PAlab_4 Wyznaczanie charakterystyk częstotliwościowych

Ćwiczenie ma na celu przedstawienie praktycznych metod wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych elementów dynamicznych.

1. Wprowadzenie

Jedną z podstawowych metod określania właściwości układów dynamicznych jest wyznaczanie ich charakterystyk częstotliwościowych. Charakterystyka częstotliwościowa opisuje odpowiedź układu na *wymuszenie harmoniczne* (sinusoidalne) o częstotliwości zmieniającej się w określonym zakresie (charakter fizyczny sygnału wejściowego i wyjściowego może być różny). Sygnał harmoniczny jest szczególnie przydatny jako sygnał testowy ponieważ kolejne punkty charakterystyki wyznaczane są oddzielnie, za każdym razem używając pełnej dopuszczalnej ze względu na nieliniowość amplitudy sygnału pomiarowego – wpływ zakłóceń jest zatem mniejszy niż przy metodach czasowych.

Zastosowanie charakterystyk częstotliwościowych

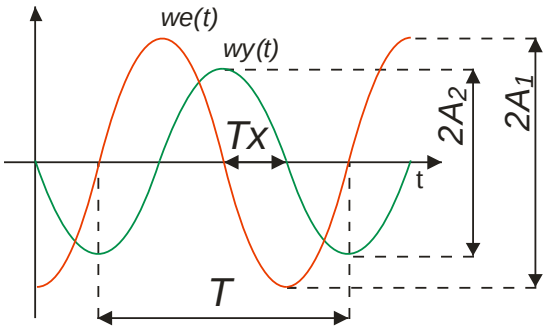
- Projektowanie układów regulacji
- Modelowanie obiektu
- Dobór częstotliwości próbkowania sygnału wyjściowego w układach dyskretnych

Doświadczalne wyznaczanie charakterystyk częstotliwościowych polega na znalezieniu zależności między amplitudami i fazami sygnałów wejściowego i wyjściowego w stanie ustalonym, gdy na wejście doprowadzony jest pomiarowy sygnał sinusoidalny o stałej amplitudzie i częstotliwości. Dokonanie tego rodzaju pomiarów przy różnych częstotliwościach pozwala znaleźć kolejne punkty charakterystyki; jeśli dokonamy tego w odpowiednim paśmie częstotliwości (teoretycznie w paśmie od f=0 do f=∞), otrzymana charakterystyka w pełni scharakteryzuje własności obiektu.

Do wykonania pomiarów konieczne jest użycie generatora przebiegów sinusoidalnych (najczęściej generatora sygnału elektrycznego) o regulowanej częstotliwości i amplitudzie sygnału. Sygnał wejściowy i wyjściowy obiektu należy podłączyć do urządzenia rejestrującego (oscyloskop, karta przetworników A/C, rejestrator pisakowy itp.) i na podstawie zarejestrowanych oscylogramów wyznaczyć stosunek amplitud |G(jω)| - wzór (1) i przesunięcie fazowe arg G(jω) - wzór (2) przy danej częstotliwości (rys 1).

$$|G(j\omega)| = M(\omega) = \frac{2A_2}{2A_1} \tag{1}$$

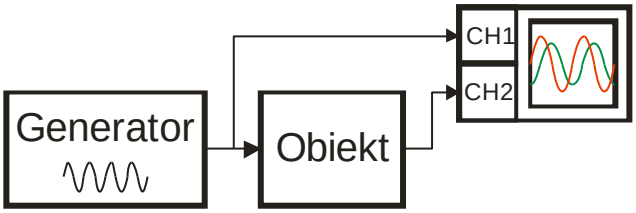
$$\varphi(\omega) = \arg G(j\omega) = -2\pi \frac{T_x}{T} \tag{2}$$



Rys. 1 Wyznaczanie modułu i przesunięcia fazowego na podstawie oscylogramów

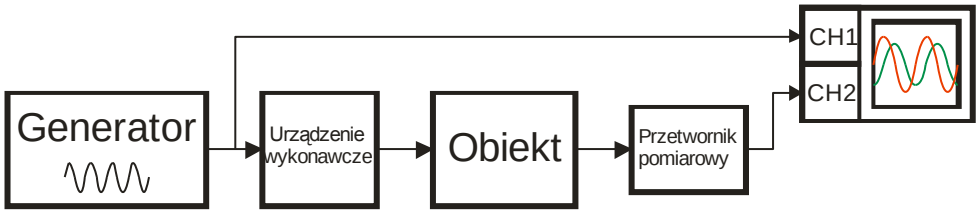
2. Układy pomiarowe do wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych

W najprostszym przypadku gdy mamy do czynienia z obiektem małej mocy o wejściu i wyjściu w postaci sygnału napięciowego układ pomiarowy do wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych przedstawiony został na rys 2:



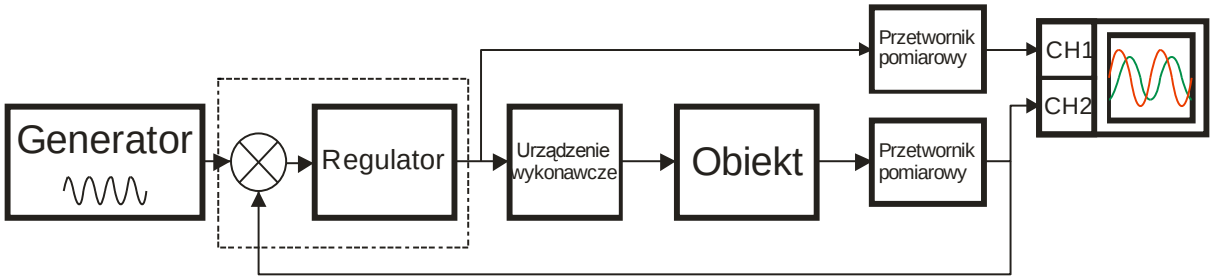
Rys. 2 Schemat blokowy układu do wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych

W praktyce sygnał z generatora sygnału elektrycznego ma zbyt małą moc żeby można go było podłączyć bezpośrednio do wejścia badanego obiektu. Konieczne jest jego wzmocnienie w elemencie wykonawczym, który dodatkowo zamienia sygnał napięciowy na inną, wymaganą do sterowania badanym obiektem wielkość np. na siłę, przemieszczenie, ciśnienie, przepływ itp. Dodatkowo sygnał wyjściowy z obiektu nie zawsze jest napięciowy; należy wówczas zastosować odpowiedni przetwornik pomiarowy (zakładamy że jego wpływ na wyniki pomiarów jest pomijalny). Ponieważ element wykonawczy jest połączony szeregowo z obiektem, zwykle wyznacza się wypadkową charakterystykę częstotliwościową tych elementów – rys 3.



Rys. 3 Schemat blokowy układu do wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych obiektu z urządzeniem wykonawczym na wejściu

Na rys 4 przedstawiono schemat blokowy układu do wyznaczanie charakterystyk częstotliwościowych obiektu pracującego w układzie zamkniętym z regulatorem liniowym. W tym przypadku generator działa na obiekt za pośrednictwem regulatora, który sterując poprzez urządzenie wykonawcze obiektem, wymusza na jego wyjściu sygnał zadany czyli przebieg sinusoidalny. W tym przypadku amplituda sygnału wyjściowego będzie miała stałą wartość, niezależną od częstotliwości sygnału z generatora. Zależna od częstotliwości będzie wartość sygnału na wejściu obiektu.



Rys. 4 Schemat blokowy układu do wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych obiektu w układzie zamkniętym z liniowym regulatorem

Układ ten nadaje się do badania obiektów **astatycznych**, które całkują sygnał wejściowy. W przypadku układu pomiarowego z rys. 3 składowa stała w sygnale na wejściu spowoduje ciągłe narastanie (lub opadanie) sygnału wyjściowego co uniemożliwia poprawny odczyt amplitudy oscylacji i przesunięcia fazowego. Dodatkowo może dojść do przekroczenia dopuszczalnych wartości sygnału wyjściowego lub innych sygnałów i w szczególności do uszkodzenia urządzenia. Układ pomiarowy z regulatorem odtwarza na wyjściu obiektu składową stałą sygnału z generatora: sygnał wyjściowy oscyluje wokół ustalonej wartości.

3. Praktyczne problemy pojawiające się podczas wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych

3.1 Dobór amplitudy sygnału wejściowego

Przy doborze amplitudy sygnału pomiarowego należy przede wszystkim zwrócić uwagą na nieliniowości występujące w układzie. Z doświadczenia wiemy że w otaczającym nas świecie zdecydowana większość zmiennych fizycznych nie może przyjmować dowolnie dużych wartości. Dlatego w każdym rzeczywistym obiekcie może pojawić się nieliniowość związana z nasyceniem sygnałów (Dodatek 1).

Często celowo wprowadza się nasycenie sygnału wejściowego lub innych sygnałów w obiekcie, w celu zabezpieczenia urządzenia przed uszkodzeniem (np. ograniczenie maksymalnego prądu płynącego przez uzwojenie silnika), czy też dla bezpieczeństwa obsługi (np. ograniczenie maksymalnej prędkości samochodu)

UWAGA:
W trakcie wyznaczania charakterystyki częstotliwościowej należy tak dobrać amplitudę sygnału wejściowego, aby żaden z sygnałów w badanym obiekcie nie uległ nasyceniu.

