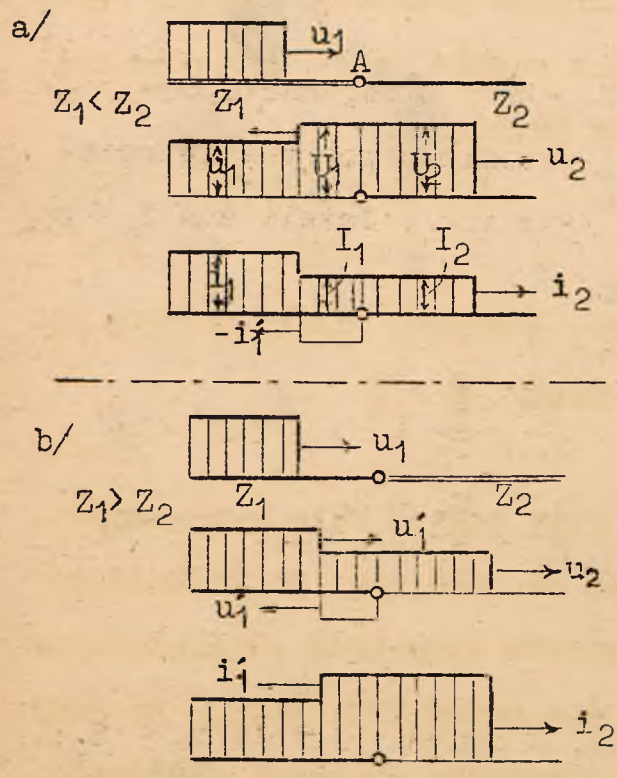
W podobny sposób przedstawić można odbicie fali samotnej. Następuje wtedy odbicie fali napięcia przy zmianie znaku, a fali prądu przy znaku takim samym.

Uak widać z powyższego, przebiegi odbicia fali na krańcu otwartym lub zwartym są podobne; jedynie tylko napięcie i prąd zamieniają swą rolę. Przypadek taki zachodzi n.p.

przy włączaniu do źródła napięcia przewodu otwartego, czy też zwarte-
go na końcu.

b/. Przejście fali przez miejsce złączenia przewodów.

Fala wędrowna, napotkawszy na zmianę oporności falowej przewodu, doznaje pewnych zmian, zależnych od stosunku oporności falowych odcinka skąd nadbiega i odcinka, na który trafia. W miejscu złączenia tych odcinków wystąpić muszą przebiegi pośrednie w stosunku do warunków krańcowych, opisanych w poprzednim ustępie. Nastąpi więc częściowe odbicie fali, a częściowe przepuszczenie.



Rys.16.

Przejście fali przez miejsce złączenia dwóch przewodów / Z_1 i Z_2 /:

a/ $Z_1 < Z_2$; b/ $Z_1 > Z_2$.

Wyobraźmy sobie /Rys.16/ 2 przewody o opornościach falowych Z_1 i Z_2 , złączone bezpośrednio ze sobą w punkcie A. Z przewodu Z_1 nadbiega fala u_1 i dochodzi do punktu A, gdzie napotyka na nagłą zmianę oporności falowej. Następuje tam częściowe przepuszczenie fali, a częściowe odbicie. Do przewodu Z_2 wpływa więc jedna fala, a do przewodu Z_1 inna. W przewodzie Z_2 będzie możliwą tylko jedna fala biegnąca w przód / u_2 , i_2 /, w przewodzie zaś Z_1 dwie fale: biegnąca w przód i biegnąca wstecz / u_1 , i_1 /, w miejscu złączenia przewodów musi mieć

napięcie oraz prąd wartość taką samą po obu stronach punktu A:

$$U_1 = U_2; \quad \text{oraz} \quad I_1 = I_2$$

Podstawiając wartości: $U_1 = u_1 + u_1'$; $U_2 = u_2$

otrzymamy

$$u_1 + u_1' = u_2; \quad \text{oraz} \quad i_1 + i_1' = i_2$$

Wyrazimy prądy przez napięcia:

$$\frac{u_1}{Z_1} - \frac{u_1'}{Z_1} = \frac{u_2}{Z_2},$$

$$u_1 - u_1' = \frac{Z_1}{Z_2} u_2,$$

skąd po wyeliminowaniu u_1' otrzymamy napięcie fali przepuszczonej, czyli krótko

$$\text{- napięcie przepuszczone} \quad u_2 = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} u_1 \quad /15/$$

a napięcie fali odbitej, czyli krótko

$$\text{- napięcie odbite} \quad u_1' = u_2 - u_1 = -\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} u_1 \quad /16/$$

Stosunek tych fal

$$\frac{u_1'}{u_2} = \frac{Z_2 - Z_1}{2Z_2}$$

Fala odbita $/u'/$ jest dodatnia, jeżeli $Z_2 > Z_1$; wtedy następuje podniesienie napięcia w punkcie złączenia i stopniowo pokrywanie przewodów Z_1 i Z_2 tym zwiększonym napięciem /Rys.16a/. Jeżeli zaś $Z_2 < Z_1$, to następuje obniżenie napięcia /Rys.16b/.

Odpowiednio do powyższego będą prądy:

$$\text{prąd przepuszczony} \quad i_2 = \frac{u_2}{Z_2} = \frac{2u_1}{Z_1 + Z_2} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} i_1; \quad /17/$$

$$\text{prąd odbity} \quad i_1' = -\frac{u_1'}{Z_1} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot \frac{u_1}{Z_1} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} i_1; \quad /18/$$

Stosunek ich

$$\frac{i_1'}{i_2} = \frac{Z_1 - Z_2}{2Z_1}$$

Prąd odbity jest dodatni, jeżeli $Z_1 > Z_2$, a ujemny, jeżeli $Z_1 < Z_2$; a więc odwrotnie, jak napięcie.

Naogół można ustalić następujące prawo przejścia fal wędrownych przez punkt złączenia przewodów o różnych opornościach falowych:

Przy przejściu fali do przewodu o oporności większej następuje podniesienie fali napięcia, a obniżenie fali prądu. Jeżeli zaś przewód, do którego fala wpada, ma oporność mniejszą, to napięcie się obniża, a prąd powiększa. Temu towarzyszą fale odbite w miejscu złączenia przewodów, które, pod względem wielkości, zachowują się odwrotnie jak fale przepuszczone. Jest to zjawisko nader ważne, tłumaczące

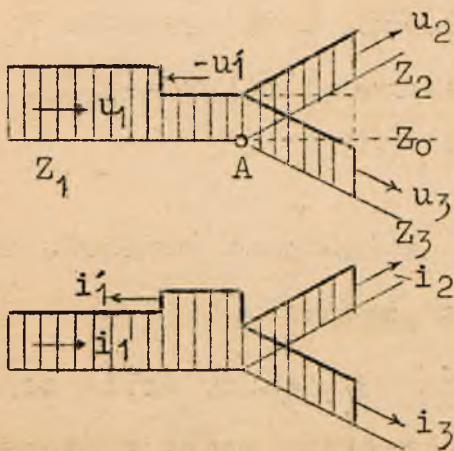
przypadki podnoszenia się napięcia w punktach złączenia przewodów o opornościach falowych, dużo od siebie się różniących.

Przypadki krańcowe będą dla $Z_2 = \infty$ /przewód otwarty/, wtedy następuje zdwojenie napięcia a zanikanie prądu, oraz dla $Z_1 = 0$ /przewód zwarty/, wtedy następuje zdwojenie prądu a zanikanie napięcia. Największa więc możliwa wartość podniesienia się napięcia w przypadku odbicia fali jest 2 /nie uwzględniając innych zjawisk postronnych, które mogą jeszcze więcej podnieść napięcie/.

c/. Rozdział fali w punkcie węzłowym.

Fale, jako przepływ ładunków elektrycznych, podlegają podobnym prawom, jak prąd elektryczny w razie napotkania na swej drodze miejsca rozgałęzienia przewodów. Stosownie do prawa Kirchhoffa następuje rozdział fali prądu odpowiednio do oporności falowych przewodów.

Fala napięcia / u /, uderzając o punkt węzłowy przy wyjściu z przewodu o oporności Z_1 , trafia tam na zmianę oporności falowej /Rys.17/.



Rys.17.

Rozdział fali wędrownej.

