

Porównanie różnych sposobów optymalizacji nastaw regulacji procesów przemysłowych z uwzględnieniem wpływu wskaźników oceny ich jakości

Konrad Bogusz, Bartosz Rajkowski, Paweł D. Domański

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

Streszczenie: Jakość regulacji jest kluczowym zagadnieniem w nowoczesnym przemyśle. Zadaniem inżyniera jest nie tylko dobór parametrów regulacji, ale również bieżące nadzorowanie jej jakości tak, aby maksymalizować wydajność procesu a także dbać o stan aparatury i urządzeń wykonawczych. W zdecydowanej większości rozwiązań praktycznych stosowany jest kwadratowy wskaźnik jakości, zarówno w procesie strojenia jak i oceny jakości regulacji. W artykule zostały zaproponowane inne wskaźniki, cechujące się większą odpornością. Zostały one zastosowane do dwóch zadań: projektowania nastaw regulatora oraz oceny jakości już pracującej struktury sterowania. W pracy uwzględnione zostały rozwiązania dla różnych wersji podstawowego algorytmu regulacji w przemyśle procesowym, tj. PID. Różne strategie regulacji PID zostały również porównane z algorytmem sterowania predykcyjnego typu MPC. Analiza symulacyjna wykorzystuje przemysłowy benchmark układu sterowania systemem chłodniczym wykorzystującym zjawisko kompresji pary.

Słowa kluczowe: ocena jakości sterowania, PID, MPC, wykładnik Hursta, analiza R/S

1. Wprowadzenie

Jakość pracy układu sterowania ma istotny wpływ na ogólną efektywność procesu wytwarzania. Widoczne to jest szczególnie w obecnych czasach, gdy zagadnienia zwiększenia wydajności, ochrony środowiska czy też zarządzania energią wymagają bezpiecznej, niezakłóconej i nad wyraz dokładnej pracy jak najbliższej ograniczeń technologicznych – koncept Przemysł 4.0. Obiekty rzeczywiste podlegają nieustannym zmianom i modyfikacjom, stając się procesami silnie niestacjonarnymi. Tym samym jednorazowa inicjatywa dotycząca projektu i strojenia układu sterowania jest skuteczna jedynie w krótkim horyzoncie. Chcąc zapewnić poprawne działanie w długim okresie, jesteśmy zmuszeni realizować ciągle elastyczny nadzór i monitoring. Istnieje wiele opracowań pokazujących korzyści finansowe uzyskane w wyniku poprawnej struktury i zestrojenia układu sterowania [1–3].

Autor korespondujący:

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

Artykuł recenzowany

nadesłany 16.05.2019 r., przyjęty do druku 30.09.2019 r.



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

Niniejszy artykuł prezentuje kompleksowe wykorzystanie odpornych wskaźników oceny jakości regulacji zastosowanych zarówno do projektowania jak i oceny sterowania nieliniowym procesem. W pracy zostaną uwzględnione równoległe oraz szeregowe postacie najbardziej popularnych struktur, tj.: PI, PD i PID, jak też rozwinięte równoległe struktury: PID z filtrem różniczkowania, PID z różniczkowaniem przefiltrowanego wyjścia oraz PID z ważeniem wartości zadanej [4]. Każda ze struktur będzie strojona przy pomocy algorytmu optymalizacji globalnej na przykładzie algorytmu genetycznego, w której funkcją celu będzie jeden ze wskaźników jakości liczony z uchybu między wyjściami a wartościami zadanymi. Wybór algorytmu był wtórny. Istotna jest możliwość prowadzenia optymalizacji globalnej, jako że nieliniowy model oznacza wielomodalny charakter wskaźnika jakości, z wieloma ekstremami lokalnymi. Efektywność optymalizacji lokalnej nie jest celem niniejszych badań i tym samym wybór algorytmu genetycznego zapewnia proste spełnienie wymagań strojenia. Uwzględnione zostaną wskaźniki: błąd średniokwadratowy MSE (ang. *Mean Square Error*), średni moduł błędu IAE (ang. *Integral Absolute Error*), mediana błędu oraz odpornościowy współczynnik skali w postaci M-estymatora z logistyczną funkcją ψ . Celem tego etapu pracy jest porównanie wpływu wskaźnika oceny na jakość otrzymanych nastaw różnych struktur regulacji klasy PID. Ciekawa byłaby obserwacja, czy odporność przyjętego wskaźnika oceny ma wpływ na otrzymaną jakość sterowania.

Zadanie strojenia regulatorów, w tym regulatora typu PID istnieje w automatyce praktycznie od jej zarania. Pierwsze uys-

tematyzowane prace nastąpiły po okresie empirycznych metod prób i błędów. Rozważania teoretyczne dotyczące charakterystyk częstotliwościowych Bodego (1930) czy też w oparciu o wykresy Nyquista zaowocowały podejściem Zieglera-Nicholsa [5] wykorzystującym cykl graniczny (1942). Cohen i Coon (1953) zaproponowali prostą metodę wykorzystującą identyfikację jednoniercyjnego modelu z opóźnieniem i wyprowadzenie sugestii nastaw regulatora PID dla takiego obiektu [6]. Owe metody w zasadzie nie wymagały stosowania komputera.

Inne, obecnie uznawana za kanoniczne, podejścia oraz metodologie strojenia można odnaleźć w pozycjach [7–9] czy też bogaty wybór zebrany w [10]. Podejście optymalizacyjne również było rozważane w literaturze [11]. Dobór nastaw regulatora dokonywany jest w oparciu o określony wskaźnik jakości. Najczęściej można znaleźć przykłady stosowania kwadratowego wskaźnika jakości MSE lub całki z wartości bezwzględnej IAE. Drugi z wymienionych wskaźników często występuje w wersji rozszerzonej o element czasu w postaci ITAE (ang. *Integral of the Time-weighted Absolute Error*). Można znaleźć wiele pozycji literatury, w których rozważane są takie podejścia. Ogólnie wskaźnik kwadratowy karze duże błędy (kwadrat), podczas gdy ITAE karze błędy, które trwają przez dłuższy czas. Tym samym jest on najczęściej stosowany. Ogólnie ISE generuje najbardziej agresywne nastawy, podczas gdy IAE znajduje rozwiązania między tymi powolnymi i bez przeregulowania, znalezionymi przez ITAE i MSE.

