



PRZEKSZTAŁTNIKI ELEKTRONICZNE

Ćwiczenie C31

Sterownik fazowy prądu przemienneego

Ramowy plan pracy

15'	30'	45'	1 ^h	1 ^h 15'	1 ^h 30'	po zajęciach

Opracowanie ćwiczenia i instrukcji:
Tomasz Poźniak, Łukasz Starzak

Łódź 2011

Spis treści

B Wprowadzenie do ćwiczenia	5
1. Cel i przebieg ćwiczenia.....	5
2. Podstawy teoretyczne.....	7
2.1. Układ z obciążeniem o charakterze rezystancyjnym	7
2.2. Teoretyczne charakterystyki układu przy obciążeniu rezystancyjnym	9
2.3. Układ z obciążeniem o charakterze indukcyjnym (RL).....	11
C Doświadczenie.....	15
3. Pomiary	15
3.1. Układ pomiarowy.....	15
3.2. Wykonanie pomiarów.....	17
Odbiornik rezystancyjny liniowy	17
Odbiornik indukcyjny	18
Odbiornik rezystancyjny nieliniowy	19
D Wyniki.....	21
4. Opracowanie i analiza wyników.....	21
4.1. Dane liczbowe.....	21
Parametry energetyczne	21
Parametry przebiegów	21
Teoretyczne charakterystyki sterowania	22
4.2. Analiza wyników	23
Charakterystyki sterowania dla obciążenia rezystancyjnego.....	23
Żarówka jako nieliniowy odbiornik rezystancyjny.....	23
Wpływ charakteru obciążenia na charakterystyki sterowania	23
Komutacyjna stromość prądowa	23
Parametry energetyczne	24
E Informacje	25
5. Literatura.....	25

Wprowadzenie do ćwiczenia

1. Cel i przebieg ćwiczenia

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. Przeanalizowane zostaną również ograniczenia wnoszone przez klucz półprzewodnikowy – triak, a związane z krytyczną komutacyjną stromością prądu.

W ćwiczeniu poruszone zostanie również zagadnienie wpływu nieliniowości odbiornika na charakterystyki przekształtnika. Za przykład posłuży typowa aplikacja sterownika fazowego – zmiana natężenia światła emitowanego przez żarówkę.

2. Podstawy teoretyczne

2.1. Układ z obciążeniem o charakterze rezystancyjnym

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.

Układ jednofazowego sterownika prądu przemiennego z odbiornikiem rezystancyjnym o rezystancji R_L jest przedstawiony na rys. 1. Działanie tego układu jest dość proste. Układ sterowania tyrystora dwukierunkowego (triaka) wykrywa przejście sinusoidy napięcia wejściowego u_i przez zero. Od tego momentu odmierza 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 częstością napięcia wejściowego u_i) następuje podanie impulsu wyzwalamyjącego na bramkę triaka, który zaczyna przewodzić prąd i . W rozpatrywanym przypadku (odbiornik rezystancyjny) prąd ten jest proporcjonalny do napięcia wejściowego u_i 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 wyzwalamyjącego 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:

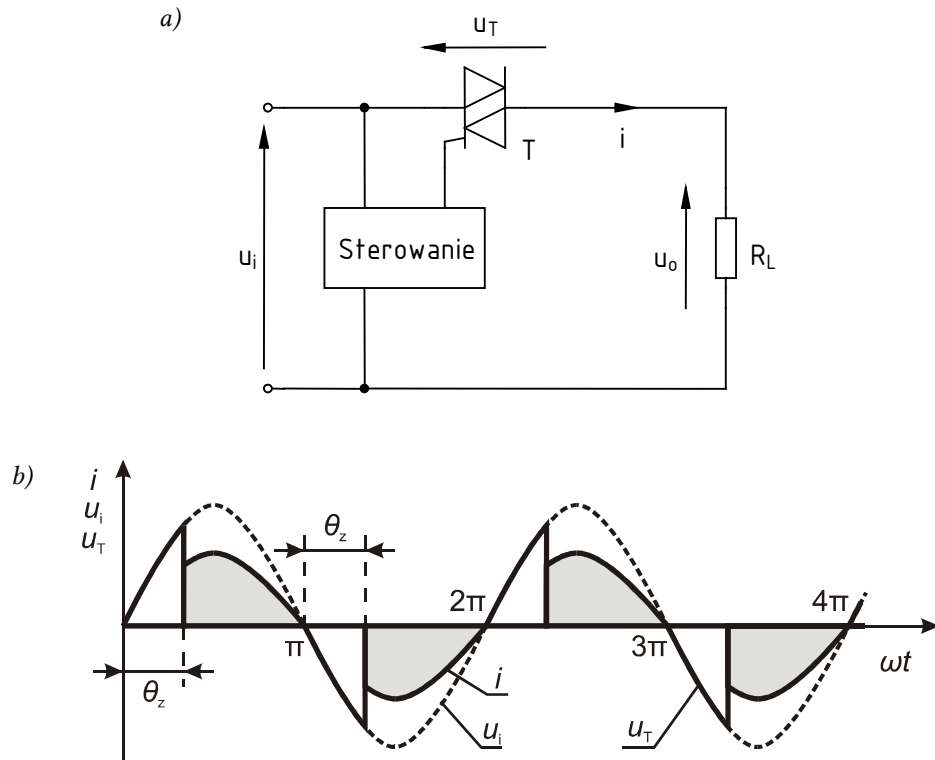
- 1) zależność względnego skutecznego prądu wyjściowego (odbiornika) od kąta załączania:

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

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 ($u = u_i$)

Oprócz tego, jak każdy układ przekształtnikowy, sterownik prądu przemiennego jest charakteryzowany przez dwa podstawowe parametry energetyczne [3]:

- 1) sprawność energetyczną,
- 2) współczynnik mocy.

