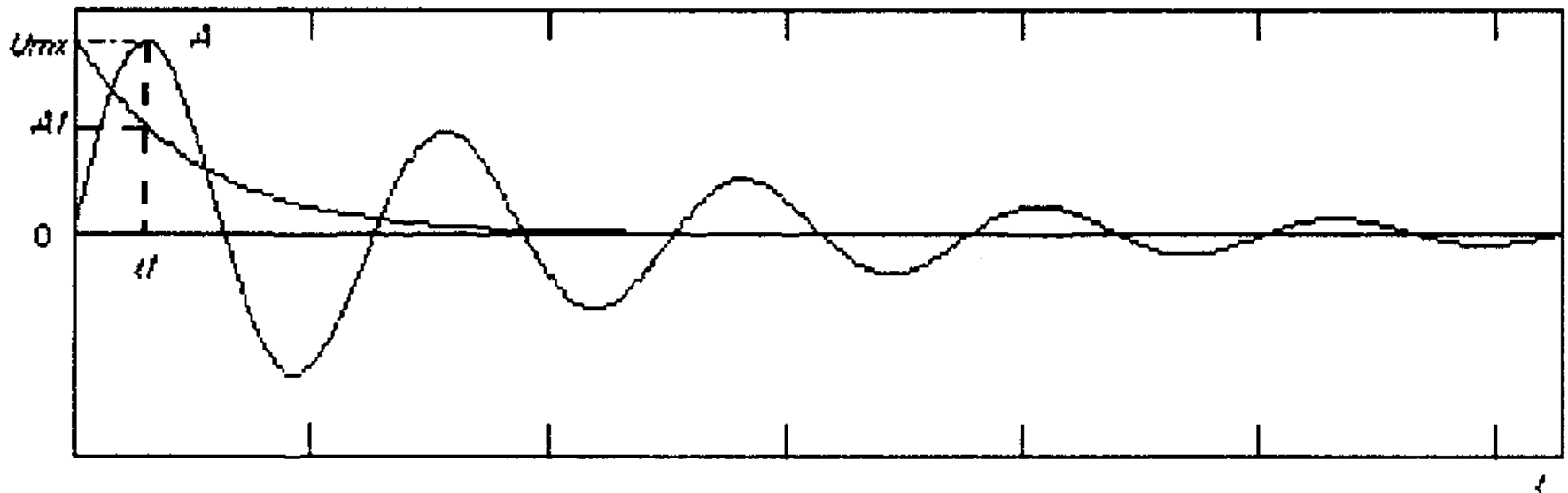


9. PRZEPIĘCIA SZYBKOSZMIENNE, ŁĄCZENIOWE

9.1. WPROWADZENIE

Szybkozmiennne przebiegi łączeniowe, są to zwykle tłumione oscylacje o częstotliwościach z przedziału $10^2 \div 10^5$ Hz, przy czym z punktu widzenia narażeń izolacji jest istotna wartość pierwszej amplitudy (rys. 9.1).

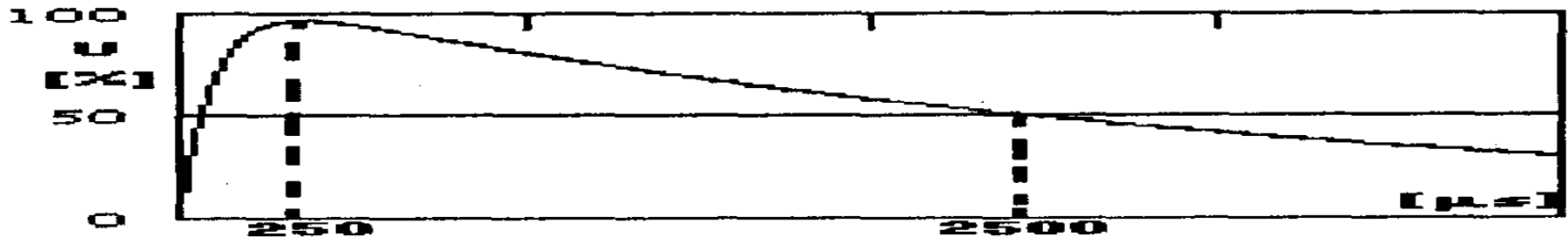


Rys. 9.1. Wyjaśnienie pojęcia udaru łączeniowego

Dla celów probierczych odtwarza się tego rodzaju narażenia napięciowe poprzez wykorzystanie dwóch pojęć: wartości szczytowej przepięcia U_{mx} oraz wykładniczego zmniejszania się amplitudy kolejnych oscylacji. Przyjmuje się przy tym, że obowiązuje zasada:

$$\Psi = e^{-\alpha \cdot t_1} = \frac{A_1}{A} = 0.6 \div 0.9 \quad (9.1)$$

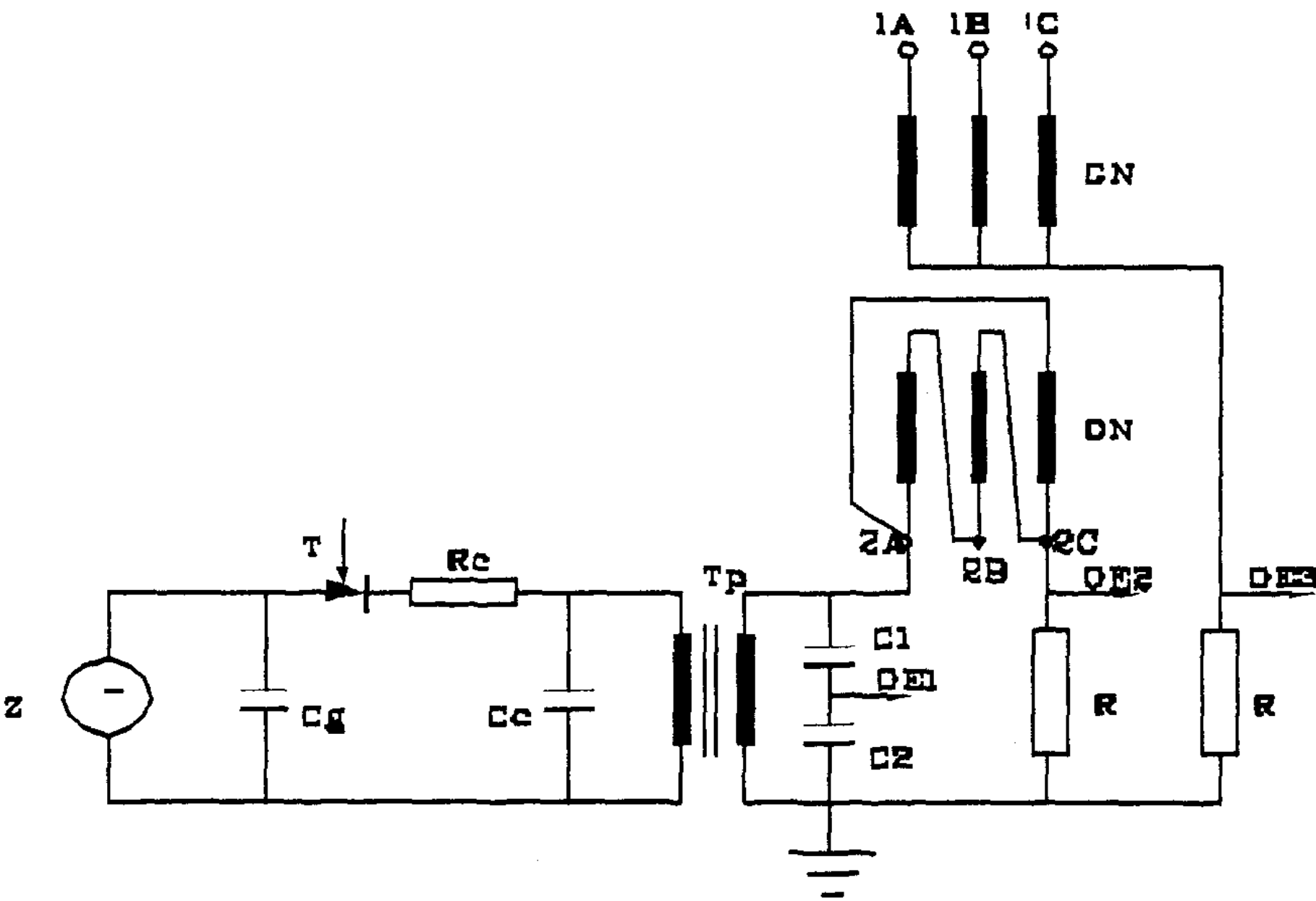
W oparciu o te zasady konstruuje się tzw. udar napięciowy łączeniowy, którego znormalizowana postać (rys. 9.2) zapisywana jest jako 250/2500 μs . Należy jednak zaznaczyć, że w wielu szczególnych przypadkach dopuszcza się, a nawet zaleca, udary o innym kształcie, w tym również oscylacyjnym.