Jednak wskaźniki te mają jedną poważną wadę. Analiza regresyjna dobitnie pokazuje [12], że estymator minimalno-kwadratowy, jak i IAE, nie są odporne na występowanie wartości odstających (ang. *outliers*). Autorzy w swojej pracy proponują stosowanie innych estymatorów, jak np. mediany, która jest odporna. Rozważania nad odpornością estymacji doprowadziły do powstania całej dziedziny statystyk odpornościowych (ang. *robust statistics*) [13]. Jedną z najbardziej popularnych jest M-estymator wykorzystujący logistyczną ψ funkcję. W niniejszym opracowaniu wykorzystywana jest implementacja zaproponowana w [14] – funkcja *m-scalelogist*.

Niniejsze opracowanie skupi się na porównaniu dwóch klasycznych wskaźników całkowych, tj. ISE oraz IAE oraz dwóch odpornych, tj. mediany błędu oraz jego odpornej M-estymaty. Wybrane cztery wskaźniki będą stosowane do dostrojenia różnych struktur typu PID dla wielowymiarowego symulowanego nieliniowego procesu.

Nieustanne utrzymywanie wysokiej jakości sterowania wymaga wypracowania i stosowania metodologii oceny pracy układu regulacji wraz z miarami umożliwiającymi ilościowe porównanie. W praktyce jest to najczęściej codzienna praca inżynierów automatyków odpowiedzialnych za działanie instalacji. Niestety w przypadku skomplikowanych obiektów, kiedy koniecznym staje się nadzór nad setkami czy też tysiącami pętli, pojawiają się wymagania zatrudnienia odpowiedniej liczby doświadczonych pracowników. Ograniczenia ujawniają się w przypadku ograniczonego dostępu do wysoko wykształconych inżynierów. Efekt ten jest widoczny już na poziomie automatyki bazowej wykorzystującej jednopętlowe czy też kaskadowe struktury PID. W przypadku rozwiązań automatyki wykorzystujących układy sterowania zaawansowanego lub optymalizacji [15] występuje istotne ograniczenie stosowalności.

Literatura przedmiotu pokazuje, że znacząca część przemysłowych pętli sterowania pracuje źle. 60% bazowych pętli SISO jest błędnie zestrojona, a nawet większa ich część (85%) ma nieadekwatną strukturę [16]. Można wymienić wiele przyczyn tego zjawiska:

1. błędne zestrojenie pętli sterowania wynikające z niestacjonarności, niewystarczającego nadzoru, konserwatywnego zestrojenia na najgorszy przypadek, częstych zmian punktów pracy instalacji czy też zmienności urządzeń wykonawczych i pomiarowych,

2. problemy i awarie osprzętu automatyki,
3. wpływ zakłóceń procesowych połączony z rzadkim odspzęganiem,
4. niedopasowany projekt systemu automatyki, często wynikający z kopiowania szablonów i nastaw z wcześniejszych rozwiązań.

Podsumowując, nadzór realizowany przez człowieka jest niewystarczający. Tym samym istnieje rosnące zapotrzebowanie na metody i rozwiązania wspierające ten proces. Muszą one spełnić wiele wymagań, aby uzyskać akceptację przemysłu. W szczególności muszą pracować autonomicznie wykorzystując dane z codziennej pracy bez konieczności realizacji jakichkolwiek specjalizowanych testów oraz muszą być sformułowane w oparciu o jasno zdefiniowane i wiarygodne miary (wskaźniki oceny).

Analiza statystyczna pokazuje [17], iż rzeczywiste dane przemysłowe bardzo często cechują się charakterem gruboogonowym, co uzasadniło postawienie hipotezy, że parametry rozkładów gruboogonowych, w szczególności α -stabilne, mogą stanowić rozsądną alternatywę dla najpopularniej stosowanego odchylenia standardowego rozkładu normalnego.

Tym samym w pracy zweryfikowano możliwość oceny układu sterowania za pomocą różnych niestandardowych wskaźników oceny sterowania. Z jednej strony zaproponowane zostały do porównania różne możliwe do zrealizowania w sposób przemysłowy struktury sterowania, począwszy od jednopętlowej regulacji PID, przez uwzględnienie odspzęgania zakłóceń, aż po predykcyjną regulację wielowymiarową klasy MPC (ang. *Model Predictive Control*). Opierając się na tak przygotowanym materiale odniesienia porównane zostały podstawowe wskaźniki oceny jakości sterowania, czyli czas sterowania, przeregulowanie, błąd średniokwadratowy (MSE) oraz moduł błędu (IAE) dla uchybu regulacji wraz ze wskaźnikiem fraktalnym w postaci wykładnika Hursta. W celu poprawy jakości porównania została zaprezentowana wielokryterialna metoda prezentacji wyników w postaci wykresu radarowego.

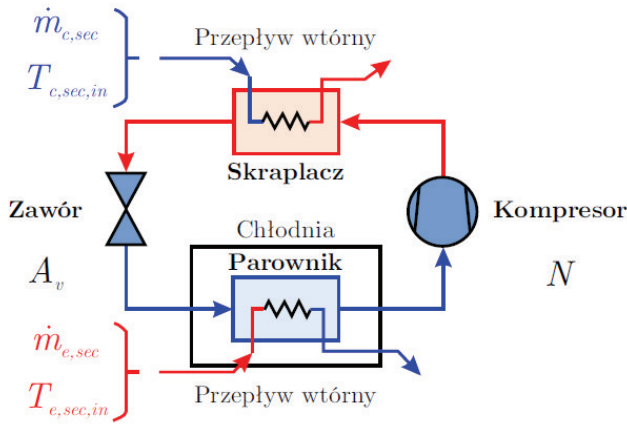
2. Wykorzystywane obiekty oraz algorytmy

Poniżej zostanie opisany nieliniowy proces systemu chłodniczego, którego model stanowi podstawę analiz symulacyjnych oraz wykorzystywane w pracy algorytmy i proponowane algorytmy obliczeniowe, tzn. struktury sterowania PID oraz predykcyjne MPC, metody ich strojenia oraz wskaźniki stosowane do ich oceny.

