



Adaptacja regulatora PI za pomocą reguł logicznych

Tadeusz Hoczek

Wydział Automatyki Elektroniki i Informatyki, Politechnika Śląska

Streszczenie: We współczesnej literaturze wiele uwagi poświęca się zagadnieniom pomiaru jakości układów regulacji. Jednym z najważniejszych wskaźników poprawnego działania regulatora jest przebieg odpowiedzi układu sterowania na działające na niego zakłócenie. W niniejszym artykule zaproponowano metodę adaptacji parametrów regulatora PI opartą na regułach logicznych. Pokazano, iż sposób powrotu systemu do stanu ustalonego daje wskazówki, które można wykorzystać do optymalizacji parametrów regulatora PI. Jednocześnie metoda ta jest na tyle prosta, iż implementacja jej w sterowniku PLC nie będzie stanowić trudności. Zbadano również zapas stabilności, jaki zapewnia procedura adaptacyjna dla procesów o różnych parametrach.

Słowa kluczowe: regulator PI, adaptacja, logika, regulacja

1. Wprowadzenie

Częstym tematem artykułów naukowych jest jakość układów sterowania. Najważniejszym wnioskiem z przeprowadzonych badań jest stwierdzenie, że wiele regulatorów w przemyśle nie jest odpowiednio dostrojonych [5, 6, 8, 11]. W kontrolowanym procesie pojawiają się oscylacje, które są elementem niepożądanym. Oscylacje powodują zwiększenie kosztów produkcji proporcjonalnie do amplitudy oscylacji [4]. Źle dostrojone regulatory mogą również powodować opóźnienia w osiągnięciu wartości zadanej, wprowadzając tym samym duże perturbacje do układu regulowanego. Wiele prac poświęcono detekcji regulatorów powodujących zakłócenia w procesie, tzn. takich, których odpowiedź na zakłócenie jest oscylacyjna lub takich, które nie odpowiadają wystarczająco szybko na zakłócenie [8, 11]. Nie podano jednak rozwiązania problemu – co robić, gdy taka pętla zostanie zidentyfikowana i pozostawiają opracowanie procedury strojenia regulatora inżynierom.

W niniejszym artykule podjęto się próby wypełnienia tej luki. Obserwując, w jaki sposób układ reaguje na działające na niego zakłócenia można zaproponować wykonanie procedury adaptacji regulatora podczas jego pracy. Zaprezentowana w artykule metoda umożliwia dostrojenie parametrów regulatora PI – wzmocnienia kp , oraz czasu zdwojenia T_i tak, aby odpowiedź układu sterowania

na zakłócenie nie zawierała oscylacji oraz była szybka. Dodatkowo zbadano zapas stabilności, jaki zapewnia procedura oraz obliczono „Idle Index” [8] dla tak dostrojonego regulatora, aby sprawdzić jego jakość.

2. Ocena pętli regulacyjnych

Artykuł Hagglunda [8] poświęcony jest „konserwatywnie” dostrajaniem pętli regulacyjnym. Autor zauważył, że dobrze dostrojone pętle regulacyjne charakteryzują się specyficznym przebiegiem sygnału wyjściowego regulatora w odpowiedzi na zakłócenie. W pierwszej fazie wartość sygnału wyjściowego rośnie, a następnie wartość ta zmniejsza się. W zbyt zachowawczo dostrojonych pętlach nie występuje druga faza odpowiedzi regulatora. Sygnał wyjściowy regulatora podąża zawsze w jednym kierunku. Do określenia jakości pętli regulacyjnej Hagglund [8] zdefiniował „Idle Index” – współczynnik określający szybkość działania układu sterowania w odpowiedzi na zakłócenie. Współczynnik ten wyznacza się, zliczając odcinki czasu, w których wyjście regulatora jest narastające oraz opadające:

$$t_{\text{pos}} = \begin{cases} t_{\text{pos}} + \Delta t & \text{if } \Delta u \cdot \Delta y > 0 \\ t_{\text{pos}} & \text{if } \Delta u \cdot \Delta y \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$t_{\text{neg}} = \begin{cases} t_{\text{neg}} + \Delta t & \text{if } \Delta u \cdot \Delta t < 0 \\ t_{\text{neg}} & \text{if } \Delta u \cdot \Delta t \geq 0 \end{cases}$$

by na tej podstawie obliczyć „Idle Index” z równania:

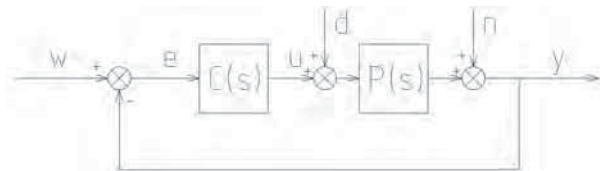
$$I_i = \frac{t_{\text{pos}}}{t_{\text{pos}}} \frac{t_{\text{neg}}}{t_{\text{neg}}} \quad (2)$$

Wartości indeksu zawarte są pomiędzy $[-1, 1]$. Współczynnik I_i bliski wartości 1 oznacza, że pętla jest źle dostrojona, ponieważ odpowiedź regulatora jest zbyt wolna. Ujemny współczynnik bliski -1 oznacza kontroler szybko odpowiadający na zakłócenia, jednak duże wartości ujemne pojawiają się przy pętlach oscylacyjnych. Można więc uznać, że współczynnik bliski 0 oznacza dobrze dostrojoną pętlę regulacyjną [8]. W przypadku identyfikacji niepoprawnie działającego regulatora, zastosowanie klasycznych

metod strojenia w celu poprawienia jego działania często jest niemożliwe. Identyfikacja parametrów obiektu za pomocą skoku jednostkowego lub metody przekąźnikowej wprowadziłyby zbyt duże zakłócenia do kontrolowanego procesu. Osobie odpowiedzialnej za strojenie regulatora pozostaje jedynie metoda prób i błędów, jednak prowadzi ona często do wątpliwych efektów. W takich wypadkach dostęp do prostego łatwego w implementacji układu automatycznego strojenia byłby nieoceniony. Jeżeli sposób, w jaki układ odpowiada na działające na niego zakłócenia niesie ze sobą informację o jakości układu regulacji, to można go użyć do strojenia regulatora. Na jednym końcu „skali” znajdują się układy, których odpowiedzi na sygnały zakłóceń nie powodują oscylacji – takie regulatory należy przyspieszyć oraz zwiększyć ich wzmocnienie. Na drugim końcu „skali” znajdują się układy, które w momencie oddziaływania na nie zakłócenia oscylują. W takim przypadku wzmocnienie regulatora należy zmniejszyć i/lub zwiększyć czas zdwojenia.

3. Proponowana metoda

Większość obiektów sterowania w przemyśle to obiekty statyczne, tzn. takie, które po podaniu na wejście dowolnego ograniczonego wymuszenia osiągają same stan równowagi dynamicznej. W takich procesach pętla regulacji ma postać jak na rys. 1, gdzie: „w” jest wartością zadaną, „e” – błędem regulacji, „u” to sygnał sterujący, a „y” jest wartością wyjściową. Sygnały „d” oraz „n” są zakłóceniami działającymi na układ w różnych miejscach.



Rys. 1. Pętla regulacji
Fig. 1. Control loop

Sterowanie regulatora proporcjonalno-całkującego PI zdefiniowane jest jako:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (3)$$

lub w postaci transmitancji

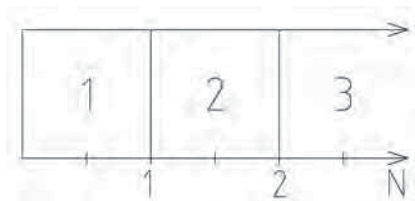
$$C(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (4)$$

Algorytm adaptacyjny oparty jest na pomiarze uchybu regulacji. Aktywacja procedury dopasowania parametrów regulatora zostanie wykonana po wykryciu błędu sterowania większego niż dopuszczalny. Następnie algorytm przechodzi do fazy obserwacji, gdzie są zliczane przejścia przez zero uchybu regulacji. Koniec obserwacji układu oraz wdrożenie reguł dopasowania wykonywane jest, gdy układ wraca do dopuszczalnego zakresu i pozostaje w nim przez zadany czas.

