

do naturalnego przejścia prądu przez zero przebiegu wymuszonego jedynie przez SEM źródła.

Przykład 2.10

Wykreślić przebieg prądu łuku przy wyłączaniu zwartego obwodu jednofazowego prądu zmiennego o parametrach $U_n = 10$ kV, $L = 20$ mH, jeżeli faza prądu w chwili utraty styczności styków w wyłączniku wynosiła $\theta = 45^\circ$, a przebieg napięcia łuku daje się wyrazić równaniem $u_a = 2 \cdot 10^7 \frac{V}{s^2} t^2$. Należy przyjąć, że wyłączanie następuje przy pierwszym przejściu prądu przez zero.

2.3.2. Napięcia powrotne

Przebieg napięcia powrotnego występującego na stykach wyłącznika przerywającego obwód prądu zmiennego zawiera zazwyczaj dwie składowe^{x)}:

- a) składową główną tj. wymuszoną przez źródło napięcia,
- b) składową przejściową (swobodną).

Składowa główna napięcia powrotnego zmienia się z częstotliwością źródła, a jej wartość początkowa (wyznaczona dla chwili zgaszenia łuku przy naturalnym przejściu prądu przez zero) wyraża się wzorem

$$U_{co} \approx k_z E_m \sin \varphi, \quad (2.10)$$

gdzie E_m - maksymalna wartość napięcia źródła,

k_z - współczynnik zależny od rodzaju zwarcia,

φ - kąt przesunięcia między prądem a napięciem.

Dla obwodu jednofazowego $k_z^I = 1,0$ dla obwodu trójfazowego przy zwarcu trójfazowym współczynnik ten ma inną wartość dla poszczególnych wyłączanych faz. W obwodzie trójfazowym, prądy

^{x)} Jest to tzw. napięcie powrotne konwencjonalne niezmodyfikowane tzn. występujące w obwodzie, w którym prąd zawiera jedynie niezanikającą składową okresową prądu zwarciovego, a wpływ wyłącznika na przebieg napięcia powrotnego jest pomijalny (wyłącznik α o napięciu łuku $u_a = 0$, a tym samym o prądzie wstecznym $i_w = 0$)

fazowe są przesunięte względem siebie o 120° , wobec czego przy założeniu gaszenia łuku przy naturalnym przejściu prądu przez zero, wyłączenie prądu zwarcia trójfazowego nie może wystąpić równocześnie we wszystkich biegunach. Rozważmy to na przykładzie obwodu trójfazowego, w którym nie ma możliwości przepływu prądów zerowych (rys.2.14a). Jeżeli jako pierwsza wyłączy faza A, to zwarcie trójfazowe przekształci się w zwarcie dwufazowe; wówczas wartość początkowa składowej głównej napięcia powrotnego między zaciskami pierwszego wyłączającego bieguna wynosi $(U_{co})_{aa'} = 1,5 E_{mA}$ (rys.2.14b). Tak więc dla pierwszego wyłączającego bieguna w obwodzie trójfazowym przy zwarcu trójfazowym $k_z^{III} = 1,5$.

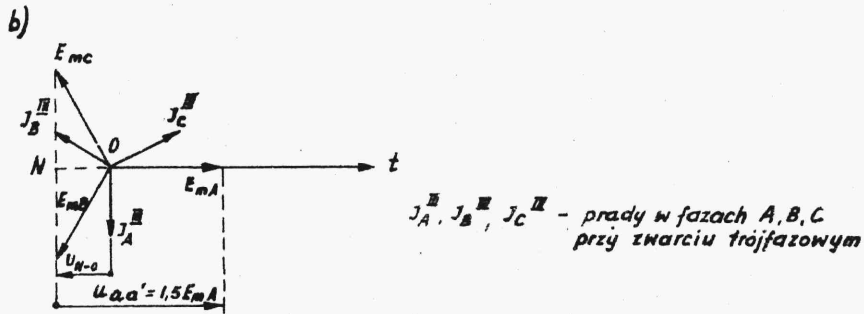
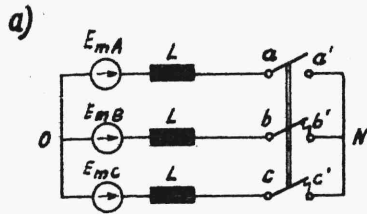
Z wykresu wskazowego prądów i napięć dla zwarcia dwufazowego (rys.2.14c) wynika, że prądy w fazach B i C osiągną wartość zerową (tzn. rzut wskaz prądu na oś czasu będzie równy zeru) po czasie odpowiadającym kątowi $\frac{\pi}{2}$. Przebiegi prądów w funkcji czasu przedstawiono na rys.2.14d. Jeżeli założy się symetrię sprzężeń pojemnościowych biegunów B i C, to wartości początkowe składowych głównych napięcia powrotnego będą