Przewody Z_2 i Z_3 połączone równolegle przedstawiają oporność wypadkową Z_0 . Dla uproszczenia przyjmiemy, że $Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z$. Wtedy $Z_0 = \frac{1}{2} Z$. W punkcie węzłowym równowaga napięć i prądów wymaga, aby $U_1 = U_2 = U_3$ oraz $I_1 = I_2 + I_3$. Ponieważ $U_1 = u_1 + u_1'$; $U_2 = u_2$; $U_3 = u_3$; oraz $I_1 = i_1 + i_1'$; $I_2 = i_2$; $I_3 = i_3$ przeto po podstawieniu otrzymamy:

$$u_1 + u_1' = u_2 = u_3$$

$$\text{oraz } i_1 + i_1' = i_2 + i_3$$

Ponieważ przewody Z_2 i Z_3 przedstawiliśmy jako jeden przewód o oporności wypadkowej $Z_0 = \frac{1}{2} Z$, przeto układ można traktować jako dwa przewody Z i Z_0 złączone ze sobą bezpośrednio. Na podstawie poprzednio znalezionych zależności będziemy mieli, oznaczwszy odpowiednio zastępcze napięcia i prądy u_0 i i_0 :

$$u_1 + u_1' = u_0 ;$$

$$i_1 + i_1' = i_0 ;$$

Stąd otrzymamy napięcia:

$$u_0 = \frac{2Z_0}{Z_1 + Z_0} \cdot u_1 = \frac{2}{3} u_1$$

Ponieważ $u_0 = u_2 = u_3$, przeto

$$u_2 = u_3 = \frac{2}{3} u_1 \quad /19/$$

oraz

$$u'_1 = -\frac{1}{3} u_1 \quad /20/$$

W punkcie węzłowym nastąpi więc obniżenie napięcia; do przewodów Z_2 i Z_3 wpływają fale napięcia o zmniejszonej wielkości, a do przewodu Z_1 wpływa fala obniżająca napięcie.

Podobnie otrzymamy prądy:

$$i_0 = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_0} i_1 = \frac{1}{3} \cdot i_1$$

Ponieważ

$$i_0 = i_2 + i_3 = \frac{u_2}{Z_2} + \frac{u_3}{Z_3}; \quad u_2 = u_3; \quad Z_2 = Z_3;$$

przeto

$$i_2 = i_3 = \frac{2}{3} i_1 \quad /21/$$

oraz

$$i'_1 = +\frac{1}{3} i_1 \quad /22/$$

W punkcie węzłowym następuje zmniejszenie prądu, do przewodów Z_2 i Z_3 wpływają fale prądu o zmniejszonej wielkości, a do przewodu Z_1 wpływa fala prądu odbita nakładająca się na prąd tam istniejący.

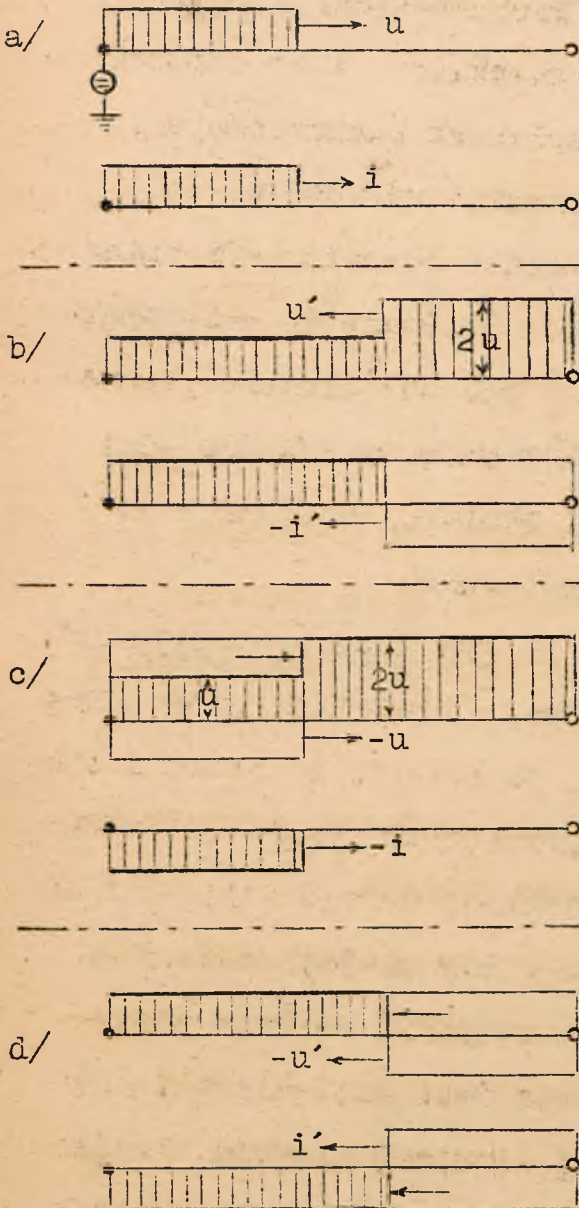
d/. Oscylacje fal wędrownych.

Zjawisko odbijania się fal wędrownych na krańcach przewodu ma charakter periodyczny, zależny od stanu tych krańców.

α. Jeden kraniec otwarty, drugi zwarty. - Wyobraźmy sobie najpierw przypadek, kiedy przewód Z , na końcu otwarty, zostaje włączony do źródła o stałym napięciu i bardzo dużej wydajności. Takie źródło można uważać jako mające oporność falową równą zeru, a więc jako przedstawiające zwarty początek przewodu.

Rys.18. przedstawia przebiegi fal wędrownych w 4 kolejnych fazach: a/ Fale napięcia u i prądu i ładują przewód, b/ Na końcu przewodu fala u odbija się i nakłada na istniejące napięcie jako fala u' ; prąd i znika skutkiem powstania fali $-i'$. c/ Na źródle /koniec zwar-

ty/ u' odbija się zmieniając znak i jako fala ładująca $-u$ znosi połowę napięcia panującego na przewodzie $/2u/$; prąd $-i'$ odbija się z tym samym znakiem. d/ Na końcu przewodu $-u$ odbija się z tym samym znakiem i jako fala wyładowująca $-u'$ znosi napięcie $+u$; $-i$ odbija się ze znakiem przeciwnym i jako i' znosi prąd i . Skoro te fale dobiegną do źródła następuje stan pierwotny, jak na początku fazy a/.



Rys.18.

Przebiegi falowe na przewodzie o jednym krańcu zwartym, a drugim otwartym.

Jak widać przebiegi przybierają taki sam stan okresowo po 4-krotnym przebiegnięciu przewodu, czyli po czasie $T=4l \sqrt{L_0 C_0}$. Zjawisko powtarza się więc z częstotliwością zależną od długości linii:

$$f = \frac{1}{4l \sqrt{L_0 C_0}} \quad /23/$$

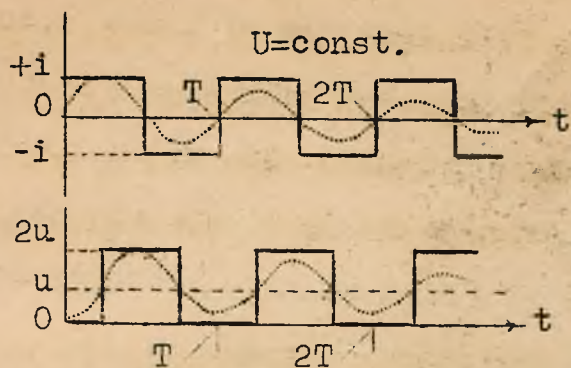
Nazywamy ją częstotliwością fal wędrownych, albo częstotliwością drgań własnych linii, gdy wtedy dana linia wykonywa drgania jako całość.

Przebieg /w czasie/ zmian napięcia i prądu na początku i na końcu przewodu przedstawia Rys.19. Na początku przewodu, t.j. na źródle /Rys.19a/ napięcie ma zawsze stałą wartość $U=const$, a prąd waha się od $+i$ do $-i$. Na końcu zaś napięcie waha się od 0 do $2u$; prąd zaś ma stale wartość zero, $I = 0$.

Przebiegi powyższe były wy-

prowadzone dla przypadku, kiedy tłumienia w przewodzie nie ma. W rze-

czywistości występuje ono i powoduje, że napięcie stopniowo się

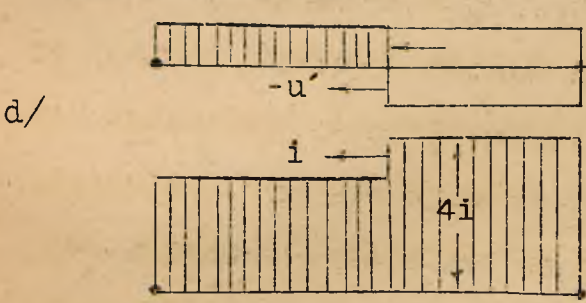
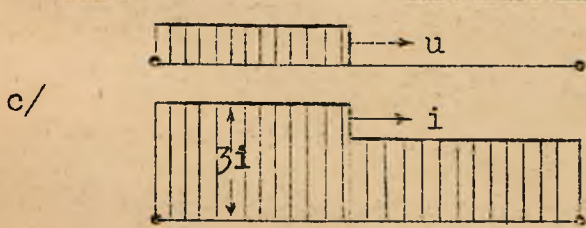
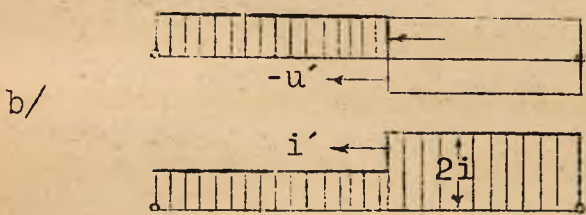
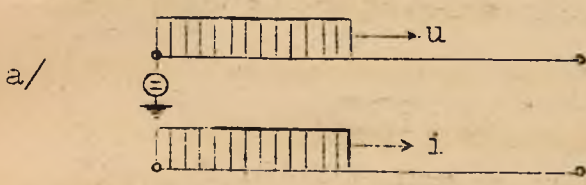


Rys. 19.