Rys. 9.2. Normalny udar łączeniowy

Do wytwarzania probierczych udarów łączeniowych można wykorzystać dwie następujące metody:

1. Dokonanie w sposób sztuczny procesu łączeniowego w specjalnie dobranym obwodzie np. poprzez rozładowanie baterii kondensatorów przez pierwotne uzwojenie transformatora probierczego (rys. 9.3). Wówczas na stronie wtórnej transformatora pojawi się impuls wysokonapięciowy, którego kształt można modelować poprzez dobór parametrów układu.



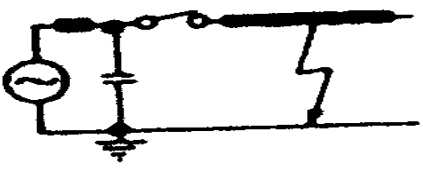

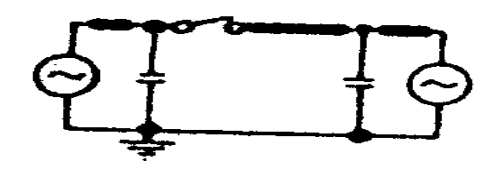
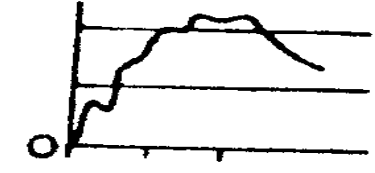
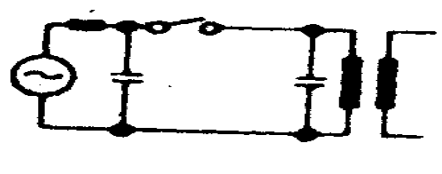
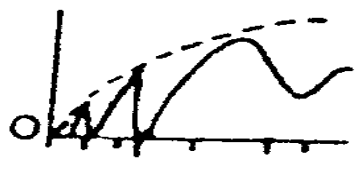
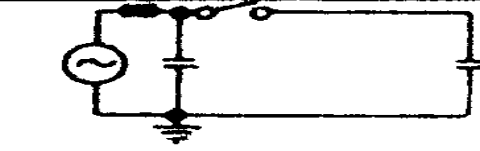
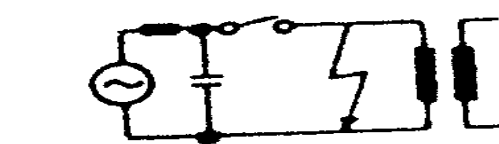
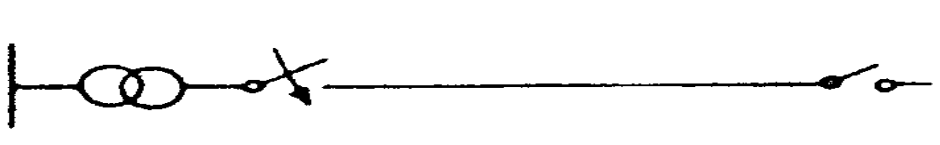


Rys. 9.3. Schemat elektryczny układu do wytwarzania uderów łączeniowych

2. Zastosowanie generatora elektrostatycznego o odpowiednio dobranych parametrach. Generator elektrostatyczny będzie omówiony w rozdziale 10.

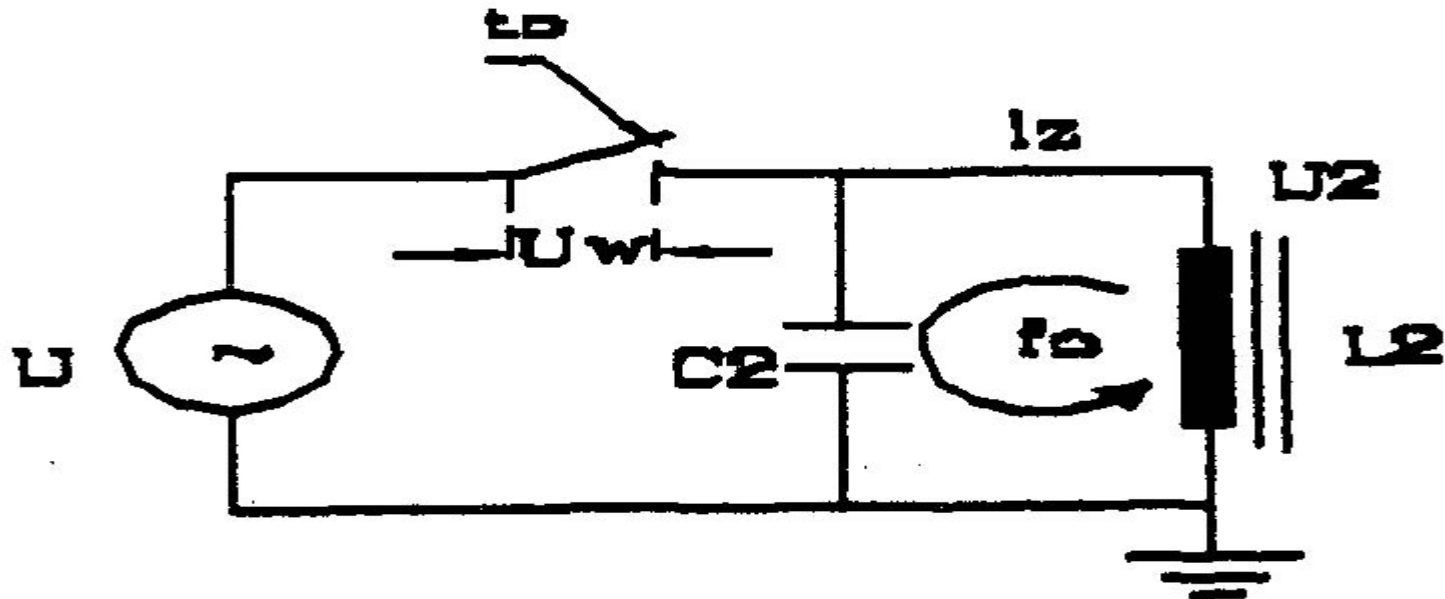
W tablicy 18 zestawiono przypadki zamierzonych i niezamierzonych łączy obwodu, w których zachodzą w praktyce znaczne przepięcia łączeniowe. Przypadki te omówiono pokrótce w poszczególnych punktach tego rozdziału.

