

Wpływ wybranych wskaźników jakości regulacji na parametry sygnału sterującego w układzie z regulatorem PID

Maciej J. Pawliński, Sebastian Plamowski, Paweł D. Domański

Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych, Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej,
ul. Nowowiejska 15/19, 00-665 Warszawa

Streszczenie: Praca ma na celu zbadanie i porównanie regulatorów PID o parametrach uzyskanych w wyniku optymalizacji wybranych wskaźników jakości pod kątem właściwości generowanych sygnałów sterujących. Punktem wyjścia do analizy są symulacje przeprowadzone w środowisku MATLAB przeprowadzone dla pięciu obiektów (z czterech klas) na sześciu typach wskaźników. Przedstawiono w szczególności zastosowane metody i wykorzystane algorytmy. W pracy prezentowane są otrzymane w trakcie optymalizacji nastawy regulatorów PID, przebiegi sygnałów procesowych w badanych układach regulacji oraz obliczone parametry sygnałów sterujących, a także sformułowane na podstawie badań obserwacje i wnioski.

Słowa kluczowe: regulacja PID, optymalizacja, ocena jakości, wskaźniki jakości, sygnał sterujący

1. Wprowadzenie

W związku z postępującym rozwojem techniki i rosnącą w wyniku globalizacji konkurencją coraz większą uwagę zwraca się na dokładne sterowanie procesami ciągłymi, które stanowią podstawę wielu gałęzi przemysłu. Przejawia się to rosnącą popularnością zaawansowanych algorytmów regulacji, takich jak sterowanie predykcyjne [22], jednak jego stosowalność ma swoje praktyczne ograniczenia [19] i najczęściej stosowanym rozwiązaniem pozostaje występujący w różnych formach regulator PID [12]. Regulacja z wykorzystaniem tego algorytmu ma wiele zalet, które przyczyniły się do jego popularności w przemyśle. Regulatory tego rodzaju nie wymagają modelu obiektu do działania, nie wymagają dużego nakładu obliczeń ze strony sterowników, a często mimo swojej prostoty zapewniają w zupełności wystarczającą dokładność i szybkość regulacji [11].

W celu zapewnienia poprawnego działania układu regulacji, nastawy (parametry) regulatora PID powinny zostać odpowiednio dobrane pod kątem właściwości obiektu sterowania. Poprawne dostrzeżenie poprawia jakość produktu, ogranicza koszty eksploatacji, a także podnosi bezpieczeństwo obiektu.

Trafny dobór nastaw regulatora ma istotny wpływ na wiele aspektów procesu, ale przede wszystkim prowadzi do zwiększenia zysków i ograniczenia kosztów, co powinno być wystarczającym argumentem za tym, że jest to istotny problem, który nie powinien być lekceważony [5, 13].

W literaturze temat ten rozpatrywany jest od wielu lat. Pierwsze raportowane prace pojawiają się w latach 60. wraz z ocenami pracy układów sterowania w piernictwie dokonanych przez Åströma [1]. Badania były kontynuowane w kolejnych dziesięcioleciach [23, 26]. Znaczne przyspieszenie nastąpiło w 1989 r. wraz z pracami Harrisa [9] na temat metod minimalno-wariacyjnych. Obecne rozwiązania pozwalają na zastosowanie dla różnych przypadków oraz zjawisk, jak na przykład nieliniowości [10], układów wielkiej skali [14], regulacji predykcyjnej [16], systemów wielowymiarowych [27], uwzględniając wpływ tarcia w urządzeniach wykonawczych [4], zjawiska oscylacji [20] i wiele innych [8]. Owe badania znalazły również przełożenie komercyjne, jako że istnieje wiele rozwiązań informatycznych automatyzujących proces [3]. Ponieważ opracowano wiele różnych wskaźników, można wydzielić kilka grup podejść [8, 11, 21]:

- rozwiązania w dziedzinie czasu wykorzystujące odpowiedź skokową: uchyb ustalony, przeregulowanie, czas regulacji, dojścia, osiągnięcia maksimum, wskaźniki: Area Index, Output Index, R-index, Idle Index,
- wskaźniki bazujące na przebiegach czasowych zmiennych biorących udział w sterowaniu (sygnał sterujący, uchyb regulacji, wyjście procesu), najczęściej w postaciach całkowitych: średni błąd kwadratowy MSE (Mean Square Error), średnia całka z modułu IAE (Integral of Absolute Error), ale i innych jak wskaźnik amplitudowy AMP (Amplitude Index),
- miary statystyczne: odchylenie standardowe, wariancja, skośność, kurtoza, współczynniki skali, kształtu, statystyki wyższego rzędu,

Autor korespondujący:

Paweł D. Domański, p.domanski@ia.pw.edu.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 4.02.2019 r., przyjęty do druku 25.03.2019 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

- wskaźniki minimalno-wariacyjne,
- miary bazujące na modelu,
- alternatywne rozwiązania, np. wykorzystujące sieci neuronowe, analizę w dziedzinie falek, częstotliwości, funkcji ortogonalnych, rozwiązania jądrowe (kernelowe), fraktalne, analizy spektralne czy też entropię,
- czysto biznesowe wskaźniki, najczęściej wyrażone w jednostkach monetarnych zwane KPIs.

W odpowiedzi na potrzebę doboru parametrów regulatorów PID opracowano szereg metod ułatwiających pracę automatyków. Popularnymi metodami doboru parametrów są [17, 25]:

- strojenie ręczne;
- metody tabelaryczne (np. Ziegler-Nichols, Tyreus-Luyben);
- strojenie automatyczne (np. relay tuning);
- analiza częstotliwościowa;
- optymalizacja wskaźników jakości.

Mimo że wszystkie metody spełniają swoje zadanie, nie są pozbawione istotnych wad. Strojenie ręczne zajmuje dużo czasu i nie daje żadnej gwarancji, że uzyskane parametry są bliskie optymalnym. Metody automatyczne i ujęte w tabelach reguły wymagają specjalnego pobudzenia obiektu w trakcie procedury. Analiza częstotliwościowa z kolei pozwala zapewnić układowi odpowiednie zapasy stabilności, ale nie zapewnia bezpośredniego przełożenia na inne wskaźniki jakości, szczególnie te w dziedzinie czasu (czas sterowania, przeregulowania) ale i na wskaźniki całkowite. Interpretacja zapasów modułu i fazy nie jest intuicyjna i trudna w przemysłowych zastosowaniach. Poza tym wymaga identyfikacji charakterystyki częstotliwościowej obiektu, co w przypadku wielu obiektów (chemia procesowa, obiekty niestabilne) jest trudne lub wręcz niemożliwe do uzyskania.

Optymalizacja wskaźników jakości, będąca tematem niniejszej pracy, również nie jest pozbawiona wad. Strojenie regulatora PID tą metodą wymaga przede wszystkim dokładnego modelu procesu, którego uzyskanie nie zawsze jest proste, a także wymaga niemałego nakładu mocy obliczeniowej w samym procesie optymalizacji. Ponadto otrzymane w wyniku optymalizacji regulatory często działają zbyt agresywnie, żeby były bezpieczne dla urządzeń wykonawczych występujących w układzie.

Pomimo tych wad optymalizacja wskaźników jakości umożliwia dobór parametrów regulatora spełniających optimum jakości według określonego przez użytkownika kryterium, a ponadto nie wymaga oddziaływania na obiekt w trakcie jego pracy. Co więcej, wraz z rosnącą mocą obliczeniową sterowników programowalnych i komputerów przemysłowych, a także coraz częściej w przemyśle archiwizowaniem przebiegów zmiennych procesowych w bazach danych, wady tej metody powinny stawać się coraz mniej dotkliwe w przyszłości [12].

