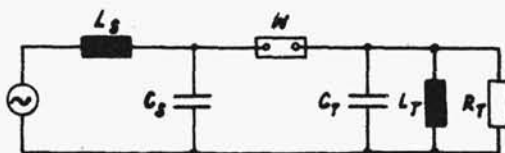


2.4. Łączenie obwodów w specjalnych warunkach pracy

W praktyce eksploatacyjnej układów elektroenergetycznych występują operacje powodujące powstawanie stanów przejściowych stwarzających ciężkie warunki pracy zarówno dla łączników, jak i dla całego układu. Do takich operacji można zaliczyć przede wszystkim wyłączanie małych prądów indukcyjnych oraz łączenie baterii kondensatorów.

A. Zagadnienie wyłączania małych prądów indukcyjnych nabiera znaczenia przy najwyższych napięciach (≥ 110 kV) i praktycznie dotyczy głównie wyłączania prądów magnesujących, transformatorów w stanie jałowym. Podczas wyłączania prądów magnesujących o wartościach znacznie mniejszych od prądów obciążeniowych, w wyłączniku występuje zjawisko niestabilności łuku prowadzące do bardzo szybkiego zgaszenia łuku (tzw. zjawisko zrywania prądu przed jego przejściem przez wartość zerową). Operacja ta powoduje powstawanie przepięć o znacznych wartościach. Rozpatrzmy uproszczony jednofazowy schemat zastępczy obwodu (rys. 2.24). Po nagłym zerwaniu prądu (o wartości chwilowej i_0) w obwodzie transformatora energia magnetyczna skojarzona z indukcyjnością główną transformatora L_T zamienia się przez ładowanie pojemności



Rys.2.24. Jednofazowy uproszczony schemat zastępczy obwodu wyłączania transformatora w stanie jałowym. L_s, C_s - parametry układu zasilającego; L_T, C_T, R_T - parametry zastępcze transformatora, W - wyłącznik

C_T w energię elektryczną. Powoduje to powstanie między zaciskami transformatora przejściowego przebiegu napięcia, którego amplituda zależna jest od wartości chwilowej prądu i_0 w chwili zerwania, oporności charakterystycznej transformatora

$Z_T = \sqrt{\frac{L_T}{C_T}}$ oraz od warunków tłumienia. Częstotliwość przebiegu przejściowego jest funkcją parametrów wyłączanego transformatora i wynosi przeciętnie kilkaset Hz.

Jeżeli założymy dla uproszczenia, że indukcyjność transformatora jest liniowa oraz pominiemy tłumienie występujące w obwodzie, to przebieg napięcia przejściowego można wyrazić wzorem

$$u(t) = -U_m \sqrt{\left(\frac{\omega_{o1}}{\omega}\right) \sin^2 \psi_1 + \cos^2 \psi_1} \sin(\omega_{o1} t + \xi) =$$

$$= -i_o \sqrt{\frac{L_T}{C_T}} \sin(\omega_{o1} t + \xi), \quad (2.19)$$

gdzie U_m - wartość amplitudy napięcia w stanie ustalonym,

$$\omega_{o1} = \sqrt{\frac{1}{L_T C_T}} - \text{pulsacja drgań własnych obwodu transformatora,}$$

i_o - wartość chwilowa prądu w momencie zerwania

$$\operatorname{tg} \xi = -\frac{\omega}{\omega_{o1}} \operatorname{ctg} \psi_1,$$

ψ_1 - faza prądu w chwili zerwania (zmienna w przedziale $0 \dots \pi$).

Największa wartość przebiegu napięcia występuje przy zerwaniu prądu w maksimum (dla $\psi_1 = \frac{\pi}{2}$) i wynosi

