

3. ŁUK ELEKTRYCZNY PRĄDU STAŁEGO I PRZEMIENNEGO

3.1. Cel i zakres ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z podstawowymi właściwościami łuku elektrycznego palącego się swobodnie, w powietrzu o ciśnieniu atmosferycznym. Ćwiczenie obejmuje:

- badanie łuku w obwodzie prądu stałego i pomiar charakterystyki statycznej łuku,
- badanie łuku w obwodzie prądu przemiennego, obserwacja przebiegów napięcia i prądu oraz charakterystyki dynamicznej łuku w obwodzie o rezystancyjnym i indukcyjnym charakterze obciążenia.

Znajomość zjawisk zaobserwowanych podczas realizacji ćwiczenia jest pomocna w zrozumieniu procesu gaszenia łuku w łącznikach prądu stałego i przemiennego.

3.2. Wiadomości podstawowe

3.2.1. Informacje wstępne

Łuk elektryczny jest jedną z form wyładowania elektrycznego w środowisku zjonizowanej plazmy. Jonizacja ta może zachodzić w trzech typowych środowiskach:

- w gazie, np. w powietrzu, sześciofluorku siarki,
- w produktach rozkładu cieczy, np. oleju mineralnego, wody,
- w parach metalu emitowanego z powierzchni elektrod, które przykładowo stanowią nośniki prądu w łuku próżniowym.

W większości aparatów łączeniowych niskiego napięcia łuk pali się w powietrzu, zwykle w powietrzu o ciśnieniu atmosferycznym. Łuk taki, nazywany łukiem powietrznym, jest przedmiotem badań w opisanym ćwiczeniu laboratoryjnym.

Łuk elektryczny jest złożonym zjawiskiem fizycznym, na które składają się zasadniczo trzy rodzaje procesów:

- termodynamiczne,
- elektryczne,
- jonizacyjne.

Wszystkie te zjawiska są ze sobą ściśle powiązane. Badane w ćwiczeniu własności elektryczne to jedynie stosunkowo wąski fragment wiedzy o łuku elektrycznym.

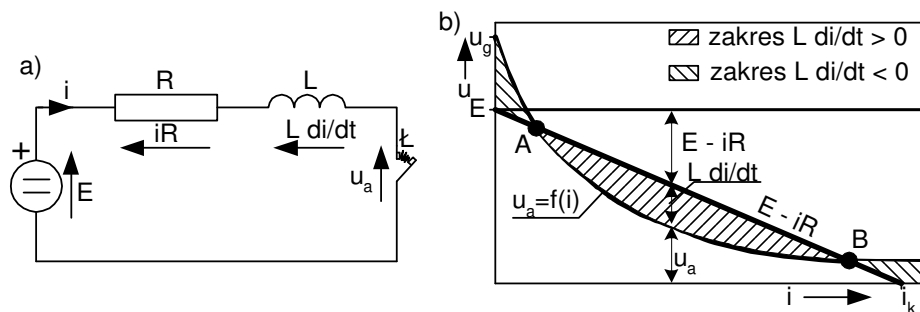
Pozwalają one jednak w znacznej mierze wyjaśnić zasady gaszenia łuku w łącznikach elektrycznych.

3.2.2. Warunki palenia się i gaszenia łuku elektrycznego prądu stałego

Analizę przebiegów prądu i napięcia łuku elektrycznego prądu stałego prowadzi się w elementarnym obwodzie, którego schemat przedstawiono na rys. 3.1a. Zgodnie z drugim prawem Kirchhoffa można zapisać następującą zależność:

$$E = iR + L \frac{di}{dt} + u_a, \quad (3.1)$$

(oznaczenia wyjaśniono w podpisie pod rysunkiem 3.1). Parametry elektryczne łuku to jego prąd i napięcie, których zmiany analizuje się w oparciu o tzw. charakterystykę łuku, czyli zależności $u_a = f(i)$. W przypadku łuku prądu stałego, czyli przy niewielkich zmianach prądu w czasie ($di/dt \approx 0$) charakterystyka ta nosi nazwę statycznej charakterystyki łuku. Iloraz napięcia i prądu daje informację o zmianach rezystancji łuku, natomiast ich iloczyn – informację o mocy łuku. Przebieg charakterystyki statycznej łuku przedstawiono na rys. 3.1b. Rysunek ten jest również graficzną ilustracją równania (3.1).