Przypadki przebiegów łączeniowych [11]

<p>1. Zwarcie na zaciskach generatora</p>		
<p>2. Zwarcie w linii</p>		
<p>3. Rozłączenie fazy w dwóch układach - napięcie zależy od warunków uziemienia układów</p>		
<p>4. Wyłączenie małego prądu indukcyjnego (nieobciążonego transformatora)</p>		
<p>5. Wyłączenie prądu pojemnościowego baterii kondensatorów, nieobciążonych linii lub kabli</p>		
<p>6. Rozwijające się uszkodzenia np. łuk wzdłuż uzwojeń transformatora</p>		
<p>7. Załączenie nieobciążonej linii EHV/UHV (z uwięzionym ładunkiem)</p>		

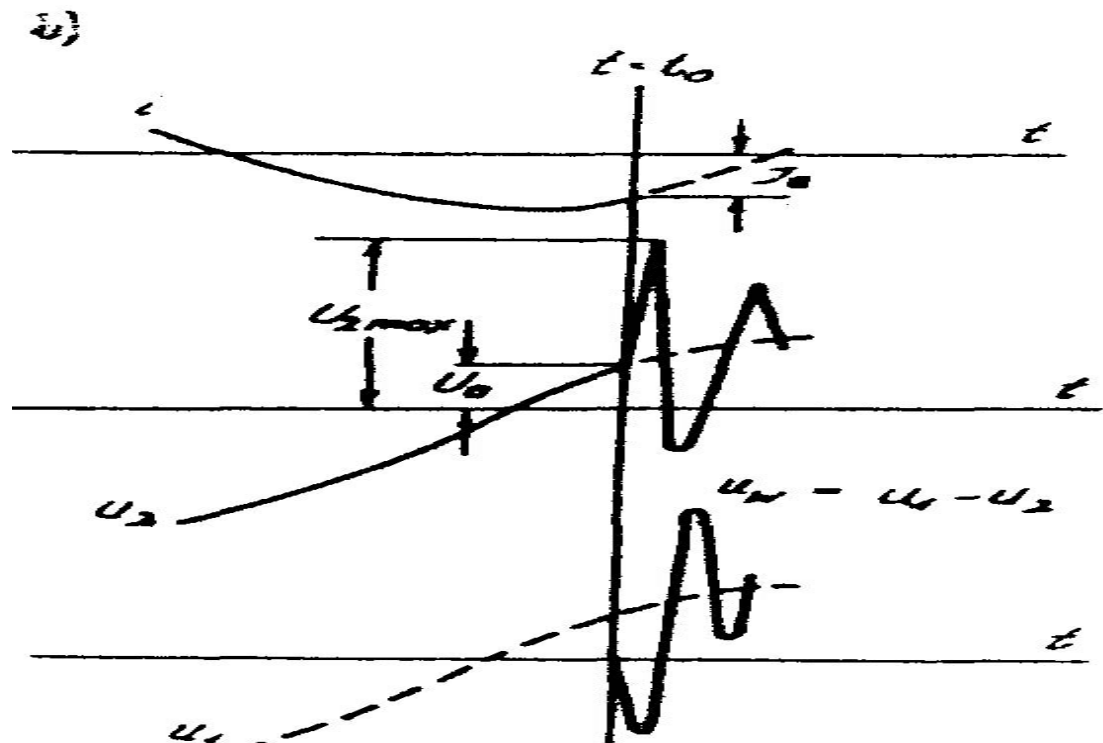
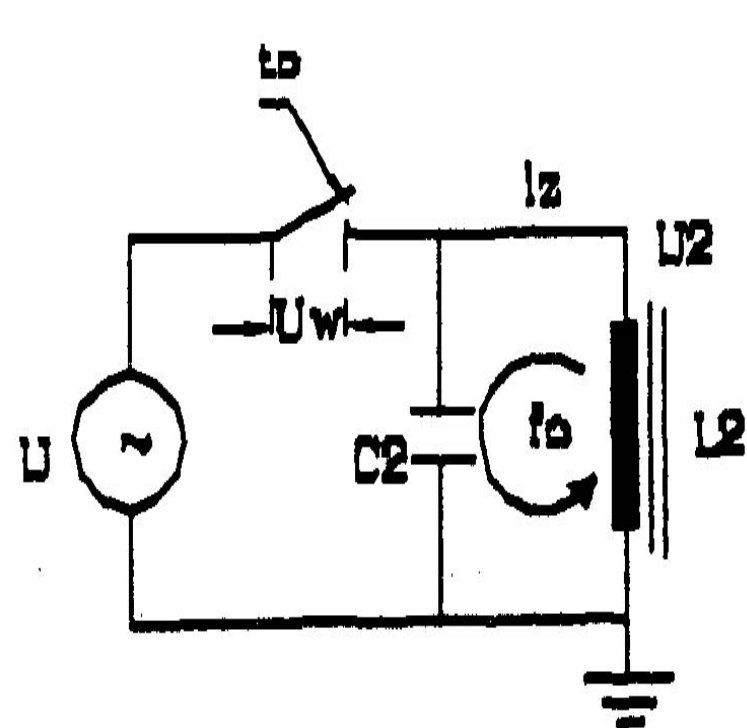
9.2. PRZEPIĘCIA PRZY WYŁĄCZANIU INDUKCYJNOŚCI

Przypadek ten, oznaczony w tablicy 2 numerem 4, można rozważyć za pomocą uproszczonego schematu jak na rysunku 9.4a. W obwodzie tym duża indukcyjność transformatora L_2 jest w chwili $t_0 = 0$ wyłączana wyłącznikiem W . W obwodzie trzeba również uwzględnić pojemność C_2 reprezentującą całkowitą pojemność doziemną dławika czy transformatora. Indeksy 2 wynikają z uproszczenia polegającego na pominięciu indukcyjności i pojemności linii L_1 i C_1 , które to parametry muszą być uwzględnione w dokładniejszych rozważaniach.



W obwodzie płynie czysto indukcyjny prąd i , opóźniony względem napięcia o 90° . W chwili t_0 przy wartości prądu i_0 nastąpiło przerwanie prądu przez wyłącznik. Gdyby wyłączenie nastąpiło w chwili przejścia prądu przez zero to nie wystąpiłoby żadne przepięcie. Jednak gdy $i_0 > 0$ to wówczas w cewce i kondensatorze jest zgromadzona energia:

$$w = \frac{1}{2} \cdot L_2 \cdot i_2^2 + \frac{1}{2} \cdot C_2 \cdot u_2^2 \quad (9.2)$$

