



PODSTAWY ENERGOELEKTRONIKI
LABORATORIUM

Ćwiczenie 3

Sterowanie fazowe sterowników prądu przemiennego

W laboratorium należy wykonać pomiary, o których mowa w paragrafie 3.3 instrukcji. Dla obciążenia rezystancyjnego liniowego należy dokonać odpowiednich obliczeń i wykreślić charakterystykę współczynnika mocy doświadczalną i teoretyczną zgodnie z paragrafem 3.4. Pozostałe obliczenia można wykonać w domu.

Opracowanie:
Tomasz Poźniak
Łukasz Starzak

Łódź 2006

Spis treści

1. Wstęp.....	3
2. Podstawy teoretyczne	4
2.1. Wprowadzenie	4
2.2. Układ z obciążeniem o charakterze rezystancyjnym.....	4
2.3. Teoretyczne charakterystyki układu przy obciążeniu rezystancyjnym	6
2.4. Układ z obciążeniem o charakterze indukcyjnym (RL)	7
3. Badanie układu	11
3.1. Układ pomiarowy	11
3.2. Pomiar kątów fazowych za pomocą oscyloskopu	12
3.3. Program pomiarów	13
Obciążenie rezystancyjne.....	13
Obciążenie indukcyjne	14
3.4. Opracowanie wyników	14
4. Oczekiwana zawartość sprawozdania	16
5. Literatura	16

1. Wstęp

Celem ćwiczenia jest poznanie zasady sterowania fazowego sterowników prądu przemiennego oraz zbadanie charakterystyk sterowania i parametrów energetycznych takiego sterownika. Badana jest praca z obciążeniem rezystancyjnym i indukcyjnym (RL) z uwzględnieniem wynikających z tego ograniczeń. Poruszone jest również zagadnienie wpływu nieliniowości odbiornika na charakterystyki przekształtnika – na przykładzie typowej aplikacji sterownika fazowego, jakim jest zmiana natężenia światła emitowanego przez żarówkę.

2. Podstawy teoretyczne

2.1. Wprowadzenie

Sterownik prądu przemiennego jest układem służącym do ciągłej (bezstopniowej) zmiany wartości skutecznej napięcia, wartości skutecznej prądu bądź mocy czynnej odbiornika. Funkcję tę może spełniać pojedynczy tyrystor lub każdy z układów prostowniczych, lecz występująca wówczas składowa stała w przebiegach wyjściowych może być tolerowana tylko przy niektórych rodzajach obciążeń. Natomiast sterowniki mocy prądu przemiennego charakteryzują się symetrycznym przebiegiem napięcia na odbiorniku i prądu odbiornika. Dlatego układy te mogą być stosowane do sterowania typowych obciążeń indukcyjnych rdzeniowych bądź obciążeń rezystancyjnych za pośrednictwem np. transformatora.

2.2. Układ z obciążeniem o charakterze rezystancyjnym

Układ jednofazowego sterownika prądu przemiennego z odbiornikiem rezystancyjnym R_o jest przedstawiony na rys. 1. Działanie tego układu jest dość proste. Układ sterowania tyrystora dwukierunkowego (triaka) wykrywa przejście sinusoidy napięcia wejściowego u przez zero. Od tego momentu odmierzany jest czas t_z odpowiadający kątowi fazowemu ϑ_z , zwanemu kątem załączania. W tym czasie tyrystor znajduje się w stanie blokowania; stąd w układzie nie płynie prąd, a całe napięcie wejściowe odkłada się na tyrystorze.

Po upływie czasu t_z (jak łatwo obliczyć, $t_z = \vartheta_z / \omega$, gdzie ω jest częstotliwością napięcia wejściowego u) następuje podanie impulsu wyzwalającego na bramkę triaka, który zaczyna przewodzić prąd i . W rozpatrywanym przypadku (odbiornik rezystancyjny) prąd ten jest proporcjonalny do napięcia wejściowego u zgodnie z prawem Ohma. Spadek napięcia na przewodzącym triaku jest zanedbywalnie mały w porównaniu z amplitudą napięcia wejściowego, którym w praktycznych aplikacjach jest z reguły napięcie sieciowe 230 V, 50 Hz.

Zgodnie ze swoją zasadą działania, z chwilą spadku prądu i poniżej wartości prądu podtrzymania, triak wyłącza się. Ponownie w układzie sterującym następuje odmierzenie czasu t_z i podanie impulsu wyzwalającego na bramkę, dzięki czemu zaczyna on przewodzić prąd w drugim kierunku aż do jego spadku poniżej prądu podtrzymania. Następnie cała sekwencja powtarza się od początku.

