

Rozdział 2

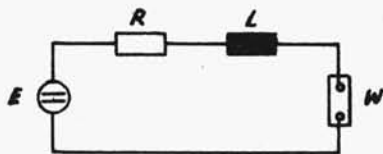
WYBRANE ZAGADNIENIA ŁĄCZENIOWE

2.1. Załączanie obwodów zwartych

W praktyce eksploatacyjnej sieci elektrycznych występują przypadki załączania łącznikami obwodów zwartych. Z punktu widzenia warunków pracy łączników, szczytową wartość prądu zwarciovego występującą przy załączaniu nazywamy prądem załączeniowym. W zależności od rodzaju wymuszenia w obwodzie zwartym, odróżnia się obwody prądu stałego i zmiennego. Zajmiemy się określeniem przebiegów prądu zwarciovego w obu rodzajach obwodów.

a. O b w ó d p r ą d u s t a ł e g o

Po dokonaniu upraszczających przekształceń schematu zastępczego dla rzeczywistej sieci prądu stałego można otrzymać schemat przedstawiony na rys.2.1.



Rys.2.1. Schemat zastępczy obwodu prądu stałego: E-SEM źródła, R - oporność zastępcza obwodu, L - indukcyjność zastępcza obwodu, W - wyłącznik obwodu

Przebieg prądu zwarciovego po załączeniu obwodu wyłącznikiem W przedstawia wzór

$$i = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-t/T} \right) = I_m \left(1 - e^{-t/T} \right) \quad (2.1)$$

gdzie I_m - ustalony prąd zwarciovy,

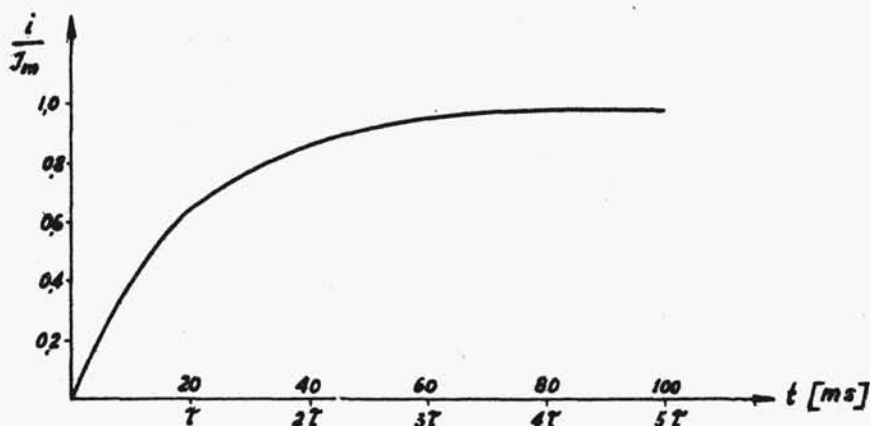
$T = \frac{L}{R}$ - stała czasowa obwodu zwartego.

Dla rzeczywistych obwodów prądu stałego (sieci trakcyjne) wartość stałej czasowej wynosi (15 ... 25) ms. Szczytowy prąd załączeniowy w tym przypadku jest równy ustalonemu prądowi zwarcioowemu.

Przykład 2.1.

Wykreślić przebieg prądu zwarciovego w funkcji czasu w obwodzie prądu stałego o stałej czasowej $T = 20$ ms.

Wg wzoru 2.1 wyznacza się wartości prądu zwarciovego wyrażonego w jednostkach względnych (odniesionego do prądu ustalonego) dla kolejnych chwil czasowych odpowiadających T , $2T$, $3T$ itd. Otrzymany w ten sposób przebieg prądu przedstawiono na rys.2.2.



Rys.2.2. Przebieg prądu zwarciovego w obwodzie prądu stałego o $T = 20$ ms

W przypadku kiedy obwód zwarty jest natychmiast po załączeniu wyłączany przy pomocy wyłącznika szybkiego, szczytowa wartość prądu zwarciovego (prąd załączeniowy) może nie osiągnąć wartości ustalonego prądu zwarciovego. Ilustruje to poniższy przykład.

