



LABORATORIUM
PODSTAW ENERGOELEKTRONIKI
(studium zaoczne)

Ćwiczenie 5

Falownik rezonansowy szeregowy

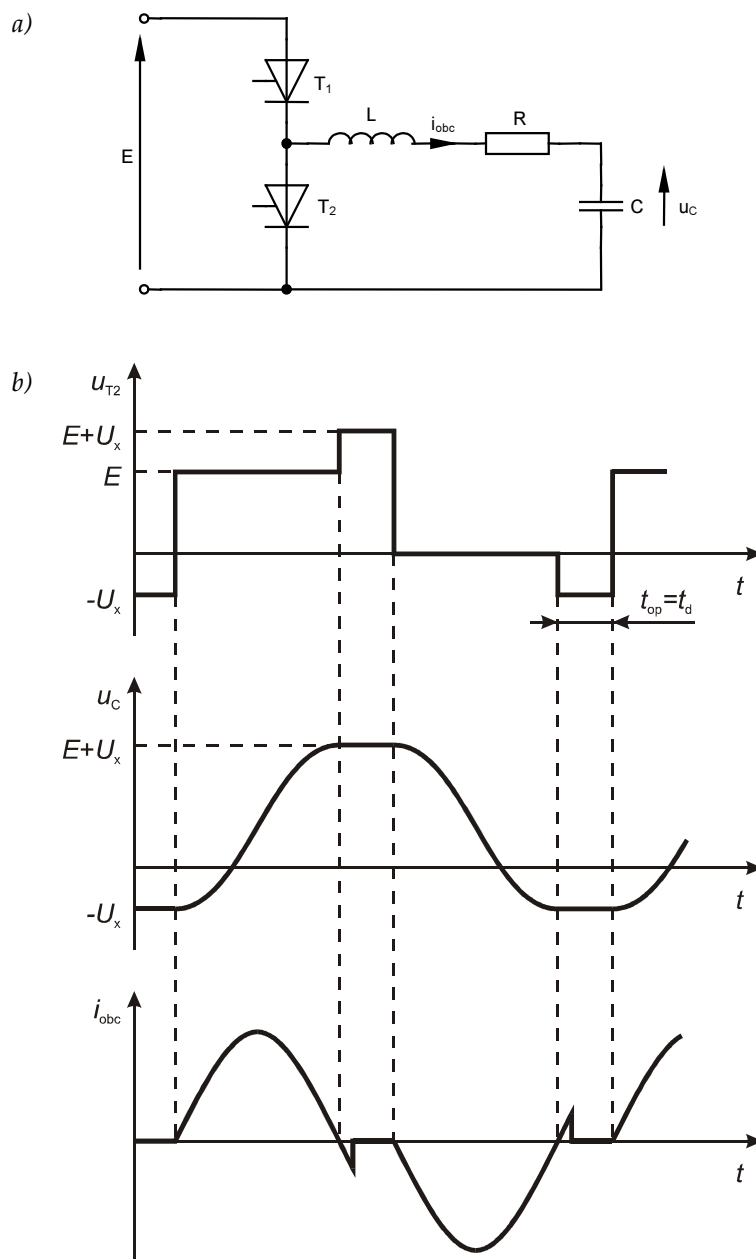
Opracowanie:
Tomasz Poźniak – punkty 1.1–1.3
Łukasz Starzak – punkty 1.4, 2

1. Podstawy teoretyczne

1.1. Wstęp

Falowniki szeregowe są urządzeniami służącymi do przekształcania prądu 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 szeregowego: a) schemat układu; b) przebiegi napięć i prądów

1.2. Zasada działania falownika szeregowego – układ podstawowy

W falowniku szeregowym (rys. 1) obciążenie wchodzi w skład szeregowego obwodu rezonansowego. Warunkiem poprawnej pracy falownika jest, aby szeregowy obwód RLC był obwodem drgającym, co sprowadza się do warunku określonego wzorem:

