Implementacja dyskretnego układu regulacji

1 Wprowadzenie

Ćwiczenie ma na celu zbudowanie układu automatycznej regulacji w formie dyskretnej. Niektóre urządzenia mogą nie obsługiwać postaci ciągłej, gdybyśmy chcieli przykładowo zaimplementować algorytm regulatora na mikrokontrolerze. Ciężko byłoby wykorzystać Matlab z Simulinkiem, żeby obliczać wartości sygnału sterującego obiektem. Trzeba zatem rozumieć, jak działa układ regulacji w formie dyskretnej, umieć taką postać otrzymać i wiedzieć, jak należy ją zaimplementować, od samego początku. Dyskretyzacji mogą wymagać różne jego elementy. Po symulacji i dokonaniu syntezy UAR w programie graficznym (na przykład Simulink), prawidłowo wykonana dyskretna aproksymacja powinna dać takie same lub zbliżone efekty.

2 Dyskretyzacja obiektu

Najłatwiej początkowo zamodelować zjawisko fizyczne w postaci ciągłej, za pomocą transmitancji albo równań stanu [1]. Najpopularniejsze metody dyskretyzacji [2] obiektu danego transmitancją ciągłą $G(s)$ przedstawiono poniżej. Przekształcenia przybliżone (1)-(3) różnią się sposobem aproksymacji pochodnej funkcji, w wyniku czego otrzymuje się podstawienie pozwalające przejść bezpośrednio z postaci zmiennej s do postaci zmiennej z.

- przekształcenie δ (metoda różnicy „w przód”)

$$G_{\delta}(z) = G(s)\Big|_{s=\frac{1-z^{-1}}{z^{-1}T_p}} \tag{1}$$

- przekształcenie δ^{-} (metoda różnicy „wstecz”)

$$G_{\delta^{-}}(z) = G(s)\Big|_{s=\frac{1-z^{-1}}{T_p}} \tag{2}$$

- przekształcenie Tustina

$$G_T(z) = G(s)\Big|_{s=\frac{2}{T_p}\cdot\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}} \tag{3}$$

Poniższe przekształcenia odwzorowują bieguny układu ciągłego $s = a$ w dyskretne $z = e^{aT_p}$ i zapewniają zgodność odpowiednich przebiegów czasowych układu ciągłego i dyskretnego (jak odpowiedzi skokowej, czy impulsowej).

- przekształcenie skokowo-inwariantne
- przekształcenie impulsowo-inwariantne
- przekształcenie z odwzorowaniem biegunów i zer

Przykład. Zdyskretyzować obiekt o transmitancji ciągłej $G(s) = \frac{4}{(2s+1)(s+1)}$ → metodami δ^{+}, δ^{-}. Dla dyskretnych transmitancji wyznaczyć równania różnicowe.
Zadanie sprowadza się do podstawienia w każde miejsce zmiennej s transmitancji ciągłej odpowiedniej zależności ze zmienną z, zgodnie z (1) i (2).

$$G_{\delta^+}(z) = \frac{4}{\left(2 \cdot \frac{1-z^{-1}}{z^{-1}T_p} + 1\right)\left(\frac{1-z^{-1}}{z^{-1}T_p} + 1\right)} = \frac{4}{\frac{2-2z^{-1}+z^{-1}T_p}{z^{-1}T_p} \cdot \frac{1-z^{-1}+z^{-1}T_p}{z^{-1}T_p}} =$$

$$= \frac{4z^{-2}T_p^2}{(2+z^{-1}(T_p-2))(1+z^{-1}(T_p-1))} = \frac{4z^{-2}T_p^2}{2+z^{-1}(3T_p-4)+z^{-2}(T_p^2-3T_p+2)}$$

$$G_{\delta^-}(z) = \frac{4}{\left(2 \cdot \frac{1-z^{-1}}{T_p} + 1\right)\left(\frac{1-z^{-1}}{T_p} + 1\right)} = \frac{4}{\frac{2-2z^{-1}+T_p}{T_p} \cdot \frac{1-z^{-1}+T_p}{T_p}} =$$

$$= \frac{4T_p^2}{((2+T_p)-2z^{-1})((1+T_p)-z^{-1})} = \frac{4T_p^2}{(2+T_p)(1+T_p)-z^{-1}(3T_p+4)+2z^{-2}}$$

