



## PRZEKSZTAŁTNIKI ELEKTRONICZNE

# Ćwiczenie C42

## Falownik rezonansowy szeregowy

Ramowy plan pracy

15'	30'	45'	1 <sup>h</sup>	1 <sup>h</sup> 15'	1 <sup>h</sup> 30'	po zajęciach

Opracowanie ćwiczenia i instrukcji:  
Tomasz Poźniak, Łukasz Starzak

Łódź 2011



## Spis treści

<b>B Wprowadzenie do ćwiczenia</b> .....	<b>5</b>
1. Cel i przebieg ćwiczenia.....	5
2. Podstawy teoretyczne.....	7
2.1. Wprowadzenie.....	7
2.2. Zasada działania falownika szeregowego – układ podstawowy.....	8
2.3. Układ zmodyfikowany falownika szeregowego.....	10
2.4. Współczynnik zawartości harmonicznych.....	12
<b>C Doświadczenie</b> .....	<b>15</b>
3. Pomiary.....	15
3.1. Układ pomiarowy.....	15
3.2. Wykonanie pomiarów.....	17
<b>D Wyniki</b> .....	<b>19</b>
4. Opracowanie i analiza wyników.....	19
4.1. Wpływ parametrów obwodu rezonansowego.....	19
4.2. Wpływ częstotliwości pracy falownika.....	21
<b>E Informacje</b> .....	<b>23</b>
5. Oczekiwana zawartość sprawozdania.....	23
6. Literatura.....	23



# B

## Wprowadzenie do ćwiczenia

---

### 1. Cel i przebieg ćwiczenia

---

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.



## 2. Podstawy teoretyczne

---

### 2.1. Wprowadzenie

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

## 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  $i_0$ . 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 przemienne. Tyrystor  $T_2$  wyłącza się z chwilą zmiany kierunku prądu.

Obwód drgający RLC można opisać następującymi wielkościami:

- $\omega_0$  – pulsacja drgań własnych nietłumionych

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

- $\alpha$  – współczynnik tłumienia

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

Tłumienie obwodu może też być określone przez:

- $\alpha_w$  – względny współczynnik tłumienia

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

- $\omega$  – pulsację drgań własnych tłumionych

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

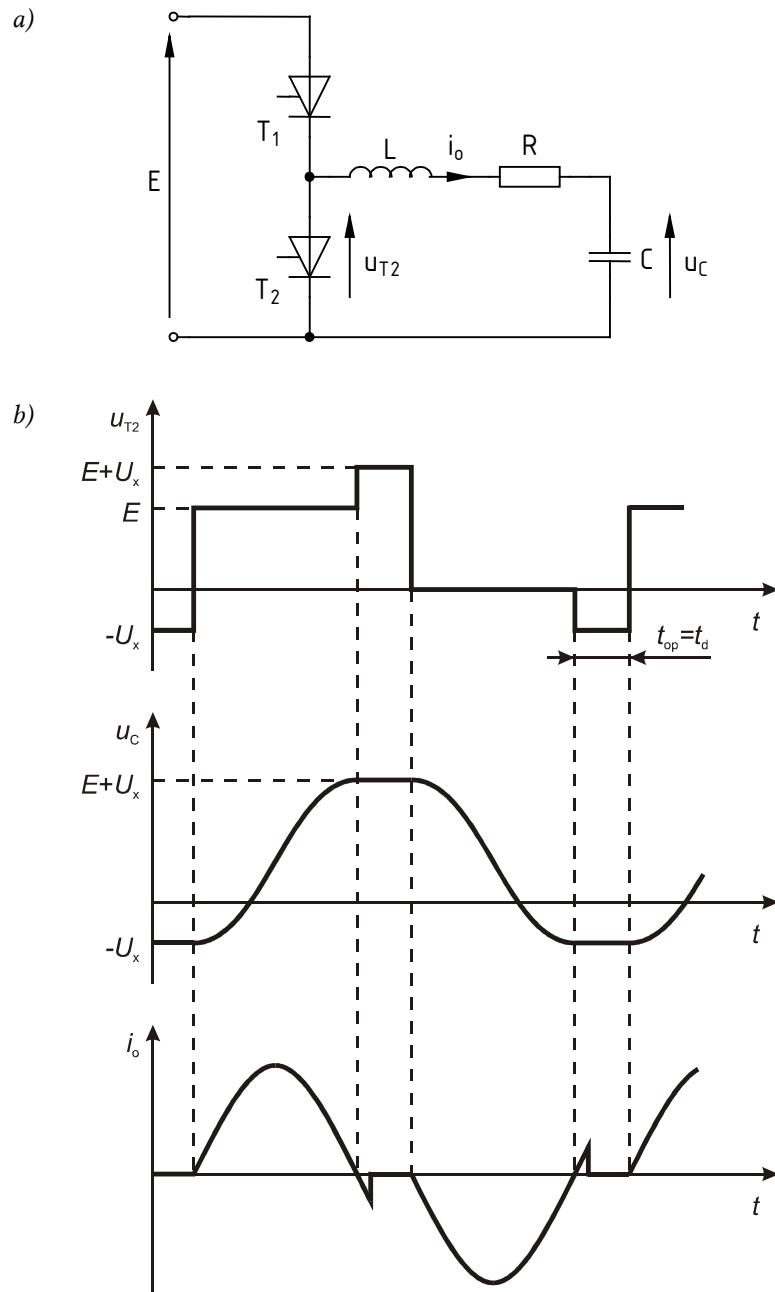
- $Q$  – dobroć:

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

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 odzyskiwania zdolności zaworowej tyrystora  $t_q$ , co wyraża się następującym warunkiem:

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



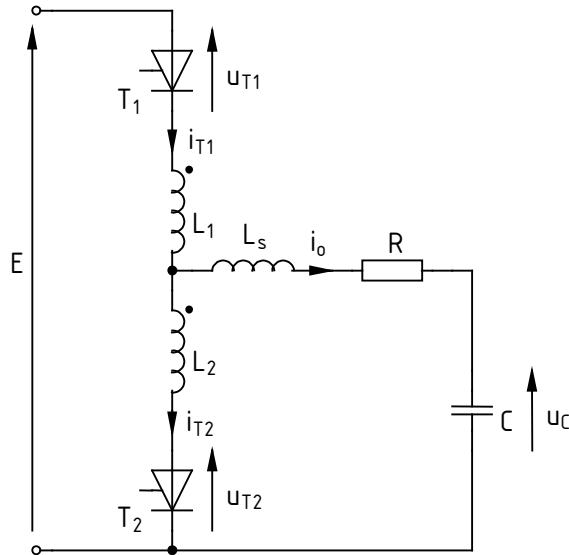


Rys. 1. Układ podstawowy falownika rezonansowego szeregowego:  
a) schemat układu; b) przebiegi napięć i prądów

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  $t_x$ . Wówczas postać warunku (7) ulega zmianie na