Algorytm adaptacyjny opiera się na regułach klasycznej logiki. Wzorowany jest jednak na systemach Tagaki-Sugeno, w których część warunkowa przybiera formę lingwistyczną, a wniosek określony jest funkcją matematyczną. Wnioskowanie podzielone jest między dwie funkcje: aktywacyjną oraz dopasowania. Funkcja aktywacyjna określa, czy układ znajduje się w stanie, w którym jest możliwe wnioskowanie. Jeżeli można go wykonać, następuje uruchomienie procedury dopasowania. Funkcja aktywacyjna oblicza procentowy uchyb sterowania w stosunku do zakresu pomiarowego procesu.

$$Pe = \frac{|e|}{w_{\max} - w_{\min}} \cdot 100\% \quad (5)$$

Wartości w_{\max} oraz w_{\min} to odpowiednio górny oraz dolny zakres pomiarowy, natomiast e jest uchybem regulacji. Funkcja ta pozwala określić siłę, z jaką zakłócenia działają na układ, jednocześnie eliminując przypadkową aktywację algorytmu przez szumy pomiarowe. Sposób dalszego postępowania określony jest przez dwie funkcje przynależności. Jeżeli uchyb regulacji jest na tyle duży, że wartość Pe przekroczy zadany próg aktywacji, zostanie uruchomiona procedura dopasowania. Dopóki wartość Pe jest mniejsza od zadanego progu aktywacji, regulator pracuje na dotychczasowych parametrach. Zadaniem procedury dopasowania jest w pierwszej fazie obserwacja układu i zbieranie niezbędnych danych, na podstawie których będzie wykonane dalsze wnioskowanie. Funkcja ta zlicza liczbę przejść uchybu regulacji przez zero, czyli liczbę oscylacji w odpowiedzi układu. Zliczanie rozpoczyna się w chwili aktywacji procedury dopasowania i trwa do momentu, w którym wartość Pe przez czas $3 \cdot T_i$ nie przekroczy wartości progu aktywacji. Kolejno określany jest kierunek dopasowania. Sposób adaptacji regulatora PI jest uwarunkowany przez trzy funkcje (rys. 2).



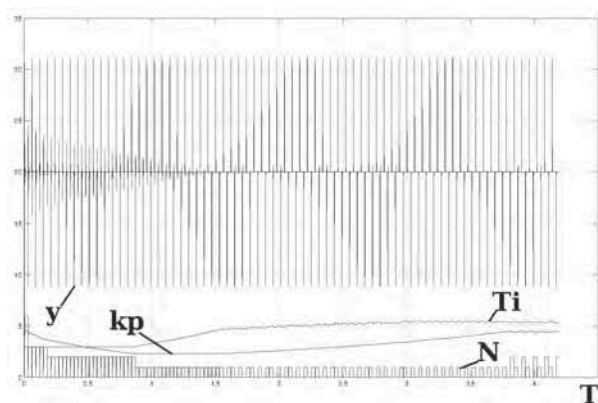
Rys. 2. Zakresy funkcji dopasowania
Fig. 2. Distribution of adaptation function membership

Jeżeli w określonym czasie nie wystąpiło przejście przez zero uchybu regulacji $N = 0$, wtedy aktywowana zostaje funkcja nr 1, która ma za zadanie przyspieszyć odpowiedź układu, aktualizując wartości regulatora wg równań 6 i 7.

$$k_p = k_p \frac{\mu \cdot k_p}{100} \quad (6)$$

$$T_i = T_i \frac{\mu \cdot T_i}{100} \quad (7)$$

Jeśli liczba przejść przez zero $N = 1$, aktywowana zostaje funkcja nr 2, a parametr T_i regulatora zostanie zmodyfikowany wg wzoru 8.



Rys. 3. Przebieg zmian parametrów regulatora w trakcie adaptacji
Fig. 3. Regulator parameter change during adaptation

$$T_i = T_i \frac{\mu \cdot T_i}{100} \quad (8)$$

Jeżeli liczba przejść $N \geq 2$, zostanie aktywowana funkcja nr 3, a parametr kp zostanie zmodyfikowany wg wzoru 9.

$$kp = kp \frac{\mu \cdot kp}{100} \quad (9)$$

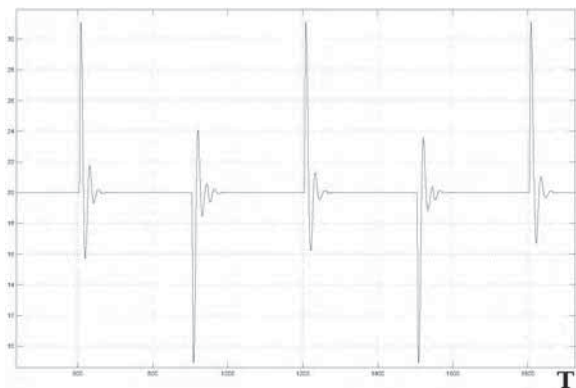
Występujący w powyższych równaniach parametr μ jest współczynnikiem adaptacji. Określa on prędkość możliwych zmian wartości parametrów regulatora.

