

łączania zwarcia trójfazowego. W chwili $t = 0$ wystąpiło zwarcie trójfazowe obwodu, przy czym przebiegi prądów w poszczególnych fazach zależne są od warunków początkowych zwarcia (np. w fazie A nie występuje składowa nieokresowa prądu).

W rzeczywistych obwodach zwartych występuje zanikanie obu składowych prądu zwarciovego, tj. zarówno składowej nieokresowej jak i okresowej. Zanikanie tej ostatniej zaznaczono za pomocą obwiedni o przebiegu wykładniczym.

W chwili zwarcia napięcie między zaciskami poszczególnych biegunów wyłącznika spada do zera. Po czasie własnym wyłącznika t_{ww} następuje rozdział styków, a tym samym zapłon łuku. Rozdział styków występuje na ogół niejednocześnie we wszystkich biegunach (wskutek niejednoczesności mechanicznej wyłącznika), co zostało uwidocznione na rysunku.

Skuteczna wartość prądu w chwili utraty styczności styków nazywana jest prądem wyłączeniowym^{x)}. Odróżniamy prąd wyłączeniowy symetryczny, tj. dla przypadku kiedy w obwodzie występuje jedynie składowa okresowa prądu oraz prąd wyłączeniowy niesymetryczny zawierający obie składowe prądu. Prąd wyłączeniowy symetryczny określony jest na podstawie przebiegu obwiedni składowej okresowej prądu i tak np. dla fazy A wyraża się następująco

$$I_{wsA} = \frac{A_1}{\sqrt{2} \cdot 2},$$

gdzie A_1 - podwójna amplituda prądu w fazie A w chwili utraty styczności styków.

Dla obwodu trójfazowego prąd wyłączeniowy określany jest jako średnia arytmetyczna prądów w poszczególnych fazach

$$I_{ws} = \frac{A_1 + B_1 + C_1}{3 \cdot 2 \sqrt{2}}. \quad (2.15)$$

^{x)} Metoda obliczania prądu wyłączeniowego opisana jest w p.3.3.

Prąd wyłączeniowy niesymetryczny występuje wówczas, gdy w chwili utraty styczności styków występuje składowa nieokresowa prądu o wartości i_{no} .

$$I_{wn} = \sqrt{I_{ws}^2 + i_{no}^2}, \quad (2.16)$$

gdzie i_{no} - wartość składowej nieokresowej w chwili utraty styczności styków.

Prąd wyłączeniowy niesymetryczny może być również definiowany przy pomocy tzw. współczynnika asymetrii prądu wyłączeniowego wyrażonego zależnością

$$a_w = \frac{i_{no}}{\sqrt{2} I_{ws}}. \quad (2.17)$$

Z chwilą zapalenia się łuku pomiędzy stykami poszczególnych biegunów wyłącznika pojawia się napięcie łuku (u_a). Napięcie łuku przebiega w fazie z prądem i posiada ujemną charakterystykę. Po czasie t_{aw}^A w biegunie A (wyłączającym jako pierwszy) w momencie przejścia prądu tej fazy przez zero występują warunki umożliwiające definitywne zgaszenie łuku. Między zaciskami bieguna A wyłącznika pojawia się zatem napięcie powrotne o wartości maksymalnej $u_{c \max}^A$. Jednocześnie zwarcie trójfazowe przekształciło się w zwarcie dwufazowe ($I_A = 0$), a prądy w fazach B i C osiągają wartość zero po czasie $t = \frac{\pi}{2\omega} = 0,05$ s. W tym momencie następuje ostateczne wyłączenie biegunów B i C, między zaciskami których pojawia się napięcie powrotne.

Po pewnym czasie przebiegi przejściowe napięcia powrotnego wytłumia się, a między zaciskami wyłącznika występuje jedynie napięcie źródła, którego wartość zmniejszona podczas trwania zwarcia w wyniku wzmożonego oddziaływania twornika narasta wykładniczo.

