

tablicy 3.2 przy zmianach napięcia pierwotnego, wymaganych dla przekładników zabezpieczeniowych tj. w przedziale  $(0,05 \div k_N)U_{1n}$ .

### 3.3. Stany przejściowe w przekładnikach

Przekładniki napięciowe zabezpieczeniowe powinny transformować poprawnie przebiegi napięciowe również w przypadkach bardzo szybkich zmian napięcia mierzonego, jakie wystąpią np. przy powstaniu zwarcia w sieci. Wymaganie to staje się szczególnie aktualne w miarę wprowadzania coraz szybciej działających zabezpieczeń.

Celem sprawdzenia cech przekładnika napięciowego w tym zakresie, konieczne jest przeprowadzenie analizy stanu przejściowego, jaki wystąpi w nim przy skokowych zmianach napięcia mierzonego.

Analizując stan przejściowy w przekładniku indukcyjnym, rozpatrzmy schemat przedstawiony na rys.3.14. W uproszczonym schemacie zastępczym przekładnika pominięto zarówno indukcyjność rozproszenia jak również indukcyjność obciążenia. Wyłącznik W odtwarza zwarcie w obwodzie pierwotnym przekładnika. Z chwilą zamknięcia wyłącznika W napięcie na zaciskach wejściowych przekładnika spada do zera i od tej chwili napięcie układu elektroenergetycznego nie ma wpływu na zjawiska występujące w przekładniku.

Napięcie na zaciskach wtórnych przekładnika będzie miało przebieg:

$$u_2 = U_2(0_+)e^{-t/T_p} \quad (3.27)$$

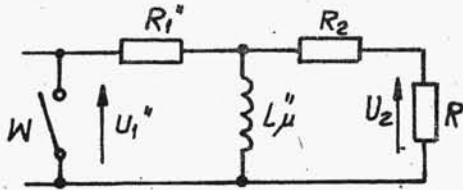
przy czym:

$U_2(0_+)$  - napięcie na zaciskach wtórnych w chwili  $0_+$  po zamknięciu wyłącznika W,

$$T_p = \frac{L''_u(R''_1 + R_2 + R)}{R''_1(R_2 + R)} - \text{stała czasowa przekładnika.}$$

Wartość napięcia  $U_2(0_+)$  zależy od chwili wystąpienia zwarcia tj. zamknięcia wyłącznika W.

Można tu rozróżnić dwa przypadki:

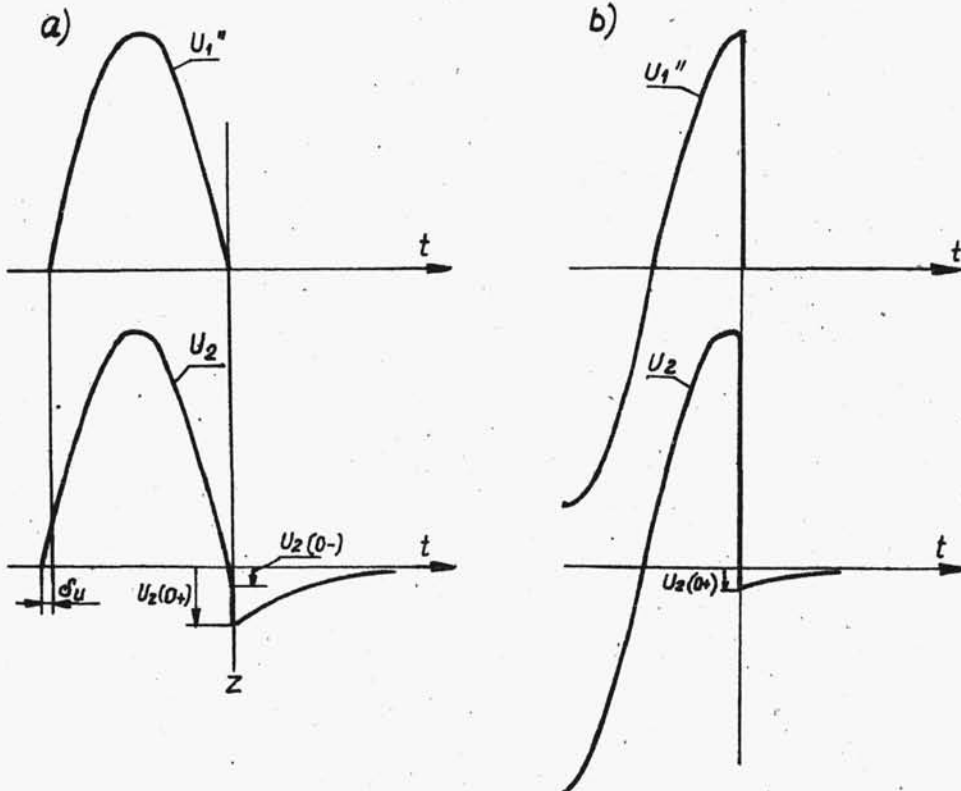


Rys.3.14. Schemat zastępczy przekładnika indukcyjnego do analizy stanów przejściowych

a) zwarcie występuje w chwili przechodzenia napięcia pierwotnego przez wartość zerową,

b) zwarcie występuje w chwili przechodzenia napięcia pierwotnego przez maksimum.

Przebiegi przejściowe napięć w obu przypadkach przedstawiono na rys.3.15:



Rys.3.15. Przebiegi przejściowe napięcia wtórnego w przekładniku indukcyjnym przy różnych warunkach początkowych zwarcia po stronie pierwotnej: a) napięcie pierwotne w chwili zwarcia przechodzi przez zero, b) napięcie w chwili zwarcia przechodzi przez maksimum

Napięcie po stronie wtórnej przekładnika zmienia się w chwili zwarcia skokowo (pomija się pojemności w obwodzie) od

wartości  $U_2(0_-)$  do wartości  $U_2(0_+)$ , a następnie maleje do zera. Napięcie  $U_2(0_+)$  - zgodnie z prawami komutacji - jest równe iloczynowi wartości prądu magnesującego i rezystancji wypadkowej przekładnika po zwarcu strony pierwotnej:

$$U_2(0_+) = \frac{i_\mu(0) R_1''(R_2+R)}{R_1'' + R_2 + R}. \quad (3.28)$$

W pierwszym przypadku (rys.3.15a), zgodnie z uproszczonym wykresem wektorowym na rys.3.14, będzie:

$$i_\mu(0) = I_\mu \cos \delta_u, \quad (3.29)$$

$$a: \quad U_2(0_+) = \frac{I_\mu'' R_1''(R_2+R)}{R_1'' + R_2 + R} \cos \delta_u. \quad (3.30)$$

W drugim przypadku (rys.3.15b):

$$i_\mu(0) = I_\mu \sin \delta_u, \quad (3.31)$$

$$a: \quad U_2(0_+) = \frac{I_\mu'' R_1''(R_2+R)}{R_1'' + R_2 + R} \sin \delta_u. \quad (3.32)$$

Napięcie to będzie znacznie mniejsze od napięcia w przypadku - a), gdyż chwilowa wartość prądu magnesującego jest obecnie znacznie mniejsza od wartości, która występowała w poprzednim przypadku.

Stosunek wartości prądu magnesującego w chwili zwarcia w obu przypadkach wynosi:

$$\frac{[i_\mu(0)]_{(b)}}{[i_\mu(0)]_{(a)}} = \operatorname{tg} \delta_u.$$

Tak więc i napięcie w przypadku - b) będzie znacznie mniejsze niż w a):

$$[u_2(0_+)]_{(b)} = [u_2(0_+)]_{(a)} \operatorname{tg} \delta_u.$$

Wartość stałej czasowej zanikania składowej przejściowej ( $T_p$ ) wynosi zwykle kilkadziesiąt milisekund.

Ogólnie można stwierdzić, że przekładniki napięciowe indukcyjne nie wnoszą dużych błędów do transformacji napięć w przypadku zwarcia w obwodach pierwotnych.

