POLITECHNIKA OPOLSKA
Opole University of Technology

KATEDRA MECHANIKI I PODSTAW KONSTRUKCJI MASZYN
Department of Mechanics and Machine Design

MECHATRONIKA
MECHATRONICS

Instrukcja do ćwiczeń laboratoryjnych
Laboratory manual for students

Badanie zachowania się układu regulacji z regulatorem PID

Behavior of the PID control system

Opracował: Dr inż. Roland Pawliczek

Opole 2009

Publikacja na prawach rękopisu

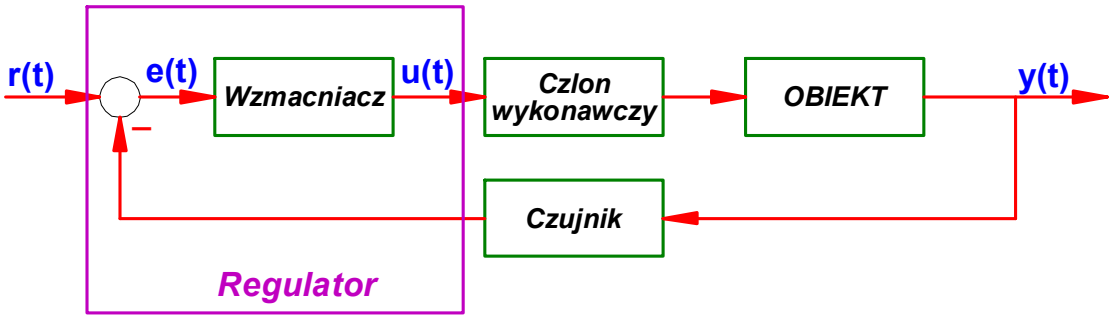
1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z zachowaniem się układu regulacji z regulatorem typu PID, metodami doboru nastaw regulatora oraz badaniem ich wpływu na pracę układu.

2. WPROWADZENIE

Regulator automatyczny jest urządzeniem, którego zadaniem jest sterowanie procesem. W układach z ujemnym sprzężeniem zwrotnym regulator wyznacza zadaną wartość wielkości sterującej na podstawie uchybu regulacji, czyli różnicy pomiędzy wartością pomierzoną a wartością zadaną tej wielkości . Na rysunku 1 przedstawiono schemat blokowy układu sterowania przemysłowego, który składa się z regulatora automatycznego, urządzenia wykonawczego, obiektu i czujnika (element pomiarowy). Sygnał wyjściowy z regulatora podawany jest na urządzenie wykonawcze, takie jak zawór, silnik elektryczny, siłownik hydrauliczny lub pneumatyczny. Urządzenie wykonawcze dokonuje przestawienia punktu pracy obiektu, stosownie do sygnału sterującego po to aby sygnał wyjściowy pokrywał się z sygnałem zadanym.

Czujnik lub element pomiarowy jest urządzeniem, które przetwarza zmienną wyjściową na inną odpowiednią zmienną, taką jak przesunięcie, ciśnienie lub napięcie, które może zostać użyte do porównania wyjścia z wejściowym sygnałem zadanym. Element ten znajduje się w pętli sprzężenia zwrotnego układu regulacji. Sygnał zadany również musi być przetworzony do tych samych jednostek w jakich jest sygnał sprzężenia z czujnika lub elementu pomiarowego.



e(t) = r(t) – y(t)

r(t) - sygnał zadany; y(t) - sygnał wyjściowy; e(t) – uchyb; u(t) - sygnał sterujący

Rys.1 Schemat układu regulacji:

3. KLASYFIKACJA I DZIAŁANIE REGULATORÓW

Najbardziej znanym regulatorem używanym w praktyce jest regulator PID, w którym w nazwie znajdują się litery pochodzące od rodzajów sterowania jakie on w sobie zawiera: proporcjonalne P, całkujące I, różniczkujące D. Stosowane są również wersje uproszczone regulatora PID składające się z wybranych elementów składowych tego regulatora. W większości regulatorów przemysłowych jako źródła mocy wykorzystywane jest napięcie.