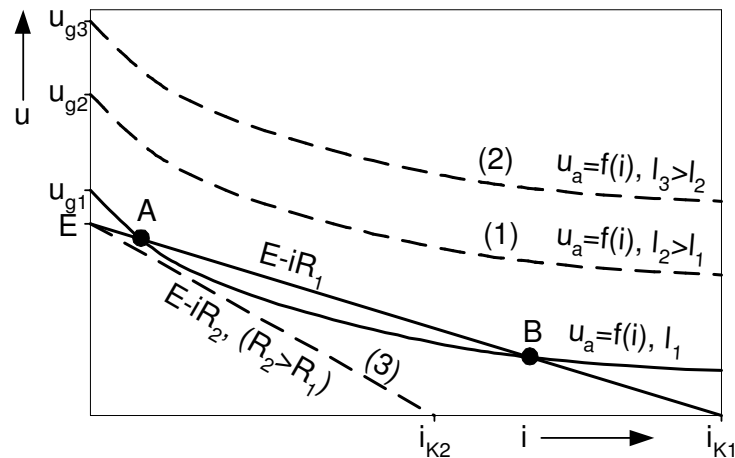


Rys. 3.1. Łuk elektryczny w obwodzie prądu stałego; a) schemat obwodu, b) charakterystyka statyczna łuku $u_a = f(i)$, wraz z graficzną interpretacją rozwiązania równania (3.1); E – napięcie źródła, R , L – rezystancja i indukcyjność obwodu, L – układ styków (elektrod) na których pali się łuk, u_a – napięcie łuku, i – prąd łuku, u_g – napięcie przy którym gaśnie łuk o charakterystyce $u_a = f(i)$, A, B – punkty równowagi, odpowiednio: chwiejnej i stabilnej, i_k – prąd zwarcia w rozpatrywanym obwodzie.

Charakterystyka łuku $u_a = f(i)$ posiada dwa punkty przecięcia się 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, jak to ilustruje rys. 3.1. 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 gaśnie. 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, rys. 3.2),
- zwiększenie rezystancji obwodu i „obniżenie” charakterystyki $E - iR$, (prosta 3, rys. 3.2).



Rys. 3.2. 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 3.1; 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 l w łącznikach realizuje się na kilka różnych sposobów, z których najczęściej spotykane to:

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

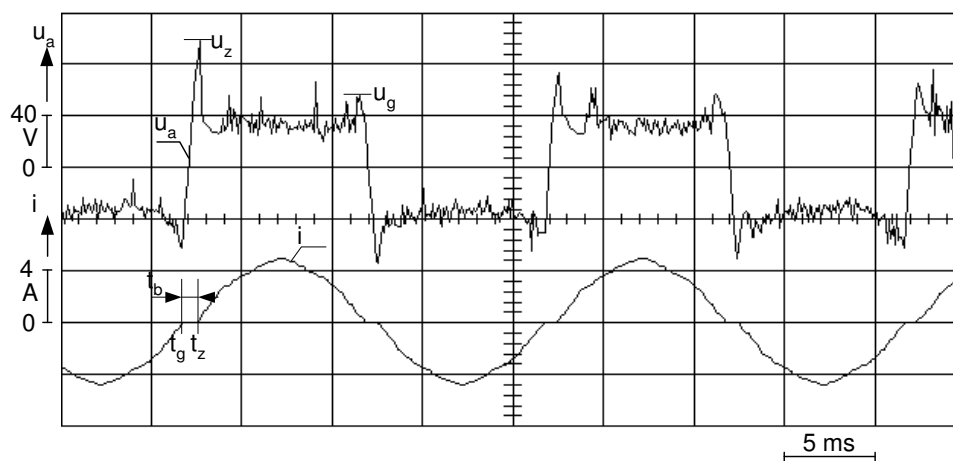
Należy jednak zwrócić uwagę na to, że wraz ze wzrostem długości łuku l rośnie wartość napięcia u_g (rys. 3.2), przy którym łuk gaśnie, a tym samym rośnie przepięcie łączeniowe związane z procesem wyłączania prądu. Przepięcie to charakteryzowane jest współczynnikiem przepięcia k_p , zgodnie z zależnością (3.2):