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

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. Po chwilowej zmianie kierunku prądu, tyrystor T_1 wyłącza rezonansowo. 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 rezonansowo 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:

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

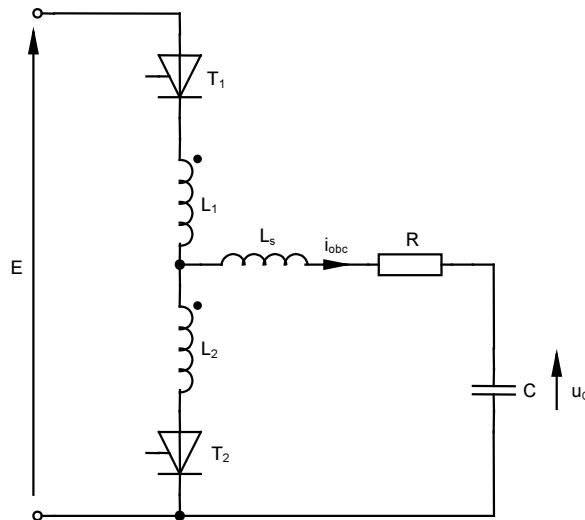
W tym układzie falownika czas opóźnienia przerzutu t_{op} jest równy czasowi dysponowanemu na wyłączenie tyrystora t_d . Ponieważ tyrystor musi odzyskać własności blokujące w czasie t_d , dlatego też czas $t_{op} = t_d$ nie może być mniejszy od czasu wyłączenia tyrystora t_q , co wyraża się następującym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

1.3. Układ zmodyfikowany falownika szeregowego

Wadę układu opisanego w punkcie 1.2 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 wartość t_x :

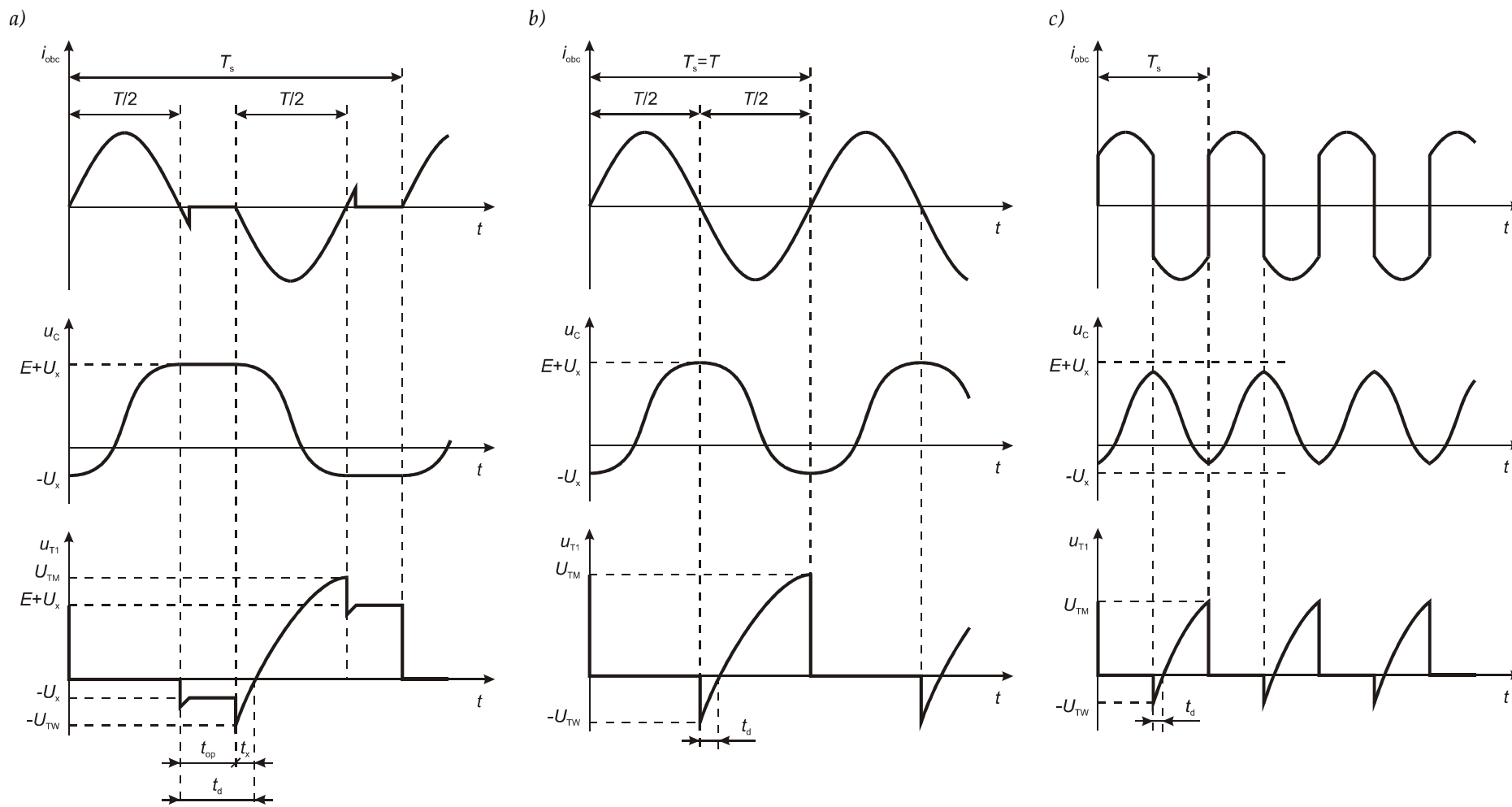
$$t_d = t_{op} + t_x \geq t_q. \quad (8)$$