2.2. Teoretyczne charakterystyki układu przy obciążeniu rezystancyjnym

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

$$i(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq \omega t \leq \vartheta_z \\ \frac{U_i \sqrt{2}}{R_L} \sin \omega t & \vartheta_z \leq \omega t \leq \pi \end{cases} \quad (3)$$

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

$$u_o = u_i - u_T \approx u_i \quad (4)$$

Wartość skuteczna prądu odbiornika obliczona na podstawie powyższego wyrażenia wynosi

$$I = \frac{U_i}{R_L} \sqrt{\frac{A(\vartheta_z)}{\pi}} \quad (5)$$

przy czym

$$A(\vartheta_z) = \pi - \vartheta_z + \frac{1}{2} \sin 2\vartheta_z \quad (6)$$

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

$$I_r(\vartheta_z) = \frac{I(\vartheta_z)}{I(0)} = \sqrt{\frac{A(\vartheta_z)}{\pi}} \quad (7)$$

Moc czynna odbiornika wynosi

$$P_o = I^2 R_L = \frac{U_i^2}{R_L} \frac{A(\vartheta_z)}{\pi} \quad (8)$$

zaś wartość względna mocy czynnej odbiornika

$$P_{or}(\vartheta_z) = \frac{P_o(\vartheta_z)}{P_o(0)} = \frac{A(\vartheta_z)}{\pi} \quad (9)$$

Współczynnik mocy układu jest w związku z tym również funkcją kąta załączania. Jeżeli założyć, że sprawność jest wysoka, a więc $\eta \approx 1$, to $P_o \approx P_i$, a wówczas

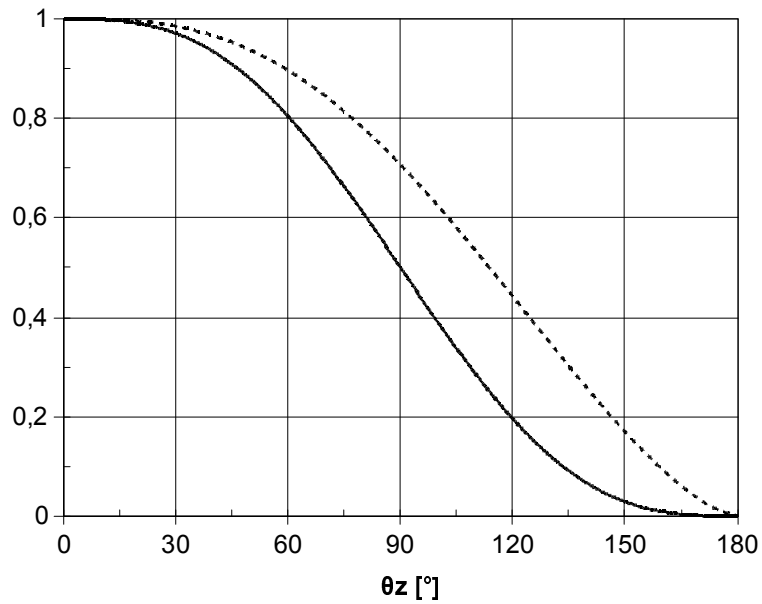
$$\lambda(\vartheta_z) = \frac{P_i}{S_i} \approx \frac{P_o}{S_i} = \frac{P_o}{U_i I} = \sqrt{\frac{A(\vartheta_z)}{\pi}}, \quad (10)$$

Teoretyczny zakres sterowania układu przy obciążeniu rezystancyjnym wynosi

$$0 \leq \vartheta_z \leq \pi \quad (11)$$

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 prądu skutecznego odbiornika I_r i współczynnika 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.

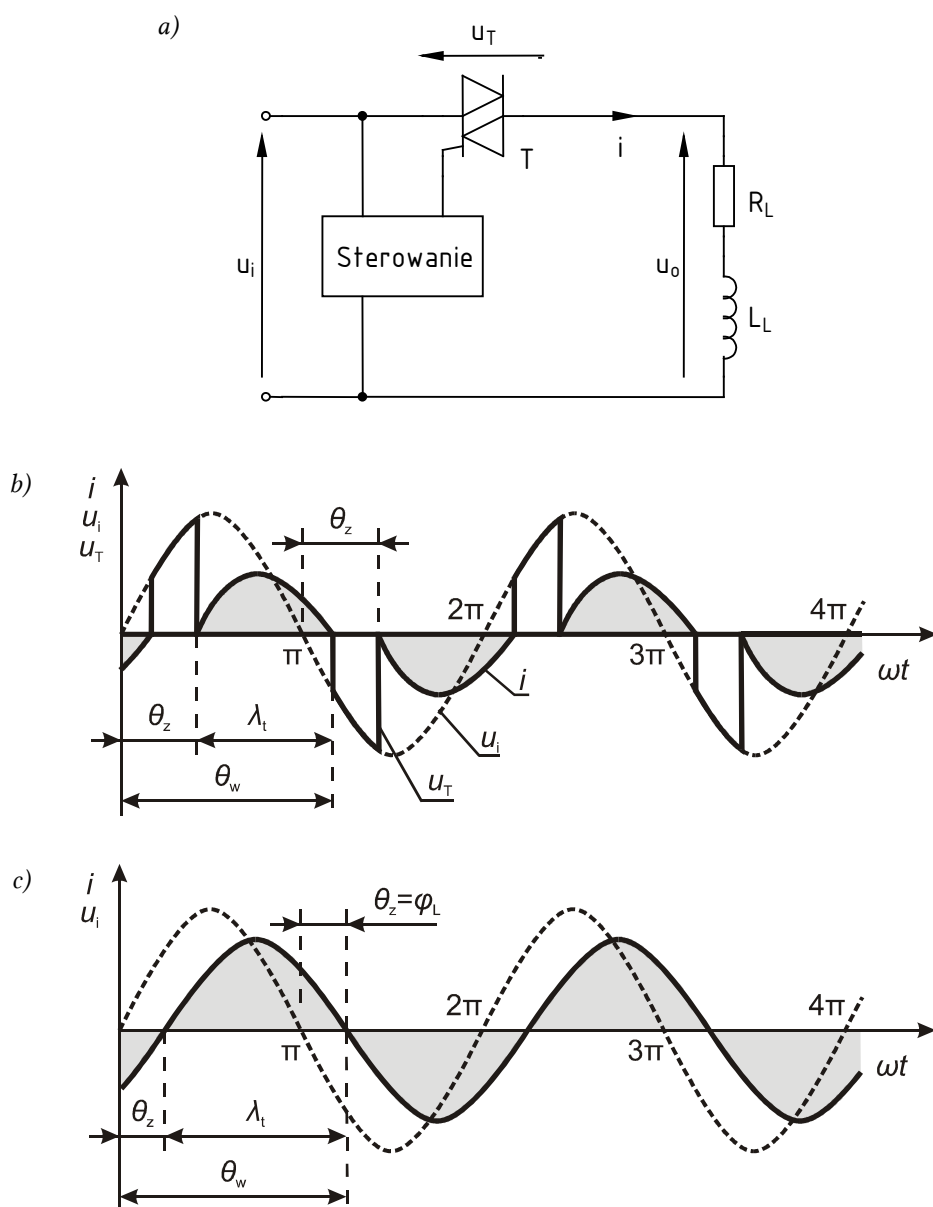
2.3. Układ z obciążeniem o charakterze indukcyjnym (RL)