Do zapisania równania różnicowego należy wyznaczyć zależności między wejściem a wyjściem, a następnie wartość wyjścia w kroku bieżącym w zależności od wszystkich pozostałych.

$$G_{\delta^+}(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} \Rightarrow \left(2+z^{-1}(3T_p-4)+z^{-2}(T_p^2-3T_p+2)\right)Y(z) = 4z^{-2}T_p^2U(z)$$

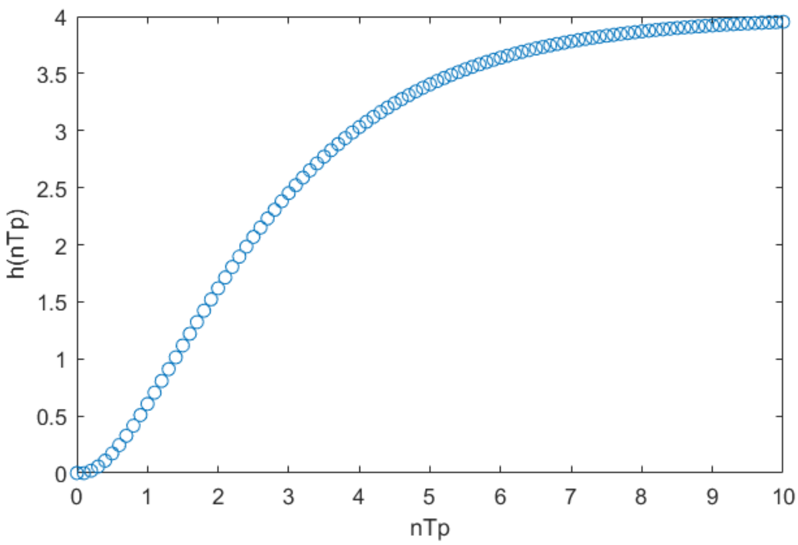
$$2y(n)+(3T_p-4)y(n-1)+(T_p^2-3T_p+2)y(n-2) = 4T_p^2u(n-2)$$

$$y(n) = (2-1.5T_p)y(n-1)-(0.5T_p^2-1.5T_p+1)y(n-2)+2T_p^2u(n-2)$$

$$G_{\delta^-}(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} \Rightarrow \left((2+T_p)(1+T_p)-z^{-1}(3T_p+4)+2z^{-2}\right)Y(z) = 4T_p^2U(z)$$

$$(2+T_p)(1+T_p)y(n)-(3T_p+4)y(n-1)+2y(n-2) = 4T_p^2u(n)$$

$$y(n) = \frac{(3T_p+4)}{(2+T_p)(1+T_p)}y(n-1)+\frac{2}{(2+T_p)(1+T_p)}y(n-2)+\frac{4T_p^2}{(2+T_p)(1+T_p)}u(n)$$



Rysunek 1: Przebieg dyskretnej odpowiedzi skokowej dla równania różnicowego

3 Dyskretyzacja regulatora

W ćwiczeniu wykorzystamy układ regulacji z obiektem wieloinercyjnym oraz regulatorem PID w torze głównym. Znając własności regulatora, można na podstawie transmitancji ciągłej zapisać jego postać dyskretną. Sygnałem wejściowym do regulatora jest uchyb, a wyjściowym – sygnał sterujący obiektem.