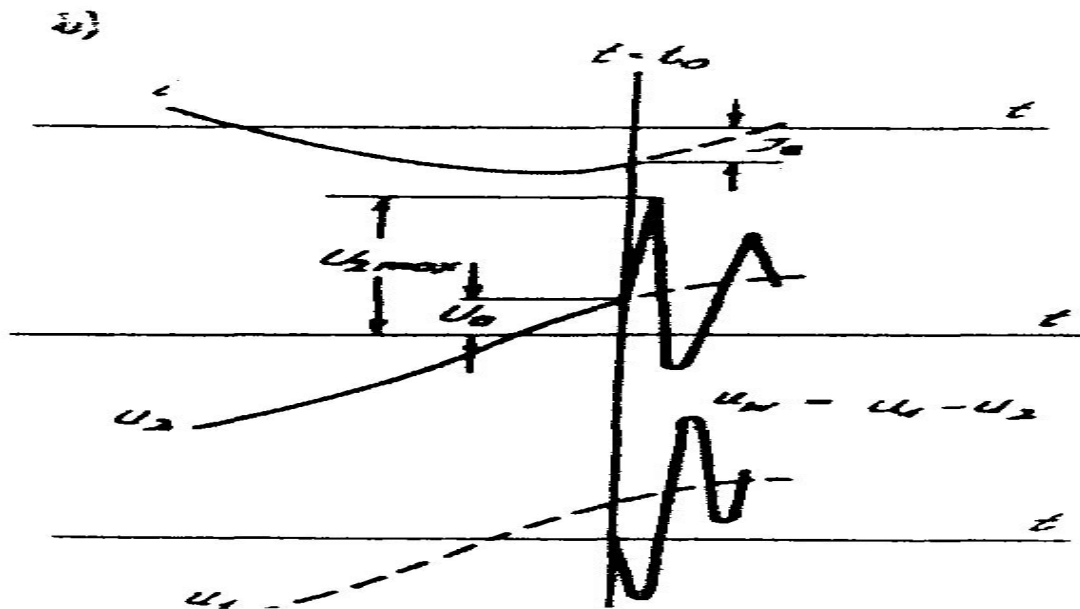


W chwili t_0 wartości początkowe napięcia i prądu wynoszą odpowiednio $u_2 = U_0$ oraz

$i_2 = I_0$, a także są spełnione warunki $u_C = -u_L = u_2$ oraz $i_2 = C_2 \cdot \frac{du_2}{dt}$ i $u_2 = -L_2 \cdot \frac{di_2}{dt}$, a zatem

biorąc $\frac{di_2}{dt} = C_2 \cdot \frac{d^2 u_2}{dt^2}$ uzyskuje się:

$$\left. \begin{aligned} u_2 &= -L_2 \cdot C_2 \cdot \frac{d^2 u_2}{dt^2} \\ \frac{d^2 u_2}{dt^2} + \omega_2^2 \cdot u_2 &= 0 \end{aligned} \right\}$$



gdzie: $\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{C_2 \cdot L_2}}$ to częstotliwość drgań własnych obwodu $L_2 \cdot C_2$.

Równanie charakterystyczne równania (9.3) ma postać $s^2 + \varpi_2^2 = 0$, gdzie: $s_1 = j\varpi_2$ oraz $s_2 = -j\varpi_2$, stąd rozwiązanie ma postać:

$$u_{cp} = A_1 \cdot e^{j\varpi_2 \cdot t} + A_2 \cdot e^{-j\varpi_2 \cdot t} = A \cdot \sin(\varpi_2 \cdot t + \psi) = A \cdot (\sin(\varpi_2 \cdot t) \cdot \cos(\psi) + \cos(\varpi_2 \cdot t) \cdot \sin(\psi))$$

Wykorzystując warunki początkowe $u_2|_{t=0} = U_0 = A \cdot \sin(\psi)$ oraz

$$C_2 \cdot \frac{dU_2}{dt} \Big|_{t=0} = I_0 = \varpi_2 \cdot C_2 \cdot A \cdot \cos(\psi) \quad \text{ i po podstawieniu } A = \frac{U_0}{\sin(\psi)} = \frac{I_0}{\varpi_2 \cdot C_2 \cdot \cos(\psi)}$$

uzyskuje się:

$$u_2 = I_0 \cdot \sqrt{\frac{L_2}{C_2}} \cdot \sin(\omega_2 \cdot t) + U_0 \cdot \cos(\omega_2 \cdot t) \quad (9.5)$$

Zatem maksymalna wartość napięcia na indukcyjności i na pojemności wyniesie

$$U_{2\max} = \sqrt{I_0^2 \cdot \frac{L_2}{C_2} + U_2^2} \quad (9.6)$$

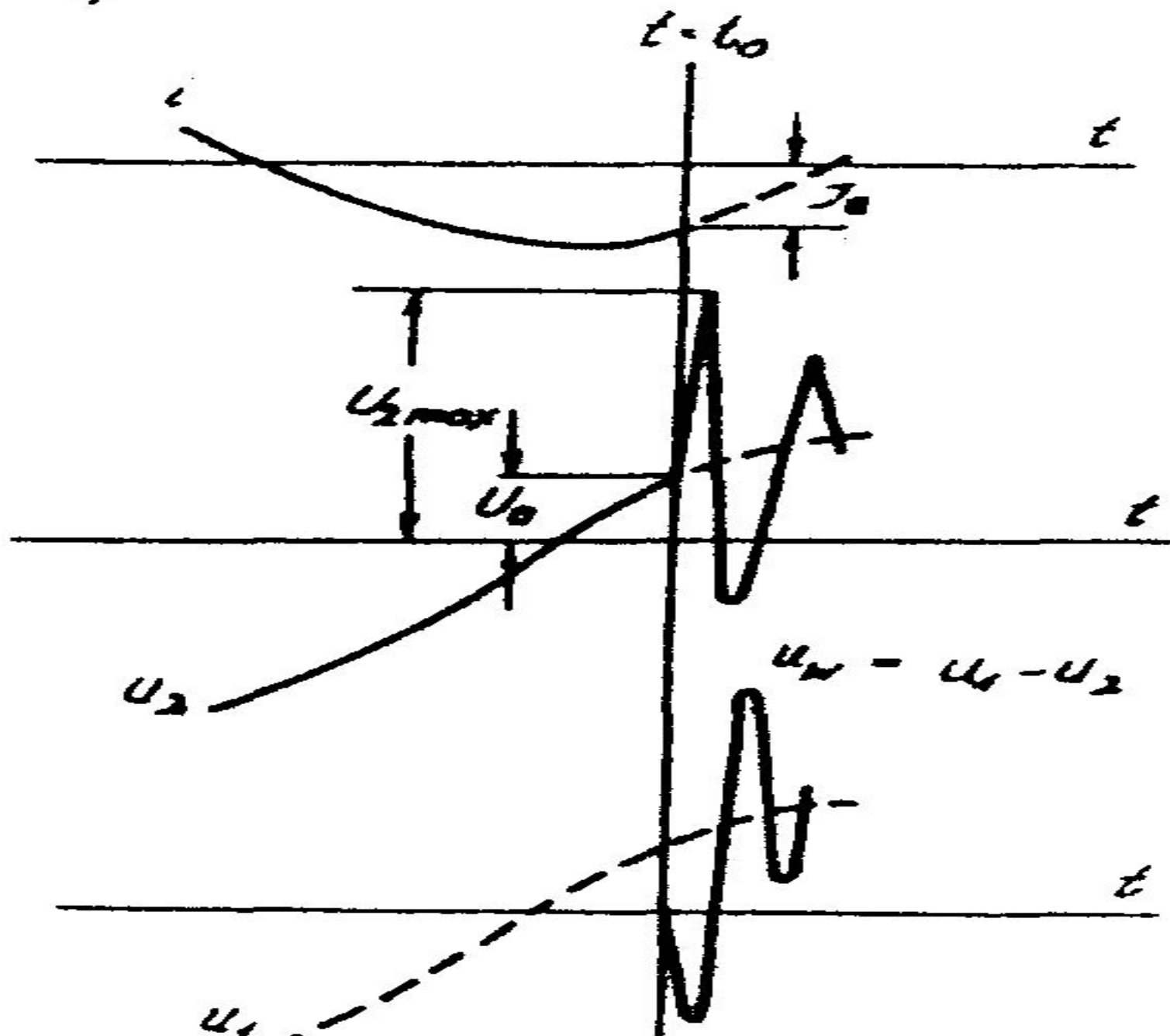
Z wzoru (9.5) można uzyskać, że:

$$\frac{C_2 \cdot U_{2\max}^2}{2} = \frac{C_2 \cdot U_0^2}{2} = \frac{L_2 \cdot I_0^2}{2} \quad (9.7)$$

co oznacza, że największa wartość napięcia występuje wtedy, gdy w trakcie drgań w obwodzie, cała energia początkowa skupia się w pojemności C_2 jako energia pola elektrycznego. W chwili początkowej energia w pojemności C_2 jest mała w porównaniu z energią w cewce L_2 . Zatem w przybliżeniu można napisać, że:

$$U_{2\max} = \sqrt{\frac{L_2}{C_2}} \cdot I_0 \quad (9.8)$$

в)



Przykładowo, dla transformatora **220 kV, 100 MVA**, o pojemności **$C_2 = 3600$ pF/fazę**, indukcyjności **$L_2 = 36$ H** i prądzie **$I_0 = 10$ A**, z wzoru (9.8) uzyska się **$U_{2\max} \approx 1000$ kV**, co daje krotność przebiegu względem maksymalnego napięcia roboczego fazowego **$k \approx 5$** .

W rzeczywistości tak wysokie wartości przebiegu nie wystąpią wskutek:

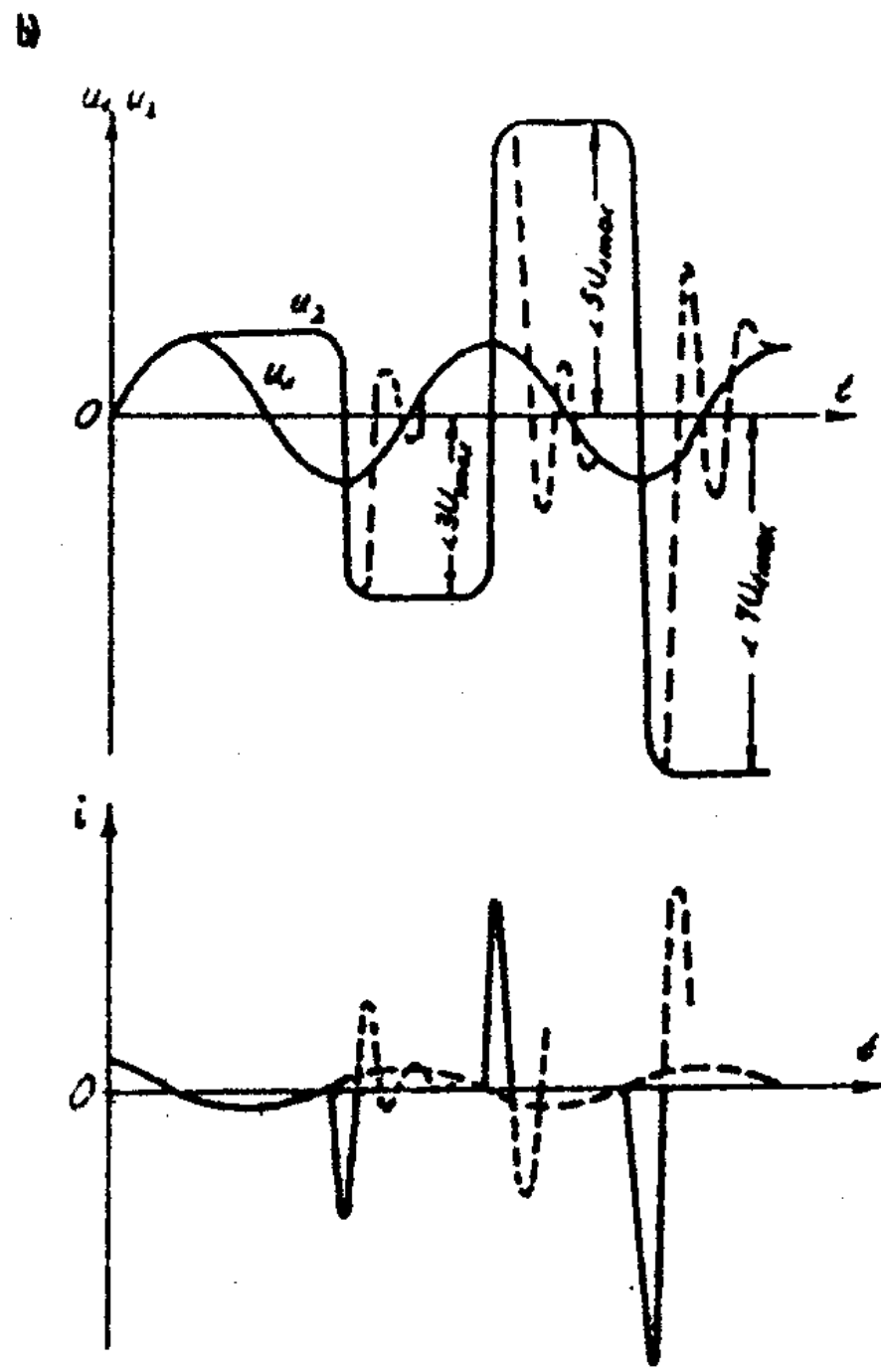
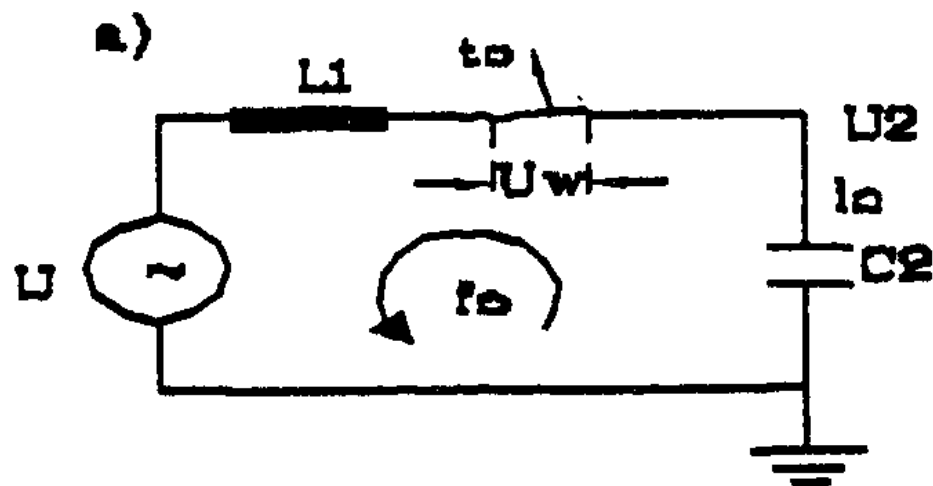
- 1) tłumienia spowodowanego rezystancjami obwodu - daje to spadek przebiegu do około 60% wartości wynikającej z wzoru przybliżonego (9.8);
- 2) zapłonów powrotnych w wyłączniku - jeśli wystąpią zapłony powrotne to część energii przejdzie z pojemności **C_2** do obwodu przed wyłącznikiem i zostanie bezpowrotnie stracona do dalszych drgań obwodu **$L_2 C_2$** . Zatem im szybszy wyłącznik tym większe przebiegi;
- 3) obciążenia transformatora - czyli, że można uniknąć przebiegu przez odpowiednią kolejność łączeń np. najpierw po stronie WN a później dopiero po stronie obciążenia czyli po stronie DN - przy prądzie większym od prądu stanu jałowego transformatora prawdopodobieństwo stromego ucięcia prądu przez wyłącznik maleje.