Przykład 2.2

Wyznaczyć szczytową wartość prądu zwarciovego (prąd załączeniowy) dla obwodu z przykładu 2.1, jeżeli wyłącznik szybki prądu stałego rozpoczyna otwieranie obwodu po czasie $t_w = 10$ ms.

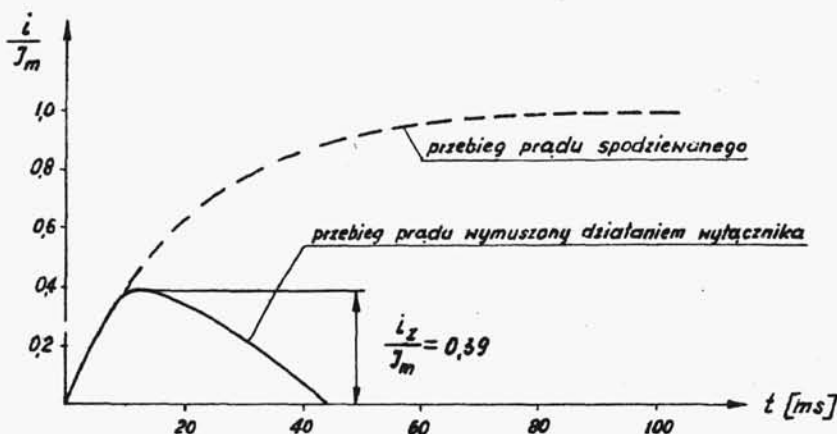
Dla $t_w = 10$ ms - prąd wynosi

$$i_z = I_m \left(1 - e^{-10/20} \right) = 0,39 I_m.$$

Występuje tu zjawisko ograniczenia szczytowej wartości prądu w stosunku do wartości ustalonego prądu zwarciovego (spodziewanej). Zakładając, że od chwili kiedy nastąpi rozdzielenie styków wyłącznika szybkiego, prąd w obwodzie zaczyna ma-

leć (rys.2.3), stopień ograniczenia prądu szczytowego wyraża się stosunkiem

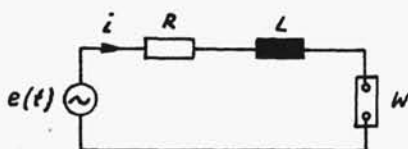
$$k_{og} = \frac{i_z}{I_m} = 0,39.$$



Rys.2.3. Przebieg prądu do przykładu 2.2. i_z - prąd ograniczony

b. O b w ó d p r ą d u z m i e n n e g o

Rozpatrzmy na początku obwód jednofazowy prądu zmiennego zasilany ze źródła o przebiegu sinusoidalnym. Analogicznie jak dla obwodu prądu stałego, upraszczając schemat zastępczy rzeczywistej sieci, można otrzymać obwód przedstawiony na rys. 2.4^{x)}.



Rys.2.4. Schemat zastępczy jednofazowego obwodu zwartego: $e(t)$ -siła elektromotoryczna źródła o przebiegu sinusoidalnym, R -rezystancja zastępcza obwodu, L -indukcyjność zastępcza obwodu, W -wyłącznik obwodu

Prąd w obwodzie po zamknięciu styków wyłącznika W wyraża się wzorem 1.18. Największy prąd szczytowy (prąd załączeniowy) występuje po czasie $t_m = 0,01$ s w przypadku kiedy początkowa faza napięcia $\psi = 0$ dla $\cos \varphi = 0$ i wyraża się wzorem

$$i_z \approx I_m \left(1 + e^{-t_m/T} \right) = k_u I_m, \quad (2.2)$$

^{x)} W schemacie pominięto zastępczą pojemność obwodu (przyłączaną równolegle do wyłącznika W). Dla rozważań nad przebiegiem prądu przy załączaniu uproszczenie takie jest dopuszczalne.

gdzie I_m - wartość maksymalna ustalonego prądu zwarcia,

$$T = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\omega} - \text{stała czasowa obwodu zwartego,}$$

k_u - współczynnik uderu.

