



PRZEKSZTAŁTNIKI ELEKTRONICZNE

Ćwiczenie C32

Sterownik grupowy 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. Zasada sterowania grupowego.....	7
2.2. Teoretyczne charakterystyki sterowania.....	10
C Doświadczenie	13
3. Pomiary	13
3.1. Układ pomiarowy.....	13
Ogólny opis układu.....	13
Wstępna konfiguracja i korzystanie z przyrządów pomiarowych.....	14
Opis funkcji sterownika mikroprocesorowego układu laboratoryjnego.....	15
3.2. Wykonanie pomiarów.....	16
D Wyniki	19
4. Opracowanie i analiza wyników.....	19
4.1. Charakterystyki sterowania.....	19
4.2. Wyznaczenie charakterystyk sterownika za pomocą arkusza kalkulacyjnego w oparciu o wyniki DFT.....	21
Import danych.....	21
Uwzględnienie współczynników wynikających z konstrukcji układu pomiarowego.....	22
Prąd skuteczny.....	22
Moc czynna.....	23
Obliczenia dla $\delta \neq 1$	24
E Informacje	25
5. Oczekiwana zawartość sprawozdania.....	25
6. Literatura.....	25

B

Wprowadzenie do ćwiczenia

1. Cel i przebieg ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie zasady sterowania grupowego sterowników prądu przemiennego oraz zbadanie charakterystyk sterowania i parametrów energetycznych. Badana jest praca sterownika z obciążeniem rezystancyjnym dla typowej aplikacji, jaką jest grzejnictwo oporowe. Ćwiczenie zapoznaje również z zastosowaniem dyskretnej transformaty Fouriera (DFT) do obliczeń w elektronicznych układach przekształtnikowych generujących przebiegi silnie odkształcone.

2. Podstawy teoretyczne

2.1. Zasada sterowania grupowego

Klasyczny sterownik prądu przemiennego, np. z triakiem jako kluczem półprzewodnikowym, może pracować z okresem impulsowania większym od okresu napięcia sieciowego. Układ taki, przedstawiony na rys. 1, działa na zasadzie okresowego przerywania przepływu prądu według określonego programu. Uzyskuje się w ten sposób zmiany wielkości sterowanych – np. mocy czynnej odbiornika czy też wartości skutecznej prądu – w funkcji współczynnika wypełnienia δ ciągu impulsów sinusoidalnych prądu odbiornika, który to współczynnik pełni rolę wielkości sterującej.

Spotyka się dwie nazwy takiego sposobu sterowania:

- grupowe – gdyż klucz półprzewodnikowy przepuszcza fale sinusoidy grupami (paczkami);
- impulsowe – gdyż polega na przepływie prądu dłuższymi lub krótszymi impulsami o charakterze sinusoidalnym.

Jest to nietypowe sterowanie impulsowe, gdyż z reguły, np. w falownikach impulsowych, klucze półprzewodnikowe są przełączane (przewodzą / nie przewodzą) z częstotliwością dużo większą od częstotliwości sieci. Tymczasem w przypadku impulsowych sterowników prądu przemiennego jest odwrotnie: częstotliwość powtarzania impulsów jest mniejsza niż częstotliwość sieci.

Współczynnik wypełnienia impulsów δ definiuje się jako stosunek czasu przewodzenia (czasu, przez który klucz półprzewodnikowy jest załączony) do okresu impulsowania (okresu, z jakim powtarzają się paczki fal sinusoidy):

$$\delta = \frac{t_i}{T_i}, \quad (1)$$

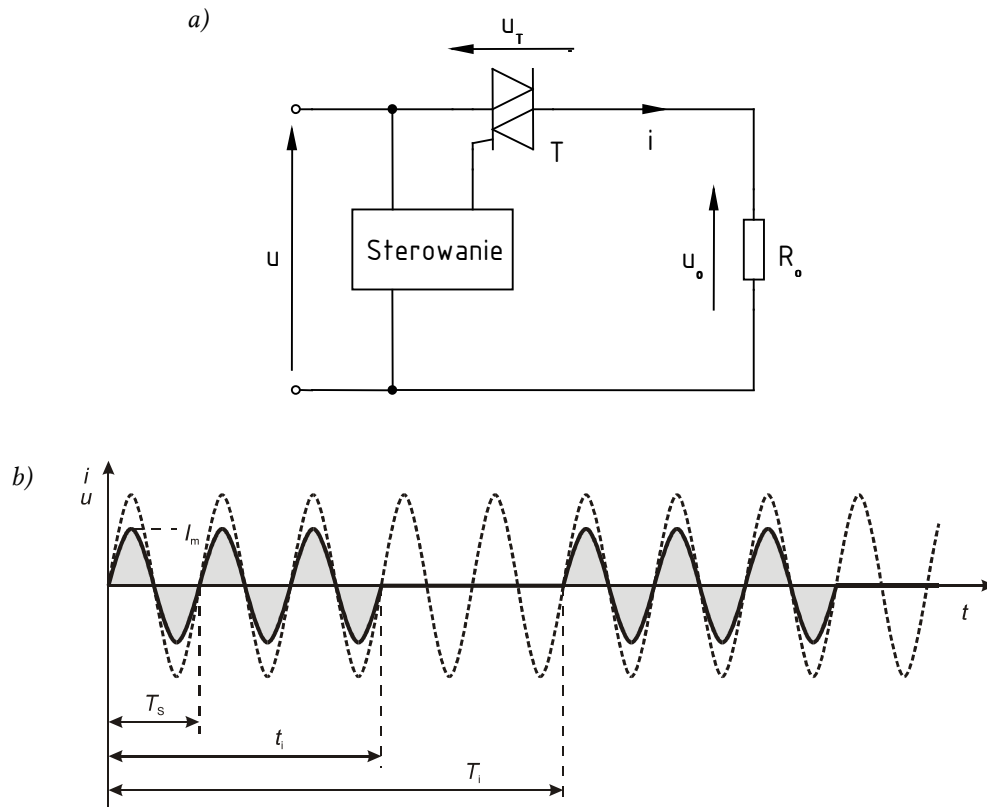
przy czym:

- T_i – obrany okres impulsowania:

$$T_i = AT_s = \frac{2\pi A}{\omega}; A = 1, 2, 3, \dots; \quad (2)$$

- A – liczba pełnych okresów sieci przyjęta jako okres impulsowania;
- T_s – okres napięcia sieci:

$$T_s = \frac{1}{f_s} = \frac{2\pi}{\omega}; \quad (3)$$



Rys. 1. Sterownik prądu przemiennego z odbiornikiem rezystancyjnym: a) schemat układu; b) przebiegi prądu odbiornika i napięcia zasilania dla $A = 5$, $N = 3$ przy sterowaniu grupowym

- t_i – czas przewodzenia (przepływu prądu):

$$t_i = NT_s = \frac{2\pi N}{\omega}; N = 0, 1, 2, \dots, A; \quad (4)$$

- N – liczba pełnych okresów prądu płynącego przez odbiornik w czasie jednego okresu impulsowania (inaczej – liczba pełnych okresów przyjęta jako czas przewodzenia).

Z zasady sterowania grupowego wynika, że częstotliwość sterowania $f_i = 1/T_i$ jest znacznie niższa od częstotliwości sieci zasilającej f_s . Można zatem spodziewać się okresowych tętnień wielkości sterowanej – mocy czynnej, temperatury, prędkości kątowej, natężenia światła itp. Wartość tych tętnień będzie zależna od relacji między stałą czasową odbiornika τ_o (np. nagrzewania się i studzenia grzałki) a okresem impulsowania T_i . W celu minimalizowania tętnień wielkości sterowanej należy dążyć do tego, by zachowana była relacja

$$\tau_o \gg T_i. \quad (5)$$

Drugą konsekwencją tego sposobu sterowania jest dyskretyzacja wielkości sterującej δ , przyjmującej tylko pewne ściśle określone wartości, wynikające ze stosunku założonych wartości – liczb całkowitych – N oraz A ,

$$\delta = \frac{N}{A}. \quad (6)$$

Dlatego wielkości sterowane mogą przyjmować również tylko odpowiednie wartości dyskretne, co powoduje nieciągłość charakterystyk sterowania – można je przedstawić w postaci krzywych schodkowych lub zbioru punktów rozmieszczonych na ciągłych charakterystykach teoretycznych.

Ważną zaletą tego sposobu sterowania jest możliwość eliminowania stanów przejściowych przy załączaniu oraz dużych stromości prądowych poprzez zapewnienie załączania w momencie naturalnego przejścia prądu przez zero. Poprawia to warunki pracy tyrystorów, a także w istotny sposób wpływa na obniżenie poziomu generowanych do otoczenia zakłóceń elektromagnetycznych.

2.2. Teoretyczne charakterystyki sterowania

Podstawowymi charakterystykami sterowników prądu przemiennego są:

- 1) względna wartość skuteczna prądu odbiornika w funkcji współczynnika wypełnienia

$$I_r(\delta) = \frac{I(\delta)}{I_{\max}}; \quad (7)$$

- 2) względna wartość mocy czynnej odbiornika w funkcji współczynnika wypełnienia

$$P_{\text{or}}(\delta) = \frac{P_o(\delta)}{P_{o(\max)}}, \quad (8)$$

gdzie I_{\max} , $P_{o(\max)}$ – maksymalne możliwe do uzyskania wartości prądu i mocy czynnej, które występują przy ciągłym przepływie prądu ($N = A$, $\delta = 1$);

- 3) współczynnik mocy układu w funkcji współczynnika wypełnienia

$$\lambda(\delta) = \frac{P(\delta)}{S(\delta)}, \quad (9)$$

gdzie P – moc czynna wejściowa, S – moc pozorna wejściowa,

$$S(\delta) = U \cdot I(\delta); \quad (10)$$

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

$$\lambda(\delta) \approx \frac{P_o(\delta)}{S(\delta)}. \quad (11)$$

Obliczymy teraz teoretyczne charakterystyki omawianego układu. Przebieg prądu (zob. rys. 1b) można opisać równaniem

$$i = \begin{cases} I_m \sin \omega t & 0 \leq \omega t \leq 2\pi N \\ 0 & 2\pi N \leq \omega t \leq 2\pi A \end{cases} \quad (12)$$

Wartość skuteczną prądu odbiornika można wyznaczyć korzystając ze wzoru definicyjnego

$$I = I_m \sqrt{\frac{1}{2\pi A} \int_0^{2\pi N} \sin^2 \omega t \, d\omega t}, \quad (13)$$

stąd

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \sqrt{\delta}. \quad (14)$$

Ponieważ maksymalną wartość skuteczną prądu osiąga się przy pełnymysterowaniu, tzn. przy $\delta = 1$, więc wynosi ona

$$I_{\max} = I|_{\delta=1} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \quad (15)$$