Rozwój technik komputerowych i algorytmów obliczeniowych jest motorem do odkrywania właściwości algorytmów poprzez ich symulację komputerową. Silne i powszechnie dostępne maszyny

pozwalają na wykonanie bardziej złożonych obliczeń w krótkim czasie bez wymuszania stosowania technik pozwalających na analityczne uproszczenia. Idąc w tym nurcie autorzy niniejszej pracy postanowili zbadać wpływ wskaźników jakości opisanych na błędzie na parametry sygnału sterowania generowanego przez algorytm PID. Badania przeprowadzono w oparciu o symulacje układu regulacji i obiektu (zamknięty układ sterowania) – w każdym badanym przykładzie dokonano optymalizacji parametrów regulatora PID wykorzystując algorytm optymalizacji globalnej. Wybór ten ma na celu uniknięcie potencjalnych rozwiązań lokalnych i często jest stosowany do takich zadań. W szczególności przebadano wskaźniki różne od najczęściej stosowanego podejścia opartego na błędzie średniokwadratowym, którego popularność wynika właśnie z właściwości. Wskaźnik średniokwadratowy w swojej naturze jest zawsze dodatni i różniczkowalny, dzięki czemu zastosowanie jego pozwala na uzyskanie pełnego analitycznego rozwiązania optymalnego lub też ograniczeniu obliczeń w szeregu problemów [17].

Celem niniejszej pracy jest porównanie wybranych wskaźników jakości wykorzystywanych do strojenia regulatorów PID pod kątem właściwości sygnałów wyjściowych (sterowań) wyliczonych z algorytmu oraz próba znalezienia wskaźnika, który pozwala na uzyskanie bezpiecznych przebiegów sygnału sterującego dla wszystkich badanych klas obiektów. Treść została uporządkowana tak, aby możliwie czytelnie zobrazować wykorzystane metody i algorytm oraz zaprezentować metodykę badań jakości sterowania. W oparciu o przeprowadzone badania sformułowana wnioski oraz wskazano możliwe kierunki dalszych prac.

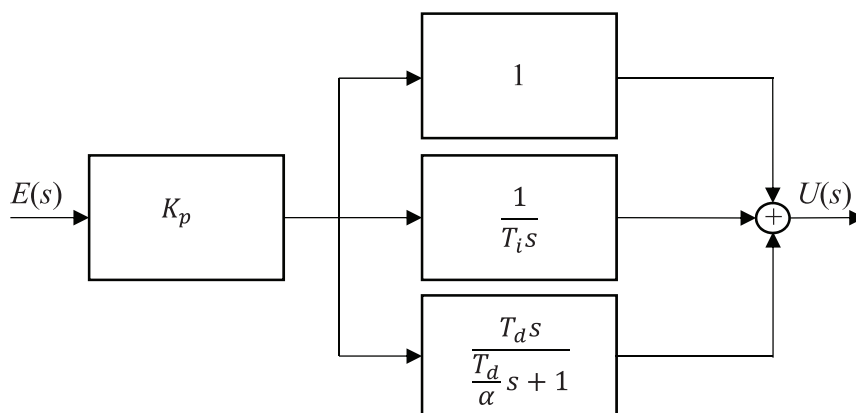
2. Metody i algorytmy

W badaniach zastosowano algorytm PID w strukturze równoległej (rys. 1).

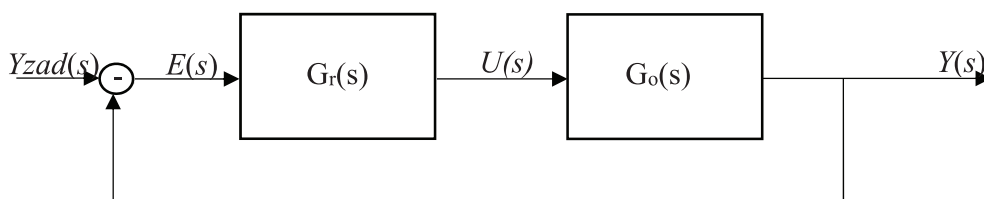
W praktyce stosowana jest rzeczywista równoległa struktura regulatora PID, w której człon różniczkujący jest rozszerzony o działanie inercyjne ze stałą czasowa T_d/α . Regulator opisany jest wzorem (1):

$$U(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{\alpha s + 1} \right) E(s) \quad (1)$$

gdzie: $U(s)$ – transformata sygnału sterowania; $E(s)$ – transformata sygnału uchybu regulacji; K_p – współczynnik wzmocnienia; T_i – stała czasowa całkowania; T_d – stała czasowa różniczkowania; α – wzmocnienie dynamiczne regulatora, wartość jego zazwyczaj wybierana jest z zakresu 5–20, a wartość typowa wynosi 10.



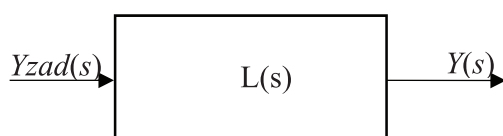
Rys. 1. Struktura regulatora PID z rzeczywistym różniczkowaniem
Fig. 1. The structure of the PID controller with real differentiation



Rys. 2. Struktura układu regulacji z regulatorem PID
Fig. 2. Structure of the control system with PID controller

Symulacje przeprowadzono w ten sposób, że regulator PID podłączono do obiektu (opis badanych obiektów przedstawiono w rozdziale 2) w pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego (rys. 2). Celowo, co zostało wyjaśnione w rozdziale 4, w badaniach nie analizowano wpływu zakłóceń działających na obiekt.

Dla takiego układu wyznaczono transmitancję zastępczą w sposób zgodny z rysunkiem 3.



Rys. 3. Schemat układu zamkniętego
Fig. 3. Closed loop schema

Transmitancję układu zamkniętego można opisać wzorem (2).

$$L(s) = \frac{H(s)}{H(s) + 1} \quad (2)$$

gdzie: $G_r(s)$ – transmitancja regulatora PID; $G_o(s)$ – transmitancja obiektu; $L(s)$ – transmitancja zastępcza pętli regulacji; $H(s)$ – transmitancja zastępcza regulatora PID i obiektu wyrażona jako: $H(s) = G_r(s) \cdot G_o(s)$.

Uzyskany w ten sposób układ jest równoważny początkowej postaci pętli regulacji i w takiej postaci został wykorzystywany w trakcie optymalizacji nastaw regulatorów. Użycie zastępczej transmitancji pozwoliło na skrócenie czasu obliczeń w symulacjach, co w przypadku stosowania algorytmów optymalizacji, gdzie każda iteracja algorytmu optymalizacji wymaga wyliczenia wskaźnika jakości (i tym samym wykonania symulacji układu) miało istotne znaczenie.

Celem zadania optymalizacji było wyznaczenie parametrów regulatora PID, dla których wskaźnik jakości opisany na błędzie między wartością zadaną a uzyskanym przebiegiem osiągnie wartość minimalną. W symulacjach wykorzystano kilka typów wskaźników, opis wykorzystanych wskaźników przedstawiono w rozdziale 3. Dla każdego typu obiektu i każdego wskaźnika wykonano optymalizację nastaw algorytmu PID używając hybrydowego autorskiego rozwiązania polegającego na wstępnym siłowym przeszukaniu dziedziny rozwiązań po siatce, a następnie uruchomieniu funkcji środowiska MATLAB *fmincon* dla najlepszego, względem optymalizowanego wskaźnika, węzła z siatki.

Kolejne kroki algorytmu w szczegółach przedstawiono w punktach poniżej:

1. Ręczne oszacowanie dziedziny parametrów regulatora PID, dla danego obiektu.
2. Określenie granulacji parametrów PID – gęstości siatki, dla której przeprowadzone zostaną symulacje.
3. Symulacja układu zamkniętego dla wszystkich kombinacji wartości parametrów regulatora PID (węzłów siatki) na

trajektorii w postaci skoku jednostkowego wartości zadanej o długości 500.

4. Wyznaczenie wartości uchybów dla każdego węzła i wyliczenie wskaźników jakości.
5. Wybór węzłów, dla których uzyskano najlepsze wartości względem badanych wskaźników jakości i uruchomienie, dla każdego wskaźnika algorytmu lokalnego *fmincon* z rozwiązaniem startowym równym wartościom parametrów (nastaw regulatora PID) z węzła.

Opisany algorytm zastosowano dla każdego badanego obiektu. W ten sposób uzyskano optymalne zestawy parametrów sterujących algorytmu PID niezależnie dla każdego badanego obiektu i każdego badanego wskaźnika jakości. Znalezione rozwiązania optymalne przebadano następnie pod kątem właściwości sygnału sterującego, jak i uzyskanych przebiegów sygnałów procesowych.