Dla rzeczywistych zwartych układów sieciowych w.n.
 $\cos \varphi = 0,07 \dots 0,2$, co odpowiada wartościom stałej czasowej
44,5 ... 15,5 ms

Przykład 2.3

Wyznaczyć największą szczytową wartość prądu (prąd załączeniowy) w obwodzie jednofazowym prądu zmiennego, którego $\cos \varphi = 0,1$, jeżeli amplituda ustalonego prądu zwarcia wynosi $I_m = 10$ kA.

$$\text{Dla } \cos \varphi = 0,1 - T = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\omega} = \frac{9,79}{314} = 31 \text{ ms,}$$

$$\text{współczynnik uderu - } k_u \cong \left(1 + e^{-0,01/0,031}\right) = 1,73,$$

$$\text{prąd załączeniowy - } i_z = 10 \cdot 1,73 = 17,3 \text{ kA.}$$

Przykład 2.4

Wykreślić przebieg prądu zwarciovego w obwodzie jednofazowym prądu zmiennego o napięciu 6 kV, jeżeli reaktancja obwodu $x = 5 \Omega$, rezystancja $R = 0,5 \Omega$, a początkowa faza napięcia (tj. faza napięcia w momencie zwarcia odniesiona do przejścia napięcia przez maksimum) wynosiła $\psi = 30^\circ$. Przy rozwiązaniu zadania pominąć zanikanie składowej okresowej prądu.

Przebieg prądu po załączeniu obwodu będzie zawierał dwie składowe (patrz p.1.3.1):

- a) składową okresową,
- b) składową nieokresową.

Wartość początkową składowej okresowej wyraża się wzorem^{x)}

^{x)} Należy pamiętać, że w przypadku obliczania prądów zwarciovych w rzeczywistych obwodach sieciowych, we wzorze tym występuje współczynnik uwzględniający możliwość powiększenia napięcia znamionowego sieci U_n (patrz p.33). W rozwiązywanym przykładzie mamy do czynienia z obwodem idealizowanym o stałej wartości napięcia zasilania, w związku z czym nie uwzględnia się wspomnianego współczynnika.

$$I_p = \frac{U}{Z},$$

gdzie U - napięcie zasilające obwód zwarty,
 Z - impedancja obwodu zwartego.

W rozwiązywanym przykładzie $x \gg R$ tak, że można dla u-
proszczenia przyjąć $Z = \sqrt{x^2 + R^2} \approx x$ oraz $\varphi \approx 90^\circ$ (φ -
kąt przesunięcia fazowego pomiędzy prądem a napięciem).

Po podstawieniu danych

$$I_p = \frac{6 \text{ kV}}{5 \Omega} = 1,2 \text{ kA}.$$

Składowa okresowa prądu wyraża się wzorem

$$i_{ok} = I_m \cos(\omega t + \alpha),$$

gdzie $\alpha = \varphi - \varphi$ - początkowa faza prądu,

t - czas mierzony od chwili powstania zwarcia

$$i_{ok} = I_p \sqrt{2} \cos(\omega t + 30^\circ - 90^\circ) = 1,7 \cos(\omega t - 60^\circ) \text{ kA},$$