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 obciążenia (rys. 3a);
- $f_s = f$ – przypadek dopasowania, najkorzystniejszy kształt prądu obciążenia (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:

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



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

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

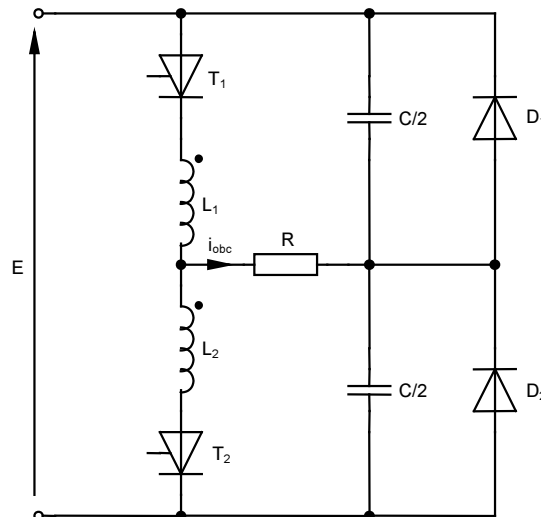
zatem

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

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 falownika, jedna z nich jest pokazana na rys. 4. Układy praktyczne falowników zostały obszernie przedstawione w literaturze.



Rys. 4. Jedna z wersji układu falownika szeregowego

1.4. 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 posiadać jakąś miarę podobieństwa generowanego przebiegu (w naszym ćwiczeniu jest to prąd odbiornika i_{obc}) do idealnej sinusoidy. Powszechnie wykorzystuje się do tego celu *współczynnik zawartości wyższych harmonicznych*, w skrócie THD od angielskiego terminu *Total Harmonic Distortion*.