$$(U_{co})_{bb'} = (U_{co})_{cc'} = \frac{\sqrt{3}}{2} E_{mA},$$

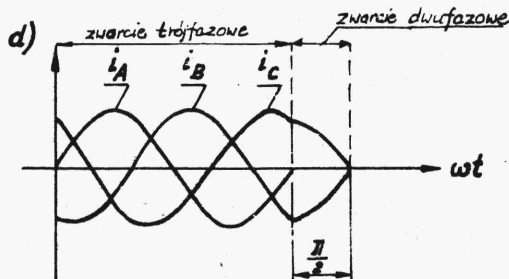
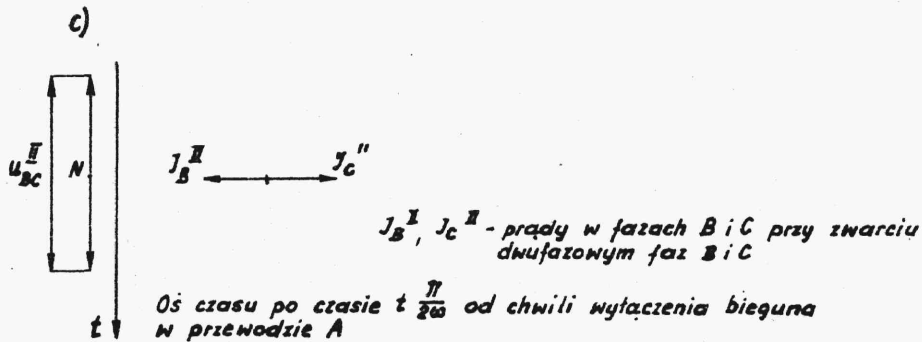
a więc współczynnik $k_z^{II} = 0,867$.

Z przedstawionych zależności wynika, że najcięższe warunki napięciowe występują w pierwszym biegunie wyłączającym ($k_z^{III} = 1,5$). Wzór 2.10 wskazuje, że największe wartości napięć powrotnych występują dla dużych wartości kąta φ , a więc podczas wyłączania prądów zwarciovych.

Składowa przejściowa napięcia powrotnego wywołana jest drganiami w obwodzie elektrycznym występującymi po zgaśnięciu łuku. Częstotliwość drgań oraz tłumienie składowej swobodnej napięcia powrotnego wyznaczone są parametrami wyłączanego obwodu, a wartość maksymalna składowej swobodnej ponadto warunkami początkowymi. W zależności od rodzaju wyłączanego obwodu odróżniamy obwody jedno- lub wieloczęstotliwościowe. W przypadku obwodu wieloczęstotliwościowego składowa przejściowa napięcia zawiera większą liczbę częstotliwości własnych. Znaczna część rzeczywistych układów sieciowych daje się sprowa-

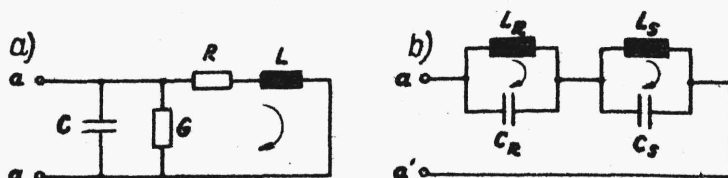


Uwaga: Położenie wektorów odpowiadające przejściu przez wartość zerową prądu w przewodzie fazy A