Jak powiedziano na wstępie, zadaniem sterowników prądu przemiennego jest sterowanie wartością skuteczną prądu, napięcia lub mocą czynną odbiornika. Wielkości te zmieniają się wraz z wartością kąta załączania ϑ_z . Podstawowymi charakterystykami sterownika są więc:

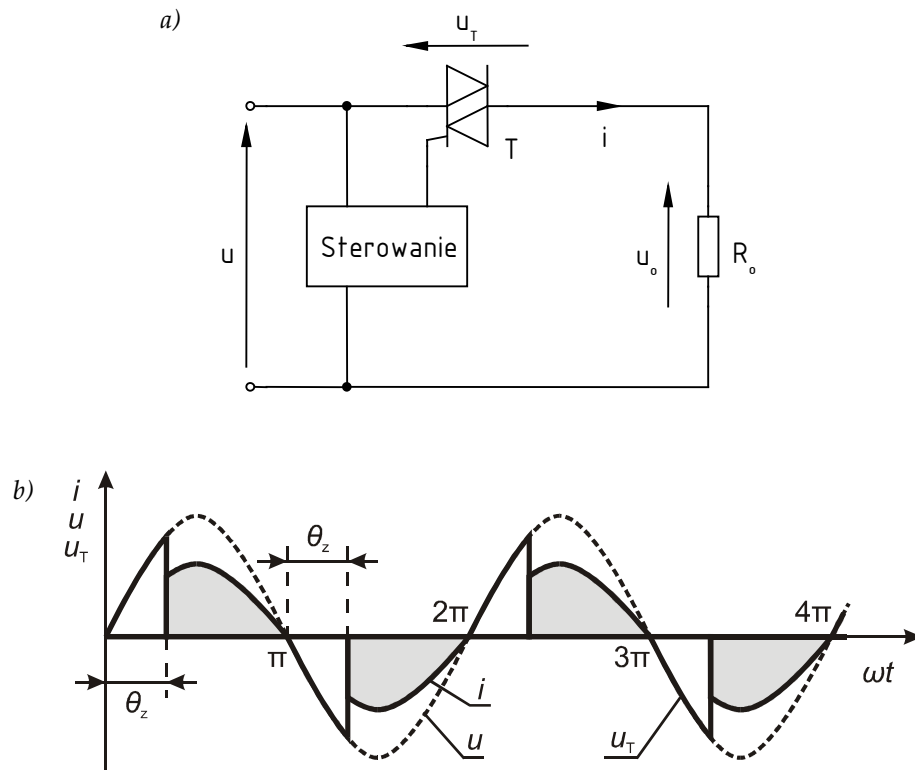
- 1) zależność względnego skutecznego prądu wyjściowego (odbiornika) od kąta załączania:

$$I_r(\vartheta_z) = \frac{I(\vartheta_z)}{I(0)}, \quad (1)$$

- 2) zależność względnej mocy czynnej wyjściowej (odbiornika) od kąta załączania:

$$P_{\text{or}}(\vartheta_z) = \frac{P_o(\vartheta_z)}{P_o(0)}. \quad (2)$$

Wartości względne są liczone w odniesieniu do maksymalnego prądu skutecznego i maksymalnej mocy czynnej. Jak wynika z zasady działania układu, występują one dla kąta załączania $\vartheta_z = 0$, gdyż wówczas mamy do czynienia z ciągłym przepływem prądu.



Rys. 1. Sterownik prądu przemiennego przy obciążeniu rezystancyjnym:
a) schemat układu; b) przebiegi w układzie przy sterowaniu fazowym

Oprócz tego, jak każdy układ przekształtnikowy, sterownik prądu przemiennego jest charakteryzowany przez dwa podstawowe parametry energetyczne:

- 1) sprawność energetyczną

$$\eta = \frac{P_o}{P} = \frac{P_o}{P_o + \Delta P}, \quad (3)$$

gdzie P – moc czynna wejściowa, P_o – moc czynna wyjściowa (odbiornika), ΔP – moc strat w sterowniku (między innymi w kluczu tyrystorowym);

- 2) współczynnik mocy układu

$$\lambda = \frac{P}{S}, \quad (4)$$

gdzie S – moc pozorna wejściowa,

$$S = UI ; \quad (5)$$

przy czym przy założeniu wysokiej sprawności układu ($\eta \approx 1$) współczynnik mocy układu można przybliżyć wzorem

$$\lambda \approx \frac{P_o}{S}. \quad (6)$$

2.3. Teoretyczne charakterystyki układu przy obciążeniu rezystancyjnym

Przebieg czasowy prądu odbiornika w pierwszym półokresie można opisać przy pomocy następującego wyrażenia (patrz rys. 1):

$$i(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq \omega t \leq \vartheta_z \\ \frac{U\sqrt{2}}{R_o} \sin \omega t & \vartheta_z \leq \omega t \leq \pi \end{cases} \quad (7)$$

Zakładamy przy tym, że spadek napięcia na tyrystorze u_T jest zaniedbywalnie mały w porównaniu z napięciem wejściowym u ; w związku z tym w przedziale od ϑ_z do π

$$u_o = u - u_T \approx u. \quad (8)$$

Wartość skuteczna prądu odbiornika obliczona na podstawie powyższego wyrażenia wynosi

$$I = \frac{U}{R_o} \sqrt{\frac{A(\vartheta_z)}{\pi}}, \quad (9)$$

przy czym

$$A(\vartheta_z) = \pi - \vartheta_z + \frac{1}{2} \sin 2\vartheta_z. \quad (10)$$

Stąd wartość względna prądu w odniesieniu do prądu przy pełnym wysterowaniu ($\vartheta_z = 0$) wynosi

$$I_r(\vartheta_z) = \frac{I(\vartheta_z)}{I(0)} = \sqrt{\frac{A(\vartheta_z)}{\pi}}. \quad (11)$$

Moc czynna odbiornika wynosi

$$P_o = I^2 R_o = \frac{U^2}{R_o} \frac{A(\vartheta_z)}{\pi}, \quad (12)$$

zaś wartość względna mocy czynnej odbiornika

$$P_{or}(\vartheta_z) = \frac{P_o(\vartheta_z)}{P_o(0)} = \frac{A(\vartheta_z)}{\pi}. \quad (13)$$