Zatem wartość skuteczna prądu w postaci względnej, odniesiona do maksymalnej wartości skutecznej prądu, daje następującą charakterystykę sterowania:

$$I_r(\delta) = \frac{I(\delta)}{I_{\max}} = \sqrt{\delta}. \quad (16)$$

Moc czynną odbiornika wyznacza się ze wzoru

$$P_o = I^2 R_o = \frac{I_m^2 R_o}{2} \delta. \quad (17)$$

Dla obciążenia rezystancyjnego

$$I_m = \frac{U_m}{R_o} = \frac{U\sqrt{2}}{R_o}, \quad (18)$$

gdzie U_m jest wartością maksymalną napięcia wejściowego, a U jego wartością skuteczną. Stąd po przekształceniach otrzymujemy ostatecznie

$$P_o = \frac{U^2}{R_o} \delta. \quad (19)$$

Natomiast przy obciążeniu indukcyjnym (RL) otrzymuje się zależność

$$P_o = \frac{U^2}{Z_o} \cos \phi_o \cdot \delta, \quad (20)$$

gdzie Z_o – moduł impedancji odbiornika, ϕ_o – kąt fazowy odbiornika. Ponieważ moc maksymalna, osiągnięta przy pełnymysterowaniu, wynosi

$$P_{o(\max)} = P_o|_{\delta=1} = \frac{I_m^2 R_o}{2}, \quad (21)$$

więc w postaci względnej charakterystyka sterowania dla mocy czynnej odbiornika ma postać

$$P_{or}(\delta) = \frac{P_o(\delta)}{P_{o(\max)}} = \delta. \quad (22)$$

Współczynnik mocy układu można wyznaczyć ze wzoru

$$\lambda(\delta) \approx \frac{P_o(\delta)}{S(\delta)} = \frac{P_o(\delta)}{UI(\delta)} = \frac{I_m^2 R_o \delta / \sqrt{2}}{U \cdot I_m \sqrt{\delta} / \sqrt{2}} = \frac{I_m R_o \sqrt{\delta}}{\sqrt{2}U}. \quad (23)$$

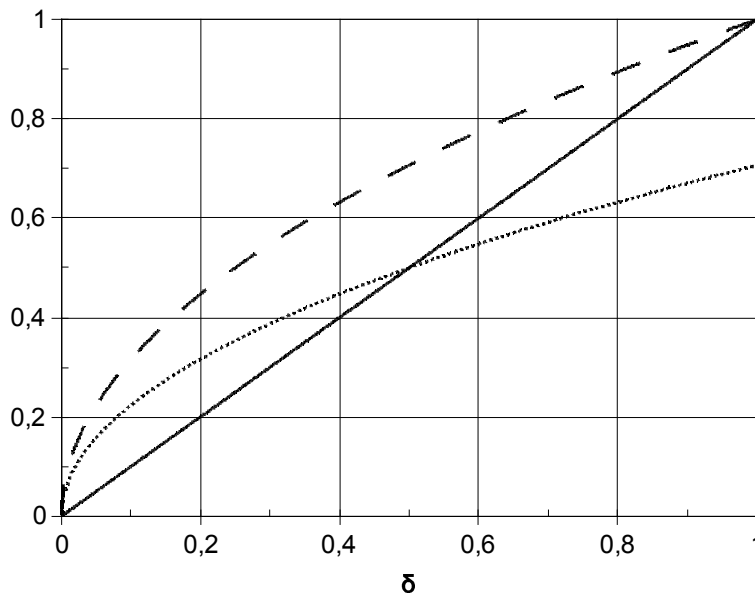
Dla obciążenia rezystancyjnego otrzymujemy po podstawieniu (18) wzór

$$\lambda(\delta) = \sqrt{\delta}, \quad (24)$$

natomiast dla obciążenia indukcyjnego

$$\lambda(\delta) = \sqrt{\delta} \cdot \cos \varphi_0. \quad (25)$$

Teoretyczne charakterystyki sterowania układu wyznaczone na podstawie powyższych zależności przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Teoretyczne charakterystyki sterowania grupowego sterownika prądu przemiennego: względnej wartości skutecznej prądu I_r oraz współczynnika mocy λ dla $\phi_0 = 0$ (linia kreskowana), współczynnika mocy λ dla $\phi_0 = \pi/4$ (linia kropkowana) oraz względnej wartości mocy czynnej odbiornika P_{or} (linia ciągła)

3. Pomiary

3.1. Układ pomiarowy

Ogólny opis układu

Badaniom poddawany jest sterownik prądu przemiennego sterowany grupowo, w którym rolę zaworu pełni tyrystor dwukierunkowy (triak). Do sterownika należy przyłączyć odbiornik i włączyć w obwód mierniki, zgodnie z rys. 3.

W ćwiczeniu bada się wyłącznie układ z odbiornikiem rezystancyjnym, przy czym rolę odbiornika pełni grzałka oporowa o mocy znamionowej 800 W. Posiada ona dużą stałą czasową nagrzewania, więc sterowanie grupowe jest w jej przypadku dobrym rozwiązaniem – por. wzór (5). W szereg z grzałką należy włączyć szeregowo opornik laboratoryjny o rezystancji ok. $5\ \Omega$, którego zadaniem jest ograniczenie maksymalnej mocy pobieranej z sieci do wartości znamionowej transformatora.

UWAGA!

1. Podłączenia układu do sieci dokonuje się w odpowiednim momencie poprzez transformator separujący, po sprawdzeniu połączeń przez prowadzącego zajęcia.
2. Jeżeli układ jest włączony do sieci, nie należy dotykać wyprowadzeń potencjałów na obudowie, na których może występować napięcie sieciowe!
3. Przed włączeniem grzałki w obwód, należy połączyć jej obudowę z przewodem PE (ochronnym) sieci – dodatkowy przewód z „krokodylkiem” należy przyłączyć do bolca w wolnym gnieździe sieciowym. Praca z nie zabezpieczoną grzałką grozi porażeniem!