Rys.2.14. Wyłączanie obwodu trójfazowego

dzić do obwodu jedno- lub dwuczęstotliwościowego. Przykłady takich obwodów przedstawiono na rys.2.15. Dla obwodu jedno-



Rys.2.15. Przykłady jednofazowych obwodów zastępczych dla wyznaczania napięcia powrotnego: a - obwód jednoczęstotliwościowy z tłumieniem, b - obwód dwuczęstotliwościowy typu R-S bez tłumienia. L - indukcyjność zastępcza układu, C - pojemność zastępcza układu, R - oporność czynna układu, G - upływność zastępcza układu

częstotliwościowego (rys.2.15a) składowa przejściowa napięcia wyraża się wzorem

$$u'_c = -U_{co} e^{-bt} \cos b'' t, \quad (2.11)$$

gdzie U_{co} - początkowa wartość składowej głównej,

$$b'' = \sqrt{\frac{1}{LC} (1+RG) - \frac{1}{4} \left(\frac{R}{L} + \frac{G}{C} \right)^2} - \text{pulsacja drgań własnych obwodu,}$$

$$b = \frac{1}{2} \left(\frac{R}{L} + \frac{G}{C} \right) - \text{współczynnik tłumienia.}$$

W obwodach trójfazowych pulsację drgań własnych wyznacza się oddzielnie dla poszczególnych wyłączanych faz. Sposób przekształcenia obwodu w celu wyznaczenia pulsacji i tłumienia napięcia powrotnego dla pierwszej wyłączanej fazy przedstawiono na rys.2.16. Parametry te wyznacza się przez rozwiązanie równania $Y_{aa'}(p) = 0$ wyrażonego w postaci operatorowej $Y_{aa'}(p)$ - admitancja wziera obwodu widzianego z otwieranych zacisków aa').

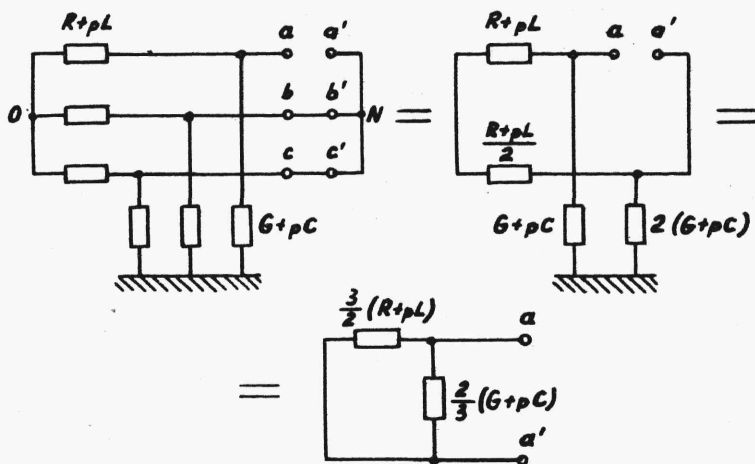
Przebieg napięcia powrotnego w obwodzie jednoczęstotliwościowym zawiera obie wymienione składowe. Jeżeli przyjmiemy że częstotliwość drgań własnych obwodu jest znacznie większa od 50 Hz, a jest to słuszne dla przeważającej większości rzeczywistych obwodów sieciowych, to przebieg napięcia powrotnego można wyrazić wzorem

$$u_c = u'_c + U_{co} \approx (1 - e^{-bt} \cos b'' t) . \quad (2.12)$$

Wartość maksymalna napięcia powrotnego występuje po czasie $t_m \approx \frac{\pi}{b''}$ i wynosi

$$u_{c \max} = \alpha_m U_{co} , \quad (2.13)$$

przy czym $\alpha_m = 1 + e^{-\frac{\pi b}{b''}}$ - współczynnik amplitudy.