Wartość składowej głównej napięcia powrotnego wyznaczona jest po wytłumieniu się składowej przejściowej napięcia powrotnego, tj. w okresie czasu $t = \frac{1}{2f} \dots \frac{1}{f}$ od chwili wyłącze-

nia przez wszystkie bieguny. Napięcie to nosi nazwę napięcia powrotnego wyłączeniowego, a wartość jego dla obwodu trójfazowego wyraża wzór

$$U_w = \sqrt{3} \frac{A_u + B_u + C_u}{3 \cdot 2 \sqrt{2}}, \quad (2.18)$$

gdzie $\frac{A_u}{2\sqrt{2}}, \frac{B_u}{2\sqrt{2}}, \frac{C_u}{2\sqrt{2}}$ - wartości skuteczne napięć fazowych w fazach A, B, C wyznaczone jak na rys.2.22.

Czas t_{aw} mierzony od chwili utraty styczności styków w pierwszym wyłączającym biegunie (A) do chwili zgaszenia łuku w ostatnim wyłączającym biegunie nosi nazwę całkowitego czasu łukowego wyłącznika, a czas t_z mierzony od momentu powstania zwarcia w obwodzie do chwili ostatecznego zgaszenia łuku nazywany jest czasem trwania zwarcia.

Przykład 2.14

Wyznaczyć współczynnik asymetrii prądu wyłączeniowego podczas wyłączania obwodu zwartego o $\cos \varphi = 0,07$ wyłącznikiem o czasie własnym $t_{ww} = 0,03$ s. W zadaniu należy założyć, że składowa nieokresowa prądu ma wartość największą z możliwych oraz pominąć zanikanie składowej okresowej.

Dla $\cos \varphi = 0,07$ stała czasowa obwodu wynosi

$$T = \frac{L}{R} = \frac{x}{\omega R} = \frac{tg \varphi}{\omega},$$

$$T = \frac{14,0}{314} = 44,5 \text{ ms}.$$

Przebieg składowej nieokresowej prądu będzie zatem

$$i_{no} = (i_{no})_p e^{-\frac{t}{0,04455}}$$

a ponieważ $(i_{no})_p = \sqrt{2} I_p = \sqrt{2} I_{ws}$

$$i_{no} = \sqrt{2} I_{ws} e^{-\frac{t}{0,04455}}$$

Dla czasu $t = 0,03$ s

$$i_{no} = \sqrt{2} I_{ws} e^{-\frac{0,03}{0,0445}} = \sqrt{2} I_{ws} 0,46,$$

stąd współczynnik asymetrii prądu wyłączeniowego będzie

$$a_w = \frac{i_{no}}{\sqrt{2} I_{ws}} = \frac{\sqrt{2} I_{ws}}{\sqrt{2} I_{ws}} 0,46 = 0,46.$$

Wartość prądu wyłączeniowego niesymetrycznego wyniesie

$$I_{wn} = \sqrt{I_{ws}^2 + (\sqrt{2} I_{ws} 0,45)^2} = 1,2 I_{ws}$$

Przykład 2.15

Wyznaczyć wymaganą stromość wzrostu wytrzymałości kanału połukowego w wyłączniku, określonej napięciem zapłonowym i zapewniającej wyłączenie obwodu, jeżeli napięcie powrotne zmienia się według zależności $u_c = U_m (1 - \cos b'' t)$. W zadaniu należy założyć, że napięcie zapłonowe wzrasta liniowo, a dla chwili $t = 0$ ma wartość $u_z = 0$.

Równanie przebiegu napięcia zapłonowego będzie zatem

$$u_z = at,$$

gdzie a - tangens kąta nachylenia prostej narastania,

czas t - liczony od chwili przejścia prądu przez zero.

Zapłon w przerwie połukowej wyłącznika nie nastąpi, jeżeli dla całego przedziału czasowego $0 \dots \frac{\pi}{b''}$ wartość napięcia zapłonowego będzie większa od napięcia powrotnego i przebieg $u_z = f(t)$ nie będzie miał punktów stycznych z przebiegiem $u_c = f(t)$.