Do środków ochrony przed przepięciami przy wyłączaniu indukcyjności należą:

- stosowanie kabla między transformatorem a wyłącznikiem co powoduje wzrost wartości C_2 , a tym samym zmniejszenie się $U_{2\max}$;
- wyłączanie za pomocą wyłączników ze stykami bocznikowanymi rezystorami (o rezystancji rzędu $10^3 \Omega$), co pozwala na pełne rozładowanie obwodu przed całkowitym wyłączeniem;
- stosowanie ograniczników przepięć (patrz rozdz. 12).

9.3. PRZEPIĘCIA PRZY WYŁĄCZANIU POJEMNOŚCI

Dany jest najprostszy obwód pojemnościowo - indukcyjny jak na rysunku 9.5a, gdzie w chwili t_0 następuje przerwa w szeregowym połączeniu L i C w momencie gdy prąd pojemnościowy przechodzi przez zero (rys. 9.5b). Na pojemności ustala się napięcie U_C - prąd nie płynie - przed wyłącznikiem natomiast napięcie nadal zmienia się sinusoidalnie osiągając po czasie $T/2$ amplitudę biegunowości przeciwnej. Na wyłączniku pojawia się podwójna wartość napięcia. Jeśli przerwa między stykami wyłącznika wytrzyma to napięcie to nic więcej się nie będzie działo. Gdy jednakże nastąpi zapłon w przerwie, to wówczas prąd osiąga oscylacyjnie swą wartość ustaloną i podobnie powstaną oscylacje napięcia, które oscyluje wokół swej ustalonej sinusoidalnej wartości z amplitudą oscylacji równą $2U$, czyli krotność przepięcia osiąga wartość 3.



Rys. 9.5. Przebiegi przy wyłączeniu pojemności:

- a) schemat zastępczy,
- b) przebiegi czasowe napięcia i prądu

Jeśli teraz drugie przerwanie prądu nastąpi przy kolejnym przejściu przez zero podstawowej, sinusoidalnej składowej prądu, to cykl się powtórzy i przy następnym zapłonie przerwy wyłącznika powtórzy się krotność 3.

Może jednakże wystąpić przypadek, gdy przy małej częstotliwości oscylacji stanu przejściowego po pierwszym zapłonie powrotnym w wyłączniku o intensywnym chłodzeniu łuku nastąpi zgaszenie łuku w wyłączniku nie przy naturalnym przejściu prądu przez zero, lecz przy przejściu przez zero pierwszego półokresu oscylacji. Wówczas napięcie na pojemności jest bliskie $3U_{\max}$ - prąd nie płynie - styki się rozchodzą - natomiast napięcie po stronie zasilania zmienia się sinusoidalnie i np. w chwili, gdy ponownie przechodzi przez maksimum - i na wyłączniku jest $4U_{\max}$ - nastąpi zapłon w przerwie wyłącznika. Teraz oscylacje mają już amplitudę $4U_{\max}$ względem sinusoidy podstawowej, co prowadzi do przepięcia $5U_{\max}$ itd. W następnych cyklach teoretycznie można osiągnąć $7U_{\max}$ itd. W rzeczywistości wzrost ten jest ograniczony przez szybki wzrost wytrzymałości rosnącej przerwy międzystykowej, co ogranicza liczbę zapłonów powrotnych.

Obydwa omówione wyżej przypadki, czyli przerywanie prądu tylko przy jego naturalnym przejściu przez zero lub przy pierwszym przejściu przez zero oscylacji, to przypadki szczególne. Na ogół przerywanie prądu następuje przy którymś kolejnym przejściu przez zero oscylacji prądu przejściowego.

Skutecznymi środkami zaradczymi przeciwko przepięciom przy wyłączaniu pojemności są:

- 1) stosowanie wyłączników bez zapłonów powrotnych (np. z wydmuchem powietrznym);
- 2) stosowanie specjalnych ograniczników przepięć (tzw. ograniczników ciężkich - patrz rozdz. 12) dostosowanych do odprowadzania dość dużych energii zgromadzonych np. na pojemnościach linii czy baterii kondensatorów (np. linia 220 kV, 200 km, gromadzi ładunek rzędu 1 C);
- 3) stosowanie oporników tłumiących w wyłącznikach ($300\div 500\ \Omega$), które to oporniki umożliwiają rozładowanie pojemności i zmniejszenie napięć na przerwie międzystykowej.

Przebiecia tego typu są znacznie groźniejsze w sieciach UHV niż w sieciach ŚN. W sieciach ŚN mogłyby być groźne w przypadku łukowych zwarć doziemnych (patrz rozdz. 9.4). Przebiecia te nie występują, gdy zastosuje się kompensację ziemnozwarciową (rozd. 8.3.3).

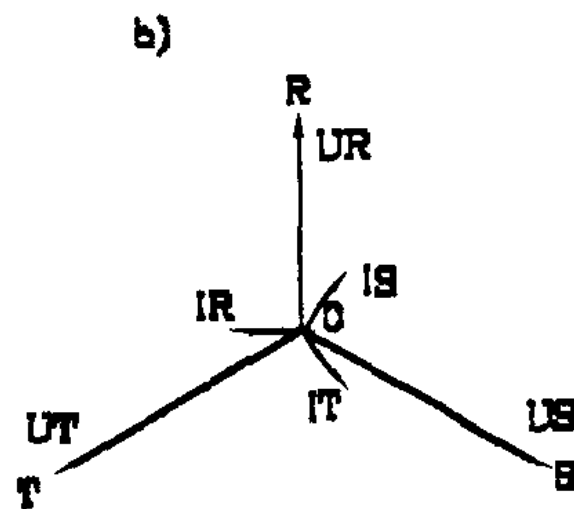
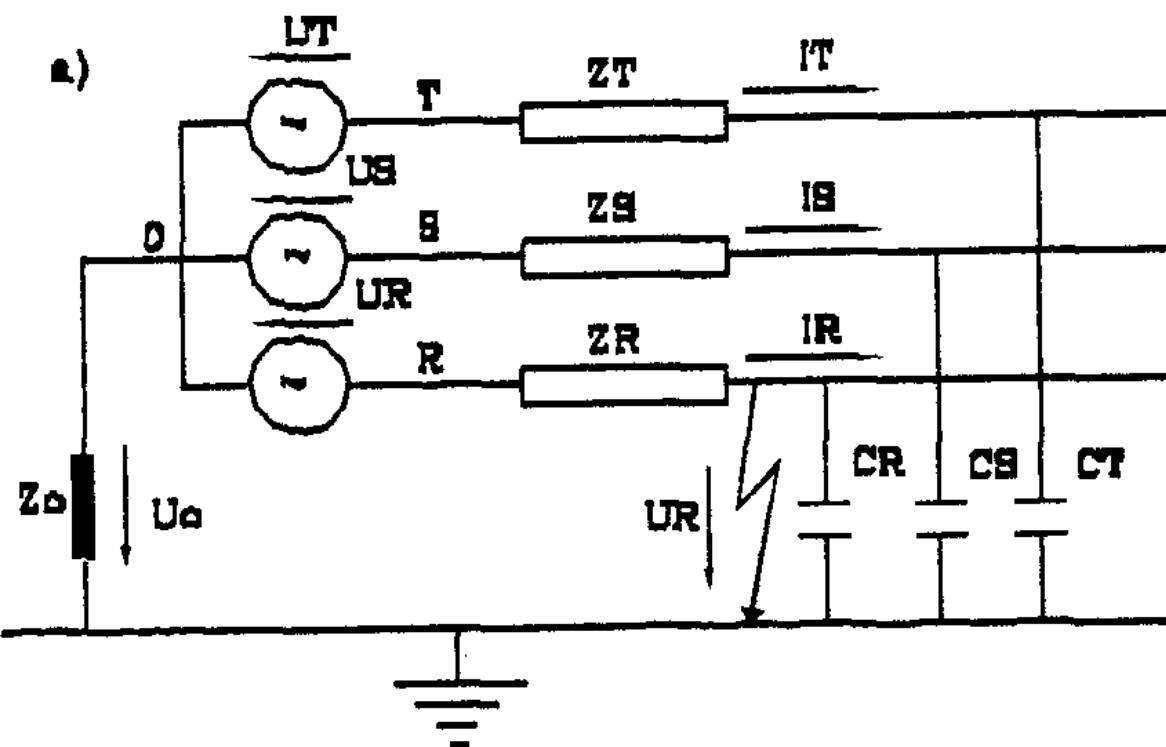
W praktyce maksymalne przebiecia przy wyłączaniu pojemności sięgają krotności $k = 2.7$, a w przypadku nowoczesnych wyłączników $k = 2$. W sieciach najwyższych napięć przebiecia te ogranicza się do $k = 1.6$.

