

Dr inż. Radosław WINICZENKO
Wydział Inżynierii Produkcji, SGGW w Warszawie

ZASTOSOWANIE I OPTYMALIZACJA REGULATORÓW PID W PRZEMYSŁE SPOŻYWCZYM®

W artykule omówiono zasadę działania regulatorów PID, stosowanych do sterowania procesami w przemyśle spożywczym. Przedstawiono również sposoby doboru nastaw (strojenia) regulatorów PID za pomocą funkcji optymalizacyjnych, zaimplementowanych w programie do obliczeń numerycznych Matlab.

WPROWADZENIE

Zadaniem przemysłu spożywczego jest przetwarzanie surowców w produkty z pożądanymi cechami za pomocą dostępnych technologii i źródeł energii w najbardziej ekonomiczny sposób. Sektor ten stosuje różnorodne operacje jednostkowe (np. odparowania, filtracji, suszenia, mieszania, wyciskania) w systematyczny i racjonalny sposób. Powyższe procesy powinny przebiegać w ściśle kontrolowanych warunkach tzn. temperatury, ciśnienia, przepływu i zagęszczenia. W celu zapewnienia odpowiednich standardów bezpieczeństwa, warunki pracy powyższych procesów powinny przebiegać zgodnie z przyjętymi standardami i być przyjazne środowisku. Przede wszystkim procesy związane z przetwarzaniem surowców w produkty powinny być kontrolowane na optymalnym poziomie w celu uzyskania minimalnych kosztów eksploatacji poprzez maksymalizację zysku i pożądaných cech produktu [4]. Wymierne korzyści w postaci zmniejszenia kosztów dla wspomnianych procesów technologicznych w przemyśle spożywczym przynosi stosowanie mikroprocesorów oraz coraz częściej sterowników programowalnych PLC (z ang. *Programmable Logic Controller*). Wspomniane powyżej sterowniki są wyposażone w układy regulacji PID (z ang. *Proportional Interwał Derivative*), które pozwalają na utrzymanie kluczowych parametrów procesu na właściwym poziomie w sposób dokładny i precyzyjny. Mówiąc o regulacji PID, nie można pominąć problemu odpowiedniego doboru ich nastaw.

Celem artykułu jest przedstawienie pracy regulatorów PID oraz doboru ich nastaw (strojenie) na przykładzie wybranych funkcji optymalizacyjnych.

KLASYFIKACJA REGULATORÓW

Regulatorem nazywamy urządzenie, które porównuje sygnał wejściowy z obiektu pomiarowego z sygnałem wartości zadanej i w zależności od tej różnicy działa na urządzenie w takim kierunku, aby tę różnicę zmniejszyć.

Ze względu na wykorzystanie energii pomocniczej regulatory dzielimy na:

- regulatory bezpośredniego działania, które nie korzystają ze źródeł energii pomocniczej przy przedstawieniu elementu wykonawczego,
- regulatory pośredniego działania, które korzystają z energii pomocniczej przy przedstawieniu elementu wykonawczego.

Ze względu na rodzaj nośnika energii wyróżnia się:

- regulatory pneumatyczne,
- regulatory elektryczne,
- regulatory hydrauliczne,
- regulatory mieszane (elektropneumatyczne, elektrohydrauliczne).

Ze względu na rodzaj sygnału wyjściowego regulatory dzielimy na:

- regulatory ciągłe – regulatory typu P (regulator proporcjonalny), I (regulator-całkujący), PI (regulator proporcjonalno-całkujący), PD (regulator proporcjonalno-różniczkujący),
- regulatory nieciągłe – do tej klasy regulatorów zaliczyć należy regulatory przekaźnikowe dwupołożeniowe, trójpołożeniowe oraz krokowe czyli regulatory trójstanowe sprzężone z silnikiem krokowym.

Regulatory pracujące w układzie automatycznej regulacji nie mogące spowodować uchybu ustalonego do zera nazywamy regulatorami statycznymi. Należą do nich regulatory typu P oraz regulatory typu PD. Natomiast regulatory astatyczne to takie, które spowodują uchyb ustalony do zera. Przykładem tej grupy regulatorów są regulatory: I, PI oraz PID [5].

Ze względu na zmiany wartości zadanej regulatory możemy podzielić na:

- regulatory stałowartościowe – są to regulatory mające utrzymać stałą wartość zadaną (temperaturę, ciśnienie, poziom cieczy),
- regulatory programowe – są to takie regulatory, które potrafią śledzić wartość zadaną, której zmiany zostały wcześniej zaprogramowane,
- regulatory nadążne – są to regulatory pracujące w układzie regulacji nadążnej czyli takie, w których wartość zadana jest zmienna ale zmiany nie są wcześniej znane,
- regulatory ekstremalne – mają za zadanie utrzymanie ekstremalnego punktu pracy układu znajdującego się na charakterystyce statycznej lub dynamicznej obiektu,
- regulatory adaptacyjne – w których własności dynamiczne są optymalizowane przez automatyczne dostosowanie się do warunków pracy obiektu. W tym przypadku adaptacja może być parametryczna (nastrajanie parametrów regulatora) lub strukturalna (nastrajanie struktury),
- regulatory optymalne, które spełniają określony wskaźnik jakości, ujmujący globalnie własności dynamiczne obiektu. Ponieważ techniczna realizacja tych regulatorów

jest bardzo trudna, dlatego też buduje się regulatory suboptymalne (prawie optymalne), tzn. takie, które z pewnym przybliżeniem realizują założony wskaźnik jakości.