Drgania ćwierćfalowe przewodu.

wistości linia wykonywa więc nie drgania prostokątne, lecz sinusoidalne z powodu tłumienia zwiększonego dla wyższych harmonicznych.

Tylko dla bardzo krótkich odcinków /kilkadziesiąt metrów/ można



Rys. 20.

Przebiegi falowe na przewodzie zwartym na obu krańcach.

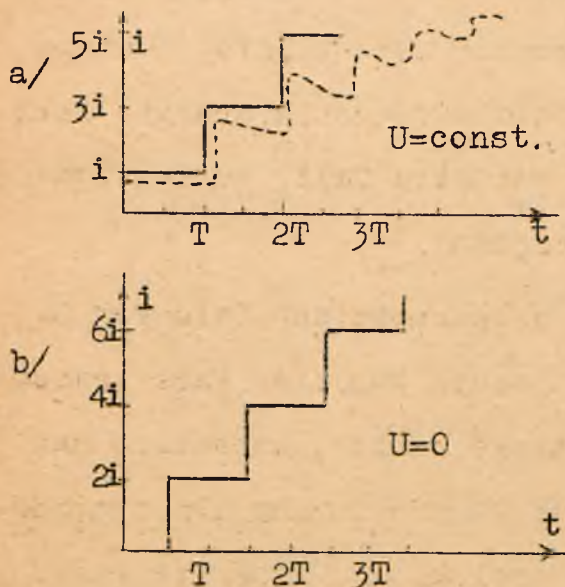
zmniejsza, wahając stale około wartości u , aż wreszcie osiągnie tę wartość $b/$; prąd zaś stale zmniejsza się dążąc do zera $a/$. Przewód jest wtedy naładowany. Przedstawione to jest na Rys. 19 za pomocą kres kropkowanych. W rzeczy-

stwierdzić /oscylograficznie/ drgania zbliżone do prostokątnych. Ponieważ długość przewodu odpowiada tu $1/4$ długości fali, mówimy, że drgania są ćwierćfalowe.

β . Oba krańce otwarte lub zwarte. - Wyobraźmy sobie /Rys. 20/, że przewód na końcu zostaje przyłączony nagle do źródła o wielkiej wydajności; jest on więc wtedy niejako zwarty na obu krańcach. Fala $a/$ przedstawia fale napięcia u i prądu i ładujące przewód. $b/$ Na zwartym końcu przewodu następuje odbicie fali napięcia u przy zmianie znaku, fala $-u'$ wyładowywa przewód; i' nakła-

da się na i ; prąd się więc podwaja. c/ Na źródle prądu następuje znowu odbicie fali napięcia $-u'$ przy zmianie znaku, powstaje fala u ładująca przewód; prąd odbija się z tym samym znakiem i nakłada na $2i$, powiększając go do wartości $3i$. d/ Na końcu przewodu mamy takie same przebiegi, jak przy końcu fazy b/; w rezultacie napięcie znika, a prąd powiększa się do $4i$, i t.d.

Przebiegi powtarzają się więc po dwukrotnym przebiegnięciu przewodu, t.j. po czasie $T=2l\sqrt{L_0C_0}$ t.j. z częstotliwością $f=\frac{1}{2l\sqrt{L_0C_0}}$, a więc dwa razy większą, niż w przypadku, gdy jeden kraniec przewodu jest otwarty a drugi zwarty. Przebieg napięcia i prądu w czasie na końcach przewodu przedstawia Rys.21. Na źródle /Rys.a/ następuje wzrost prądu



Rys.21.

Przebieg prądu:

a/ na źródle,

b/ na zwartym końcu przewodu.

du stopniami o wartości $2i$ od i do ∞ /teoretycznie/. W rzeczywistości oporności obwodu prąd ten ograniczą, a tłumienie spowoduje zmniejszenie się tych skoków /linia kreskowana/. Napięcie zaś jest zawsze stałe, $U=const.$ Rys.21b przedstawia podobny wzrost prądu na krańcu zwartym, skokami o wartości $2i$ od 0 do ∞ ; napięcie tam ma stałe wartość zero, $U=0$.

Podobny przebieg otrzymany dla przypadku, kiedy oba krańce są otwarte. Częstotliwość zjawiska będzie znowu

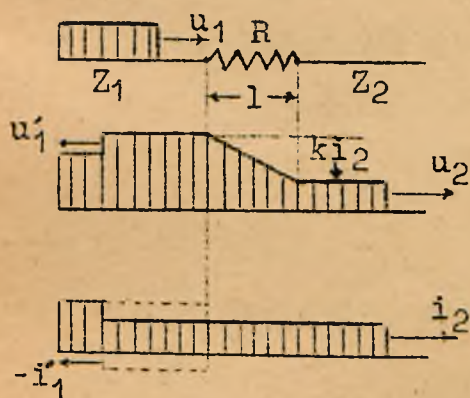
$$f = \frac{1}{2 l \sqrt{L_0 C_0}}$$

Częstotliwość fal wędrownych zależy więc od długości linii i od stanu krańców, a także, oczywiście, od przenikalności środowiska. Dla przewodów napowietrznych jest ona na ogół rzędu kilku lub kilkunastu tysięcy. Dla krótszych więcej, dla dłuższych odpowiednio mniej. Jest więc ona tego rzędu, że może pobudzić do drgań obwody o stałych skupionych i wywołać w nich zjawiska rezonansowe.

3. Wpływ stałych skupionych na fale wędrowne.

Przy przejściu fali przez oporność skupioną następuje, jak z poprzedniego wyniku, przemiana energii fali w ciepło; fala doznaje zatem zmniejszenia jej rzędnych, zasadniczy kształt zachowuje jednak ten sam. Podobny wpływ ma oporność przyłączona równolegle do przewodu, przez który fala biegnie, a więc upływność. Ma to praktyczne znaczenie w zastosowaniu ochronników oporowych. Inaczej pod tym względem działają cewki i kondensatory, przedstawiające skupioną indukcyjność lub pojemność, włączone lub przyłączone do przewodów. Fala wędrowna nadbiegając do nich wytwarza pole magnetyczne naokoło cewki, a elektryczne w kondensatorze, które nie mogą powstać momentalnie. W ciągu czasu, jaki do tego jest potrzebny, następuje odciąganie energii fali do tych elementów, a skutkiem tego zmiana kształtu fali. Na tym zjawisku polegają cewki, oraz kondensatory ochronne.

a. Oporność skupiona. - Między przewodami o opornościach falowych Z_1 i Z_2 włączona jest oporność R , skupiona w jednym punkcie. Fala wędrowna $/u_1, i_1/$ uderzając o nią, częściowo zostanie odbita, częściowo zaś przepuszczona przez nią do przewodu Z_2 /Rys.22 - wykonany dla oporności rozłożonej na odcinku $l/$. Poza tym przy



przejściu fali przez oporność następuje częściowa absorpcja jej energii skutkiem przemiany jej na ciepło. Prąd i_2 przepływający przez R powoduje stratę mocy.

Przez punkt złączenia przewodów przepływa ten sam prąd; napięcia zaś na przewodach po obu stronach oporności R różnią się o spadek napięcia na niej. Mamy więc

$$U_1 = RI_2 + U_2, \text{ oraz } I_1 = I_2$$

Po podstawieniu składowych napięć i prądów będziemy mieli:

napięcia: $u_1 + u_1' = Ri_2 + u_2 = R \frac{u_2}{Z_2} + u_2$,

Rys.22.
Działanie oporności skupionej na falę wędrowną.

prądy: $i_1 + i'_1 = i_2$

Wyrazimy prądy przez napięcia:

$$\frac{u_1}{Z_1} - \frac{u'_1}{Z_1} = \frac{u_2}{Z_2}$$

albo

$$u_1 - u'_1 = \frac{Z_1}{Z_2} u_2$$

Z powyższych równań otrzymamy falę napięcia przepuszczoną:

$$u_2 = \frac{2 Z_2}{Z_1 + Z_2 + R} \cdot u_1 \quad /24/$$

a falę odbitą:

$$u'_1 = u_2 - u_1 + \frac{R}{Z_2} u_2 = - \frac{Z_1 - Z_2 - R}{Z_1 + Z_2 + R} \cdot u_1 \quad /25/$$

Podobnie prądy:

$$i_2 = \frac{u_2}{Z_2} = \frac{2 Z_1}{Z_1 + Z_2 + R} \cdot i_1 \quad /26/$$

oraz

$$i'_1 = - \frac{u'_1}{Z_1} = \frac{Z_1 - Z_2 - R}{Z_1 + Z_2 + R} \cdot i_1 \quad /27/$$

Włączenie oporności R powoduje zmniejszenie amplitudy fali napięcia wpadającej do przewodu Z_2 .

Stosunki tu zachodzące przedstawia Rys.22 dla pewnego momentu, kiedy część fali wędrowniej przeszła już przez opornik.