$$k_p = \frac{u_g}{E}. \quad (3.2)$$

Istnieje szereg różnych sposobów ograniczania przepięć łączeniowych w łącznikach prądu stałego. Niektóre z nich opisano w literaturze [3.1].

3.2.3. Łuk elektryczny w obwodach 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. 3.3) i gaśnie, gdy napięcie łuku u_a zmniejsza się poniżej napięcia gaszenia u_g podczas zbliżania się prądu do kolejnego przejścia przez zero. Odcinek czasu t_b (rys. 3.3) upływający od chwili zgaszenia łuku t_g do chwili jego ponownego zapłonu t_z nosi nazwę przerwy bezprądowej.

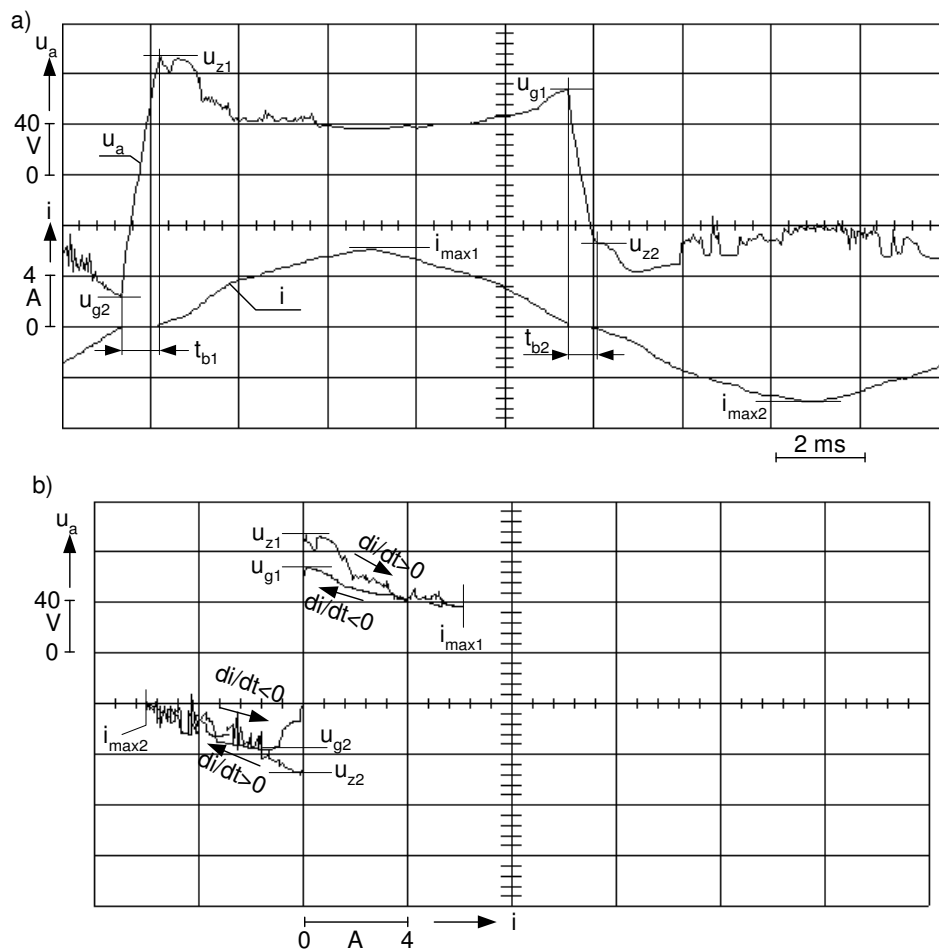


Rys. 3.3. Oscylogramy napięcia u_a i prądu i łuku prądu przemiennego w obwodzie o charakterze rezystancyjnym; u_z , u_g – napięcia