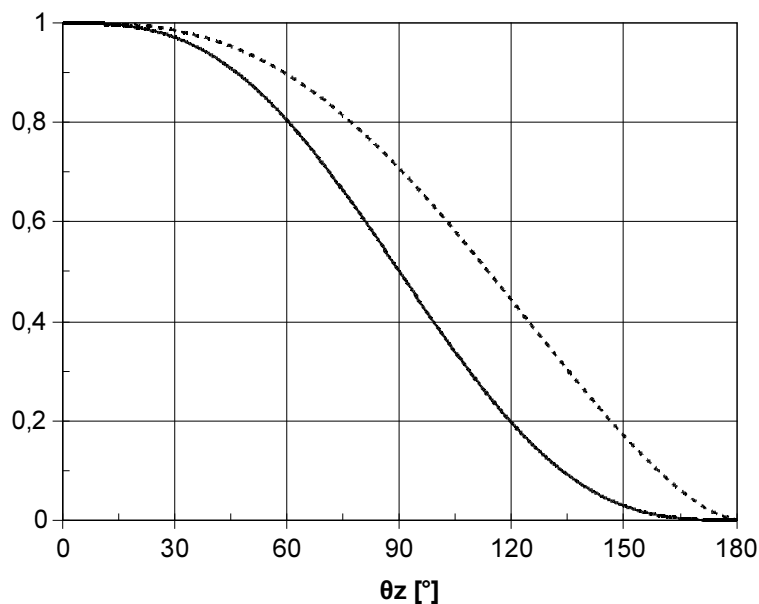
Współczynnik mocy układu jest w związku z tym również funkcją kąta załączania:

$$\lambda(\vartheta_z) \approx \frac{P_o}{S} = \frac{P_o}{UI} = \sqrt{\frac{A(\vartheta_z)}{\pi}}, \quad (14)$$

Teoretyczny zakres sterowania układu przy obciążeniu rezystancyjnym wynosi

$$0 \leq \vartheta_z \leq \pi. \quad (15)$$

W rzeczywistości układ sterowania wnosi pewne opóźnienie związane z detekcją przejścia napięcia wejściowego przez zero i generacją impulsu bramkowego, co ogranicza zakres sterowania od dołu. Z kolei z uwagi na niezerowy czas trwania impulsów niemożliwe jest nadmierne zbliżenie się do $\vartheta_z = \pi$, gdyż przeciągnięcie impulsu na kolejny półokres napięcia wejściowego mogłoby doprowadzić do niepożądanego załączenia triaka w kolejnym półokresie już w chwili $\vartheta_z = 0$.



Rys. 2. Teoretyczne charakterystyki sterowania dla obciążenia rezystancyjnego: względny prąd skuteczny odbiornika I i współczynnik mocy układu λ (linia przerywana) oraz mocy czynnej odbiornika P_{or} (linia ciągła)

Na rys. 2 przedstawione są teoretyczne charakterystyki względnej wartości skutecznej prądu, względnej wartości mocy czynnej odbiornika oraz współczynnika mocy układu przy obciążeniu czysto rezystancyjnym.

2.4. Układ z obciążeniem o charakterze indukcyjnym (RL)

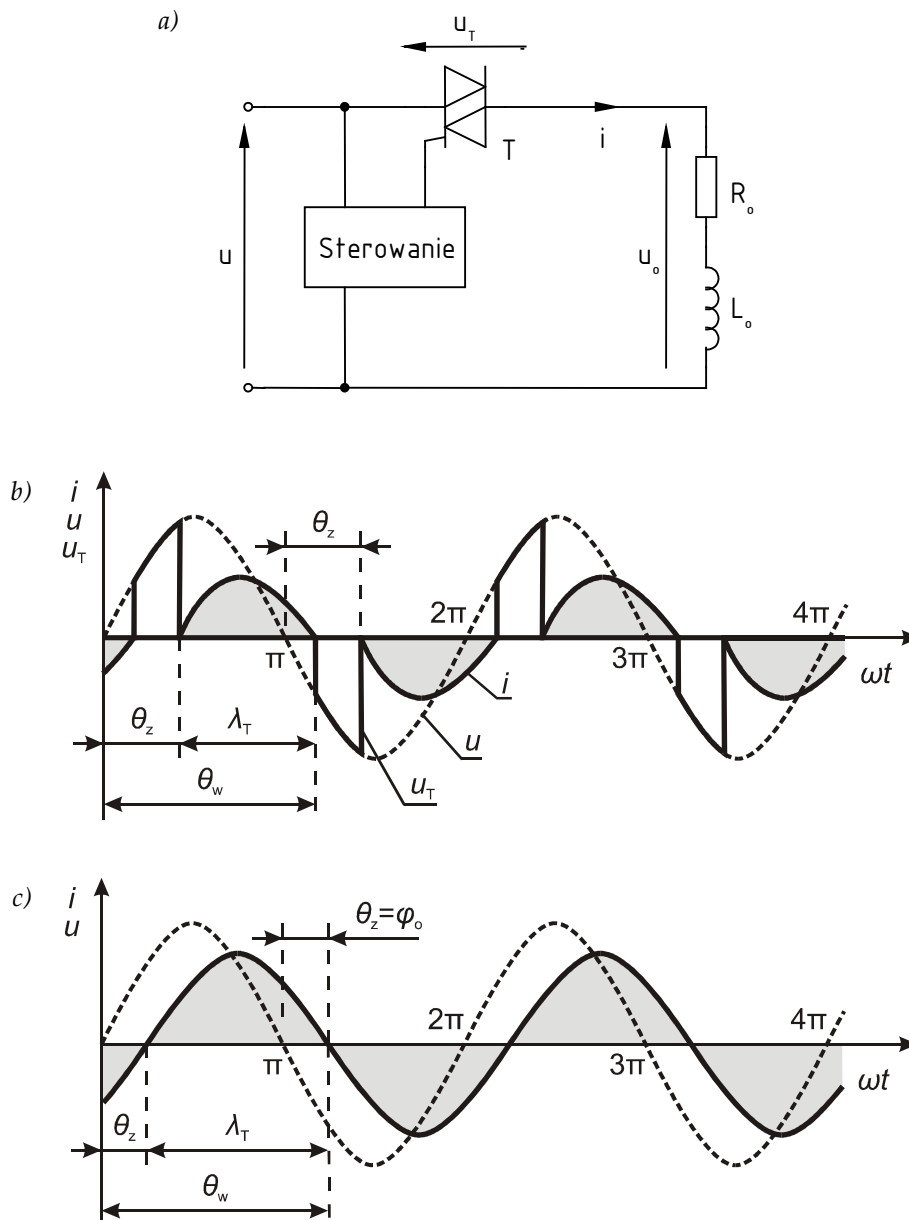
Ten typ obciążenia można przyjąć za podstawowy i najczęściej spotykany. Schemat układu jest przedstawiony na rys. 3a.