Rozważany schemat układu dla tego przypadku jest przedstawiony na rys. 3a. Zgodnie z rys. 3b,

$$\vartheta_w = \vartheta_z + \lambda_t > \pi \quad (12)$$

gdzie:

- 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 $\vartheta_z > \varphi_L$; (c) przebiegi napięć i prądów dla $\vartheta_z = \varphi_L$.

Równanie opisujące układ po załączeniu tyrystora ma postać

$$\sqrt{2}U_i \sin \omega t = iR_L + L_L \frac{di}{dt} \quad (13)$$

Rozwiązanie tego równania daje następującą postać przebiegu prądu:

$$i(t) = \frac{\sqrt{2}U_i}{|Z_L|} \left\{ \sin(\omega t - \varphi_L) - \sin(\vartheta_z - \varphi_L) \cdot \exp\left[-\frac{R_L}{\omega L_L}(\omega t - \vartheta_z)\right] \right\} \quad (14)$$

gdzie $|Z_L|$ oznacza moduł impedancji odbiornika

$$|Z_L| = \sqrt{R_L^2 + (\omega L_L)^2} \quad (15)$$

zaś φ_L – kąt fazowy odbiornika

$$\varphi_L = \arctg \frac{\omega L_L}{R_L} \quad (16)$$

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

$$\varphi_L \leq \vartheta_z \leq \pi \quad (17)$$

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

Charakterystyka prądu skutecznego ma postać

$$I = \frac{U_i}{|Z_L|} \sqrt{\frac{B(\vartheta_z, \varphi_L)}{\pi}} \quad (18)$$

charakterystyka mocy czynnej odbiornika – postać:

$$P_o = \frac{U_i^2}{|Z_L|} \cos \varphi_L \cdot \frac{B(\vartheta_z, \varphi_L)}{\pi} \quad (19)$$

zaś współczynnika mocy:

$$\lambda = \cos \varphi_L \cdot \sqrt{\frac{B(\vartheta_z, \varphi_L)}{\pi}} \quad (20)$$

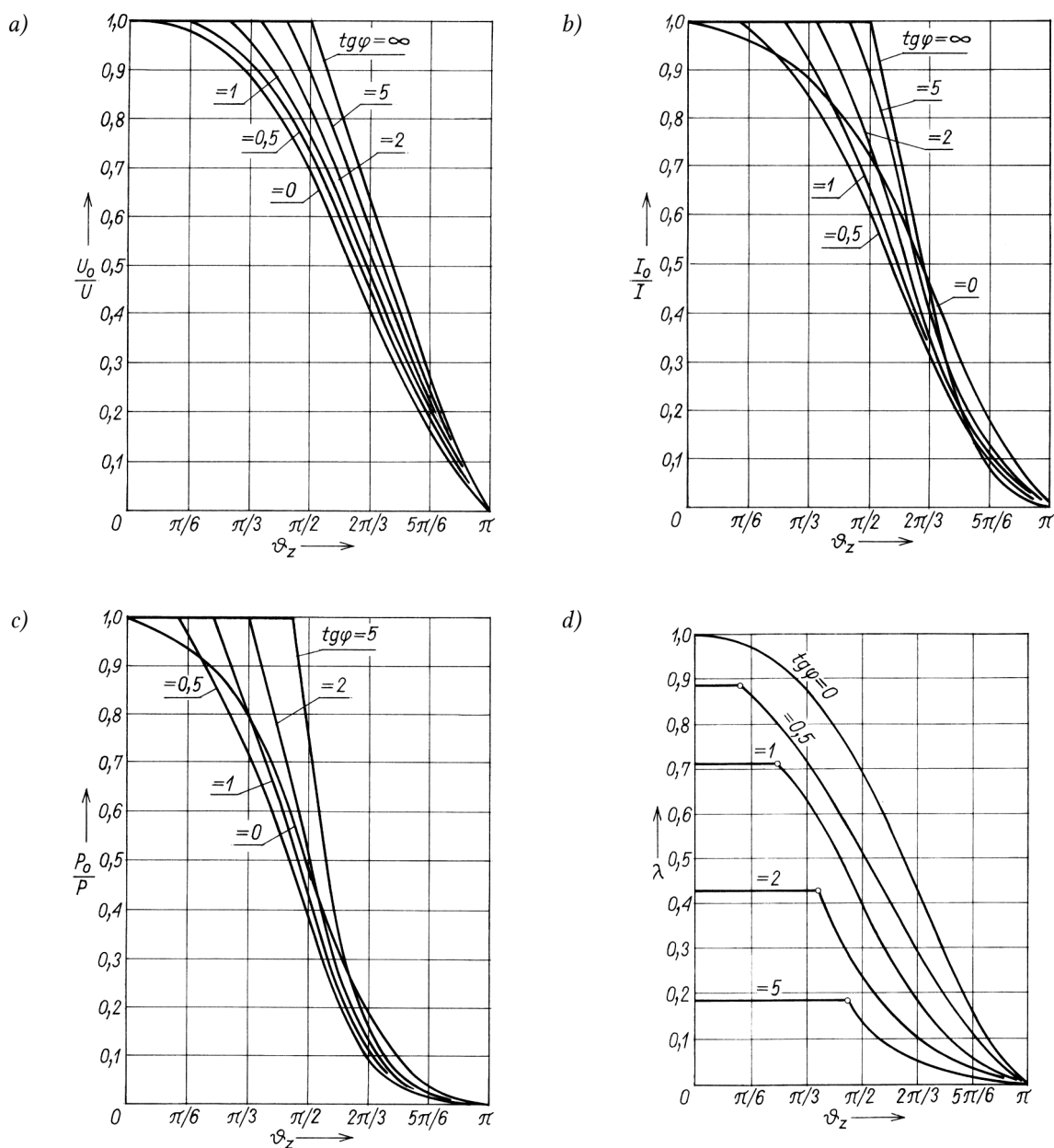
gdzie B jest pewną funkcją parametrów ϑ_z i φ_L .