3. Obiekty i wskaźniki jakości sterowania

W celu uwiarygodnienia i sprawdzenia uniwersalności sformułowanych wniosków, badania przeprowadzono na obiektach o różnych właściwościach. Obiekty zostały wybrane ze względu na swoją uniwersalność i możliwość modelowania przy ich pomocy wielu rzeczywistych procesów przemysłowych, co na przykład widać w klasycznych przykładach dla układów regulacji typu PID [2]. Podczas badań wykorzystano pięć obiektów (z czterech klas – obiekt oscylacyjny badany był z opóźnieniem i bez opóźnienia) i przebadano sześć różnych wskaźników jakości, według których dokonano optymalizacji parametrów algorytmu PID.

3.1. Obiekty sterowania

W artykule opisano rezultaty z badań obiektów opisanych równaniami (3–7):

– obiekt inercyjny I rzędu

$$G(s) = \frac{1}{10s + 1} \quad (3)$$

– obiekt inercyjny II rzędu z opóźnieniem

$$G(s) = \frac{1}{100s^2 + 40s + 1} e^{-10s} \quad (4)$$

– obiekt oscylacyjny i obiekt oscylacyjny z opóźnieniem

$$G(s) = \frac{1}{4s^2 + 0,8s + 1} \quad (5)$$

$$G(s) = \frac{1}{4s^2 + 1,2s + 1} e^{-10s} \quad (6)$$

– obiekt nieminimalnofazowy

$$G(s) = \frac{-10s + 1}{400s^2 + 40s + 1} \quad (7)$$

3.2. Wskaźniki jakości

Wykorzystano sześć wskaźników jakości opisanych równaniami (8–13). Wybór łączy w sobie wskaźniki klasyczne z odpornymi. Wynika to z faktu, że charakter przebiegów często cechuje się właściwościami niegaussowskimi [6, 7], a takich przypadkach wskaźniki odporne jak IAE, LMS czy też ADM powinny być lepiej dopasowane.

ISE (*Integral of Squared Error*) – całka z kwadratu uchybu regulacji na całym horyzoncie czasowym eksperymentu [17], wskaźnik ten opisany jest wzorem (8):

$$ISE = \int_{t_0}^{t_k} e^2 dt \tag{8}$$

IAE (*Integral of Absolut Error*) – całka z modułu uchybu regulacji na całym horyzoncie czasowym eksperymentu [18], wskaźnik ten opisany jest wzorem (9):

$$IAE = \int_{t_0}^{t_k} |e| dt \tag{9}$$

LMS (*Least Median of Squares*) – mediana kwadratów uchybu regulacji [15], wskaźnik ten opisany jest wzorem (10):

$$LMS = \text{median}(e^2) \tag{10}$$

ADM (*Average Distance from Median*) – średnia odległość próbek od mediany [24], wskaźnik ten opisany jest wzorem (11):

$$ADM = \overline{(x_i - M(x))} \tag{11}$$

ITSE (*Integral of Time-weighted Squared Error*) – modyfikacja wskaźnika ISE polegająca na całkowaniu iloczynu kwadratu uchybu i czasu, dla którego ten uchyb wystąpił [17], wskaźnik opisany jest wzorem (12):

$$ITSE = \int_{t_0}^{t_k} (t - t_0) e^2 dt \tag{12}$$

ITAE (*Integral of Time-weighted Absolut Error*) – analogiczna do ITSE modyfikacja wskaźnika IAE polegająca na całkowaniu iloczynu wartości bezwzględnej uchybu i czasu, dla którego ten uchyb wystąpił [17], wskaźnik ten opisany jest wzorem (13):

$$ITAE = \int_{t_0}^{t_k} (t - t_0) |e| dt \tag{13}$$

4. Metodyka badania jakości sterowania, parametry sygnału sterowania

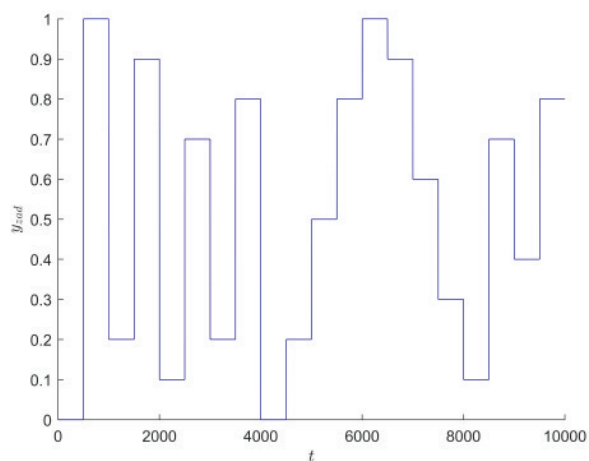
W wyniku procedury opisanej w podrozdziale „Metody i algorytmy” uzyskane zostały nastawy optymalnych pod kątem wybranych wskaźników jakości regulatorów PID. Jako, że do optymalizacji wymagana była znajomość jedynie wartości zadanej i wyjścia obiektu, dla uproszczenia obliczeń wykorzystywana była transmitancja pętli zamkniętej, a także stosunkowo krótka trajektoria zadana o długości 500 kroków (czas dyskretyzacji wynosił 1 s). Jako trajektorii zadanej użyto sygnał skoku jednostkowego, zmiana wartości zadanej następowała w kroku jedenastym.

Po znalezieniu szukanych parametrów regulatora PID, jego sygnał sterujący jest badany po przeprowadzeniu symulacji na dużo dłuższej i bardziej zróżnicowanej trajektorii zadanej (rys. 4).

Uzyskane przebiegi zostały zapisane, a następnie obliczono następujące miary zmienności sygnału sterującego:

- wartość maksymalna U_{\max} ,

- wartość minimalna U_{\min} ,
- maksymalny przyrost ΔU_{\max} ,
- wariancja sterowania σ_U ,
- średni przyrost sterowania $A(\Delta U)$,
- mediana przyrostów sterowania $M(\Delta U)$.



Rys. 4. Trajektoria zadana do badania sygnału sterującego
Fig. 4. Trajectory given to test control signal

W tym miejscu należy zauważyć, że wszelkie analizy prowadzone są dla działania nadążnego pętli regulacji w odpowiedzi na zmiany wartości zadanej. Niemniej nic nie stoi na przeszkodzie w rozszerzeniu interpretacji wyników na zadania tłumienia zakłóceń. Wskaźniki oceny jakości sterowania wyznaczane są dla uchybu regulacji. Z punktu widzenia dynamicznej jakości regulacji, źródło owych zmian nie jest najważniejsze. Regulator musi jak najszybciej je zredukować. Tym samym metodologia oceny układów sterowania wydaje się być analogicznie stosowalna. Takowe badania obejmujące zmiany zarówno wartości zadanej jak i zakłóceń można również znaleźć w literaturze [5].

Warto również zauważyć, że w prowadzonych badaniach nie występują żadne nieliniowości czy też ograniczenia. Pętla regulacji jest całkowicie liniowa. Celem pracy jest pokazanie, że nawet przy takich jakże idealistycznych założeniach istnieje sensowność i celowość stosowania wskaźników odpornych i nie-Gaussowskich. Wprowadzenie do pętli nieliniowości, jakimi są ograniczenia sygnału sterującego może tylko bardziej przyczynić się do sensowności stosowania wskaźników nietradycyjnych jakimi są wskaźniki odporne.

5. Wyniki symulacji

Dla każdego obiektu i każdego wskaźnika przeprowadzono symulacje, wyniki przedstawiono poniżej w postaci:

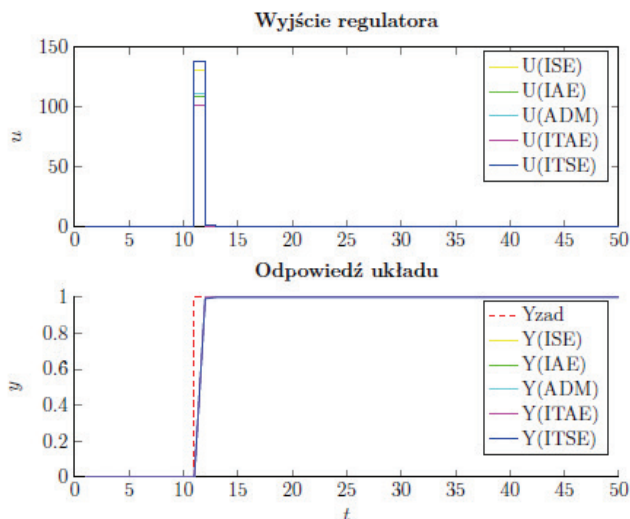
- optymalnych nastaw regulatora PID;
- wybranych fragmentów przebiegów odpowiedzi układu na skok jednostkowy i sygnału sterowania;
- wartości wskaźnika dla trajektorii zróżnicowanej.