a jej wartość początkowa

$$(i_{ok})_0 = I_m \cos \alpha = 1,7 \cos 60^\circ = 0,85 \text{ kA}.$$

Wartość początkowa składowej nieokresowej prądu wynosi

$$(i_{no})_0 = - I_m \cos \alpha = - 0,85 \text{ kA},$$

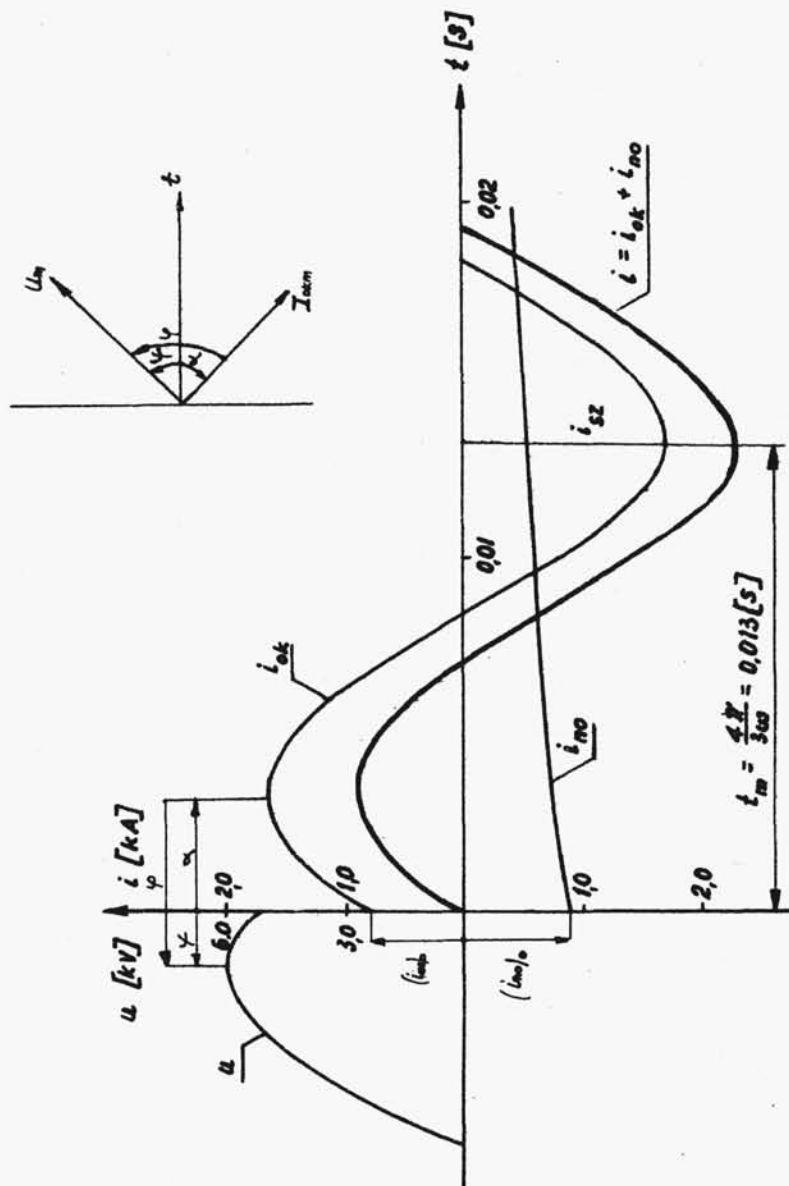
a jej wartość po czasie t

$$i_{no} = (i_{no})_0 e^{-t/T},$$

$$\text{przy czym } T = \frac{1}{\omega R} = \frac{x}{\omega R} = \frac{5}{314 \cdot 0,5} = 32 \text{ ms},$$

czyli

$$i_{no} = - 0,85 \text{ kA } e^{-t/0,032s}$$



Rys.2.5. Przebieg prądu zwarcowego do przykładu 2.4.

Na rys.2.5 przedstawiono przebiegi obu składowych oraz prądu wypadkowego. Prąd szczytowy występuje gdy $\cos(\omega t_m - 60^\circ) = \cos 180^\circ = -1$ a więc po czasie $t_m = \frac{4\pi}{3\omega} = 0,013$ s i wynosi

$$i_z = \left(-1,7 - 0,85 e^{-4\pi/3 \cdot 0,032} \right) \text{ kA} =$$

$$= (-1,7 - 0,85 \cdot 0,6) \text{ kA} = -2,36 \text{ kA}.$$

Przykład 2.5

Wykreślić przebieg prądu zwarciovego przy załączaniu jednofazowego obwodu prądu zmiennego o napięciu 15 kV o impedancji $Z = 10\Omega$ i $\cos \varphi = 0,15$, jeżeli początkowa faza napięcia wynosiła $\psi = 120^\circ$. Przy rozwiązywaniu należy pominąć zanikanie składowej okresowej prądu.

