



PODSTAWY ENERGOELEKTRONIKI
LABORATORIUM

Ćwiczenie 2

Falownik rezonansowy szeregowy

W laboratorium należy wykonać pomiary, o których mowa w paragrafie 3.2 instrukcji. 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. Zasada działania falownika szeregowego – układ podstawowy	4
Opis działania układu	4
Parametry obwodu rezonansowego	6
Czas dysponowany na wyłączenie.....	7
2.3. Układ zmodyfikowany falownika szeregowego	7
2.4. Współczynnik zawartości harmonicznyc	10
3. Badanie układu	12
3.1. Układ pomiarowy	12
3.2. Program badań.....	13
3.3. Opracowanie wyników	15
Wpływ parametrów obwodu rezonansowego	15
Wpływ częstotliwości pracy falownika	15
4. Oczekiwana zawartość sprawozdania	17
5. Literatura.....	17

1. Wstęp

Celem ćwiczenia jest poznanie zasady działania jednego z typowych układów przekształtnikowych AC/DC (falowników). Przykładowy układ stanowi niezależny falownik rezonansowy szeregowy, w którym rolę kluczy pełnią półsterowalne przyrządy półprzewodnikowe mocy – tyrystory. Badania układu dotyczą wpływu elementów obwodu rezonansowego i parametrów sterowania na pracę układu jako całości oraz na warunki pracy tyrystorów. Na podstawie wyników analizy widmowej dokonywana jest ocena jakości pracy układu w zależności od parametrów sterowania.

Niniejsze ćwiczenie nie wyczerpuje zagadnienia przekształtników DC/AC. Istnieją inne rozwiązania falowników rezonansowych, jak również falowniki inne niż rezonansowe (np. falowniki impulsowe). Ich szczegółowa analiza wykracza jednak poza zakres niniejszego laboratorium.

2. Podstawy teoretyczne

2.1. Wprowadzenie

Falowniki szeregowe są urządzeniami służącymi do przekształcania napięcia stałego na prąd przemienny. Przekształtniki te nazywane są falownikami niezależnymi i, w odróżnieniu od falowników sieciowzbudnych (zależnych), nie mają połączenia od strony wyjścia ze sztywną siecią energetyczną.

Falowniki szeregowe znajdują zastosowanie m.in. w grzejnictwie indukcyjnym, technice ultradźwiękowej, napędach elektrycznych, układach przetwarzania napięć itp.

2.2. Zasada działania falownika szeregowego – układ podstawowy

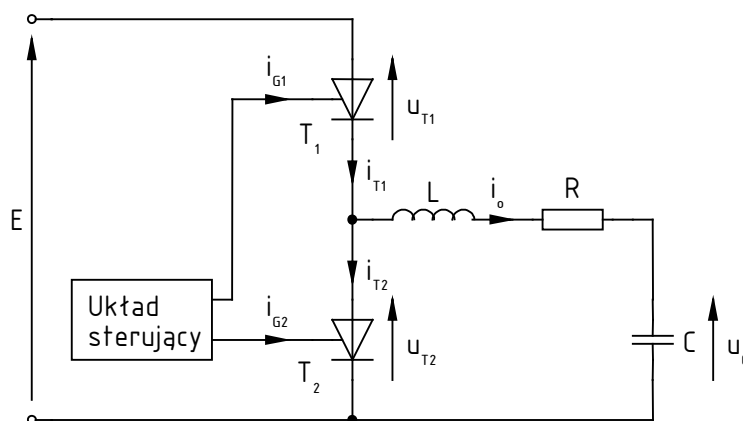
Opis działania układu

Podstawowy układ szeregowego falownika rezonansowego przedstawiony jest na rys. 1. W układzie tym odbiornik (przyjmijmy, że reprezentuje go opornik R) wchodzi w skład szeregowego obwodu rezonansowego. Warunkiem poprawnej pracy falownika jest, aby obwód RLC był obwodem drgającym, co sprowadza się do warunku

$$2\sqrt{\frac{L}{C}} > R. \quad (1)$$

Zasadę pracy układu obrazują podstawowe przebiegi przedstawione na rys. 2. Przyjmijmy, że w chwili $t = 0$ oba tyrystory są wyłączone, a na kondensatorze odłożone jest pewne ujemne napięcie $u_c = -U_x$. Wobec tego w układzie nie płynie żaden prąd i napięcie na tyrystorze T_2 jest również równe $-U_x$, w związku z czym napięcie na tyrystorze T_1

