



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	5
2.3. Układ zmodyfikowany falownika szeregowego	6
2.4. Współczynnik zawartości harmonicznch	8
3. Badanie układu	10
3.1. Układ pomiarowy	10
3.2. Program badań.....	11
3.3. Opracowanie wyników	12
Wpływ parametrów obwodu rezonansowego	12
Wpływ częstotliwości pracy falownika	13
4. Oczekiwana zawartość sprawozdania	14
5. Literatura.....	14

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.

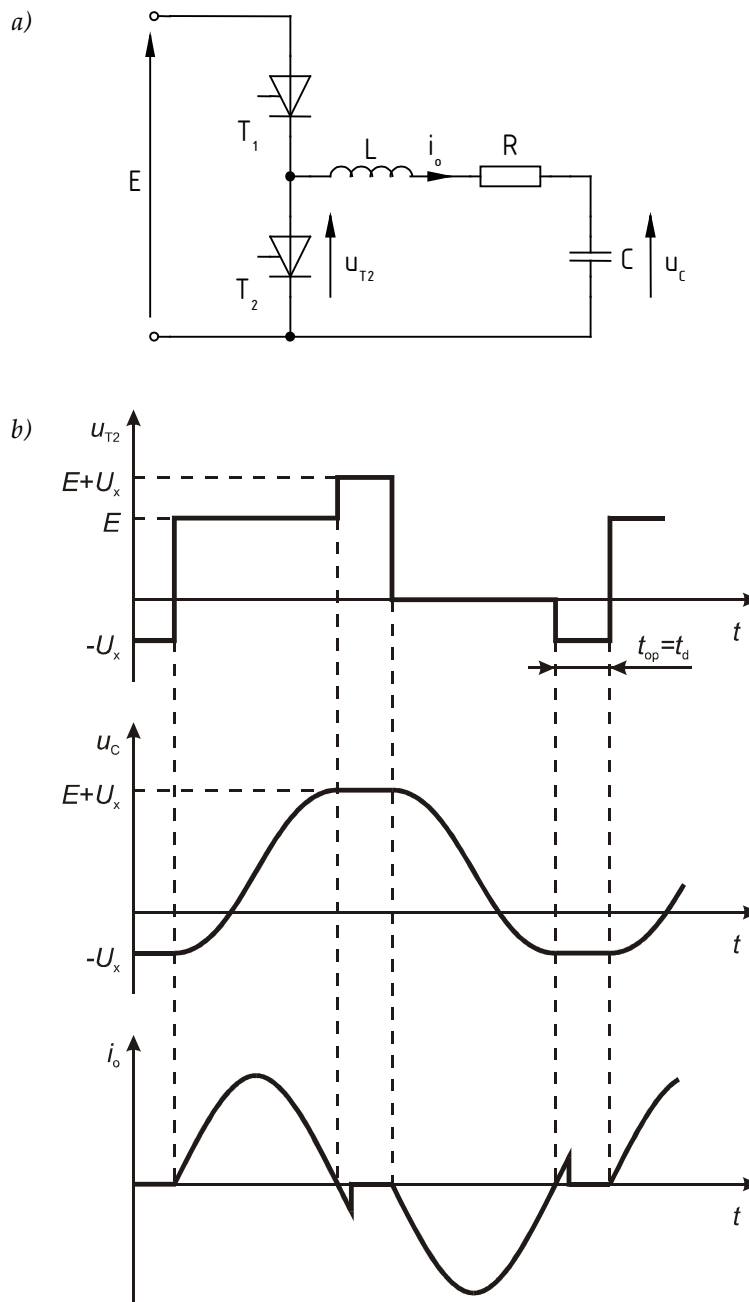
Niniejsze ćwiczenie nie wyczerpuje zagadnienia przekształtników DC/AC. Istnieją inne rozwiązania falowników rezonansowych, jak również falowniki inne niż rezonansowe (np. falowniki impulsowe). Ich szczegółowa analiza wykracza jednak poza zakres niniejszego laboratorium.