2.1. Obiekt regulacji

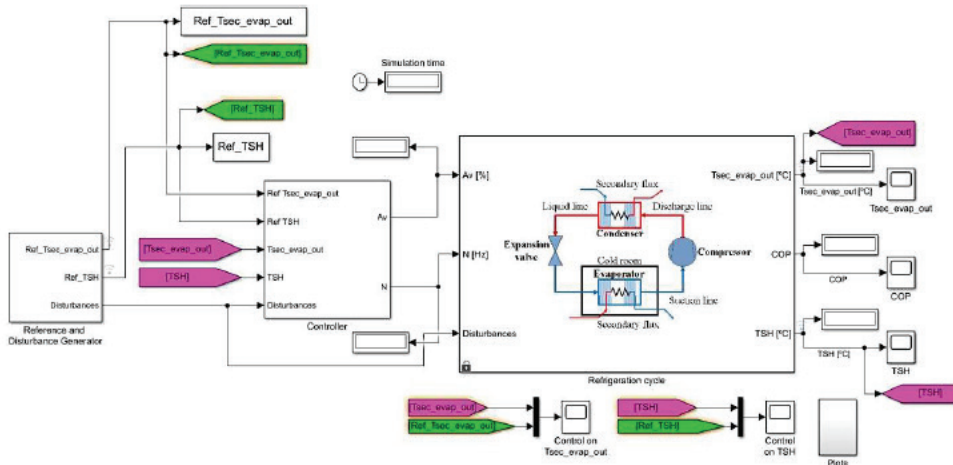
Chłodzenie z wykorzystaniem kompresji pary jest obecnie wiodącą technologią w chłodnictwie, zarówno w klimatyzacji, ochładzaniu bądź zamrażaniu [51]. Utrzymywanie niskiej, zadanej temperatury jest kluczowe w wielu aspektach, takich jak komfort ludzi, przechowywanie i transport żywności oraz w procesach przemysłowych. Stąd pojawia się potrzeba dogłębnego badania i analizy struktur regulacji temperatury oraz ich rozwijania.

Schemat cyklu chłodniczego został przedstawiony na rys. 1. Jego główne elementy to zawór, kompresor, parownik oraz skraplacz. Celem cyklu jest usuwanie ciepła z przepływu wtórnego (ang. *secondary flux*) w parowniku i odrzucanie ciepła z kondensatora do przepływu wtórnego. Chłodziwo o niskiej temperaturze i niskim ciśnieniu wpływa do parownika i paruje, usuwając ciepło z przepływu wtórnego parownika. Następnie kompresor podnosi ciśnienie i temperaturę chłodziwa, które wpływa do skraplacza. Tam początkowo temperatura spada, następuje kondensacja pary i ciepło jest przekazane do przepływu wtórnego. Zawór wyrównuje różnice ciśnień między parownikiem a skraplaczem.



Rys. 1. Schemat cyklu chłodniczego wykorzystującego zjawisko kompresji pary [51]

Fig. 1. Schematic diagram of refrigeration system based on vapour compression



Rys. 2. Model systemu chłodniczego w środowisku MATLAB/Simulink
Fig. 2. MATLAB model of the refrigeration system

Do badań wykorzystano zmodyfikowany model systemu chłodniczego (rys. 2) przygotowany w środowisku MATLAB/Simulink przez naukowców Uniwersytetu w Sewilli na potrzeby konferencji IFAC PID 2018, który jest ogólnie dostępny [50]. Jego dokładny opis jest umieszczony w [51].

Głównym celem regulacji jest zapewnienie odpowiedniej mocy chłodzącej \dot{Q}_e [51]. Aby generowanie tej mocy było jak najbardziej wydajne, należy utrzymywać właściwy stopień przegrzania cieczy (ang. *degree of superheating*) T_{SH} , czyli różnicę między temperaturą cieczy przegrzanej (o temperaturze wyższej niż temperatura wrzenia przy danym ciśnieniu) a temperaturą cieczy nasyconej (pozostającej w równowadze termodynamicznej z inną fazą tej samej substancji) [52].

Zapotrzebowanie na chłodzenie może być również wyrażone za pomocą temperatury wyjściowej przepływu wtórnego w parowniku $T_{e,sec,out}$. Otrzymujemy wtedy układ z dwoma zmiennymi procesowymi T_{SH} i $T_{e,sec,out}$ oraz dwoma zmiennymi sterującymi pochodzącymi od urządzeń wykonawczych, czyli prędkość obrotowa pracy kompresora N i otwarcie zaworu A_v . Temperatury, przepływy masowe oraz ciśnienia przepływów wtórnych na wejściach parownika i skraplacza nie będą regulowane, są one potraktowane w modelu jako zakłócenia, podobnie jak temperatura otoczenia kompresora.

2.2. Szumy pomiarowe

W celu przetestowania odporności regulatorów na występowanie błędów pomiarowych zostały one dodane do istniejącego

modelu. Przebiegi szumów zostały wygenerowane raz, a następnie były wczytywane z pliku. Takie podejście pozwoliło na zachowanie powtarzalności eksperymentów. W celu odzwierciedlenia rzeczywistych, trudnych niegaussowskich warunków sterowania wprowadzone zostały szumy o charakterze gruboogonowym generowane jako szum α -stabilny. Cechują się one możliwością uwzględnienia wartości odstających (ang. *outliers*), które bardzo często występują w systemach przemysłowych.