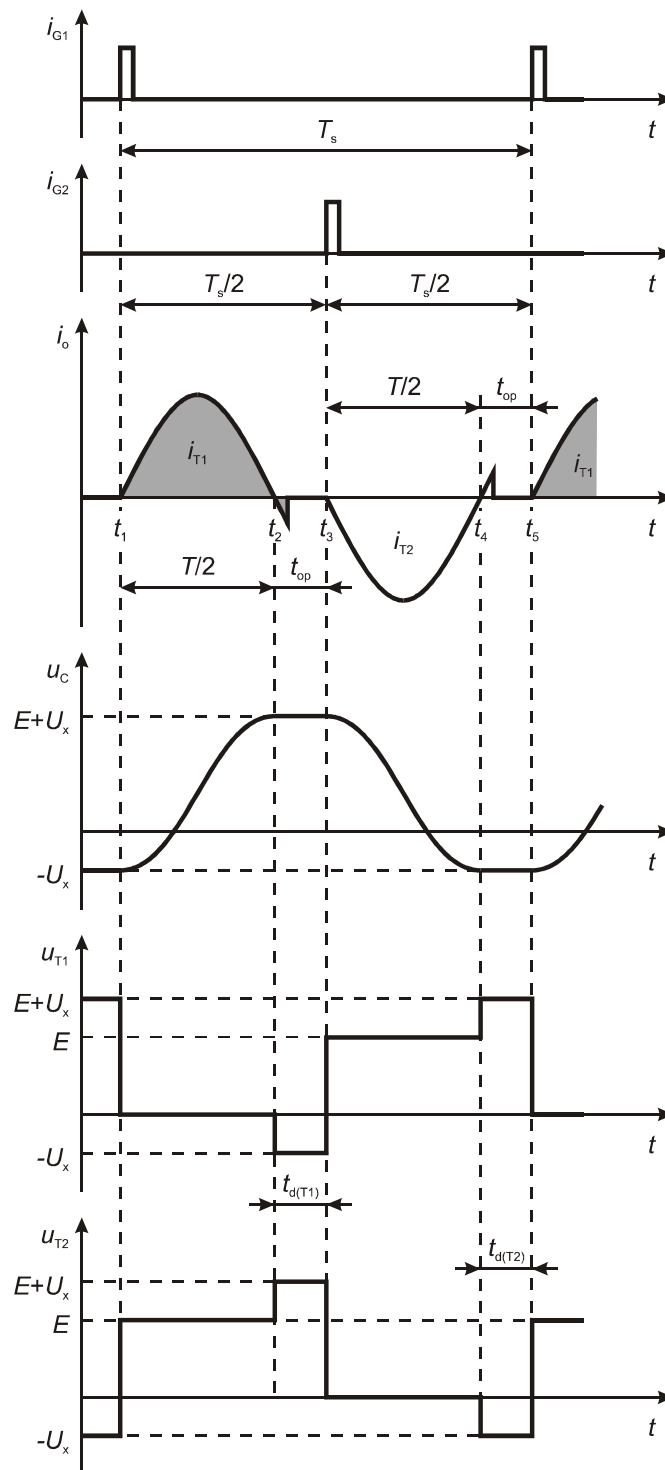
$$u_{T1} = E - u_{T2} = E + U_x. \quad (2)$$



Rys. 1. Układ podstawowy szeregowego falownika rezonansowego

W chwili t_1 układ sterujący generuje impuls bramkowy i_{G1} dla tyrystora T_1 , co powoduje jego załączenie i przepływ prądu odbiornika $i_o = i_{T1}$ w obwodzie E-T₁-L-R-C. Pod warunkiem spełnienia nierówności (1), prąd ma kształt sinusoidy, a jego przepływowi

towarzyszy przeładowanie rezonansowe kondensatora C do – jak można obliczyć – napięcia $E+U_x$. Jeżeli przyjmiemy, że napięcie na przewodzącym tyrystorze T_1 wynosi 0, na drugim tyrystorze odkłada się pełne napięcie zasilania E .



Rys. 2. Przebiegi napięć i prądów w układzie z rys. 1

Ogólnie rzecz biorąc, w szeregowym obwodzie RLC o charakterze oscylacyjnym prąd ma kształt sinusoidy o malejącej amplitudzie. Jednak w przybliżeniu w chwili t_2 – przejścia prądu i_o przez zero – tyrystor T_1 wyłącza się, co wynika z zasady jego działania, i w układzie przestaje płynąć prąd. Jeżeli przez T oznaczymy okres drgań własnych obwodu RLC, to czas przepływu prądu odbiornika wynosi $T/2$, gdyż odpowiada on jedynie połowie sinusoidy. Po

ustaniu przepływu prądu kondensator C podtrzymuje napięcie $E+U_x$, które występuje również na tyrystorze T₂. Napięcie u_{T1} wynosi więc $E-u_{T2} = -U_x$.