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.



Rys. 1. Układ podstawowy falownika rezonansowego szeregowego:
a) schemat układu; b) przebiegi napięć i prądów

2.2. Zasada działania falownika szeregowego – układ podstawowy

W falowniku szeregowym odbiornik (na rys. 1 opornik R) wchodzi w skład szeregowego obwodu rezonansowego. Warunkiem poprawnej pracy falownika jest, aby obwód RLC był obwodem drgającym, co sprowadza się do warunku

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

Zasada pracy układu jest następująca: po włączeniu tyrystora T_1 następuje przeładowanie rezonansowe kondensatora C (od napięcia $-U_x$ do napięcia $E+U_x$) praktycznie sinusoidalnym impulsem prądu i_o . Po chwilowej zmianie kierunku prądu, tyrystor T_1 wyłącza się. Na kondensatorze napięcie zostaje podtrzymane przez czas t_{op} , a po włączeniu tyrystora T_2 , kondensator zostaje przeładowany do napięcia $-U_x$. W obciążeniu pojawia się drugi impuls stanowiący ujemny półokres prądu przemiennego. Tyrystor T_2 wyłącza się z chwilą zmiany kierunku prądu.

Obwód drgający RLC można opisać następującymi wielkościami:

- ω_0 – pulsacja drgań własnych nietłumionych

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}; \quad (2)$$

- α – współczynnik tłumienia

$$\alpha = \frac{R}{2L}. \quad (3)$$

Tłumienie obwodu może też być określone przez:

- α_w – względny współczynnik tłumienia

$$\alpha_w = \frac{\alpha}{\omega_0} = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}; \quad (4)$$

- ω – pulsację drgań własnych tłumionych

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} = \omega_0 \sqrt{1 - \alpha_w^2}; \quad (5)$$

- Q – dobroć:

$$Q = \frac{\omega L}{R} = \frac{\sqrt{1 - \alpha_w^2}}{2\alpha_w}. \quad (6)$$

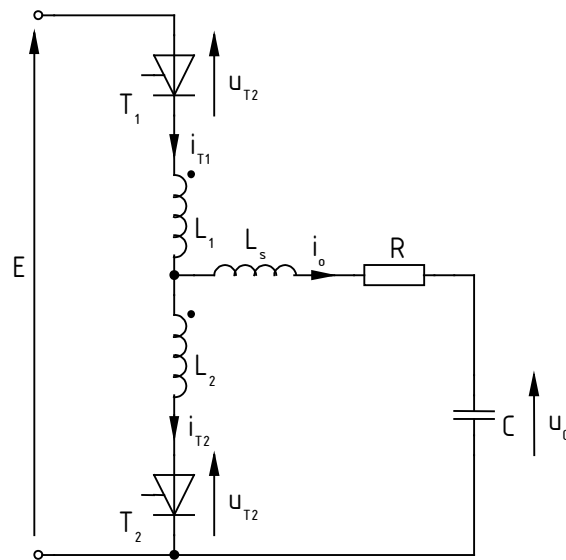
W tym układzie falownika czas opóźnienia przerzutu t_{op} jest równy czasowi dysponowanemu na wyłączenie tyrystora t_d . Ponieważ tyrystor musi odzyskać własności blokujące w czasie t_d , dlatego też czas $t_{op} = t_d$ nie może być mniejszy od czasu wyłączenia tyrystora t_q , co wyraża się następującym warunkiem:

$$t_d = t_{op} \geq t_q. \quad (7)$$

Częstotliwość pracy układu – narzucona przez częstotliwość sterowania f_s – jest więc mniejsza niż częstotliwość rezonansowa f obwodu RLC. To ograniczenie od góry częstotliwości pracy układu jest jego podstawową wadą.

2.3. Układ zmodyfikowany falownika szeregowego

Wadę układu opisanego w par. 2.2 można w znacznym stopniu usunąć, stosując cewki sprzężone o równych indukcyjnościach $L_1 = L_2$ (rys. 2).