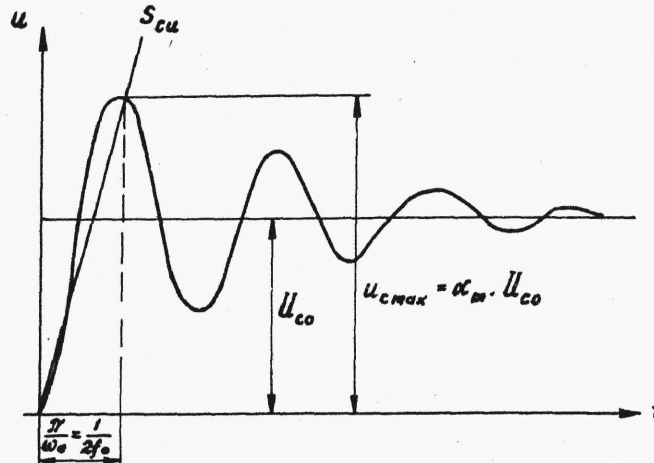


Rys.2.16. Przykład przekształcenia zastępczego obwodu trójfazowego w celu wyznaczenia parametrów napięcia powrotnego dla pierwszej wyłączającej fazy zwarcie trójfazowe bez doziemienia miejsca zwarcia, pL - oporność indukcyjna (reaktancja) obwodu zapisana w postaci operatorowej, pC - przewodność pojemnościowa obwodu zapisana w postaci operatorowej

Dla rzeczywistych układów w.n. częstotliwość drgań własnych wynosi $f_0 = 1 \dots 50$ kHz przy współczynniku amplitudy. $\alpha_m = 1,3 \dots 1,8$, a dla układów n.n. odpowiednio $f_0 = 10 \dots \dots 40$ kHz i $\alpha_m = 1,2 \dots 1,6$.

Przebieg napięcia powrotnego w obwodzie jednoczęstotliwościowym jest jednoznacznie określany za pomocą częstotliwości drgań własnych f_0 oraz współczynnika amplitudy α_m . Często podawana jest również stromość wzrostu napięcia powrotnego określana zwykle jako wartość średnia za pół okresu drgań

$$S_{uc} = \left(\frac{du}{dt} \right)_{sr} = \frac{u_{c \max}}{t_m} = 2 f_0 u_{c \max} = 2 f_0 k_z E_m \sin \varphi \quad (2.14)$$

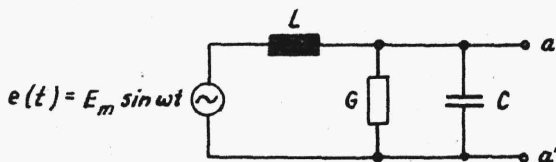


Rys.2.17. Przykład przebiegu napięcia powrotnego w obwodzie jednoczęstotliwościowym

Przykład przebiegu napięcia powrotnego z oznaczeniem jego parametrów przedstawiono na rys.2.17.

Przykład 2.11

Wyznaczyć parametry oraz wykreślić przebieg napięcia powrotnego między zaciskami $a - a'$ w obwodzie jednofazowym jak na rys.2.18.



Rys.2.18. Schemat obwodu jednofazowego do przykładu 2.11. $E_m = 5000$ V;
 $L = 4$ mH; $C = 0,5 \cdot 10^{-6}$ F; $G = 0,6 \cdot 10^{-2}$ S

Na podstawie danych liczbowych do zadania podanych na rysunku wyznaczamy

a) pulsację drgań własnych

$$b'' = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{1}{2} \frac{G}{C}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{4 \cdot 10^{-3} \text{ H} \cdot 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ F}} - \frac{1}{4} \frac{0,6^2 \cdot 10^{-4} \text{ S}^2}{0,5^2 \cdot 10^{-12} \text{ F}^2}} = 2,18 \cdot 10^4 \frac{1}{\text{s}},$$

$$f_0 = \frac{2,18 \cdot 10^4}{2\pi} = 3,45 \text{ kHz},$$

b) współczynnik tłumienia

$$b = \frac{1}{2} \frac{G}{C} = \frac{0,6 \cdot 10^{-2} \frac{S}{F}}{2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6} \frac{F}{F}} = 0,6 \cdot 10^4 \frac{1}{s},$$