Zgrubnej oceny czy któryś z sygnałów uległ nasyceniu można dokonać na podstawie obserwacji kształtu sygnału wyjściowego. Przykładowo jeśli nasycenie pojawia się bezpośrednio na wyjściu obiektu to można je zobaczyć na oscylogramie (Dodatek 1/rys. 1b). W pewnych sytuacjach nasyceniu może ulec któryś z sygnałów ‘wewnątrz’ obiektu. Jeżeli sygnały te są niedostępne dla pomiarów wówczas o ewentualnym wystąpieniu nasycenia można wnioskować na podstawie obserwacji kształtu sygnału wyjściowego; wymaga to jednak analizy częstotliwościowej tego sygnału. Jeżeli w widmie pojawią się dodatkowe prążki o częstotliwościach będących całkowitymi wielokrotnościami częstotliwości sygnału wejściowego to oznacza, że któryś z sygnałów ulega nasyceniu. W takim przypadku należy zmniejszyć amplitudę sygnału wejściowego.

3.2 Zakres zmian częstotliwości sygnału wejściowego

Pewną trudność sprawia zazwyczaj określenie pasma częstotliwości, w którym trzeba dokonać pomiarów. Niekiedy zaleca się rozpoczynać pomiary od doświadczalnego wyznaczenia częstotliwości $f_{-\pi}$, przy której przesunięcie fazowe $\varphi = -\pi$. Następnie przeprowadza się pomiary dla częstotliwości z zakresu od 0 do $2f_{-\pi}$.

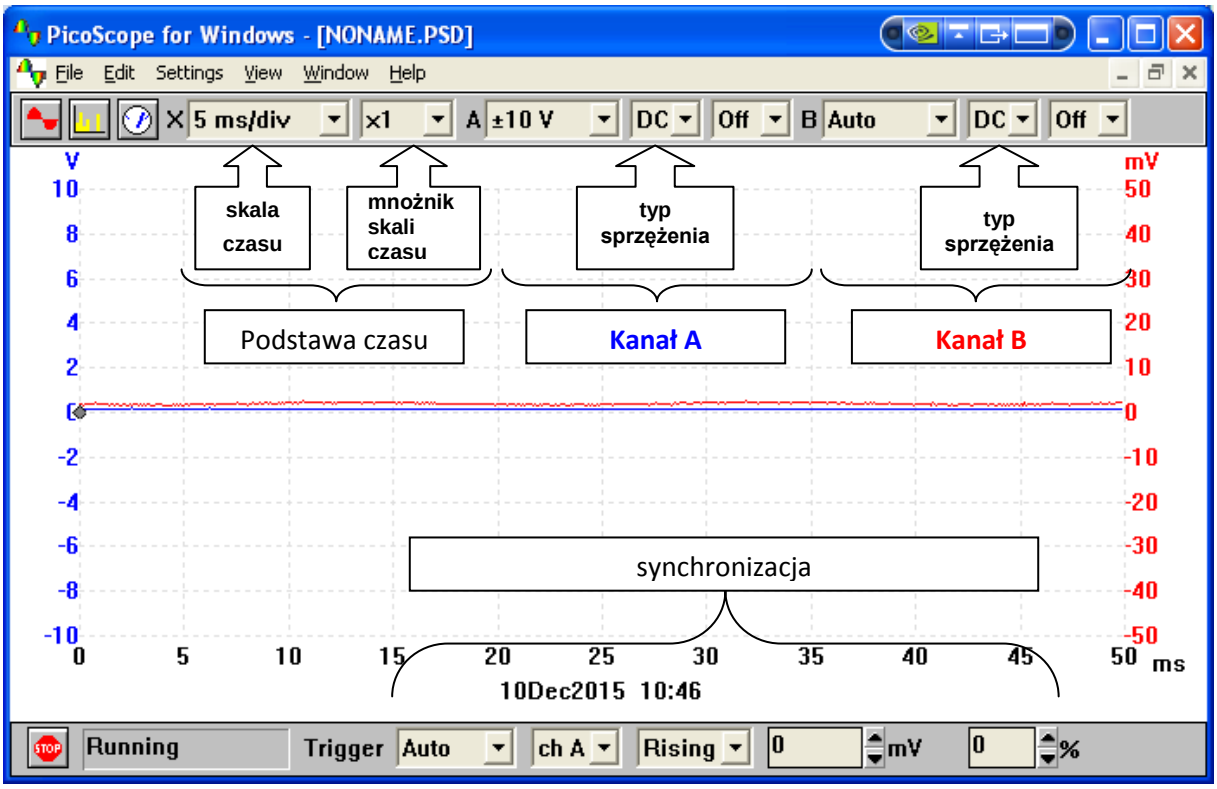
3.3 Dobór składowej stałej sygnału wejściowego