Układ sterowania działa z pewną częstotliwością $f_s = 1/T_s$. Po upływie połowy okresu sterowania T_s , w chwili t_3 generowany jest impuls i_{G2} wyzwalający tyrystor T₂. Prąd $i_o = -i_{T2}$ płynie teraz w obwodzie C-R-L-T₂. Podobnie jak poprzednio ma on kształt połówki sinusoidy, jednak płynie w przeciwnym kierunku. Czas trwania ujemnej połówki prądu wynosi oczywiście $T/2$, po którym to czasie – w chwili t_4 – tyrystor T₂ wyłącza się. Z przepływem prądu związane jest przeładowanie kondensatora do napięcia $-U_x$. Napięcie to jest podtrzymywane do chwili t_5 . W tym czasie $u_{T2} = -U_x$, $u_{T1} = E+U_x$.

W chwili t_5 , po upływie czasu $T_s/2$ od chwili t_3 i T_s od chwili t_1 , układ sterujący generuje kolejny impuls bramkowy dla tyrystora T₁ i cały cykl zaczyna się od początku. Wynikiem działania układu jest więc przepływ prądu odbiornika i_o na przemian dodatnimi i ujemnymi połówkami sinusoidy. Pomiedzy kolejnymi połówkami sinusoidy występują przerwy o czasie trwania

$$t_{op} = \frac{T_s}{2} - \frac{T}{2}, \quad (3)$$

k który nazywany jest czasem opóźnienia przerzutu.

Parametry obwodu rezonansowego

Obwód drgający RLC można opisać za pomocą dwóch podstawowych parametrów:

- pulsacji drgań własnych nietłumionych

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4)$$

- oraz współczynnika tłumienia

$$\alpha = \frac{R}{2L}. \quad (5)$$

Obwód może też być scharakteryzowany przez:

- względny współczynnik tłumienia

$$\alpha_w = \frac{\alpha}{\omega_0} = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}, \quad (6)$$

- pulsację drgań własnych tłumionych

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} = \omega_0 \sqrt{1 - \alpha_w^2} \quad (7)$$

- oraz dobroć

$$Q = \frac{\omega L}{R} = \frac{\sqrt{1 - \alpha_w^2}}{2\alpha_w}. \quad (8)$$

Przeprowadzając odpowiednie obliczenia, można charakterystyczne poziomy napięć w układzie uzależnić od parametrów obwodu rezonansowego:

$$U_x = E \frac{\exp\left(-\pi\alpha_w / \sqrt{1-\alpha_w^2}\right)}{1 - \exp\left(-\pi\alpha_w / \sqrt{1-\alpha_w^2}\right)}, \quad (9)$$

$$E + U_x = \frac{E}{\exp\left(-\pi\alpha_w / \sqrt{1-\alpha_w^2}\right)}. \quad (10)$$

Stąd

$$\frac{U_x}{E + U_x} = \exp\left(-\pi\alpha_w / \sqrt{1-\alpha_w^2}\right). \quad (11)$$

Czas dysponowany na wyłączenie

Aby układ pracował poprawnie, na początku każdego półokresu tylko jeden z tyrystorów powinien zacząć przewodzić, natomiast drugi powinien pozostać w stanie blokowania. Jak wiadomo, tyrystory charakteryzuje czas odzyskiwania zdolności zaworowych t_q . Jest to minimalny czas, który musi upłynąć od wyłączenia tyrystora, aby można było bezpiecznie ponownie podać na niego napięcie dodatnie. Jeżeli napięcie zostanie podane zbyt wcześnie, tyrystor załączy się mimo braku impulsu bramkowego.

Czas, który w konkretnym układzie upływa od wyłączenia tyrystora do ponownego podania dodatniego napięcia między anodą i katodą, nazywamy czasem dysponowanym na wyłączenie t_d . Warunkiem poprawnej pracy układu jest więc takie działanie obwodu sterowania, aby

$$t_d \geq t_q. \quad (12)$$

Jak widać na rys. 2, w omawianym układzie falownika czas dysponowany na wyłączenie tyrystora t_d jest równy czasowi opóźnienia przerzutu t_{op} . W tym czasie napięcie na tyrystorze wyłączanym jest ujemne, natomiast po jego upływie na tyrystor ten podawane jest dodatnie napięcie o wartości E . Warunek (12) ma więc postać

$$t_{op} = \frac{T_s}{2} - \frac{T}{2} \geq t_q, \quad (13)$$

stąd

$$T_s \geq T + 2t_q. \quad (14)$$

Tak więc $T_s > T$, czyli $f_s < f$ – częstotliwość pracy układu (częstotliwość sterowania) musi być mniejsza niż częstotliwość drgań własnych obwodu RLC. To ograniczenie częstotliwości pracy od góry jest podstawową wadą rozważanego układu.