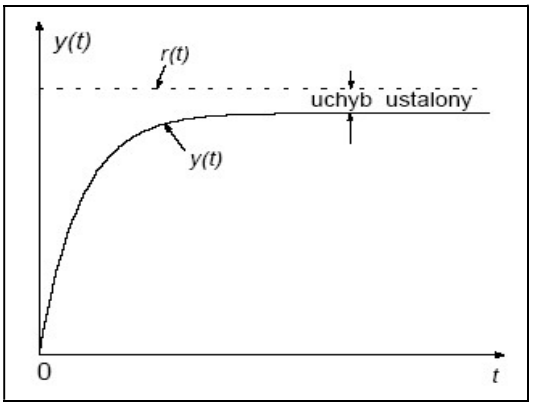
3.1. Regulator proporcjonalny P

Regulatory proporcjonalne P wytwarzają sygnał sterujący, który w każdej chwili czasu jest proporcjonalny do wartości sygnału uchybu regulacji. Funkcja transmitancji regulatora proporcjonalnego ma postać

$$G(s) = K_P, \tag{1}$$

gdzie K_P jest wzmocnieniem regulatora.

Zwiększanie wartości wzmocnienia powoduje wzrost szybkości reakcji układu, jednak zbyt duże wartości wprowadzają układ w oscylacje. Stosowanie regulacji proporcjonalnej nie niweluje uchybu w stanie ustalonym (Rys.2.)



Rys.2. Uchyb w stanie ustalonym dla regulacji typu P

3.2. Regulator całkujący I

Regulatory całkujące wytwarzają sygnał sterujący będący całką sygnału uchybu regulacji. Regulatory typu I stosuje się wtedy gdy regulator typu P nie zapewnia utrzymywania zgodności wartości wielkości regulowanej z wartością zadaną, jeżeli na układ działają zakłócenia. Sterowanie całkujące eliminuje uchyb w stanie ustalonym pojawiający się w odpowiedzi na wymuszenie skokowe. Jest to ważne polepszenie jakości sterowania w stosunku do sterowania proporcjonalnego.
Funkcja transmitancji regulatora całkującego ma postać

$$G(s) = \frac{K_i}{s} = \frac{1}{T_i s}, \tag{2}$$

gdzie K_i jest wzmocnieniem regulatora, T_i – stała czasowa całkowania.
Regulator całkujący powoduje znaczne wydłużenie czasu regulacji (w stosunku do układu z regulatorem proporcjonalnym) oraz także łatwo prowadzi do niestabilności układu, w którym pracuje. Sygnał wyjściowy regulatora narasta w czasie. W początkowej fazie pracy może być zbyt mały aby zlikwidować uchyb regulacji. Dlatego regulatory całkujące nadają się do likwidowania zakłóceń długotrwałych i długookresowych.

3.3. Regulator proporcjonalno-całkujący PI

Dzięki zastosowaniu w regulatorach typu PI elementu całkującego, uchyb ustalony w układach z takimi regulatorami może być sprowadzony do zera. Jeśli sterowanie całkujące dodawane jest do regulatora, wówczas tak długo jak długo występuje sygnał uchybu powstaje sygnał sterujący w celu wyeliminowania tego uchybu..
Funkcja transmitancji regulatora proporcjonalno-całkującego ma postać

$$G(s) = K_P\left(1 + \frac{1}{T_i s}\right). \tag{3}$$

Czas T_i odpowiada takiej wartości przy której sygnał wyjściowy regulatora uzyskuje wartość dwukrotnie większą niż w regulatorze typu P. Jest to tzw. czas zdwojenia, który odpowiada stałej czasowej całkowania..
Czas regulacji w układach z regulatorami typu PI jest wprawdzie dwukrotnie większy niż w układach z regulatorami typu P, ale jest znacznie krótszy niż w układach z regulatorami typu I.
Regulatory PI stosowane są między innymi w układach regulacji prędkości obrotowej.

3.4. Regulator proporcjonalno-różniczkujący PD

Regulator PD jest zalecany w sytuacjach szybkich zmian sygnałów zakłócających. Część różniczkująca zwiększa korekcyjne działanie regulatora w momencie narastania błędu i działa stabilizująco. Umożliwia to wzmocnienie korekcji proporcjonalnej.
Funkcja transmitancji regulatora proporcjonalno-różniczkującego ma postać