4. Wyniki symulacji

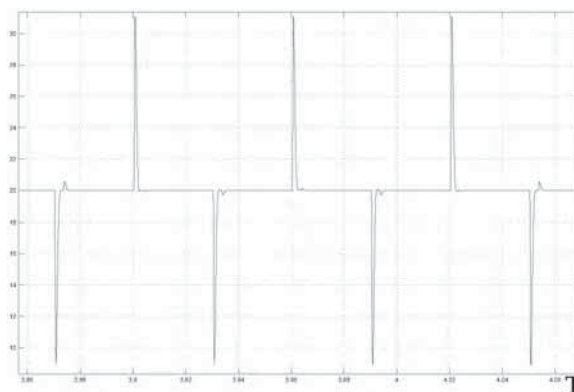
Warunkiem przeprowadzenia opisanej adaptacji jest stabilność układu w momencie jej włączenia. Aby procedura mogła wprowadzić zmiany w parametrach konieczny jest powrót układu do stanu „ustalonego”. Na rys. 3 przedstawiono przebieg adaptacji regulatora oraz towarzyszące jej zmiany parametrów dla obiektu o parametrach:

$$G(s) = \frac{1.6}{4s^3 \cdot 2s^2 \cdot 5s \cdot 1} e^{-3s} \quad (10)$$

Zaprezentowane przebiegi (rys. 4, 5) są odpowiedzią na kwadratowy sygnał podany jako zakłócenie „d” wg schematu na rys. 1.



Rys. 4. Odpowiedź układu na zakłócenie przed adaptacją
Fig. 4. Process answer for disturbance before adaptation



Rys. 5. Odpowiedź procesu na zakłócenie po adaptacji
Fig. 5. Process answer for disturbance after adaptation

Algorytm działa również w przypadku zakłóceń oddziaływujących na układ przez sygnał „n”, jak i zmian wartości zadanej. Można zauważyć, że w wyniku adaptacji regulatora praktycznie całkowicie udało się wyeliminować przeregulowanie, dzięki czemu czas regulacji znacznie się skrócił. Wartość maksymalnego przeregulowania również została zmniejszona. „Idle Index” obliczony dla tego układu wynosił $-0,14$, co pozwala uznać pętlę, wg kryteriów opisanych w [8], za dobrze dostrojoną. Aby zbadać zapas stabilności systemu sterowania nastrojonego przy pomocy zaproponowanej metody, przeprowadzono szereg symulacji dla procesów o różnych parametrach. Do tego celu wykorzystano obiekt pierwszego rzędu z opóźnieniem:

$$P(s) = \frac{K}{T_s \cdot 1} e^{-sT_o} \quad (11)$$

Tab. 1. Wyniki symulacji
Tab. 1. Simulations results

Model			Regulator			
K	T	T_o	kp	T_i	G_m	P_m
0,7	4	1	2,6	3,3	10	58
1,6	4	1	1,1	3,3	10	59
0,7	4	3	1	4,9	10	69
1,6	4	3	0,4	4,8	11	70
0,7	4	6	0,8	7,1	8	72
1,6	4	6	0,3	6,5	9	72
0,7	10	5	1,6	11	10	68
1,6	10	5	0,6	11	10	62
0,7	10	3	2,7	9	9	53
1,6	10	3	0,9	9,2	10	60
0,7	14	3	3,8	10	8	49
1,6	14	3	1,5	10	9	53

W tab. 1 zestawiono wyniki przeprowadzonych eksperymentów: parametry modelu obiektu regulacji, parametry regulatora PI po ustaleniu się jego wartości oraz obliczone wartości zapasu wzmocnienia G_m i fazy P_m . Z przeprowadzonych symulacji wynika, że uzyskane zapasy wzmocnienia i fazy odpowiadają regulatorowi o dość dużym marginesie bezpieczeństwa odpowiednio $G_m \sim 10$ i $P_m \sim 60$.

Punktem początkowym każdej symulacji był regulator o parametrach $k_p = 1$ oraz stałej czasowej $T_i = 6$. Parametry regulatora zostały dobrane metodą prób i błędów, jak często stosuje się w rzeczywistych układach.

Podczas eksperymentów progowa wartość funkcji aktywacji wynosiła 1. Przyjęto zakres pomiarowy 0–50, a współczynnik adaptacji $\mu = 0,1$.