2.3. Układ zmodyfikowany falownika szeregowego

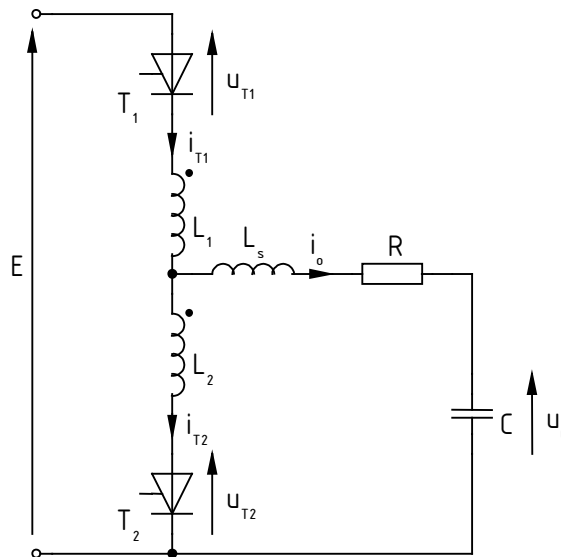
Wady układu opisanego w par. 2.2 można w znacznym stopniu usunąć, stosując cewki sprzężone o równych indukcyjnościach $L_1 = L_2$ (rys. 3).

Rozważmy działanie tego układu, rozpoczynając w chwili, gdy tyrystor T_1 przestaje przewodzić, a kondensator C jest naładowany do napięcia $E+U_x$ (patrz rys. 4a). Proces ładowania kondensatora jest analogiczny do opisanego w poprzednim paragrafie. Po załączeniu tyrystora T_2 , prąd odbiornika płynie przez cewkę L_2 indukując na niej pewne napięcie. Dzięki wzajemnemu sprzężeniu L_1 i L_2 , napięcie powstaje również na cewce L_1 , zwiększając napięcie wsteczne przyłożone do tyrystora T_1 , a jednocześnie zwiększając czas dysponowany na wyłączenie o pewną wartość t_x . W związku z tym warunek (12) można zapisać jako

$$t_d = t_{op} + t_x \geq t_q, \quad (15)$$

skąd

$$t_{op} \geq t_q - t_x. \quad (16)$$



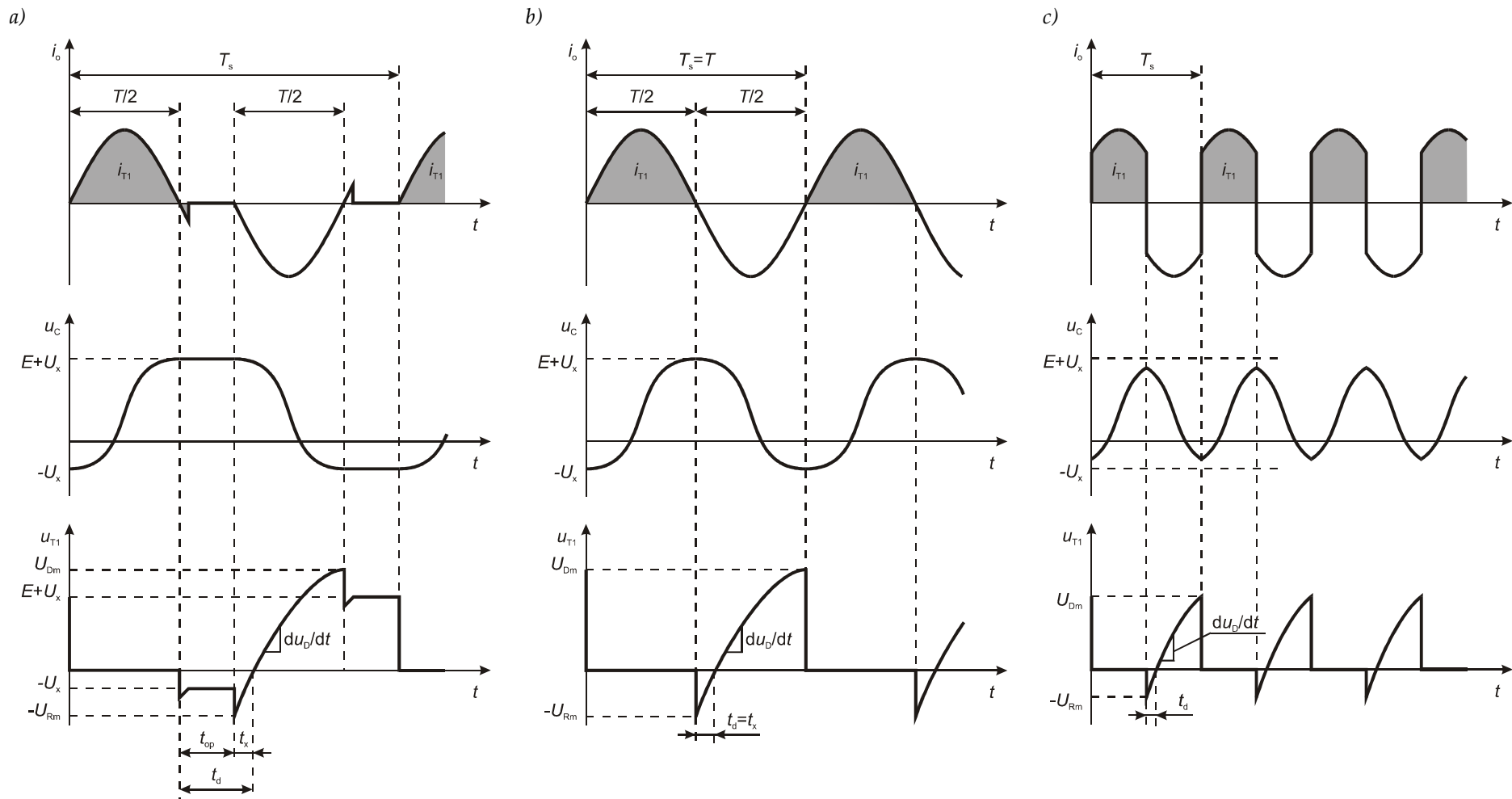
Rys. 3. Schemat zmodyfikowanego układu falownika szeregowego.