$$G(s) = K_P\left(1 + T_d s\right), \tag{4}$$

gdzie T_d jest stałą czasową różniczkowania.
Sterowanie różniczkujące dodane do regulatora proporcjonalnego powoduje, że regulator ma większą wrażliwość. Zaletą użycia sterowania różniczkującego jest to, że reaguje ono na przyrost zmian uchybu wykonawczego i wyznacza odpowiednią poprawkę na sterowanie, która zabezpiecza przed powstaniem zbyt dużej amplitudy oscylacji sygnału wykonawczego uchybu. Sterowanie różniczkujące uprzedza sygnał wykonawczy uchybu, inicjuje wcześniejszą akcję korekcyjną co powoduje wzrost stabilności układu. Chociaż sterowanie różniczkujące nie wpływa bezpośrednio na uchyb w stanie ustalonym, to wprowadza tłumienie do układu i pozwala na użycie większej wartości wzmocnienia K_P, którego zwiększenie poprawia dokładność w stanie ustalonym.

3.5. Regulator proporcjonalno-całkująco-różniczkujący PID

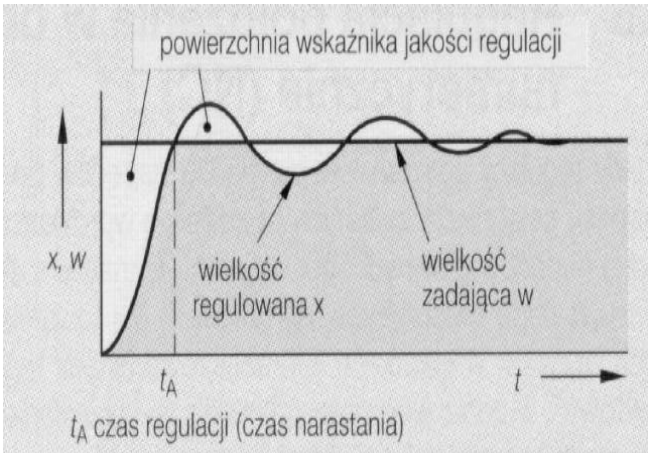
Regulatory PID należą do najbardziej uniwersalnych. Człon P regulatora natychmiast wzmacnia odchyłkę regulacji tworząc sygnał sterujący. Człon I zmienia sygnał tak długo, aż odchyłka regulacji wyzeruje się. Człon D reaguje na zmiany wartości odchyłki w czasie (dla ustalonej wartości odchyłki człon D nie reaguje).

$$G(s) = K_P\left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right). \tag{5}$$

W wyniku sumowania sygnałów wyjściowych tych regulatorów uzyskuje się regulator uniwersalny, likwidujący bardzo dobrze zarówno zakłócenia krótko- jak i długotrwałe. Nie zaleca się jednak stosowania go w układach z silnymi szumami (krótkie, losowe zakłócenia np. przy regulacji poziomu cieczy), ze względu na możliwość wzmacniania tych szumów.

4. DOBÓR NASTAW REGULATORA PID

Od układu regulacji oczekuje się jak najszybszego osiągnięcia nowej wartości zadanej przez wartość rzeczywistą sygnału, pojawienie się jak najmniejszych przeregulowania i szybkie wytłumienie ewentualnych oscylacji w układzie (Rys.3.).



czas narastania (regulacji) t_A *– czas od chwili wymuszenia do chwili uzyskania wartości zadanej po raz pierwszy*

czas ustalania t_U *– czas od chwili podania wymuszenia do chwili uzyskania uchybu o wartości 10% wielkości zadanej*

powierzchnia wskaźnika jakości regulacji *– jest miarą jakości regulacji*

Rys.3. Przebieg sygnału w układzie regulacji

Należy tak dobrać parametry regulatorów, aby powierzchnia wskaźnika regulacji była jak najmniejsza. Zbyt duże wartości wzmocnienia K_P i zbyt krótkie stałe czasowe całkowania T_i prowadzą do niestabilnej pracy układu regulacji.
Tabela 1 przedstawia ogólny opis wpływu poszczególnych parametrów regulatora PID na odpowiedź zamkniętego układu regulacji.

Tabela 1. Wpływ parametrów regulatora PID na odpowiedź układu regulacji

	Czas narastania	**Przeregulowanie**	**Czas ustalania**	**Uchyb w stanie ustalonym**
K_P	Zmniejszenie	Zwiększenie	Mała zmiana	Zmniejszenie
K_i	Zmniejszenie	Zwiększenie	Zwiększenie	Eliminacja
K_d	Mała zmiana	Zmniejszenie	Zmniejszenie	Mała zmiana

Sterowanie proporcjonalne z nastawą K_P ma wpływ na zmniejszanie czasu narastania i będzie zmniejszało uchyb w stanie ustalonym, lecz nigdy nie będzie go eliminowało. Sterowanie całkujące z nastawą K_i ma wpływ na eliminowanie uchybu w stanie ustalonym, lecz pogarsza odpowiedź w stanie przejściowym. Sterowanie różniczkujące z nastawą K_d ma wpływ na zwiększenie stabilności układu, zmniejszając przeregulowanie i poprawiając odpowiedź przejściową.