Współczynnik zawartości wyższych harmonicznych definiuje się z jako stosunek wartości skutecznej obliczonej z pominięciem pierwszej harmonicznej (przyjmuje się, że składowa stała jest zerowa) do wartości skutecznej pierwszej harmonicznej:

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

gdzie $X_{(k)}$ oznacza wartość skuteczną k -tej harmonicznej danego sygnału $x(t)$. W praktyce znana jest wartość skuteczna pewnej skończonej liczby harmonicznych N ; zachodzi więc konieczność stosowania wzoru przybliżonego:

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

Jak nietrudno zauważyć, wartość THD dla pojedynczej sinusoidy wynosi 0, gdyż zawiera ona tylko harmoniczną podstawową (pierwszą). Jak można obliczyć, dla idealnego prostokąta THD wynosi ok. 0,483. Ogólnie więc, im mniejsza wartość THD, tym mniejsze odkształcenia przebiegu od idealnej sinusoidy.

2. Badanie układu

2.1. 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 , oraz konfiguracji (niesymetryczna – „A” / symetryczna – „B”),

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

Do kanałów oscyloskopu należy podłączyć sygnały z wyjść oznaczonych „U” (pomiar napięcia) oraz „I” (pomiar prądu); pomiar prądu odbywa się za pośrednictwem bocznika o wartości $10 \text{ m}\Omega$. Przyciskiem umieszczonym poniżej wybiera się jedną z dwóch par przebiegów do obserwacji:

- napięcie $-u_C$, prąd i_{obc} ;
- napięcie u_{T1} , prąd $-i_{T1}$.

Wyjście „Synchr.” należy dołączyć do wejścia wyzwalania oscyloskopu i włączyć wyzwalanie zewnętrzne. Przycisk poniżej gniazda „Synchr.” pozwala wybrać między wyzwalaniem podstawy czasu równocześnie z wyzwoleniem tyrystora T_1 lub równocześnie z wyzwoleniem tyrystora T_2 .

Pokrętło „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.

2.2. Program badań i opracowanie wyników

Wpływ parametrów obwodu rezonansowego

W wymienionych niżej przypadkach należy zarejestrować wszystkie dostępne przebiegi napięć i prądów przy rozsądnej podstawie czasu, dla konfiguracji „A” (proszę zwrócić uwagę, że działanie układu jest takie samo dla konfiguracji symetrycznej i niesymetrycznej).

1. Ustawić częstotliwość pracy (sterowania) $f_s < f$. Zarejestrować przebiegi dla wszystkich 6 kombinacji wartości R i L .
2. Na podstawie uzyskanych przebiegów, 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, na którym stromość napięcia u_{T1} jest maksymalna. Stromość tę oblicza się jako $\Delta u_D/\Delta t$ na podstawie obliczonej przez program różnicy położeń kursorów: (1) w osi Y dla kanału zawierającego przebieg $u_{T1} - \Delta u_D$; (2) w osi X – Δt .

Otrzymane wyniki zebrać w tabeli.

3. Na podstawie wyników z punktu 2 przeanalizować wpływ parametrów obwodu rezonansowego na częstotliwość generowanych drgań.
4. 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?
5. 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?
6. 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.
7. Wykreślić zależność maksymalnych napięć U_{TM} i U_{TW} od dobroci układu rezonansowego. Czy falowniki przystosowane do pracy z obwodem rezonansowym o większej dobroci będą droższe czy tańsze? (Tyrystory o większych dopuszczalnych napięciach kosztują oczywiście więcej.)

Wpływ częstotliwości pracy falownika

8. Ustawić wartości L i R według zalecenia prowadzącego (pozostawić konfigurację „A”).
9. Dla co najmniej 6 wartości częstotliwości sterowania f_s z dostępnego zakresu ($f_s < f$, $f_s = f$, $f_s > f$), zarejestrować przebieg prądu obciążenia i napięcia na kondensatorze. Obliczyć w programie Osc dyskretną transformatę Fouriera prądu obciążenia; wyniki DFT należy

zapisać w plikach programu Excel z rozszerzeniem CSV (menu Plik ► Eksportuj). Czym charakteryzuje się widmo amplitudowe prądu obciążenia dla różnych częstotliwości sterowania?