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

$$I_r(\vartheta_z) = \frac{I(\vartheta_z)}{I(\varphi_L)}, \quad (21)$$

$$P_{or}(\vartheta_z) = \frac{P_o(\vartheta_z)}{P_o(\varphi_L)}. \quad (22)$$

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



Rys. 4. Charakterystyki sterowania przy obciążeniu indukcyjnym w funkcji kąta załączania [1]:
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. Pomiar

3.1. Układ pomiarowy

Badaniom poddawany jest sterownik prądu przemiennego sterowany fazowo, w którym rolę klucza półprzewodnikowego pełni triak. Triak ten zawarty jest w układzie scalonym – tzw. przekaźniku półprzewodnikowym (ang. *solid-state relay*), zawierającym samego triaka, obwód wyzwania z izolacją optyczną oraz podstawowy tłumik RC (na schemacie pominięty).

Uwaga!

Podłączenia układu do sieci dokonuje się dopiero we wskazanym w instrukcji momencie po sprawdzeniu połączeń przez prowadzącego zajęcia i pod jego nadzorem!

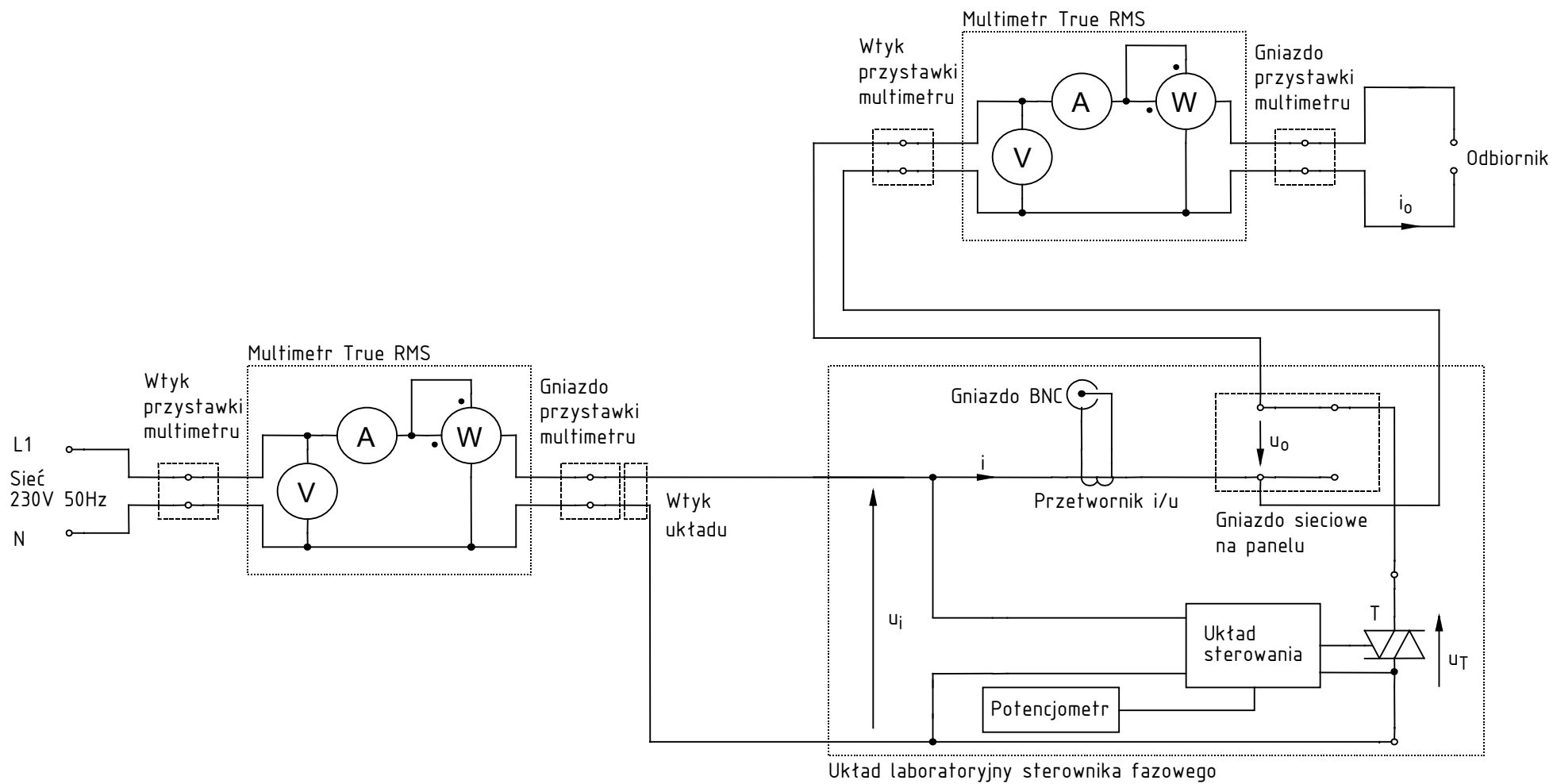
Jeżeli układ jest włączony do sieci, nie należy dotykać wyprowadzeń punktów N, L i u_T , na których może występować napięcie sieciowe – grozi porażeniem!