odpowiednio: zapłonu i gaszenia łuku w danym półokresie prądu, t_b – czas trwania przerwy bezprądowej, t_g , t_z – początek i koniec przerwy bezprądowej.

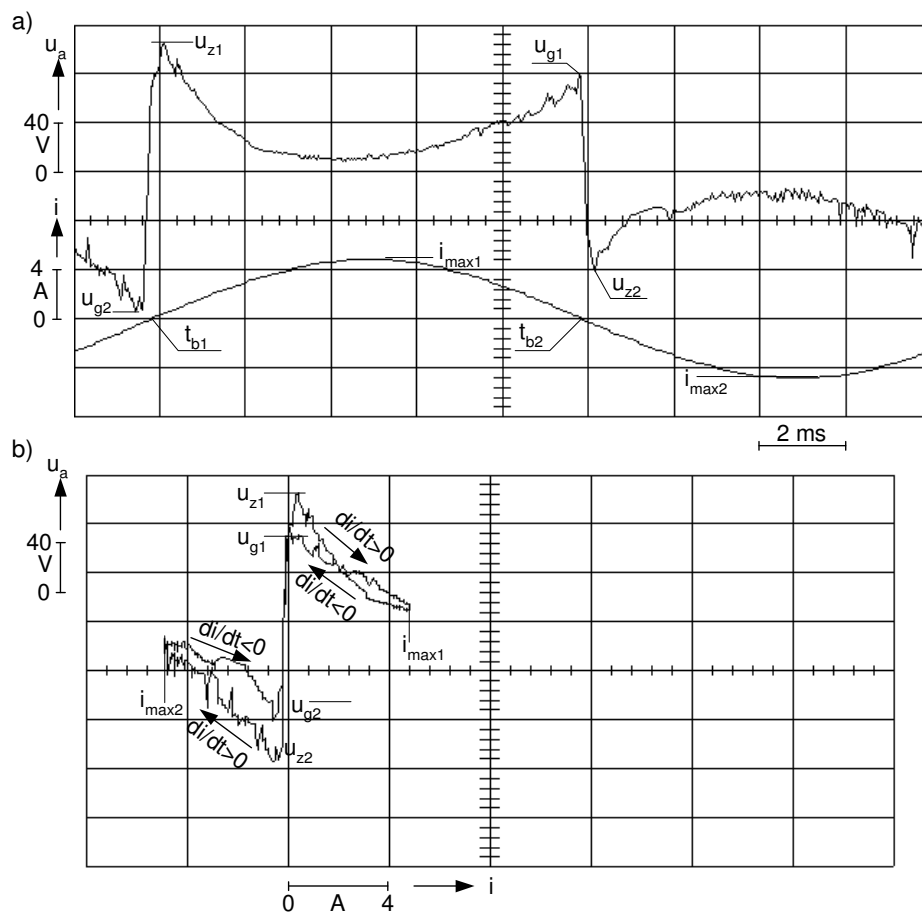
Charakterystyka łuku $u_a = f(i)$ w obwodzie prądu przemiennego nosi nazwę charakterystyki dynamicznej. Jest ona wykreślona dla dodatniej i ujemnej części okresu napięcia i prądu, czyli mieści się w I i III ćwiartce na płaszczyźnie $u-i$ (rys. 3.4). Cechą charakterystyki dynamicznej jest to, że jej część 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 narostu prądu niż w fazie jego zmniejszania się. Zjawisko to jest związane z procesami energetycznymi i jonizacyjnymi zachodzącymi w plazmie łuku prądu przemiennego [3.1, 3.2].