ALGORYTM PODSTAWOWY REGULATORA PID

Regulator PID jest najbardziej uniwersalnym typem regulatora, który zezwala na regulację obiektami o różnych charakterystykach. Klasyczny regulator PID na podstawie sygnału uchybu $e(t)$, będącego różnicą pomiędzy wartością zadaną $y(z)$ a rzeczywistą $y(t)$ wielkości sterowanej, wypracowuje sygnał sterujący $u(t)$ będący wynikiem trzech działań.

Konwencjonalna ciągła postać algorytmu PID ma postać:

$$u = K_p \cdot \left(e + \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^{\tau} e d\tau + T_d \cdot \frac{ed}{d\tau} \right) \quad (1)$$

gdzie:

K_p – współczynnik wzmocnienia części proporcjonalnej regulatora,

T_i – czas zdwojenia (Jest to czas potrzebny na to, aby przy wymuszeniu skokowym podanym na wejściu regulatora PI sygnał wyjściowy regulatora podwoił swoją wartość w stosunku do skoku początkowego spowodowanego działaniem proporcjonalnym),

T_d – czas wyprzedzania (jest to czas po upływie którego, w przypadku podania na wejście regulatora PD sygnału narastającego liniowo, sygnał związany z działaniem proporcjonalnym zrówna się z sygnałem pochodzącym od działania różniczkującego).

Wielkość regulująca (wyjściowa) regulatora PID jest proporcjonalna do wartości odchylenia regulacji e (działanie proporcjonalne),

do czasu trwania odchylenia $\int_0^{\tau} e d\tau$ (działanie całkujące)

i do szybkości zmian odchylenia regulacji $de/d\tau$ (działanie różniczkujące).

Człon proporcjonalny regulatora PID powoduje wzmocnienie uchybu i zapewnia sukcesywne jego zmniejszanie. Działanie P prowadzi do niestabilności układu regulacji. Wzrost wzmocnienia K_p powoduje zmniejszenie zapasu stabilności, poszerzenie pasma roboczego i współczynnika astatyzmu.

Człon całkujący w regulatorze PID powoduje korekcję w zakresie małych częstotliwości, wprowadzając efekt astatyzmu. Człon ten dla większych częstotliwości zmniejsza znacznie wzmocnienie, ogranicza pasmo robocze oraz wprowadza przesunięcie fazy, prowadząc do pogorszenia stabilności.

Człon różniczkujący stosuje się w celu przyspieszenia przebiegów zachodzących w układzie regulacji. W połączeniu z elementami całkującym i proporcjonalnym, działanie członu różniczkującego wprowadza do sygnału wyjściowego z regulatora składnik zależny od prędkości zmian uchybu regulacji. W sumie połączenie działań P i D zapewnia zwiększenie zapasu stabilności, wzmocnienia i rozszerzenia pasma roboczego [5].

PRZEGLĄD WYBRANYCH METOD NASTAW (STROJENIA) REGULATORA PID

W ostatnim czasie odnotowano duże zainteresowanie regulatorami PID pomimo wielu dostępnych technik ich strojenia opisanych w literaturze i rozwoju nowych metod. Zainteresowanie to, wynika z możliwości szerokiego zastosowania regulatorów PID w przemyśle oraz z faktu, iż część z nich jest nieprawidłowo strojona. Ponieważ obecnie w automatyce występuje ponad 181 metod strojenia regulatorów PID, to niemożliwe jest przeanalizowanie wszystkich z nich. Dlatego w niniejszym artykule scharakteryzowano tylko wybrane metody nastaw parametrów regulatora PID.

Rzeczywiste obiekty wysokiego rzędu, występujące w przemyśle spożywczym są opisywane za pomocą transformatu pierwszego lub drugiego rzędu z opóźnieniem transportowym lub bez niego. Jeśli złożoność procesów wzrasta, to ilość odpowiednich metod strojenia maleje lub w wielu wypadkach zanika. Metody doboru nastaw w tego typu procesach nie opierają się na wydajności oraz niezawodnych kryteriach, a zatem otrzymane parametry nie zawsze są optymalne. Jednakże istnieją takie metody strojenia regulatorów PID, jak algorytmy ewolucyjne, w których jako funkcję celu przyjmuje się kryteria błędów, czyli optymalizuje się wydajność regulatora poprzez minimalizację funkcji kosztów [1-2]. Funkcją kosztów (celu) w tym przypadku jest najczęściej funkcja błędu średniokwadratowego pomiędzy sygnałem wyjściowym a wejściowym.