W wielu przypadkach sygnał sterujący nie może przyjmować wartości ujemnych (np. nie można dostarczyć ujemnej mocy do grzałki, zaworu ustawionego w zerowej pozycji nie da się bardziej zamknąć itp.). Wówczas do sinusoidalnego sygnału wymuszenia należy dodać składową stałą, o wartości odpowiadającej typowemu punktowi pracy urządzenia (lub w połowie zakresu liniowości) . Zwykle towarzyszy temu pojawienie się składowej stałej w odpowiedzi badanego obiektu – Dodatek 1/rys. 2. W przypadku sygnałów z niezerową składową stałą może pojawić się problem z wyznaczeniem czasu Tx (wzór (2)). W tej sytuacji należy skorzystać z metody przedstawionej w dodatku 2.

UWAGA
Składowa stała w sygnale wejściowym nie zmienia charakterystyki częstotliwościowej

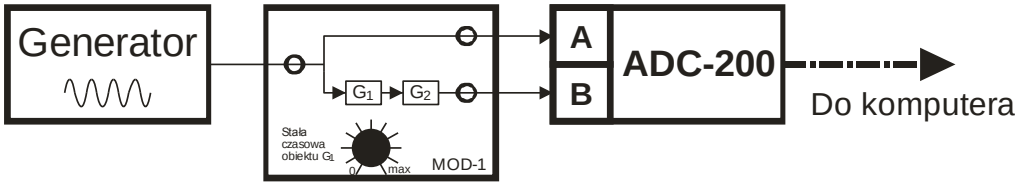
4. Przebieg ćwiczenia

1. Włączyć zasilanie przystawki oscyloskopowej ADC-200;
   wejścia pomiarowe A i B przystawki pozostawić odłączone.
2. Uruchomić program PicoScope. Ustawić parametry oscyloskopu zgodnie z rys. 1.



Rys 1 Ustawienia początkowe parametrów oscyloskopu

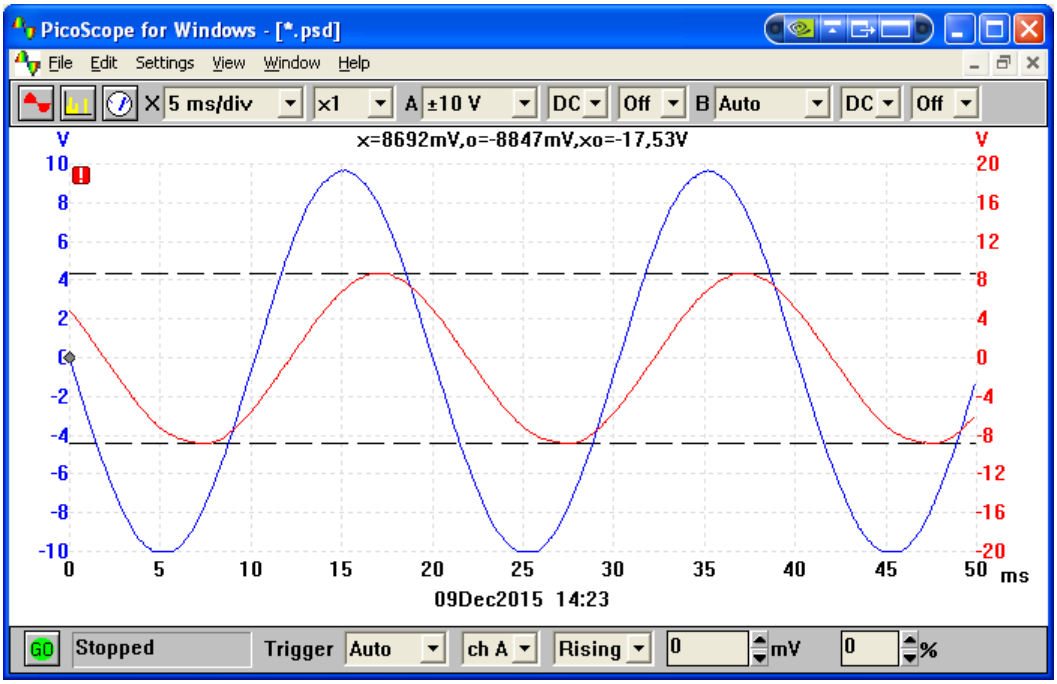
3. Wykonać procedury kalibracji offsetów; polecenie Settings/Offset null/Chanell x.
4. Połączyć układ pomiarowy zgodnie z rys.2.



