

URZĄDZENIA ELEKTRYCZNE – LABORATORIUM

Ćwiczenie 4.

Charakterystyka łuku elektrycznego

1. Mechanizm wyładowania łukowego w łącznikach elektrycznych

Zapalenie się łuku elektrycznego w łączniku może być spowodowane:

- rozdzielaniem się styków łącznika w czasie jego otwierania,
- przeskokiem iskry przy zbliżaniu się styków podczas zamykania łącznika,
- stopieniem i odparowaniem elementu topikowego w bezpiecznikach.

W czasie otwierania łącznika, między rozdzielającymi się stykami występują wyładowania elektryczne, jeżeli przerywany prąd i napięcie są większe od pewnych określonych wartości granicznych. Wartości te zależą od materiału, z którego wykonane są styki (tabela 1). Przy otwieraniu obwodów, w których płynie niewielki prąd, ale napięcie jest znaczne, może wystąpić wyładowanie świetlące, tzn. wyładowanie iskrowe niskotemperaturowe (niska temperatura gazu i elektrod). Tylko niewielkie wartości prądu w obwodach o niskim napięciu mogą być przerywane beziskrowo.

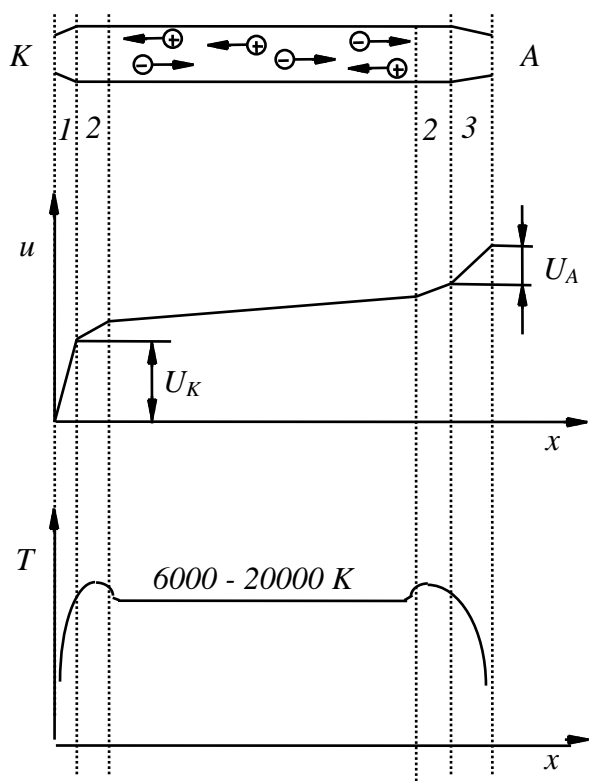
Tabela 1. Minimalne wartości napięć (U_0) i prądów (I_0) warunkujące powstanie wyładowania łukowego

Materiał	U_0 [V]	I_0 [A]
Platyna	17	0,7 - 1,1
Złoto	15	0,3 - 0,4
Srebro	12	0,4
Wolfram	15 - 16	0,8 - 1,2
Miedź	12 - 13	0,4
Pallad	15 - 16	0,8 - 0,9
Węgiel	20	0,01 - 0,02
Żelazo	13 - 15	0,3 - 0,5
Nikiel	14	0,4 - 0,5

W przeciwieństwie do tego, podczas wyładowań łukowych, gaz i styki nagrzewają się do bardzo wysokich temperatur. Bezpośrednio przed rozejściem się styków maleje szybko siła ich docisku, skutkiem czego rośnie rezystancja przejścia. Przepływający prąd powoduje silne nagrzanie powierzchni styków w miejscach ich styczności. Wysoka temperatura powoduje parowanie materiału elektrod. W chwili utraty styczności między stykami pojawia się pole elektryczne o dużym natężeniu i rozpoczyna się jonizacja zderzeniowa. Rozpędzone w polu elektrycznym elektrony jonizują pary materiału elektrod i cząsteczki gazu w przestrzeni międzystykowej. Dochodzi szybko do jonizacji lawinowej i zapalenia się łuku elektrycznego. Łuk początkowo jest krótki (kilka milimetrów), w miarę rozchodzenia się styków wydłuża się, przechodząc w łuk długi. Jego temperatura osiąga poziom od 6 do 20 tysięcy kelwinów.