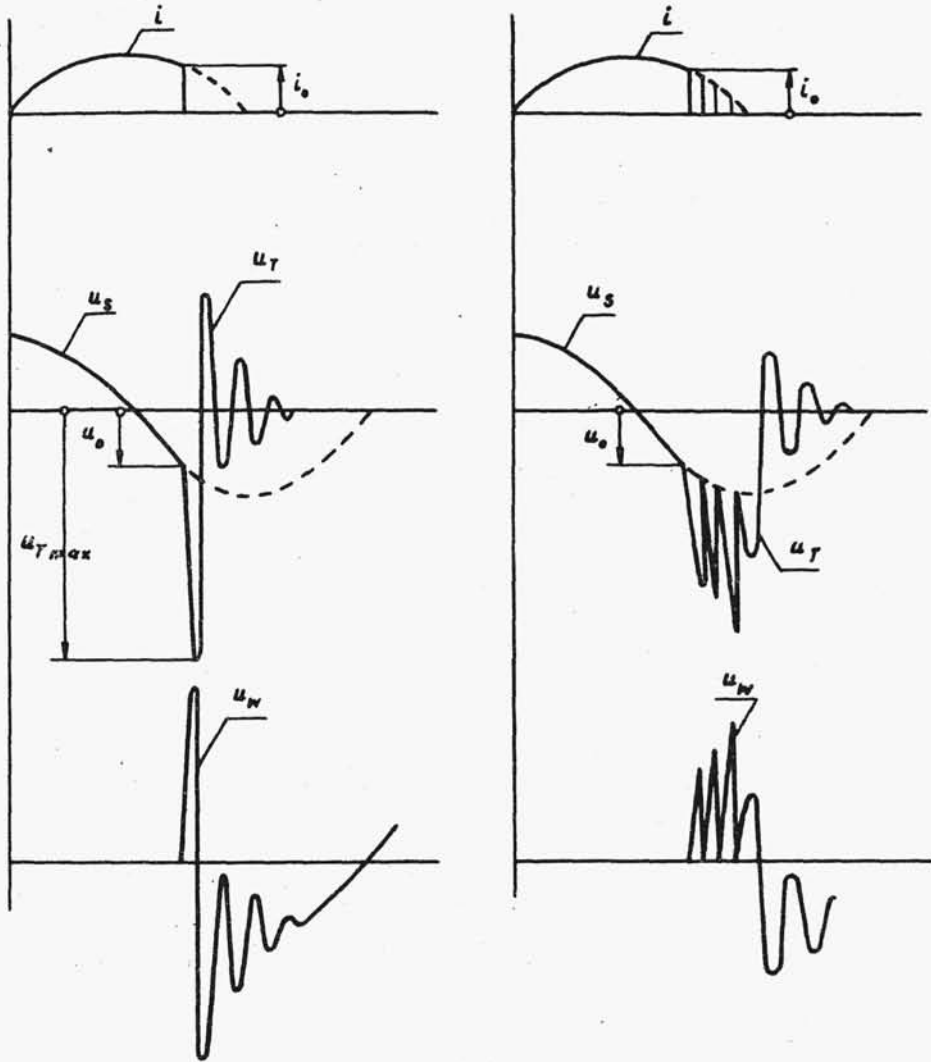
$$u_m = U_m \frac{\omega_{o1}}{\omega} = I_m \sqrt{\frac{L_T}{C_T}}, \quad (2.20)$$

gdzie I_m - amplituda prądu wyłączanego.

W rzeczywistości przebieg napięcia ograniczany jest zarówno tłumieniem (głównie w stalowym rdzeniu transformatora), jak również wytrzymałością przerwy w biegunie wyłącznika. Wpływ wyłącznika na wartość przebiegu napięcia ilustrują przebiegi przedstawione na rys.2.25. Na rys.2.25a przedstawione są przebiegi napięcia przejściowego występujące między zaciskami transformatora (u_T) oraz wyłącznika (u_W), w przypadku braku zapłonów w przerwie biegunu wyłącznika, na rys.2.25b z występowaniem zapłonów w wyłączniku. Gdy napięcie między zaciskami

a)

b)



Rys.2.25. Przebiegi napięć podczas wyłączania prądu magnesującego transformatora w obszarze niestabilności łuku: a - bez zapłonów powrotnych w wyłączniku, b - z występowaniem zapłonów powrotnych w wyłączniku. u_s - napięcie sieci zasilającej, u_T - napięcie między zaciskami transformatora, u_W - napięcie między zaciskami wyłącznika

wyłącznika (u_W) przekroczy wartość wytrzymałości powrotnej tej przerwy następuje zapłon w wyłączniku. Natychmiast po zapłonie