Przebiegi prądu przy załączaniu w obwodzie trójfazowym można określać analogicznie jak dla obwodu jednofazowego z tym, że obwód zastępczy będzie zależny od rodzaju zwarcia. W rzeczywistych obwodach sieciowych najcięższe warunki stwarza zazwyczaj zwarcie trójfazowe. Jeżeli założymy dla uproszczenia jednoczesne zwarcie wszystkich trzech faz, to wówczas przebiegi składowych okresowych prądów w poszczególnych fazach można rozpatrywać oddzielnie dla każdej z nich korzystając z jednofazowych obwodów zastępczych. Wartości początkowe składowych nieokresowych oraz szczytowe wartości prądów w poszczególnych fazach będą miały różne wartości zależnie od początkowej fazy napięcia. Jako prąd załączeniowy przyjmuje się w tym przypadku największy prąd szczytowy występujący w jednej z faz zwieranego obwodu. Wyznaczenie przebiegów prądu komplikuje się znacznie w przypadku zwarć niejednoczesnych. Wykracza to jednakże poza zakres skryptu i nie będzie rozpatrywane.

Przykład 2.6

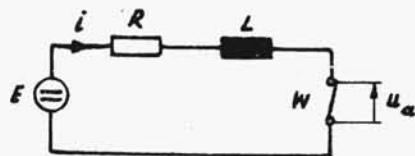
Wykreślić przebiegi prądu zwarciovego przy załączaniu w poszczególnych fazach trójfazowego obwodu prądu zmiennego o parametrach jak w przykładzie 2.5, jeżeli początkowa faza napięcia (dla pierwszej fazy) wynosiła $\psi = 150^\circ$. Przy rozwiązaniu należy pominąć zanikanie składowej okresowej prądu.

2.2. Wyłączanie prądu stałego

Wyłączanie prądu stałego będzie rozpatrzone na przykładzie obwodu z rys.2.6. Przebiegi prądu i napięcia przy wyłączaniu obwodu prądu stałego przedstawiono na rys.2.7. Po czasie własnym wyłącznika (t_{ww}) od chwili zwarcia, następuje rozdzielanie styków wyłącznika między którymi zapala się łuk elektryczny. W zależności od wartości czasu własnego wyłącznika odróżnia się tu dwa przypadki:

wyłączania przy wartości ustalonej prądu zwarciovego (rys.2.7a), lub przed ustaleniem się prądu (rys.2.7b). Zadaniem wyłącznika przerywającego obwód jest stworzenie warunków, w których prąd obwodu mający w chwili rozdziału wartość I_w (rys.2.7a) zostanie

srowadzony do zera. Ogólny warunek wyłączania prądu stałego można sformułować opierając się na równaniu dla obwodu z rys. 2.6 w stanie przejściowym



Rys.2.6. Schemat wyłączanego obwodu prądu stałego: R,L - parametry wyłączanego obwodu, W - wyłącznik obwodu

$$E = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + u_a, \quad (2.3)$$

gdzie u_a - napięcie łuku między stykami wyłącznika.

Stąd warunkiem malenia prądu od wartości $i_a = I_w$ do $i_a = 0$ jest aby

$$L \frac{di_a}{dt} \bigg|_{i_a=I_w}^{i_a=0} = E - i_a R + u_a < 0 \quad (2.4)$$

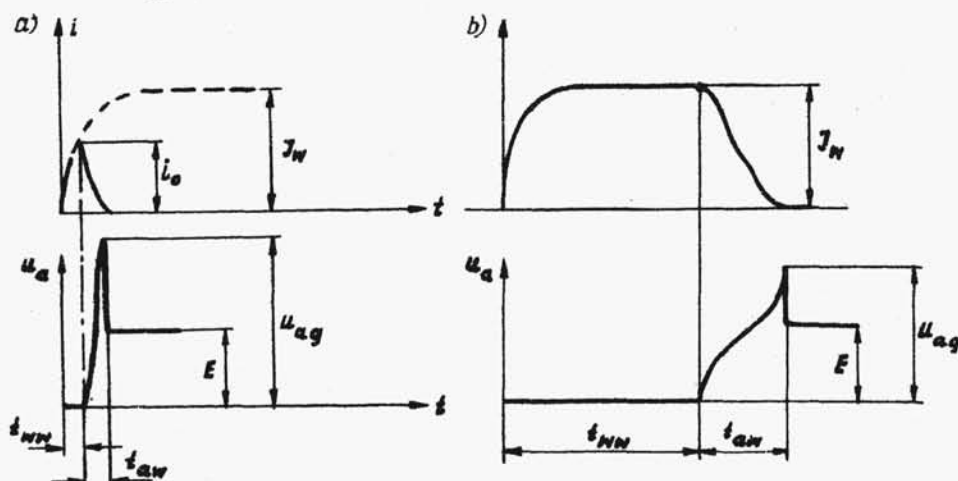
czyli

$$u_a > E - i_a R \bigg|_{i_a=I_w}^{i_a=0} \quad (2.5)$$

Wystarczającym granicznym warunkiem spełnienia wymagania (2.5) jest

$$u_{as} > E - i_a R \quad \left| \begin{array}{l} i_a = 0 \\ i_a = I_w \end{array} \right.$$