2. Charakterystyki wyładowania łukowego

Pałący się między stykami (elektrodami) łuk elektryczny można podzielić na kilka stref (rys. 1). W pobliżu elektrody ujemnej K znajduje się strefa katodowego spadku napięcia ($U_K = 10...20$ V), spowodowana ładunkiem przestrzennym jonów dodatnich zjonizowanych w tej strefie oraz napływających z kolumny łukowej. Grubość strefy katodowej wynosi około $0,01 \div 0,1$ mm.



Rys. 1. Uproszczony obraz łuku elektrycznego i jego podstawowe charakterystyki;

K - katoda,

A - anoda,

1 - strefa katodowa,

2 - strefa przejściowa,

3 - strefa anodowa,

u - rozkład napięcia,

U_K i U_A - spadki napięcia w strefie katodowej i anodowej,

T - temperatura rdzenia łuku.

Wyładowanie elektryczne bazuje głównie na elektronach emitowanych z elektrody ujemnej. Możliwe są dwa rodzaje emisji:

- termoemisja (emisja cieplna) występująca po rozgrzaniu elektrody na skutek bombardowania jej jonami dodatnimi, wspomagana dużym natężeniem pola elektrycznego;
- autoemisja (emisja polowa) spowodowana dużym natężeniem pola elektrycznego ($10^5...10^6$ V·cm⁻¹) przy elektrodzie ujemnej.

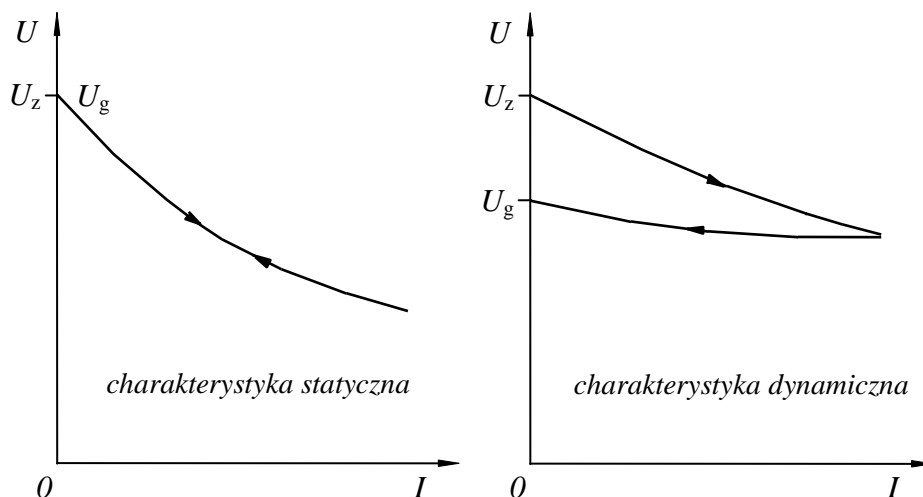
Przy elektrodzie dodatniej występuje strefa anodowego spadku napięcia ($U_A = 5...10$ V), w której elektrony mają znaczną przewagę nad jonami z powodu odpływu tych ostatnich do elektrody ujemnej. Grubość tej strefy wynosi od 0,1 do 1 mm. Elektroda dodatnia spełnia w czasie wyładowania łukowego rolę bierną przyjmując tylko strumień elektronów.

Środkową, zasadniczą część łuku zajmuje kolumna łukowa, łącząca się ze strefą katodową i anodową przez strefy przejściowe. W kolumnie łukowej występuje równomierna koncentracja jonów dodatnich i elektronów oraz stałe natężenie pola elektrycznego ($10 \div 400$ V·cm⁻¹). Temperatura kolumny łukowej jest bardzo wysoka ($6...20 \cdot 10^3$ K) z powodu przekazywania energii kinetycznej rozprzeczonych w polu elektrycznym elektronów cząsteczkom i jonom w czasie zderzeń sprężystych.

Charakterystyka łuku to zależność napięcia łuku od prądu łuku. Rozróżnia się charakterystykę statyczną i dynamiczną łuku (rys. 2.). Charakterystykę statyczną uzyskuje się podczas bardzo powolnych zmian prądu łuku. Odpowiada ona równowadze energii dostarczanej do łuku i traconej przez łuk. Przebieg tej charakterystyki zależy od długości łuku i intensywności chłodzenia kolumny łukowej. Charakterystyki dynamiczne uzyskuje się dla większych prędkości zwiększania lub zmniejszania prądu. Na ich przebieg ma wpływ bezwładność zjawisk zachodzących w kolumnie łukowej, zmiana jej średnicy oraz intensywność procesów jonizacji i dejonizacji.