następuje wyrównanie napięć na pojemnościach transformatora C_T i układu zasilającego C_S w szybkozmiennym (kilkadzieśiąt kHz) przejściowym przebiegu nie zaznaczonym na rysunku. Po wytłumieniu się tego przebiegu napięcie przyłożone do transformatora przyjmuje wartość napięcia zasilającego. Następuje ponowne zerwanie prądu, a między zaciskami transformatora i wyłącznika pojawia się ponownie napięcie przejściowe, które narasta aż do następnego zapłonu w wyłączniku, występującego teraz przy nieco większej wartości napięcia (wzrasta bowiem wytrzymałość przerwy w miarę rozchodzenia się styków wyłącznika). Zjawisko to powtarza się wielokrotnie, aż do chwili, w której napięcie międzyzaciskowe nie spowoduje już zapłonu w wyłączniku, tzn. do chwili definitywnego wyłączenia. Amplituda napięcia przejściowego będzie wówczas mniejsza niż w przypadku bez zapłonów, ponieważ podczas kolejnych zapłonów energia magnetyczna zgromadzona w indukcyjności transformatora przy mniejszej wartości zrywanego prądu będzie miała mniejszą wartość.

Przebiegi występujące podczas wyłączania prądów magnesujących transformatorów w stanie jałowym stwarzają poważne zagrożenie dla izolacji układu, jak również mogą prowadzić do bardzo poważnych w skutkach zwarć następnych. W celu zmniejszenia wartości tych przebiegów stosowane są rozmaite środki, z których wymienić należy:

- 1) zabiegi konstrukcyjne w wyłączniku, jak np. stosowanie oporów równoległych do przerwy międzyzaciskowej służących do rozładowania energii transformatora,
- 2) stosowanie odpowiednich odgromników ograniczających wartość przebiegu,
- 3) zastosowanie między wyłącznikiem i transformatorem odcinka kabla. Dodatkowa pojemność kabla powoduje zmniejszenie wartości przebiegu (patrz wzór 2.20).

Przykład 2.18

Wyznaczyć maksymalną wartość przebiegu (przy pominięciu tłumienia) występującego przy zerwaniu prądu między zaciskami transformatora, którego schemat przedstawiono na rys.2.26.

Na podstawie danych parametrów transformatora określamy:
- prąd magnesujący w stanie ustalonym

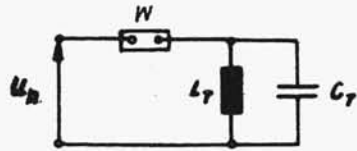
$$I_T = \frac{U_{nT}}{x_T} = \frac{U_{nT}}{\omega L_T} = \frac{110 \cdot 10^3 \text{ V} \cdot \text{s}}{\sqrt{3} \cdot 314 \cdot 13,1 \text{ H}} = 15,5 \text{ A},$$

o amplitudzie

$$I_{Tm} = \sqrt{2} I_T = \sqrt{2} \cdot 15,5 = 22 \text{ A},$$

- oporność charakterystyczną transformatora

$$Z_T = \sqrt{\frac{L_T}{C_T}} = \sqrt{\frac{13,1 \text{ H}}{0,1 \cdot 10^{-6} \text{ F}}} = 11500 \Omega$$



Rys. 2.26. Schemat zastępczy transformatora do przykładu 2.18.
 $U_n = 110/\sqrt{3} \text{ kV}$; $L_T = 13,1 \text{ H}$; $C_T = 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ F}$

Maksymalna wartość przepięcia występuje dla zerwania prądu przy amplitudzie i wynosi

$$u_{\max} = I_m Z_T = 22 \cdot 11500 = 252 \text{ kV}.$$

Współczynnik przepięcia

$$k_u = \frac{u_m}{U_m} = \frac{252 \sqrt{3}}{110 \sqrt{2}} = 2,75.$$

B. W sieciach elektrycznych średnich i największych napięć coraz częściej stosowane są równoległe baterie kondensatorów, jako kompensatory mocy biernej. Jednym z zasadniczych problemów występujących przy bateriach są zjawiska łączeniowe. Łączenia baterii wywołują stany przejściowe prądów i napięć, którym mogą towarzyszyć znaczne przetężenia i przepięcia.