9.4. PRZEPIĘCIA ZIEMNOZWARCIOWE W STANACH NIEUSTALONYCH

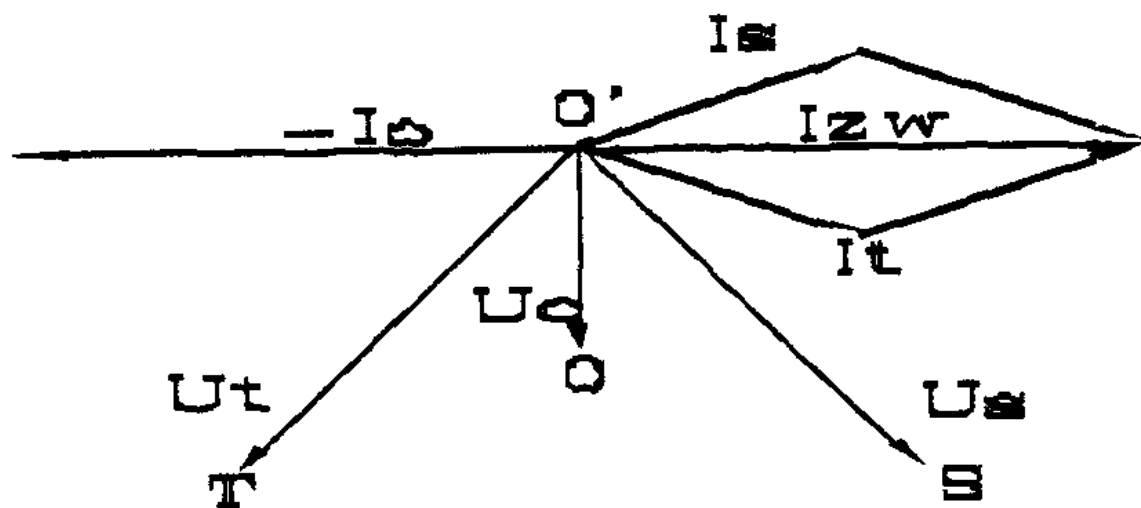
Ten rodzaj przepięć (w tablicy 18 numery 1, 2, 6) wynika ze stanów nieustalonych przy zwarcu doziemnym mającym charakter przerywanego łuku. Mogą one występować w groźnej postaci tylko w liniach ŚN z izolowanym punktem zerowym gdyż w liniach z uziemionym punktem zerowym prąd zwarcia jest tak duży, że musi nastąpić zadziałanie zabezpieczeń.

Mechanizm przepięcia przy łukowym zwarcu doziemnym w linii z izolowanym punktem zerowym jest podobny do mechanizmu przepięcia przy wyłączaniu pojemności (rozdz. 9.3) gdyż prąd łuku ma charakter pojemnościowy, zamyka się przez pojemności doziemne sieci (rys. 8.6). Występuje tu analogia do ponownych zapłonów w przerwie międzystykowej wyłącznika przy wyłączaniu pojemności. Krotność przepięcia sięga $k = 3$.

Przepięcia te są złośliwe ze względu na długi czas trwania. Mogą uszkadzać mufy kablowe i silniki wysokonapięciowe. Radykalnym sposobem jest zastosowanie kompensacji ziemnozwarciowej (rozdz. 9.3.3).



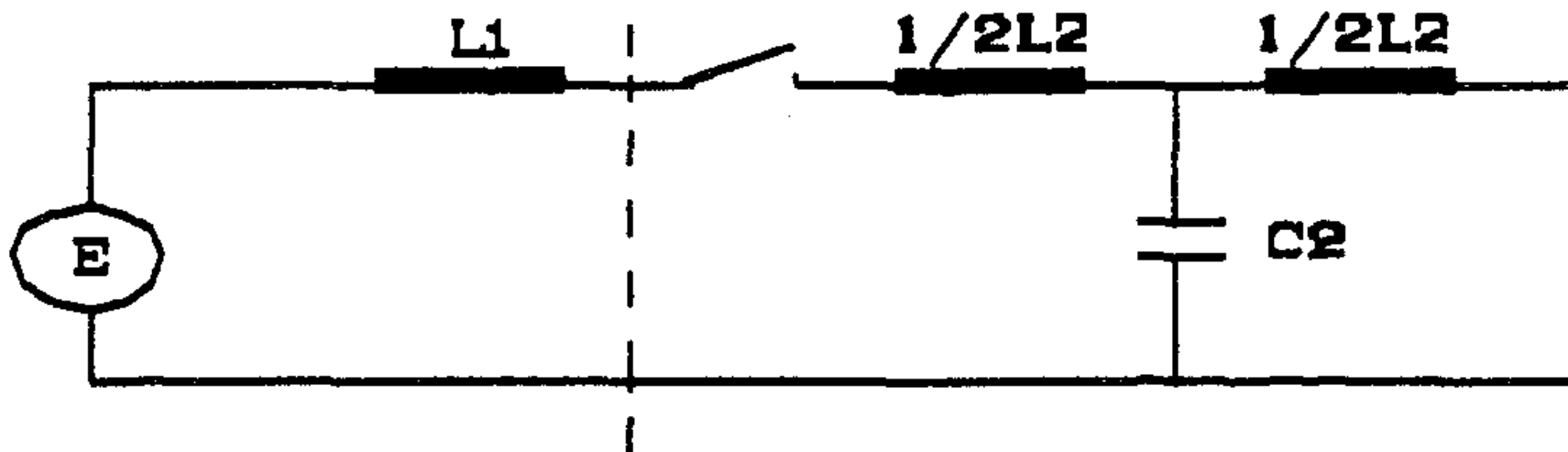
Rys. 8.6. Kompensacja
ziemnozwarciowa:
a) obwód sieci z izolo-
wanym punktem zerowym,
b) wykres wskazowy przed
zwarcie fazy R,
c) wykres wskazowy po
zwarcie fazy R



9.5. PRZEPIĘCIA PRZY ZAŁĄCZANIU LINII DŁUGICH

Tego typu przebiegi występują dopiero w sieciach powyżej 220 kV. W tablicy 18 oznaczono ten przypadek numerem 7.