Energia fali nadbiegającej w jednostce czasu jest $w_1 = \frac{u_1^2}{Z_1}$, a energia stracona w oporniku R $w_2 = R \frac{u_2^2}{Z_2^2}$. Sprawność opornika R, czyli skuteczność jego działania na fale wędrownie można więc określić jako stosunek w_2 do w_1 ; po podstawieniu wartości za u_2 otrzymamy:

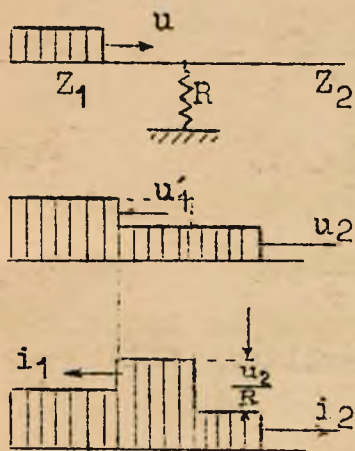
$$\eta = \frac{w_2}{w_1} = \frac{4R \cdot Z_1}{(Z_1 + Z_2 + R)^2} \quad /28/$$

Wyraz ten ma maksimum, gdy $R=Z_1+Z_2$. Wtedy $\eta = \frac{Z_1}{Z_1+Z_2}$. Sprawność opornika będzie więc tym większa, im Z_1 większe jest wobec Z_2 , a więc n.p. przy przejściu fali z przewodu napowietrznego do kablowego. Do celów bezpośredniej ochrony od przepięć takie urządzenia się nie nadają, gdyż opornik włączony na stałe do linii powodowałby stałą stratę energii. Natomiast praktyczne zastosowanie tego zjawiska spotykamy przy wyłącznikach z opornikami ochronnymi, o czym jest mowa w części traktującej o ochronnikach.

Całkowitą absorbcję energii fali nadbieżnej można osiągnąć w przy-

padku, jeżeli $Z_2=0$, t.j. jeżeli przewód Z_1 jest zwarty z ziemią przez opornik R , przy czym $R=Z_1$. Wtedy odbicie fali na tym oporniku nie nastąpi. Jest to szczególnie ważne w różnych przypadkach, kiedy zależy na tym, aby fala nadbieżna nie została odbita, lecz pochłonięta całkowicie przez opornik, o który uderza.

b. Upływność skupiona. - W punkcie węzłowym 2 przewodów Z_1 i Z_2 odgałęzia się /n.p. do ziemi/ opornik o oporności R skupionej, przedstawiający przeto upływność skupioną /Rys.23/.



W tym punkcie następuje rozgałęzienie prądu, napięcie zaś się zniża. Równowaga wymaga, aby

$$U_1 = U_2, \text{ a } I_1 = I_2 + \frac{u_2}{R},$$

czyli po podstawieniu:

$$u_1 + u'_1 = u_2; \quad i_1 + i'_1 = i_2 + \frac{u_2}{R_2}.$$

Wyrazimy prądy przez napięcia:

$$\frac{u_1}{Z_1} - \frac{u'_1}{Z_1} = \frac{u_2}{Z_2} + \frac{u_2}{R_1},$$

albo

$$u_1 - u'_1 = Z_1 \cdot \left(\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{R} \right) \cdot u_2$$

Rys.23.

Działanie upływności skupionej na falę węzłową.

Po podstawieniach otrzymamy:

$$u_2 = \frac{2 \cdot \frac{1}{Z_1}}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{R}} \cdot u_1$$

albo

$$u_2 = \frac{2}{1 + \frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_1}{R}} \cdot u_1 \quad /29/$$

oraz

$$u'_1 = u_2 - u_1 = \frac{\frac{1}{Z_1} - \frac{1}{Z_2} - \frac{1}{R}}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{R}} \cdot u_1 \quad /30/$$

Prądy zaś:

$$i'_1 = \frac{u'_1}{Z_1} = \frac{\frac{1}{Z_1} - \frac{1}{Z_2} - \frac{1}{R}}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{R}} \cdot i_1 \quad /31/$$

oraz

$$i_2 = \frac{u_2}{Z_2} = \frac{2 \cdot \frac{1}{Z_1}}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{R}} \cdot \frac{1}{Z_2} \cdot i_1 = \frac{2 \cdot \frac{1}{Z_2}}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{R}} \cdot i_1 \quad /32/$$

Jak widać, oporność R wpływa na zmniejszenie u_2 tym więcej im jest ona mniejsza.

Część energii fali, wynoszącej $w_1 = \frac{u_1^2}{Z_1}$, traci się w oporniku skutkiem upływu przez niego prądu fali pod napięciem U. Strata tej energii w jednostce czasu

$$w_r = \frac{u^2}{R} = \frac{u_2^2}{R} .$$

Sprawność takiego urządzenia będzie zatem

$$\eta = \frac{w_r}{w_1} = \frac{u_2^2 \cdot Z_1}{u_1^2 \cdot R} = \frac{4 \cdot \frac{1}{Z_1 R}}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{R}} \quad /33/$$

Maksimum tego wyrażenia wypadnie dla $\frac{1}{R} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}$; wtedy $\eta = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$.

Sprawność więc tego urządzenia będzie tym większa im Z_1 jest mniejsze wobec Z_2 ; n.p. dla przypadku, kiedy fala nadbiega z kabla do przewodu napowietrznego; a więc przeciwnie niż w przypadku oporu R włączonego szeregowo.

W przypadku, jeżeli $Z_1 = Z_2 = Z$, wz./28/ przejdzie w

$$u_2 = \frac{1}{1 + \frac{Z}{2R}} \cdot u_1 \quad /34/$$

Z tego wynika, że od pewnej wartości stosunku Z do R, stosunek napięć $u_2 : u_1$ zmniejsza się niewiele; sprawność urządzenia rośnie wolno z malejącym R. Uwidocznia to następująca tabela:

Z	R	$\frac{Z}{R}$	$\frac{u_2}{u_1}$
omy	omy	-	-
500	5000	0,1	0,95
500	500	1	0,66
500	250	2	0,50
500	125	4	0,33

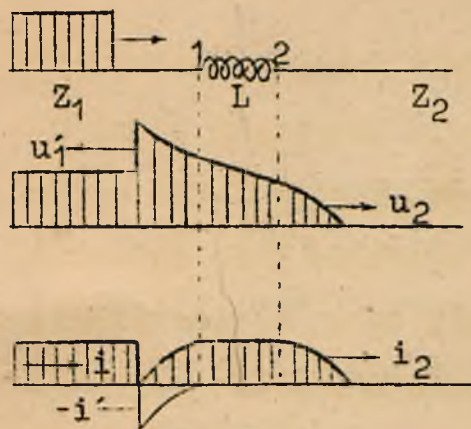
Widać z tego, że n.p. dla $R=Z$ nastąpi obniżenie napięcia tylko o $\frac{1}{3}$.

Jeżeli przewód Z_2 nie istnieje, czyli $Z_2 = \infty$, t.j. w przypadku zwarcia przewodu Z_1 z ziemią przez opornik R, możemy uzyskać - podobnie jak poprzednio - całkowitą absorbcję fali nadbieżnej, jeżeli $R=Z_1$.

Zastosowanie oporu włączonego między przewód a ziemię /lub drugi

przewód/ powodowałoby stały odpływ energii roboczej. Można temu zapobiec przez włączenie w szereg z takim opornikiem przerwy iskrowej. Na tym polegają ochronniki rożkowe, o których jest mowa w następnych rozdziałach.

c. Indukcyjność skupiona. - W punkcie złączenia przewodów Z_1 i Z_2 /Rys.24/ znajduje się cewka o indukcyjności skupionej L . Przyjmujemy,



Rys.24.

Działanie indukcyjności skupionej na falę wędrowną.

że cewka nie posiada wcale pojemności i że na razie jej oporność rzeczywista jest równa 0. Fala, uderzając o cewkę, napotyka tam na zmianę oporności falowej; następuje częściowe odbicie fali, oraz częściowe jej przepuszczenie. Prąd przepływający przez cewkę i_2 powoduje powstanie w niej SEM-iej indukcji: $-L \frac{di_2}{dt}$.