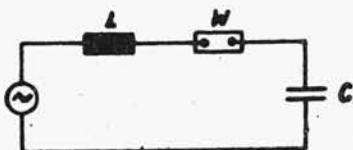
Przy załączaniu baterii o pojemności C w obwodzie (rys. 2.27) występuje przejściowy przebieg prądu, którego amplituda przy pominięciu tłumienia wyraża się

$$i_m = - I_m \sqrt{\left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2 \cos^2 \psi_1 + \sin^2 \psi_1}, \quad (2.21)$$

gdzie I_m - prąd baterii w stanie ustalonym (wartość amplitudy),

$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ - pulsacja drgań własnych obwodu z rys.2.24,

ψ_1 - faza prądu w chwili załączenia.



Rys.2.27. Uproszczony schemat obwodu dla załączania baterii kondensatorów

Maksymalne przetęczenie występuje dla $\psi_1 = 0$ i wynosi

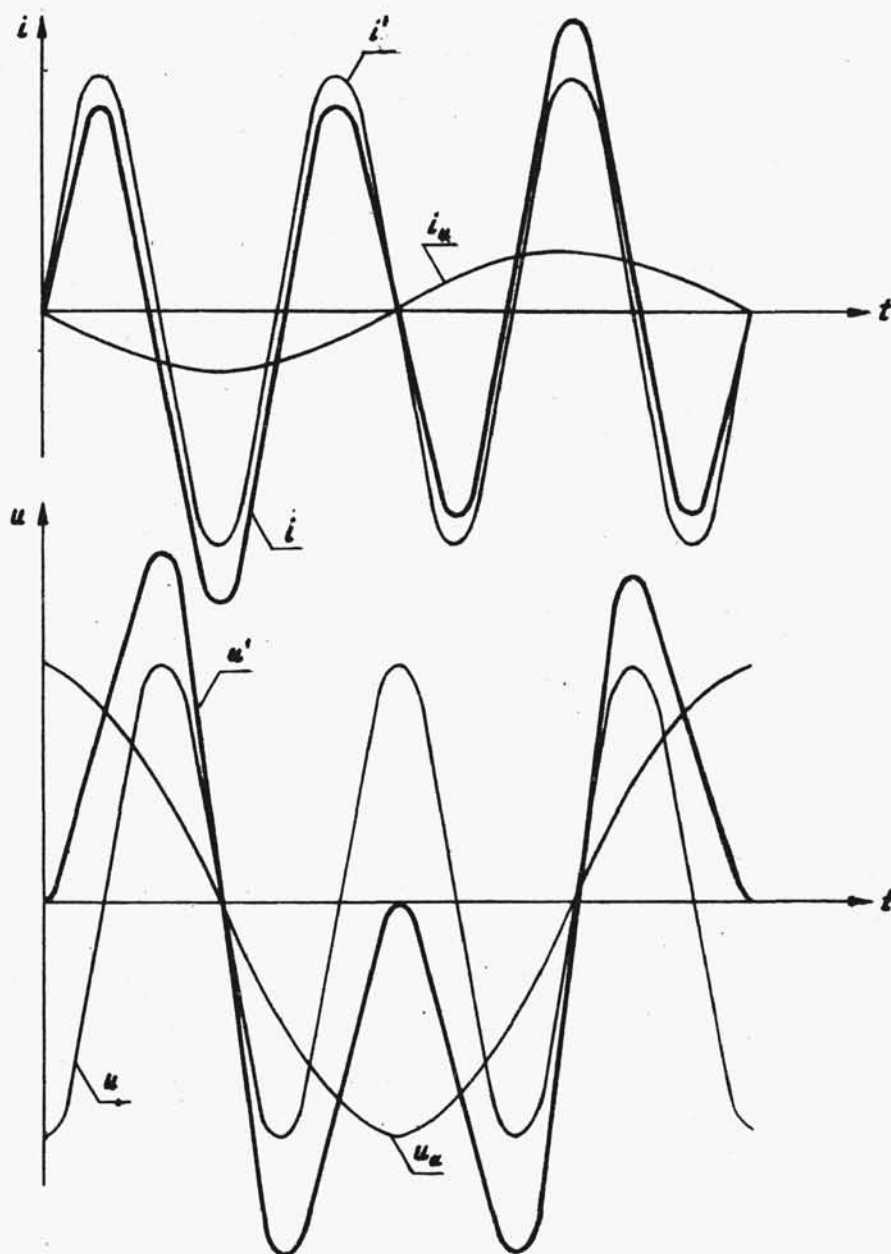
$$i_m = - I_m \frac{\omega_0}{\omega} . \quad (2.22)$$

Maksymalna wartość napięcia przejściowego przy załączaniu pojemności nie przekracza $2 U_m$ (U_m - wartość maksymalna napięcia w stanie ustalonym).