Jeśli przyjąć uproszczony schemat jak na rysunku 9.6 gdzie linię długą zastąpiono czwórnikami typu T, to odpowiada to w przybliżeniu, znanemu w elektrotechnice teoretycznej, przypadkowi ładowania kondensatora przez indukcyjność.



Rys. 9.6. Ilustracja do przypadku załączania linii długiej

Po załączeniu źródła powstaje obwód drgający o częstotliwości:

$$f_p = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\left(L_1 + \frac{1}{2} \cdot L_2 \right) \cdot C_2}} \quad (9.9)$$

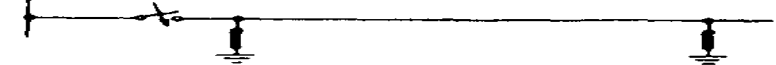
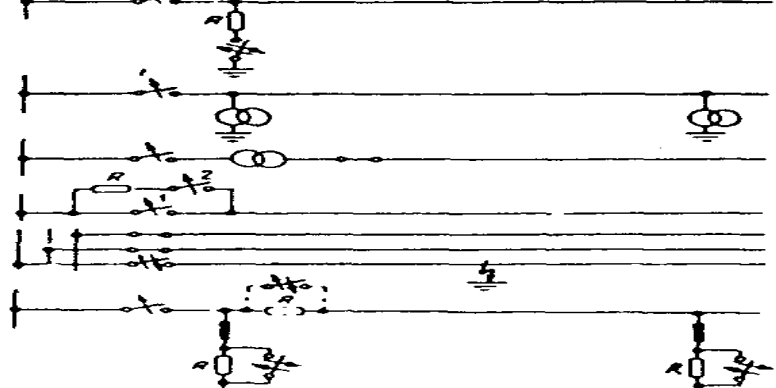
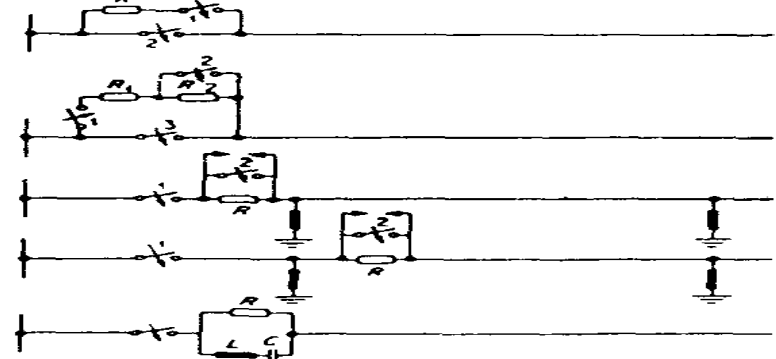

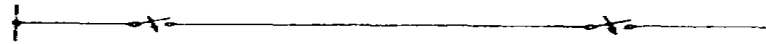

Oczywiście w układach rzeczywistych problem jest znacznie bardziej złożony, szczególnie, że nakładają się dodatkowe zjawiska jak efekt Ferrantiego (rozdz. 8.2.1) czy niejednoczesność załączania faz. Szczególnie groźne jest samoczynne powtórne załączanie (tzw. szybki SPZ) jeżeli tuż przed załączeniem linia ma napięcie szczytkowe o znaku przeciwnym niż napięcie załączane.

Środkami zaradczymi przed tego typu przebiegami są:

- 1) kompensacja dławikami równoległymi, tzw. kompensacja poprzeczna (patrz również rozdz. 8.2.1);
- 2) stosowanie łączeń synchronicznych polegających na takim łączeniu linii, by przebieg osiągał wartość minimalną. Np. w rozważanym przypadku z rysunku 9.6 załączanie linii w chwili, gdy wartość napięcia na pojemności przechodzi przez zero daje stan nieustalony bez składowej przejściowej i przebieg jest minimalizowany. Oczywiście, linia to rozłożony system pojemności i indukcyjności, zatem wybór chwili załączania jest znacznie bardziej złożony.

Drugim sposobem ograniczania omawianych przebiegów jest stosowanie ograniczników przebiegów dostosowanych do odprowadzania ładunku gromadzonego na linii (ograniczników ciężkich).

Sposoby ograniczania przepięć łączeniowych [11]

<p>1. Dławiki bocznikujące dołączane do linii w celu obniżenia przepięć o częstotliwości technicznej</p>	
<p>2. Eliminacja ładunku pozostającego na linii</p> <p>2.1. Bocznikowanie linii po wyłączeniu</p> <p>2.2. Rozładowanie linii przez indukcyjne przekładniki napięciowe</p> <p>2.3. Odłączenie linii po stronie niskiego napięcia transformatora</p> <p>2.4. Rezystory rozładowujące</p> <p>1, 2 - kolejność łączenia</p> <p>2.5. Jednofazowe wyłączenie i załączenie przy zwarciu jednofazowym</p> <p>2.6. Tłumienie oscylacji po wyłączeniu linii z dławikami bocznikującymi</p>	
<p>3. Tłumienie stanów nieustalonych przy przepięciach łączeniowych</p> <p>3.1. Jednostopniowe rezystory załączające</p> <p>3.2. Wielostopniowe rezystory załączające</p> <p>3.3. Rezystory załączające na linii między wyłącznikiem a dławikiem bocznikującym</p> <p>3.4. Rezystor załączający po liniowej stronie dławika bocznikującego</p> <p>3.5. Obwód rezonansowy (pochłaniacz fali) włączony do linii</p>	
<p>4. Łączenie w najdogodniejszej chwili czasowej</p> <p>4.1. Załączanie synchroniczne</p> <p>4.2. Ponowne załączenie przy minimum napięcia na wyłączniku</p>	
<p>5. Jednoczesne załączanie na obu końcach linii</p>	
<p>6. Stosowanie odgromników</p> <p>a) załączanie nieobciążonej linii</p> <p>b) odłączanie indukcyjnie obciążonych transformatorów</p> <p>c) odłączanie dławików bocznikujących</p>	

9.6. WIELKOŚCI PRZEPIEĆ ŁĄCZENIOWYCH

Postęp w dziedzinie wyłączników, odgromników zaworowych jak również w rozeznaniu mechanizmów przebiegów oraz opłacalność stosowania coraz bardziej skomplikowanych zabiegów w celu ograniczenia wartości przebiegów powodują, że krotności przebiegów łączeniowych maleją ze wzrostem napięć znamionowych sieci.

W tabeli 3 zestawiono sposoby ograniczania poszczególnych rodzajów przebiegów łączeniowych.

T a b e l a 20

Maksymalne poziomy przebieg łączeniowych

Napięcie znamionowe	kV	110÷220	500	765	1100
Krotność przebiegu	j.w.	$\leq 3 \div 2.5$	< 2.3	< 2.1	< 1.8

W tabeli 20 zestawiono maksymalne poziomy przebieg łączeniowych dla poszczególnych zakresów napięć znamionowych linii. Dla projektowanych linii EHV przewiduje się dalszy spadek krotności przebiegów łączeniowych.