Do doboru nastaw regulatora PID może być wykorzystana metoda eksperymentalna Zieglera i Nicholsa. Metoda ta opiera się na wyznaczaniu odpowiedzi układu regulacji na granicy stabilności i jej podstawą jest określenie krytycznego wzmocnienia, przy którym układ wpada oscylacje o stałej amplitudzie. Wzmocnienie to może być znalezione eksperymentalnie, wymaga się wówczas zwiększania wzmocnienia w układzie zamkniętym aż na wyjściu pojawią się oscylacje o stałej amplitudzie. Jest to w niektórych zastosowaniach praktycznych bardzo niebezpieczna operacja. Jednak z wykorzystaniem symulacji komputerowych metoda ta może być skutecznie weryfikowana.

W celu wyznaczenia nastaw należy wykorzystać wzmocnienie K_P układu regulacji. Można to uzyskać wstawiając bardzo duże wartości czasu $T_i=\infty$ ($K_i=0$) i $T_d=0$. Następnie należy postępować według następujących kroków:

1. wybiera się regulator P i zmienia się wartość wzmocnienia K_P tak długo, aż wystąpią oscylacje niegasnące → K_{PKR}
2. mierzy się okres tych oscylacji T_{OSC}
3. oblicza się nastawy regulatora:

- kryterium I: minimum czasu regulacji:

  regulator P $\quad K_P = 0{,}50K_{PKR}$

  regulator PI $\quad K_P = 0{,}45K_{PKR} \quad T_i = 0{,}85T_{OSC}$

  regulator PID $\quad K_P = 0{,}60K_{PKR} \quad T_i = 0{,}50T_{OSC} \quad T_d = 0{,}12T_{OSC}$

- kryterium II: aperiodyczności przeregulowania (brak oscylacji):

  regulator P $\quad K_P = 0{,}20K_{PKR}$

  regulator PI $\quad K_P = 0{,}15K_{PKR} \quad T_i = 0{,}40T_{OSC}$

  regulator PID $\quad K_P = 0{,}25K_{PKR} \quad T_i = 0{,}33T_{OSC} \quad T_d = 0{,}5T_{OSC}$