W przypadku łuku prądu przemiennego prąd co pół okresu ma wartość chwilową równą zero i zmienia kierunek przepływu, niezależnie od stanu zjonizowania przestrzeni między elektrodami. Kiedy napięcie osiąga wartość napięcia zapłonu (U_z) łuk zapala się, kiedy napięcie zmniejszy się poniżej napięcia gaśnięcia (U_g) łuk gaśnie. Dla prądu przemiennego $di/dt \neq 0$, charakterystyka łuku jest więc charakterystyką dynamiczną, a napięcie gaśnięcia jest niższe od napięcia zapłonu łuku.

W obwodzie prądu przemiennego zawierającym tylko rezystancję napięcie zasilające jest w fazie z napięciem i prądem łuku. Zapewnia to korzystne warunki gaszenia łuku. W przypadku przewagi reaktancji w obwodzie, w chwili przejścia prądu przez zero napięcie źródła ma wartość bliską maksymalnej. W takich obwodach warunki gaszenia łuku są znacznie gorsze niż w obwodach zawierających tylko rezystancję. Krótszy jest również czas przerwy bezprądowej.



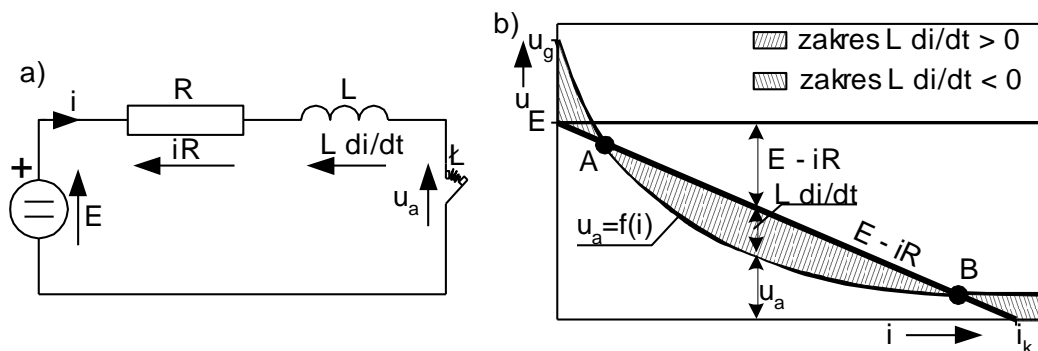
Rys. 2. Charakterystyki prądowo-napięciowe łuku: statyczna ($di/dt \cong 0$) i dynamiczna ($di/dt \neq 0$); U_z - napięcie zapłonu łuku, U_g - napięcie gaśnięcia łuku

3. Łuk łączeniowy prądu stałego

Analizę przebiegów prądu i napięcia łuku elektrycznego prądu stałego prowadzi się w elementarnym obwodzie, którego schemat przedstawiono na rys. 3a. Zgodnie z drugim prawem Kirchhoffa można napisać następującą zależność:

$$E = iR + L \frac{di}{dt} + u_a \quad (1)$$

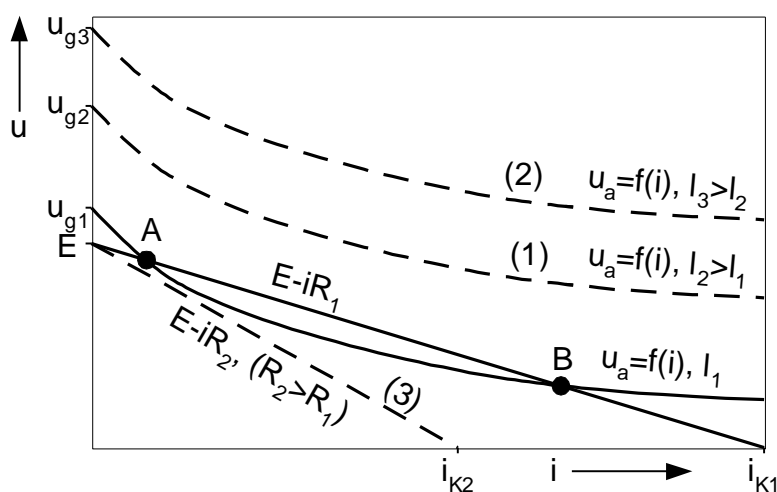
Parametry elektryczne łuku to jego prąd i napięcie, których zmiany analizuje się w oparciu o charakterystykę łuku, czyli zależności $u_a = f(i)$. W przypadku łuku prądu stałego, przy niewielkich zmianach prądu w czasie ($di/dt \approx 0$) jest to charakterystyka statyczna. Iloraz napięcia i prądu daje informację o zmianach rezystancji łuku, natomiast ich iloczyn – informację o mocy łuku. Charakterystykę statyczną łuku, stanowiącą ilustrację równania (1) przedstawiono na rys. 3b.