W ćwiczeniu należy wykorzystać oscyloskop Goldstar OS-3060. Do oscyloskopu należy przyłączyć, zapisując numery wykorzystanych kanałów:

- do jednego kanału – napięcie u_{LEM} z gniazda BNC (wyjście przetwornika prąd/napięcie), przy czym współczynnik przetwarzania przetwornika należy ustawić na 20 mA/mV;
- do drugiego kanału – sygnał u_o (napięcie na odbiorniku) przez sondę tłumiącą 100:1;

- do wejścia wyzwalania zewnętrznego – sygnał z gniazda SYNCHR.

Wstępna konfiguracja i korzystanie z przyrządów pomiarowych

Pomiaru parametrów energetycznych dokonuje się za pośrednictwem oscyloskopu, z wykorzystaniem dyskretnej transformaty Fouriera (DFT). Ta metoda jest obecnie powszechnie używana w energoelektronice przy analizie przebiegów silnie odkształconych (a z takimi właśnie mamy do czynienia w ćwiczeniu). Jedną z jej głównych zalet jest uproszczenie obliczeń przez wyeliminowanie konieczności przetwarzania długich ciągów próbek w dziedzinie czasu – dzięki transformacie Fouriera zostają one zastąpione niewielką ilością próbek w dziedzinie częstotliwości.

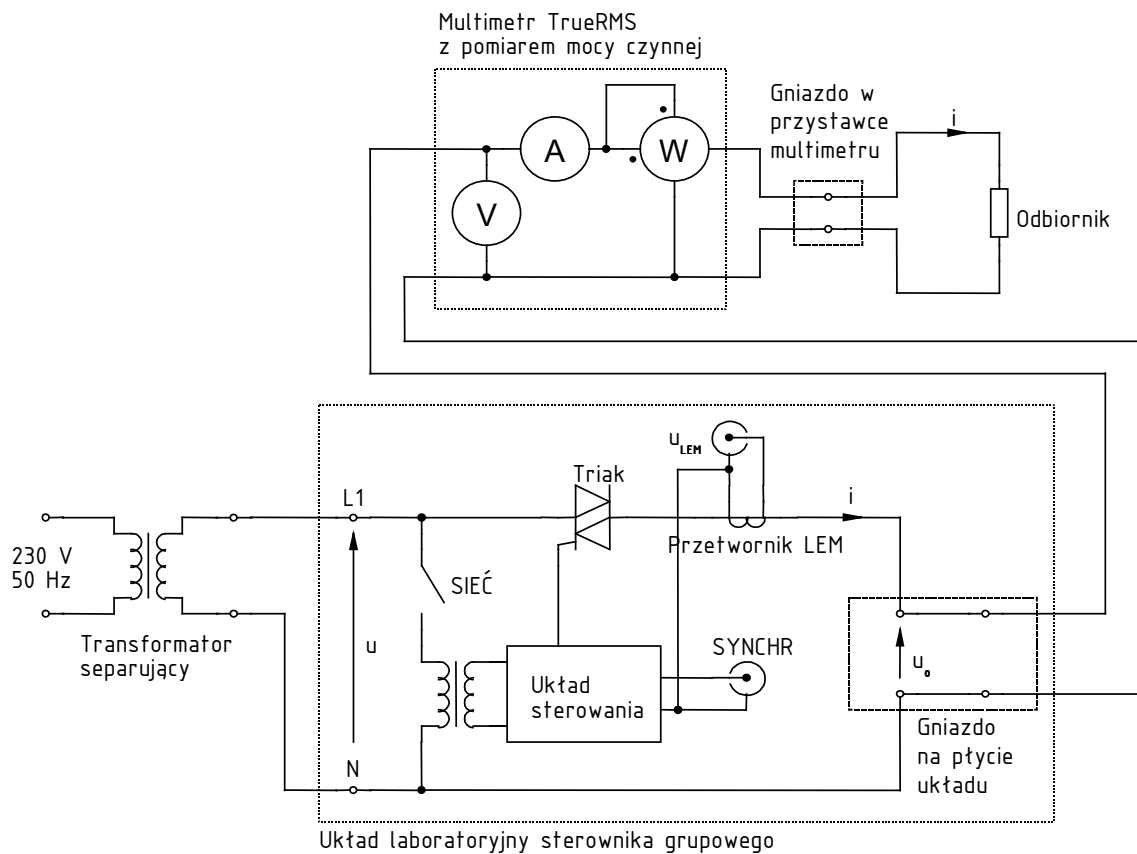
Po włączeniu oscyloskopu należy:

- przełączyć go w tryb pracy z cyfrową pamięcią przebiegów przez wciśnięcie przycisku STORAGE;
- wyłączyć domyślną funkcję uwzględniania współczynnika tłumienia sond 10:1, gdyż nie jest to zgodne z rzeczywistością – w tym celu należy wcisnąć przycisk MENU do pojawienia się u góry ekranu napisu „PROB X10”, następnie przyciskiem SELECT przejść do opcji „PROB X1” i wcisnąć przycisk MENU aż do zgaśnięcia kontrolki MENU (pojawienia się napisu „NORM”).

Jak można zaobserwować (patrz punkt 3.2.4), ze względu na charakter sterowania w badanym układzie standardowe mierniki są bezużyteczne. Nie są one bowiem w stanie uśrednić prądu i mocy za długi okres impulsowania T_i , z którym mamy do czynienia. Multimetr będzie przydatny wyłącznie do pomiarzenia wartości I i P_o dla pełnego wysterowania, które posłużą nam do weryfikacji obliczeń.