5. PRZEBIEG ĆWICZENIA

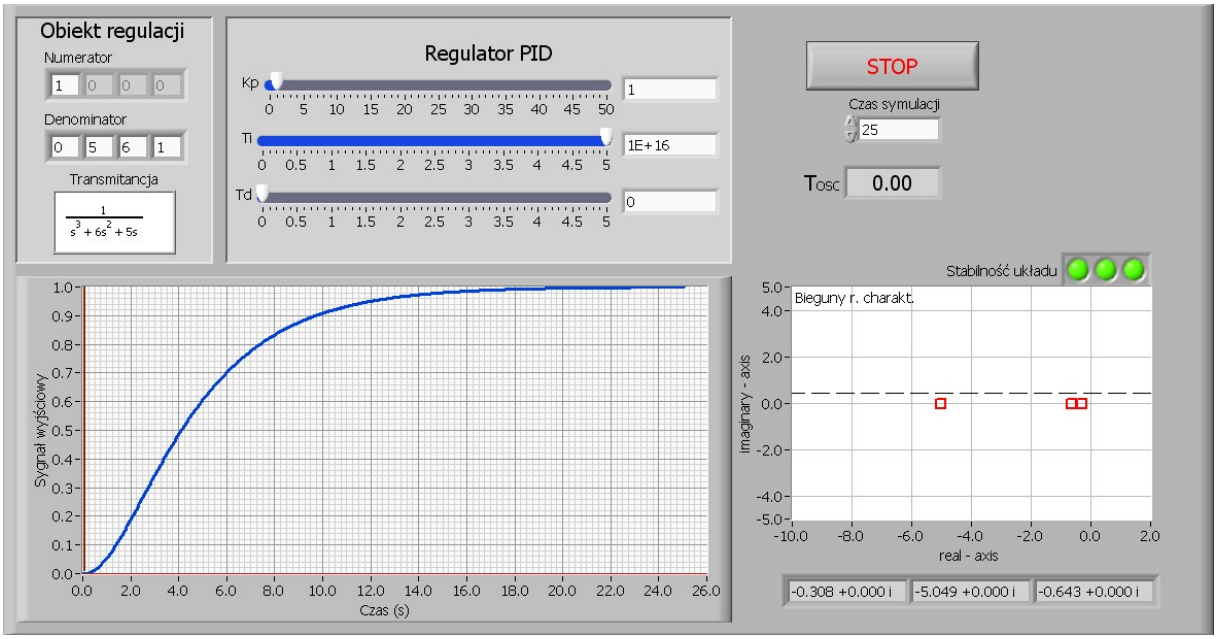
5.1. Program symulacyjny

Do doboru nastaw regulatora PID według opisanej metody służy program **regulator_pid.vi**, który został utworzony za pomocą LabVIEW. Rysunek 4 przedstawia interfejs użytkownika programu.

Obiekt regulacji definiowany jest za pomocą jego funkcji transmitancji poprzez podanie współczynników wielomianów **numeratora** i **denominatora** transmitancji obiektu. Postać funkcji transmitancji jest wyświetlana po zadaniu wartości współczynników i uruchomieniu programu.

Parametry **regulatora PID** w postaci współczynnika wzmocnienia proporcjonalnego K_P, stałej czasowej całkowania T_i (czasu zdwojenia) i stałej czasowej różniczkowania T_d zadawane są za pomocą suwaków lub mogą być wpisywane w oknie numerycznym obok suwaków. Domyślnie przyjmowane są wartości $\mathbf{K_P=1}$, $\mathbf{T_i=1E+16}$, $\mathbf{T_d=0}$. Określa to przypadek, kiedy wyłączone są człony całkujący i różniczkujący regulatora, a aktywny pozostaje tylko człon proporcjonalny.

<u>Uwaga:</u> przed przystąpieniem do ćwiczenia takie wartości muszą być wprowadzone jako początkowe – w innym przypadku należy je wprowadzić w polach numerycznych obok suwaków.



Rys. 4. Interfejs użytkownika programu **regulator_pid.vi**

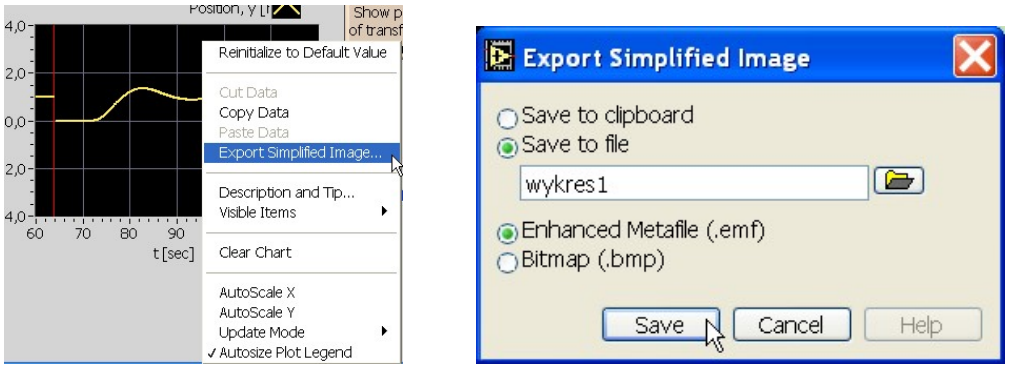
Zachowanie się obiektu w układzie regulacji obserwowane jest za pomocą **Odpowiedzi skokowej** oraz wykresu **Bieguny**. Wykres **Bieguny** przedstawia położenie biegunów równania charakterystycznego, które umożliwia określenie stanu stabilności krytycznej układu regulacji. Bieguny układu są wyświetlane na wykresie i w postaci tablicy, a dodatkowy wskaźnik **Stabilność układu** w postaci graficznej (zielone diody) zmienia swój kolor na czerwony po przekroczeniu wzmocnienia krytycznego. Podczas zmiany wartości parametrów układu regulacji użytkownik może na bieżąco obserwować położenie biegunów i oceniać stabilność układu.