$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p\left(1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d\right) \tag{4}$$

$$u(t) = K_p\left(e(t) + \frac{1}{T_i}\int_0^t e(\tau)d\tau + T_d\frac{de(t)}{dt}\right) \tag{5}$$

Całkowanie w dziedzinie dyskretnej odpowiada sumowaniu (metoda prostokątów) przemnożonemu przez przyrost czasu, który będzie aproksymowany jako okres próbkowania $dt \approx T_p$. Różniczkowanie to przyrost wartości funkcji w czasie.

$$u(n) = K_p\left[e(n) + \frac{1}{T_i}\sum_{k=1}^{n} e(k)T_p + T_d\frac{e(n) - e(n-1)}{T_p}\right]$$

$$\boxed{u(n) = K_p\left[e(n) + \frac{T_p}{T_i}\sum_{k=1}^{n} e(k) + \frac{T_d}{T_p}\big(e(n) - e(n-1)\big)\right]} \tag{6}$$

Powyższy algorytm aproksymacji dyskretnej PID nazywa się **pozycyjnym**. Jest to uniwersalne równanie różnicowe regulatora PID, które zależy od nastaw (K_p, T_i, T_d) dobranych na przykład symulacyjnie w układzie ciągłym, a także od okresu pobierania próbek T_p do urządzenia obliczeniowego. Równanie rozpatrywać można, podobnie jak w przypadku ciągłym, jako sumę gałęzi

$$u(n) = u_P(n) + u_I(n) + u_D(n),$$

co może pozwolić na manipulację poszczególnymi torami, przykładowo nieuwzględnienie uchybu w torze różniczkującym, czy warunkowe wyłączenie całkowania.

Całkowe wskaźniki jakości można wyznaczyć na przykład również przez aproksymację całkowania metodą prostokątów:

$$\mathrm{ISE}(n) = T_p\sum_{k=1}^{n} e^2(k), \tag{7}$$

$$\mathrm{IAE}(n) = T_p\sum_{k=1}^{n} |e(k)|,\ \ n = \{1, \ldots, M\} \tag{8}$$

gdzie M oznacza długość symulacji (liczbę próbek dyskretnych). Oprócz przebiegu czasowego wskaźnika ocenę liczbową jakości regulacji umożliwia właśnie wartość końcowa, np. $\mathrm{ISE}(M)$.

Powyżej wykorzystane zostało najprostsze numeryczne całkowanie – metodą prostokątów, które w zdecydowanej większości przypadków się sprawdza. Chcąc poprawić jakość regulacji można także pokusić się o zaimplementowanie innej, bardziej złożonej metody, np. trapezów. Więcej informacji na temat układów regulacji dyskretnej można znaleźć w [2, 3]. Zaawansowane metody aproksymacji całkowania w regulatorach PID zostały też pokazane w [4] (Temat 10, p. 4). Przedstawiona aproksymacja wydaje się bardzo intuicyjna, ale ciągłą transmitancję regulatora można też dyskretyzować za pomocą poznanych metod, na przykład (1)-(3).

4 Przebieg ćwiczenia

4.1 Model ciągły i dyskretny obiektu regulacji

- Ustaw parametry obiektu (każdy z Państwa różne):

  $$G(s) = \frac{k}{(1 + sT_1)(1 + sT_2)}$$

  - k niech będzie równe czwartej cyfrze numeru albumu
  - T_1 niech wynosi 5.[5. cyfra]
  - T_2 niech wynosi 0.[6. cyfra]

  Osoba o numerze albumu 134306, otrzyma transmitancję obiektu $G(s) = \frac{3}{(1+5.0s)(1+0.6s)}$. Gdyby na wartość wzmocnienia lib stałej czasowej T_2 przypadało zero, ustaw je na dowolną, niezerową wartość.

  → W raporcie umieść numer indeksu oraz postać transmitancji.

- Sprawdź za pomocą programu Simulink/xcos odpowiedź skokową obiektu. Dobierz odpowiednio niską wartość T_p do dyskretyzacji. Powinien on być co najmniej 10-krotnie mniejszy od dominującej stałej czasowej, a całkowita krotność T_p powinna pozwalać uzyskać czas opóźnienia transportowego, jeśli takowe występuje.

  Do realizacji inercji można wykorzystać, dla ułatwienia, połączone szeregowo bloki `Transfer Fcn` obiektami pierwszego rzędu, zamiast liczyć współczynniki wielomianu z mianownika.

  Uwaga! Do dalszych rozważań ustaw wybrany okres próbkowania także w programie Simulink/xcos (`Configuration Parameters` → `Fixed Step` → `Tp`). Jeśli przebiegi będą zniekształcone, należy jeszcze zmniejszyć T_p.