Do sterownika należy przyłączyć odpowiedni odbiornik i włączyć w obwód mierniki, zgodnie z rys. 5. Do dwu kanałów oscyloskopu należy przyłączyć:

- sygnał z gniazda BNC (wyjście przetwornika prąd-napięcie); współczynnik przetwarzania przetwornika (przełącznik na panelu układu) należy ustawić na 10 A/V i zapisać tę nastawę;
- napięcie sieciowe u przez sondę tłumiącą 100:1, przy czym należy przyjąć, że potencjał przewodu zerowego (N) jest równy potencjałowi przewodu ochronnego (PE), w związku z czym należy użyć sondy bez masy, przyłączając do układu wyłącznie końcówkę gorącą.

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!



Rys. 5. Schemat układu pomiarowego

3.2. Wykonanie pomiarów

Odbiornik rezystancyjny liniowy

1. Skonfigurować połączenie oscyloskopu z komputerem zgodnie z instrukcją dostępną na stanowisku.
2. Jako odbiornik włączyć w obwód 2 szeregowo połączone oporniki $30\ \Omega$, 4 A.

Następny punkt należy wykonywać pod nadzorem prowadzącego i po sprawdzeniu przez niego połączeń!

3. Włączyć układ do sieci (listwy zasilającej) poprzez dodatkowy przedłużacz. Sprawdzić, czy napięcie fazowe występuje w odpowiednim gnieździe układu zgodnie ze schematem; w przeciwnym razie odwrócić wtyk układu.

Od tego momentu nie należy dotykać gniazd układu! Grozi porażeniem!

Wszelkich przełączeń w układzie należy dokonywać po odłączeniu przedłużacza z listwy zasilającej (nie wtyku z przedłużacza)!

4. Pokrętko nastawy kąta załączania ustawić mniej więcej w połowie.
5. Skonfigurować oscyloskop:
 - 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 wyzwalanie przebiegiem napięcia (przycisk TRIG) przy sprzężeniu ze składową stałą (przycisk TRIG. MODE, ustawienie DC);
 - d) wyregulować poziom wyzwalania (pokrętko LEVEL) tak, aby świeciła się kontrolka TR, obraz był stabilny;
 - e) podstawę czasu (pokrętko TIME/DIV) ustawić tak, aby obserwować 1 okres napięcia sieci;
 - f) położenie chwili wyzwalania (przycisk PTR. oraz pokrętko LEVEL) ustawić tak, aby chwila przejścia przebiegu napięcia sieci przez zero znajdowała się dokładnie na lewym krańcu podziałki;
 - g) wzmocnienia kanałów (pokrętko VOLTS/DIV) ustawić tak, aby obserwowane przebiegi dla pełnego wysterowania zajmowały możliwie dużą część ekranu;
 - h) poziomy zera obu przebiegów (znacznik w formie odwróconej litery T) ustawić na środku ekranu.

Z powodu niedoskonałości przetwornika prąd/napięcie, poziom zera wykazywany na oscyloskopie może nie odpowiadać rzeczywistości. Wiadomo, że prąd jest zerowy w czasie, gdy triak nie przewodzi i na tej podstawie należy ustawić jego przebieg na ekranie.

6. Zmieniając kąt załączania ϑ_z od wartości maksymalnej do minimalnej (możliwych do uzyskania w badanym układzie), dla 8–10 punktów pomiarowych należy (dla każdego punktu wszystkie czynności, również ppkt 9.c), jednym ciągiem nie zmieniając kąta):
 - a) pobrać przebiegi z oscyloskopu (przycisk *Read*) i zapisać w formacie programu SP107 (MES);
 - b) dla kąta załączania $\vartheta_z \approx 90^\circ$:
 - przełożyć sondę napięciową tak, aby mierzyć napięcie na triaku u_T ,
 - pobrać przebiegi z oscyloskopu i zapisać w formacie programu SP107 (MES),

- przełożyć sondę napięciową z powrotem na napięcie wejściowe u_i ;
- c) zanotować wskazania mierników:
 - wartość skuteczną prądu I ,
 - moc czynną wyjściową P_o ,
 - moc czynną wejściową P_i ,
 - wartość skuteczną napięcia wejściowego (sieci) U_i .
- 7. Zmierzyć maksymalne wartości prądu i mocy:
 - a) odłączyć układ od sieci stosując się do uwagi podanej pod pkt. 3;
 - b) zewrzeć klucz półprzewodnikowy przewodem;
 - c) włączyć układ do sieci;
 - d) zanotować wskazania I i P_o ;
 - e) odłączyć układ od sieci;
 - f) usunąć zwarcie klucza.