W zależności od tego, czy obwód ma charakter rezystancyjny (rys. 3.3, 3.4) czy indukcyjny (rys. 3.5) 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 narostu napięcia powrotnego jest więc 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 więc znacznie większa stromość narostu, gdyż po dojściu prądu do zera (chwila t_g , rys. 3.5) zmierza ono natychmiast do wartości bliskiej amplitudzie napięcia zasilającego. Na przykładowym oscylogramie przebiegu prądu w obwodzie indukcyjnym z rys. 3.5 przerwa bezprądowa jest tak krótka, że jest praktycznie niewidoczna.

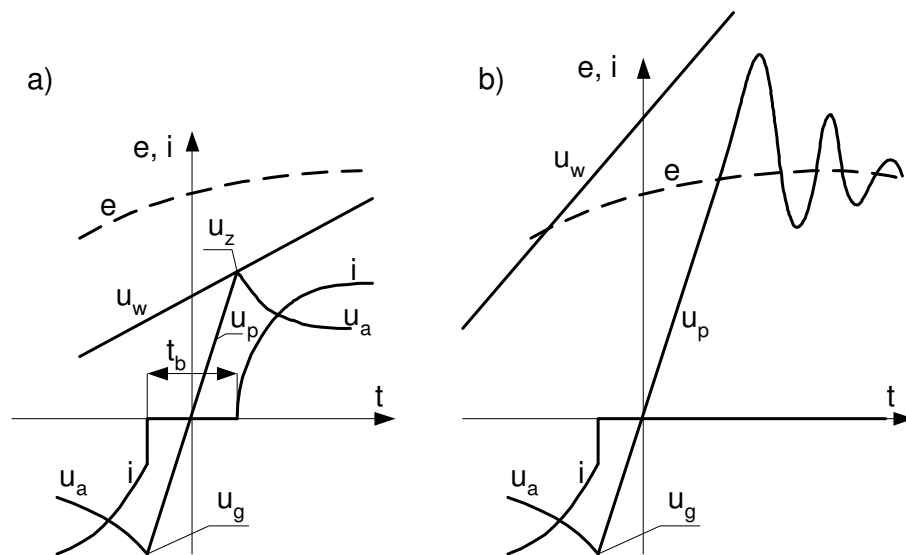
Gaszenie łuku w łącznikach prądu przemiennego polega na niedopuszczeniu do ponownego zapłonu łuku po kolejnym przejściu prądu przez zero (rys.3.6). Łuk gaśnie, jeśli krzywa wzrostu napięcia powrotnego u_p , (rys 3.6) pojawiającego się na rozchodzących się stykach, nie przetnie się z krzywą wzrostu wytrzymałości połukowej u_w (rys. 3.6b). Jeśli natomiast dojdzie do przecięcia się tych krzywych, łuk zapala się ponownie i następuje kontynuacja wyładowania w ciągu następnego półokresu (rys. 3.6a). Na przebieg wytrzymałości połukowej $u_w = f(t)$ ma wpływ czas trwania przerwy bezprądowej t_g . Proces gaszenia łuku jest więc łatwiejszy w obwodach o charakterze rezystancyjnym (rys. 3.3, 3.4), gdzie przerwa ta jest dłuższa niż w obwodach o charakterze indukcyjnym (rys. 3.5).



Rys. 3.4. Przykładowy 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. 3.3.



Rys. 3.5. Przykładowy 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. 3.3 i 3.4.



Rys. 3.6. Przebiegi prądu i napięcia podczas gaszenia łuku prądu przemiennego:
a) przy ponownym zapłonie łuku, b) przy skutecznym wyłączeniu obwodu; e – przebieg siły elektromotorycznej źródła, u_w – przebieg wzrostu wytrzymałości przerwy połukowej, u_p – przebieg napięcia powrotnego na stykach; pozostałe oznaczenia jak na rys. 3.3.