Ze względu na czytelność zdecydowano o przedstawieniu tylko wybranych fragmentów przebiegów odpowiedzi układu na skok jednostkowy i sygnału sterowania.

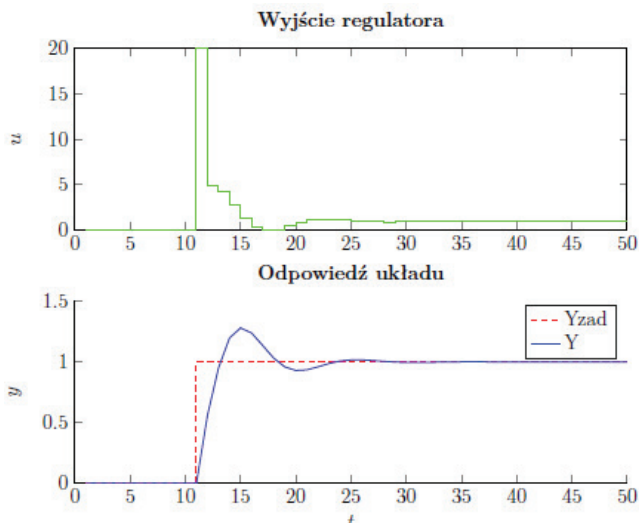
5.1. Obiekt inercyjny pierwszego rzędu

W tabeli 1 przedstawiono parametry regulatorów PID dla poszczególnych wskaźników jakości.

Na rysunkach 5 i 6 zaprezentowano przebiegi sygnałów sterującego i sterowanego dla przebadanych wskaźników jakości. W tabeli 2 przedstawiono wartości miar zmienności sygnału sterującego.



Rys. 5. Przebiegi sygnałów w pętli regulacji dla regulatora optymalizowanego pod kątem wskaźników: ISE, IAE, ADM, ITSE, ITAE
Fig. 5. Process and control signals for the controller optimized for indicators: ISE, IAE, ADM, ITSE, ITAE



Rys. 6. Przebiegi sygnałów w pętli regulacji dla regulatora optymalizowanego pod kątem wskaźnika LMS
Fig. 6. Process and control signals for the controller optimized for LMS indicator

Tabela 1. Parametry regulatorów PID uzyskane dla obiektu inercyjnego
Table 1. Parameters of PID controllers obtained for the inertial object

	K_p	T_i	T_d
ISE	98,8132	9,9583	0,0321
IAE	85,3976	10,0281	0,0280
LMS	5,0000	1,0000	0,3000
ADM	98,9823	10,0123	0,0123
ITSE	93,0511	9,9860	0,0095
ITAE	76,0477	10,0824	0,0816

Przebiegi sygnału wyjściowego procesu niewiele się między sobą różnią, za wyjątkiem regulatora optymalizowanego wskaźnikiem LMS. Podczas gdy w pozostałych układach regulacji sygnał wyjściowy obiektu szybko osiąga wartość zadaną i nie powoduje przeregulowań, regulator optymalizowany LMS ma przeregulowanie sięgające 28% a ustabilizowanie procesu na

wartości zadanej zajmuje mu około 20 s. Bardzo dobra jakość regulacji większości badanych regulatorów PID wynika z charakterystyki badanego obiektu. Pojedyncza inercja bez opóźnienia jest stosunkowo prostym obiektem do sterowania.

Jeśli chodzi o parametry sygnałów sterujących, regulator strojony wskaźnikiem LMS ponownie znacząco odbiega od pozostałych. Obliczone przez ten regulator maksymalne i minimalne wartości sterowania są ponad 5-krotnie mniejsze od wszystkich pozostałych wskaźników. Średni przyrost oraz wariancja sterowania również są dla tego regulatora kilkakrotnie niższe niż w przypadku pozostałych. Jednak, co ciekawe, mediana przyrostów sterowania dla regulatora strojonego LMS nie jest już tak niska i regulatory strojone wskaźnikami ISE, a tym bardziej ADM osiągają pod tym kątem lepsze wyniki. Może to wynikać z wkładu członu różniczkującego, jako że regulatory z niską stałą czasową różniczkowania T_d mają najniższe mediany przyrostów sterowania.

Najlepsze parametry sygnału sterującego poza regulatorem strojonym wskaźnikiem LMS uzyskał PID wyznaczony w oparciu o ITSE, a następnie kolejno IAE oraz ADM. Co ciekawe, mimo że wskaźnik IAE pozwolił uzyskać lepsze rezultaty niż ISE, to w odpowiadających im wskaźnikach ważonych po czasie lepsze przebiegi sterowania od ITAE pozwolił uzyskać wskaźnik ITSE.

Tabela 2. Właściwości sygnału sterującego uzyskanego dla obiektu inercyjnego
Table 2. Properties of the control signal obtained for the inertial object

	U_{\min}	U_{\max}	ΔU_{\max}	$A(\Delta U)$	$M(\Delta U)$	σ_U
ISE	-103,6210	130,5322	130,5322	0,2420	0,0068	9,3827
IAE	-86,6448	109,3089	109,3089	0,2073	0,0164	6,6052
LMS	-15,1914	20,0000	20,0000	0,0448	0,0081	0,3465
ADM	-88,1116	111,1571	111,1571	0,2047	0,0038	6,8266
ITSE	-109,6694	138,1026	138,1026	0,2596	0,0085	10,4963
ITAE	-80,7120	101,8910	101,8910	0,1825	$7,695 \cdot 10^{-15}$	5,7485

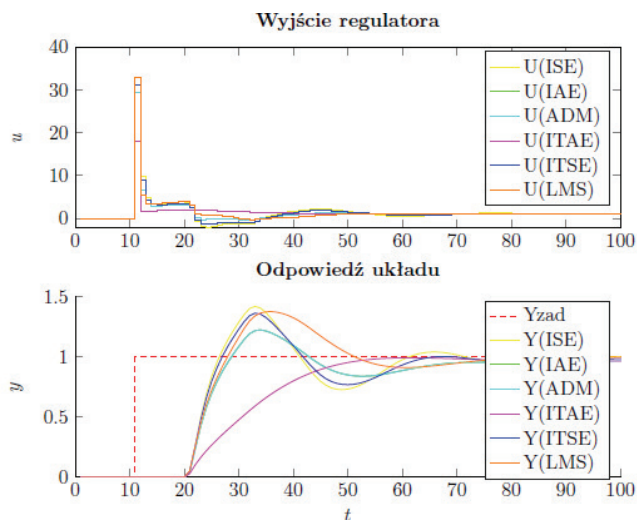
5.2. Obiekt inercyjny II rzędu z opóźnieniem

W tabeli 3 przedstawiono parametry regulatorów PID dla poszczególnych wskaźników jakości.

Tabela 3. Parametry regulatorów PID uzyskane dla obiektu dwuinercyjnego z opóźnieniem

Table 3. Parameters of PID controllers obtained for the two-inertial object with delay

	K_p	T_i	T_d
ISE	2,8434	36,1037	7,1016
IAE	2,6669	42,9624	5,2216
LMS	3,0000	27,0000	4,0000
ADM	2,6675	43,0032	5,2188
ITSE	2,8314	38,8992	6,3860
ITAE	1,6368	38,3431	0,0330



Rys. 7. Przebiegi sygnałów w pętli regulacji dla regulatora optymalizowanego pod kątem badanych wskaźników
Fig. 7. Process and control signals for the controller optimized for the investigated indicators

Na rysunku 7 zaprezentowano przebiegi sygnałów sterującego i sterowanego dla przebadanych wskaźników jakości. W tabeli 4 przedstawiono wartości miar zmienności sygnału sterującego.