Innym przypadkiem, w którym występują w przekładniku przebiegi przejściowe jest wyłączenie napięcia zasilającego sieć, w której zainstalowany jest przekładnik. Napięcie wtórne zanika wówczas do zera od wartości początkowej, zależnej jak poprzednio od fazy napięcia w chwili rozpoczęcia procesu przejściowego. Przyjmując, że ostateczne wyłączenie obwodu pierwotnego nastąpi wyłącznikiem, przy naturalnym przejściu prądu przez zero, faza napięcia w chwili rozpoczęcia stanu przejściowego zależy od kąta  $\varphi$  pomiędzy prądem i napięciem w obwodzie pierwotnym. Zakładając  $\varphi = 0$ , otrzymuje się przypadek - a), rozpatrywany poprzednio. Warto zwrócić uwagę, że  $U_2(0_+)$  osiągnie teraz większe wartości niż w przypadku zwarcia strony pierwotnej, gdyż rezystancja wypadkowa przekładnika jest obecnie większa niż przy zwarcu:

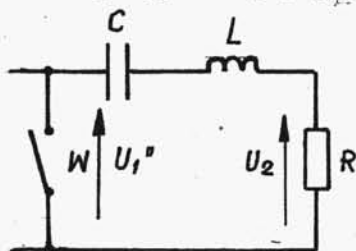
$$I''_{\mu} (R_2 + R) \cos \delta_u > \frac{U''_{\mu} R_1'' (R_2 + R)}{R_1'' + R_2 + R} \cos \delta_u.$$

Natomiast stała czasowa zanikania wynosi obecnie

$$T_p = \frac{L''_{\mu}}{R_2 + R}$$

i ma wartość mniejszą niż poprzednio, co oznacza, że przebiegi przejściowe będą zanikały szybciej.

W przypadku gdyby w obwodzie występowała pojemność, np. po stronie pierwotnej przekładnika



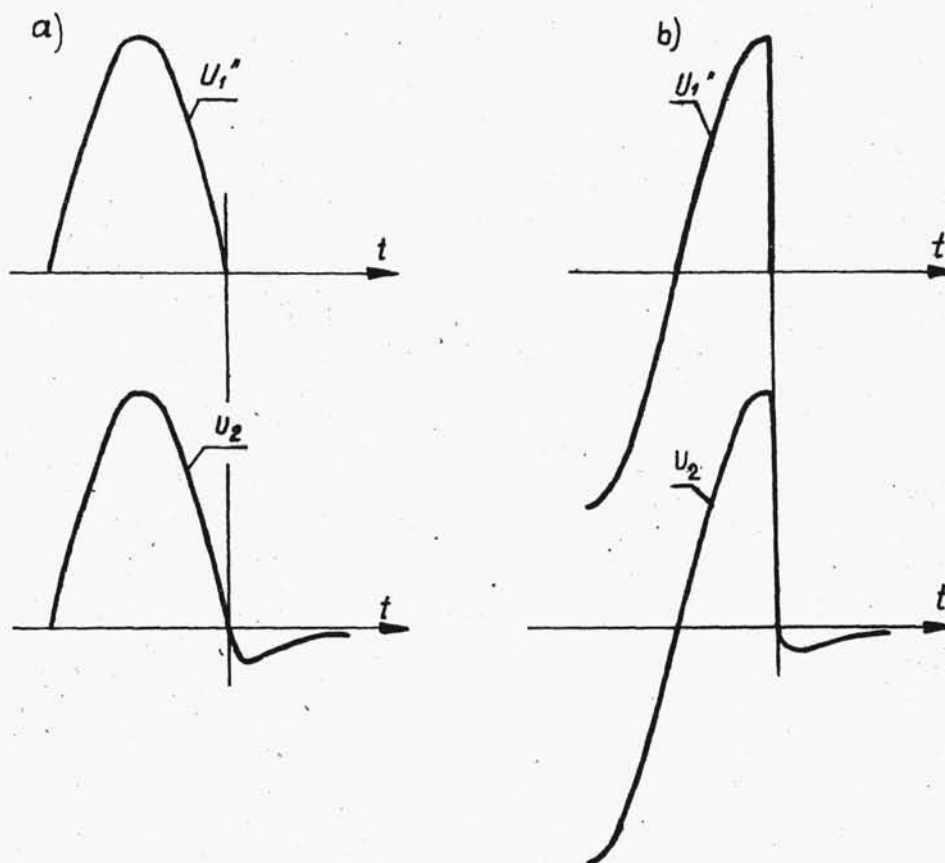
względnie jako jego obciążenie, to stany przejściowe bardzo się komplikują, przy czym mogą one mieć charakter oscylacji tłumionych o zmiennej częstotliwości.