Na wykresie odpowiedzi skokowej znajdują się dwa kursory: czerwony ***Kursor 1*** i zielony ***Kursor 2***. Użytkownik może przemieszczać je wzdłuż krzywej wykresu uzyskując aktualne położenie kursora w okienku pod wykresem.

Klawisz **STOP** umożliwia zatrzymanie programu.

Możliwe jest zapisanie wykresów w postaci plików graficznym BMP. Wykresy mogą być zapisane na dysku za pomocą menu kontekstowego, które wywoływane jest za pomocą kliknięcia prawym

klawiszem myszki na wykresie. Zapis na dysk lub do schowka (clipboard) odbywa się za pomocą opcji ***Export Simplified Image...*** i podaniu nazwy i lokalizacji dla zapisywanego obrazu.



Rys. 5. Zapis wykresu do pliku graficznego

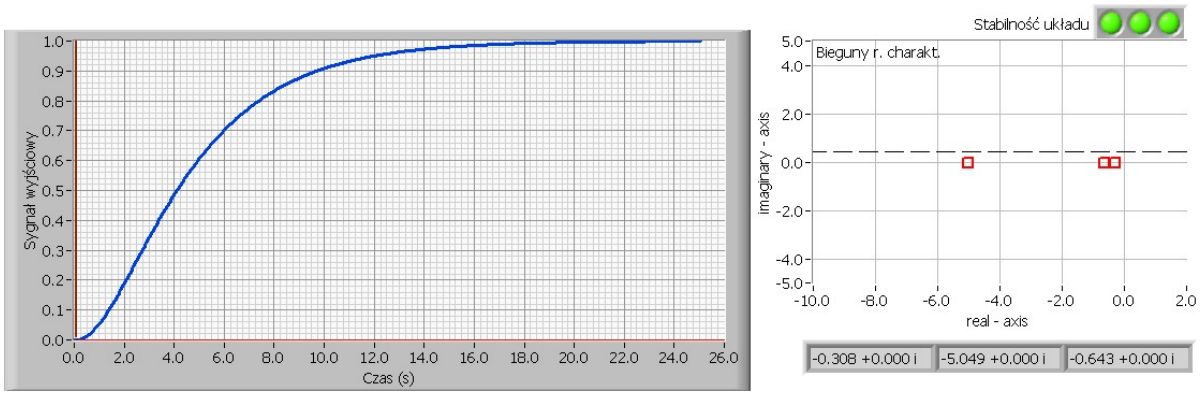
5.2. Badanie zachowania się obiektu regulacji

Przebieg ćwiczenia przedstawiony zostanie w oparciu o analizę przykładowego obiektu, którego funkcja transmitancji ma postać

$$\frac{1}{s^3 + 6s^2 + 5s}.$$

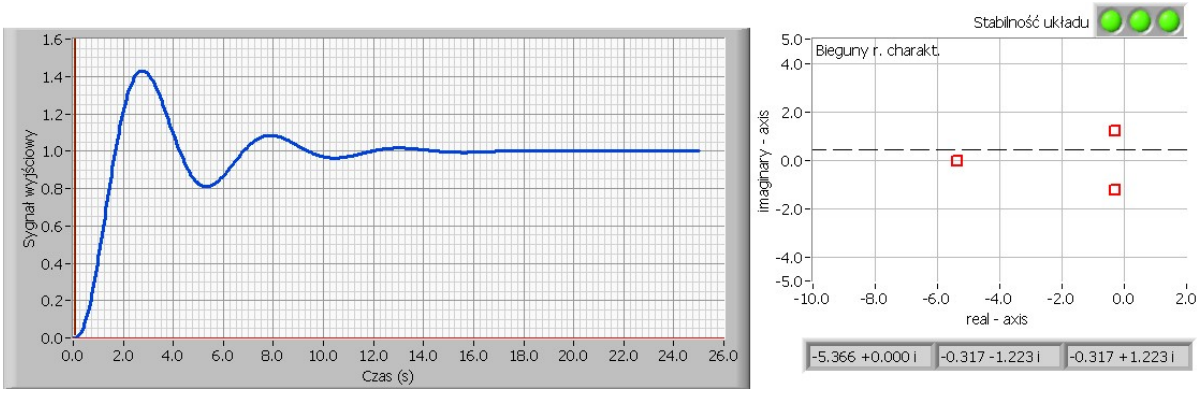
Przed uruchomieniem programu należy wprowadzić wartości współczynników wielomianu numeratora i denominatora dla zadanego układu

oraz upewnić się, że nastawy regulatora PID wynoszą odpowiednio $\mathbf{K_P=1}$, $\mathbf{T_i=1E+16}$, $\mathbf{T_d=0}$.
Po uruchomieniu programu uzyskuje się wykresy dla obiektu bez wpływu działania regulatora PID.