Zgodnie z wykresem 3b

$$\vartheta_w = \vartheta_z + \lambda_T > \pi, \quad (16)$$

przy czym:

- ϑ_w – kąt wyłączenia tyrystora,
- λ_T – kąt przewodzenia tyrystora.



Rys. 3. Układ odwrotnie równoległy przy obciążeniu indukcyjnym:
a) schemat układu; b) przebiegi napięć i prądów dla $\vartheta_z > \varphi_o$; (c) przebiegi napięć i prądów dla $\vartheta_z = \varphi_o$.

Równanie opisujące układ po załączeniu tyrystora ma postać

$$\sqrt{2}U \sin \omega t = iR_o + L_o \frac{di}{dt}. \quad (17)$$

Rozwiązanie tego równania daje następującą postać przebiegu prądu:

$$i(t) = \frac{\sqrt{2}U}{Z_o} \left\{ \sin(\omega t - \varphi_o) - \sin(\vartheta_z - \varphi_o) \cdot \exp\left[-\frac{R_o}{\omega L_o}(\omega t - \vartheta_z)\right] \right\}, \quad (18)$$

gdzie Z_o oznacza moduł impedancji odbiornika

$$Z_o = \sqrt{R_o^2 + (\omega L_o)^2}, \quad (19)$$

zaś φ_o – kąt fazowy odbiornika

$$\varphi_o = \arctg \frac{\omega L_o}{R_o}. \quad (20)$$

Obecność indukcyjności w obwodzie obciążenia powoduje zachowanie ciągłości prądu (brak dużych stromości prądowych) oraz opóźnienie momentu wyłączenia przewodzącego tyristora na następny półokres – kąt wyłączania $\vartheta_w > \pi$. Przeciąganie prądu na następny półokres jest tym większe, im większy jest kąt fazowy odbiornika φ_o . Pełne wysterowanie układu osiąga się przy $\vartheta_z = \varphi_o$. Zatem zakres sterowania przy obciążeniu RL wynosi

$$\varphi_o \leq \vartheta_z \leq \pi. \quad (21)$$

Podobnie jak przy obciążeniu rezystancyjnym, można wyznaczyć teoretyczne charakterystyki sterowania.

Charakterystyka prądu skutecznego ma postać

$$I = \frac{U}{Z_o} \sqrt{\frac{B(\vartheta_z, \varphi_o)}{\pi}}, \quad (22)$$

charakterystyka mocy czynnej odbiornika – postać:

$$P_o = \frac{U^2}{Z_o} \cos \varphi_o \cdot \frac{B(\vartheta_z, \varphi_o)}{\pi}, \quad (23)$$

zaś współczynnika mocy:

$$\lambda = \cos \varphi_o \cdot \sqrt{\frac{B(\vartheta_z, \varphi_o)}{\pi}}, \quad (24)$$