Wykorzystano szum niegaussowski, gruboogonowy o współczynniku skali wynoszącym $\alpha = 1,9$. Wygenerowane zostały dwa ciągi po 1200 próbek dla obu wyjść obiektu. Zastosowanie takiego rozkładu umożliwia obserwację zachowania systemu na pojedyncze, duże odchyłki podczas pomiaru wyjść, co odwzorowuje obserwacje odstające.

2.3. Struktury regulatorów

W pracy wykorzystane zostały dwie klasy algorytmów regulacji: struktury typu PID oraz algorytm predykcyjny klasy MPC.

2.3.1. Struktury PID

Najczęściej spotykanym w zastosowaniach przemysłowych algorytmem regulacji jest układ regulatora proporcjonalno-całkująco-różniczkującego (PID). Algorytm ten ma długą historię, jest bardzo popularny oraz powszechnie znany. Różne jego wersje występują w prawie każdym regulatorze przemysłowym. Jako podstawowy układ w pojedynczej pętli sprzężenia zwrotnego, regulator PID cechuje się dużą odpornością oraz uniwersalnością zastosowań.

W trakcie opisywanych badań analizowane były następujące jednopętlowe struktury regulacji z rodziny PID:

– PI szeregowy

$$G_{PI,series} = P \left(1 + I \frac{T_s}{z-1} \right), \quad (1)$$

– PD szeregowy

$$G_{PD,series} = P \left(1 + D \frac{z-1}{T_s z} \right), \quad (2)$$

– PID szeregowy

$$G_{PID,series} = P \left(1 + I \frac{T_s}{z-1} \right) \left(1 + D \frac{z-1}{T_s z} \right), \quad (3)$$

– PI równoległy

$$G_{PI,parallel} = P + I \frac{T_s}{z-1}, \quad (4)$$

– PD równoległy

$$G_{PD,parallel} = P + D \frac{z-1}{T_s z}, \quad (5)$$

– PID równoległy

$$G_{PID,parallel} = P + I \frac{T_s}{z-1} + D \frac{z-1}{T_s z}, \quad (6)$$

– PID równoległy z filtrem różniczkowania

$$G_{\text{PID,filter,parallel}} = P + I \frac{T_s}{z-1} + D \frac{N}{1 + N \cdot T_s \frac{1}{z-1}}, \quad (7)$$

– PID równoległy z różniczkowaniem wyjścia

$$G_{\text{PID,weighting,parallel}} = \left(P + I \frac{T_s}{z-1} \right) (r - y) - D \frac{N}{1 + N \cdot T_s \frac{1}{z-1}} y, \quad (8)$$

– PID równoległy z ważeniem wartości zadanej

$$G_{\text{PID,weighting,parallel}} = P(b \cdot r - y) + I \frac{T_s}{z-1} (r - y) + D \frac{N}{1 + N \cdot T_s \frac{1}{z-1}} (c \cdot r - y). \quad (9)$$

2.3.2. Algorytm predykcyjny MPC

Regulator predykcyjny MPC (Model Predictive Control) działa w układzie regulacji z modelem. Swoje działanie opiera na wyznaczaniu w każdej iteracji algorytmu przyszłych wartości sygnału sterującego oraz wektora przyrostów tego sygnału [18]. W tym celu wymagana jest znajomość modelu dynamicznego procesu (w postaci odpowiedzi skokowej, równania różnicowego lub równań stanu), pomiarów sygnałów wejściowych oraz wyjściowych zarówno z aktualnej chwili czasu, jak i z przeszłości oraz znajomość trajektorii zadanej.

Najczęściej spotykanymi algorytmami regulacji predykcyjnej są:

- algorytm DMC (Dynamic Matrix Control), wykorzystujący model obiektu w postaci odpowiedzi skokowych,
- algorytm GPC (General Predictive Control), dla obiektów opisanych za pomocą równań różnicowych,
- algorytm MPC (Model Predictive Control with State equations), dla modeli obiektu w postaci równań stanu.

Sterowanie predykcyjne znalazło w dzisiejszych czasach zastosowanie m.in. w przemyśle rafineryjnym oraz procesach destylacji. Jego głównymi zaletami są:

- możliwość uwzględnienia ograniczeń sygnałów,
- możliwość uwzględnienia wewnętrznych interakcji między wyjściami i wejściami procesu czy też zakłóceniami wpływającymi na proces,
- możliwość zaprojektowania funkcji celu indywidualnie, specjalnie na potrzeby regulowanego procesu.

W celu zaprojektowania regulatora predykcyjnego posłużono się narzędziem oprogramowania MATLAB – Model Predictive Control Toolbox. Jest to bardzo wygodne oraz intuicyjne w obsłudze narzędzie do projektowania układów sterowania wykorzystujących regulatory predykcyjne w środowisko MATLAB/Simulink. Zawiera aplikację MPC Designer umożliwiającą uzyskanie modelu obiektu w postaci równań stanu, projektowanie, testowanie oraz porównywanie działania regulatorów predykcyjnych. Do obliczania wartości sygnałów sterujących wykorzystuje on algorytm MPC (Model Predictive Control), a funkcja celu zdefiniowana jest jako suma czterech składników: śledzenia wartości zadanej, śledzenia sygnałów sterujących, kary za przystość sygnałów sterujących oraz kary za przekroczenie ograniczeń sygnałów wejściowych oraz wyjściowych [19].

2.4. Strojenie algorytmu PID stosując optymalizację

Optymalizacja parametrów była wykonywana przy pomocy algorytmu genetycznego ga z pakietu Global Optimization Toolbox dla środowiska MATLAB. Struktury regulatorów były testowane parami, tj. na obu torach sterowania wykorzystywane były te same regulatory dla każdej ze struktur. Następnie

wszystkie pary zostały nastrojone przy użyciu jednego z czterech wskaźników jakości:

- MSE,
- IAE,
- mediana,
- mscaleologist (odporny współczynnik skali rozkładu prawdopodobieństwa).