W porównaniu z obiektem inercyjnym badany obiekt o charakterystyce inercji drugiego rzędu z opóźnieniem jest dużo trudniejszym procesem do wysterowania. Znajduje to odzwierciedlenie w uzyskanych sygnałach wyjściowych z obiektu sterowania, wszystkie regulatory poza PID optymalizowanym przy pomocy wskaźnika ITAE powodują wyraźne przeregulowania i oscylacje sygnału wyjściowego. Z kolei regulator uzyskany w wyniku optymalizacji wskaźnika ITAE powoduje aperiodyczną odpowiedź układu (nie występuje przeregulowanie), a przy tym sprawia, że proces osiąga wartość zadaną w podobnym czasie, co w przypadku pozostałych regulatorów. Generalnie zapewnia zatem zdecydowanie najlepszą jakość regulacji dla tego obiektu.

Z punktu widzenia uzyskanych sygnałów sterujących regulator optymalizowany wskaźnikiem ITAE ponownie okazał się najlepszy. Generowany przez niego sygnał sterujący ma najmniejsze wartości maksymalne i minimalne, najmniejszy maksymalny i średni przyrost sterowania, a także najniższą wariancję. Pod względem mediany przyrostów sterowania najlepszy okazał się regulator uzyskany w wyniku optymalizacji wskaźnika LMS, a lepsze od ITAE okazały się również regulatory optymalizowane wskaźnikami ADM oraz IAE. Stosunkowo wysoka mediana przyrostów sterowania w przypadku PID uzyskanego z optymalizacji wskaźnika ITAE może wynikać z bardzo niskiej w porównaniu z innymi regulatorami stałej czasowej różniczkowania T_d .

5.3. Obiekt oscylacyjny bez opóźnienia

W tabeli 5 przedstawiono parametry regulatorów PID dla poszczególnych wskaźników jakości.

Na rysunkach 8 i 9 zaprezentowano przebiegi sygnałów sterującego i sterowanego dla przebadanych wskaźników jakości. W tabeli 6 przedstawiono wartości miar zmienności sygnału sterującego.

Podobnie jak w przypadku obiektu inercyjnego pod względem przebiegu sygnału wyjściowego najbardziej od pozostałych odróżnia się regulator otrzymany w wyniku optymalizacji wskaźnika LMS. Tak samo jak pozostałe regulatory nie powoduje on istotnego przeregulowania, jednak ustabilizowanie procesu w pobliżu wartości zadanej zajmuje mu około 15 s, podczas gdy pozostałe regulatory robią to prawie natychmiastowo. Ponadto w trakcie narastania sygnału wyjściowego

Tabela 4. Właściwości sygnału sterującego uzyskanego dla obiektu dwuinercyjnego z opóźnieniem

Table 4. Properties of the control signal obtained for the two-inertial object with delay

	U_{\min}	U_{\max}	ΔU_{\max}	$A(\Delta U)$	$M(\Delta U)$	σ_U
ISE	-24,2219	31,2774	31,2774	0,0656	$3,5211 \cdot 10^{-7}$	0,7611
IAE	-22,6687	29,3359	29,3359	0,0560	$4,3536 \cdot 10^{-8}$	0,6247
LMS	-25,6000	33,0000	33,0000	0,0624	$7,8840 \cdot 10^{-11}$	0,7540
ADM	-22,6740	29,3425	29,3425	0,0560	$3,9704 \cdot 10^{-8}$	0,6248
ITSE	-24,1163	31,1454	31,1454	0,0630	$8,3855 \cdot 10^{-8}$	0,7276
ITAE	-13,6038	18,0048	18,0048	0,0323	$6,2593 \cdot 10^{-8}$	0,3028

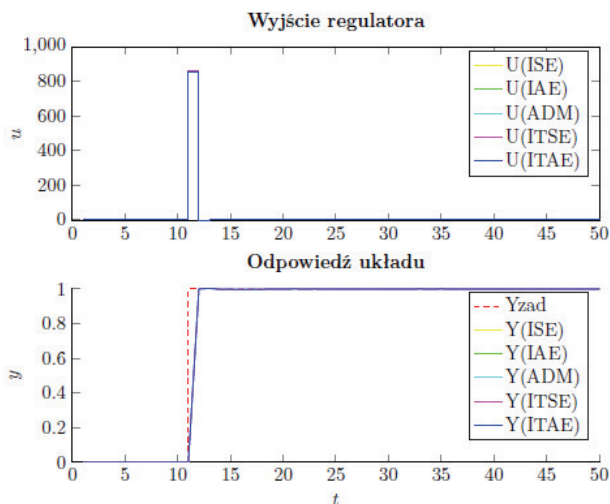
Tabela 5. Parametry regulatorów PID uzyskane dla obiektu oscylacyjnego bez opóźnienia
 Table 5. Parameters of PID controllers obtained for the oscillation object without delay

	K_p	T_i	T_d
ISE	78,1200	1,9433	1,3898
IAE	77,8801	1,7351	1,4447
LMS	1	2	2,4000
ADM	77,8740	1,7619	1,4650
ITSE	78,0604	1,8772	1,4088
ITAE	77,8361	1,6690	1,4278

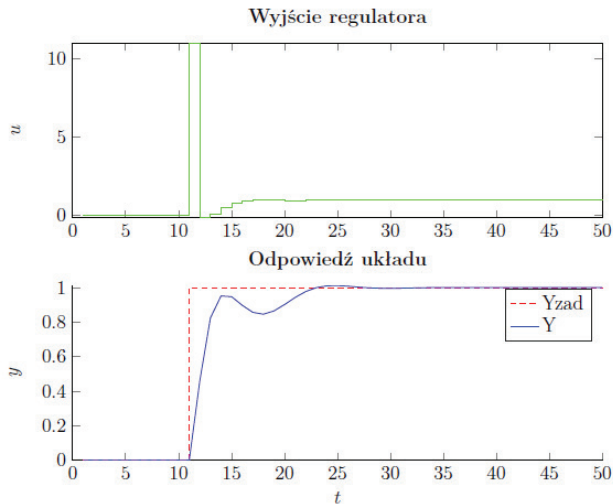
procesu można zaobserwować wyraźne oscylacje związane z charakterystyką obiektu.

Nastawy regulatorów uzyskanych w wyniku optymalizacji wskaźników jakości innych niż LMS są bardzo zbliżone, zatem podobieństwo otrzymanych przebiegów sygnałów wyjściowych sterowanego procesu oraz sygnałów sterujących nie jest zaskakujące. Mimo bardziej złożonej charakterystyki obiektu regulacji, regulatory doprowadzają proces do wartości zadanej błyskawicznie nie powodując przy tym istotnych przeregulowań. Okupione jest to jednak ogromnymi skokami sygnału sterującego.

W porównaniu z regulatorem optymalizowanym wskaźnikiem LMS pozostałe regulatory wygenerowały sygnały sterujące o wartościach minimalnych i maksymalnych wyższych ponad 75-krotnie. Podobnie wygląda kwestia maksymalnego oraz średniego przyrostu sterowania. Mediana przyrostów sterowania i wariancja sterowania w przypadku regulatora optymalizowanego LMS okazały się mniejsze od uzyskanych przez pozostałe regulatory nawet o 3 rzędy wielkości.