Pomiaru wielkości elektrycznych przy pełnym wysterowaniu 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. 3. 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. 3. Schemat układu pomiarowego

Do rejestracji przebiegów z oscyloskopu wykorzystuje się program Osc dostępny z menu Start, zakładka *Pomiary*. Pobrania przebiegów aktualnie wyświetlanych na ekranie dokonuje się za pomocą przycisku *Pobierz wykres*. Jeżeli zgłaszany jest błąd transmisji, należy sprawdzić ustawienia wciskając przycisk *Ustawienia*: typ oscyloskopu: Goldstar OS-3060, prędkość: 4800 baud, port: zgodnie z opisem z tyłu obudowy komputera.

Program Osc zawiesi się przy pierwszej próbie pobrania przebiegów z oscyloskopu. Należy wcisnąć Ctrl+Alt+Del, włączyć Menedżera zadań (*Task Manager*), wybrać aplikację Osc, wcisnąć *Zakończ zadanie* (*End task*) i *Zakończ teraz* (*End now*). Zamknąć Menedżera zadań, ponownie uruchomić program Osc i pobrać przebiegi.

Opis funkcji sterownika mikroprocesorowego układu laboratoryjnego

Przełączniki na płycie czołowej

- SIEĆ – załączanie zasilania układu sterowania
- 200 mA/mV / 20 mA/mV – wybór współczynnika przetwarzania przetwornika prąd/napięcie

Przyciski na płycie czołowej

- ON – załączanie sterowania obwodu mocy (załączenie jest sygnalizowane znakiem „!” w rogu wyświetlacza)
- OFF – wyłączanie sterowania obwodu mocy
- ▲ i ▼ – wybór pozycji menu, zmiana parametrów sterowania
- ENTER – wybór wskazanej pozycji menu
- ESC – porzucenie bieżącej pozycji menu

Funkcje menu

- Uruchom – zmiana wartości parametru N
- Ustawienia – zmiana wartości parametru A

3.2. Wykonanie pomiarów

Przed przystąpieniem do pomiarów, należy dokładnie zapoznać się z treścią paragrafu 3.1 i wykonać odpowiednie czynności wstępne. Pomiary należy wykonywać ściśle według poniższych punktów.

1. Włączyć zasilanie układu sterowania przełącznikiem SIEĆ.
2. Ustawić:
 - a) okres impulsowania (parametr A) podany przez prowadzącego;
 - b) współczynnik wypełnienia prądu odbiornika δ na minimalny większy od 0 (czyli $1/A$).
3. W celu sprawdzenia poprawności działania układu i wyregulowania nastaw oscyloskopu:
 - a) chwilowo zmienić odbiornik na żarówkę;

Zachować odpowiednią ostrożność – układ jest pod napięciem sieciowym!

- b) włączyć sterowanie obwodu mocy przyciskiem ON – żarówka powinna zacząć migać;
- c) ustawić położenie poziomu zera obu kanałów oscyloskopu na środku ekranu;

W tym celu należy ustawić sprzężenie danego kanału na GND, wyregulować położenie przebiegu pokrętkiem POSITION i powrócić do sprzężenia DC.

Ustawienia poziomu zera nie należy zmieniać podczas pomiarów!

- d) doprowadzić do wyzwiania oscyloskopu sygnałem SYNCHR na początku paczki impulsów:
 - ustawić zewnętrzne źródło wyzwiania (EXT) – przełącznik SOURCE;
 - ustawić normalny tryb wyzwiania (NORM) – przełącznik MODE;
 - ustalić moment wyzwiania regulując poziom wyzwiania – pokrętko LEVEL (nie HOLD OFF);
 - aby upewnić się, że wyzwianie następuje na początku paczki impulsów, przebieg można przesunąć nieco w prawo przyciskami READOUT/CURSOR;
 - e) ustawić wzmocnienia obu kanałów oscyloskopu tak, aby przebiegi zajmowały jak największą część ekranu;
 - f) ustawić podstawę czasu oscyloskopu tak, aby na ekranie było widać jeden pełen okres impulsowania T_i ;
 - g) wyłączyć sterowanie obwodu mocy przyciskiem OFF, ponownie obciążyć sterownik grzałką i włączyć sterowanie obwodu mocy;
 - h) w razie potrzeby dostosować wzmocnienie kanału, do którego przyłączono wyjście przetwornika prąd/napięcie.
4. Ustawić $A = 50$ oraz współczynnik wypełnienia δ na ok. 0,25 i stwierdzić, że z powodu sposobu sterowania nie można dokonać pewnego odczytu wartości prądu i mocy z multimetru.
 5. Powrócić do wartości A i δ ustawionych w punkcie 2.

Przed przystąpieniem do dalszych pomiarów należy koniecznie zanotować współczynnik przetwarzania przetwornika prąd/napięcie oraz współczynnik tłumienia sondy napięciowej. Zanotowane współczynniki zostaną uwzględnione dopiero przy przetwarzaniu danych w arkuszu kalkulacyjnym. W trakcie pomiarów nie należy zmieniać współczynnika przetwarzania przetwornika LEM.

6. Korzystając z programu Osc, pobrać przebiegi napięcia na odbiorniku u_o i napięcia wyjściowego przetwornika LEM u_{LEM} z oscyloskopu do komputera.
7. Za pomocą kursorów zaznaczyć pełen okres impulsowania T_i (nie okres sieci T_s !, patrz paragraf 2.1) Należy przy tym skorzystać z informacji o różnicy położenia kursorów wyświetlanej w okienku w

rogu (znany jest okres sieci oraz liczba okresów w sieci przypadająca na okres impulsowania). Kursory włącza się przyciskiem *Włącz kursor*. Kursory pojawiają się na lewej i prawej krawędzi wykresu, skąd należy je przeciągnąć myszą w odpowiednie położenie.