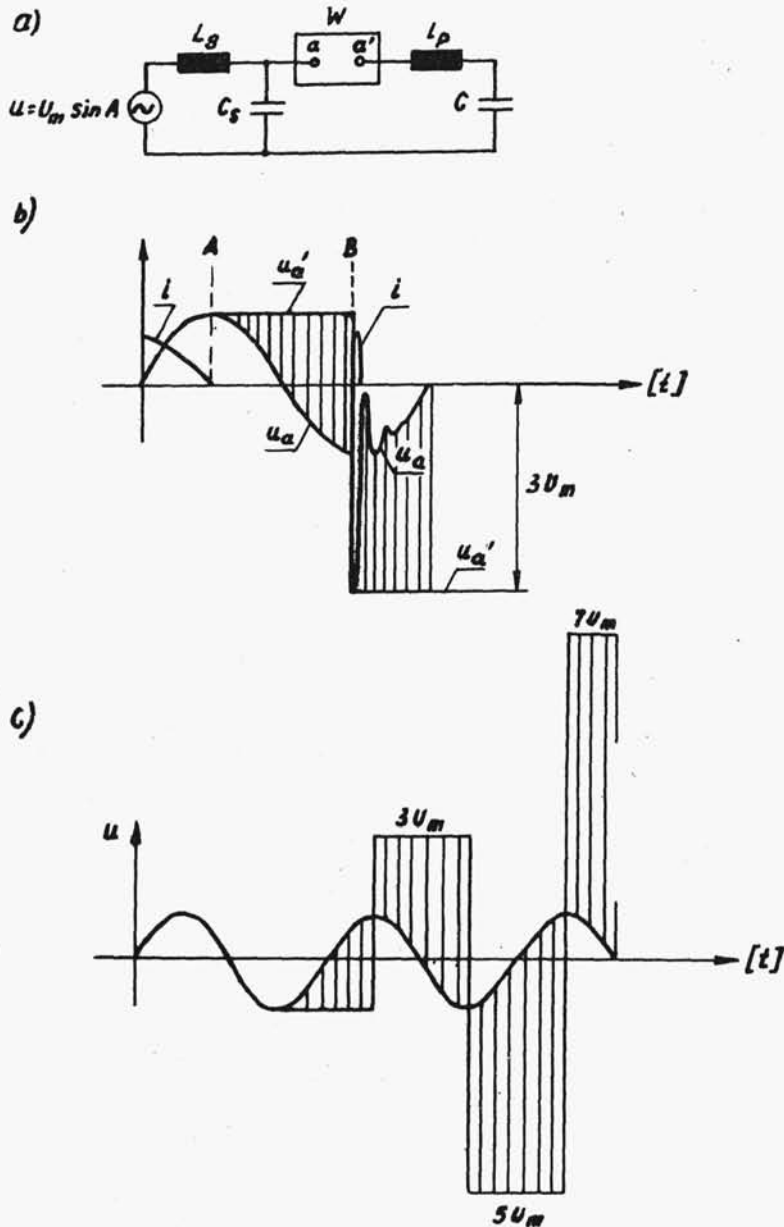
W rzeczywistych obwodach występuje tłumienie wywołane zwiększoną skutkiem nasłórkowości rezystancją obwodu, co powoduje, że przetęczenia osiągają wartości mniejsze, niż podaje to wzór 2.22. Praktyczne wartości przetężeń (tj. stosunku amplitudy prądu przejściowego do amplitudy prądu ustalonego) dla napięć średnich do 20 kV wynoszą 5 ... 20. W niektórych przypadkach występuje konieczność wprowadzenia dodatkowego tłumienia polegająca na dwuoperacyjnym załączaniu baterii przez rezystancję, lub na włączaniu dodatkowej indukcyjności.