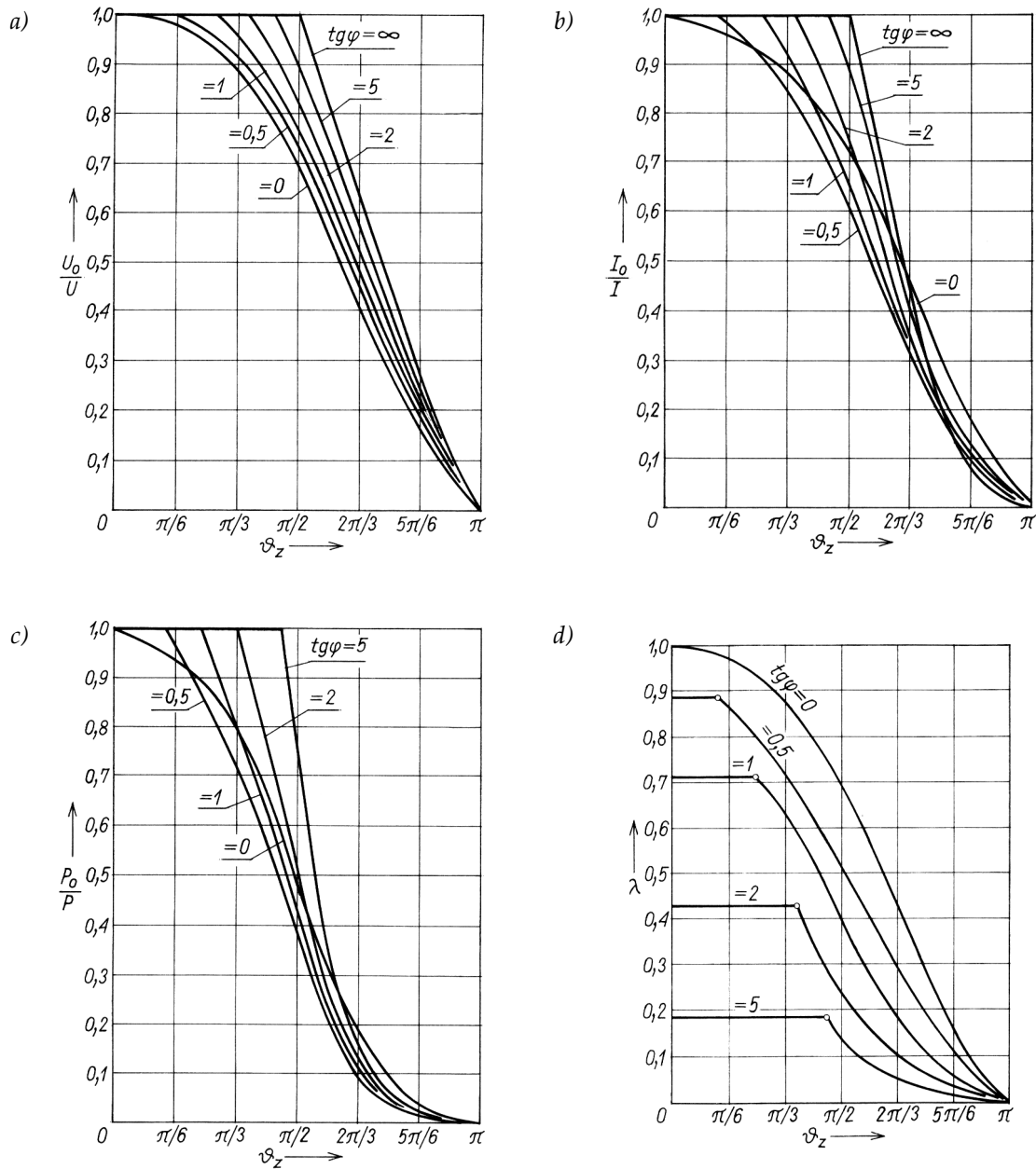
gdzie B jest pewną funkcją parametrów ϑ_z i φ_o .

Jak już zauważyliśmy, w przypadku obciążenia RL minimalny kąt załączania jest równy kątowi fazowemu odbiornika. Przy tym kącie wystąpi pełne wysterowanie tyristora i ciągłe przewodzenie prądu, a więc maksimum mocy dostarczanej do odbiornika. Dlatego wartości względne oblicza się z zależności

$$I_r(\vartheta_z) = \frac{I(\vartheta_z)}{I(\varphi)}, \quad (25)$$

$$P_{\text{or}}(\vartheta_z) = \frac{P_o(\vartheta_z)}{P_o(\varphi)}. \quad (26)$$

Charakterystyki sterowania układu obliczone na podstawie wyżej podanych wzorów są przedstawione na rys. 4.



Rys. 4. Charakterystyki sterowania przy obciążeniu indukcyjnym w funkcji kąta załączenia [3]:
 a) względna wartość skuteczna napięcia na odbiorniku u_o ; b) względna wartość skuteczna prądu i ;
 c) względna wartość mocy czynnej odbiornika P_o ; d) współczynnik mocy układu λ

3. Badanie układu

3.1. Układ pomiarowy

Badaniom poddawany jest sterownik prądu przemiennego sterowany fazowo, w którym rolę klucza półprzewodnikowego pełni triak. Do sterownika należy przyłączyć odpowiedni odbiornik i włączyć w obwód mierniki, zgodnie z rys. 5.