8. Dokonać dyskretnej transformaty Fouriera pobranych przebiegów za pomocą przycisku DFT (*Analiza Fouriera*).
9. Zapisać wynik do pliku tekstowego w formacie CSV (menu *Plik ▶ Eksportuj*).
10. Wyłączyć funkcję DFT (przycisk *Wykres oryginalny*).
11. Powtórzyć punkty 6–10, zmieniając wartość współczynnika wypełnienia od 0 do 1, z pominięciem wartości skrajnych. W sumie należy uzyskać co najmniej 5 punktów pomiarowych.
12. Ustawić $\delta = 1$ i wykonać punkty 6–10.
13. Zanotować dla tego przypadku wskazania mierników: wartości skutecznej prądu, mocy czynnej odbiornika i wartości skutecznej napięcia na odbiorniku. Tak jak wspomniano, zapisane wartości posłużą później do sprawdzenia poprawności obliczeń.
14. Wyłączyć sterowanie obwodu mocy (przycisk OFF). Wyłączyć zasilanie sterownika (przełącznik SIEĆ). Odłączyć transformator od sieci.

4. Opracowanie i analiza wyników

4.1. Charakterystyki sterowania

Na podstawie zarejestrowanych wyników należy wyznaczyć charakterystyki sterownika zgodnie z poniższymi punktami.

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 bardzo podobna do programu Microsoft Excel. Aby bezproblemowo odczytać arkusz w programie Microsoft Excel, należy na koniec zapisać go w formacie XLS (menu *Plik, Zapisz jako*).

1. Dla każdej wartości współczynnika wypełnienia δ wyznaczyć:
 - a) wartość skuteczną prądu odbiornika I ,
 - b) moc czynną odbiornika P_o ,
 - c) tylko dla $\delta = 1$ – wartość skuteczną napięcia sieci U przyjmując, że jest ona równa napięciu na odbiorniku U_o przy pełnymysterowaniu.

W celu uzyskania pożądaných wyników, należy postępować ściśle zgodnie z instrukcjami podanymi w paragrafie 4.2.

2. Na podstawie wartości wyznaczonych w punkcie 1 obliczyć dla każdej wartości δ :
 - a) względną wartość skuteczną prądu I_r ,
 - b) wartość względną mocy czynnej odbiornika P_{or} ,
 - c) moc pozorną wejściową S ,
 - d) współczynnik mocy układu λ .
3. Obliczyć charakterystyki teoretyczne $I_r(\delta)$, $P_{or}(\delta)$ i $\lambda(\delta)$ na podstawie wzorów podanych w paragrafie 2.2.

Wskazówka. Funkcje trygonometryczne programów Microsoft Excel i OpenOffice operują na wartościach w radianach. Stopnie na radiany można przeliczyć za pomocą funkcji *RADIANY()* [ang. *RADIANS()*]. Dokładną wartość liczby π zwraca funkcja *PI()*.

- Wykonać trzy wykresy charakterystyk: $I_r(\delta)$, $P_{or}(\delta)$ i $\lambda(\delta)$, na każdym z nich umieszczając dwie krzywe: doświadczalną i teoretyczną.

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

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.

- Przeanalizować uzyskane wyniki, porównać z przewidywaniami teoretycznymi.

4.2. Wyznaczanie charakterystyk sterownika za pomocą arkusza kalkulacyjnego w oparciu o wyniki DFT

Naszym zadaniem jest obliczenie dla każdej wartości δ wielkości charakteryzujących pracę badanego układu, zgodnie z punktem 4.1:

- wartości skutecznej prądu I ,
- mocy czynnej odbiornika P_o ,
- oraz dla $\delta = 1$ wartości skutecznej napięcia na odbiorniku U_o .

Dla $\delta = 1$ dysponujemy danymi porównawczymi z multimetru, a więc logicznie będzie zacząć obliczenia od tego właśnie przypadku.

Import danych

1. Importujemy wyniki DFT zapisane programem Osc; jako pierwszy – plik z danymi dla $\delta = 1$.
 - a) Microsoft Excel. Jeżeli w używanej wersji programu dostępna jest funkcja *Dane* ▶ *Pobierz dane zewnętrzne* ▶ *Importuj plik tekstowy*, korzystamy z tej funkcji. W przeciwnym razie korzystamy z komendy *Plik* ▶ *Otwórz*.
W razie potrzeby (jeżeli inaczej dane nie importują się poprawnie), należy wybrać znak średnika jako separator kolumn, a przecinek jako separator części dziesiętnej.
 - b) OpenOffice. Otwieramy plik komendą *Plik* ▶ *Otwórz* wybierając z listy typ pliku „Tekst CSV”.
W razie potrzeby (jeżeli inaczej dane nie importują się poprawnie), należy wybrać znak średnika jako separator kolumn. Jeżeli z powodu ustawień systemowych znak przecinka nie jest rozpoznawany jako separator części dziesiętnej, to po otwarciu pliku należy zamienić przecinki na kropki korzystając z funkcji *Edycja* ▶ *Znajdź i zamień*.
2. Zapisujemy skoroszyt jako dokument arkusza kalkulacyjnego – Microsoft Excel (XLS) lub OpenOffice (ODS).
3. Przeanalizujemy zawartość otwartego arkusza.