5. Wnioski

Zaproponowana metoda adaptacji regulatora PI umożliwia dostrojenie regulatora do obiektu. Dopasowanie jego parametrów następuje w odpowiedzi na działające na obiekt zakłócenia lub zmiany wartości zadanej. Zastosowanie prostego narzędzia, jakim są reguły logiczne daje możliwość implementacji ich w sterowniku programowalnym. Połączenie proponowanego algorytmu z wbudowanym w PLC regulatorem PI ułatwi zastosowanie go w już istniejących aplikacjach. Dodatkowo metodę tę można w pewnych warunkach zastosować jako ciągły adaptator regulatora do zmieniających się parametrów obiektu. Opisana metoda jest szczególnie przydatna dla procesów cyklicznych, gdzie regularnie występują „zakłócenia” o dużej amplitudzie lub zmiany wartości zadanej, np. nagrzewnice indukcyjne, kontrola prędkości czy procesy wsadowe. Niewielka prędkość dopasowania ogranicza jednak zastosowanie procedury do wolno zmieniających się procesów. Niemniej, pozwala ona na takie dopasowanie regulatora do obiektu, które wyeliminuje oscylacje pojawiające się w układzie, ograniczając również wartość przeregulowania występującego podczas oddziaływań zakłóceń i zmian wartości zadanej. Zapasy stabilności uzyskane podczas badań symulacyjnych utrzymywane są na dość dużych wartościach, co umożliwia bezpieczne sterowanie obiektem. Natomiast współczynnik jakości pętli regulacyjnej pozwala uznać wyniki za zadowalające.

Bibliografia

1. Ziegler J.G., Nichols N.B., *Optimum settings for automatic controllers*, “Transactions of the ASME” 64/1942, 759–768.
2. Astrom K.J., Eyekohoff P., *System Identification – A Survey*, “Automatica”, no. 7, 1971, 123–162.
3. Sundaresan K.R., Krishnawamy P.R., *Estimation of time delay, time constant parameters in time, frequency and Laplace domains*, “The Canadian Journal of Chemical Engineering”, no. 56, 1978, 257–262.
4. Shinsky F.G., *How Good Are Our Controllers in Absolute Performance and Robustness*, “Measurement & Control”, no. 23, 1990, 114–120.

5. Bialkowski W.L., *Dream vs. Reality: A View from Both Sides of the Gap*, Control System '92 Conference.
6. Ender D., *Process Control Performance: Not as Good as You Think*, “Control Eng.”, vol. 40, no. 9, 1993, 180–190.
7. Astrom K.J., Hagglund T., *PID Controllers: Theory, Design and Tuning*, 2nd Edition, Instrument Society of America, 1995.
8. Hagglund T., *Automatic detection of sluggish control loops*, “Control Engineering Practice”, no. 7, 1999, 1505–1511.
9. Kealy T., O'Dwyer A., *Comparison of open and closed loop process identification techniques in the time domain*, “Proceedings of the 3rd Wismarer Automatisierungssymposium”, no. 1, 2001, 3–4.
10. Chainho J., Pereira P., *A Simple PID Controller with Adaptive Parameter in a dsPIC; Case of Study*, Congresso Hispano Luso de Engenharia Electrotécnica, 2005.
11. Hagglund T., *Industrial implementation of on-line performance monitoring tools*, “Control Engineering Practice”, no. 13, 2005, 1383–1390.
12. Huang S.-J., Lo Y.-H., *Metal Chamber Temperature control by Using Fuzzy PID Gain Auto-tuning strategy*, “WSEAS Transaction on Systems and Control”, no. 4, 2009, 1–10. ■

Adaptation of PI controller by means of logic rules

Abstract: In the article a new method of PI controller adaptation was introduced. It was shown that way how controlled process is returning to its set value, after set point change or disturbance, can give guidelines for PI regulator tuning. Moreover, the proposed method is very simple and can be implemented in every PLC controller. The inference part of the solution can be implemented separately and allows tuning of the PLC build in PI controllers. The proposed method dump oscillations and limits overshoots, which appears in the process output. It was shown that obtained gain and phase margins are enough big to be safe.

Keywords: PI, adaptation, logic, control

Artykuł recenzowany, nadesłany 25.06.2013, przyjęty do druku 09.08.2013.

mgr inż. Tadeusz Hoczek

Doktorant wydziału Automatyki Elektrycznej i Informatyki Politechniki Śląskiej. Główny kierunek badań to modelowanie, identyfikacja systemów oraz wykorzystanie algorytmów sztucznej inteligencji w sterowaniu procesów przemysłowych. Zawodowo zajmuje się zagadnieniami sterowania procesów ciągłych w przemyśle.

e-mail: thoczek@gmail.com