- Dokonaj dyskretyzacji obiektu jedną z dwóch metod:

  - δ (1) – jeśli suma trzech pierwszych cyfr Twojego numeru indeksu daje liczbę parzystą;
  - δ^- (2) – jeśli suma trzech pierwszych cyfr Twojego numeru indeksu daje liczbę nieparzystą;

  → W raporcie umieść obliczenia transmitancji $G(z)$ (może być zdjęcie obliczeń). Sugeruję działać na ujemnych potęgach z, jak w przykładzie wyżej.

- Wyznacz równanie rekursywne na podstawie wyliczonej transmitancji; niech T_p będzie w nim parametrem – nie podstawiaj w obliczeniach jego wartości.

  → Umieść obliczenia (mogą być zdjęcia) w sprawozdaniu.

- Zaimplementuj odpowiedź obiektu danego równaniem różnicowym na skok jednostkowy w kodzie, używając pętli `for` (jak było pokazane na pierwszych zajęciach). Nie używaj żadnych gotowych funkcji! Porównaj odpowiedź ciągłą i dyskretną, stwierdzając poprawność wykonanej dyskretyzacji.

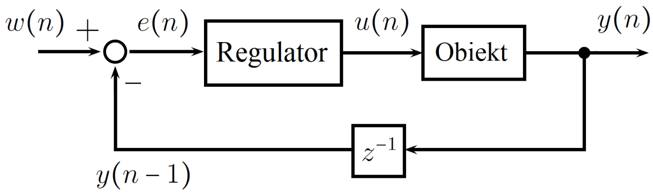
  Odpowiedzi samego obiektu nie trzeba zamieszczać w sprawozdaniu. Ma ono stanowić raczej udokumentowanie bieżących wyników niż opis i wnioski do różnych konfiguracji, jak było do tej pory.

4.2 Podstawowy UAR z regulatorem PID

- Do schematu symulacyjnego obiektu ciągłego dołóż regulator PID (4) i dokonaj syntezy – znajdź nastawy, zapewniające odpowiednią jakość regulacji. Można je dobrać ręcznie – ważne, by odpowiedź układu ustalała się na zadanej wartości (by potem porównać działanie z układem dyskretnym). Zaimplementuj wskaźniki jakości (7), (8) – przebiegi czasowe oraz wartości końcowe. Sygnał wymuszający $w(t) = 1(t)$.

  → W sprawozdaniu zamieść schemat UAR (zrzut ekranu) z dobranymi nastawami, na którym widoczne będą wartości wskaźników jakości. Zamieść też odpowiedź układu i pod spodem drugi wykres przedstawiający sygnał sterujący obiektem (można ten efekt uzyskać za pomocą oscyloskopu z dwoma wejściami). Załącz także czasowe przebiegi wskaźników jakości. Skomentuj krótko, według jakiego kryterium (optymalizacji jakiego czynnika) dobrano nastawy.

- Na podstawie wyprowadzonego równania rekursywnego obiektu oraz przedstawionego równania dyskretnego regulatora PID (6), zaimplementuj w programie Matlab/Scilab/Octave układ automatycznej regulacji. Implementacja tylko w skrypcie, bez używania gotowych bloków/funkcji! Poglądowy układ dyskretny został przedstawiony na rysunku 2. Ważne jest, by uchyb $e(n)$ bazował na wyjściu opóźnionym o próbkę (stąd czynnik z^{-1} w sprzężeniu). Zaczynając n-ty krok algorytmu, nie znamy jeszcze wyjścia z tego kroku!

  Rysunek 2: Poglądowy układ w postaci dyskretnej

  Najwygodniej będzie na samym początku skryptu zdefiniować wartości zmiennych (takie jak nastawy regulatora, okres próbkowania), aby można było zaimplementować bezpośrednio uzyskane równania i wszystko przeliczy za nas program. Starajmy się go jak najbardziej parametryzować. Później trzeba określić (na podstawie symulacji ciągłej) czas symulacji i przeliczyć, ile będzie na to potrzebne próbek. Przykładowo, dla czasu symulacji $T_{sim} = 15$ sek, okresu próbkowania $T_p = 0.01$ sek, będzie to $M = \frac{T_{sim}}{T_p} = 1500$ próbek.