3.3. Niezbędne przygotowanie studenta

Studentów obowiązuje znajomość materiału z zakresu łuku elektrycznego zawarta w [3.1], rozdziały 5.3 i 5.4.

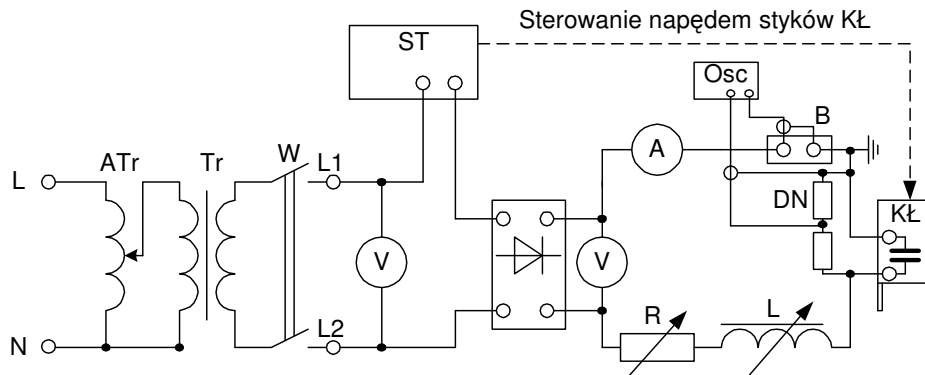
3.4. Opis stanowiska laboratoryjnego

Stanowisko laboratoryjne składa się z dwóch części, pozwalających na badanie odpowiednio łuku prądu stałego i łuku prądu przemiennego.

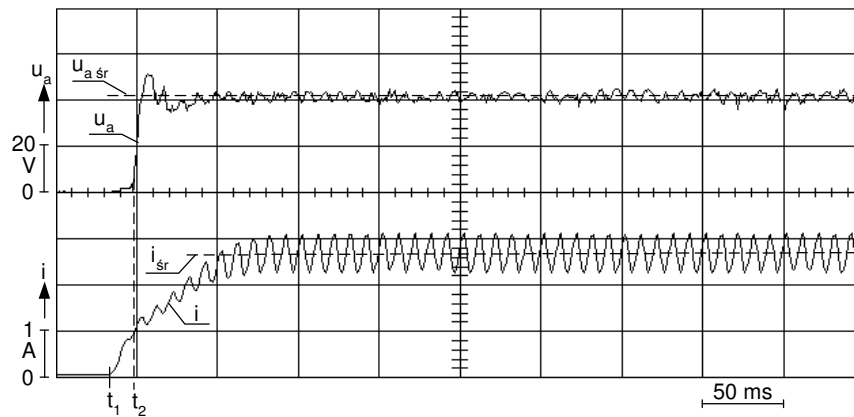
3.4.1. Stanowisko do badania łuku prądu stałego

Łuk prądu stałego jest badany w układzie, którego schemat przedstawiono na rys. 3.7. Komora łukowa wyposażona jest w układ dwóch płaskich styków miedzianych poruszanych napędem elektromagnetycznym, które w stanie wyjściowym są zwarte. Zainstalowana w dolnej części komory śruba mikrometryczna umożliwia nastawianie

odległości na którą rozwierane są styki. Zakres nastaw tej odległości to 0,5 – 5 mm. Zadaniem układu sterującego *ST* jest załączenie prądu (chwila t_1 , rys. 3.8), który wyprostowany w układzie prostującym płynię w obwodzie *B-KŁ-L-R*. Bezpośrednio po załączeniu prądu układ *ST* rozwiera styki komory łukowej (chwila t_2 , rys. 3.8), inicjując zapłon łuku. Styki rozwierają się na nastawioną wcześniej odległość.



Rys. 3.7. Schemat układu pomiarowego do badania łuku prądu stałego; *ATr* – autotransformator, *Tr* – transformator separacyjny, *W* – łącznik, *ST* – sterownik, *B* – bocznic prądowy, *DN* – dzielnik napięciowy, *KŁ* – komora łukowa, *Osc* – oscyloskop, *R*, *L* – rezystor i dławik.