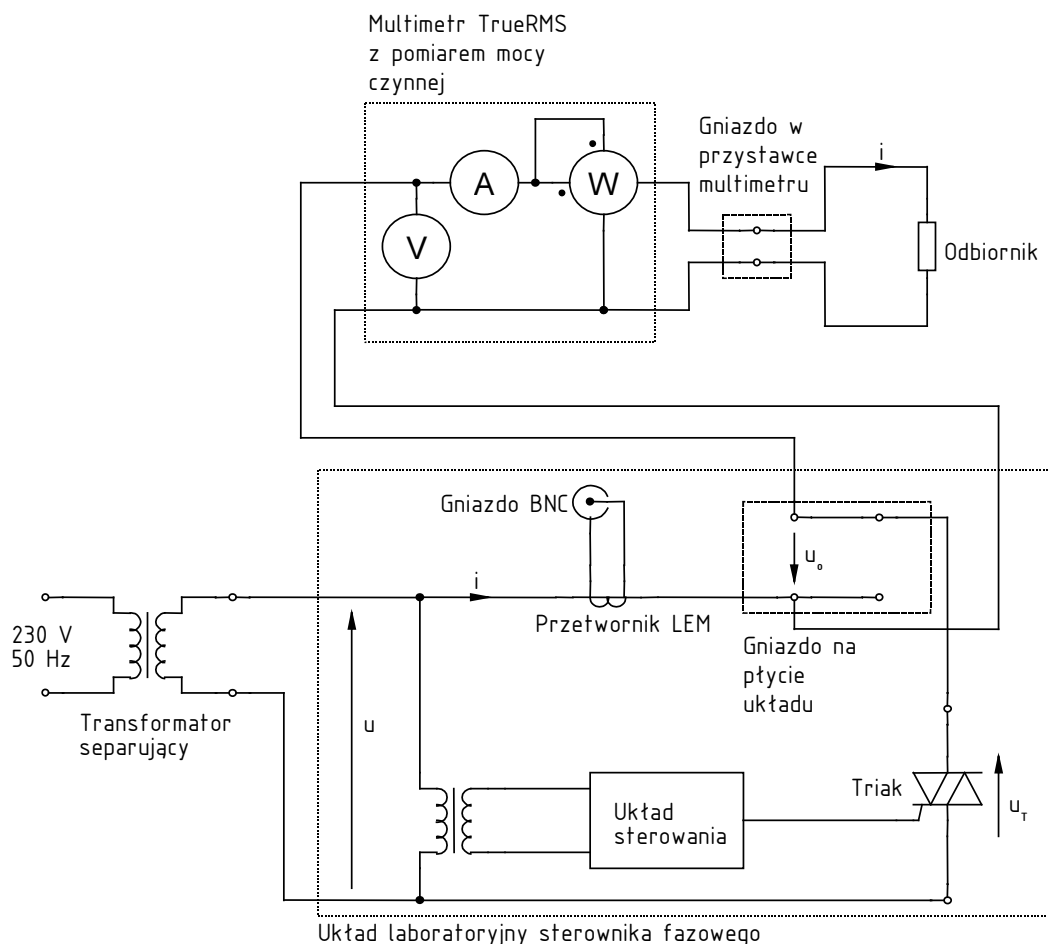
UWAGA!

Podłączenia układu do sieci w odpowiednim momencie dokonuje się poprzez transformator separujący po sprawdzeniu połączeń przez prowadzącego zajęcia!

Jeżeli układ jest włączony do sieci, nie należy dotykać wyprowadzeń punktów N, L i u_T , na których może występować napięcie sieciowe.

Do dwu kanałów oscyloskopu należy przyłączyć:

- sygnał z gniazda BNC (wyjście przetwornika LEM prąd/napięcie);
- współczynnik przetwarzania przetwornika należy ustawić na 10 A/V;



Rys. 5. Schemat układu pomiarowego

- napięcie sieciowe u przez sondę tłumiacą 100:1.

Pomiaru wielkości elektrycznych dokonuje się za pomocą multimetru z przystawką umożliwiającą jednoczesny pomiar mocy oraz wartości skutecznych prądu i napięcia. Bolce

sieciowe przystawki należy włączyć w gniazdo na płycie układu pomiarowego, zaś w gniazdo sieciowe przystawki włączyć odbiornik zgodnie z rys. 5. Drugą końcówkę przystawki należy włożyć w odpowiednie gniazda multimetru zgodnie z opisem (20 A, COM, V/ Ω). Na multimetrze ustawić tryb pomiaru POWER.

Nieprzestawienie multimetru w tryb POWER grozi jego uszkodzeniem!

Pomiaru kąta załączania ϑ_z i kąta fazowego odbiornika φ_o dokonuje się za pomocą oscyloskopu lub programu SP107. Odpowiednią procedurę opisano w paragrafie 3.2.

Do rejestracji i przetwarzania przebiegów z oscyloskopu wykorzystuje się program SP107 dostępny z menu Start, zakładka *Pomiary*. Pobrania przebiegów aktualnie wyświetlanych na ekranie dokonuje się przyciskiem *Read*. Jeżeli zgłaszany jest brak łączności z oscyloskopem, należy skonfigurować połączenie wciskając przycisk *Config* i *Autosearch*, a następnie przestawiając prędkość połączenia na 115200 baud. Zapisu przebiegów w formie numerycznej dokonuje się z menu *Data* ▶ *Save*, a w formie obrazu – przyciskiem *WMF-Export*; obraz można również skopiować do schowka z menu *Data* ▶ *Clipboard*.

Zgodnie z instrukcją, dane z mierników zapisujemy w arkuszu kalkulacyjnym. W laboratorium dostępny jest arkusz kalkulacyjny pakietu OpenOffice. Jeżeli przy uruchamianiu pojawi się informacja o konieczności dokonania instalacji, należy ją przeprowadzić zgadzając się na wszystkie domyślne ustawienia, bez wypełniania danych i rejestrowania programu. Obsługa arkusza kalkulacyjnego w zakresie potrzebnym na laboratorium jest identyczna z programem Microsoft Excel. Aby bezproblemowo odczytać arkusz w programie Microsoft Excel, należy na koniec zapisać go w formacie XLS (menu *Plik, Zapisz jako*).