  Później w pętli czasowej `for` zaimplementuj równanie regulatora PID (6) wyliczające sterowanie obiektem na podstawie uchybu, jego całki oraz pochodnej. Sterowanie to wyliczone w każdej chwili próbkowania trafi do obiektu danego równaniem rekursywnym.

  Uwaga! Proszę zwrócić szczególną uwagę na kilka początkowych kroków pętli. Jeżeli przykładowo otrzyma się równanie rekursywne $y(n) = 2y(n-1) + y(n-2) - u(n-2)$, to w $n = 1$ oraz $n = 2$ program będzie chciał odwołać się do elementów o numerach 0 i -1, co spowoduje błąd. Łatwiejsze rozwiązanie to rozpoczęcie symulacji od $n = 3$, przy czym wartości początkowe $y(0)$ należy ustawić na 0, wartości uchybu $e(0) = 1$. Rozwiązanie trudniejsze (i wyżej punktowane) będzie to rozważenie w pierwszych krokach próbkowania, jak dokładnie należy zaimplementować poszczególne etapy (najłatwiej instrukcjami warunkowymi).

- Zaimplementuj również obliczanie wskaźników jakości (7), (8). Po zakończeniu pętli, wygeneruj w skrypcie dwa wykresy (jeden pod drugim) – pierwszy zawierający sygnał wartości zadanej i odpowiedź układu. Drugi, przedstawiający sygnał sterujący. W drugim oknie wyświetl przebiegi czasowe wskaźników jakości.

  Powyżej znajduje się podstawowa wersja projektu. Można nie wykonywać już poniższych punktów (tylko zapisać wnioski, wg p. 4.6), ale maksymalne ocena za pracę wyniesie wtedy 6/10 punktów.

- Sprawdź działanie układu (ciągłego i dyskretnego) przy wymuszeniu prostokątnym, o wybranych amplitudach i częstotliwościach przełączeń – tak, by widać było ustalenie się sygnału na zadanej wartości. Można zmodyfikować część różniczkującą, by brała pod uwagę nie uchyb, ale tylko pomiar $-y(t)$.

  → W raporcie zamieść listing kodu oraz wyniki działania układu dyskretnego w odpowiedzi na wartość stałą i prostokąt, by można było porównać je z wersją ciągłą. Zamieść też wykresy i wartości końcowe wskaźników jakości. Oś poziomą wyskaluj tak, by reprezentowała ona czas ciągły $t \approx nT_p$.

4.3 Kryterium modułu i symetrii doboru nastaw regulatora

Dla wygenerowanego w p. 4.1 obiektu, dobierz nastawy regulatora korzystając z kryterium modułu oraz kryterium symetrii [3], Temat 12, p. 12.2.1, Tab. 12.1; p. 12.2.2, Tab. 12.2. Struktura regulatora determinowana jest przez metodę oraz postać obiektu regulacji. Zaimplementuj podane struktury regulatora w wersji ciągłej oraz dyskretnej (odpowiedź układu na skok jednostkowy).

Dokonaj analizy oczekiwanych przebiegów czasowych ze względu na przeregulowanie względne (in. maksymalne odchylenie dynamiczne) oraz oczekiwany czas odpowiedzi* – [3], Rys. 12.1 oraz Rys. 12.5.

*Przez czas odpowiedzi rozumie się tutaj czas od początku symulacji do pierwszego osiągnięcia przez wyjście zadanej wartości.

→ W raporcie przedstaw niezbędne obliczenia dot. doboru nastaw (według tabelek; może być zdjęcie obliczeń), zamieść wykresy dla układu dyskretnego: odpowiedzi na skok jednostkowy i wskaźniki jakości, na podstawie wykresów wyznacz maksymalne odchylenia dynamiczne (in. przeregulowania względne) i czasy odpowiedzi. Krótko skomentuj wyniki.