Przesuwając kursory na wykresie odpowiedzi skokowej możemy odczytać wartości sygnału wyjściowego obiektu w dowolnej chwili czasowej (zgodnie z rozdzielczością osi czasu). Na wykresie biegunów widoczne są trzy punkty znajdujące się po ujemnej stronie osi rzeczywistej (części urojone biegunów są równe zero) – wskaźnik diodowy wskazuje stabilną pracę układu.

Użytkownik może zwiększyć wartość wzmocnienia K_P i obserwować zachowanie się obiektu. Poniżej widoczne są wyraźne przeregulowania i oscylacje wytłumione po około 15 sekundach.

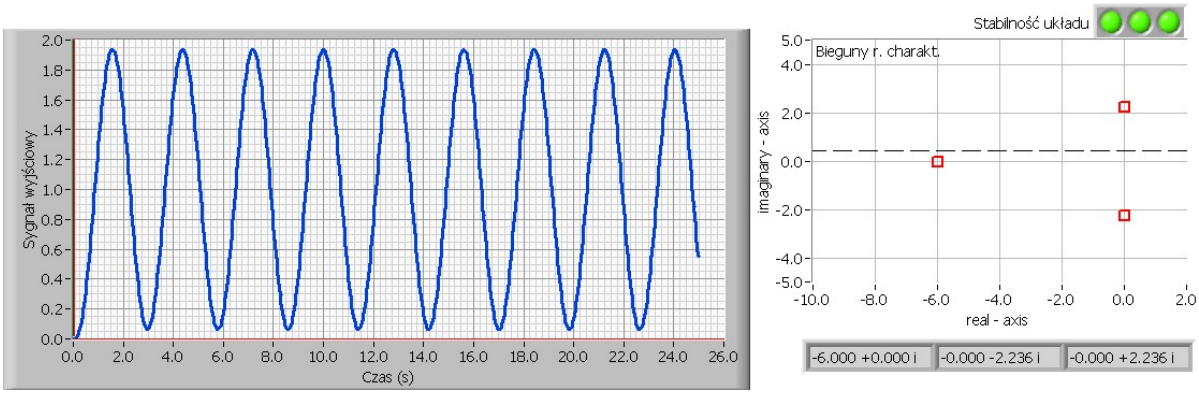


5.3. Wyznaczenie wzmocnienia krytycznego K_{PKR} układu

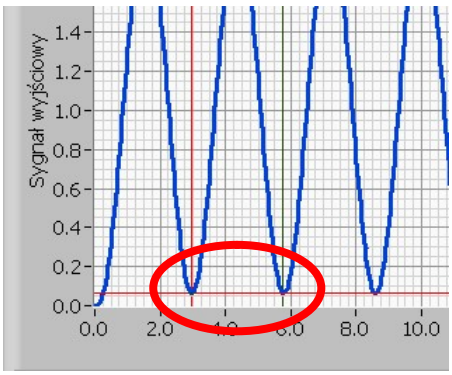
Przed uruchomieniem programu należy upewnić się, że nastawy regulatora PID wynoszą odpowiednio **K_P=1**, **T_i=1E+16**, **T_d=0**.

Po uruchomieniu programu należy zwiększać wartość współczynnika K_P do momentu uzyskania odpowiedzi skokowej w postaci oscylacji niegasnących. Części rzeczywiste niektórych biegunów przyjmują wartość 0.

Uwaga: program cechuje się pewną bezwładnością – dlatego operację strojenia należy przeprowadzić odczekując chwilę po wprowadzeniu zmian.



Następnie wykorzystując kursory wykresu należy zmierzyć okres oscylacji T_{OSC}. W tym celu należy ustawić kursory np. na dwóch sąsiednich pikach tak, aby współrzędne Y były jednakowe lub bardzo do siebie zbliżone.