Rys.2 Schemat blokowy układu do wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych

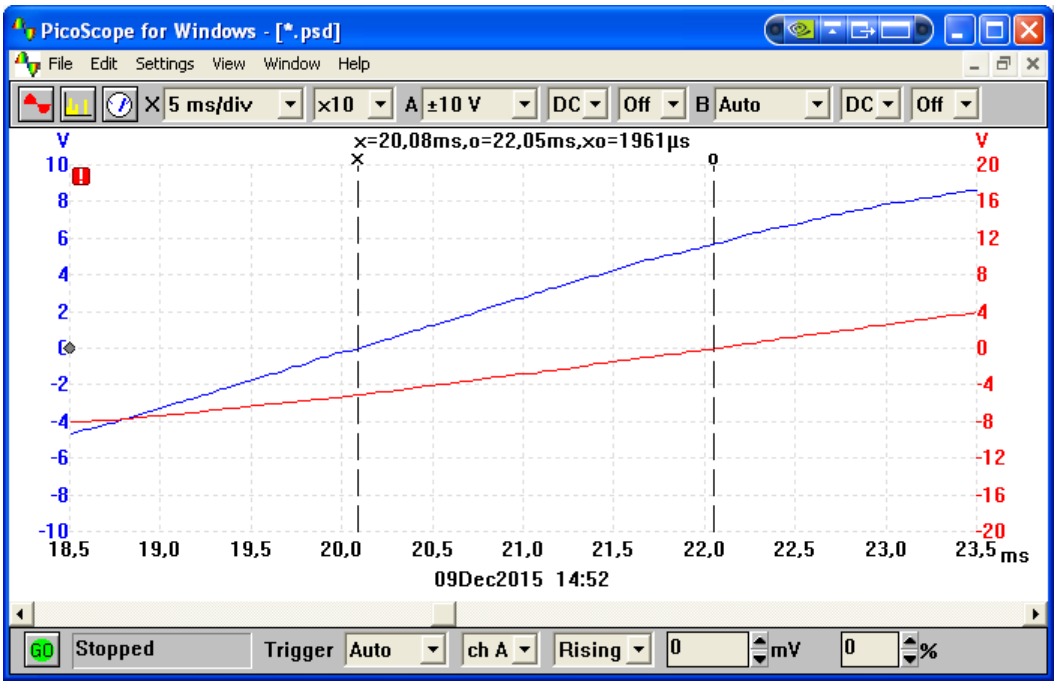
5. Ustawić stałą czasową transmitancji G_1 na '0' – wówczas $G_1(S)=1$; w tym przypadku identyfikowana będzie transmitancja G_2.
6. Poprosić prowadzącego o sprawdzenie połączeń.
7. Włączyć zasilanie obiektu.
8. Włączyć zasilanie generatora. Przyciskiem 'WAVE' wybrać rodzaj przebiegu wyjściowego z generatora – przebieg sinusoidalny. Ustawić częstotliwość na 50 Hz (pokrętło i przyciski ← → w prawym górnym narożniku generatora). Na monitorze pojawią się przebiegi sygnału z generatora (kanał A – niebieski) i sygnału na wyjściu obiektu (kanał B – czerwony).
   UWAGA
   Jeśli w trakcie pomiarów przebiegi nie będą sinusoidalne należy poprosić prowadzącego.
9. Przy pomocy pokrętła 'AMPL' w dolnej części generatora ustawić amplitudę sygnału z generatora na 10 V – odczyt z oscylogramu.

10. Nacisnąć przycisk ‘STOP’ w lewym dolnym narożniku okna oscylogramu. Następnie umieścić na oscylogramie poziome linie naciskając **prawy** przycisk myszy (rysowanie linii: Dodatek 3). Przesunąć strzałkami linie tak aby przechodziły przez maksima i minima sygnału na wyjściu obiektu – rys.3.



Rys.3 Ustawienia kursorów i odczyt max i min sygnału w kanale B

11. Odczytać wartość międzyszczytową (wielkość xo nad oscylogramem). Wynik zapisać w tabeli 1 - kolumna ‘$2A_2$’.
12. Narysować pionowe linie w punktach, w których narastające zbocza sygnałów osiągają wartość 0. Linię ‘ x’ na sygnale wejściowym (niebieski), linię ‘o’ na sygnale wyjściowym (czerwony). W celu zwiększenia precyzji ustawienia linii należy ustawić mnożnik skali czasu na ‘x1 0’ – rys. 4.