Odbiornik indukcyjny

8. Przy układzie odłączonym od sieci, w szereg z opornikami włączyć dławik o indukcyjności 130 mH. Ponownie przyłączyć układ do sieci.
9. Zmieniając kąt załączania ϑ_z od wartości maksymalnej do minimalnej, przy której układ działa poprawnie (co należy stwierdzić na podstawie przebiegu prądu – por. rys. 3b), dla 5–8 punktów pomiarowych, należy [dla każdego punktu wszystkie czynności, również ppkt c), jednym ciągiem nie zmieniając kąta]:
 - a) dostosować wzmocnienie kanału, na którym obserwowany jest prąd i do amplitudy tego prądu oraz ustawić jego poziom zera na środku ekranu;
 - b) pobrać przebiegi z oscyloskopu i zapisać w formacie programu SP107 (MES);
 - c) dla 3 (nie dla wszystkich) kątów załączania ϑ_z – maksymalnego, minimalnego (przy którym układ działa poprawnie) i pośredniego:
 - przełożyć sondę napięciową tak, aby mierzyć napięcie na triaku u_T ,
 - dostosować podstawę czasu (*Time/Div*) i poziom wyzwalania (*Level*) tak, aby widoczne było od swojego początku zbocze narastające napięcia u_T w chwili wyłączenia triaka (osiągnięcia zera przez prąd i), w sposób umożliwiający późniejsze odczytanie stromości tego zbocza,
 - pobrać przebiegi z oscyloskopu i zapisać w formacie programu SP107 (MES),
 - przełożyć sondę napięciową z powrotem na napięcie wejściowe u_i i przywrócić podstawę czasu i poziom wyzwalania według wytycznych z pkt. 5.e)–f);
 - d) zanotować wskazania mierników:
 - wartość skuteczną prądu I ,
 - moc czynną wyjściową P_o ,
 - moc czynną wejściową P_i ,
 - wartość skuteczną napięcia wejściowego (sieci) U_i .
10. Zarejestrować przebiegi dla kąta załączania, przy którym układ przestaje działać poprawnie (tj. kiedy działa już niepoprawnie).
11. Powtórzyć pkt 9 dla ciągłego przewodzenia, tj. przy skrajnej pozycji pokrętła regulacji kąta załączania (w kierunku zmniejszania kąta) – przy tej nastawie układ na powrót powinien działać poprawnie.
12. Odłączyć układ od sieci. Wyłączyć dławik z obwodu.
13. Odłączyć układ od sieci.
14. Włączyć cyfrowy mostek RLC i sprawdzić, czy jest on ustawiony w tryb pomiaru:

- indukcyjności (L) – wskazanie $L/C/R$ z lewej strony wyświetlacza, zmiana przyciskiem $L/C/R$;
 - rezystancji (Ω) – wskazanie $Q/D/\Omega$ w prawym górnym rogu wyświetlacza, zmiana przyciskiem $Q/D/R$;
 - szeregowego obwodu zastępczego (SER) – wskazanie PAL/SER u góry wyświetlacza, zmiana przyciskiem $PAL SER$;
 - przy niskiej częstotliwości pomiarowej 120 Hz – wskazanie 1kHz lub 120Hz z prawej strony wyświetlacza, zmiana przyciskiem $FREQ$.
15. Za pomocą mostka RLC zmierzyć:
- a) dokładną indukcyjność dławika L bez obciążenia przy częstotliwości rzędu sieciowej (tj. przy 120 Hz),
 - b) dokładną rezystancję dławika dla składowej stałej R_s ,
 - c) dokładną rezystancję szeregowo połączonych oporników R_L .

Odbiornik rezystancyjny nieliniowy

16. Przy układzie odłączonym od sieci, zamiast oporników włączyć w obwód żarówkę o mocy 500 W. Ponownie przyłączyć układ do sieci.
17. Powtórzyć pkt. 6–7 dla 5–10 punktów pomiarowych.

4. Opracowanie i analiza wyników

4.1. Dane liczbowe

Parametry energetyczne

1. Wskazania mierników zanotowane w toku pomiarów zebrać:
 - w tabeli 1 – z pkt. 3.2/6 (odbiornik rezystancyjny liniowy – oporniki),
 - w tabeli 2 – z pkt. 3.2/9 (odbiornik indukcyjny),
 - w tabeli 3 – z pkt. 3.2/17 (odbiornik rezystancyjny nieliniowy – żarówka).
2. Na podstawie danych zebranych w tabelach 1–3, dla każdego punktu pomiarowego obliczyć:
 - a) z definicji względną wartość skuteczną prądu I_r , jako wartość maksymalną przyjmując:
 - dla odbiorników rezystancyjnych – wartość zmierzona przy zwartym triaku (pkt 3.2/7 wykonany odpowiednio dla odbiornika liniowego lub dla odbiornika nieliniowego),
 - dla odbiornika indukcyjnego – wartość zmierzona przy ciągłym przewodzeniu (pkt 3.2/11);
 - b) z definicji względną wartość mocy czynnej odbiornika P_{or} , jako wartość maksymalną przyjmując:
 - dla odbiorników rezystancyjnych – wartość zmierzona przy zwartym triaku (pkt 3.2/7 wykonany odpowiednio dla odbiornika liniowego lub dla odbiornika nieliniowego),
 - dla odbiornika indukcyjnego – wartość zmierzona przy ciągłym przewodzeniu (pkt 3.2/11);
 - c) z definicji [3] moc pozorną pobieraną z sieci S ,
 - d) z definicji [3] współczynnik mocy układu λ ,
 - e) sprawność przekształtnika η [3].

Wyniki dodać do odpowiedniej tabeli.

Parametry przebiegów

3. Uruchomić program SP107.

4. Dla każdego z oscylogramów napięcia u_i i prądu i zarejestrowanych w pkt. 3.2/6, 9 i 17:
 - a) kursorami objąć odcinek czasu t_z odpowiadający kątowi załączania ϑ_z i odczytać długość tego odcinka (w okienku *Cursor* wskazanie dt);
 - b) przeliczyć czas t_z na kąt fazowy ϑ_z w stopniach opierając się na fakcie, że okres przebiegu jest znany w obu jednostkach, gdyż znana jest częstotliwość napięcia sieci u_i oraz wiadomo, że okres sinusoidy w dziedzinie kąta fazowego wynosi 180° ;

Wyniki dodać odpowiednio do tabeli 1, 2 lub 3.