Uwaga. Przed uruchomieniem funkcji DFT, należy zaznaczyć kursorami odcinek czasu o długości równej dokładnie jednemu okresowi badanego przebiegu. W przeciwnym razie numery harmonicznych nie będą zgodne z rzeczywistością.

10. Przeanalizować uzyskane wyniki; powiązać przebiegi w funkcji czasu z obrazami widma.
11. Na podstawie zapisanych wyników, korzystając z programu Excel, obliczyć współczynnik zawartości wyższych harmonicznych prądu obciążenia i wykreślić jego zależność od stosunku f_s/f . Szczegółowa instrukcja postępowania znajduje się w punkcie 2.3.

2.3. Obliczenia współczynnika zawartości wyższych harmonicznych przy pomocy programu Microsoft Excel

Wykorzystywane wzory

W celu obliczenia współczynnika THD, skorzystamy ze wzoru przybliżonego (14), który obecnie zapiszemy z uwzględnieniem, że badanym sygnałem jest prąd odbiornika i_{obc} :

$$w_h \cong \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^N I_{obc(k)}^2}}{I_{obc(1)}}, \quad (15)$$

gdzie N oznaczać będzie liczbę współczynników transformaty Fouriera obliczonych przez funkcję DFT programu Osc (oprócz składowej stałej o numerze 0).

Jak widać, niezbędne będzie obliczenie wartości skutecznej każdej harmonicznej. Dokonamy tego w prosty sposób, korzystając z faktu, że odpowiednio przeskalowany moduł k -tego współczynnika szeregu Fouriera $|I_{obc}[k]|$ jest równy amplitudzie k -tej harmonicznej $I_{obc,m(k)}$. Przeskalowane moduły są zapisywane przez program Osc w pliku CSV. Każda harmoniczna jest idealną sinusoidą, więc jej wartość skuteczną można obliczyć ze znanego wzoru

$$I_{obc(k)} = \frac{I_{obc,m(k)}}{\sqrt{2}}. \quad (16)$$

Import danych

1. Uruchamiamy program Microsoft Excel i otwieramy nowy skoroszyt.
2. Jeżeli w używanej wersji programu Excel dostępna jest funkcja *Dane►Pobierz dane zewnętrzne►Importuj plik tekstowy*, importujemy po kolei wszystkie zapisane pliki CSV (każdy do osobnego arkusza). W przeciwnym razie otwieramy kolejno pliki CSV (*Plik►Otwórz*), a następnie przenosimy arkusze do naszego czystego skoroszytu (menu *Edycja►Przenieś lub kopiuje arkusz*).

Zaimportowane arkusze należy sensownie nazwać (szczególnie arkusz zawierający dane dla przypadku pełnego wystereowania, gdyż jego nazwy będziemy używać w formułach).

Jak widać, program Osc zapisał dane (wyniki DFT) w czterech kolumnach ($X[k]$ oznacza poniżej zespolone współczynniki szeregu Fouriera przeskalowane – jak tego wymaga teoria – przez $N/2$ lub N dla składowej stałej, gdzie N jest liczbą próbek):

- kolumna 1 zawiera ciąg współczynników $a[k] = \text{Re } X[k]$;
- kolumna 2 zawiera ciąg współczynników $b[k] = \text{Im } X[k]$;
- kolumna 3 zawiera ciąg modułów (amplitud harmoniczných)
 $X_m[k] = |X[k]|$;
- kolumna 4 zawiera ciąg argumentów (kątown fazowych harmoniczných)
 $\varphi[k] = \arg X[k]$;
- dodatkowa kolumna po lewej stronie zawiera numery harmoniczných.
[Numer 1 oznacza składową o częstotliwości $f(1) = 1/T_{\text{DFT}}$, gdzie T_{DFT} jest odcinkiem czasu zaznaczonym w punkcie 9. A więc, o ile zaznaczyliśmy dokładnie 1 okres prądu obciążenia, to numer 1 odpowiada jego harmonicznej podstawowej o częstotliwości $1/T_s = f_s$. Numer 0 oznacza oczywiście składową stałą.]