Okres oscylacji niegasnących można wyznaczyć jako

$$T_{OSC} = Y_{Kursor\ 1} - Y_{Kursor\ 2} = 5{,}77 - 2{,}97 = 2{,}8\ s$$

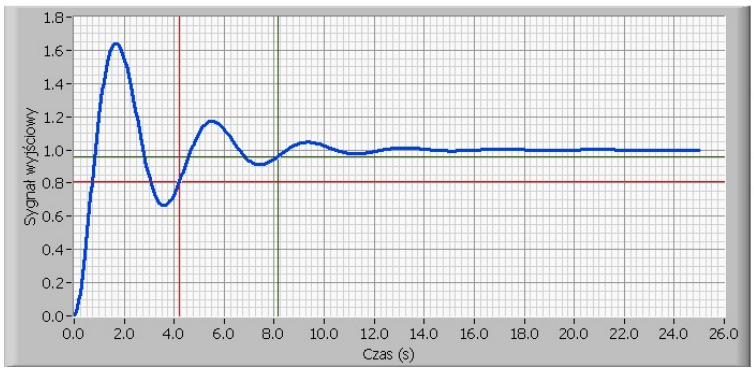
Program automatycznie wyznaczy czas oscylacji.

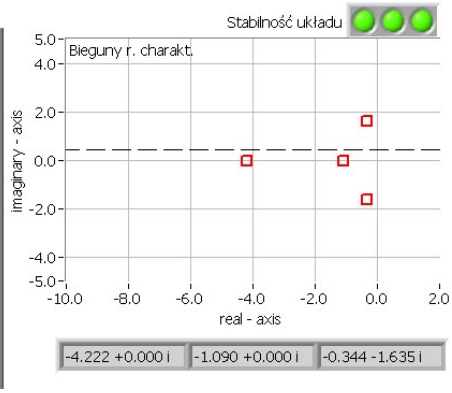
Dla K_{PKR}=30 i T_{OSC}=2,8 nastawy regulatora PID obliczamy zgodnie z Kryterium I:

$$K_P = 0{,}60K_{PKR} = 18 \qquad T_i = 0{,}50T_{OSC} = 1{,}4 \qquad T_d = 0{,}12T_{OSC} = 0{,}336$$

5.4. Symulacja pracy układu regulacji z regulatorem PID

Aby obserwować pracę układu przy włączonym regulatorze PID należy uruchomić program i ustawić parametry regulatora wyliczone na podstawie reguły Zieglera i Nicholsa.





6. SPRAWOZDANIE

Dla zadanego obiektu:
1. zbadać zachowanie się obiektu z wyłączonym regulatorem PID,
2. wyznaczyć wzmocnienie krytyczne i wartość okresu oscylacji niegasnących,
3. obliczyć nastawy regulatora PID według kryterium I i II,
4. zbadać zachowanie się obiektu z włączonym regulatorem PID dla kryterium I i II.

W sprawozdaniu należy zamieścić wykresy odpowiedzi skokowej oraz opisać je, odnieść pracę obiektu z układem regulacji dla nastaw wg kryterium I i II do charakterystyk uzyskanych przy wyłączonym regulatorze PID.

Transmitancje obiektów:

a) $\dfrac{0{,}5}{s^3+4s^2+s+1}$ e) $\dfrac{1}{s^3+4s^2+6s+1}$ i) $\dfrac{1}{s^3+2s^2+3s+2}$

b) $\dfrac{1}{s^3+6s^2+5s}$ f) $\dfrac{2}{s^3+2s^2+5s+2}$ j) $\dfrac{3}{2s^3+6s^2+5s+2}$

c) $\dfrac{2}{s^3+6s^2+5s+0{,}5}$ g) $\dfrac{0{,}1}{0{,}5s^3+s^2+2s+1}$ k) $\dfrac{1}{5s^3+6s^2+5s}$

d) $\dfrac{1}{2s^3+2s^2+2s}$ h) $\dfrac{1}{s^3+4s^2+4s+0{,}8}$ l) $\dfrac{1}{s^3+5s^2+s+2}$

LITERATURA

[1] B.Heiman, W.Gerth, K.Popp: Mechatronika: komponenty, metody, przykłady, tł. M. Gawrysiak, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2001
[2] M.Gawrysiak: Mechatronika i projektowanie mechatroniczne, Rozprawy Naukowe Nr 44, Polit. Białostocka, Białystok, 1997
[3] A.Afonin, P. Szymczak: Mechatronika, Skrypt Politechniki Szczecińskiej,Szczecin, 2001