5. Dla przypadków kąta załączania ϑ_z z pkt. 3.2/6.b) i 9.c) (tj. dla których rejestrowany był dodatkowy oscylogram napięcia na triaku u_T):
 - a) na oscylogramie przebiegów u_i i i , kursorami objąć krótki odcinek czasu ($100...500 \mu s$) bezpośrednio przed przejściem prądu i przez zero;
 - b) odczytać długość zaznaczonego odcinka Δt (w oknie *Cursor* wskazanie dt) oraz zmianę prądu Δi^* na tym odcinku w woltach (wskazanie *CI-CII* w odpowiednim wierszu *CHI* lub *CH II* – zależnie od tego, na którym kanale rejestrowany był prąd);
 - c) obliczyć przybliżoną stromość opadania prądu przy komutacji di_{com}/dt [4] jako iloraz różnic

$$\frac{di_{com}}{dt} \approx \frac{\Delta i(\Delta t)}{\Delta t} = \frac{k_i \cdot \Delta i^*(\Delta t)}{\Delta t} \quad (23)$$

gdzie k_i jest współczynnikiem przetwarzania przetwornika prąd-napięcie wybranym i zanotowanym w pkt. 3.1;

- d) na oscylogramie przebiegów u_T i i , objąć kursorami krótki odcinek czasu na zboczu narastającym napięcia u_T (w miejscu, gdzie stromość tego napięcia jest największa);
- e) odczytać długość zaznaczonego odcinka Δt i zmianę napięcia Δu^* na tym odcinku;
- f) obliczyć przybliżoną stromość narastania napięcia przy komutacji du_{com}/dt [4] jako iloraz różnic

$$\frac{du_{com}}{dt} \approx \frac{\Delta u(\Delta t)}{\Delta t} = \frac{k_u \cdot \Delta u^*(\Delta t)}{\Delta t} \quad (24)$$

gdzie k_u jest współczynnikiem tłumienia użytej sondy napięciowej zgodnie z pkt. 3.1.

Wyniki zebrać w tabeli 4, umieszczając w niej również charakter obciążenia (R/RL) i wartość kąta załączania ϑ_z .

6. Dla oscylogramu zarejestrowanego w pkt. 3.2/11 (odbiornik indukcyjny, ciągle przewodzenie – skrajna pozycja pokrętki regulacji kąta załączania):
 - a) kursorami objąć odcinek czasu t_φ odpowiadający przesunięciu fazowemu prądu względem napięcia i odczytać długość tego odcinka;
 - b) przeliczyć czas t_φ na kąt fazowy w stopniach – uzyskany wynik stanowi kąt fazowy odbiornika φ_L ;
 - c) wykonać pkt 2 w oparciu o wskazania mierników zanotowane w pkt. 3.2/11 i dodać wyniki do tabeli 3 wraz z wartością ϑ_z (równą φ_L).

Teoretyczne charakterystyki sterowania

7. Wykorzystując wzory wyprowadzone w paragrafie 2.2, obliczyć teoretyczne charakterystyki $I_r = f(\vartheta_z)$, $P_{or} = f(\vartheta_z)$ i $\lambda = f(\vartheta_z)$ dla przekształtnika idealnego – tzn. uzyskać w miarę gęsty zbiór punktów w pełnym zakresie ϑ_z , tj. od 0° do 180° .

4.2. Analiza wyników

Charakterystyki sterowania dla obciążenia rezystancyjnego

1. Na podstawie wyników zawartych w tabelach 1 i 3, wykonać dwa wykresy charakterystyk: $I_r = f(\vartheta_z)$ i $P_{or} = f(\vartheta_z)$, na każdym z nich umieszczając trzy krzywe: doświadczalną dla odbiornika liniowego, doświadczalną dla odbiornika nieliniowego i teoretyczną.
2. Czy rozbieżności między charakterystykami dla odbiornika liniowego a charakterystykami teoretycznymi są znaczące? Czy wskazują one na duże znaczenie nieidealności użytego klucza półprzewodnikowego?

Żarówka jako nieliniowy odbiornik rezystancyjny

3. Przeanalizować wpływ nieliniowości żarówki polegającej na zmianie rezystancji włókna w funkcji temperatury:
 - a) jaka różnica między opornikami a żarówką daje się zauważyć na charakterystykach prądu I_r i mocy P_{or} ? czy zmienia się ona wraz z kątem załączania ϑ_z i w jaki sposób?
 - b) w oparciu o oscylogramy zarejestrowane dla żarówki (pkt 3.2/17), obserwując, w jaki sposób zmienia się wartość prądu w ustalonej chwili czasu przy zmianie kąta załączania ϑ_z , stwierdzić, w jaki sposób zmienia się rezystancja żarówki (rośnie czy maleje);
 - c) łącząc temperaturę włókna z mocą czynną w nim wydzielaną P_o , w oparciu o charakterystykę $P_{or} = f(\vartheta_z)$ oraz obserwację z podpunktu b) określić, jak zmienia się rezystancja żarówki w funkcji temperatury;
 - d) w oparciu o wnioski z podpunktu c), uzasadnić obserwację z podpunktu a).