Rys. 4 Ustawienia linii pionowych do pomiaru czasu opóźnienia

13. Odczytać czas pomiędzy liniami (wielkość xo nad oscylogramem). Wynik zapisać w tabeli 1 – kolumna T_{X1}.
14. Powtórzyć pomiar czasu dla linii umieszczonych na opadających zboczach sygnałów. Wynik zapisać w tabeli 1 – kolumna T_{X2}.
15. Ustawić mnożnik skali czasu na ‘x1’.
16. Nacisnąć przycisk ‘GO’ w lewym dolnym narożniku okna oscylogramu.
17. Powtórzyć punkty od 9 do 16 dla wszystkich częstotliwości z tabeli 1 . Skalę czasu (Rys. 1) dobierać tak aby na oscylogramie widoczne były przynajmniej po dwa minima i maksima przebiegu sygnału wyjściowego.
    UWAGA
    1. Dla częstotliwości powyżej 100 Hz ustawić w obu kanałach typ sprzężenia na ‘AC’
    2. Wyniki pomiarów na bieżąco wpisywać do programu Matlab lub Excel
18. Na podstawie wykonanych pomiarów i obliczeń wykreślić charakterystyki Bodego obiektu o transmitancji G_2
19. Poprosić prowadzącego o sprawdzenie wyników pomiarów i ustawienie stałej czasowej dla transmitancji G_1.
20. Powtórzyć pomiary (punkty od 10 do 17) dla szeregowego połączenia transmitancji G_1 i G_1.
21. Wyłączyć zasilanie: generatora, obiektu i przystawki oscyloskopowej.

	Transmitancja G_2									
LP	Ustawienia		Pomiary			Obliczenia				
	f	$2A_1$	$2A_2$	T_{X1}	T_{X2}	T	$T_{X\ śr}$	$\|G(\omega)\|$	$\varphi(\omega)$	Uwagi
	[Hz]	[V]	[V]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[V/V]	[rad]	
1	5									
2	10									
3	20									
4	50									
5	100									
6	200									
7	500									
8	1k									
9	2k									
10	5k									
11	10k									
12	20k									
13	50k									
14	100k									
15	200k									
	Transmitancja G_1 G_2									
1	5									
2	10									
3	20									
4	50									
5	100									
6	200									
7	500									
8	1k									
9	2k									
10	5k									
11	10k									
12	20k									
13	50k									
14	100k									
15	200k									

Tabela 1 – Znaczenie symboli – rys.1

Sprawozdanie

Do obliczeń i tworzenia wykresów wykorzystać program Matlab lub Excel.

1. Na podstawie wykonanych pomiarów i obliczeń wykreślić charakterystykę amplitudowo-fazową (Nyquist'a) i charakterystyki Bodego obiektu o transmitancji G_2
2. Na podstawie uzyskanych w punkcie 1 charakterystyk określić jaki to jest obiekt. Podać transmitancję i wyznaczyć parametry. Wartości parametrów należy określić na podstawie charakterystyk asymptotycznych dorysowanych na wykresach wyznaczonych charakterystyk logarytmicznych.
3. Na podstawie wykonanych pomiarów i obliczeń wykreślić charakterystykę amplitudowo-fazową (Nyquist'a) i charakterystyki Bodego obiektu złożonego z szeregowego połączenia transmitancji G_1 i G_2.
4. Wiedząc że badany obiekt składa się z szeregowego połączenia dwóch bloków wyznaczyć charakterystyki Bodego bloku G_1.
   Wskazówka:
   Należy od uzyskanych w punkcie 3 charakterystyk odjąć charakterystyki z punktu 1.
5. Na podstawie uzyskanych w punkcie 4 charakterystyk określić jaki to jest obiekt. Podać transmitancję i wyznaczyć parametry. Wartości parametrów należy określić na podstawie charakterystyk asymptotycznych dorysowanych na wykresach wyznaczonych charakterystyk logarytmicznych.
6. Podać transmitancję wypadkową obiektu . Na podstawie transmitancji wykreślić charakterystykę amplitudowo-fazową (Nyquist'a) i charakterystyki Bodego (na wspólnym rysunku z punktu 3. Określić czy otrzymane charakterystyki pokrywają się (jeśli nie to dlaczego)
7. Na podstawie wykreślonych charakterystyk Bodego określić czy badany obiekt jest minimalnofazowy czy nieminimalnofazowy; odpowiedź uzasadnić [3].