gdzie u_{as} - statyczne napięcie łuku.



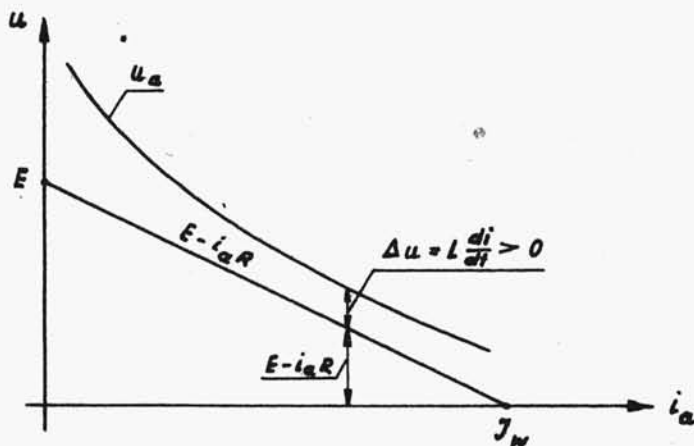
Rys.2.7. Przebiegi czasowe prądu i napięcia przy wyłączaniu prądu stałego: a - wyłączanie przy wartości ustalonej prądu, b - wyłączanie przed ustaleniem się prądu zwarciovego. I_w - prąd wyłączeniowy, I_0 - prąd w chwili rozdziału styków, E - napięcie zasilania, u_{ag} - napięcie gaszenia, t_{ww} - czas własny wyłącznika, t_{aw} - czas łukowy wyłącznika

Graficznie zależność przedstawiono na rys.2.8. Nierówność 2.5 oznacza, że warunkiem zgaszenia łuku prądu stałego jest, aby charakterystyka dynamiczna^{x)} $u_a = f(i)$ dla każdej wartości chwilowej prądu w przedziale $I_w \dots 0$ przebiegała powyżej prostej $E - i_a R$, czyli tzw. zewnętrznej charakterystyki obwodu. Im wyżej przebiega charakterystyka łuku w stosunku do charakterystyki zewnętrznej obwodu, tym większe jest tzw. napięcie redukcyjne $\Delta u = -L \frac{di_a}{dt}$ i tym szybciej maleje prąd,

^{x)} Jako charakterystykę dynamiczną łuku przyjmuje się zależność $u_a = f(i_a)$ w warunkach rzeczywistych zmian prądu występujących w obwodzie podczas wyłączania.

a tym samym skraca się czas łukowy. Położenie charakterystyki łuku zależne jest od konstrukcji wyłącznika, a uzyskanie dostatecznie wysokiego napięcia redukcyjnego (tzw. podniesienie charakterystyki) można osiągnąć przez zastosowanie specjalnych środków takich jak: wydmuch magnetyczny, wydmuch pneumatyczny oraz na drodze specjalnego ukształtowania styków opalanych.

Wzrost napięcia redukcyjnego jest ograniczony dopuszczalną wartością przepięcia, jakie występuje w chwili, kiedy prąd łuku $i_w = 0$. Stąd też przy opracowywaniu konstrukcji wyłącznika prądu stałego konieczne jest przyjęcie pewnego kompromisu pomiędzy dwoma przeciwstawnymi wymaganiami dotyczącymi krótkiego czasu łukowego oraz utrzymania przepięć łączeniowych na odpowiednio niskim poziomie.