Rys. 3. Łuk elektryczny w obwodzie prądu stałego; a) schemat obwodu, b) charakterystyka statyczna łuku $u_a = f(i)$; E – napięcie źródła, R , L – rezystancja i indukcyjność obwodu, L – styki, między którymi pali się łuk, u_a – napięcie łuku, i – prąd łuku, u_g – napięcie gaśnięcia łuku o charakterystyce $u_a = f(i)$, A , B – punkty równowagi, odpowiednio: chwiejnej i stabilnej, i_k – prąd zwarcia

Charakterystyka łuku $u_a = f(i)$ ma dwa punkty przecięcia z charakterystyką obwodu (prosta $E - iR$), przy czym punkt A nazywany jest punktem równowagi chwiejnej, natomiast punkt B – punktem równowagi stabilnej. Punkty te dzielą obszar wykresu na dodatni zakres napięcia występującego na indukcyjności obwodu $L(di/dt)$ oraz zakres ujemny. Ujemny bądź dodatni zakres $L(di/dt)$ oznacza odpowiednio ujemny bądź dodatni znak pochodnej prądu di/dt . Warunkiem zgaszenia łuku prądu stałego jest przesunięcie punktu pracy w ujemny zakres pochodnej prądu ($di/dt < 0$), dzięki czemu prąd będzie się systematycznie zmniejszał, aż osiągnie wartość zbyt małą do podtrzymania wyładowania i łuk zgaśnie. Przesunięcie punktu pracy w ujemny zakres pochodnej prądu di/dt oznacza takie wzajemne ułożenie charakterystyk łuku ($u_a = f(i)$) i obwodu ($E - iR$), aby nie miały one punktów wspólnych. Istnieją dwa podstawowe sposoby realizacji tego zadania:

- wydłużenie łuku, a tym samym przesunięcie jego charakterystyki w zakres wyższych wartości napięcia (krzywe 1 i 2 na rys. 4),
- zwiększenie rezystancji obwodu i obniżenie charakterystyki $E - iR$, (prosta 3 na rys. 4).



Rys. 4. Ilustracja wzajemnego przesunięcia statycznej charakterystyki łuku $u_a = f(i)$ względem charakterystyki obwodu $E - iR$ w celu uzyskania ujemnej wartości pochodnej prądu di/dt ; l_1 , l_2 , l_3 – długości łuku, pozostałe oznaczenia jak na rys. 3; charakterystyka $u_a = f(i)$ dla najmniejszej długości łuku l_1 jest charakterystyką wyjściową