Na obu krańcach cewki prąd musi być ten sam: $I_1=I_2$. Napięcie zaś U_2 na krańcu 2 różni się od napięcia U_1 na krańcu 1.

o spadek napięcia na cewce:

$$U_1 = U_2 + L \frac{di_2}{dt}$$

Do przewodu Z_2 wpływa fala napięcia u_2 , do przewodu Z_1 wraca fala odbita u_1' oraz odpowiednie im fale prądu. Równowaga napięć i prądów wymaga, aby

$$u_1 + u_1' = u_2 + L \frac{di_2}{dt},$$

oraz

$$i_1 + i_1' = i_2.$$

Wyraziwszy prądy przez napięcia będziemy mieli

$$u_1 + u_1' = u_2 + \frac{L}{Z_2} \frac{du_2}{dt},$$

oraz

$$\frac{u_1}{Z_1} - \frac{u_1'}{Z_1} = \frac{u_2}{Z_2},$$

albo

$$u_1 - u_1' = \frac{Z_1}{Z_2} \cdot u_2.$$

Po podstawieniu otrzymamy

$$2u_1 = \frac{Z_1 + Z_2}{Z_2} u_2 + \frac{L}{Z_2} \cdot \frac{du_2}{dt},$$

albo

$$\frac{du_2}{dt} + \frac{Z_1 + Z_2}{L} u_2 - \frac{2Z_2}{L} u_1 = 0$$

Równanie to ma rozwiązanie podobne jak dla prądu przejściowego przy włączaniu cewki. W rezultacie

$$u_2 = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot u_1 \cdot \left[1 - e^{-\frac{Z_1 + Z_2}{L} \cdot t} \right] \quad /34/$$

Z równania tego widać, że napięcie fali przepuszczonej u_2 nie osiąga odrazu wartości, jaka by wypadła dla przypadku przejścia fali przez miejsce złączenia dwóch przewodów bez obecności tam cewki, kiedy to sam tylko czynnik $\frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$ warunkował wysokość tego napięcia. Stanie się to natomiast teoretycznie po czasie $t = \infty$, a praktycznie w ciągu czasu bardzo krótkiego, lecz wystarczającego do wywołania zjawisk powodujących zmianę kształtu fali przepuszczonej do przewodu Z_2 . Jak widać bowiem z ostatniego równania zmiana u_2 odbywa się według funkcji wykładniczej, z rosnącym czasem t u_2 rośnie. Zmiana ta warunkowana jest stosunkiem $\alpha = \frac{Z_1 + Z_2}{L}$, a więc zależy dla danych przewodów od wielkości indukcyjności cewki. Odwrotność tego stosunku α nazywamy stałą czasu indukcyjną fal wędrownych:

$$L = \frac{L}{Z_1 + Z_2} \quad /35/$$

Fala odbita

$$u_1' = u_1 - \frac{Z_1}{Z_2} u_2 = - \left[\frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} / 1 - e^{-\alpha t} / -1 \right] \cdot u_1 \quad /36/$$

W pierwszym momencie uderzenia fali o cewkę $/t=0, e^{-\alpha t}=1/$ będzie $u_2=0$, a $u_1'=u_1$, czyli $U_1=2u_1$; napięcie podwaja się więc, tak samo jak w przypadku uderzenia fali o otwarty koniec przewodu. W miarę jak t rośnie, maleje człon $e^{-\alpha t}$ i to tym wolniej im L jest większe. Wskutek tego u_2 rośnie stopniowo a u_1' maleje w tym samym stopniu. Po czasie $t = \infty$, $e^{-\alpha t}=0$, a $u_2 = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} u_1$, jak w przypadku, gdy cewki nie ma.

Przebiegi tu opisane są przedstawione na Rys.24 w momencie, kiedy część fali przeszła już do przewodu Z_2 .

Wynikiem tego przebiegu jest wydłużenie czoła fali, przez co je-

go stromość się zmniejsza. Z równań podstawowych mamy:

$$\frac{\partial u_2}{\partial x} = -L_0 \frac{\partial i_2}{\partial t} = -\frac{L_0}{Z_2} \frac{\partial u_2}{\partial t} = -\frac{2L_0}{L} u_1 e^{-\alpha t}$$

albo, ponieważ ogólnie prędkość

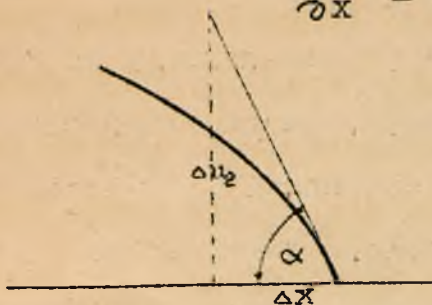
$$v = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}},$$

przeto

$$L_0 = \frac{1}{v^2 C_0} = \frac{\sqrt{L_0 C_0}}{v \cdot C_0} = \frac{Z}{v};$$

wobec czego

$$\frac{\partial u_2}{\partial x} = -\frac{2Z_2}{vL} u_1 \cdot e^{-\alpha t} \quad /37/$$



Rys.25.

Stromość czoła fali.

Tutaj $\frac{\partial u_2}{\partial x}$ przedstawia /Rys.25/ stromość czoła fali przepuszczonej. Wyraz ten będzie miał maksimum dla $t=0$:

$$\left(\frac{\partial u_2}{\partial x}\right)_{\max} = -\frac{2Z_2}{vL} u_1 = -\frac{2L_0}{L} u_1,$$

gdzie L_0 przedstawia indukcyjność jednostki długości przewodu Z_2 . Z ostatniego wyrażenia widać, że aby maksimum stromości

zmniejszyć, trzeba powiększyć indukcyjność cewki $/L/$ i to proporcjonalnie do indukcyjności linii, do której fala wpada $/Z_2/$. Dla przewodów napowietrznych trzeba cewki o większej indukcyjności $/L/$ niż dla kablowych.

Prądy odpowiadające falom napięcia są:

$$i_2 = \frac{u_2}{Z_2} = \frac{2}{Z_1 + Z_2} \cdot u_1 / 1 - e^{-\alpha t} / = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} i_1 / 1 - e^{-\alpha t} / \quad /38/$$

$$i_1' = -\frac{u_1'}{Z_1} = + \left[\frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} / 1 - e^{-\alpha t} / - 1 \right] \cdot i_1 \quad /39/$$

Prądy te również będą się zmieniać według funkcji wykładniczej zależnie od stałej czasu.

Podczas trwania przebiegu wyżej opisanego gromadzi się w cewce energia magnetyczna; po czasie $t=\infty$ wyniesie ona:

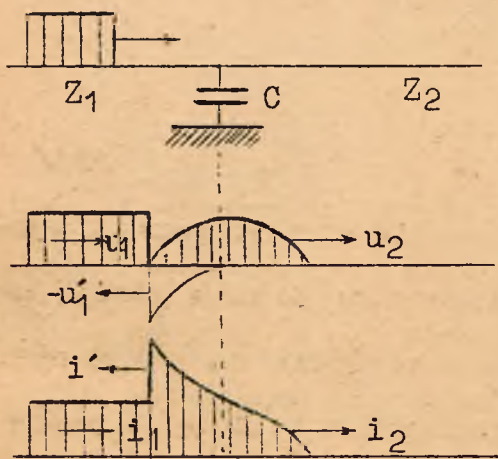
$$W_m = \frac{1}{2} L \cdot i_2^2 = \frac{2L}{(Z_1 + Z_2)^2} \cdot u_1^2 \quad /40/$$

Skoro cewka zostanie już naładowana, przestaje działać na falę wędrowną, która przechodzi wtedy przez nią, doznając jedynie tłumienia skutkiem oporności cewki. Działanie więc cewki tłumaczy się potrze-

bą pewnego czasu, aby się ona naładowała energią magnetyczną, którą narazie odciąga z fali a potem, po zniknięciu fali, oddaje przewodowi.

Opisany powyżej wpływ indukcyjności skupionej na kształt fali wędrownej ma bardzo praktyczne znaczenie. Na tym opiera się działanie cewek ochronnych, jako przyrządów służących do łagodzenia przepięć. O tym jest mowa w następnych rozdziałach.

d. Pojemność skupiona.- W punkcie złączenia przewodów Z_1 i Z_2 przyłączony jest kondensator doskonały, którego druga okładzina połączona jest z ziemią /Rys.26/.



Fala wędrowna /zasilana/, nadbiegając do punktu węzłowego, rozgałęzia się: jedna część idzie dalej do przewodu Z_2 , druga zaś do gałęzi kondensatora. Jeżeli przyjmiemy, że przewód łączący kondensator z linią i z ziemią jest bardzo krótki, wystąpi odrazu działanie kondensatora na falę.

Rys.26.

Działanie pojemności skupionej na fale wędrownej.