Wobec tego mamy dwa równania odpowiadające granicznemu przypadkowi zapłonu

$$at = U_m (1 - \cos b'' t),$$

$$a = U_m b'' \sin b'' t.$$

Dzieląc je stronami otrzymujemy współrzędną punktu styczności krzywej $u_c = (t)$ z prostą napięcia zapłonu u_z

$$t_1 = \frac{1 - \cos b'' t_1}{\sin b'' t_1}.$$

Z rozwiązania graficznego powyższej zależności wynika, że jest ona spełniona dla $b'' t_1 = 0,74 \pi = 132^\circ$.

Chwilowa wartość napięcia powrotnego w punkcie styczności wyniesie

$$u_c = U_m (1 - \cos 132^\circ) = 1,68 U_m,$$

a kąt nachylenia prostej przechodzącej przez ten punkt oraz początek układu współrzędnych

$$\frac{u_c}{t_1} = \frac{1,68 U_m b''}{0,74 \pi} = 0,725 b'' U_m.$$

Tak więc aby zapłon nie wystąpił wymagana stromość wzrostu napięcia zapłonowego wynosi

$$a \geq 0,725 b'' U_m.$$

Przykład 2.16

Wyznaczyć wymaganą stromość napięcia zapłonowego dla warunków jak w przykładzie 2.15, przyjmując jednakże, że napięcie powrotne ma przebieg

$$u_c = U_m (1 - e^{-bt} \cos b'' t).$$

Przykład 2.17

Wyznaczyć na drodze wykreslnej, po którym kolejnym przejściu prądu przez zero nastąpi definitywne wyłączenie obwodu, jeżeli napięcie powrotne zmienia się wg zależności

$$u_c = 8500 V (1 - \cos 31400 t),$$

a napięcie zapłonowe daje się wyrazić wzorem $u_z = at = f(t') \cdot t$,

gdzie $a = f(t')$ - funkcja charakteryzująca stromość wzrostu wytrzymałości, uwzględniająca fakt, że wraz z wydłużaniem się łuku w miarę upływu czasu t' , a więc w miarę otwierania bieguny wzrasta długość kanału połukowego, w wyniku czego wzrasta stromość narastania napięcia zapłonowego.

Jeżeli założymy stałość wartości gradientu zapłonu K_z oraz liniowy wzrost długości kanału łukowego względem czasu $l_a = n \bar{w} t'$ (gdzie $n\bar{w}$ - prędkość otwierania wyłącznika n - przerwowego), to wówczas $f'(t) = K_z l_a = n \bar{w} K_z t'$ jest liniową funkcją czasu. W zadaniu należy przyjąć $f(t') = 4 \cdot 10^9 \frac{V}{s} t$

gdzie czas t' - jest czasem palenia się łuku w s,
czas t - liczony jest od chwili przejścia prądu przez zero.

Moment utraty styczności styków wystąpił w momencie przechodzenia prądu przez zero.