4.4 Sprzężenie wyprzedzające

Wygeneruj sinusoidalny sygnał zadany (o wybranej amplitudzie i częstotliwości). Zbadaj możliwości nadążania układu z regulatorem PID, a następnie zaprojektuj sprzężenie wyprzedzające korygujące sygnał sterujący. Porównaj w Simulinku/xcos skuteczność realizacji pochodnych sygnału zadanego przez bloki `Derivative` wykonujące różniczkowanie numeryczne, oraz obliczonych pochodnych ciągłych – bloki `Sine Wave` z podanym przesunięciem fazowym oraz amplitudą (jak na zajęciach, Temat 5). Zrealizuj algorytm regulacji w formie dyskretnej, generując sygnały za pomocą funkcji `sin`, `cos`.

Uwaga! Wybierając częstotliwość sinusa, należy zwrócić szczególną uwagę na „możliwości” obiektu – nie zawsze jego dynamika pozwoli na śledzenie wystarczająco szybkiego sygnału.

→ W raporcie zamieść schemat układu ze sprzężeniem wyprzedzającym i wybrane odpowiedzi układu ciągłego (w przypadku różniczkowania numerycznego i ręcznego liczenia pochodnych) oraz układu dyskretnego. Skomentuj krótko wyniki.

4.5 Ograniczenie sterowania i AWC

Zaimplementuj na schemacie ograniczenie sygnału sterującego – blok `Saturation` i porównaj działanie układu dla różnych wartości ograniczeń (niech sygnałem zadanym będzie prostokąt). Odwzoruj ograniczenie w układzie dyskretnym (inwencja własna, np. instrukcje warunkowe).

Zaimplementuj wybraną metodę kompensacji AWC [3], Temat 14, p. 14.2.2 / Rys. 14.4 przez dodanie odpowiednich bloków na schemacie oraz modyfikację kodu w układzie dyskretnym. Sprawdź skuteczność działania AWC dla różnych wartości ograniczeń.

→ W raporcie zamieść schemat układu (zrzut ekranu) z ograniczeniem i realizacją AWC, przykładowe wyniki obrazujące działanie układu dyskretnego z kompensacją i bez, krótko je skomentuj.

4.6 Ocena wyników i wnioski

- Porównaj krótko, na podstawie uzyskanych wyników, działanie układu z regulatorem ciągłym oraz dyskretnym. Jeżeli w implementacji coś nie zadziałało i nie udało się tego naprawić, spróbuj odpowiednio opisać i wyciągnąć wnioski.

- Na końcu sprawozdania proszę umieścić listing z kodem programu. Sam program (plik skryptu) również proszę zamieścić w wyznaczonym miejscu. Proszę też załączyć schemat Simulink/xcos realizujący ten sam układ ciągły, bym mógł porównać działanie.

  W przypadku schematów Simulink, proszę przekonwertować je do wersji 17b (`File → Export Model To → Previous Version`).

4.7 Aplikacja GUI do przedstawienia wyników

Jest to zadanie nadprogramowe, na dodatkowe punkty. W razie zainteresowania po szczegóły zgłoś się do prowadzącego. ☺

Punkty dodatkowe zdobyć można tylko w przypadku wykonania pełnej wersji pracy, tj. wszystkich poleceń 4.1-4.6. Za tę pracę można zdobyć maksymalnie do +4 punktów.

Dodatkowe uwagi

- Postępy prac oraz wszystkie wątpliwości przed oddaniem można na bieżąco konsultować.
- W końcowym raporcie należy unikać wypisywania jakichkolwiek informacji teoretycznych; podajemy tylko wyniki pracy i krótkie do nich komentarze w miejscach, gdzie jest taka prośba.
- Do ustalonego terminu należy wysłać raport i wyniki, a w uzgodnionym terminie zajęć odbędzie się *obrona* pracy.

Literatura

[1] Dariusz Horla, Podstawy automatyki, ćwiczenia rachunkowe, część I.

[2] Dariusz Horla, Podstawy automatyki, ćwiczenia rachunkowe, część II.

[3] Dariusz Horla, Podstawy automatyki, ćwiczenia laboratoryjne.

[4] Dariusz Horla, Sterowanie adaptacyjne, ćwiczenia laboratoryjne.