Rys.2.8. Graficzna forma warunku wyłączania prądu stałego

Interesujący jest również wpływ indukcyjności obwodu na warunki wyłączania. Przy założeniu określonego położenia charakterystyki łuku ($\Delta u = \text{const}$), prędkość malenia prądu $\left(\frac{di_a}{dt}\right)$ będzie tym mniejsza, im większa jest indukcyjność obwodu. Tak więc wzrost indukcyjności obwodu powoduje wydłużanie się czasu łukowego i utrudnia warunki wyłączania.

Przykład 2.7

Wyznaczyć metodą całkowania graficznego czas łukowy wyłącznika prądu stałego wyłączającego obwód o parametrach: $E = 800 \text{ V}$, $R = 0,8 \Omega$, $T = 20 \text{ ms}$, jeżeli wyłączanie rozpoczęło się od wartości ustalonej prądu, a charakterystyka dynamiczna łuku ma kształt linii prostej (przebieg idealizowany) osiągającej dla $i_a = 0$ $u_{ag} = 1600 \text{ V}$, a dla $i_a = I_w$, $u_a = 50 \text{ V}$.

Czas łukowy można wyrazić z zależności

$$\Delta u = -L \frac{di_a}{dt} = u_a - E - Ri_a,$$

stąd

$$dt_a = -\frac{L}{\Delta u} di_a,$$

a

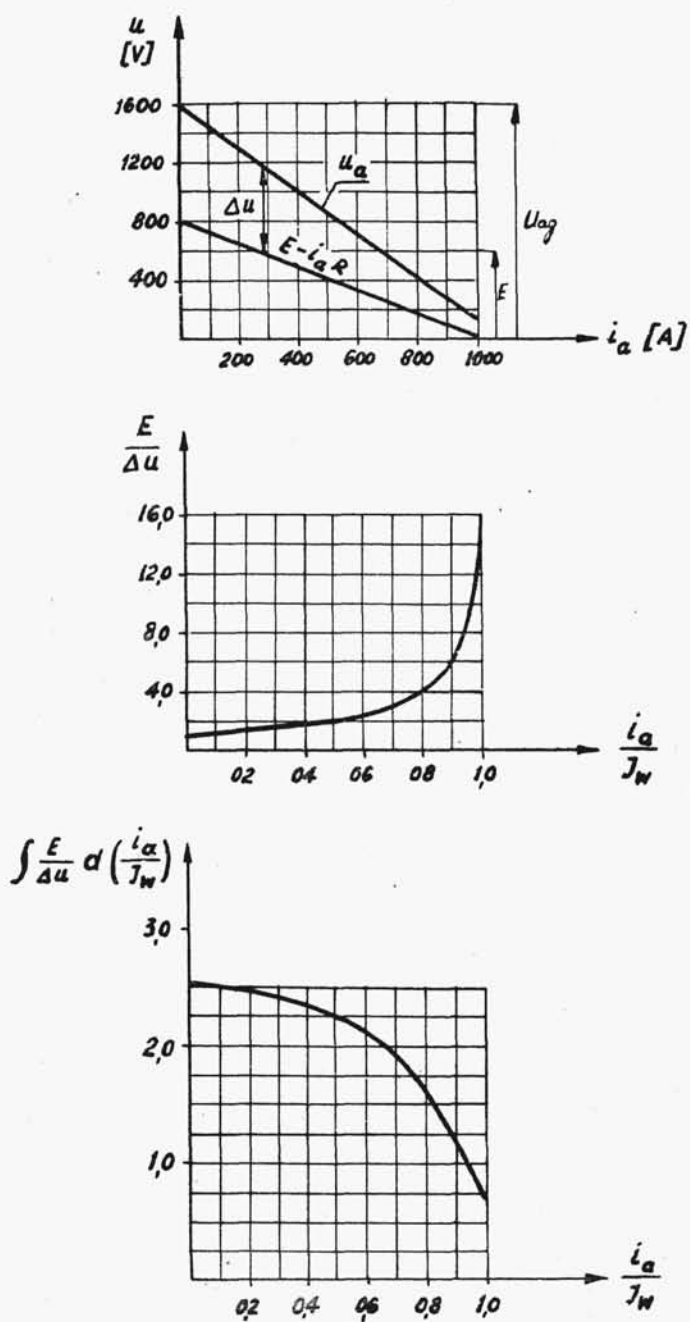
$$t_a = -L \int_{i_a=I_w}^{i_a=0} \frac{di_a}{\Delta u} = \frac{L}{R} \int_0^1 \frac{E}{\Delta u} d\left(\frac{i_a}{I_w}\right) = T t_{aN}, \quad (2.6)$$

gdzie $t_{aN} = \int_0^1 \frac{E}{\Delta u} d\left(\frac{i_a}{I_w}\right)$ - funkcja czasu łukowego zależna jedynie od konstrukcji wyłącznika.