Po obu stronach punktu węzłowego będą napięcia te same: $U_1=U_2$; prąd zaś I_2 ,

wpływający do Z_2 , będzie mniejszy od I_1 o prąd płynący do kondensatora pod napięciem u_2 :

$$I_1 = I_2 + C \frac{du_2}{dt}$$

Podstawiając składowe będziemy mieli:

$$u_1 + u_1' = u_2 ; \quad i_1 + i_1' = i_2 + C \frac{du_2}{dt}$$

Wyraziwszy prądy przez napięcia:

$$\frac{u_1}{Z_1} - \frac{u_1'}{Z_1} = \frac{u_2}{Z_2} + C \frac{du_2}{dt}$$

skąd

$$u_1 - u_1' = \frac{Z_1}{Z_2} \cdot u_2 + Z_1 \cdot C \cdot \frac{du_2}{dt}$$

Po podstawieniu otrzymamy

$$2u_1 = \frac{Z_1}{Z_2} + 1 \cdot u_2 + Z_1 \cdot C \cdot \frac{du_2}{dt}$$

albo

$$\frac{du_2}{dt} + \frac{1}{C} \cdot \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \cdot u_2 - \frac{2}{Z_1 C} \cdot u_1 = 0$$

Rozwiązanie tego równania jest podobne jak w przypadku cewki:

$$u_2 = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot u_1 / 1 - e^{-\frac{Z_1 + Z_2}{C \cdot Z_1 \cdot Z_2} t} \quad /41/$$

Różnica w stosunku do poprzedniego jest więc tylko w wykładniku $\beta = \frac{Z_1 + Z_2}{C \cdot Z_1 \cdot Z_2}$, podczas gdy tam było $\alpha = \frac{Z_1 + Z_2}{L}$. Przebiegi będą zatem podobne, wpływ kondensatora na falę przepuszczoną jest również łagodzący jej czoło. Zmiana u_2 odbywa się według funkcji wykładniczej i jest uwarunkowana stałą czasu pojemnościową fal wędrownych, która w tym przypadku ma postać

$$\tau_c = \frac{C \cdot Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad /42/$$

Fala odbita
$$u_1' = u_2 - u_1 = \left[\frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} / 1 - e^{-\beta t} / - 1 \right] \cdot u_1 \quad /43/$$

W pierwszym momencie, t.j. kiedy fala nadbiegnie do punktu węzłowego, $t=0$, wtedy $u_1' = -u_1$, czyli $U_1=0$; kondensator działa wtedy jak zwarcie. Stopniowo zaczyna się ładowanie go, napięcie na nim a więc i na przewodach Z_1 i Z_2 z nim związanych podnosi się od 0, a napięcie fali odbitej stopniowo maleje. Skoro kondensator zostanie naładowany, napięcie w punkcie węzłowym osiąga wartość $U=u_1$; kondensator przestaje działać bezpośrednio na fale.

Stosunki tu zachodzące pokazuje Rys.26 dla momentu, kiedy kondensator został już naładowany.

Podczas tego przebiegu nagromadziła się więc w kondensatorze energia elektryczna:

$$W_C = \frac{1}{2} C \cdot u_2^2 = \frac{2C \cdot Z_2^2}{Z_1 + Z_2 / 2} \cdot u_1^2 \quad /44/$$

Po naładowaniu, skoro fala wędrowna /n.p.samotna/ przejdzie całkowicie obok niego, kondensator rozładowywa się do obu przewodów w stosunku ich oporności Z_1 i Z_2 .

Prądy odpowiadające falom napięcia będą:

$$i_2 = \frac{u_2}{Z_2} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} i_1 / 1 - e^{-\beta t} / \quad /45/$$

oraz
$$i_1' = \frac{u_1'}{Z_1} = \left[\frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} / 1 - e^{-\beta t} / - 1 \right] i_1 \quad /46/$$

W pierwszej chwili / $t=0$ / prąd fali odbitej $i_1' = i_1$, a więc całko-

wity prąd na przewodzie podwaja się, $I=2i_1$, podobnie jak w przypadku kiedy fala uderzy o zwarty koniec przewodu. Następnie stopniowo i_1 maleje w miarę, jak kondensator naładowywa się.

Wpływ kondensatora na fale wędrowne da się więc ująć następująco: W pierwszym momencie kondensator działa na falę nadbieżną jak zwarcie, następnie ładuje się stopniowo, odciągając część energii fali wędrownej. Napięcie na punkcie węzłowym rośnie stopniowo od zera według funkcji wykładniczej, zależnej od oporności falowych przewodów i pojemności kondensatora. Skutkiem tego do przewodu Z_2 wpływa fala o napięciu rosnącym stopniowo od 0, a więc o złagodzonym czole; do przewodu zaś Z_1 wpływa fala odbita o stromym czole o łagodnym tyle.

Działanie więc kondensatora jest bardzo podobne do działania cewki, jedyną różnicą jakościową jest to, że w pierwszym momencie napięcie na kondensatorze spada do zera a na cewce rośnie do podwójnej wysokości. Stanowi to przewagę kondensatorów jako przyrządów ochronnych od napięć nad cewkami, które chociaż pewniejsze co do budowy w stosunku do kondensatorów, mają tę słabą stronę, że mogą spowodować zjawiska rezonansowe n.p.z pojemnością wejściową transformatora, który mają ochraniać.

Ilościowa różnica w działaniu kondensatorów i cewek wynika z postaci stałych czasu: $T_L = \frac{L}{Z_1 + Z_2}$; $T_C = \frac{C \cdot Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2}$. Stałe czasu będą równe jeżeli:

$$L = CZ_1 Z_2, \quad \text{albo} \quad C = \frac{L}{Z_1 \cdot Z_2} \quad /47/$$

Pojemność równoważna indukcyjności jest tym mniejsza im Z_1 i Z_2 większe. Używając tu powyższych zamienników można się posługiwać wzorami wyprowadzonymi dla cewek lub dla kondensatorów z jednakową słuszością.

Spadek napięcia na czole fali przepuszczonej wyrazi się według poprzedniego, podstawivszy $L=CZ_1 Z_2$;

$$\frac{\partial u_2}{\partial x} = -\frac{2}{vCZ_1} \cdot u_1 \cdot e^{-\beta t}$$

a

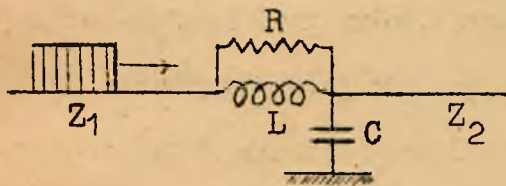
$$\frac{\partial u_2}{\partial x} / \max = - \frac{2u_1}{\sqrt{CZ_1}} = - \frac{2C_0}{C} u_1 \quad /48/$$

Aby stromość czoła zmniejszyć, trzeba zwiększyć pojemność kondensatora /C/ w stosunku do pojemności przewodu /C₀/, skąd fala nadbiega.

Jeżeli fala wędrowna ma ograniczoną długość, to zależnie od pojemności kondensatora, energia jej może być całkowicie odciągnięta przez niego, lub tylko częściowo. W pierwszym przypadku mielibyśmy największą sprawność ochronną kondensatora. Po nagromadzeniu się energii fali na kondensatorze, kiedy fala wędrowna znika, kondensator rozładowywała się do obu przewodów, wysyłając tam fale wędrowne o łagodnych czołach.

Powyższe zjawiska wyzyskujemy przy stosowaniu kondensatorów ochronnych jako przyrządów łagodzących przepięcia w urządzeniu elektrycznym. Jest o nich mowa w następnych rozdziałach.

Przez odpowiednie połączenie cewki i kondensatora, n.p.jak na



Rys.27.

Układ ochronny złożony ze skupionych R, L i C.

Rys.27, można wyzyskać własności obu tych elementów. W przypadku teoretycznym, gdy L i C są skupione, występuje równoczesne ich działanie. Wytwarza się dla fali nadbiegającej w pierwszym momencie niejako punkt węzłowy dla napięcia i dla

prądu /U=0, I=0/, co może mieć pewne praktyczne znaczenie.

Zastosowanie oporności skupionej R, przyłączonej równolegle do indukcyjności L, w postaci t.zw.opornika obejściowego /Rys.27/, powoduje absorbcję /częściową/ energii fali nadbiegającej, polepsza przeto sprawność ochronną urządzenia.

Układy takie mają niekiedy praktyczne zastosowanie przy ochronie przeciwprzepięciowej.

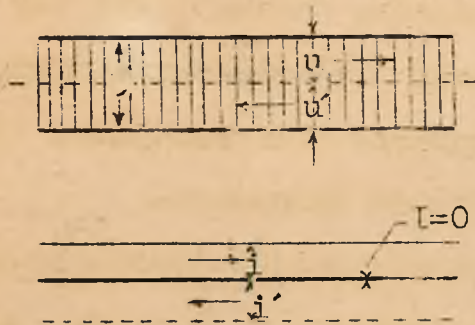
4. Przebiegi łączeniowe w liniach.

Włączenie przewodu o stałych rozłożonych do źródła napięcia

/maszyna, transformator, przewód pod napięciem i t.d./ odbywa się w postaci fal łączeniowych. W najogólniejszym przypadku wyobrażamy sobie, że źródło prądu o bardzo dużej wydajności, przedstawiające więc ładunek nieskończenie wielki, włączone jest nagle i bezoporowo do przewodu. Ładunek takiego źródła uważamy jako statyczny. W momencie przyłączania obiektu do źródła ładunek ten spływa na niego w postaci fali ładującej. Równocześnie musi nastąpić wyładowanie źródła przez falę wyładowującą. Również, w razie wyłączenia przewodu naładowanego lub jego zwarcia, zjawia się podobna fala.

Jako ładunek statyczny rozumiemy tu będziemy ładunki, znajdujące się w spoczynku na przewodach, t.zn. nie przepływające przez nie, i to niezależnie od tego czy są one związane ze stałym potencjałem, czy też pochodzą od źródła napięcia wolnozmiennającego się. Należą więc tu ładunki atmosferyczne, udzielone przewodom i związane z chmurami, ładunki odpowiadające napięciu zasilającemu linię otwartą i t.d.

a. Ładunek w spoczynku. - Ładunki takie możemy traktować jak by to były fale wędrownie biegnące w strony przeciwne i w pewnym momencie nakładające się na siebie.



Rys. 28.

Ładunek w spoczynku.