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

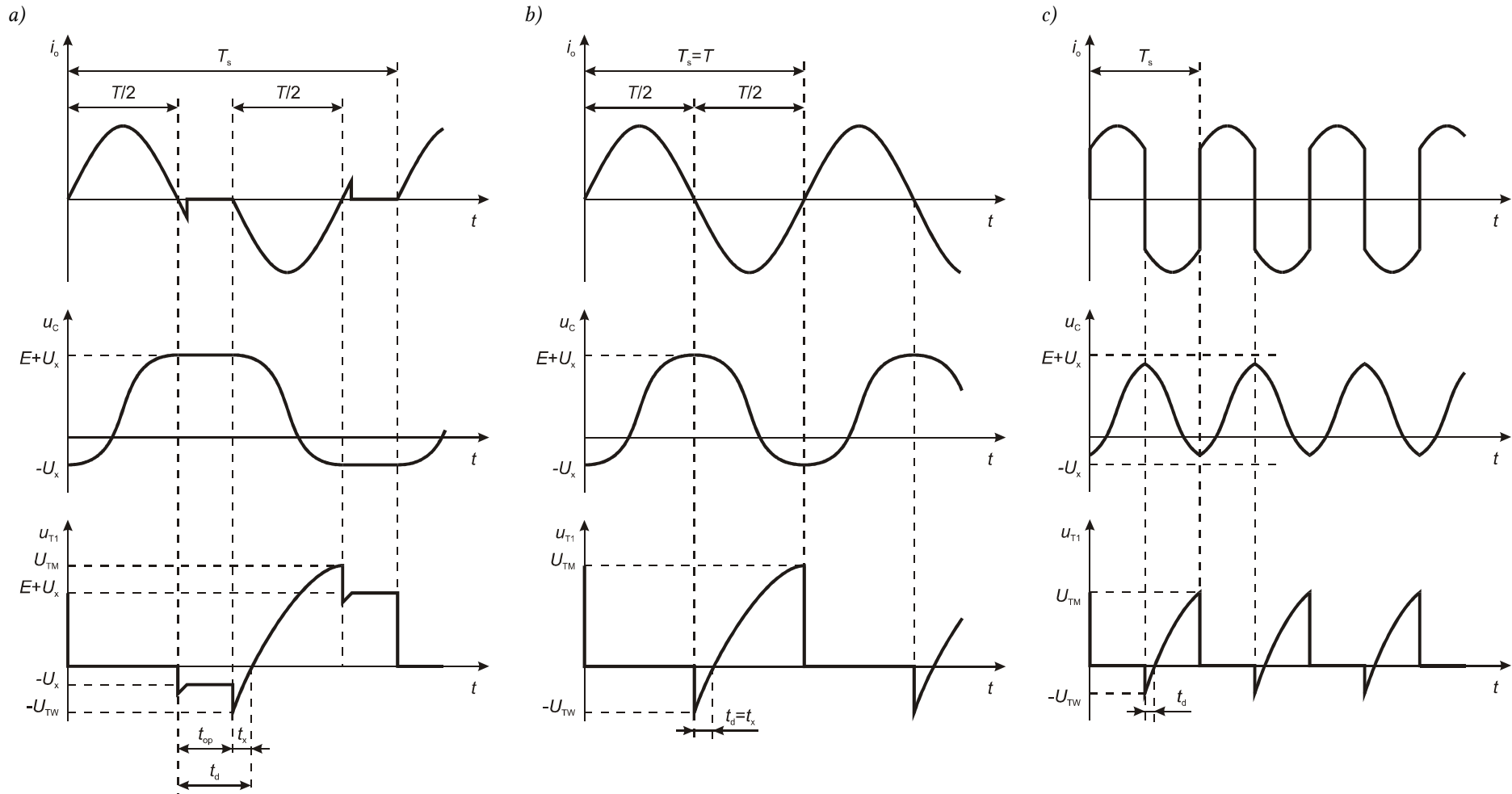
Z warunku tego wynika, że możliwa jest poprawna praca układu zmodyfikowanego z czasem opóźnienia  $t_{op}$  krótszym od czasu odzyskiwania zdolności zaworowej tyristora  $t_q$  – pod warunkiem, że różnicę skompensuje odpowiednio długi czas  $t_x$ . Oznacza to, że można załączyć jeden tyristor nim drugi odzyska właściwości blokujące. 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).