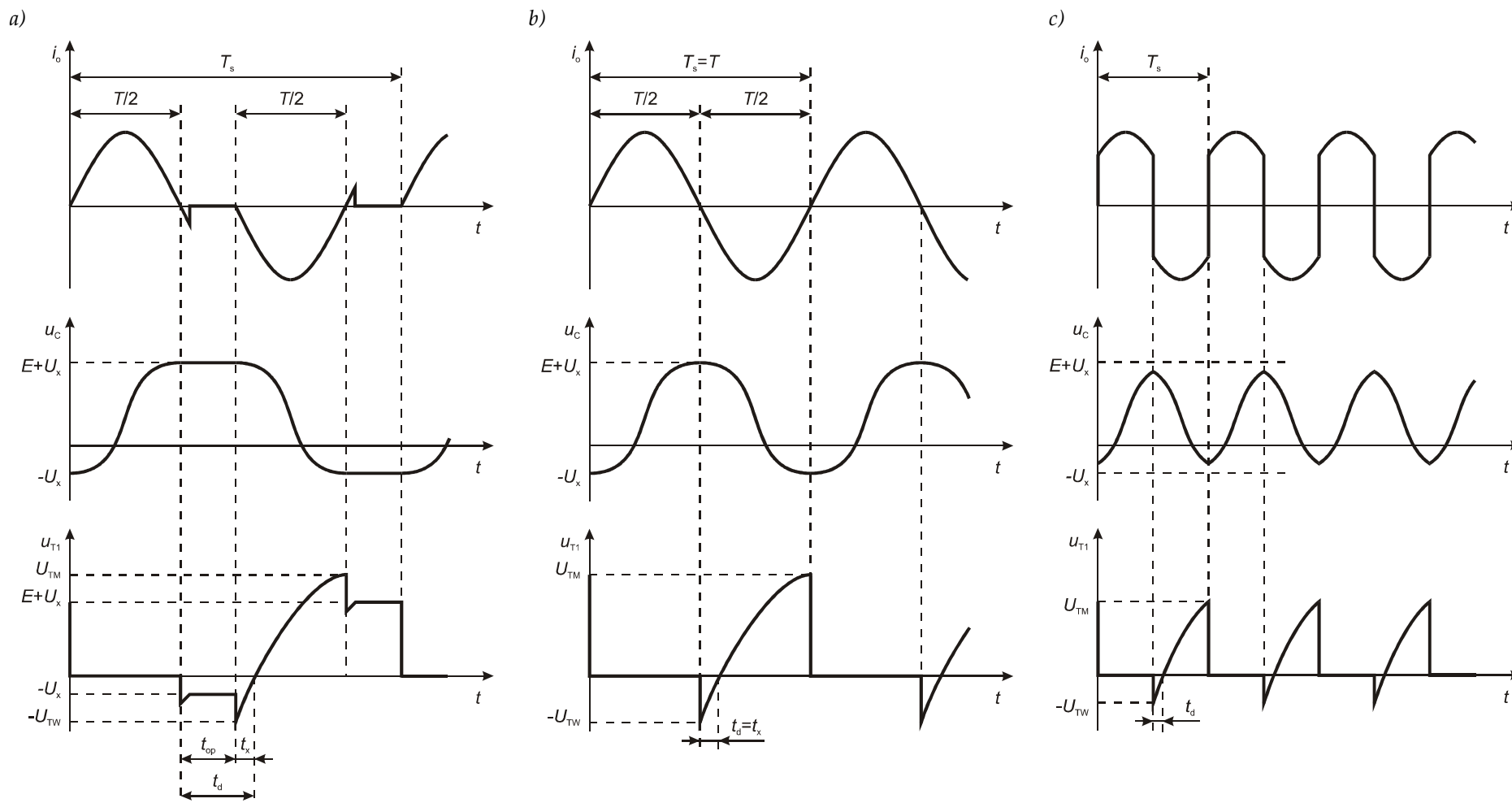
Rys. 2. Schemat zmodyfikowanego układu falownika szeregowego.