Jeżeli ładunek jest w spoczynku, to - według poprzedniego - w każdym miejscu przewodu

$$I = i + i' = 0,$$

stąd

$$i = -i',$$

prądy się więc znoszą. Falom prądowym i i i' odpowiadają fale napięcia $u = +Zi$ i $u' = -Zi'$

przeto

$$u = u'$$

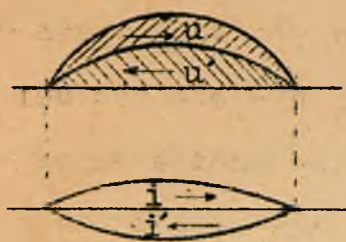
napięcia się więc dodają. Całe napięcie w pewnej chwili będzie wobec tego

$$U = 2u = 2u'$$

/49/

co odpowiada naszym założeniom o pojmowaniu ładunku w spoczynku, jako wyniku dwu fal jednakowych, biegnących w strony przeciwne i w pewnym momencie nakładających się.

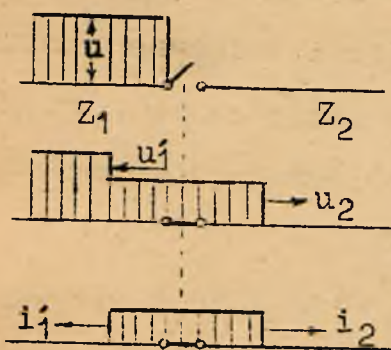
Podobnie rzecz się ma n.p.z ładunkiem samotnym, znajdującym się na przewodzie /Rys.29/. Taki ładunek, uwolniony nagle, przemienia się w dwie fale wędrownie napięcia u i u' , oraz dwie fale prądu i i i' , biegnące w strony przeciwne. Rzędne tych fal będą o połowę mniejsze niż odpowiednie rzędne całego ładunku, kształt ich zaś jest taki sam jak tamtego.



Rys.29.
Fala wędrowna w spoczynku.

b. Włączanie przewodu jałowego. - Przewód o oporności falowej Z_1 , będący pod napięciem U , zostaje włączony nagle i bezoporowo do przewodu bez napięcia o oporności Z_2 . Następuje wtedy ładowanie przewodu Z_2 a wyładowanie przewodu Z_1 . Zjawiają się więc fale ładujące u_2 i i_2 , oraz wyładowujące u_1 i i_1 .

Równowaga napięć i prądów wymaga, aby w miejscu



złączenia

$$U + u_1' = u_2, \quad \text{oraz} \quad i_1' = i_2$$

Wyraziwszy prądy i_1' i i_2 przez napięcia

$$- \frac{u_1'}{Z_1} = \frac{u_2}{Z_2}$$

skąd

$$- u_1' = \frac{Z_1}{Z_2} \cdot u_2$$

Rys.30.
Włączanie przewodu.

Po podstawieniu tego do równania na napięciu otrzymamy napięcie fali ładującej

przewód Z_2
$$u_2 = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot u \quad /50/$$

a napięcie fali wyładowującej przewód Z_1
$$u_1' = u_2 - U = - \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot U \quad /51/$$

Temu odpowiadają prądy
$$i_2 = \frac{u_2}{Z_2} = \frac{u}{Z_1 + Z_2} = i_1' \quad /52/$$

Jeżeli $Z_1 = Z_2 = Z$ to

$$u_2 = \frac{U}{2} = -u_1'$$

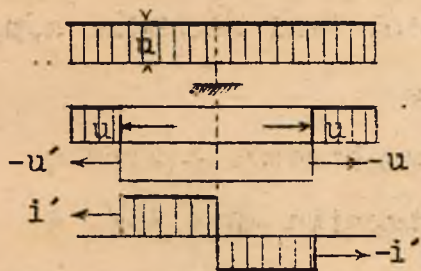
a
$$i_2 = \frac{U}{2Z} = i_1$$

Napięcie fali ładującej czy wyładowującej zależy jak widać od stosunku oporności Z_1 i Z_2 . Im Z_2 jest większe od Z_1 tym napięcie

fali ładującej przewód Z_2 jest mniejsze. W każdym razie do przewodu Z_2 wpływa fala o napięciu niższym niż robocze $/U/$. Prąd zaś jest w obu przypadkach taki sam.

Przypadek rozpatrywany powyżej zachodzi w praktyce bardzo często jako: przyłączanie dwóch przewodów do siebie; włączanie przewodu napowietrznego do prądnicy /napięcie ładowania zmniejsza się nieco/ włączanie kabla do prądnicy /do kabla wpływa fala o małej amplitudzie, do prądnicy o dużej/; przyłączanie transformatora do linii napowietrznej /do transformatora wpływa fala niska, do maszyny wysoka/ i t.d.

c. Zwarcie przewodu naładowanego. - Przewód naładowany do napięcia U /Rys.31/ zostaje nagle i bezoporowo połączony z ziemią /lub drugim przewodem/.



Napięcie U musi skutkiem zwarcia zniknąć. Przebieg tego odbędzie się w postaci fal wędrownych wyładowujących, przesuujących się w obie strony od miejsca zwarcia, o napięciu takim samym jak U , lecz o znaku przeciwnym.

Rys131.

Zwarcie w środku przewodu.

Równowaga napięć i prądów wymaga, aby w

każdym punkcie

$$U + u = U + u' = 0 ;$$

stąd

$$-u = -u' = U$$

Prądy temu odpowiadające znajdziemy, dzieląc napięcia przez oporności falowe

$$-\frac{u}{Z} = -\frac{u'}{Z} ,$$

czyli

$$-i = +i'$$

Fali napięcia wyładowującej biegnącej w przód, odpowiada ujemna fala prądu, a fali napięcia biegnącej wstecz - dodatnia fala prądu. Wykreślenie przedstawiamy to jako fale napięcia znoszące istniejący ładunek /część niezakreskowana/, oraz jako fale prądu zjawiające się w miejscu zwarcia. Jak widać, prądy te w tym miejscu sumują się. Całkowity prąd będzie tam

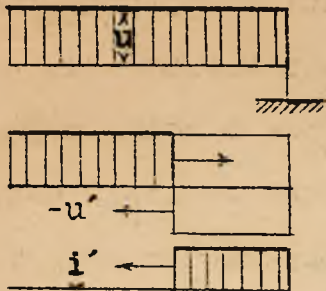
$$I = \frac{2U}{Z}$$

/54/

Jest to częsty przypadek zwarcia przewodu z ziemią n.p.przez iskrę

elektryczną na izolatorze.

Jeżeli zwarcie nastąpi na krańcu przewodu naładowanego, /Rys. 32/, to może powstać tylko jedna fala, biegnąca ku końcowi przeciwnemu. Wtedy mamy napięcia:



$$U + u' = 0$$

$$-u' = U$$

temu odpowiada prąd

$$-\frac{u'}{Z} = +i';$$

czyli

$$I = \frac{U}{Z} \quad /54/$$

Przez miejsce zwarcia płynie więc prąd 2 razy mniejszy, niż gdyby zwarcie było w środku przewodu. Przypadek taki zachodzi n.p.

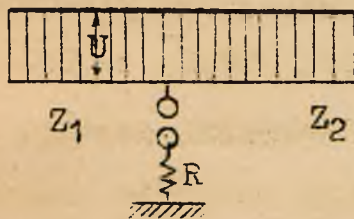
w razie włączenia linii lub prądnic na zwarcie.

Rys. 32.

Zwarcie na krańcu przewodu.

d. Zwarcie przewodu przez opornik. - Między przewód a ziemię

przyłączony jest opornik, za pośrednictwem iskiernika /Rys. 33/. W



razie nagłego włączenia opornika przez iskiernik napięcie U spada do wartości:

$$u_0 = Ri_0$$

gdzie i_0 - prąd płynący przez opornik R.

Powstaje fala wyładowująca /ujemna/

$$+u' = +u_2 = +u \quad /zmieniamy znak/$$

Musi być zatem

$$\text{napięcie} \quad U = u_0 + u = Ri_0 + u,$$

$$\text{prąd} \quad i_0 = i_1 - i_2$$

Przekształcamy:

$$Ri_0 = R/i_1 - i_2/ = R \cdot \frac{u_1}{Z_1} + \frac{u_2}{Z_2} =$$

$$= R \cdot \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \cdot u = R \cdot \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1 \cdot Z_2} \cdot u$$

Przeto

$$U = \left(1 + R \cdot \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1 \cdot Z_2}\right) \cdot u$$

Otrzymamy stąd:

$$\text{fala wyładowująca} \quad u = \frac{U}{1 + R \cdot \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1 \cdot Z_2}} \quad /55/$$

napięcie pozostałe $u_c = U \left(1 + \frac{1}{R \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1 \cdot Z_2}} \right)^{-1} = \frac{U}{1 + \frac{Z_1 \cdot Z_2}{R(Z_1 + Z_2)}} \quad /56/$

prąd w oporniku $i_o = \frac{U_o}{R} = \frac{U}{R + \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2}} \quad /57/$

Oznaczmy: $\frac{1}{\frac{Z_1 + Z_2}{Z_1 \cdot Z_2}} = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} = Z'$

przeto $u = \frac{U}{1 + \frac{R}{Z'}}; \quad u_o = \frac{U}{1 + \frac{Z'}{R}}; \quad i_o = \frac{U}{R + Z'}$

Jeżeli $Z_1 = Z_2 = Z$, to wzory powyższe przechodzą w postać:

$$u = \frac{U}{1 + \frac{2R}{Z}}; \quad u_o = \frac{U}{1 + \frac{Z}{2R}}; \quad i_o = \frac{U}{R + \frac{Z}{2}} \quad /58, 59, 60/$$

Rozładowanie przewodu Z zwartego przez opór na końcu daje falę wyładowującą biegnącą wstecz

$$u = -u' = -\frac{Z}{Z + R} \cdot U = -\frac{U}{1 + \frac{R}{Z}}$$

znoszącą częściowo napięcie istniejące na przewodzie.