Można więc włączyć jeden tyrystor nim drugi odzyska właściwości blokujące, dokładnie rzecz biorąc – o t_x wcześniej. Czas opóźnienia przerzutu wymagany dla poprawnej pracy układu, a więc zachowania $t_d \geq t_q$, jest mniejszy niż w układzie podstawowym. Tym samym rozważany układ może pracować z częstotliwością sterowania:

- $f_s < f$ – największy czas dysponowany t_d , duże zniekształcenia prądu odbiornika (rys. 4a);
- $f_s = f$ – przypadek dopasowania, najkorzystniejszy kształt prądu odbiornika (rys. 4b);
- $f_s > f$ – przebieg prądu prawie prostokątny, duże stromości prądu i napięcia oraz mały czas dysponowany t_d (rys. 4c).

Oprócz czasu dysponowanego na wyłączenie t_d , warunki pracy tyristorów określają też inne parametry, zaznaczone na rys. 4:

- maksymalne napięcie blokowania U_{Dm} – nie może przekraczać napięcia przełączania tyrystora, w przeciwnym razie tyrystor będzie załączając się niezależnie od impulsów bramkowych;

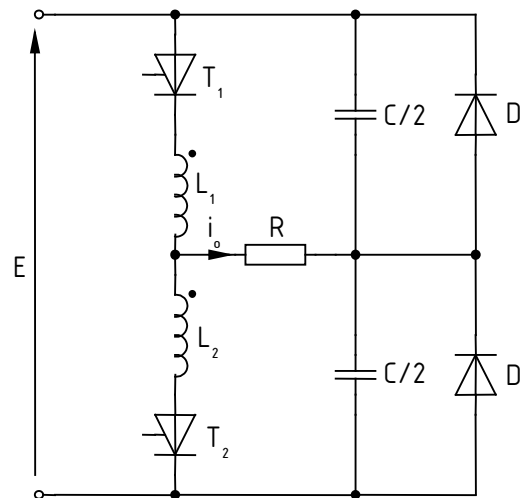


Rys. 4. Typowe przebiegi w układzie zmodyfikowanym falownika szeregowego: a) $f_s < f$; b) $f_s = f$; c) $f_s > f$

- maksymalne napięcie wsteczne U_{Rm} – jeżeli przekroczy napięcie przebicia tyrystora, przyrząd ulegnie zniszczeniu;
- maksymalna stromość narastania napięcia blokowania $(du_D/dt)_m$ – przekroczenie wartości krytycznej dla tyrystora ma taki skutek jak zbyt mały czas dysponowany na wyłączenie.

W rozpatrywanym układzie stromość du_D/dt jest ograniczona w stosunku do układu podstawowego, w którym napięcie E podawane było na tyrystor natychmiastowo. Natomiast w układzie zmodyfikowanym napięcie na wyłączonym tyrystorze narasta powoli, gdyż stanowi sumę napięcia zasilającego E i spadków napięć na cewkach L_1 i L_2 , będących funkcją sinusoidalnie zmiennego prądu odbiornika i_o . Jest to dodatkowa – oprócz zwiększenia czasu dysponowanego na wyłączenie – zaleta tego układu z punktu widzenia warunków pracy kluczy półprzewodnikowych.