Ze względu na złożoność modelu czas jednej symulacji waha się od około 120 sekund dla dobrze dobranego regulatora, do godziny dla układów niestabilnych. Podjęte zostały próby strojenia regulatora bezpośrednio na obiekcie metodą gradientową. Przy takim podejściu ujawniają się dwa kolejne problemy. Po pierwsze ze względu na nieliniowość obiektu oraz wielomodalność przestrzeni przeszukiwań rezultat mocno zależy od wybranego punktu startowego. Jeżeli już na starcie regulator wpadał w oscylacje, oznaczało to, że metoda nie jest w stanie znaleźć parametrów stabilnego regulatora.

Drugim problemem, jaki się pojawia, jest czas trwania optymalizacji. Dla dwóch regulatorów PI, czyli jedynie czterech parametrów, procedura trwała kilkanaście godzin. Z tych względów ta metoda została porzucona.

W związku z tym wykorzystano model liniowy obiektu. W tym celu zastosowano model z literatury, który jest opisany za pomocą czterech transmitancji [20]. Transmitancje modelu liniowego przedstawia wzór (10). Nie uwzględnia on działania zakłóceń, jednak umożliwia szybkie odnajdywanie parametrów. Czas wykonania symulacji został skrócony do wartości rzędu ułamków sekundy. Umożliwiło to zastosowanie metod optymalizacji globalnej. Dzięki takiemu podejściu możliwe jest sprawdzanie nawet kilkudziesięciu tysięcy punktów w znacznie krótszym czasie

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{-0,2219s - 0,004757}{s^2 + 5,834s + 0,2373} & \frac{-0,004638}{s^2 + 93,24s + 3,802} \\ \frac{-2,425}{s^2 + 2,099s + 6,634} & \frac{1,208s + 0,03219}{s^2 + 6,743s + 0,1946} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Problemem związanym z modelem liniowym było to, że źle odwzorowywał on zachowanie dla wartości sygnałów oddalonych od punktu pracy, w którym został stworzony. Dlatego na potrzeby wyznaczania parametrów, oryginalny przebieg wartości zadanych wyznaczający cykl pracy obiegu został przeskalowany w taki sposób, aby skoki były niewielkie i wartości zadane oscylowały wokół punktu pracy.

Podczas strojenia nastaw regulatora w warunkach nieliniowych zastosowana została autorska procedura:

1. Optymalizacja na modelu liniowym przy pomocy algorytmu genetycznego.
2. Test na oryginalnym modelu.
3. Jeżeli układ jest stabilny, wykonanie testu na modelu z błędami pomiarowymi.

Przy strojeniu struktur będących rozwinięciem równoległego regulatora PID, wzmocnienia członów P, I oraz D zostały wybrane z wyznaczonych nastaw dla podstawowej wersji PID, a dostrajane były jedynie dodatkowe parametry (np. b oraz c dla struktury z ważeniem wartości zadanej).

2.5. Wskaźniki jakości regulacji

Istnieje wiele wskaźników służących do oceny jakości regulacji. Najpopularniejszymi z nich są przeregulowanie κ , które informuje o oscylacjach procesu oraz czas regulacji T_r dostarczający informacji o szybkości stabilizacji sygnału wokół wartości zadanej. Dodatkowo, bardzo często używa się wskaźników całkowitych, takich jak IAE (Integral Absolute Error), MSE (Mean Square Error) lub ISE (Integral Square Error) oraz wskaźników statystycznych, takich jak średnia oraz wariancja uchybu regulacji (oznaczone odpowiednio μ i σ).

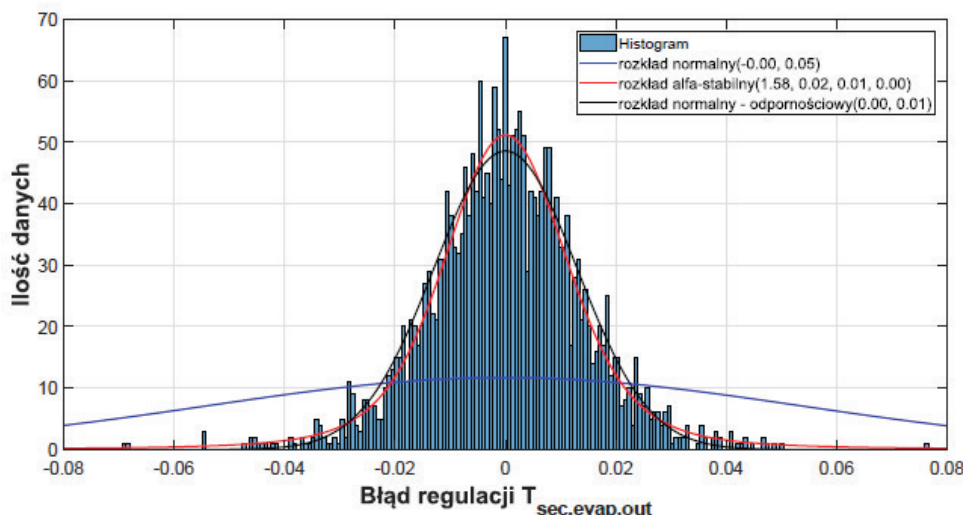
Powyższe wskaźniki należy traktować jako podstawowe. Jednakże literatura przedmiotu jest bardzo bogata i można znaleźć wiele innych podejść, jak na przykład:

1. inne wskaźniki wykorzystujące odpowiedź skokową, na przykład współczynnik zapominania (ang. *decay ratio*) lub uchyb ustalony [21],
2. wskaźniki wykorzystujące odpowiedź zakłóceńową, na przykład Idle Index [22], Area Index, Output Index [23], R-index [24],
3. inne wskaźniki całkowite, jak Integral Time Absolute Value (ITAE) [25], Integral of Square Time derivative of the Control input (ISTC) [26], Total Squared Variation (TSV) [27], Amplitude Index (AMP) [21],
4. wskaźniki korelacyjne [28, 29],
5. inne wskaźniki statystyczne, jak skośność, kurtoza [30], variance band [31] oraz współczynniki innych rozkładów [32],
6. metody wykorzystujące modelowanie, w tym podejście minimalno-wariacyjne [33, 34],
7. podejścia hybrydowe [35], np. Exponentially Weighted Moving Averages (EWMA) [36],
8. metody częstotliwościowe wykorzystujące charakterystyki Bodego, Nyquista i Nicholasa wraz z zapasami modułu i fazy [37] aż po bardziej zaawansowane metody wykorzystujące przekształcenie Fouriera [38],
9. metody alternatywne wykorzystujące przekształcenie fal-kowe [39], ortogonalne funkcje Laguerre'a [40], sztuczne sieci neuronowe [41], wykładnik Hursta [42], miary persystencji [43], czy entropii [44],
10. różnorakie wskaźniki czysto biznesowe [45, 2].