Pytanie dodatkowe dla dociekliwych:

1. Czy do wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych można użyć innego niż sinusoida sygnału wejściowego (np. przebieg prostokątny lub trapezoidalny) ?
   Wskazówka: [1] – rozdział 3.3

Literatura

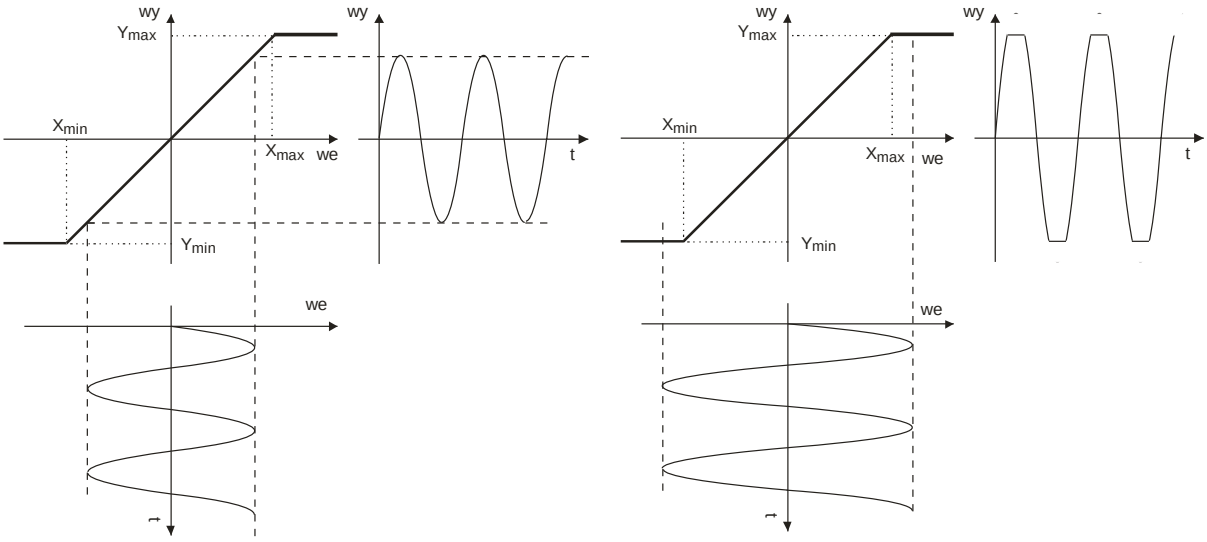
[1] W. Findeisen: „Technika regulacji automatycznej", PWN, Warszawa 1978.
[2] Jerzy Pułaczewski: „Podstawy regulacji automatycznej"
[3] Andrzej Markowski: *„Automatyka w pytaniach i odpowiedziach"*, Warszawa 1979, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne

Dodatek 1

Nasycenie

Zjawisko *nasycenia* ma miejsce wtedy, gdy po przekroczeniu przez sygnał wejściowy pewnej wartości ustaje przyrost sygnału wyjściowego. Analityczny opis jest wtedy następujący:

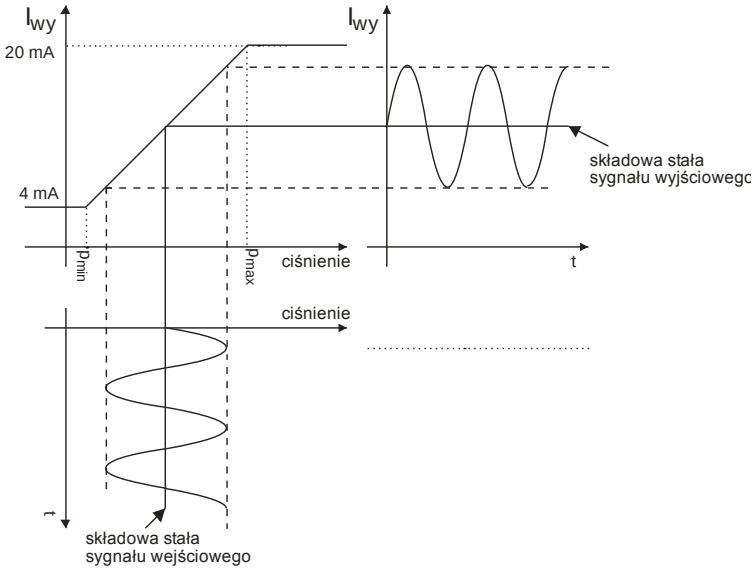
$$wy = \begin{cases} we;\ X_{min} \le we \le X_{max} \\ Y_{max}; \quad X_{max} < we \\ Y_{min}; \quad we < X_{min} \end{cases}$$



a) sygnał wejściowy w zakresie liniowym b) sygnał wejściowy poza zakresem liniowym

Rys.1 Wpływ nasycenia na kształt sygnału wyjściowego w zależności od wartości sygnału wejściowego

Nieliniowość charakterystyki obiektu nie musi być symetryczna względem początku układu współrzędnych. Na rys 2 przedstawiono charakterystykę statyczną przetwornika pomiarowego ciśnienia z wyjściem prądowym. W tym przypadku sygnał wyjściowy przyjmuje wyłącznie wartości większe od zera z przedziału 4-20 mA. Dodatkowo zakres zmian sygnału wejściowego został ograniczony do wartości większych od zera.