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

3. Przechodzimy do pierwszego zaimportowanego arkusza.
4. Przetwarzamy dane z programu Osc tak, aby odpowiadały rzeczywistej wartości prądu i_{obc} – należy uwzględnić istnienie w obwodzie bocznika pomiarowego. W tym celu należy dodać nową kolumnę z odpowiednimi formułami, w której to kolumnie znajdują się wartości zmierzone przemnożone przez odpowiedni współczynnik. [Zaimportowane dane znajdują się w 4 kolumnach, jednak dla nas przydatna będzie tylko jedna – zob. równanie (16) i objaśnienia w punkcie 2.]

Nowe kolumny z obliczeniami najlepiej dodawać po prawej stronie zaimportowanych danych. 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.

Należy zwrócić uwagę, że chodzi tu o mnożenie i dodawanie *zespolonych* współczynników przekształcenia Fouriera. Przypomnijmy, że mnożenie liczby zespolonej przez stałą jest równoważne wymnożeniu przez tę stałą jej części rzeczywistej i urojonej, a w zapisie moduł-argument – wymnożeniu przez stałą modułu przy pozostawieniu argumentu bez zmian:

$$aX = a(\text{Re } X + j \text{Im } X) = (a \text{Re } X) + j \cdot (a \text{Im } X)$$

$$aX = a(|X|e^{j \arg X}) = (a|X|) \cdot e^{j \arg X}$$

W ćwiczeniu wykorzystujemy własność liniowości, uwzględniając mnożnik wynikający z obecności bocznika dopiero przy obróbce wyników DFT. Gdyby wykorzystane

przekształcenie nie było liniowe, wówczas mnożniki te należałoby uwzględnić przed dokonaniem transformacji.

Obliczenie współczynnika zawartości wyższych harmonicznych

5. W nowej kolumnie obliczamy wartości skuteczne poszczególnych harmonicznych, korzystając ze wzoru (16).
6. Ze wzoru (15) wynika, że potrzebne będą kwadraty wartości skutecznych. Obliczamy je w kolejnej nowej kolumnie.
7. Obliczamy THD, wpisując do arkusza formułę odpowiadającą wzorowi (15).

Czynności z punktów 4–7 powtarzamy dla kolejnych zaimportowanych arkuszy. Jeżeli obliczenia były dokonywane w kolumnach na prawo od danych z programu Osc, to wystarczy teraz zaznaczyć te kolumny, skopiować do schowka i wkleić do pozostałych arkuszy w to samo miejsce – obliczenia powinny się wykonać automatycznie przy wykorzystaniu wprowadzonych przez nas formuł.

Teraz trzeba dodać nowy arkusz i utworzyć w nim tabelkę zawierającą:

- okres sterowania T_s (odczytany z wykresu);
- okres drgań własnych T (połowę tego okresu można odczytać z wykresu);
- obliczony na tej podstawie stosunek f_s/f ;
- wartość THD (przekopiowaną z odpowiedniego arkusza).

Na podstawie tabelki można już wygenerować wykres przedstawiający interesującą nas zależność.

2.4. Oczekiwana zawartość sprawozdania

Sprawozdanie powinno zawierać:

- tabelę wypełnioną w punktach 2 i 6;
- wykresy i wnioski z punktów 3, 4, 5 i 7;
- przykładowe przebiegi zarejestrowane w punkcie 9 (dla trzech przypadków – f_s równego, większego i mniejszego od f) oraz wnioski (punkt 10);
- tabelę wyników i wykres z punktu 11.

W katalogu sieciowym zespołu należy pozostawić pliki z zarejestrowanymi przebiegami.

3. 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.