Wiele metod doboru nastaw optymalnych parametrów regulatora PID wbudowanych jest w środowisku wysokiego programowania jakim jest program do obliczeń numerycznych „Matlab”. Metody te korzystają z oprogramowania Simulink, który pozwala budować modele symulacyjne przy pomocy interfejsu graficznego, pakietu narzędzi optymalizacyjnych Optimization Toolbox, oraz biblioteki NCD Blockset [3,4, 11]. Biblioteka NCD (ang. Nonlinear Control Design Blockset) umożliwia dobór optymalnych parametrów regulatora lub innych poszukiwanych parametrów przy wykorzystaniu wbudowanych do programu Matlab algorytmów optymalizacji (np. Optimization Toolbox).

Wśród konwencjonalnych metod, kryteriów i wskaźników jakości układów regulacji, które umożliwiają przeprowadzenie syntezy parametrycznej regulatorów, znalazły miejsce:

- metoda Zieglera-Nicholsa,
- kryterium optymalnego modułu,
- kryterium stabilności aperiodycznej,
- parametry odpowiedzi skokowej układu,
- całkowite wskaźniki jakości,
- metoda inwersji dynamicznej.

Jednym z najbardziej istotnych problemów regulacji jest optymalne nastawienie parametrów regulatora dla określonego procesu i uzyskanie w ten sposób prawidłowego działania układu. Nastawy regulatorów ciągłych wyznacza się różnymi metodami na podstawie odpowiednich wzorów obliczeniowych oraz tabel, które zapewniają minimalizację określonego wskaźnika jakości regulacji. Do tych metod zaliczyć należy najbardziej cytowane w literaturze metody, opracowane przez Zieglera i Nicholasa. Zadaniem ich optymalizacji było znalezienie

takich nastaw regulatorów, które minimalizowały kryterium jakości IAE, trzyskokowej zmianie wartości zadanej [14]. Po zaimplementowaniu regulatora w układzie regulacji, minimalizuje się jego działanie całkujące i działanie różniczkujące. Regulator uzyskuje wtedy charakterystykę zbliżoną do proporcjonalnej. Nastawia się najmniejsze wzmocnienie regulatora i następnie uruchamia układ regulacji. Poprzez zwiększanie stopniowe wzmocnienia regulatora doprowadza się do wystąpienia w układzie niegasnących oscylacji wielkości regulowanej, aż do osiągnięcia granicy stabilności układu. Przy tym krytycznym zakresie proporcjonalności mierzy się okres powstałych oscylacji. Następnie w zależności od zastosowanego rodzaju regulatora, optymalne nastawy oblicza się korzystając z odpowiednich tabel. Metody Zieglera i Nicholasa nie można stosować, jeśli względy technologiczne nie pozwalają na doprowadzeniu obiektu regulacji do granicy stabilności i wywołanie znacznych oscylacji wielkości regulowanej [8].

Jednym z najpopularniejszych sposobów oceniania przebiegu regulacji jest ocena parametrów odpowiedzi skokowej. W metodzie tej uwzględnia się następujące parametry:

- odchyłkę maksymalną e_{max} – która jest największą wartością odchyłki przebiegającą podczas przebiegu przejściowego,

- przeregulowanie $\kappa = \frac{e_2}{e_1} \cdot 100\%$ – jest to stosunek amplitudy pierwszej i drugiej odchyłki,

- czas narastania t_n – czas przyrostu wartości wyjściowej,
- czas regulacji t_r – czas liczony od chwili wystąpienia wymuszenia, aż do momentu, stabilizacji sygnału wyjściowego w okolicach nowej wartości zadanej. W zależności od procesu dopuszcza się wahania od wartości zadanej wynoszące od 1,2 do 5%.

Zadaniem układu regulacji jest uzyskanie możliwie krótkiego czasu regulacji i jak najmniejszego przeregulowania. Takie wymagania są sprzeczne ze sobą i dlatego konieczny jest kompromis. W praktyce do oceny jakości układu regulacji stosuje się kryteria całkowite, które oceniają cały przebieg sygnału błędu $e(t)$. Celem takiej optymalizacji jest minimalizacja wartości jednego z całkowitych wskaźników jakości:

- kryterium IAE (ang. *Integral of absolute value of error*) jest najprostszym kryterium w postaci błędu bezwzględnego uchybu w czasie,

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (2)$$

- kryterium ISE (ang. *Integral of error squared*) jest błędem średniokwadratowym i jest najczęściej wykorzystywanym kryterium do optymalizacji regulatorów, jednakże kładzie ono nacisk na czas narastania a nie zwraca uwagi na wielkość przeregulowania,

$$ISE = \int_0^{\infty} [e(t)]^2 dt \quad (3)$$

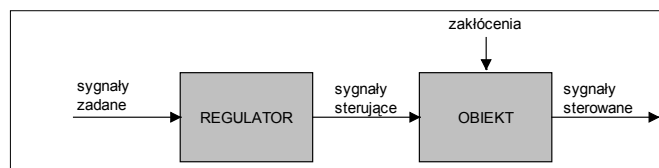
- kryterium ITAE (ang. *Integral of time absolute error* or *Time-weighted*) charakteryzuje się tym, że układ z regulatorem dobrany na podstawie tego kryterium, jest układem dość szybkim i odpornym na zakłócenia.