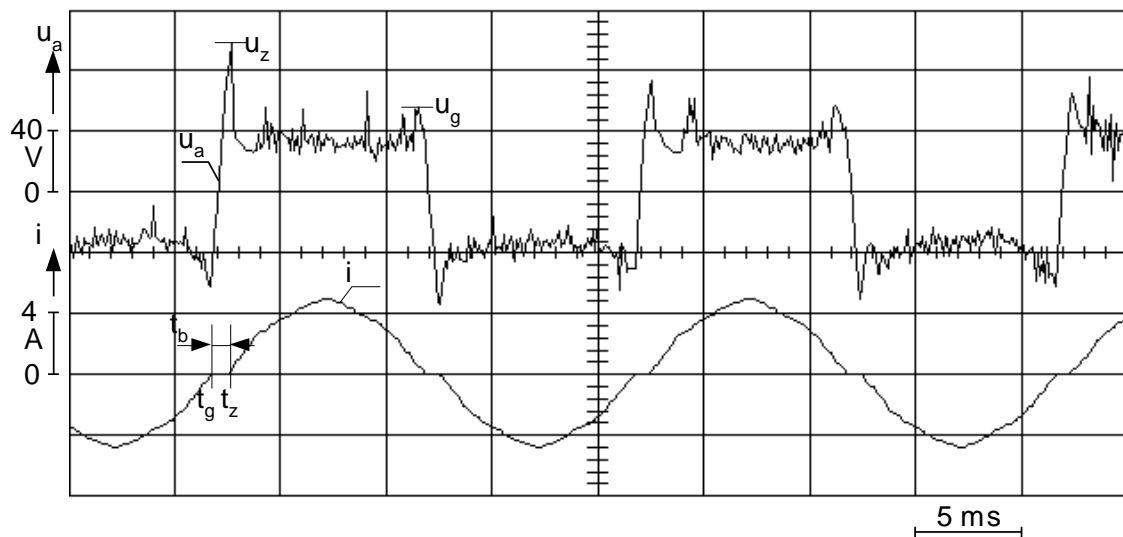
Znacznie łatwiejszym do praktycznej realizacji jest pierwszy z wymienionych sposobów. Zwiększenie długości łuku w łącznikach realizuje się na kilka różnych sposobów, z których najczęściej spotykane to:

- rozwarcie styków na odpowiednią odległość,
- odpowiednie ukształtowanie styków (np. rożkowy kształt styków),
- wydmuch łuku.

4. Łuk łączeniowy prądu przemiennego

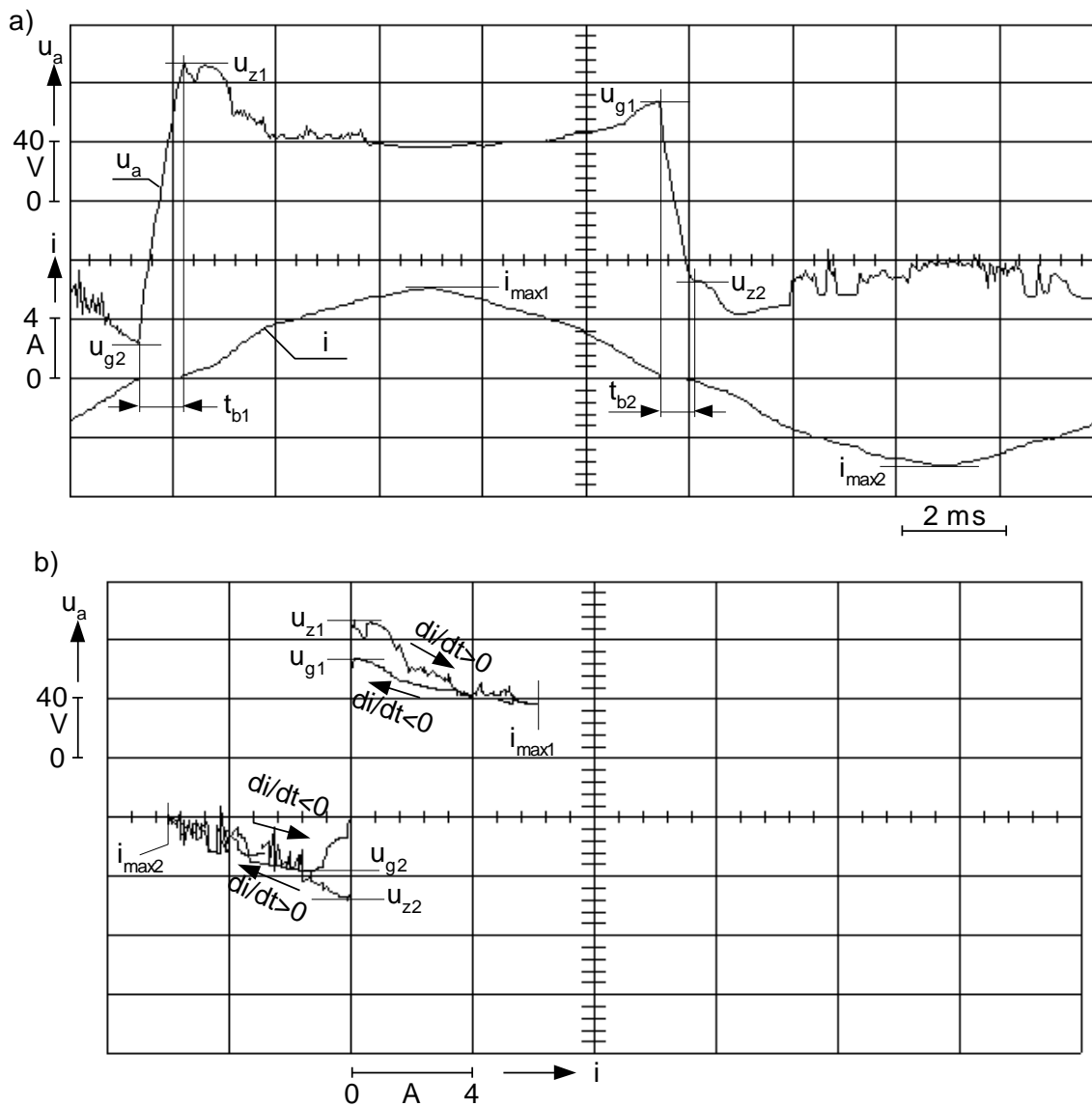
W gaszeniu łuku prądu przemiennego wykorzystuje się naturalne przejście prądu przez wartość zerową. Zapłon łuku w danym półokresie po przejściu prądu przez zero następuje wówczas, gdy napięcie pomiędzy elektrodami osiąga wartość napięcia zapłonu u_z (rys. 5) i gaśnie, gdy napięcie łuku u_a zmniejsza się poniżej napięcia gaśnięcia u_g podczas zbliżania się prądu do kolejnego przejścia przez zero. Odcinek czasu t_b upływającego od chwili zgaszenia łuku t_g do chwili jego ponownego zapłonu t_z nosi nazwę przerwy bezprądowej.