Jak widać, program Osc zapisał dane (wyniki DFT) dla każdego z dwóch kanałów w czterech kolumnach. Każdemu kanałowi odpowiada N zespolonych współczynników szeregu Fouriera X_n ($n = 0, 1, 2, \dots, N-1$), które powstały w wyniku wykonania DFT odpowiedniego przebiegu czasowego oraz obciążenia połowy z nich i przeskalowania pozostałych zgodnie z teorią. Poszczególne kolumny zawierają:

- kolumna a_n – części rzeczywiste współczynników, $a_n = \text{Re } X_n$;
- kolumna b_n – części urojone współczynników, $b_n = \text{Im } X_n$;
- kolumna h_n – moduły współczynników $h_n = |X_n|$
(dla składowej stałej $n = 0$ jest to wartość tej składowej X_n , a dla składowych harmonicznym $n \geq 1$ są to amplitudy tych składowych $X_{n,m}$);
- kolumna ϕ_n (f_i) – argumenty współczynników $\phi_n = \arg X_n$
(dla składowej stałej $n = 0$ jest to 0, a dla składowych harmonicznym $n \geq 1$ są to kąty fazowe tych składowych ϕ_n);
- kolumna $nr \text{ harm}$ – numery harmonicznym n , przy czym 0 oznacza składową stałą.

Numer 1 oznacza zawsze składową podstawową z punktu widzenia transformaty, a więc o częstotliwości $f(1) = 1/T_{\text{DFT}}$, gdzie T_{DFT} jest odcinkiem czasu zaznaczonym w punkcie 3.2.7. A więc w naszym przypadku nie będzie to składowa podstawowa napięcia sieci, gdyż zazaczyliśmy odcinek o długości T_i , w którym mieści się A okresów sieci T_s . Okresowe zmiany napięcia sieci odbywają się z częstotliwością A razy większą niż częstotliwość pracy sterownika (częstotliwość impulsowania); dlatego składowa podstawowa napięcia sieci będzie widziana przez komputer jako harmoniczna o numerze A .

Do dalszych obliczeń wykorzystamy zapis liczby zespolonej moduł–kąt, a więc kolumny h_n i ϕ_n :

$$X_n = |X_n| e^{j \arg X_n} = h_n e^{j \phi_n}. \quad (26)$$

Dobra rada: Kolumny w arkuszach warto podpisywać w jednym z górnych wierszy, uwzględniając jednostki miary. Inaczej łatwo się będzie pogubić. Dotyczy to również kolumn, które zostaną dodane później.

Uwzględnienie współczynników wynikających z konstrukcji układu pomiarowego

- Przetwarzamy dane z programu Osc (u_{LEM} i u_o) tak, aby odpowiadały rzeczywistym poziomom prądu i i napięcia u_o , przez uwzględnienie współczynnika przetwarzania przetwornika LEM i współczynnika tłumienia sondy napięciowej. W tym celu należy dodać dwa razy po dwie nowe kolumny: h_{n1}' , $f_{i_{n1}}'$, h_{n2}' , $f_{i_{n2}}'$ w które wpisujemy takie formuły, za pomocą których wyliczą się wartości rzeczywiste prądu i napięcia na podstawie zarejestrowanych oscyloskopem.

Nowe kolumny z obliczeniami najlepiej dodawać po prawej stronie wszystkich zaimportowanych danych (nie wstawiać nowych kolumn między już istniejące). W ten sposób łatwo będzie skopiować wprowadzone formuły do pozostałych arkuszy, bez konieczności dodawania lub kasowania kolumn w tych arkuszach.

Mnożenie przez stałe i/lub dodawanie do siebie próbek przebiegów w dziedzinie czasu jest równoważne mnożeniu przez stałe i/lub dodawaniu współczynników przekształcenia Fouriera tych przebiegów. Własność ta nazywa się liniowością przekształcenia. Dzięki temu mnożniki wynikające z obecności przetwornika LEM i sondy napięciowej można uwzględnić dopiero operując na małej liczbie próbek DFT – nie trzeba tego robić na dużej (rzędu 1000) liczbie próbek w funkcji czasu.

Chodzi tu o mnożenie i dodawanie *zespolonych* współczynników przekształcenia Fouriera. W przypadku mnożenia liczby zespolonej przez stałą oznacza to wymnożenie przez tę stałą modułu liczby i pozostawienie argumentu bez zmian:

$$a \cdot X_n = a \cdot (h_n e^{j \phi_n}) = (a \cdot h_n) e^{j \phi_n}. \quad (27)$$

W związku z powyższym w każdej z dodanych kolumn h_n' należy wprowadzić formułę mnożącą wartość z oryginalnej kolumny h_n przemnożoną przez odpowiedni współczynnik. Natomiast w każdej z dodanych kolumn f_{i_n}' należy wprowadzić formułę przepisującą oryginalną wartość f_{i_n} bez zmian.

Prąd skuteczny

- Obliczamy wartość skuteczną prądu odbiornika I . Posłużymy się w tym celu wzorem Parsewala:

$$I = \sqrt{I_{(0)}^2 + \sum_{n=1}^{N-1} I_{(n)}^2}, \quad (28)$$

gdzie $I_{(0)}$ jest składową stałą prądu i (równą amplitudzie h_0 – zob. punkt 3), zaś $I_{(n)}$ są wartościami skutecznymi poszczególnych harmonicznymi.

Najpierw należy dodać nową kolumnę i za pomocą odpowiedniej formuły obliczyć w niej wartości $I_{(n)}$ ($\neq h_n$), poczynając od $n = 1$, ze wzoru na wartość skuteczną sinusoidy o znanej amplitudzie $I_{(n)m}$ (równej h_n – zob. punkt 3).

Następnie w kolejnej kolumnie należy obliczyć kwadraty wartości skutecznych $I_{(n)}^2$, a dla $n = 0$ – kwadrat składowej stałej $I_{(0)}^2$.

W osobnej komórce – zgodnie ze wzorem (28) – należy obliczyć sumę wartości z ostatnio wypełnionej kolumny [funkcja `SUMA()`, ang. `SUM()`] i wyciągnąć z niej pierwiastek [funkcja `PIERWIASTEK()`, ang. `SQRT()`].