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (4)$$

Innym kryterium doboru nastaw regulatorów jest kryterium zastosowane przez Passena, który w tzw. regule Passena, wykorzystał aperiodyczność odpowiedzi skokowej i minimalizację czasu regulacji. Propozycje wspomnianych autorów dotyczące odpowiedzi obiektu do oscylacji i utrzymania amplitudy drgań na stałym poziomie są trudne do wykonania w sposób automatyczny. Poza tym nie wszystkie obiekty można doprowadzić do granic stabilności [5,6,7].

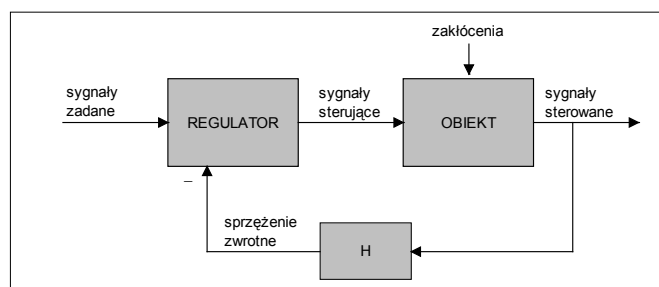
1. Identyfikacja obiektu w układzie otwartym i zamkniętym

Obiekt sterowania odpowiednio połączony z regulatorem tworzy układ sterowania. Układ ten może być układem otwartym lub zamkniętym – ze sprzężeniem zwrotnym. W przypadku układu otwartego sygnały sterowane nie oddziałują na regulator (rys.1). W zamkniętym układzie regulacji (rys.2) sygnały sterowane są doprowadzane przez ujemne sprzężenie zwrotne z powrotem na wejście układu i porównywane w regulatorze z odpowiednimi sygnałami zadanymi. Powstała w ten sposób różnica jest przetwarzana według algorytmu regulatora na sygnały sterujące.



Rys. 1. Otwarty układ sterowania.

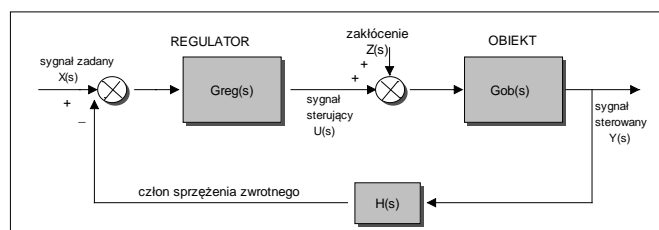
Źródło: Chotkowski W., 1981.



Rys. 2. Zamknięty układ sterowania (w pętli zamkniętej).

Źródło: Chotkowski W., 1981.

Sterowanie w układzie zamkniętym nazywamy regulacją automatyczną. Na rysunku 3 przedstawiono schemat blokowy układu automatycznej regulacji jednej zmiennej z oznaczeniem transmitancji i poszczególnych elementów oraz transformat Laplace'a sygnałów w nim występujących.



Rys. 3. Schemat blokowy układu regulacji automatycznej.

Źródło: Chotkowski W., 1981.

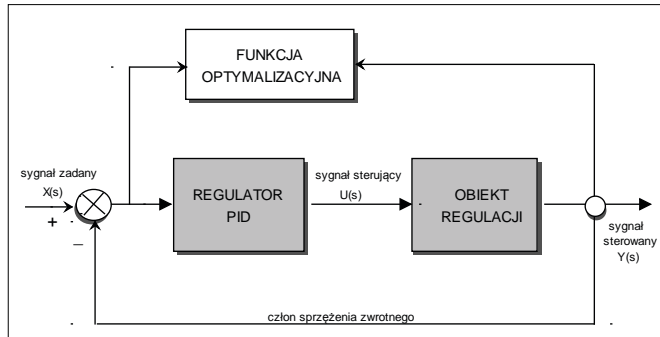
Zadaniem regulatora jest wytwarzanie sygnału sterującego $U(s)$ obiektem regulacji przez porównanie wartości mierzonej z wartością zadaną (tzw. uchyb regulacji $e(t) = X(s) - Y(s)$), zapewniającego pożądany przebieg zmiennej regulowanej $Y(s)$.