Wzory opisujące najważniejsze parametry są następujące:

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

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



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

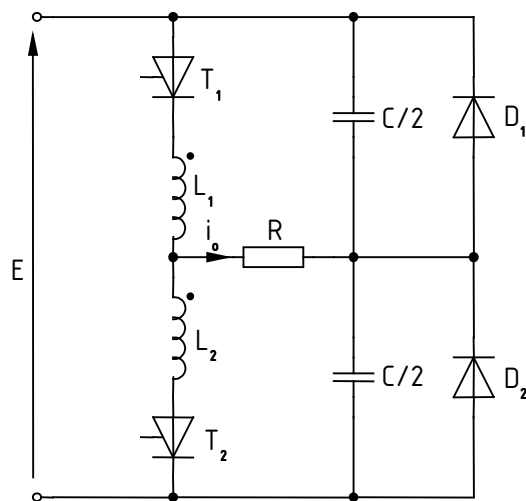
zatem

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

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 harmoniczych

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 harmoniczych  $d_h$  (ang. *total harmonic distortion*, THD). Inne spotykane nazwy tego współczynnika to współczynnik zniekształceń harmoniczych lub współczynnik odkształcenia harmonicznymi.

Współczynnik zawartości harmoniczych definiuje się z reguły jako stosunek wartości skutecznej obliczonej (ze wzoru Parsewala) 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 harmoniczych  $N$ . 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 harmoniczych, tym większe odkształcenie przebiegu od idealnej sinusoidy.



### 3. Pomiary

---

#### 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. Wykonanie pomiarów

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) włączyć badany układ przyciskiem na jego panelu przednim;

Częstotliwość i poziom dźwięków emitowanych przez układ są niekorzystne. W związku z tym, z uwagi na higienę pracy nie powinien on być bez przerwy włączony. Przy każdym pomiarze, zaraz po uzyskaniu odpowiednich przebiegów na ekranie oscyloskopu obraz należy zatrzymać przyciskiem *HOLD*, a układ wyłączyć przyciskiem na jego panelu przednim.

- g) jeżeli oscyloskop nie wyzwała się poprawnie (nie świeci się kontrolka TR lub obraz jest niestabilny), należy wyregulować poziom wyzwalania (pokrętko LEVEL);
- h) 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('y:\ELEMS\uep\C42\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 harmonicznych, 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  $u_{i_0}$ , natomiast  $k_i$  jest mnożnikiem pozwalającym przeliczyć napięcie na boczniku  $u_{i_0}$  na rzeczywistą wartość prądu odbiornika  $i_0$ . 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. harmonicznej 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.

## 4. Opracowanie i analiza wyników

---

### 4.1. 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 tyristorze 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)  $\Delta u_D$  – wskazanie „CI - CII” dla kanału zawierającego przebieg  $u_{T1}$ ; (2)  $\Delta t$  – 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 zmieni się wymagane co do parametru  $t_q$  (czasu odzyskiwania zdolności zaworowej) tyristorów wynikające z warunku (8): (1) przy zwiększeniu rezystancji obciążenia? (2) 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 tyristorów są korzystniejsze dla małych czy dla dużych obciążeń?

5. Na podstawie wyznaczonych wartości  $U_x$  i  $E+U_x$ , obliczyć współczynnik tłumienia  $\alpha_w$ , a następnie (na podstawie obliczonej wartości  $\alpha_w$ ) 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.

#### 4.2. Wpływ częstotliwości pracy falownika

1. 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.

2. Przeanalizować wyniki – powiązać obraz przebiegów w funkcji czasu, obraz widma i wartość współczynnika zawartości harmonicznych.
3. Dla każdego przypadku wyznaczyć stosunek  $f_s/f$  korzystając z wartości  $f$  wyznaczonej w punkcie 3.2.5.d).
4. 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. W jaki sposób wykres ten dowodzi, że uzyskanie minimalnych zniekształceń (współczynnika zawartości harmonicznych) możliwe jest wyłącznie w układzie zmodyfikowanym, a nie w podstawowym?



## 5. Oczekiwana zawartość sprawozdania

---

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

- tabele z wynikami z punktów 4.1 i 4.4;
- 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. 4.

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

## 6. 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.