Wpływ charakteru obciążenia na charakterystyki sterowania

4. Porównać przebiegi zarejestrowane dla maksymalnego wysterowania (minimalnego kąta załączania), dla obciążenia rezystancyjnego (pkt 3.2/6) i indukcyjnego (pkt 3.2/11 – skrajna pozycja pokrętkła regulacji kąta załączania), pod kątem kształtu, fazy i wartości. Uzasadnić obserwacje.
5. Na podstawie wartości indukcyjności i rezystancji (w tym rezystancji szeregowej dławika) zmierzonych w pkt. 3.2/15, obliczyć kąt fazowy odbiornika φ_L dla częstotliwości występującej w badanym układzie. Porównać wynik z otrzymanym z graficznej analizy przebiegów w pkt. 4.1/6.b).
6. Na podstawie wyników zawartych w tabelach 1 i 2, wykonać dwa wykresy charakterystyk: $I_r = f(\vartheta_z)$ i $P_{or} = f(\vartheta_z)$, na każdym z nich umieszczając dwie krzywe otrzymane doświadczalnie – dla obciążenia rezystancyjnego liniowego i dla obciążenia indukcyjnego. Porównać uzyskane zależności z teoretycznymi, biorąc między innymi pod uwagę wyznaczoną wartość kąta fazowego odbiornika φ_L .
7. Na podstawie wartości indukcyjności i rezystancji (w tym rezystancji szeregowej dławika) zmierzonych w pkt. 3.2/15, obliczyć moduł impedancji odbiornika $|Z_L|$ dla częstotliwości występującej w badanym układzie. Czy różnice maksymalnych (bezwzględnych) wartości prądu I i mocy wyjściowej P_o między obciążeniem rezystancyjnym i indukcyjnym (pkt 3.2/7 i 11 – wartości wykorzystane już w pkt. 2) wykazują zgodność z otrzymanym wynikiem?

Komutacyjna stromość prądowa

8. Na podstawie wyników dla obciążenia indukcyjnego z tabeli 4, wykreślić komutacyjną stromość prądu di_{com}/dt oraz komutacyjną stromość napięcia du_{com}/dt w funkcji kąta załączania ϑ_z . Opisać uzyskane zależności.
9. Porównać wartości du_{com}/dt dla obciążenia indukcyjnego i dla obciążenia rezystancyjnego. Uzasadnić obserwacje dotyczące stromości napięcia w oparciu o zarejestrowane oscylogramy (oscyllacje napięcia należy pominąć – wynikają one z rezonansu między indukcyjnością odbiornika a pojemnością nieuwzględnioną na rys. 5 tłumika RC).

10. Przeanalizować zagadnienie krytycznej stromości komutacyjnej [4]:
- apodać krytyczne wartości du_{com}/dt i di_{com}/dt jako najwyższe, przy których układ z obciążeniem indukcyjnym działał poprawnie (przypadek najmniejszego kąta ϑ_z z tabeli 4);
 - bw oparciu o oscylogram zarejestrowany w pkt. 3.2/10 opisać, co stało się po przekroczeniu powyższych wartości krytycznych; czy zjawisko to jest obserwowane przy obu polaryzacjach napięcia głównego? czy jest to zgodne z przewidywaniami teoretycznymi? (nie wnikać w kwestię konkretnych trybów pracy, gdyż układ warstw półprzewodnikowych w układzie scalonym nie jest znany);
 - cporównać wartości di_{com}/dt dla obciążenia indukcyjnego i dla obciążenia rezystancyjnego; czy można wnioskować, że stromość prądowa jest parametrem niezależnym czy zależnym od innych warunków pracy? jaki parametr (wyznaczony w ćwiczeniu) ma wartość zdecydowanie korzystniejszą w przypadku obciążenia rezystancyjnego?

Parametry energetyczne

11. Na podstawie wyników zawartych w tabelach 1, 2 i 3, wykonać dwa wykresy charakterystyk: $\lambda = f(\vartheta_z)$ i $\eta = f(\vartheta_z)$, na każdym z nich umieszczając trzy krzywe otrzymane doświadczalnie – dla obciążenia rezystancyjnego liniowego, rezystancyjnego nieliniowego i indukcyjnego.
12. Przeanalizować zależności uzyskane dla współczynnika mocy:
- ajaki wpływ na współczynnik mocy układu ma sterowanie fazowe, tj. zmiana kąta załączania ϑ_z ? przypomnieć, z czego to wynika [4];
 - bczy nieliniowość odbiornika ma wpływ na wartość współczynnika mocy układu? uzasadnić tę obserwację w oparciu o wiedzę na temat współczynnika mocy odbiorników rezystancyjnych [3], [4];
 - czy charakter odbiornika (rezystancyjny / indukcyjny) ma wpływ na wartość współczynnika mocy układu? czy da się to uzasadnić wiedzą o współczynniku mocy odbiorników biernych [3]?
 - d) czy da się wskazać, jakie wartości kąta załączania oraz jaki charakter obciążenia jest najkorzystniejszy z punktu widzenia obciążenia sieci energetycznej [3]?
13. Przeanalizować zmiany sprawności sterownika prądu przemiennego:
- ajaki wpływ na sprawność układu ma sterowanie fazowe, tj. zmiana kąta załączania ϑ_z ? czy da się wskazać kąt, przy którym układ staje się wyraźnie mniej korzystny dla odbiorcy energii? jeżeli tak – czy występuje to przy mniejszym czy większym obciążeniu I przekształtnika?
 - bczy zmiana charakteru odbiornika miała widoczny wpływ na sprawność przekształtnika w wykonanym doświadczeniu? jeżeli tak – czy można to wytłumaczyć w oparciu o wniosek na temat obciążenia sformułowany w podpunkcie a)?

5. Literatura

- [1] Nowak M., Barlik R.: *Poradnik inżyniera energoelektronika*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1998.
- [2] Luciński J.: *Układy z tyrystorami dwukierunkowymi*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1986.
- [3] Starzak Ł.: *Laboratorium przyrządów i układów mocy. Instrukcja 0. Wprowadzenie do elektroniki mocy*. Łódź: Politechnika Łódzka, 2009.
- [4] Starzak Ł.: *Laboratorium przyrządów i układów mocy. Ćwiczenie 2. Tyrystory*. Łódź: Politechnika Łódzka, 2009.