Przykładowy przebieg przejściowego prądu i i napięcia dla $\psi_1 = 0$ przy pominięciu tłumienia przedstawiono na rys.2.28. Przebieg prądu wypadkowego i jest sumą dwóch składowych: ustalonej $i_u = I_m \sin \omega t$ oraz przejściowej $i' = I_m \frac{\omega_0}{\omega} \cos \omega_0 t$. Analogicznie napięcie wypadkowe u składa się z napięcia w stanie ustalonym $u_u = - U_m \cos \omega t$ oraz napięcia przejściowego $u' = U_m \sin \omega_0 t$.

Szczególnie duże wartości pulsacji (ω_0) przejściowego przebiegu prądu a tym samym duże wartości przetężeń będą występowały w przypadku dołączania niewielkiej pojemności (części baterii) do znacznej pojemności włączonej uprzednio. Analiza matematyczna zjawiska jest jednak bardzo złożona i nie będzie tu przytaczana.



Rys.2.28. Przebiegi prądu i napięcia przy załączaniu pojemności w fazie $\psi_1 = 0$ w obwodzie bez tłumienia



Rys.2.29. Wyłączanie baterii w obwodzie jednofazowym, jeśli moc baterii jest stosunkowo mała, tj. jeśli $C < C_s$: a- uproszczony schemat układu, b - przebiegi prądu i napięcia przy wyłączaniu, c- przebieg napięcia przy wielokrotnych zapłonach. L_s, C_s - parametry obwodu zasilającego, C - pojemność wyłączanej baterii, L_p - indukcyjność połączeń

Wyłączanie baterii kondensatorów w nietłumionym obwodzie jednofazowym będzie rozpatrzone na przykładzie obwodu z rys.2.29.

Po wyłączeniu baterii, w chwili odpowiadającej punktowi A, przy naturalnym przejściu prądu pojemnościowego przez zero, napięcie zacisku odłączonej baterii a tym samym zacisku (a') wyłącznika pozostaje równe napięciu U_m , podczas gdy na zacisku wyłącznika od strony zasilania (punkt a) napięcie zmienia się w takt zmian napięcia źródła. Po czasie odpowiadającym połowie okresu $t = \frac{\pi}{\omega}$ między zaciskami wyłącznika występuje już napięcie $2 U_m$. Jeżeli napięcie to przewyższy wytrzymałość przerwy międzyzaciskowej bieguna wyłącznika, wówczas w wyłączniku nastąpi zapłon łuku (punkt B). Zapłon powoduje powstanie bardzo szybkiego przebiegu przejściowego w obwodzie $C - L_p - C_S$, wyrównującego napięcia na obu pojemnościach. Częstotliwość tego przebiegu wyraża się wzorem

$$f_{o1} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C + C_S}{L_p C_S C}}, \quad (2.23)$$

a ponieważ $C \gg C_S$

$$f_{o1} \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_p C_S}}, \quad (2.24)$$

gdzie L_p - indukcyjność (b.mała) przewodów łączących baterię z układem szyn zbiorczych rozdzielni.

Po wytłumieniu się przebiegu szybkozmiennego (o częstotliwości kilkudziesięciu kHz) rozpoczyna się przejściowy przebieg ładowania obu pojemności $(C + C_S)$ o pulsacji

$$\omega_{o2} = \sqrt{\frac{1}{L_S (C + C_S)}} \quad (2.25)$$

znacznie mniejszej od pulsacji ω_{o1} (indukcyjność $L > L_p$ a $C + C_S \gg C_S$). Jeżeli prąd przejściowy o pulsacji ω_{o2} zostanie wyłączony przy pierwszym jego przejściu przez zero, to wówczas z przyczyny wyprzedzania tego prądu względem napięcia

na odłączonej pojemności C pozostanie (przy pominięciu tłumienia) napięcie o wartości $3U_m$ (rys.2.29b). Jeżeli występowałyby dalsze przeskoki po czasie $t = \frac{2\pi}{\omega}$, $3\frac{\pi}{\omega}$ itd., to napięcie na odłączanej baterii uzyskiwałoby kolejno wartości $5U_m$, $7U_m$ itd. (rys.2.29c). W rzeczywistości istnieją czynniki powodujące, że napięcie nie osiąga tak dużych wartości. Można do nich zaliczyć:

- a) tłumienie w rezystancji obwodu,
- b) częściowe rozładowanie baterii (wskutek upływności) do momentu zapłonu,
- c) przesunięcie chwili zapłonu w stosunku do maksimum napięcia, powodujące zmniejszenie amplitudy napięcia przejściowego,
- d) wzrost wytrzymałości przerwy międzyczaciskowej bieguna wyłącznika nie dopuszczający do powstawania zapłonów powrotnych.