W celu znalezienia nastaw regulatora PID należy zidentyfikować obiekt podlegający sterowaniu, tzn. wyznaczyć jego model matematyczny. Definiuje on w sposób ścisły jego zachowanie w określonych warunkach, które są opisane przez wejścia i wyjścia z obiektu w chwili obecnej i w przyszłości. Identyfikacja jest przeprowadzana na podstawie informacji pomiarowej o wielkościach wejściowych i wyjściowych rozpatrywanego obiektu. W odniesieniu do sygnałów często stosuje się idealizację, która polega na przybliżaniu rzeczywistych sygnałów ich idealnym odpowiednikiem opisywanym matematycznie. Takie postępowanie pozwala nam na łatwiejszą ich analizę w zadaniach identyfikacji.

Z natury rzeczy model jest pewnym przybliżeniem rzeczywistego obiektu, idealizacją z ograniczającymi założeniami. Ograniczeniami obiektu może być ilość wejść i wyjść, liniowość. W praktyce stosuje się różne postacie modeli w zależności od ich zastosowania i struktury identyfikowanego obiektu. Modele opisujące rzeczywiste obiekty, są podzielone na modele dynamiczne i liniowe, wielowejsciowe i wielowyjściowe (ang. Multiple Input Multiple Output, MIMO) oraz modele z jednym wejściem i jednym wyjściem (ang. Single Input Single Output, SISO) [6-7].

2. Przykład zadania optymalizacyjnego

Na rysunku 4 przedstawiono schemat blokowy optymalizowanego zadania. Celem optymalizacji jest minimalizacja błędu pomiędzy sygnałem wejściowym a wyjściowym oraz dobór parametrów regulatora PID w układzie zamkniętym dla wszystkich kroków w czasie od 0 do 100 s.



Rys. 4. Ogólny schemat blokowy układu zamkniętego z regulacją PID.

Źródło: Chotkowski W., 1981.

W naszym przykładzie transmitancja obiektu oscylacyjnego jest wyrażona wielomianem trzeciego rzędu:

$$G(s) = \frac{1.5}{50s^3 + 43s^2 + 3s + 1} \quad (5)$$

Jednym ze sposobów rozwiązania tego typu problemu jest minimalizacja błędu pomiędzy sygnałem wyjściowym a wejściowym. Zmiennymi parametrami są parametry regulatora PID (K_p , T_i , T_d). Jeśli chcielibyśmy zminimalizować błąd w jakimś ustalonym czasie zastosowalibyśmy jednokryterialną funkcję celu. Ponieważ naszym celem jest minimalizacja błędu pomiędzy wartością wyjściową a wejściową w odstępie czasowym od 0 do 100 s, nasze zadanie jest więc zagadnieniem wielokryterialnym [12].

Funkcją realizującą powyższe zadanie optymalizacyjne jest funkcja o nazwie *lsqnonlin*, którą uruchamiamy

w narzędziu do optymalizacji Optimization Toolbox, znajdującego się w programie Matlab. Funkcja *lsqnonlin* realizuje zadanie liniowe MNK (metodą najmniejszych kwadratów). Za jej pomocą możemy rozwiązywać problemy o średniej i o dużej skali trudności. Funkcja ta, stosuje algorytm Gaussa-Newtona oraz metodę z regularyzacją Lavenberga-Marquardta. Metoda Gaussa-Newtona wykorzystuje specyficzną postać hesjanu i wektor gradientu funkcji celu, do utworzenia liniowego zadania najmniejszych kwadratów. Rozwiązanie tego zadania przyjmowane jest jako kierunek poprawy. Uzyskany w ten sposób kierunek jest zbliżony do uzyskiwanego w metodzie Newtona. W metodzie Lavenberga-Marquardta kierunek poprawy jest otrzymywany w rezultacie rozwiązania układu równań liniowych. W zależności od wartości parametru układu uzyskuje się kierunki zbliżone do kierunku Gaussa-Newtona do kierunku najszybszego spadku [12].

Zastosowanie funkcji optymalizacyjnej *lsqnonlin* do znalezienia optymalnych parametrów regulatora PID wymaga odpowiedniego zapisu funkcji w skryptach programu Matlab, którego kody opisano w poszczególnych krokach.

Krok 1

```
function F = tracklsq(pid,a1,a2)
Kp = pid(1);
Ki = pid(2);
Kd = pid(3);
opt = simset('solver','ode5','SrcWorkspace','Current');
[tout,xout,yout] = sim('optsim',[0 100],opt);
F = yout-1;
```

Zapis funkcji *tracklsq* w *m*-pliku z wykorzystaniem Simulinka do obliczenia trajektorii funkcji celu (błędu) w oknie roboczym Matlab.