Rys. 3.16. Uproszczony schemat zastępczy przekładnika pojemnościowego do analizy stanów przejściowych

Omawiając stan przejściowy w przekładniku pojemnościowym rozpatrzmy schemat przedstawiony na rys. 3.16. W uproszczonym schemacie za-

stępczym przekładnika pominięto gałąź magnesującą i rezystancję uzwojenia pierwotnego. Wyłącznik  $W$  - jak poprzednio - od-  
tworza zwarcie w obwodzie pierwotnym. Z chwilą zamknięcia  $W$   
napięcie na zaciskach pierwotnych przekładnika spada do ze-  
ra i rozpoczyna się stan przejściowy w przekładniku, przy czym  
od tej chwili nie jest on już zależny od sieci.

Jak wynika z analizy stanu przejściowego w przekładniku  
pojemnościowym [11], parametry  $L$ ,  $C$ ,  $R$  w rzeczywistych prze-  
kładnikach mają takie wartości, że nie występują drgania, a  
przebiegi przejściowe są kombinacją liniową funkcji wykładni-  
czych tłumionych.



Rys.3.17. Przebiegi przejściowe napięcia wtórnego w przekładni-  
ku pojemnościowym przy różnych warunkach początkowych zwarcia  
po stronie pierwotnej: a) napięcie pierwotne w chwili zwarcia  
przechodzi przez zero, b) napięcie pierwotne w chwili zwarcia  
przechodzi przez maksimum

Ponieważ stan przejściowy zależy od warunków początkowych, na rys.3.17 przedstawiono przebiegi przejściowe dla dwóch różnych faz napięcia w chwili zwarcia (wg [11]).

W przypadku - a), gdy napięcie pierwotne w chwili zwarcia przechodzi przez zero<sup>x)</sup>, przebieg przejściowy jest wywołany rozładowaniem energii nagromadzonej w pojemności C.

Maksymalna wartość napięcia wtórnego wyraża się w przybliżeniu:

$$u_{2m} = \frac{U_1''}{\omega R_w C''}$$

i może osiągać wartość  $(0,1 \div 0,2)U_1''$ . Dla zmniejszenia wartości  $u_{2m}$  należałoby stosować możliwie duże wartości  $R_w$  i  $C''$ . Czas trwania przebiegu przejściowego może wynosić kilkadziesiąt ms.

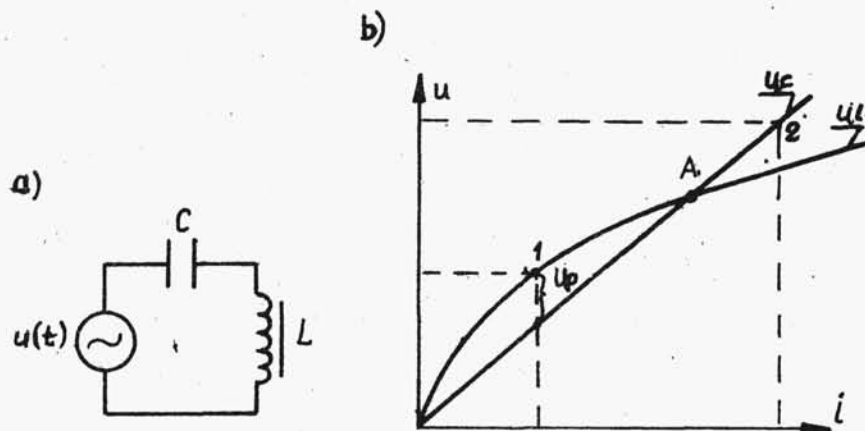
W przypadku - b), gdy w chwili zwarcia napięcie pierwotne przechodzi maksimum, przebieg przejściowy jest związany z rozładowaniem energii nagromadzonej w dławiku. Amplituda napięcia przejściowego jest znacznie mniejsza niż w przypadku - a).