Rozważmy działanie tego układu: tyristor T_1 przewodził, kondensator C jest naładowany do napięcia $E+U_x$. Proces ładowania kondensatora jest analogiczny do procesu ładowania opisanego w poprzednim punkcie. Po załączeniu tyristora T_2 , prąd płynie przez cewkę L_2 indukując na niej pewne napięcie. Dzięki wzajemnemu sprzężeniu L_1 i L_2 , na cewce L_1 powstaje również napięcie, które zostaje doprowadzone do T_1 jako dodatkowe napięcie wsteczne zwiększające czas dysponowany na wyłączenie o pewną wartość t_x :

$$t_d = t_{op} + t_x \geq t_q \quad (8)$$

Można więc włączyć jeden tyristor nim drugi odzyska właściwości blokujące, co prowadzi do zmniejszenia czasu opóźnienia przerzutu. Rozważany układ może pracować z częstotliwością sterowania:

- $f_s < f$ – największy czas dysponowany t_d , duże zniekształcenia prądu odbiornika (rys. 3a);
- $f_s = f$ – przypadek dopasowania, najkorzystniejszy kształt prądu odbiornika (rys. 3b);
- $f_s > f$ – przebieg prądu prawie prostokątny, duże stromości prądu i napięcia oraz mały czas dysponowany t_d (rys. 3c).



Rys. 3. Typowe przebiegi w układzie zmodyfikowanym falownika szeregowego: a) $f_s < f$; b) $f_s = f$; c) $f_s > f$

Wzory opisujące najważniejsze parametry są następujące:

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

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

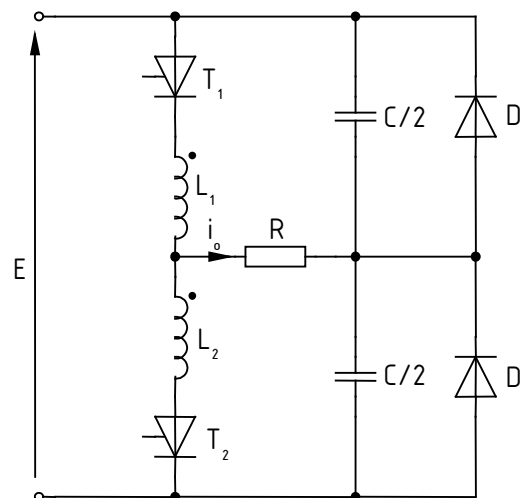
zatem

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

Stromość napięciowa może być obliczona ze wzoru

$$\left. \frac{dU_T}{dt} \right|_{t=t_x} = E\omega [\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg}(\omega t_x + \varphi)]. \quad (12)$$

Istnieje szereg odmian układowych szeregowego falownika rezonansowego. Jedna z nich pokazana jest na rys. 4. Układy praktyczne falowników zostały obszernie przedstawione w literaturze.



Rys. 4. Jedna z wersji układu falownika szeregowego

2.4. Współczynnik zawartości harmonicznych

Ogólnie rzecz biorąc, zadaniem falowników – jako przekształtników DC/AC – jest generacja przemiennej sygnali 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 harmonicznymi.

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

$$d_h = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} X_{(k)}^2}}{X_{(1)}}, \quad (13)$$

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:

$$d_h \approx \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^N X_{(k)}^2}}{X_{(1)}}. \quad (14)$$

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

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. 4) lub niesymetrycznym (jak na rys. 2 bez cewki L_s).

Przełączniki umożliwiają zmianę:

- wartości indukcyjności obwodu rezonansowego L ($= L_1 = L_2$),
- wartości rezystancji obciążenia 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 i wstęp teoretyczny (par. 2.3).

Podstawę czasu należy dobrać tak, aby później możliwe było w miarę dokładne zmierzenie odpowiednich czasów (na ekranie widoczne ok. 2 okresy). W razie potrzeby przebiegi można przesuwac o 1/4 ekranu w prawo przyciskiem PTR. (*pre-trigger*).
3. Zarejestrować przebiegi dla wszystkich 6 kombinacji wartości R i L .