c) współczynnik amplitudy

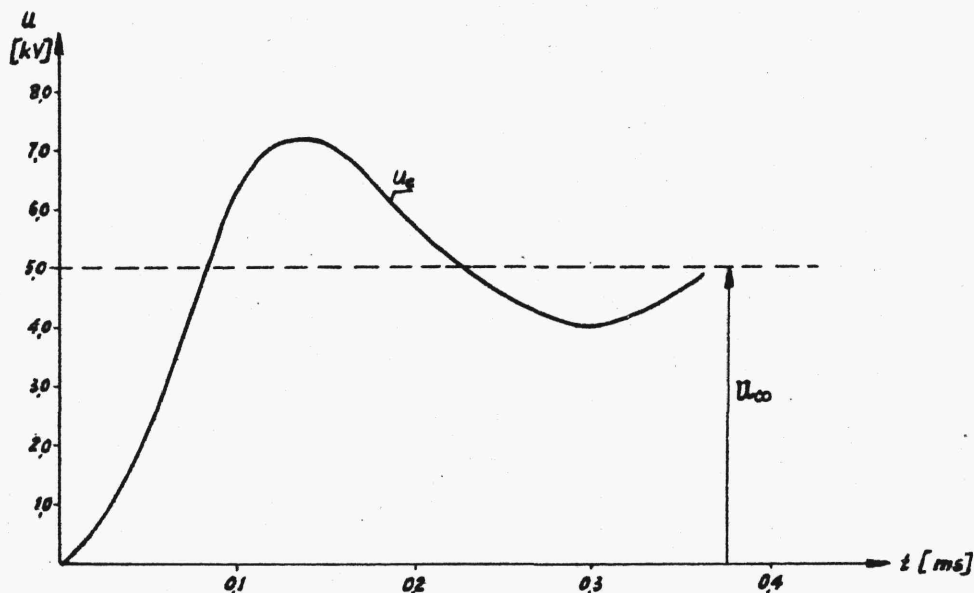
$$\alpha_m = 1 + e^{-bt_m} = 1 + e^{-\frac{bT}{b''}} = 1 + e^{-\frac{0,6 \cdot 10^4 T}{2,18 \cdot 10^4}} = 1,42,$$

d) średnią stromość napięcia powrotnego

$$S_{uc} = 2 f_o \alpha_m k_z^I E_m \sin \varphi = 2 \cdot 3450 \cdot 1,42 \cdot 5,0 \frac{V}{\mu s} = 53 \frac{V}{\mu s},$$

ponieważ $k_z^I = 1,0,$

$$\sin \varphi = 1,0.$$



Rys.2.19. Przebieg napięcia powrotnego do przykładu 2.11

Można przyjąć, że dla czasu trwania kilku okresów przebiegu przejściowego składowa główna ma wartość stałą i równą wartości początkowej ($b'' = 2,1 \cdot 10^4 \gg \omega = 314 s^{-1}$) i równanie przebiegu napięcia powrotnego będzie

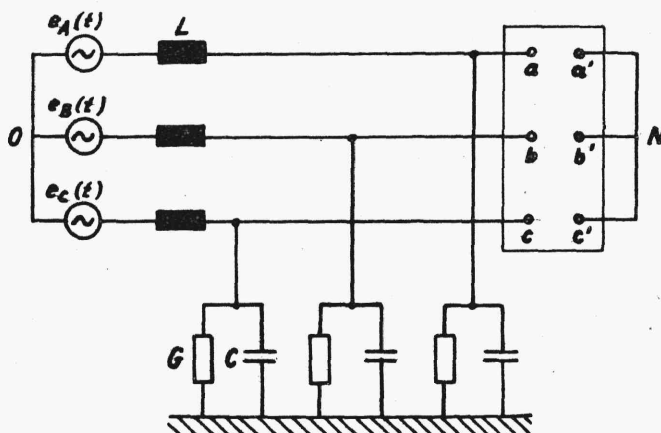
$$u_c = 5000 \left(1 - e^{0,6 \cdot 10^4 s^{-1} t} \sin 2,18 \cdot 10^4 s^{-1} t \right) V,$$

przy czym $U_{co} = k_z^I E_m \sin \varphi = 1,0 \cdot 5000 \cdot 1,0 = 5000 V$.

Przebieg ten przedstawiono na rys.2.19.