Dla pierwszego przejścia prądu przez zero

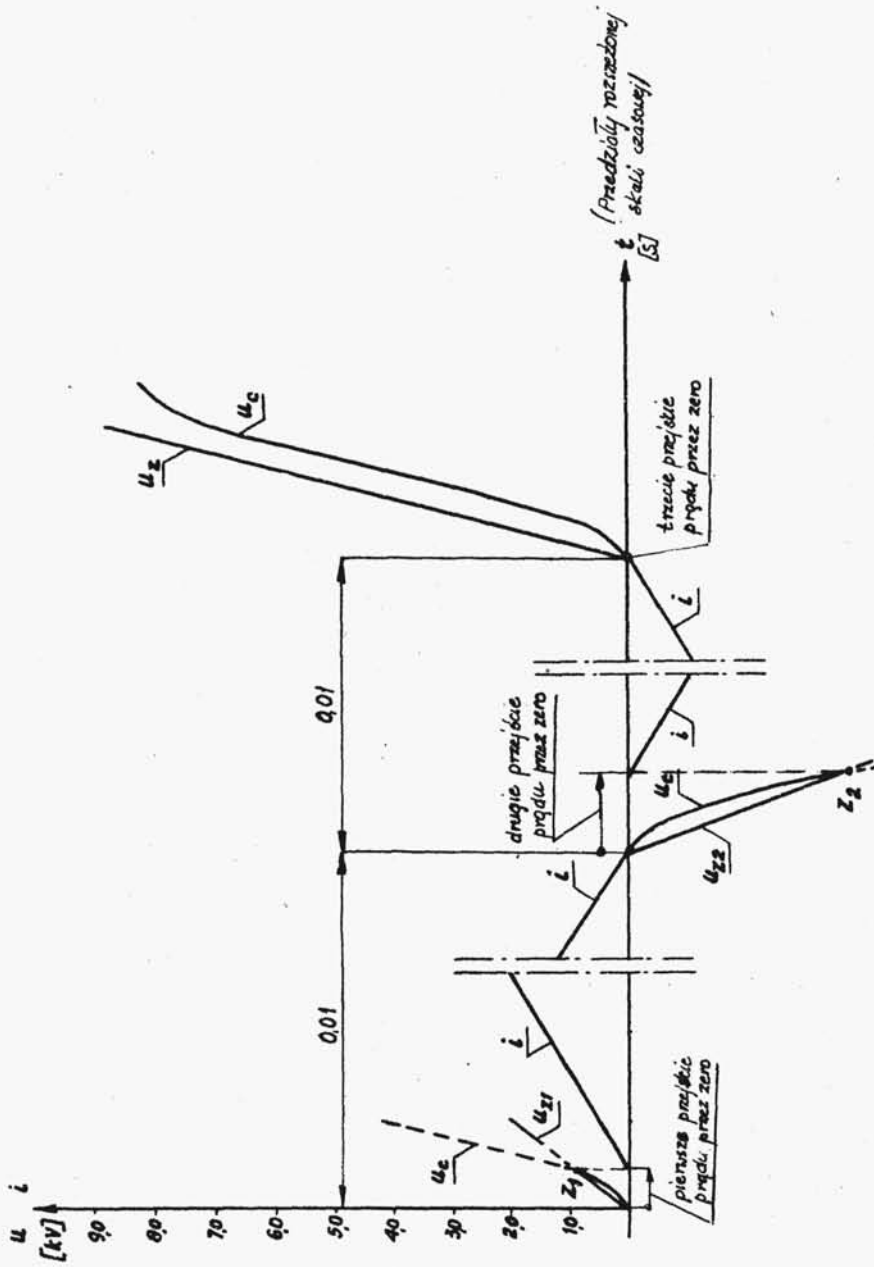
$$\begin{aligned} f(t') &= 4 \cdot 10^9 \cdot 0,01 = 4 \cdot 10^7 \frac{V}{s}, \\ a \quad u_z &= 4 \cdot 10^7 \frac{V}{s} t'. \end{aligned}$$

Dla drugiego przejścia prądu przez zero

$$\begin{aligned} f(t') &= 4 \cdot 10^9 \cdot 0,02 = 8 \cdot 10^7 \frac{V}{s}, \\ a \quad u_z &= 8 \cdot 10^7 \frac{V}{s} t'. \end{aligned}$$

Wyznaczone w ten sposób proste wzrostu napięcia zapłonowego dla kolejnych przejść prądu przez zero oraz przebieg napięcia powrotnego przedstawiono na rys.2.23.

Definitywne wyłączenie obwodu nastąpi po trzecim kolejnym przejściu prądu przez zero - napięcie zapłonowe nie przecina się z przebiegiem napięcia powrotnego.



Rys.2.23. Rozwiązanie wykresne przykładu 2.15. u_1, u_2, u_3 - napięcie powrotne; u_{z1}, u_{z2}, u_{z3} - napięcie zapłonu po pierwszym, drugim i trzecim przejściu prądu przez zero, z_1, z_2 - punkty zapłonu