3.2. Pomiar kątów fazowych za pomocą oscyloskopu

Kąty fazowe należy odczytać w oparciu o wyświetlane przebiegi napięcia sieci i prądu odbiornika w następujący sposób.

1. W celu maksymalnie dokładnego pomiaru kąta należy ustawić podstawę czasu tak, aby na ekranie widoczny był jeden półokres napięcia sieci. W razie potrzeby wyregulować moment wyzwalania pokręteł LEVEL; przebieg można przesunąć zgrubnie o 1/4 ekranu w prawo przyciskiem PTR (*pre-trigger*).
2. Zmierzyć czas odpowiadający danemu kątowi fazowemu (ϑ_z lub φ_o) na oscyloskopie lub w programie SP107.
 - a) Pomiar bezpośrednio na oscyloskopie:
 - włączyć kursory wciskając i przytrzymując (do sygnału dźwiękowego) przycisk CHI/II pod ekranem;
 - wciskając i przytrzymując (do sygnału dźwiękowego) przycisk I/II wybrać kursory pionowe;
 - krótko wciskając przycisk I/II wybiera się kursor, którym można poruszać za pomocą „dżojstika” CURSOR;
 - w prawym dolnym rogu ekranu wyświetla się długość zmierzonego odcinka czasu (jeżeli mierzy się częstotliwość, należy wcisnąć przycisk CHI/II).
 - b) Pomiar w programie SP107:
 - pobrać przebiegi na komputer;

- przeciągnąć myszą kursory (pionowe przerywane linie) w końcu odpowiedniego odcinka czasu;
 - długość odcinka wyświetla się w okienku *Cursor*, pozycja *dt*.
3. Przeliczyć czas na kąt fazowy w oparciu o znany okres przebiegu. Przeliczenia można dokonać na kalkulatorze lub wpisując formułę w arkuszu kalkulacyjnym [liczbę π można uzyskać wpisując „PI()”].

3.3. Program pomiarów

Obciążenie rezystancyjne

1. Ustawić rezystancję odbiornika liniowego (szeregowe połączenie oporników laboratoryjnych) zgodnie z poleceniem prowadzącego.

Uwaga. Podczas pomiaru rezystancji należy odłączyć odbiornik od układu.

2. Włączyć w obwód odbiornik nieliniowy (żarówkę) o mocy wskazanej przez prowadzącego.
3. Włączyć układ do sieci (gniazdo uzwojenia wtórnego transformatora) i ustawić $\vartheta_z \approx 90^\circ$. Żarówka powinna zacząć świecić.
4. Wprowadzić odpowiednie ustawienia oscyloskopu:
 - a) wyłączyć uwzględnianie tłumienia sondy 1:10 na obu kanałach –wcisnąć i przytrzymać (do sygnału dźwiękowego) przycisk AC DC obok wejścia kanału (uwzględnianie tłumienia jest sygnalizowane wyświetlaniem symbolu sondy po lewej stronie wzmocnienia danego kanału);
 - b) sprawdzić, czy na obu kanałach ustawione jest sprzężenie DC. Sprzężenie DC jest sygnalizowane przez znak = obok nazwy kanału na dole ekranu, zaś sprzężenie AC – przez znak ~. W razie potrzeby należy zmienić ustawienie wciskając (krótko) przycisk AC DC;
 - c) wybrać wyzwalenie z kanału, do którego dołączono napięcie sieci (wybór przyciskiem pod kontrolkami TRIG.);
 - d) ustawić tryb wyzwiania DC (przycisk TRIG. MODE);
 - e) jeżeli oscyloskop nie wyzwala się poprawnie (nie świeci się kontrolka TR lub obraz jest niestabilny), należy wyregulować poziom wyzwiania (pokrętko LEVEL);
 - f) wzmocnienia kanałów powinny być takie, aby obserwowane przebiegi dla pełnego wysterowania zajmowały możliwie dużą część ekranu.
5. Zmieniając kąt załączania ϑ_z od wartości maksymalnej do minimalnej (możliwych do uzyskania w badanym układzie), dla ok. 10 punktów pomiarowych należy:
 - a) odczytać z oscylogramu nastawioną wartość ϑ_z (patrz par. 3.2);
 - b) pomierzyć wartość skuteczną prądu I ;
 - c) pomierzyć moc czynną wydzielaną w odbiorniku P_o ;
 - d) zaobserwować, czy i jak zmienia się amplituda sinusoidy prądu i ; zarejestrować przebiegi, które to obrazują.

Dane uzyskane w punktach a)–c) proszę wpisać do arkusza kalkulacyjnego.

6. Dla kąta załączania 90° i minimalnego zarejestrować przebieg prądu na tle napięcia sieci. Podstawę czasu należy ustawić tak, aby widoczne były 2–3 okresy napięcia sieci.
7. Po dokonaniu pomiarów w dostępnym zakresie kąta załączania, należy dodatkowo:
 - a) zewrzeć klucz półprzewodnikowy i również dla tego przypadku ($\vartheta_z = 0^\circ$) zanotować wartości I i P_o ;
 - b) zmierzyć wartość skuteczną napięcia sieci U .

Uwaga. Zwarcia triaka należy dokonywać pod nadzorem prowadzącego.
8. Powtórzyć punkty 5–7 dla odbiornika liniowego o nastawionej wcześniej rezystancji.