Praktycznie, wartości przepięć występujących podczas wyłączania baterii trójfazowych nie przekraczają $(3 \dots 4) U_m$.

Przykład 2.19

Wyznaczyć wartość przetężenia jakie występuje przy załączaniu jednofazowej baterii kondensatorów o mocy $Q = 3 \text{ MVar}$ w obwodzie o napięciu znamionowym $U_n = \frac{15}{\sqrt{3}} \text{ kV}$, jeżeli moc zwarciova układu zasilającego wyznaczona dla szyn zbiorczych, do których dołączona jest bateria wynosi $S_z = 100 \text{ MVA}$. Przy obliczeniach pominąć tłumienie obwodu.

Pojemność załączanej baterii wyznaczymy z zależności

$$Q = U^2 \omega C,$$

stąd

$$C = \frac{Q}{U^2 \omega} = \frac{3 \cdot 3 \text{ MVar s}}{15^2 \text{ kV}^2 \cdot 314} = 0,127 \cdot 10^{-3} \text{ F}.$$

Indukcyjność obwodu zasilania można wyznaczyć ze wzoru

$$S_z = \frac{U^2}{x_z} = \frac{U^2}{\omega L},$$

stąd

$$L_S = \frac{U^2}{S_z \omega} = \frac{1^2 \text{ kV}^2 \text{ s}}{3 \cdot \text{MVar} \cdot 314} = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ H}.$$

Częstotliwość drgań własnych obwodu (przy pominięciu pojemności po stronie zasilania)

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_S C}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{0,127 \cdot 10^{-3} \text{ F} \cdot 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ H}}} = 290 \text{ Hz}.$$

Współczynnik przetężenia

$$k_I = \frac{i_{\max}}{I_m} = \frac{\omega_o}{\omega} = \frac{f_o}{f} = \frac{290}{50} = 5,8.$$

Przykład 2.20

Bateria o mocy $Q = 1 \text{ MVar}$ wyłączana jest z jednofazowego obwodu o napięciu znamionowym $U_n = \frac{30}{\sqrt{3}} \text{ kV}$. Moc zwarcia obwodu $S_z = 200 \text{ MVar}$, a częstotliwość drgań własnych obwodu zasilającego (bez baterii) wynosi $f_o = 3 \text{ kHz}$. Wyznaczyć amplitudę przebiegu oraz pulsację drgań przebiegu przejściowego napięcia po zapłonie w przerwie międzystykowej wyłącznika w założeniu, że zapłon wystąpił po czasie $t_z = \frac{3\pi}{4\omega}$ od chwili wyłączenia obwodu. Pominąć tłumienie oporowe oraz rozładowanie baterii.

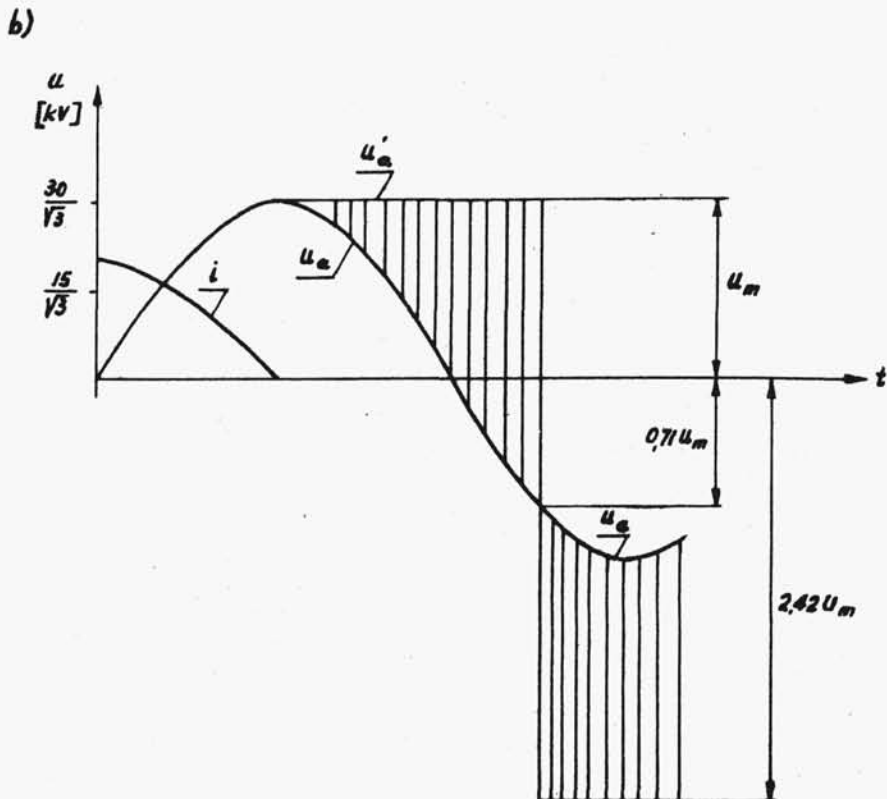
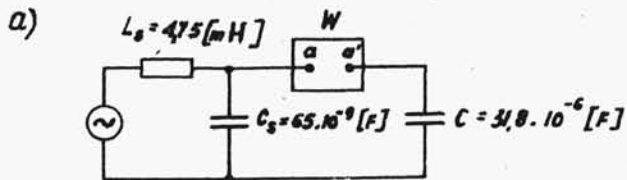
Pojemność C baterii wynosi