Istnieje szereg odmian układowych szeregowego falownika rezonansowego. Jedna z nich pokazana jest na rys. 5. Układy praktyczne falowników zostały obszernie przedstawione w literaturze.



Rys. 5. Jedna z wersji układu falownika szeregowego

2.4. Współczynnik zawartości harmonicznych

Ogólnie rzecz biorąc, zadaniem falowników – jako przekształtników DC/AC – jest generacja przemiennego sygnału sinusoidalnego. W takim przypadku, aby ocenić jakość działania układu, należy dysponować jakąś miarą podobieństwa generowanego przebiegu (w rozważanym układzie jest to prąd odbiornika i_o) do idealnej sinusoidy. Takim parametrem jest współczynnik zawartości harmonicznych d_h (ang. *total harmonic distortion*, THD). Inne spotykane nazwy tego współczynnika to współczynnik zniekształceń harmonicznych lub współczynnik odkształcenia harmonicznych.

Współczynnik zawartości harmonicznych definiuje się z reguły jako stosunek wartości skutecznej obliczonej (ze wzoru Parsevala) z pominięciem pierwszej harmonicznej do wartości skutecznej pierwszej harmonicznej:

$$d_h = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} X_{(k)}^2}}{X_{(1)}}, \quad (17)$$

gdzie $X_{(k)}$ oznacza wartość skuteczną k -tej harmonicznej danego sygnału $x(t)$. Tę definicję przyjmują m. in. obowiązujące normy dotyczące jakości zasilania oraz oddziaływania odbiorników na sieć zasilającą.

W praktyce, gdy korzystamy z cyfrowych przyrządów pomiarowych, znane są wartości skuteczne jedynie pewnej skończonej liczby harmonicznych N . Zachodzi wówczas konieczność stosowania wzoru przybliżonego:

$$d_h \approx \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^N X_{(k)}^2}}{X_{(1)}}. \quad (18)$$

Przyjmuje się, że dla typowych przebiegów wystarczającą dokładność osiąga się dla $N = 40\text{--}50$.

Jak nietrudno zauważyć, dla sinusoidy $d_h = 0$, gdyż zawiera ona tylko harmoniczną podstawową (pierwszą). Natomiast im większy współczynnik zawartości harmonicznych, tym większe odkształcenie przebiegu od idealnej sinusoidy.

3. Badanie układu

3.1. Układ pomiarowy

Układ pomiarowy pozwala na badanie falownika szeregowego w układzie symetrycznym (jak na rys. 5) lub niesymetrycznym (jak na rys. 3 bez cewki L_s).

Przełączniki umożliwiają zmianę:

- wartości indukcyjności obwodu rezonansowego L ($= L_1 = L_2$),
- wartości rezystancji odbiornika R ,
- konfiguracji (A – niesymetryczna, B – symetryczna).

Układ jest tak skonstruowany, że niezależnie od konfiguracji wypadkowa pojemność C w szeregowym obwodzie rezonansowym wynosi $3,75 \mu\text{F}$.

Do oscyloskopu należy podłączyć:

- do jednego z kanałów – sygnał z wyjścia układu I (pomiar prądu) za pośrednictwem zwykłego kabla koncentrycznego;
- do drugiego kanału – sygnał z wyjścia U (pomiar napięcia) przez sondę tłumiącą 10:1, przy czym masę sondy należy pozostawić nie podłączoną;
- do wejścia wyzwalania zewnętrznego – sygnał z wyjścia *Synchr.*

Pomiar prądu odbywa się za pośrednictwem boczników o wartości $10 \text{ m}\Omega$.

Przyciskiem umieszczonym poniżej gniazd I i U wybiera się jedną z dwóch par przebiegów do obserwacji:

- napięcie $-u_C$ i prąd i_o ;
- lub napięcie u_{T1} i prąd $-i_{T1}$.

Przycisk poniżej gniazda *Synchr.* pozwala wybrać między wyzwalaniem oscyloskopu równocześnie z wyzwoleniem tyrystora T_1 lub równocześnie z wyzwoleniem tyrystora T_2 . W niniejszym ćwiczeniu ustawienie to może być dowolne.

Pokrętko *Reg. f* służy do regulacji częstotliwości wyzwalania tyrystorów f_s . Należy nadmienić, że przy maksymalnym dociążeniu układu (wybór $R = 0$) następuje samoczynne obniżenie częstotliwości wyzwalania.