Rys. 8. Przebiegi sygnałów w pętli regulacji dla regulatora optymalizowanego pod kątem wskaźników ISE, IAE, ADM, ITSE, ITAE
 Fig. 8. Process and control signals for the controller optimized for indicators: ISE, IAE, ADM, ITSE, ITAE



Rys. 9. Przebiegi sygnałów w pętli regulacji dla regulatora optymalizowanego pod kątem wskaźnika LMS
 Fig. 9. Process and control signals for the controller optimized for LMS indicator

Tabela 6. Właściwości sygnału sterującego uzyskanego dla obiektu oscylacyjnego bez opóźnienia
 Table 6. Properties of the control signal obtained for the oscillation object without delay

	U_{min}	U_{max}	ΔU_{max}	$A(\Delta U)$	$M(\Delta U)$	σ_U
ISE	-687,1566	859,3200	865,5620	2,1691	0,7140	404,6738
IAE	-684,4369	856,6811	864,0537	1,8326	0,2468	401,8422
LMS	-7,9997	11,0000	11,1462	0,0213	$1,3572 \cdot 10^{-4}$	0,1761
ADM	-684,4185	856,6140	864,7042	1,7240	0,1747	401,7528
ITSE	-686,3749	858,6644	865,3759	2,2886	0,8187	403,7944
ITAE	-684,2061	856,1971	862,8163	1,8832	0,2805	401,4695

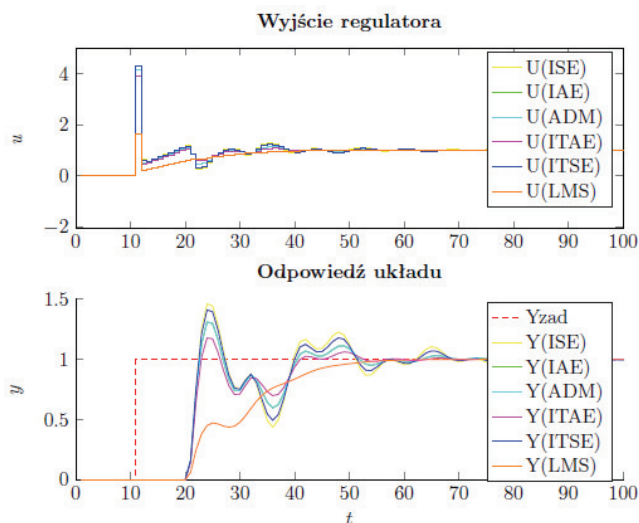
5.4. Obiekt oscylacyjny z opóźnieniem

Poniżej w tabeli przedstawiono parametry regulatorów PID dla poszczególnych wskaźników jakości.

Tabela 7. Parametry regulatorów PID uzyskane dla obiektu oscylacyjnego z opóźnieniem

Table 7. Parameters of PID controllers obtained for the oscillation object with delay

	K_p	T_i	T_d
ISE	0,3916	4,4275	3,1632
IAE	0,3783	4,6034	2,4319
LMS	0,1500	2,9000	0,8000
ADM	0,3783	4,6033	2,4319
ITSE	0,3887	4,5180	2,8746
ITAE	0,3533	4,5604	2,0362



Rys. 10. Przebiegi sygnałów w pętli regulacji dla regulatora optymalizowanego pod kątem badanych wskaźników
Fig. 10. Process and control signals for the controller optimized for the investigated indicators

Na rysunku 10 zaprezentowano przebiegi sygnałów sterującego i sterowanego dla przebadanych wskaźników jakości. W tabeli 8 przedstawiono wartości miar zmienności sygnału sterującego.

Wprowadzenie opóźnienia do obiektu oscylacyjnego sprawiło, że uzyskane nastawy regulatorów różnią się o wiele wyraźniej niż w przypadku obiektu bez opóźnień. Obiekt oscylacyjny z dużym opóźnieniem jest wyraźnie trudniejszy do ustabilizowania. Jedynym regulatorem, przy którym obiekt nie wpada w drgania i nie powoduje przeregulowania jest PID uzyskany w wyniku optymalizacji wskaźnika LMS. Ten regulator zapewnia asymptotyczny przebieg wyjścia procesu, a także stosunkowo szybko (choć wolniej niż pozostałe regulatory) doprowadza do osiągnięcia wartości zadanej. Poza uzyskaniem dobrej jakości regulacji procesu, generowany przez regulator optymalizowany wskaźnikiem LMS sygnał sterujący jest zdecydowanie najwolniej zmienny ze wszystkich uzyskanych dla tego obiektu. Najmniejsza i największa wartość sterowania są ponad dwukrotnie mniejsze niż w przypadku najlepszego z pozostałych regulatorów, podobnie jak maksymalny i średni przyrost sterowania. Mediana przyrostów sterowania jest 8 rzędów wielkości mniejsza niż pozostałe, a wariancja również jest najniższa, choć różnica w stosunku do pozostałych regulatorów jest mniej wyraźna. Poza regulatorem LMS, warto wyróżnić regulator ITAE, który wywołuje najmniej spośród zaobserwowanych przeregulowań, a także szybko osiąga wartość zadaną. Ponadto pod względem zmienności sterowania ustępuje tylko regulatorowi optymalizowanemu wskaźnikiem LMS.

5.5. Obiekt nieminimalnofazowy

Poniżej w tabeli 9 przedstawiono parametry regulatorów PID dla poszczególnych wskaźników jakości.

Na rysunku 11 zaprezentowano przebiegi sygnałów sterującego i sterowanego dla przebadanych wskaźników jakości. W tabeli 10 przedstawiono wartości miar zmienności sygnału sterującego.

Dla obiektu nieminimalnofazowego uzyskano najbardziej zróżnicowane nastawy regulatorów ze wszystkich obserwowanych obiektów. Najmniej agresywny sygnał sterujący generował ponownie regulator uzyskany na drodze optymalizacji wskaźnika LMS. Ten regulator powodował najmniej maksymalny przyrost sterowania, najmniej średni przyrost sterowania, najmniej skrajne wartości sygnału sterującego oraz najmniejszą wariancję. Natomiast mediana przyrostów sterowania dla tego regulatora okazała się największa ze wszystkich dla tego obiektu. Niestety łagodny przebieg sygnału sterującego w tym

Tabela 8. Właściwości sygnału sterującego uzyskanego dla obiektu oscylacyjnego z opóźnieniem

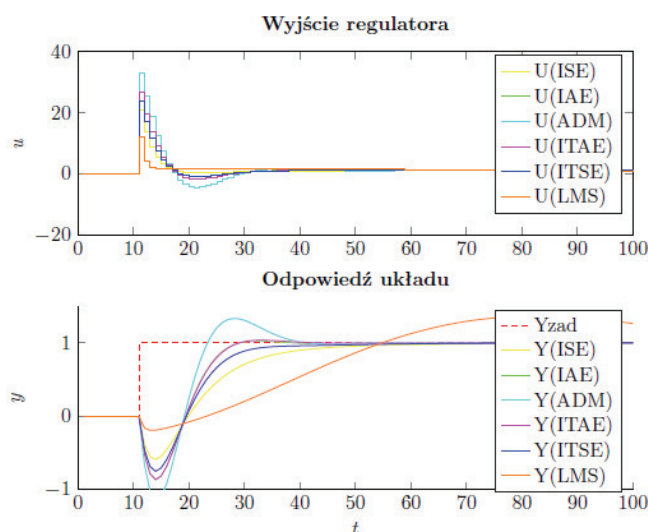
Table 8. Properties of the control signal obtained for the oscillation object with delay

	U_{min}	U_{max}	ΔU_{max}	$A(\Delta U)$	$M(\Delta U)$	σ_U
ISE	-2,6461	4,3076	4,3076	0,0118	$3,9023 \cdot 10^{-7}$	0,1234
IAE	-2,5296	4,1613	4,1613	0,0106	0,0013	0,1221
LMS	-0,5195	1,6500	1,6500	0,0035	$1,1102 \cdot 10^{-15}$	0,1144
ADM	-2,5296	4,1613	4,1613	0,0106	0,0013	0,1221
ITSE	-2,6203	4,2757	4,2757	0,0109	0,0003	0,1229
ITAE	-2,3081	3,8863	3,8863	0,0084	0,0002	0,1210

Tabela 9. Parametry regulatorów PID uzyskane dla obiektu nieminimalnofazowego

Table 9. Parameters of PID controllers obtained for the non-minimum phase object

	K_p	T_i	T_d
ISE	1,8986	39,9297	9,5907
IAE	2,4198	39,1037	9,5016
LMS	1,0791	18,8611	6,1131
ADM	3	39	8,6000
ITSE	2,1786	39,3102	9,8247
ITAE	2,4407	39,1113	9,3505



Rys. 11. Przebiegi sygnałów w pętli regulacji dla regulatora optymalizowanego pod kątem badanych wskaźników

Fig. 11. Process and control signals for the controller optimized for the investigated indicators

przypadku wiązał się z wystąpieniem przeregulowania, oscylacji i wolnego osiągnięcia wartości zadanej przez regulator.