Należy pamiętać, aby korzystać z kolumn przemnożonych przez współczynniki układu pomiarowego (h_n' nie h_n).

6. Dla przypadku $\delta = 1$ sprawdzamy, czy wartość obliczona zgadza się z odczytaną z multimetru (oczywiście w przybliżeniu). Jeżeli nie, to musimy zlokalizować błąd w obliczeniach.

Moc czynna

7. Do obliczenia mocy czynnej wydzielanej w odbiorniku P_o wykorzystamy własność mówiącą, że całkowita moc czynna jest równa sumie mocy czynnych związanych ze składową stałą i poszczególnymi harmonicznymi:

$$P_o = P_{o(0)} + \sum_{n=1}^{N-1} P_{o(n)}. \quad (29)$$

W powyższym wzorze $P_{o(0)}$ oznacza moc związaną ze składową stałą. Jest ona oczywiście równa iloczynowi składowych stałych napięcia na odbiorniku i prądu odbiornika:

$$P_{o(0)} = U_{o(0)} I_{o(0)}, \quad (30)$$

czyli iloczynowi amplitud współczynników DFT h_o .

Natomiast moc czynną $P_{o(n)}$ związaną z n -tą harmoniczną można wyrazić znanym wzorem:

$$P_{o(n)} = U_{o(n)} I_{o(n)} \cos \varphi_{o(n)}, \quad (31)$$

gdzie: $U_{o(n)}$ i $I_{o(n)}$ – wartości skuteczne n -tej harmonicznego prądu odbiornika i napięcia na odbiorniku (patrz punkt 5); $\varphi_{o(n)}$ – przesunięcie fazowe n -tej harmonicznego napięcia na odbiorniku u_o względem n -tej harmonicznego prądu odbiornika i .

W nowej kolumnie należy obliczyć za pomocą odpowiednich formuł wartości $P_{o(0)}$ i $P_{o(n)}$, a następnie w osobnej komórce obliczyć sumę tych wartości.

Drugi czynnik we wzorze (31) powinien już zostać obliczony dla każdego n w punkcie 5, przy obliczaniu wartości skutecznej prądu I .

Czynnik pierwszy we wzorze (31) można uzyskać analogicznie jak drugi, obliczając wartość skuteczną napięcia na odbiorniku U_o (tę wartość i tak musimy obliczyć zgodnie z punktem 4.1) – do czego niezbędne będą wartości $U_{o(n)}$:

$$U_o = \sqrt{U_{o(0)}^2 + \sum_{n=1}^{N-1} U_{o(n)}^2}. \quad (32)$$

Trzeci czynnik to kosinus różnicy kątów fazowych napięcia i prądu danej harmonicznego:

$$\varphi_{o(n)} = \varphi_{u_o(n)} - \varphi_{i(n)}, \quad (33)$$

przy czym kąty fazowe – argumenty współczynników DFT ϕ_n – zawierają kolumny $f_{i_{n1}}$ i $f_{i_{n2}}$.

8. Dla przypadku $\delta = 1$ sprawdzamy, czy obliczona wartość skuteczna napięcia na odbiorniku i moc czynna odbiornika zgadzają się (w przybliżeniu) z zapisanymi wskazaniem multimetru. Zwróćmy uwagę, że dla rozpatrywanego przypadku tyrystor stale przewodzi. Ponieważ zaś spadek napięcia na tyrystorze u_T jest niewielki, można przyjąć, że $u_o \approx u$; stąd również obliczona wartość U_o powinna być w przybliżeniu równa zmierzonemu napięciu skutecznemu sieci U .

Jeżeli wartości nie zgadzają się ze sobą, to szukamy błędu (jeśli poprzednio wartość skuteczna prądu była zgodna z rzeczywistością, to błąd najpewniej wynika z operacji dokonanych na napięciach lub kątach fazowych).

Obliczenia dla $\delta \neq 1$

Aby wykonać obliczenia dla pozostałych wartości δ wystarczy skopiować formuły wprowadzone w arkuszu z danymi dla $\delta = 1$.

9. Nie zamykając arkusza z danymi dla $\delta = 1$ otwieramy kolejny plik z danymi (patrz „Import danych”).
10. W arkuszu z danymi dla $\delta = 1$ zaznaczamy wszystkie dodane kolumny i kopiujemy do schowka.
11. Przechodzimy do nowo otwartego pliku z danymi i ustawiamy zaznaczenie w pierwszym wierszu pierwszej ze skopiowanych kolumn. Wklejamy skopiowane kolumny ze schowka.
12. Wartości I oraz P_o powinny obliczyć się automatycznie; wartość U_o nie jest potrzebna dla współczynników wypełnienia innych niż 1.

5. Oczekiwana zawartość sprawozdania

Sprawozdanie powinno zawierać wyniki uzyskane w toku ćwiczenia zgodnie z instrukcją, w szczególności:

- wartości obliczone w punktach 4.1, 4.2 i 4.3 zebrane w tabeli, wraz z zastosowanymi wzorami i przykładami obliczeń;
- charakterystyki uzyskane w punkcie 4.4;
- analizę wyników i wnioski.

Do sprawozdania należy dołączyć utworzony skoroszyt arkusza kalkulacyjnego z obliczeniami, lub wydruk jednego z arkuszy z obliczeniami wraz z opisem wprowadzonych formuł.

W katalogu sieciowym zespołu należy pozostawić pliki z wynikami pobranymi z oscyloskopu.

6. Literatura

- [1] Nowak M., Barlik R.: Poradnik inżyniera energoelektronika. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1998.
- [2] Luciński J.: Układy z tyrystorami dwukierunkowymi. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1986.