Obciążenie indukcyjne

9. Odłączyć sterownik od sieci. W szereg z opornikiem laboratoryjnym włączyć cewkę o indukcyjności podanej przez prowadzącego. Ponownie przyłączyć sterownik do zasilania.
10. Zmieniając kąt załączania ϑ_z od wartości maksymalnej do minimalnej (pełne wystrojenie), z krokiem podobnym jak w punkcie 5, należy:
 - a) odczytać nastawioną wartość ϑ_z ;
 - b) pomierzyć wartość skuteczną prądu I ;
 - c) pomierzyć moc czynną wydzielaną w odbiorniku P_o ;

Uzyskane dane proszę wpisać do arkusza kalkulacyjnego.
11. Dla kąta załączania 90° i minimalnego zarejestrować przebieg prądu na tle napięcia sieciowego. Podstawę czasu należy ustawić tak, aby widoczne były 2–3 okresy napięcia sieci.
12. Odłączyć układ od sieci. Odłączyć cewkę od układu i zmierzyć jej rezystancję R_{SL} .

3.4. Opracowanie wyników

1. Na podstawie danych z mierników, proszę obliczyć dla każdego kąta ϑ_z , dla obu odbiorników rezystancyjnych, na podstawie wzorów podanych w paragrafie 2.2:
 - a) względną wartość skuteczną prądu I_r ,
 - b) względną wartość mocy czynnej odbiornika P_{or} ,
 - c) moc pozorną pobieraną z sieci S ,
 - d) współczynnik mocy układu λ .
2. Wykorzystując wzory wyprowadzone w paragrafie 2.3, proszę obliczyć teoretyczne charakterystyki $I_r(\vartheta_z)$, $P_{or}(\vartheta_z)$ i $\lambda(\vartheta_z)$.
3. Wykonać trzy wykresy charakterystyk: $I_r(\vartheta_z)$, $P_{or}(\vartheta_z)$ i $\lambda(\vartheta_z)$, na każdym z nich umieszczając trzy przebiegi: doświadczalny dla odbiornika liniowego, doświadczalny dla odbiornika nieliniowego i teoretyczny.

Bez względu na wykorzystywane oprogramowanie, należy wykreślać wykresy typu XY, a nie *Liniowy*. W przeciwnym razie oś X nie będzie odpowiednio wyskalowana w wartościach ϑ_z .

Arkusz kalkulacyjny pakietu OpenOffice wymaga, aby wszystkie kolumny danych, które zamierzamy umieścić na wykresie, leżały bezpośrednio obok siebie. Jeżeli nie jest to spełnione, to dane należy skopiować w nowe miejsce, używając funkcji *Edycja* ▶ *Wklej*

specjalnie i zaznaczając *Ciągi znaków*, *Liczby* i *Formaty*. Microsoft Excel nie posiada tego ograniczenia.

4. Proszę przeanalizować uzyskane wykresy, zwracając uwagę na różnicę między odbiornikiem liniowym a nieliniowym. Proszę wyjaśnić tę rozbieżność. Na czym polega nieliniowość żarówki? jaki ma to związek z kątem załączania? Pomocne powinny być wyniki z punktu 3.3.5 d).
5. Na podstawie danych z mierników uzyskanych dla obciążenia indukcyjnego, proszę obliczyć dla każdego kąta ϑ_z :
 - a) względną wartość skuteczną prądu I_r ,
 - b) względną wartość mocy czynnej odbiornika P_{or} ,
 - c) moc pozorną pobieraną z sieci S ,
 - d) współczynnik mocy układu λ .
6. Porównać przebiegi zarejestrowane w punktach 3.3.6 i 3.3.11.
7. Odczytać z zarejestrowanego oscylogramu kąt fazowy odbiornika φ_o . Niezależnie od tego obliczyć kąt fazowy odbiornika na podstawie znanej wartości indukcyjności i zmierzonych wartości rezystancji. Porównać otrzymane wyniki.
8. Wykonać trzy wykresy charakterystyk: $I_r(\vartheta_z)$, $P_{or}(\vartheta_z)$ i $\lambda(\vartheta_z)$, na każdym z nich umieszczając dwa przebiegi otrzymane doświadczalnie – dla obciążenia R liniowego i dla obciążenia RL.
9. Przeanalizować wykresy otrzymane dla obciążeń R i RL. Porównać charakterystyki dla obciążenia RL z podanymi w paragrafie 2.4.

4. Oczekiwana zawartość sprawozdania

Sprawozdanie powinno zawierać:

- tabele z wynikami pomiarów (par. 3.3) i obliczeń (par. 3.4), wraz z zastosowanymi wzorami i przykładami obliczeń;
- wykresy uzyskane na podstawie danych doświadczalnych i wzorów teoretycznych (par. 3.4);
- przebiegi zarejestrowane w odpowiednich punktach (par. 3.3);
- wyniki z punktu 3.4.7;
- analizę wyników i wnioski.

W katalogu sieciowym zespołu należy zostawić plik arkusza kalkulacyjnego z wynikami pomiarów oraz pliki z zarejestrowanymi przebiegami.

5. Literatura

- [1] Luciński J.: Układy tyrystorowe. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1978.
- [2] Luciński J.: Układy z tyrystorami dwukierunkowymi. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1986.
- [3] Nowak M., Barlik R.: Poradnik inżyniera energoelektronika. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1998.
- [4] Tunia H., Winiarski B.: Energoelektronika. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1994.
- [5] Barlik R., Nowak M.: Technika tyrystorowa. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1997.