2.6. Analiza rozkładu uchybu regulacji

Niestety błąd regulacji bardzo rzadko można przybliżyć rozkładem Gaussa, stąd parametry μ oraz σ niedokładnie będą oceniać jakość regulacji. Analizując histogram uchybu regulacji (rys. 3) można zauważyć, że właściwości obiektu znacznie lepiej można przybliżyć wykorzystując do tego celu rozkład α -stabilny Lévy'ego bądź rozkład normalny wyznaczając jego parametry metodami statystyki odpornościowej (ang. *Robust Statistics*). Rozkład α -stabilny należy do rozkładów gruboogonowych (ang. *heavy-tailed distribution*) i ma 4 parametry:

- $\alpha \in (0, 2]$ – parametr stabilności,
- $\beta \in [-1, 1]$ – parametr skośności,
- $\gamma \in (0, \infty)$ – parametr skali,
- $\delta \in (-\infty, \infty)$ – parametr położenia.



Rys. 3. Aproksymacja rozkładu statystycznego uchybu regulacji przy pomocy rozkładu Gaussa, α -stabilnego oraz Gaussa z parametrami odpornościowymi

Fig. 3. Control error histogram with fitted Gauss, α -stable and robust probabilistic density functions

Warto nadmienić, że w przypadku, gdy $\alpha = 2$ oraz $\beta = 0$ mamy do czynienia z rozkładem gaussowskim $\mathcal{N}(\gamma, \delta)$, zaś dla $\alpha = 1$ i $\beta = 0$ – z rozkładem Cauchy'ego.

Metody statystyki odpornościowej służą do estymacji rozkładu prawdopodobieństwa danych pod kątem odporności na odejście od założeń modelu (ang. *outliers*) bądź w obecności zakłóceń. W tych przypadkach klasyczne estymatory średniej bądź skali nie są wiarygodne. Odporność na wartości odstające wykazują również modułowe wskaźniki statystyczne, np. wskaźnik IAE.

Aproksymacja rozkładu błędu regulacji przy użyciu rozkładów α -stabilnego oraz normalnego o parametrach wyznaczonych metodami statystyki odpornościowej daje lepsze wyniki niż w przypadku rozkładu normalnego, dlatego też parametry skali oraz położenia tych rozkładów dokładniej oceniają błąd regulacji aniżeli klasyczne Gaussowskie wskaźniki.

Istnieje wiele metod dedykowanych dopasowaniu funkcji rozkładu prawdopodobieństwa do histogramu zmiennej [46]. Podejście regresyjne Koutrouvelisa [47] pozwala na dopasowanie rozkładu α -stabilnego.

2.6.1. Analiza fraktalna

Pojęcie fraktali (łac. *fractus* – złamany, cząstkowy) zostało wprowadzone przez Benoit Mandelbrodta. Fraktale są obiektami samopodobnymi, najprostsza metoda ich powstawania jest wielokrotne powtarzanie tej samej reguły, która generuje kształt. Kształty fraktalne wykazują samopodobieństwo względem przestrzeni, natomiast szeregi czasowe – względem czasu. Przykładem kształtu fraktalnego są np. płatki śniegu lub trójkąt Sierpińskiego. Jednym z narzędzi stosowanych do analizy fraktalnej szeregów czasowych jest wykładnik Hursta.

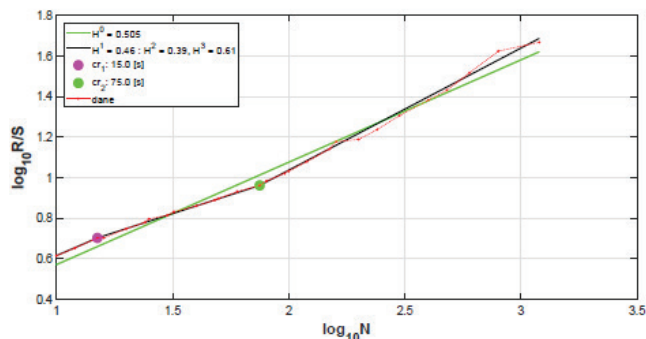
Harold Edwin Hurst był hydrologiem, pracował przy budowie tamy na Nilu mając dostęp do danych historycznych dotyczących wylewów tej rzeki. Na potrzeby swojej pracy opracował nowe narzędzie statystyczne: wykładnik Hursta (H) [48]. W celu obliczenia współczynnika i porównywania szeregów czasowych różnego typu należy dokonać analizy przeskalowanego zasięgu R/S (ang. *Rescaled Range analysis*).

Zakres szeregu (różnica między maksymalną a minimalną wartością szeregu) dzieli się przez odchylenie standardowe tego zbioru, co sprawia, że wykładnik ten jest uniwersalnym narzędziem do analizy wszelkich szeregów czasowych. Oblicza się go na podstawie nachylenia wykresów logarytmów R/S w zależności od długości danych N na skali podwójnie logarytmicznej.

$$\frac{R}{S} = a \cdot N^H, \quad (11)$$

gdzie: R – zakres szeregu czasowego, S – odchylenie standardowe, N – liczba obserwacji, a – stała estymowana na podstawie nachylenia wykresu R/S , H – wykładnik Hursta.