Na podstawie danych obliczamy

$$I_w = I_m = \frac{E}{R} = \frac{800}{0,8} \text{ A} = 1000 \text{ A}.$$

Na rys.2.9a przedstawiono charakterystykę zewnętrzną wyłączanego obwodu oraz zadaną charakterystykę dynamiczną łuku. Na tej podstawie wyznaczono graficznie zależność $\frac{E}{\Delta u} = f\left(\frac{i_a}{I_w}\right)$ w granicach od $\frac{i_a}{I_w} = 0$.. do $\frac{i_a}{I_w} = 1$ (rys.2.9b). Metodą całkowania graficznego wyznaczono (dzieląc przedział $\frac{i_a}{I_w} = 0 \dots 1$ na 10 równych części) przebieg $\frac{E}{\Delta u} d\left(\frac{i_a}{I_w}\right) = f\left(\frac{i_a}{I_w}\right)$ (rys.2.9c), z którego odczytano wartość $t_{aN} = 2,5$.



Rys.2.9. Rozwiązanie graficzne przykładu 2.7

Czas łukowy wyłącznika wynosi $t_a = T t_{aN} = 20 \cdot 2,5$
ms = 50 ms.

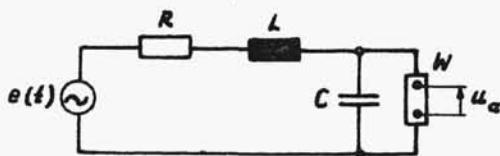
Przykład 2.8

Wyznaczyć czas łukowy wyłącznika prądu stałego wyłączającego obwód o parametrach $E = 3000$ V, $R = 0,6 \Omega$, $L = 15$ mH, jeżeli wyłączanie prądu rozpoczęło się od wartości $i_a = 0,8 I_w$, a charakterystyka dynamiczna łuku ma kształt linii prostej osiagającej w punkcie $i_a = 0$ $u_{ag} = 2,5 E$, a dla $i_a = 0,8 I_w$ $u_a = 200$ V.

2.3. Wyłączanie prądu zmiennego

2.3.1. Warunki wyłączania prądu zmiennego

Analizę zjawisk występujących podczas wyłączania prądu zmiennego rozpatrzmy na przykładzie jednofazowego obwodu zastępczego przedstawionego na rys.2.10. W obwodzie prądu zmiennego



Rys.2.10. Schemat zastępczy wyłączanego jednofazowego obwodu prądu zmiennego: $e(t)$ - napięcie źródła o przebiegu sinusoidalnym; L , R , C - parametry zastępcze wyłączanego obwodu, W - wyłącznik obwodu

ogólny warunek wyłączania sformułowany jako konieczność sprowadzenia prądu do wartości zero jest realizowany bez udziału wyłącznika przez okresową zmienną SEM źródła, która wymusza przejście składowej okresowej prądu w obwodzie przez wartość zerową dwa razy w ciągu okresu. Speł-

nienie warunku osiągnięcia przez prąd wartości zero nie jest jednakże warunkiem wystarczającym do wyłączenia obwodu. Szybkość zmian prądu w pobliżu przejścia przez zero jest - szczególnie dla prądów zwarciovych - tak duża, że zmiany temperatury oraz koncentracji ładunków wskutek histerezy kanału łukowego nie nadążają za zmianami prądu. Wobec tego kanał po-
łukowy posiada z chwilą zgaśnięcia łuku (tj. osiągnięcia wartości zerowej prądu łuku) określoną przewodność elektryczną, co stwarza możliwość ponownego zapłonu wyładowania łukowego. Z chwilą zgaśnięcia łuku napięcie źródła zaczyna przeładowy-