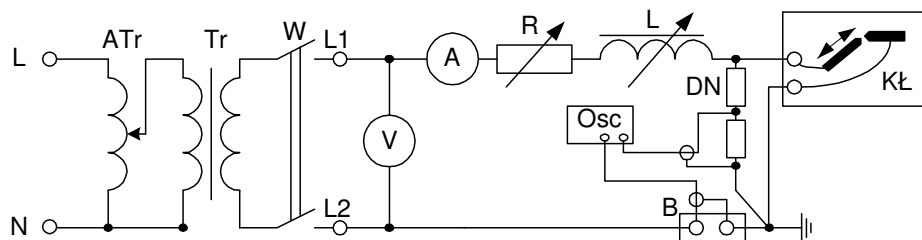


Rys. 3.8. Przykładowy oscylogram przebiegów napięcia u_a i prądu łuku i w obwodzie prądu stałego (rys. 3.7); u_a , $u_{a sr}$ – przebieg napięcia łuku i jego uśredniona wartość, i , i_{sr} – przebieg prądu łuku i jego uśredniona wartość, t_1 – chwila załączenia prądu przez sterownik *ST* (rys. 3.7), t_2 – chwila rozwierania styków i zapłon łuku.

Czas palenia się łuku jest nastawiany na sterowniku *ST* w zakresie od 1 do 10 sekund. Po wyłączeniu prądu łuku przez sterownik *ST* styki nadal pozostają rozwarte w celu ostygnięcia. Czas rozwarcia styków jest nastawiany również na sterowniku *ST* w zakresie od 10 do 120 sekund. Czas palenia się łuku, nastawiony zwykle na ok. 1 s jest wystarczający do zarejestrowania przebiegu prądu i napięcia łuku na oscyloskopie (rys. 3.8). Znając rezystancję bocznika prądowego $B = 0,1 \Omega$ i przekładnię dzielnika napięciowego $\vartheta = 1:100$, można określić uśrednione wartości prądu (i_{sr}) i napięcia (u_{asr}), jak to zilustrowano na rys. 3.8. „Tętniący” przebieg prądu jest wynikiem zasilania układu poprzez prostownik. Tak odczytane napięcie i prąd to jeden punkt na charakterystyce statycznej dla danej odległości styków. Zmieniając prąd obwodu poprzez zmianę nastaw rezystora R można odczytać inne punkty charakterystyki powtarzając opisany cykl pomiarowy.

3.4.2. Stanowisko do badania łuku prądu przemiennego

Łuk prądu przemiennego jest badany w układzie, którego schemat przedstawiono na rys. 3.9. Po załączeniu obwodu łącznikiem *W* i nastawieniu odpowiedniej wartości napięcia zasilającego przy pomocy autotransformatora *Atr*, kręcąc pokrętkiem komory łukowej *KŁ* należy zewrzeć jej elektrody węglowe. Z chwilą gdy amperomierz *A* wskaże wartość płynącego prądu należy powoli rozsunąć elektrody węglowe, inicjując zapłon łuku. Na oscyloskopie *Osc* można prowadzić obserwację przebiegów prądu i napięcia łuku oraz jego charakterystyk dynamicznych jak to zilustrowano na rys. 3.3, 3.4 i 3.5. Rezystancyjny bądź indukcyjny charakter obciążenia ustala się nastawiając odpowiednie wartości rezystancji R i indukcyjności L .



Rys. 3.9. Schemat układu do badania łuku prądu przemiennego; *KŁ* – komora łukowa wyposażona w elektrody węglowe; pozostałe oznaczenia jak na rys. 3.7.