Drugi pod względem zmienności sterowania okazał się regulator ISE, trzeci ITSE, czwarty IAE, piąty ITAE, a najbardziej agresywny sygnał sterujący generował regulator optymalizowany wskaźnikiem ADM. Parametry sygnałów sterowania są ściśle powiązane ze wzmocnieniami statycznymi K_p uzyskanych regulatorów, a ich odzwierciedlenie widać bardzo wyraźnie w uzyskanych odpowiedziach obiektu sterowania. Można by uznać, że im większe jest wzmocnienie regulatora PID i bardziej agresywne generowane przez niego sterowanie, tym krótszy czas regulacji, a większe przeregulowanie, jednak regulator optymalizowany wskaźnikiem LMS jest wyjątkiem od tej prawidłowości.

Warto zwrócić uwagę na fakt, że dotychczas w każdym badanym obiekcie sterowania regulator optymalizowany w oparciu o wskaźnik ISE uzyskiwał bardziej agresywne sterowanie niż ten, który był optymalizowany przy zastosowaniu wskaźnika IAE, natomiast w przypadku obiektu minimalnofazowego jest dokładnie odwrotnie. Podobnie minimalizacja wskaźnika ITAE dawała do tej pory łagodniejsze przebiegi sygnału sterującego w porównaniu z ITSE. Inną godną zastanowienia obserwacją jest fakt, że optymalizacja przy wykorzystaniu wskaźnika ADM po raz pierwszy dała wyraźnie odbiegający od innych zestaw parametrów PID, podczas gdy do tej pory były one bardzo zbliżone do regulatorów optymalizowanych wskaźnikiem IAE.

6. Podsumowanie i możliwości rozwoju

Celem pracy było porównanie przebiegów czasowych w układach regulacji PID o różnych nastawach regulatorów oraz wartości wybranych kryteriów jakości regulacji obliczanych na podstawie tych przebiegów i cel ten zrealizowano. Niestety uzyskane wyniki są często właściwe poszczególnym klasom obiektów i dokonanie na ich podstawie syntezy uniwersalnych stwierdzeń prawdziwych dla dowolnego układu regulacji jest trudne. Mimo że zależności między parametrami sygnałów wyjściowych regulatorów zmieniają się dla różnych właściwości sterowanych procesów, niektóre trendy da się zaobserwować dla wszystkich rozpatrywanych obiektów regulacji.

Symulacje na obiekcie inercyjnym pokazały, że dla takiego prostego procesu, wszystkie regulatory optymalizowane całkowitymi wskaźnikami sprowadzały obiekt na wartość zadaną w sposób natychmiastowy, jednak odbywało się to kosztem bardzo wysokich i gwałtownych przyrostów sygnału sterują-

Tabela 10. Właściwości sygnału sterującego uzyskanego dla obiektu nieminimalnofazowego

Table 10. Properties of the control signal obtained for the non-minimum phase object

	U_{\min}	U_{\max}	ΔU_{\max}	$A(\Delta U)$	$M(\Delta U)$	σ_U
ISE	-15,9077	20,8846	20,8846	0,0380	$2,7852 \cdot 10^{-10}$	0,4912
IAE	-20,4942	26,6178	26,6178	0,0522	$3,0342 \cdot 10^{-10}$	0,8531
LMS	-8,6963	11,8701	11,8701	0,0218	$2,1098 \cdot 10^{-4}$	0,2204
ADM	-25,6000	33	33,0000	0,0695	$1,9457 \cdot 10^{-9}$	1,4119
ITSE	-18,3717	23,9646	23,9646	0,0457	$7,1368 \cdot 10^{-12}$	0,6782
ITAE	-20,6782	26,8477	26,8477	0,0523	0,0002	0,8552

cego w momencie zmiany wartości zadanej. Podobnie zachował się PID powstały w wyniku minimalizacji wskaźnika ADM. Zbliżone rezultaty uzyskano dla obiektu oscylacyjnego. Jedyną różnicą były marginalne oscylacje pojawiające się na wyjściu sterowanego obiektu, oraz jeszcze bardziej agresywne przebiegi sygnału sterującego.

Z kolei regulatory o nastawach dobieranych w oparciu o wskaźnik LMS zarówno w przypadku obiektu inercyjnego, jak i oscylacyjnego zapewniały sygnał sterujący o wielokrotnie niższych niż w przypadku pozostałych regulatorów wartościach krańcowych, zdecydowanie wolniejszych przyrostach oraz niższej wariancji. Niestety w obu przypadkach wiązało się to ze spadkiem jakości regulacji – wolniejszym osiąganiem wartości zadanej, a w przypadku obiektu oscylacyjnego także wyraźnym przeregulowaniem. Dopiero obiekty o wolniejszej odpowiedzi na zmiany sygnału wejściowego, czyli takie w których występują opóźnienia lub nieminimalnofazowość sprawiły, że różnice między badanymi wskaźnikami jakości stały się wyraźniejsze.

W przypadku rozpatrywanego obiektu nieminimalnofazowego oraz obiektu oscylacyjnego z opóźnieniem najbardziej łagodny przebieg sygnału sterującego ponownie zapewniły regulatory PID o nastawach wyznaczonych na drodze minimalizacji wskaźnika LMS. Natomiast dla obiektu o charakterystyce inercji drugiego rzędu z opóźnieniem najwolniej zmienny sygnał sterujący wygenerował regulator optymalizowany pod kątem wskaźnika ITAE, podczas gdy sterowanie uzyskane przez regulator strojony względem LMS było najbardziej agresywne ze wszystkich zaobserwowanych. Prawdopodobnie wynika to z niskiej stałej czasowej całkowania T_i , która w związku z dużym opóźnieniem w sterowanym procesie powoduje wysoki i gwałtowny przyrost sterowania po zmianie wartości zadanej. Możliwe, że uzyskane wyniki mają związek z monotonicznością odpowiedzi skokowej odpowiednich obiektów i wskaźnik LMS daje najłagodniejsze przebiegi sterowania regulatorów tylko, gdy obiekt regulacji ma niewielkie opóźnienie lub jego odpowiedź skokowa jest niemonotoniczna.

Związek między regulatorami optymalizowanym pod kątem ISE oraz IAE jest stały dla wszystkich badanych obiektów, które są minimalnofazowe. PID uzyskane w wyniku optymalizacji ISE są dla tych obiektów zawsze bardziej agresywne w porównaniu z IAE. Najmniejsze różnice są widoczne dla obiektu oscylacyjnego, a najbardziej dla obiektu dwuinercyjnego z opóźnieniem.

Analogicznie regulatory uzyskane w wyniku optymalizacji ITSE generują bardziej agresywny sygnał sterujący niż PID strojone względem ITAE. Dla wszystkich minimalnofazowych obiektów ITAE daje łagodniejsze sterowanie niż IAE, natomiast między ITSE a ISE nie ma żadnej stałej zależności.

Zależności między wskaźnikami ISE a IAE oraz między ITSE a ITAE są dokładnie odwrotne w przypadku badanego obiektu nieminimalnofazowego, zachowanie to może wynikać z właściwości uchybu występującego zaraz po zmianie wartości zadanej – w przypadku obiektu nieminimalnofazowego uchyb wzrasta powyżej wartości 1, gdy dla wszystkich innych obiektów uchyb jest zawsze co najwyżej równy wartości 1.

Niniejsza praca nie wyczerpuje tematu, jest szereg zagadnień, które wpływają na charakter sygnałów sterowania i byłyby warte badania. Jednym z zagadnień jest uwzględnienie odporności optymalizowanych regulatorów i zapasów stabilności. Możliwe byłoby zmodyfikowanie wskaźników jakości w sposób taki, żeby w procesie optymalizacji uwzględnić powyższe aspekty i zbadać jaki jest wpływ ich na uzyskane przebiegi sygnałów sterowania i jakość regulacji.