Krok 2

```
optsim
pid0 = [0.63 0.0504 1.9688];
a1 = 3; a2 = 43;
options = optimset('Algorithm','levenberg-marquardt',...
'Display','off','TolX',0.001,'TolFun',0.001);
pid = lsqnonlin(@tracklsq, pid0, [], [], options);
Kp = pid(1); Ki = pid(2); Kd = pid(3);
```

Zapis funkcji *lsqnonlin* z wywołaniem funkcji *tracklsq* z kroku 1 optymalizowanego modelu opisanego w Simulinku, wraz z początkowymi parametrami regulatora PID, tzn. $k_p=0.63$, $k_i=0.0504$, $k_d=1.9688$ oraz zmiennymi parametrami a_1 , a_2 modelu poddanemu regulacji.

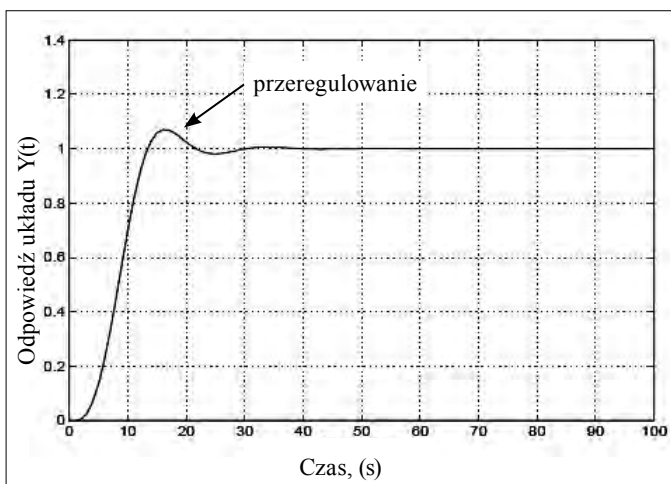
Wyniki optymalizacji dla 73 funkcji obliczeniowych przedstawiono na poniższym skrypcie w oknie roboczym Matlab. Optymalizacja zakończyła się powodzeniem a jej wyniki są następujące: $K_p = 2,9633$ $T_i = 0,1436$ $T_d = 13,1386$.

Odpowiedź skokową regulatora zoptymalizowanego za pomocą funkcji *lsqnonlin* metodą najmniejszych kwadratów pokazano na rysunku 5.

Iteration	Func-count	Residual	Step-size	Directional derivative	Lambda
1	3	8.66531	1	-3.48	
2	10	6.78831	1	-0.0634	3.4355
3	19	5.99204	5.5	-0.0446	0.28612
4	28	4.74992	5.78	-0.0213	0.0227966
5	36	4.51795	1.25	0.0222	0.0744258
6	43	4.5115	0.58	-0.00633	0.03445
7	51	4.49455	2.99	0.000688	0.017225
8	58	4.4836	0.915	0.00203	0.0180998
9	66	4.47724	1.22	0.000845	0.00904992
10	73	4.47405	0.801	-0.00072	0.0113409

Optimization terminated successfully:

$k_p=2.9633$; $k_i=0.1436$; $k_d=13.1386$



Rys. 5. Odpowiedź skokowa obiektu z regulatorem PID strojonym za pomocą funkcji *lsqnonlin*.

Źródło: Opracowanie własne.

Na powyższym rysunku nietrudno zauważyć nieznaczne przeregulowanie w fazie początkowej. Aby pozbyć się przeregulowania w dalszym etapie badań zaproponowano zastosowanie funkcji *minimax*, która dodatkowo wprowadza nieliniowe ograniczenia.

Funkcja ta korzysta z algorytmu poszukiwania najlepszego rozwiązania dla problemu wielokryterialnego. Algorytm stosowany w funkcji *fminimax* wykorzystuje wielokrotne programowanie kwadratowe oraz poszukiwanie gradientu i hesjanu, zaczynając od punktu startowego. Za pomocą funkcji *fminimax* można zbudować aproksymację jednostajną lub aproksymację czebyszewowską tablicowych danych [10,11,12].

Procedura zastosowania funkcji *minimax* w Matlabie obejmowała trzy kroki:

Krok 1

```
function F = trackmmobj(pid,a1,a2)
Kp = pid(1);
Ki = pid(2);
Kd = pid(3);
opt = simset('solver','ode5','SrcWorkspace','Current');
[tout,xout,yout] = sim('optsim',[0 100],opt);
F = yout;
assignin('base','F_TRACKMMOBJ',F);
```

Zapisz funkcję *trackmmobj* w *m*-pliku z wykorzystaniem Simulinka do obliczenia funkcji celu.

Krok 2

```
function [c,ceq] = trackmmcon(pid, a1,a2)
F = evalin('base','F_TRACKMMOBJ');
c = -F(20:100)+.95;
ceq = [];
```

Opis funkcji *trackmmcon* w *m*-pliku do obliczenia nieliniowych ograniczeń.