3.5. Program ćwiczenia

3.5.1. Badanie łuku prądu stałego

Badanie łuku prądu stałego prowadzi się w układzie z rys. 3.7. W trakcie ćwiczenia należy zmierzyć i porównać charakterystyki statyczne łuku dla różnych jego długości, zmienianych poprzez odpowiednie nastawienie końcowej odległości styków komory łukowej **KŁ**. Dla podanych przez prowadzącego trzech różnych odległości międzystykowych w zakresie od 0,5 do 5 mm, należy dokonać pomiaru charakterystyk, powtarzając kilkakrotnie cykle pomiarowe opisane w punkcie 3.4.1. Po załączeniu łącznika **W** (rys. 3.7) należy nastawić napięcie zasilające układ, około 150 V. Wartość prądu łuku, a tym samym jego napięcie, dla danej odległości międzystykowej zmienia się nastawiając odpowiednie wartości rezystancji na rezystorze **R**. Prąd łuku należy nastawiać wstępnie na sterowniku **ST** (rys. 3.7) w zakresie od 1 do 10 A. Po załączeniu danego cyklu pomiarowego przy pomocy sterownika **ST**, na oscyloskopie zostaną zarejestrowane przebiegi napięcia i prądu łuku (rys. 3.8). Przebiegi te pozwalają na odczytanie uśrednionych wartości prądu i_{sr} oraz napięcia $u_{a,sr}$ (rys. 3.8), które są współrzędnymi jednego punktu charakterystyki statycznej. Pomiary należy powtórzyć dla kilku wartości prądu przy danej odległości międzystykowej tak, aby uzyskać ok. 6-7 punktów charakterystyki statycznej $u_a = f(i)$, co pozwala na jej wykreślenie. Podobne pomiary należy wykonać dla pozostałych zadanych przez prowadzącego odległości międzystykowych.

3.5.2. Badanie łuku prądu przemiennego

Badanie to polega na obserwacji przebiegów prądu i napięcia oraz charakterystyki dynamicznej łuku w układzie przedstawionym na rys. 3.9, dla dwóch różnych charakterów obciążenia: rezystancyjnego oraz indukcyjnego. Po załączeniu łącznika **W** należy nastawić napięcie zasilające przy pomocy autotransformatora **ATr** na około 200 V. Następnie dla określonego charakteru obciążenia (rezystancyjne bądź indukcyjne) należy dokonać zapłonu łuku jak to opisano w punkcie 3.4.2 i zarejestrować na oscyloskopie przebiegi: $u_a = f(t)$ oraz $i = f(t)$, zbliżone do przedstawionych na rysunkach 3.3, 3.4 i 3.5. Podobnie należy dokonać obserwacji charakterystyki dynamicznej łuku $u_a = f(i)$.

3.6. Opracowanie wyników badań

Wyniki pomiarów charakterystyk statycznych łuku należy zestawić w tabeli dla wszystkich trzech odległości międzystykowych. Na tej podstawie należy wykreślić

charakterystyki $u_a = f(i)$ na wspólnej płaszczyźnie i porównać ich wzajemne położenie. Należy krótko opisać zaobserwowane prawidłowości.

Na podstawie zarejestrowanych oscylogramów przebiegów $u_a = f(t)$, $i = f(t)$ oraz $u_a = f(i)$ dla łuku prądu przemiennego należy dokonać analizy i krótkiego opisu zaobserwowanych zjawisk, ze szczególnym uwzględnieniem czasów trwania przerw bezprądowych t_b (rys. 3.3, 3.4 i 3.5) oraz wzajemnego położenia ramion charakterystyki dynamicznej w zależności od wartości pochodnej di/dt . Zależnie od wskazań prowadzącego, oscylogramy należy naszkicować w oparciu o obraz zapamiętany na ekranie oscyloskopu lub wydrukować.

Sprawozdanie powinno zawierać wnioski końcowe stanowiące podsumowanie przeprowadzonych badań.

3.7. Literatura

- [3.1] Markiewicz H.: Urządzenia elektroenergetyczne, WNT, Warszawa 2001.
- [3.2] Ciok Z. Procesy łączeniowe w układach elektroenergetycznych, WNT, Warszawa 1976.