Dodatek – Algorytm przyrostowy PID

Może wystąpić także potrzeba wyznaczenia transmitancji dyskretnej regulatora PID. Wyznaczając różnicę dwóch próbek sygnału wyjściowego (6), można zapisać algorytm **przyrostowy** dyskretnego regulatora PID. Tym razem nie trzeba przechowywać w pamięci wszystkich wartości uchybu, wystarczy tylko dwie poprzednie próbki, jednak mamy dostęp na wyjściu regulatora jedynie do przyrostu sterowania.

$$\Delta u(n) = u(n) - u(n-1) = K_p \Bigg[e(n) - e(n-1) + \frac{T_p}{T_i} \left(\sum_{k=1}^{n} e(k) - \sum_{k=1}^{n-1} e(k) \right) +$$

$$+ \frac{T_d}{T_p} \big(e(n) - e(n-1) - (e(n-1) - e(n-2)) \big) \Bigg]$$

$$\Delta u(n) = u(n) - u(n-1) = K_p \left[e(n) - e(n-1) + \frac{T_p}{T_i} e(n) + \frac{T_d}{T_p} \big(e(n) - 2e(n-1) + e(n-2) \big) \right] \tag{9}$$

Wyciągając transformatę Laurenta $\mathcal{Z}$ z powyższego równania, przy założeniu zerowych warunków początkowych, można wyznaczyć transmitancję dyskretną regulatora PID.

$$(1 - z^{-1}) U(z) = K_p \left[(1 - z^{-1}) E(z) + \frac{T_p}{T_i} E(z) + \frac{T_d}{T_p} (1 - 2z^{-1} + z^{-2}) E(z) \right]$$

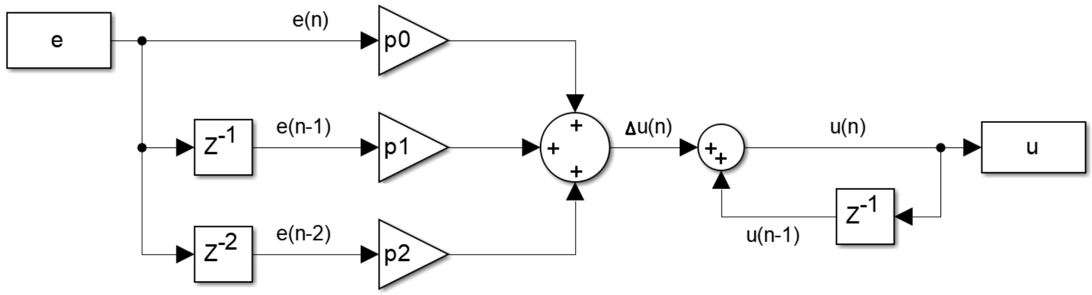
$$(1 - z^{-1}) U(z) = \left[K_p \left(1 + \frac{T_p}{T_i} + \frac{T_d}{T_p} \right) - K_p \left(1 + 2\frac{T_d}{T_p} \right) z^{-1} + K_p \frac{T_d}{T_p} z^{-2} \right] E(z)$$

$$(1 - z^{-1}) U(z) = \left(p_0 + p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2} \right) E(z)$$

$$G_R(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{p_0 + p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}} \tag{10}$$

$$p_0 = K_p \left(1 + \frac{T_p}{T_i} + \frac{T_d}{T_p} \right), \quad p_1 = -K_p \left(1 + 2\frac{T_d}{T_p} \right), \quad p_2 = K_p \frac{T_d}{T_p}$$

Obecność całkowania widoczna jest przez $(1 - z^{-1})$ w mianowniku Dla równania regulatora danego (9) wygodnie jest też sporządzić schemat analogowy, po wyznaczeniu powyższych współczynników:



Jak widać, wystarczy przechowywać każdorazowo wartości uchybu z dwóch poprzednich próbek oraz wartość sterowania z próbki poprzedniej, by móc wyznaczyć bieżące: $\Delta u(n) = u(n) - u(n-1) \Rightarrow u(n) = \Delta u(n) + u(n-1)$.