Krok 3

```
function F = tracklsq(pid,a1,a2)
Kp = pid(1);
Ki = pid(2);
Kd = pid(3);
opt = simset('solver','ode5','SrcWorkspace','Current');
[tout,xout,yout] = sim('optsim',[0 100],opt);
F = yout-1;
```

Zapisz funkcję *minimax* z wywołaniem funkcji z kroku 1, simulinka, wraz z początkowymi zmiennymi parametrami regulatora PID, tzn. $k_p=0.63$, $k_i=0.0504$, $k_d=1.9688$ oraz zmiennymi parametrami a_1, a_2 obiektu poddanemu regulacji.

```
optsim
pid0 = [0.63 0.0504 1.9688]
a1 = 3; a2 = 43;
options = optimset('Display','iter',...
'TolX',0.001,'TolFun',0.001);
pid = fminimax(@trackmmobj,pid0,[],[],[],[],[],...
'trackmmcon',options,a1,a2);
Kp = pid(1); Ki = pid(2); Kd = pid(3);
```

Poniżej przedstawiono wyniki działania symulacji numerycznej z uwzględnieniem ograniczeń i wyliczeń funkcji celu w poszczególnych iteracjach.

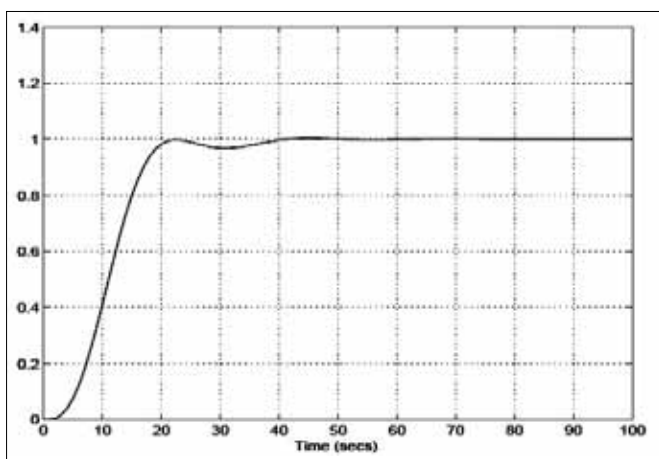
Objective Max Line search Directional

Iter	F-count	value	constraint	steplength	derivative	Procedure
0	5	0	1.11982			
1	11	1.184	0.07978	1	0.482	
2	17	1.012	0.04285	1	-0.236	
3	23	0.9995	0.007058	1	-0.0186	Hessian modified twice
4	29	0.9997	9.706e-007	1	0.00716	Hessian modified

Optimization terminated successfully:

$k_p=0.5910$, $k_i=0.0606$, $k_d=5.5383$

Wyniki parametrów regulatora PID zoptymalizowanego za pomocą programowania kwadratowego wynoszą odpowiednio: $k_p=0.5910$, $k_i=0.0606$, $k_d=5.5383$. Maksymalna wartość funkcji celu dla wszystkich kroków czasowych wyniosła 0.9997. Wyniki odpowiedzi skokowej regulatora PID zoptymalizowanego za pomocą funkcji *minimax* przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Odpowiedź skokowa regulatora PID podczas doboru nastaw za pomocą funkcji *minima*.

Źródło: Opracowanie własne.

Jak widać na powyższym rysunku nie zauważono większego przeregulowania. Zatem można przyjąć ten układ za dobrze zaprojektowany.

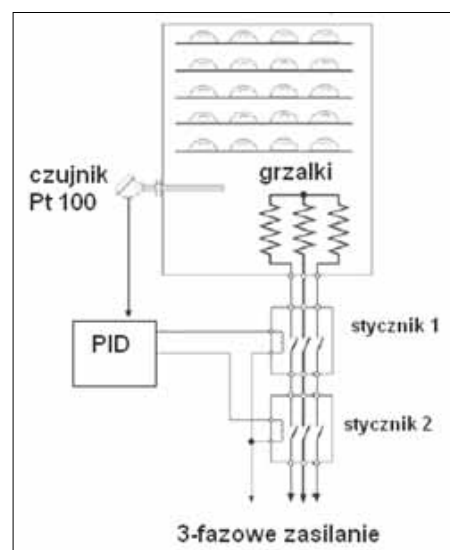
PRZYKŁADY ZASTOSOWAŃ REGULATORÓW PID W PRZEMYSŁE SPOŻYWCZYM

Obiektem regulacji PID stosowanym w przemyśle spożywczym może być piec piekarniczy pokazany na rysunku 7. Celem regulacji jest utrzymanie stałej temperatury pieca. W układzie regulacji sygnał wejściowy (temperatury), odczytany za pomocą termopary lub czujnika termorezystancyjnego przesyłany jest do regulatora, w którym dokonuje się nastaw wartości zadanej (temperatury) za pomocą pokrętła. Sygnałem wyjściowym (sterującym) z regulatora jest przełącznik lub tranzystor połączony do grzałek pieca.