$$C = \frac{Q}{U^2 \omega} = \frac{3 \cdot 1 \text{ MVar s}}{30^2 \text{ kV}^2 \cdot 314} = 31,8 \cdot 10^{-6} \text{ F}.$$

Indukcyjność obwodu zasilającego L_S

$$L_S = \frac{U^2}{S_z \omega} = \frac{30^2 \text{ kV}^2 \text{ s}}{3 \cdot 200 \text{ MVA} \cdot 314} = 4,75 \cdot 10^{-3} \text{ H}.$$

Pojemność C_S obwodu zasilającego można wyznaczyć ze wzoru na pulsację drgań własnych obwodu



Rys. 2.30. Do przykładu 2.20: a-schemat zastępczy obwodu, b-przebiegi napięć w obwodzie

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{L_S C_S}},$$

stąd

$$C_S = \frac{1}{L_S 4\pi^2 f_0^2} = \frac{1}{4,75 \cdot 10^{-3} \cdot 4\pi^2 (3 \cdot 10^3)^2} = 65 \cdot 10^{-9} \text{ F.}$$

Opierając się na wyżej wyliczonych danych wyznaczono schemat zastępczy przedstawiony na rys.2.30.

Po czasie $t_z = \frac{3\pi}{4\omega}$ (rys.2.30b) napięcie między stykami wyłącznika wynosi $U_{aa'} = U_m + U_m \sin 45^\circ = 1,71 U_m$. Po zapłonie napięcie pojemności C oscyluje wokół osi oscylacji o wartości $0,71 U_m$. Maksymalne napięcie względem ziemi jakie wystąpi na pojemności wyniesie

$$U_m = 0,71 U_m + 1,71 U_m = 2,42 U_m.$$

Pulsacja drgań własnych obwodu po zapłonie wynosi

$$\omega_o = \sqrt{\frac{1}{L(C+C)}} = \sqrt{\frac{1}{4,75 \cdot 10^{-3} \cdot 3,18 \cdot 10^{-6}}} = 815 \frac{1}{s},$$

$$a \quad f_o = \frac{815}{2\pi} = 132 \text{ Hz}.$$

R o z d z i a ł 3

DOBÓR APARATÓW ELEKTRYCZNYCH DO OBCIĄŻENIOWYCH ZWYKŁYCH I ZWARCIOWYCH WARUNKÓW PRACY

3.1. Uwagi ogólne

Warunkiem niezbędnym dla prawidłowej pracy aparatów elektrycznych w układach elektroenergetycznych jest ich właściwy dobór do określonych warunków pracy. Cechy techniczne aparatów określane są przy pomocy tzw. parametrów znamionowych przypisywanych określonemu typowi aparatu. Prawidłowy dobór polega na wyznaczeniu wymagań określonych w miejscu zainstalowania dobieranego aparatu i wybrania typu aparatu o parametrach znamionowych większych lub co najmniej równych tym wymaga-