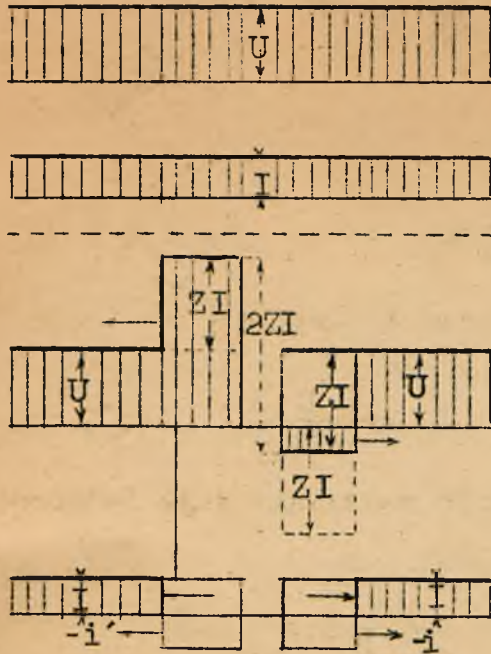
Przypadek ten jest bardzo ważny dla praktyki, zachodzi bowiem przy działaniu ochronników oporowych /iskrowych/. Jeżeli napięcie na przewodzie przekroczy wartość krytyczną dla iskiernika, nastąpi przeskok iskry i opornik R zaczyna działać, obniżając napięcie pozostałe na przewodzie do wartości odpowiadającej spadkowi napięcia na oporniku, spowodowanego przez prąd i_o . Do przewodu wpływają na obie strony fale wyładowujące.

Poniższa tabelka uwidacznia to dla przykładu kiedy $Z_1 = 500 \Omega$, $Z_2 = 5000 \Omega$; wtedy dla różnych R w stosunku do $\frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} = Z' = 450 \Omega$ otrzymamy:

$R = Z' = 450 \Omega$,	$u_o = \frac{1}{2}U$,	$u = \frac{1}{2}U$
$= 2Z' = 900 \Omega$,	$= \frac{2}{3}U$,	$= \frac{1}{3}U$
$= 4Z' = 1800 \Omega$,	$= \frac{4}{5}U$	$= \frac{1}{5}U$

Ażeby napięcie u_o obniżyć do granic dopuszczalnych, trzeba dobrać odpowiednio opór R . Im jest on mniejszy tym sprawność ochronna urządzenia lepsza.

e. Przerwanie przewodu pod prądem. - Przewód pracujący pod napięciem U i pod prądem I zostaje nagle i bezoporowo przerwany. Prąd



I nie może płynąć musi przeto zostać zniesiony przez fale wyładowujące $-i'$ i $-i$, płynące w obie strony od miejsca przerwy. Przy tym musi być oczywiście

$$-i' = -i = +I$$

Z tym związane są fale napięcia nakładające się na napięcie U istniejące na przewodzie /Rys.34/:

$$+\frac{u'}{Z} = -\frac{u}{Z} = I$$

albo

$$u' = -u = ZI$$

Rys.34.

Przerwanie przewodu pod prądem.

W pobliżu przerwy napięcie przyjmie więc wartości:

- z lewej strony $U + u' = U + ZI$

- z prawej strony $U + u = U - ZI$

A zatem na przewodzie /wyłączniku/ powstanie napięcie podwójne

$$U_p = 2ZI \quad /62/$$

Przypadek taki powstaje w razie nagłego przerwania przewodu lub rozłączenia dwóch przewodów za pomocą wyłącznika szybkodziałającego. Przepięcie, jakie wtedy powstaje, może teoretycznie przyjąć bardzo duże wartości /jeżeli I bardzo duże/; w praktyce utrudnia to gaszenie łuku powstającego na wyłączniku.

f. Włączanie wsteczne /powrotne/. - Przy wyłączaniu powolnym linii otwartej /obciążenie czysto pojemnościowe /prąd przerywa się przy przejściu przez 0, napięcie ma wtedy wartość maksymalną U_m /. Po obu stronach wyłącznika /Rys.31a/ panuje w chwili wyłączania napięcie U_m : w przewodzie /po prawej stronie/ w postaci ładunku w spoczynku, na źródle /po lewej stronie/ jako chwilowa wartość napięcia zmieniającego się okresowo. Po czasie $\frac{1}{2}$ okresu napięcie na źródle

le przyjmuje wartość $-U_m$; na przewodzie panuje nadal $+U_m$. Na wyłączniku występuje zatem różnica potencjałów

$2U_m$. Jeżeli przez ten czas styki wyłącznika nie rozeszły się za bardzo, następuje

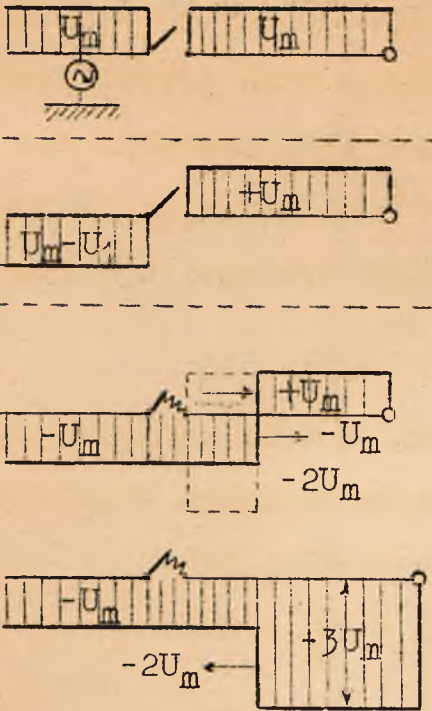
przebite warstwy oleju lub powietrza przedzielającego je pod napięciem $2U_m$;

do przewodu wciąga fala ładująca odpowiadająca różnicy potencjałów $[-U_m - U_m] =$

$= -2U_m$. Na otwartym końcu następuje odbicie tej fali, która nakłada się na istniejące

napięcie $-U$ a przez to na przewodzie powstaje napięcie $-3U_m$. To napięcie podtrzymuje nadal iskrę w wyłączniku; fala

uderza o źródło, następują dalsze odbicia i przebiegi. /Rys.35/.



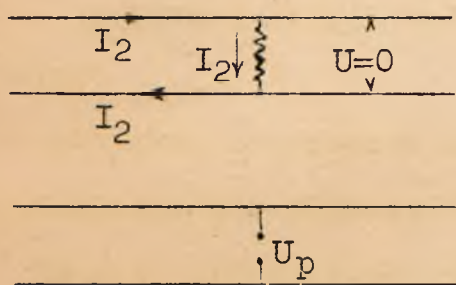
Rys.35

Włączanie wsteczne.

g. Wyłączanie zwarcia międzyprzewodowego. - Linia dwuprzewodowa

ma zwarcie bezoporowe, przez które płynie prąd I_z . Napięcie na miejscu

zwarcia $U=0$. W razie nagłego przerwania zwarcia powstaje napięcie U_p między przewodami w postaci fal rozbiegających się na każdym przewodzie /Rys.36/:



$$u' = u = U_p$$

Temu odpowiadają prądy, których suma algebraiczna

$$-i' + i = I_z, \text{ albo } \frac{u'}{Z} + \frac{u}{Z} = I_z$$

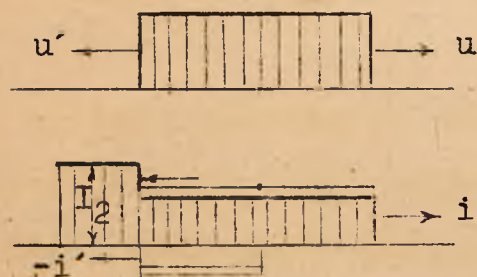
czyli

$$2U_p = ZI_z$$

skąd

$$U_p = \frac{1}{2}ZI_z \quad /61/$$

Napięcie powstające na miejscu zwarcia jest więc znacznie mniejsze niż przy



Rys.36.

Wyłączanie zwarcia międzyprzewodowego.

przerwaniu przewodu pod prądem /przypadek f/.

Przypadek ten zachodzi w praktyce bardzo często przy wyłączaniu obwodu zwartego.

INSTYTUT WYSOKIEGO NAPIĘCIA

Nr inw.

Nr kat.