Regulatory PID, które są wykorzystywane w przemyśle spożywczym, znalazły zastosowanie między innymi w :

- sterowaniu procesem mikrofiltracji surowej trzciny cukrowej,
- procesie pasteryzacji,

- stałowartościowej regulacji pH nawapniacza wstępnego w cukrowni [9],
- zagadnieniu regulacji temperatury w formie wtryskowej,
- sterowaniu temperaturą w komorach suszarniczych,
- urządzeniach pakujących,
- urządzeniach dla chłodnictwa, klimatyzacji i wentylacji.



Rys. 7. Przykład regulacji PID temperatury w piecu piekarniczym.

Źródło: Ludwicki M., 2009.

Większość nowej generacji cyfrowych regulatorów PID stosowanych w przemyśle spożywczym to urządzenia samo-dostrajające lub samoparametryzujące się (takie jak wyżej wspomniane sterowniki przemysłowe PLC), które nie wymagają ręcznego dobierania nastaw stałych współczynników w algorytmie PID. Sterowniki PLC po przeanalizowaniu przebiegu odpowiedzi wymuszenia skokowego na wyjściu, obliczają optymalne współczynniki algorytmu PID i automatycznie wprowadzają je do realizacji [13].

PODSUMOWANIE

Współczesna gospodarka żywnościowa jest dziedziną, która wykorzystuje najnowsze technologie oraz nowoczesną technikę kontrolno-pomiarową. Dla zapewnienia prawidłowej pracy maszyn i urządzeń oraz zapewnienia optymalnego przebiegu procesów technologicznych i bezpieczeństwa konieczne jest ciągle mierzenie, monitorowanie i rejestracja parametrów technicznych i technologicznych. Bardzo ważna jest na przykład analiza zagrożeń i krytycznych punktów

kontroli, dotycząca konieczności ciągłego nadzorowania temperatury i wilgotności powietrza w przemyśle spożywczym podczas produkcji, transportu i przechowywania żywności. W pomieszczeniach do składowania mięsa jest wymagana ciągła rejestracja (przez okres 3 lat) wilgotności i temperatury z określoną dokładnością. Do zagwarantowania skuteczności powyższych przepisów jest wymagane stosowanie współczesnych systemów kontrolno-pomiarowych, dających możliwość jednoczesnego sterowania i regulacji wielu parametrów. W tym celu wykorzystuje się sterowniki programowalne PLC, w których umieszczono regulatory PID [13]. Parametry regulatorów PID wymagają często optymalnego doboru ich nastaw, które realizuje się według metod opisanych w niniejszym artykule.

LITERATURA

- [1] **ASTROM K.J., HAGGLUM. 2001.** *The future of PID control.* Control Engineering Practice 9.
- [2] **ASTROM, K.J., EYKOFF P. 1975.** *System Identification-a survey.* Automatica, 7.
- [3] **BROGAN W.L. 1991.** *Modern Control Theory.* Third edition, Prentice Hall.
- [4] **CAMACHO E.F., BORDONS C. 2004.** *Modern Predictive control in the process industry.* Prentice Hall.
- [5] **CHOTKOWSKI W. 1981.** *Podstawy automatyki.* Politechnika Gdańska.
- [6] **CZARKOWSKI D. 2002.** Identyfikacja oraz strojenie regulatora PID przy wykorzystaniu pakietu Matlab. Praca magisterska, Gdynia.
- [7] **DELORES M. ETTER. 1997.** *Engineering Problem Solving with Matlab, second edition.* Prentice Hall, New Jersey.
- [8] **LUDWICKI M. 2009.** *Sterowanie procesami w cukrowniach. Dobór nastaw regulatora PID.* Gazeta cukrownicza 5.
- [9] **LUDWICKI M. 2002.** Sterowanie procesami w przemyśle spożywczym. PTTŻ, Łódź.
- [10] **MOŚCICKI J., OGOŃOWSKI Z. 1995.** *Advance Control with Matlab & Simulink* Ellis Horwood.
- [11] **OGATA K. 2002.** *Modern Control Engineering.* Fourth edition, Prentice Hall, New Jersey.
- [12] **COLEMAN T., BRANCH, M.A., GRACE, A. 2001.** *Optimization Toolbox for use with Matlab, User's Guide, Mathworks.*
- [13] **SALAŁ R., KORPYSZ K., OBSTAWSKI P. 2010.** *Wstęp do programowania sterowników,* Warszawa, WKŁ.
- [14] **ZIEGLER, J.G., NICHOLAS, N.B. 1942.** *Optimum settings for automatic controllers circuit.* Transaction of the ASME, p 759-768.

APPLICATION AND OPTIMIZATION OF PID CONTROLLERS IN FOOD INDUSTRY

SUMMARY

This article discusses the principle of PID controllers used for process control in food industry. The methods for tuning of PID controllers by function, implemented in Matlab are presented.