Należy zarejestrować wszystkie dostępne przebiegi napięć i prądów przy rozsądnej podstawie czasu, dla konfiguracji „A”. Aby możliwe było łatwe 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 dostępnego zakresu (uwzględniając wszystkie przypadki: $f_s < f, f_s = f, f_s > f$):
 - a) zarejestrować przebieg prądu odbiornika przy takiej podstawie czasu, aby widoczne były co najmniej 4 okresy prądu;
 - b) zapisać przebieg w postaci obrazu;
 - c) dodatkowo zapisać wyniki w postaci tabelarycznej w pliku tekstowym (TAB);

- d) dla dowolnego z przypadków $f_s < f$ wyznaczyć i zapisać 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');
```

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

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

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

- b) za pomocą transformaty Fouriera obliczyć częstotliwość sterowania f_s oraz amplitudy harmoniczných, 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 . Podpisy (nagłówki) kolumn w pliku TAB można wyświetlić wpisując:

```
naglowek
```

- c) odczytać i zanotować częstotliwość sterowania f_s wpisując:

```
fs
```

- d) wykreślić w postaci słupków widmo amplitudowe prądu odbiornika do 40. harmoniczných 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 czystego arkusza w arkuszu kalkulacyjnym OpenOffice.

3.3. Opracowanie wyników

Wpływ parametrów obwodu rezonansowego

1. Na podstawie przebiegów zarejestrowanych w punkcie 3.2.3, 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_{TM}) i w kierunku wstecznym (U_{TW});
- e) maksymalną stromość narastania napięcia blokowania $(du_D/dt)_{max}$.

W tym celu należy zlokalizować przedział czasu t_x i zaznaczyć na nim kursorami odcinek (wybrany „na oko”), na którym stromość napięcia u_{T1} jest maksymalna. Stromość tę oblicza się jako $\Delta u_D/\Delta t$ na podstawie obliczonej przez program różnicy położenia kursorów: (1) Δu_D – wskazanie „CI - CII” dla kanału zawierającego przebieg u_{T1} ; (2) Δt – wskazanie „dt”.

Otrzymane wyniki zebrać w tabeli.

2. Na podstawie wyników z punktu 1 przeanalizować wpływ parametrów obwodu rezonansowego na częstotliwość generowanych drgań.
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 zmieniają się wymagania co do parametru t_q (czasu wyłączenia) tyrystorów: (a) przy zwiększeniu rezystancji obciążenia? (b) przy zwiększeniu indukcyjności obciążenia?
4. Wykreślić maksymalną stromość narastania napięcia blokowania $(du_D/dt)_{max}$ w funkcji rezystancji R dla obu wartości L . Przeanalizować wpływ tych parametrów; czy warunki pracy tyrystorów są korzystniejsze dla małych czy dla dużych obciążeń?
5. Na podstawie wyznaczonych wartości U_x i $E+U_x$, obliczyć współczynnik tłumienia α_w , a następnie (na podstawie obliczonej wartości α_w) dobroć obwodu rezonansowego Q . Wyniki dodać do tabeli.
6. Wykreślić zależność maksymalnych napięć U_{TM} i U_{TW} 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 harmonicznych d_h biorąc pod uwagę $N = 20$ harmonicznych.

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 skutecznych.

8. Przeanalizować wyniki – powiązać obraz przebiegów w funkcji czasu, obraz widma i wartość współczynnika zawartości harmonicznych.
9. Dla każdego przypadku wyznaczyć stosunek f_s/f korzystając z wartości f wyznaczonej w punkcie 3.2.5.d).
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:

- tabele z wynikami z punktów 3.3.1 i 3.3.10;
- przykładowe przebiegi i obrazy widma zarejestrowane w punktach 3.2.5 i 3.2.7 (dla trzech przypadków – f_s równego, większego i mniejszego od f);
- wykresy, ich analizę i wnioski zgodnie z poleceniami w par. 3.3.

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.