Przekładniki napięciowe zainstalowane w układach elektroenergetycznych mogą być niekiedy przyczyną tzw. przepięć ferrozonansowych. Jest to zjawisko bardzo rzadkie, aczkolwiek nie wykluczone w przypadku przekładników indukcyjnych, natomiast znacznie bardziej prawdopodobne w przypadku przekładników pojemnościowych.

Zjawisko ferrozonansu występuje przy szeregowym połączeniu indukcyjności nieliniowej (np. gałąź magnesowania przekładnika) oraz pojemności zasilanych ze źródła napięcia (rys.3.18a). W przypadku, gdy przebiegi  $u_L = f(i)$  i  $u_C = f(i)$  przecinają się (jak to pokazano na rysunku), w miejscu przecięcia występuje zjawisko ferrozonansu. Oznacza to, że spadki napięcia  $u_C$  i  $u_L$  wzajemnie się kompensują, a napięcie przyłożone z zewnątrz ( $u$ ) jest równe zeru (rys.3.18b). Wartość prądu jest wówczas ograniczona jedynie impedancją źródła i może osią-

x) Napięcie wtórne również przechodzi przez zero, gdyż przyjmuje się pełną kompensację spadków napięcia na L i C.

gać znaczne wartości, powodując jednocześnie występowanie znacznych spadków napięcia na L i C.



Rys.3.18. Rysunek objaśniający zjawisko ferre rezonansu: a) schemat obwodu, b) charakterystyki napięciowo-prądowe elementów

W rzeczywistych obwodach występuje stratność elementów L i C tak, że w punkcie rezonansu napięcie zewnętrzne nie jest równe zero.

Organiom ferre rezonansowym mogą towarzyszyć znaczne przepięcia i przetężenia; mogą również występować zakłócenia w obwodach przyrządów przyłączonych do przekładnika.

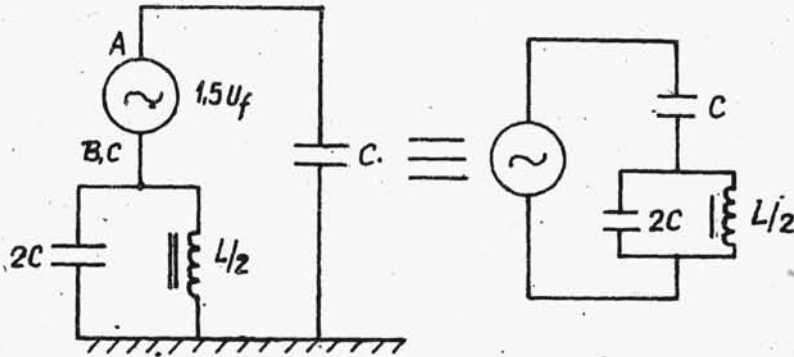
Z przebiegów na rys.3.18b wynika, że napięcie zasilania -  $u$  - jest różnicą spadków napięcia na indukcyjności  $u_L$  i pojemności  $u_C$ ,  $u = u_L - u_C^x$ ). Przy podnoszeniu napięcia zasilającego wzrasta prąd płynący w obwodzie oraz wywołane spadki napięć  $u_L = \omega L I$  i  $u_C = \frac{I}{\omega C}$ , aż do wartości napięcia zasilającego równej tzw. napięciu przewrotu  $U_p$ . Jest to wartość będąca największą różnicą pomiędzy przebiegami  $u_L$  i  $u_C$  na lewo od punktu A. Przy dalszym podwyższaniu napięcia zasilania nastąpi nagłe przejście od punktu 1 do punktu 2 (rys.3.18b), któremu towarzyszy znaczne podwyższenie napięcia na elementach L i C jak i zwiększenie prądu. Jest to tzw. zjawisko przewrotu.

x) Na lewo od punktu A na rys.3.18b obwód ma charakter indukcyjny, na prawo od tego punktu - pojemnościowy.