Przykład 2.12

Wyznaczyć parametry przebiegu napięcia powrotnego dla poszczególnych faz obwodu trójfazowego, jak na rys.2.20.



Rys.2.20. Schemat układu do przykładu 2.12.
 $L=6 \text{ mH}$; $C = 0,7 \cdot 10^{-6} \text{ F}$; $G=0,7 \cdot 10^{-2} \text{ S}$; $E_{mA} = E_{mB} = E_{mC} = 8,3 \text{ kV}$

1. Dla bieguna w fazie A wyłączającego jako pierwszy. Po przekształceniu obwodu (jak pokazano na rys.2.16) otrzymuje się następujące wzory na pulsację i tłumienie:

a) pulsacja drgań własnych

$$b'' = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{1}{2} \frac{G}{C} \right)^2} = \sqrt{\frac{1}{6 \cdot 10^{-3} \text{ H} \cdot 0,7 \cdot 10^{-6} \text{ F}} - \frac{1}{2} \frac{0,7 \cdot 10^{-2} \text{ S}^2}{0,7 \cdot 10^{-6} \text{ F}^2}} =$$

$$= 1,47 \cdot 10^4 \frac{1}{\text{s}}$$

$$f_o = \frac{1,47 \cdot 10^4}{2 \pi} = 2,35 \text{ kHz},$$

b) współczynnik tłumienia

$$b = \frac{1}{2} \frac{G}{C} = \frac{0,7 \cdot 10^{-2} \text{ S}}{2 \cdot 0,7 \cdot 10^{-6} \text{ F}} = 0,5 \cdot 10^4 \frac{1}{\text{s}},$$

c) współczynnik amplitudy

$$\alpha_{mA} = 1 + e^{-\frac{bT}{b^p}} = 1 + e^{-\frac{0,5 \cdot 10^4 \pi}{1,47 \cdot 10^4}} = 1,34,$$

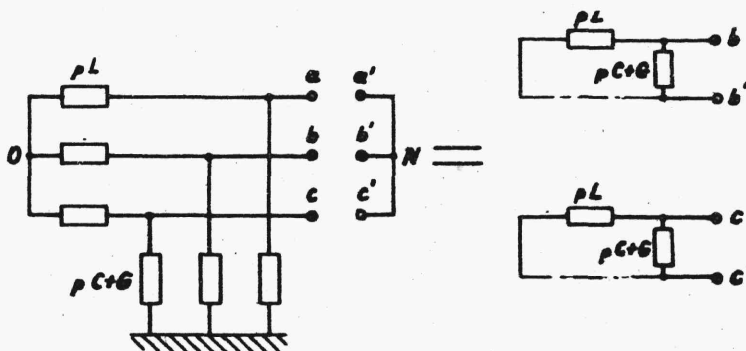
d) stromość średnia napięcia powrotnego

$$S_{uc} = 2 f_o k_z^{III} \alpha_{mA} E_m \sin \varphi = 2 \cdot 2350 \cdot 1,5 \cdot 1,34 \cdot 8,3 \frac{\text{V}}{\mu\text{s}} =$$

$$= 79 \frac{\text{V}}{\mu\text{s}},$$

$$\text{promień } k_z^{III} = 1,5 \quad \sin \varphi = 1,0.$$

2. Dla faz B i C wyłączających jako ostatnie



Rys.2.21. Przekształcenie obwodu w celu wyznaczenia pulsacji i tłumienia przebiegu składowej przejściowej napięcia powrotnego dla biegunów w fazach B i C wyłączających jako ostatnie