Charakterystyka łuku $u_a = f(i)$ w obwodzie prądu przemiennego jest charakterystyką dynamiczną. Jest wykreślona (na rysunku 6) dla dodatniej i ujemnej części okresu napięcia i prądu, czyli mieści się w I i III ćwiartce na płaszczyźnie $u = f(i)$. Cechą charakterystyki dynamicznej jest to, że jej część w fazie narostu prądu ($di/dt > 0$) odpowiada wyższym bezwzględnym wartościom napięcia niż część w fazie zmniejszania się prądu do zera ($di/dt < 0$). Wynika stąd, że zarówno rezystancja łuku jak i jego energia jest wyższa w fazie wzrostu prądu niż w fazie jego zmniejszania się.

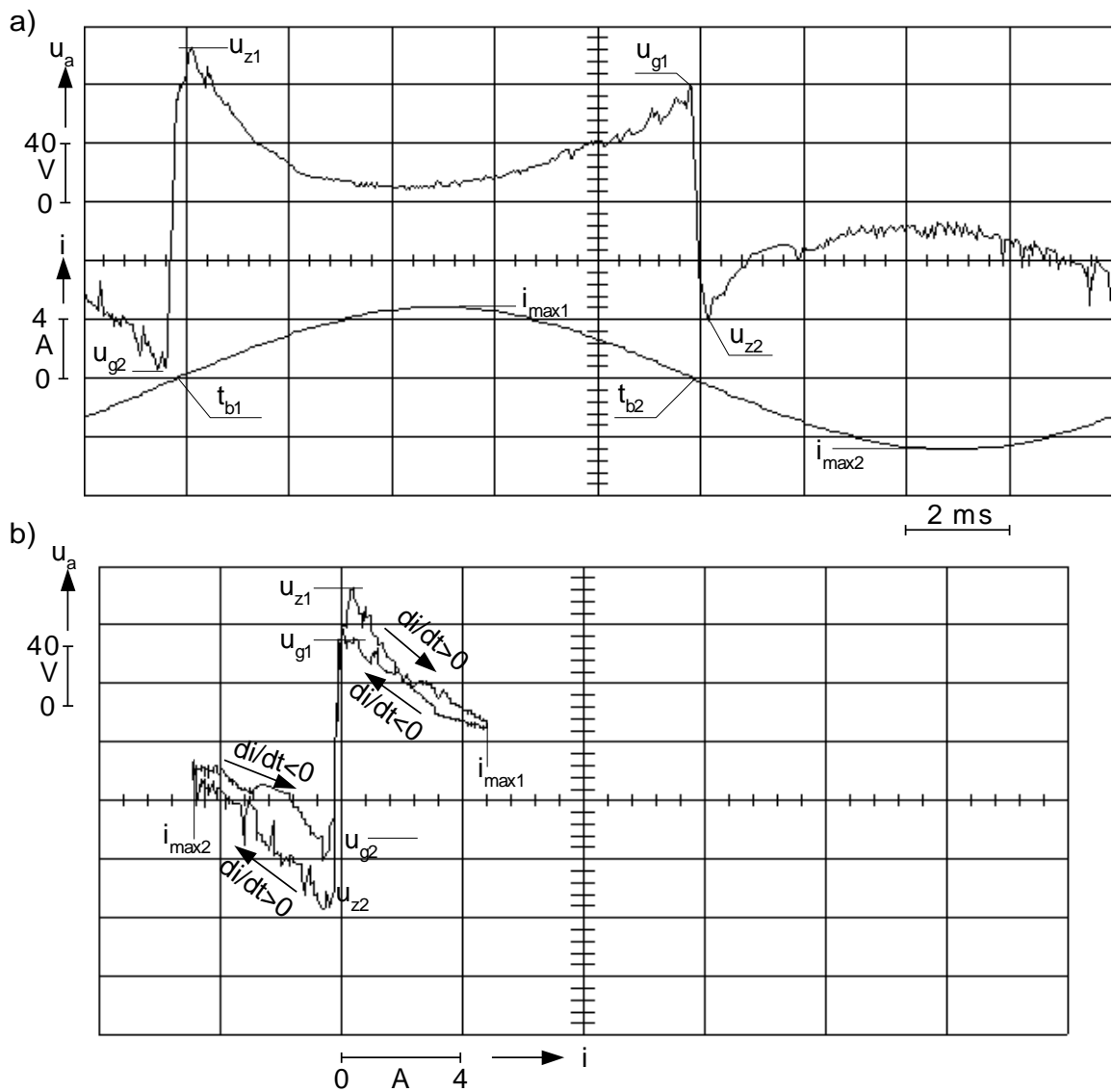


Rys. 5. Oscylogramy napięcia u_a i prądu łuku prądu przemiennego w obwodzie o charakterze rezystancyjnym; u_z , u_g – napięcia zapłonu i gaśnięcia łuku, t_b – czas trwania przerwy bezprądowej, t_g , t_z – początek i koniec przerwy bezprądowej

W zależności od tego, czy obwód ma charakter rezystancyjny (rys. 5 i 6) czy indukcyjny (rys. 7), różny jest czas trwania przerw bezprądowych t_b . W obwodzie o charakterze rezystancyjnym napięcie źródła zasilania jest w fazie z napięciem łuku i w chwili wystąpienia przerwy bezprądowej wartość napięcia źródła jest w pobliżu zera. Stromość wzrostu napięcia powrotnego jest stosunkowo nieduża i zgodna z sinusoidalnym przebiegiem napięcia zasilania. W obwodzie o charakterze indukcyjnym w chwili przejścia prądu przez zero wartość siły elektromotorycznej źródła jest bliska jej amplitudy. Napięcie powrotne na stykach cechuje znacznie większa stromość wzrostu, gdyż po dojściu prądu do zera (chwila t_g , rys. 7) zmierza natychmiast do wartości bliskiej amplitudzie napięcia zasilającego. Na oscylogramie przebiegu prądu w obwodzie indukcyjnym (rys. 7) przerwa bezprądowa jest tak krótka, że jest praktycznie niewidoczna.



Rys. 6. Oscylogram jednego okresu prądu i napięcia łuku w obwodzie prądu przemiennego o charakterze rezystancyjnym (a) i odpowiadająca mu charakterystyka dynamiczna (b); i_{max1} , i_{max2} – amplituda prądu łuku, pozostałe oznaczenia jak na rys. 5



Rys. 7. Oscylogram jednego okresu prądu i napięcia łuku w obwodzie prądu przemiennego o charakterze indukcyjnym (a) i odpowiadająca mu charakterystyka dynamiczna (b); oznaczenia jak na rys. 5 i 6