Ciekawą propozycją byłoby użycie wskaźników wielokryterialnych. Tym sposobem możliwe byłoby wykorzystanie na przykład wskaźnika LMS lub podobnych do ograniczania nagłych zmian sygnału sterowania, a bardziej agresywnego wskaźnika, takiego jak ISE lub ISE w celu zwiększenia szybkości i dokładności regulacji procesu. Modyfikując wagi poszczególnych wskaźników projektant układów sterowania korzystający z takiego rozwiązania miałby możliwość dostosowania nastaw regulatorów między bardziej agresywnymi, a generującymi łagodny przebieg sterowania w zależności od potrzeb.

Bibliografia

1. Åström K.J., *Computer control of a paper machine – an application of linear stochastic control theory*, “IBM Journal of Research and Development”, Vol. 11, No. 4, 1967, 389–405, DOI: 10.1147/rd.114.0389.
2. Åström K.J., Hägglund T., *Benchmark Systems for PID Control*, “IFAC Proceedings Volumes”, Vol. 33, No. 4, 2000, 165–166, DOI: 10.1016/S1474-6670(17)38238-1.
3. Bauer M., Horch A., Xie L., Jelali M., Thornhill N., *The current state of control loop performance monitoring – a survey of application in industry*, “Journal of Process Control”, Vol. 38, 2016, 1–10, DOI: 10.1016/j.jprocont.2015.11.002.
4. Choudhury M.A.A.S., Shah S.L., Thornhill N.F., *Diagnosis of Process Nonlinearities and Valve Stiction. Advances in Industrial Control*. Springer Berlin Heidelberg, 2008.
5. Domański P.D., *Non-Gaussian properties of the real industrial control error in SISO loops*, [in:] Proceedings of the 19th International Conference on System Theory, Control and Computing, Cheile Gradistei, Romania, 2015, 877–882, DOI: 10.1109/ICSTCC.2015.7321405.
6. Domański P.D., *Non-Gaussian statistical measures of control performance*, “Control and Cybernetics”, Vol. 46, No. 3, 2017, 259–290.
7. Domański P.D., Golonka S., Jankowski R., Kalbarczyk P., Moszowski B., *Control rehabilitation impact on production efficiency of ammonia synthesis installation*, “Industrial & Engineering Chemistry Research”, Vol. 55, 2016, 10366–10376, DOI: 10.1021/acs.iecr.6b02907.
8. Gao X., Yang F., Shang C., Huang D., *A review of control loop monitoring and diagnosis: Prospects of controller maintenance in big data era*, “Chinese Journal of Chemical Engineering”, Vol. 24, No. 8, 2016, 952–962, DOI: 10.1016/j.cjche.2016.05.039.
9. Harris T., *Assessment of closed loop performance*, “The Canadian Journal of Chemical Engineering”, Vol. 67, 1989, 856–861, DOI: 10.1002/cjce.5450670519.
10. Horch A., Isaksson A.J., *A modified index for control performance assessment*, [in:] Proceedings of the 1998 American Control Conference, 1998, 3430–3434, DOI: 10.1109/ACC.1998.703231.
11. Jelali M., *An overview of control performance assessment technology and industrial applications*. “Control Engineering Practice”, Vol. 14, No. 5, 2006, 441–466, DOI: 10.1016/j.conengprac.2005.11.005.
12. Jelali M., *Control Performance Management in Industrial Automation: Assessment, Diagnosis and Improvement of Control Loop Performance*. Springer-Verlag, London 2013.
13. Ordys A., Uduchi D., Johnson M.A., *Process Control Performance Assessment – From Theory to Implementation*. Springer-Verlag, London 2007.

14. Paulonis M.A., Cox J.W., *A practical approach for large-scale controller performance assessment, diagnosis, and improvement*, "Journal of Process Control", Vol. 13, No. 2, 2003, 155–168, DOI: 10.1016/S0959-1524(02)00018-5.
15. Rousseeuw P.J., Leroy A.M., *Robust Regression and Outlier Detection*, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, 1987.
16. Schäfer J., Cinar A., *Multivariable MPC system performance assessment, monitoring, and diagnosis*. "Journal of Process Control", Vol. 14, No. 2, 2004, 113–129, DOI: 10.1016/j.jprocont.2003.07.003.
17. Seborg D.E., Mellichamp D.A., Edgar T.F., Doyle F.J., *Process dynamics and control*, Wiley, 2010.
18. Shinsky F.G., *How good are our controllers in absolute performance and robustness?* "Measurement and Control", Vol. 23, No. 4, 1990, 114–121, DOI: 10.1177/002029409002300402.
19. Smuts J.F., Hussey A., *Requirements for successfully implementing and sustaining advanced control applications*, [in:] Proceedings of the 54th ISA POWID Symposium, Charlotte, North Carolina, USA, 89–105.
20. Srinivasan B., Spinner T., Rengaswamy R., *Control loop performance assessment using detrended fluctuation analysis (DFA)*, "Automatica", Vol. 48, No. 7, 2012, 1359–1363, 2012, DOI: 10.1016/j.automatica.2012.04.003.
21. Starr K.D., Petersen H., Bauer M., *Control loop performance monitoring – ABB's experience over two decades*, "IFAC-PapersOnLine", Vol. 49, No. 7, 2016, 526–532, 11th IFAC Symposium on Dynamics and Control of Process Systems Including Biosystems DYCOPS-CAB 2016, Trondheim, Norway, DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.07.396.
22. Tatjewski P., *Sterowanie zaawansowane procesów przemysłowych. Struktury i algorytmy*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2016.
23. Tolfo F., *A methodology to assess the economic returns of advanced control projects*. 1983 American Control Conference, IEEE, 1141–1146, DOI: 10.23919/ACC.1983.4788287.
24. Verboven S., Hubert M., *LIBRA: a MATLAB library for robust analysis*, "Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems", Vol. 75, No. 2, 2005, 127–136, DOI: 10.1016/j.chemolab.2004.06.003.
25. Veronesi M., Visioli A., *An industrial application of a performance assessment and retuning technique for PI controllers*, "ISA Transactions", Vol. 49, No. 2, 2010, 244–248, DOI: 10.1016/j.isatra.2009.11.008.
26. DeVries W., Wu S., *Evaluation of process control effectiveness and diagnosis of variation in paper basis weight via multivariate time-series analysis*. "IEEE Transactions on Automatic Control", Vol. 23, No. 4, 1978, 702–708, DOI: 10.1109/TAC.1978.1101828.
27. Zhuo H., *Research of performance assessment and monitoring for multivariate model predictive control system*. [in:] 4th International Conference on Computer Science & Education, 2009, 509–514, DOI: 10.1109/ICCSE.2009.5228377.

Influence of the Selected Indicators on the Parameters of the Control Signal in the System with the PID Controller

Abstract: The goal of this thesis is to assess and compare PID controllers with parameters determined by minimizing select performance indices paying special attention to the attributes of their output signals. Analysis is based on simulations performed using MATLAB for four controlled processes classes and six types of indicators. The methods and algorithms used have been presented in detail. Thesis presents results of the simulations, optimized PID parameters, plots of process signals in examined control systems, calculated control signal attributes and formulated based on experiments observations and conclusions.

Keywords: PID control, optimization, performance assessment, performance indices, controller output signal

dr inż. Sebastian Plamowski

Sebastian.Plamowski@ia.pw.edu.pl

Adiunkt w Instytucie Automatyki i Informatyki Stosowanej na Wydziale Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej. Aktualne zainteresowania naukowe obejmują systemy automatyki przemysłowej DCS i SCADA. Główne kierunki badań to analiza i synteza układów sterowania w szczególności regulacji predykcyjnej.



inż. Maciej Pawliński

mpawlins@mion.elka.pw.edu.pl

Absolwent kierunku Automatyka i Robotyka na Wydziale Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej kontynuujący naukę na studiach II stopnia. Zainteresowania naukowe obejmują między innymi teorię sterowania, optymalizację oraz ocenę jakości pętli regulacji.



dr hab. inż. Paweł D. Domański

p.domanski@ia.pw.edu.pl

Inżynier automatyk, adiunkt w Instytucie Automatyki i Informatyki Stosowanej na Wydziale Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej. Początkowe zainteresowania naukowe dotyczące automatyki zaawansowanej oraz soft computing obecnie koncentrują się na przemysłowej ocenie jakości pracy układów sterowania z wykorzystaniem metod analizy nieliniowej i metod statystycznych.