Po obustronnym zlogarytmizowaniu równania (11) można obliczyć wykładnik H . Niestety jedna prosta w większości przypadków niedokładnie aproksymuje dane na wykresie przeskalowanego zasięgu, stąd też podejmuje się próby aproksymacji danych łamaną z dwoma punktami przegięcia (ang. *cross-over*), co zostało szerzej opisane w [43]. W procesie oceny działania regulatora kluczowy jest począt-



Rys. 4. Przykład analizy R/S danych; H_0 jest wykładnikiem Hursta obliczonym na podstawie aproksymacji danych prosta; współczynniki H_1, H_2 oraz H_3 oznaczają wykładniki Hursta obliczone na podstawie danego odcinka łamanej o punktach przegięcia cr_1 i cr_2

kowy odcinek krzywej aproksymującej dane. W przypadku małej ilości dostępnych danych (N) wykładnik Hursta może złudnie oceniać szereg czasowy. Przykład analizy przeskalowanego zakresu danych można zobaczyć na rys. 4.

Wykładnik Hursta jest miarą korelacji elementów szeregu czasowego. Przyjmuje on wartości z zakresu $(0; 1)$:

- gdy $H \in (0; 0,5)$ to szereg jest ergodyczny (antypersystentny); jego wartości powracają do średniej; w odniesieniu do oceny jakości regulacji oznacza to, że regulator jest szybki (ang. *aggressive*) [49];
- gdy $H \in (0,5; 1)$ to szereg jest persystentny; jego wartości odbiegają od średniej; oznacza to, że regulator jest powolny (ang. *sluggish*), a regulowany proces może być niestabilny;
- gdy $H = 0,5$ to wszystkie elementy szeregu są niezależne, nieskorelowane; wartość ta stanowi punkt odniesienia w procesie projektowania regulatorów.

3. Wyniki strojenia różnymi wskaźnikami

W pierwszej kolejności analizie zostały poddane możliwości strojenia algorytmów regulacji PID przy wykorzystaniu różnych wskaźników jakości. Biorąc pod uwagę wielorakość wskaźników oraz wersji algorytmów regulacji trudno w pracy zamieścić wszystkie wyniki. Dlatego zamieszczono tylko przykładowe wyniki, zaś podsumowanie zaprezentowano w postaci tabelarycznej.

Dla przykładu pokazany zostanie przebieg badania dla równoległego regulatora PI dla wskaźnika MSE. Najpierw na modelu liniowym zostaje uruchomiona optymalizacja metodą ga. Po 64 pokoleniach i 3250 symulacjach algorytm skończył działanie i zwrócił parametry: $P_{T_{sec, evap, out}} = 24,3883$, $I_{T_{sec, evap, out}} = 24,8822$, $P_{T_{SH}} = 5,0567$, $I_{T_{SH}} = 5,0184$. Przebiegi na modelu liniowym dla tych parametrów są przedstawione na rys. 5. Po znalezieniu parametrów został wykonany test na oryginalnym modelu. Ponieważ użycie uzyskanych wyników dało regulator stabilny, układ został uruchomiony na modelu z błędami pomiarowymi. Oba eksperymenty zostały przedstawione na rys. 7.

3.1. Porównanie struktur regulacji

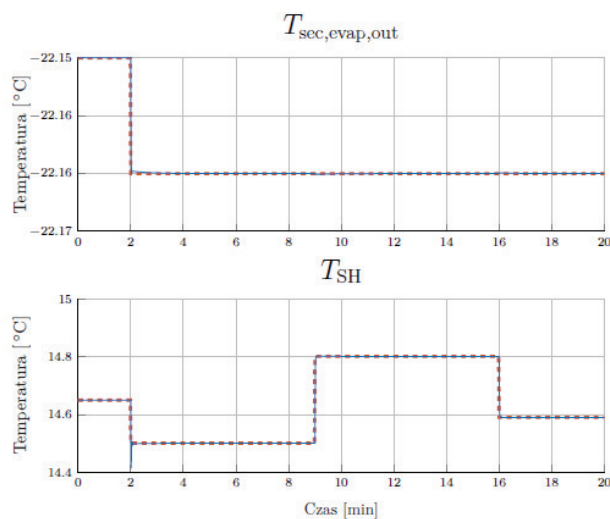
Dla modelu z zakłóceniami zostały wybrane struktury, które uzyskały najlepszą jakość regulacji pod względem każdego ze wskaźników.

- MSE – PI równoległy nastrojony przy pomocy MSE,
- IAE – PID z ważeniem wartości zadanej nastrojony przy pomocy IAE,
- mediana – PID z ważeniem wartości zadanej nastrojony przy pomocy IAE,

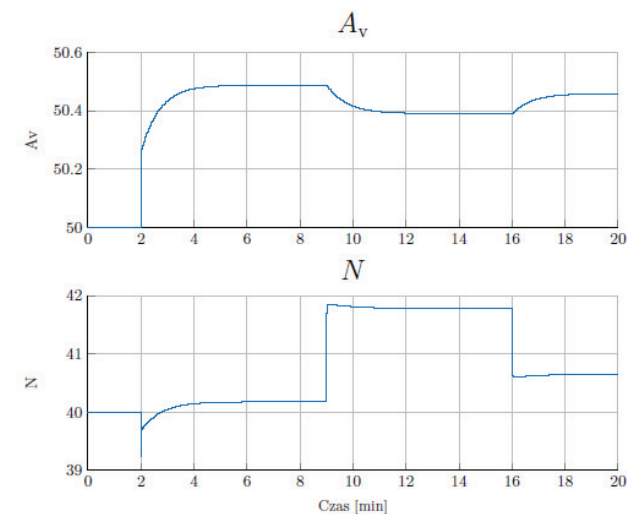
– mscalelogist – PID z ważeniem wartości zadanej nastrojony przy pomocy IAE.