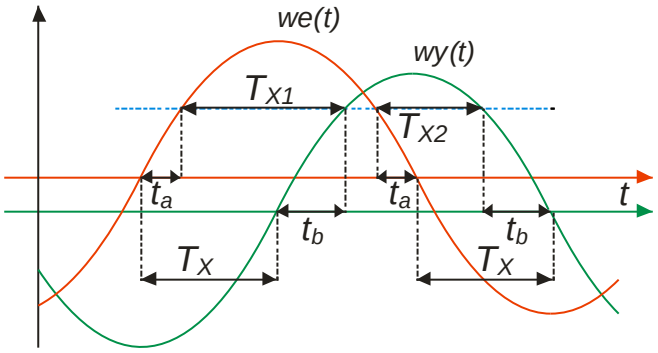


Rys. 2 Charakterystyka statyczna przetwornika pomiarowego z wyjściem prądowym 4-20 mA

Dodatek 2

Wyznaczanie przesunięcia fazowego w przypadku sygnałów z niezerową składową stałą

Pomiar czasu opóźnienia T_X wymaga precyzyjnego określenia momentów w których badane sygnały mają jednakowe fazy. Jeśli analizowane sygnały mają różne składowe stałe może to być kłopotliwe. W takim przypadku do wyznaczenia czasu T_X można skorzystać z zależności (3) – wyprowadzenie poniżej.



Rys. 1 Wyznaczanie przesunięcia fazowego w przypadku sygnałów z niezerową składową stałą

Na podstawie rys. 1 można napisać układ równań (1):

$$\begin{cases} T_X + t_b = t_a + T_{X1} \\ T_X + t_a = t_b + T_{X2} \end{cases} \tag{1}$$

Dodając powyższe równania stronami otrzymujemy (2):

$$2\,T_X + t_a + t_b = T_{X1} + T_{X2} + t_b + t_a \tag{2}$$

Ostatecznie po przekształceniu otrzymujemy (3):

$$T_X = \frac{T_{X1} + T_{X2}}{2} \tag{3}$$

Jak widać wyznaczony czas T_X nie zależy od wartości składowych stałych przebiegów i przyjętego poziomu na którym dokonujemy pomiarów T_{X1} i T_{X2} (niebieska linia na rys.1). W praktyce ze względu na szumy pomiarowe najlepiej jest przyjąć poziom na którym dokonujemy pomiarów blisko miejsca w którym sygnały mają maksymalne stromości.

Dodatek 3

Rysowanie linii pomocniczych na wykresie

Aby dodać pionową linię:

1. Przesuń kursor w okolice miejsca w którym ma znaleźć się linia, zaczynając w górnej części okna.
2. Naciśnij i przytrzymaj wciśnięty lewy przycisk myszy
3. Przeciągnij myszą w dół
4. PicoScope wyświetla pionową linijkę
5. Przesuń mysz lewo lub w prawo , aby ustawić żądaną pozycję.
6. Zwolnij przycisk myszy

Aby dodać poziomą linię:

1. Przesuń kursor w okolice miejsca w którym ma znaleźć się linia , w pobliżu lewej strony okna
2. Naciśnij i przytrzymaj wciśnięty **prawy** przycisk myszy
3. Przeciągnij mysz w prawo
4. PicoScope wyświetla poziomą linijkę
5. Przesuń mysz w górę lub w dół , aby ustawić żądaną pozycję.
6. Zwolnij przycisk myszy

Jeżeli są dwie osie Y, to naciśnięcie lewego przycisku myszy przy rysowaniu przypisuje linię do osi z lewej strony, natomiast naciśnięcie prawego przycisku myszy przy rysowaniu przypisuje linię do osi z prawej strony (na końcu linii pojawia się znacznik z kolorem osi do której została ona przypisana)

Można dodać maksymalnie dwie linie; dodawanie kolejnej spowoduje usunięcie najstarszej.
Program PicoScope wyświetla aktualne pozycje linii. Jeśli dwie linie są na tej samej osi , PicoScope wyświetla również różnicę wartości pomiędzy nimi (wielkość ‘xo’ w górnej części ekranu)

Narysowane linie można przemieszczać przy pomocy strzałek na klawiaturze. Aby wybrać linię która będzie przesuwana należy ustawić kursor w pobliżu wybranej linii i ‘kliknąć’ **lewym** przyciskiem myszy – linia przesunie się tak że będzie przechodzić przez aktualne położenie kursora. Następnie przy pomocy strzałek na klawiaturze można precyzyjnie ustawić położenie linii.