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, wyniki analizy Fouriera 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. Program badań

1. Wprowadzić na oscyloskopie odpowiednie ustawienia:
 - a) wyłączyć uwzględnianie tłumienia sondy 10:1 na kanale, do którego przyłączono wyjście I – 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) włączyć uwzględnianie tłumienia sondy 10:1 na kanale, do którego przyłączono sondę napięciową;
 - c) 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 ~; zmiany dokonuje się wciskając (krótko) przycisk AC DC);
 - d) wybrać wyzwalanie z wejścia zewnętrznego (EXT – wybór przyciskiem pod kontrolkami TRIG.);
 - e) ustawić tryb wyzwalania wysoką częstotliwością HF (przycisk TRIG. MODE);
 - f) jeżeli oscyloskop nie wyzwała się poprawnie (nie świeci się kontrolka TR lub obraz jest niestabilny), należy wyregulować poziom wyzwalania (pokrętko LEVEL);
 - g) wzmocnienia kanałów powinny być takie, aby obserwowane przebiegi zajmowały możliwie dużą część ekranu (w trakcie pomiarów należy dopasowywać to ustawienie do zmieniających się warunków).

W celu eliminacji szumów widocznych szczególnie na przebiegu napięcia na boczniku można na oscyloskopie włączyć tryb uśredniania. W tym celu należy strzałkami STOR. MODE wybrać AVM, wywołać funkcję #AV (wcisnąć obie strzałki jednocześnie), ustawić strzałkami liczbę próbek, z których ma być obliczana średnia, i zatwierdzić wciskając ponownie #AV.

2. Ustawić częstotliwość pracy (sterowania) $f_s < f$. Relację między f a f_s należy określić w oparciu o obserwowane oscylogramy (por. rys. 4).

Podstawę czasu należy dobrać tak, aby później możliwe było w miarę dokładne zmierzenie odpowiednich czasów (na ekranie widoczne ok. 2 okresy T_s). W razie potrzeby przebiegi można przesuwac o 1/4 ekranu w prawo przyciskiem PTR. (*pre-trigger*).
3. Dla wszystkich 6 kombinacji wartości R i L , dla konfiguracji A, zarejestrować wszystkie dostępne przebiegi napięć i prądów przy podstawie czasu jak wyżej i odpowiednich wzmocnieniach kanałów. Aby w późniejszym czasie możliwe było dokładne odczytanie poziomów napięć i długości odcinków czasowych z użyciem kursorów programu SP107, oscylogramy należy zapisywać w formacie MES.
4. Ustawić wartości L i R według zalecenia prowadzącego (pozostawić konfigurację A).
5. Dla 5–6 wartości częstotliwości sterowania f_s z całego dostępnego zakresu, uwzględniając wszystkie przypadki – $f_s < f$, $f_s = f$ i $f_s > f$, zarejestrować przebieg prądu odbiornika. Podstawę czasu należy dobierać tak, aby widoczne były co najmniej 4 okresy przebiegu. Przebiegi należy zapisywać w dwóch postaciach: graficznej i numerycznej (plik TAB).

Dodatkowo dla dowolnego z przypadków $f_s < f$ wyznaczyć i zanotować częstotliwość drgań własnych f .

6. Uruchomić program Scilab służący do obliczeń numerycznych. Wczytać plik zawierający funkcje potrzebne w niniejszym ćwiczeniu, wpisując instrukcję:

```
exec('\\\\ixi\\labs\\common\\pee\\falownik.sce');
```

następnie zmienić bieżący katalog na folder zawierający zapisane pliki TAB:

```
cd('dysk:\\folder');
```

7. W programie Scilab dla każdego z zapisanych plików TAB obliczyć widmo amplitudowe prądu odbiornika w następujący sposób:

- a) wczytać wyniki z pliku do macierzy *naglowek* i *dane*, wpisując komendę:

```
[naglowek,dane]=wczytaj_sp107('nazwa_pliku.tab');
```

- b) za pomocą funkcji *fftfal* opartej na dyskretnej transformacie Fouriera obliczyć amplitudy poszczególnych harmoniczných (umieszczając je w macierzy *widmo*) oraz częstotliwość sterowania f_s , wpisując komendę:

```
[widmo,fs]=fftfal(dane, nr_kolumny_t, nr_kolumny_io, ki);
```

gdzie *nr_kolumny_t* i *nr_kolumny_io* oznaczają numery kolumn w pliku TAB zawierające odpowiednio czas t i napięcie na boczniku u_{io} , natomiast k_i jest mnożnikiem pozwalającym przeliczyć napięcie na boczniku u_{io} na rzeczywistą wartość prądu odbiornika i_o . Kolejność kolumn w pliku TAB można ustalić wyświetlając ich nagłówki przez wpisanie:

```
naglowek
```

- c) odczytać i zanotować częstotliwość sterowania f_s wpisując:

```
fs
```

- d) wykreślić w postaci słupków widmo amplitudowe prądu odbiornika do 40. harmonicznęj włącznie, wpisując:

```
fft_wykres(widmo,40);
```

- e) zapisać obraz widma: w oknie wykresu wybrać z menu *File* ► *Export*, a następnie *Export Type: GIF*.