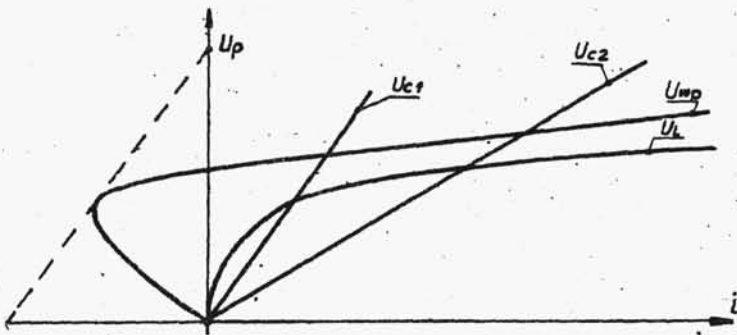


równoległy ( $2C$  i  $L/2$ ) ma charakter pojemnościowy, a następnie indukcyjny.



Rys. 3.20. Schemat zastępczy sieci z rys. 3.19

Wartość napięcia zasilania  $u_p$ , przy której wystąpi zjawisko ferrozrezonansu, może być określana metodą wykreślną. Wartość tę uzyskuje się jako miejsce przecięcia z osią  $y$  prostej równoległej do  $u_{C1}$  i stycznej do charakterystyki wypadkowej (na rys. 3.21 prosta narysowana linią przerywaną).

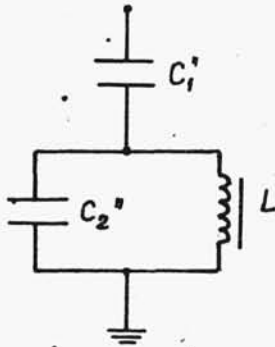


Rys. 3.21. Charakterystyki  $U = f(i)$  dla elementów ze schematu zastępczego wg rys. 3.20

Dla rzeczywistych parametrów sieci oraz danych konstrukcyjnych przekładników indukcyjnych, możliwość wystąpienia zjawiska ferrozrezonansu jest mało prawdopodobna.

Znacznie bardziej prawdopodobne są drgania ferrozrezonansowe w przekładniku pojemnościowym, o uproszczonym schemacie (rys. 3.22), z którego wynika, że drgania są tu możliwe w samym przekładniku, bez wpływu sieci. Drgania te mogą występować

przy dostatecznie dużym napięciu wejściowym (tj. przy wartości  $u_p$  na rys.3.21). Stan taki jest możliwy np. przy przebiegach łączeniowych pojawiających się w układzie (załączanie sieci, przełączenie długotrwałe wywołane zwarciem doziemnym innych faz).



Rys.3.22. Uproszczony schemat zastępczy przekładnika pojemnościowego (bez obciążenia): L-indukcyjność gałęzi magnesowania członu indukcyjnego; pozostałe elementy schematu zastępczego przekładnika indukcyjnego pominięto

Drgania ferrozrezonansowe mogą być również wywołane zakłóceniami w dolnym członie dzielnika.

Podatność przekładnika napięciowego na drgania jest zwykle sprawdzana doświadczalnie przez wytwórcę.

Dla uniknięcia szkodliwego wpływu drgań ferrozrezonansowych na pracę przekładników pojemnościowych, stosowane są środki tłumiące drgania. Do najprostszych należy stosowanie rezystora włączonego równolegle do zacisków uzwojenia wtórnego indukcyjnego członu przekładnika.

### 3.4. Zasady konstruowania przekładników

Pierwszą fazą konstruowania przekładnika napięciowego jest jego wstępne obliczenie, obejmujące wyznaczenie geometrii, parametrów uzwojeń oraz sprawdzenie podstawowych funkcji (np. dokładności transformacji).

Przystępującemu do konstruowania konieczna jest znajomość podstawowych cech i parametrów znamionowych, jakimi ma się charakteryzować przekładnik. Będą to: rodzaj przekładnika (do pomiaru napięcia międzyfazowego lub fazowego), napięcie znamionowe pierwotne i wtórne, moc znamionowa obciążenia w określonej klasie dokładności, funkcja przekładnika (pomiarowy lub zabezpieczeniowy).

Pierwszą kwestią, która wymaga rozstrzygnięcia, jest rodzaj konstrukcji z uwagi na zastosowaną izolację główną. Zgodnie z obowiązującymi aktualnie zasadami konstrukcyjnymi, dla napięć średnich ( $\leq 30$  kV) będzie to wykonanie wewnętrzne