Sposób przekształcenia obwodu w celu wyznaczenia parametrów napięcia powrotnego dla faz B i C przedstawiono na rys. 2.21. Z przekształconego obwodu wynika, że pulsacja i tłumienie przebiegu napięcia powrotnego będą dla fazy B i C takie same i równe wartościom wyznaczonym dla fazy A

$$f_{oB} = f_{oC} = f_{oA} = 2,35 \text{ kHz},$$

$$b_B = b_C = b_A = 0,5 \cdot 10^4 \frac{1}{s},$$

$$\alpha_{mB} = \alpha_{mC} = \alpha_{mA} = 1,34.$$

Jedynie wartość średniej stromości będzie inna niż dla fazy A i wyniesie

$$\begin{aligned} S_{ucB} = S_{ucC} &= 2f_o k_z^{II} \alpha_{mA} E_m \sin \varphi = 2 \cdot 2350 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} 8,3 \cdot 10 = \\ &= 45,5 \frac{V}{\mu s}, \end{aligned}$$

ponieważ $k_z^{II} = \frac{\sqrt{3}}{2}.$

Otrzymane wyniki zestawiono w tablicy 9. Potwierdzają one wniosek, że najcięższe warunki napięciowe (stromość napięcia powrotnego) wystąpią w pierwszym wyłączającym biegunie.

Tablica 9

Do przykładu 2.12

Parametry napięcia powrotnego		Biegun wyłączający	
		pierwszy A	ostatnie B i C
f_o	kHz	2,35	2,35
α_m	-	1,34	1,34
S_{uc}	kV/ μ s	79	45,5

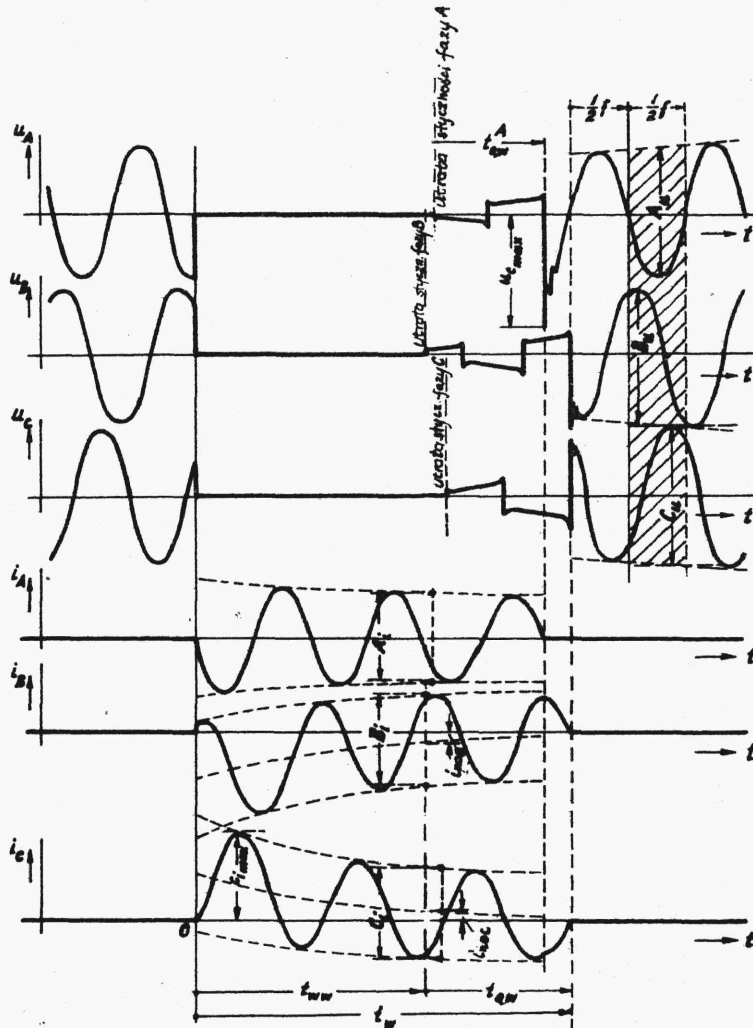
Przykład 2.13

Dokonać przekształcenia obwodu oraz określić parametry przebiegu napięcia powrotnego dla obwodu trójfazowego, jak w

przykładzie 2.12, przy doziemieniu punktu zwarcia (tzn. po prawej stronie wyłącznika).

2.3.3. Przebiegi napięć i prądów podczas wyłączania obwodów prądu zmiennego

Na rys.2.22 przedstawiono przebiegi prądów i napięć w poszczególnych fazach w funkcji czasu, występujące podczas wy-



Rys.2.22. Przebiegi prądów i napięć przy wyłączaniu zwarcia trójfazowego