- f) skopiować obliczone widmo amplitudowe do schowka w postaci tabelki, wpisując:

```
fft_kopiuj(widmo);
```

- g) wkleić widmo ze schowka do arkusza kalkulacyjnego OpenOffice.

3.3. Opracowanie wyników

Wpływ parametrów obwodu rezonansowego

1. Na podstawie przebiegów zarejestrowanych w punkcie 3.2.3, w oparciu o znajomość zasady działania układu, dla wszystkich przypadków wyznaczyć:
 - a) częstotliwość drgań własnych f ;
 - b) czas opóźnienia wewnętrznego t_x ;
 - c) wartości napięć U_x i $E+U_x$;
 - d) wartości maksymalnych napięć występujących na tyrystorze w kierunku blokowania U_{Dm} i w kierunku wstecznym U_{Rm} ;
 - e) maksymalną stromość narastania napięcia blokowania $(du_D/dt)_m$.

W tym celu należy zaznaczyć kursorami niewielki odcinek (wybrany „na oko”) po przejściu narastającego napięcia u_{T1} przez poziom 0. Stromość oblicza się jako iloraz $\Delta u_D/\Delta t$, na podstawie obliczonych przez program różnic położenia kursorów: Δu_D – wskazanie „CI - CII” dla kanału zawierającego przebieg u_{T1} ; Δt – wskazanie „dt”.

Otrzymane wyniki zebrać w tabeli.

2. Na podstawie wyników z punktu 1 przeanalizować wpływ parametrów obwodu rezonansowego na częstotliwość generowanej sinusoidy.
3. Wykreślić czas opóźnienia wewnętrznego t_x w funkcji rezystancji R (na jednym wykresie dwie krzywe – dla dwu wartości L). Na tej podstawie określić wpływ parametrów R i L na czas t_x .
Jak wobec tego zmienią się wymagania co do parametru t_q tyrystorów: 1^o przy zwiększeniu rezystancji w obwodzie? 2^o przy zwiększeniu indukcyjności w obwodzie?
4. Wykreślić maksymalną stromość narastania napięcia blokowania $(du_D/dt)_m$ w funkcji rezystancji R dla obu wartości L (dwie krzywe na jednym wykresie).
Przeanalizować wpływ powyższych parametrów – czy warunki pracy tyrystorów są korzystniejsze dla małych czy dla dużych obciążeń?
5. W oparciu o wyznaczone wartości U_x i $E+U_x$ obliczyć współczynnik tłumienia α_w , a następnie na tej podstawie obliczyć dobroć obwodu rezonansowego Q . Wyniki dodać do tabeli.
6. Wykreślić zależność maksymalnych napięć U_{Dm} i U_{Rm} od dobroci układu rezonansowego. Sformułować wniosek dotyczący warunków pracy tyrystorów.

Wpływ częstotliwości pracy falownika

7. Dla każdego przypadku z punktu 3.2.5 obliczyć współczynnik zawartości harmonicznym d_h biorąc pod uwagę $N = 20$ harmonicznym.

Obliczenia najprościej wykonać w arkuszu kalkulacyjnym, wpisując odpowiednią formułę z użyciem funkcji $SUMA()$ i $PIERWIASTEK()$ [w wersji angielskiej: $SUM()$ i $SQRT()$]. Potrzebne będzie dodanie nowej kolumny z wyliczonymi kwadratami wartości skutecznym.

8. Przeanalizować wyniki – powiązać obraz przebiegów w funkcji czasu, obraz widma i wartość współczynnika zawartości harmonicznym.

9. Dla każdego przypadku wyznaczyć stosunek f_s/f korzystając z wartości f wyznaczonej w punkcie 3.2.5.
10. Zebrać w tabeli uzyskane wyniki f_s , f_s/f i d_h . Wykreślić zależność współczynnika d_h od stosunku f_s/f . Sformułować wnioski.

4. Oczekiwana zawartość sprawozdania

Sprawozdanie powinno zawierać:

- stabelaryzowane wyniki z punktów 3.3.1 i 3.3.5 wraz z przykładami obliczeń;
- wykresy, ich analizę i wnioski zgodnie z poleceniami w punktach 3.3.2–3.3.4 i 3.3.6;
- obrazy przebiegów zarejestrowane w punkcie 3.2.5 i obrazy widma zapisane w punkcie 3.2.7;
- tabelę z wynikami i wykres z punktu 3.3.10;
- analizę wyników i wnioski zgodnie z poleceniami w punktach 3.3.8 i 3.3.10.

W katalogu sieciowym zespołu należy pozostawić pliki z zarejestrowanymi przebiegami i uzyskanymi wynikami.

5. Literatura

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