Analizując cztery wskaźniki, wybrane zostały w sumie trzy różne przypadki. Trzy z tego względu, że do regulatora z różniczkowaniem wyjścia zostały wybrane parametry równoległego PI, a optymalizacja przy pomocy IAE wyznaczyła zerowe wzmocnienia dla członu różniczkowania. Sprowadziła ona w ten sposób regulator PID z różniczkowaniem wyjścia do równoległego regulatora PI.

Porównując jakościowo oba te przebiegi można zauważyć, że regulator PI mocniej oscyluje wokół wartości zadanych. Ponieważ wskaźnik MSE jest mniej odporny i bardziej uwzględnia pojedyncze duże wahania, wyznaczył on właśnie takie parametry. Warto zwrócić uwagę na fakt, że optymalizacja sprowadziła regulator bardziej zaawansowany, o większej liczbie stopni swobody i współczynników, do formy prostszej zerując część jego parametrów.



Rys. 5. Równoległy regulator PI strojony z użyciem MSE – symulacja na modelu liniowym



Rys. 6. Równoległy regulator PI strojony z użyciem MSE – symulacja na modelu liniowym – przebiegi sygnałów sterujących

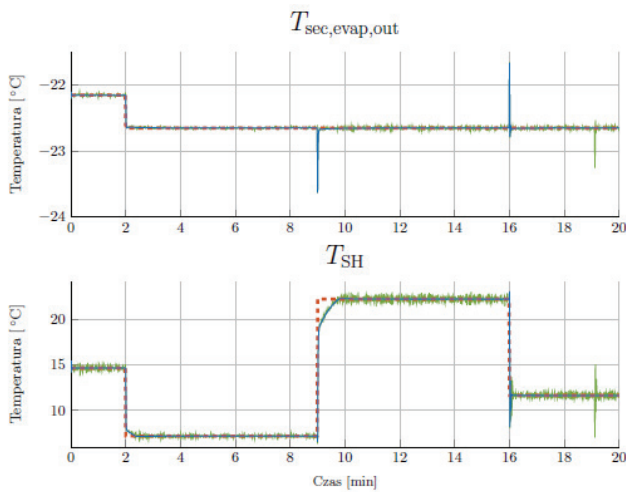
3.2. Porównanie wskaźników jakości

Biorąc pod uwagę analizę wszystkich wskaźników, najlepszy wynik został uzyskany dla regulatorów strojonych przy pomocy IAE. Jednak, aby uwzględnić więcej czynników, zostaną również porównane inne aspekty. Zgodnie z tabelą 1 wskaźnik MSE zwrócił 8/9 stabilnych regulatorów, IAE 7/9, mediana 4/9, a statystyka odpornościowa 5/9.

Tab. 1. Stabilność wyznaczonych regulatorów dla modelu bez błędów pomiarowych

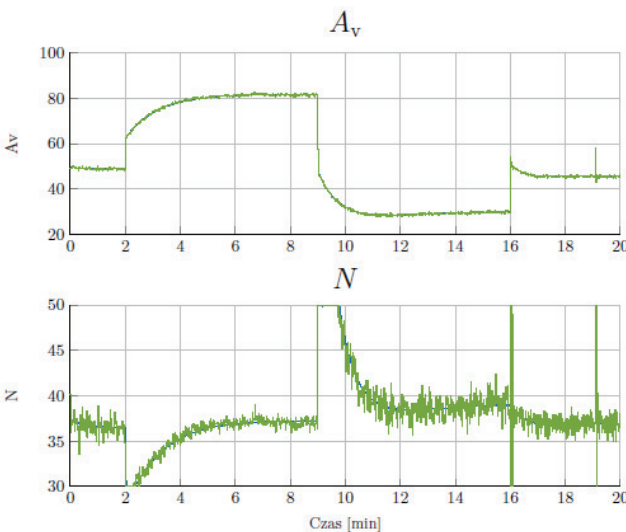
Tab. 1. Stability of controllers designed without disturbances

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
MSE	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
IAE	×	✓	✓	✓	✓	×	✓	✓	✓
mediana	×	×	×	✓	×	×	✓	✓	✓
mscalelogist	✓	×	×	✓	×	×	✓	✓	✓



Rys. 7. Równoległy regulator PI strojony z użyciem MSE w wersji z zakłóceniami i bez

Fig. 7. Parallel PI controller tuned according to MSE, with and without disturbances – process variables



Rys. 8. Równoległy regulator PI strojony z użyciem MSE w wersji z zakłóceniami i bez – przebiegi sygnałów sterujących

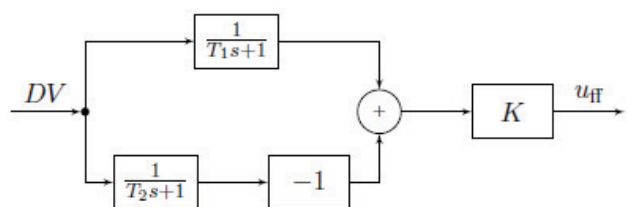
Fig. 8. Parallel PI controller tuned according to MSE, with and without disturbances – manipulated variables

Analizując, jaki wskaźnik użyty podczas strojenia dał najlepsze przebiegi dla każdej ze struktur okazuje się, że dominują tu wskaźniki MSE oraz IAE. Strojenie za pomocą statystyki odpornościowej najlepiej zadziałało dla równoległego regulatora PD, natomiast mediana nie dała najlepszego rezultatu dla żadnej ze struktur. Strojenie przy pomocy mediany oraz statystyki odpornościowej dało średnio gorsze układy niż MSE oraz IAE. Należy wziąć również pod uwagę, że nie są tutaj uwzględnione układy niestabilne, ponieważ nie były one testowane na modelu z błędami pomiarowymi, co jeszcze bardziej pokazuje przewagę wskaźników MSE oraz IAE. Prezentacja wszystkich wskaźników umieszczona jest w tabelicy 4.

4. Badania oceny jakości regulacji

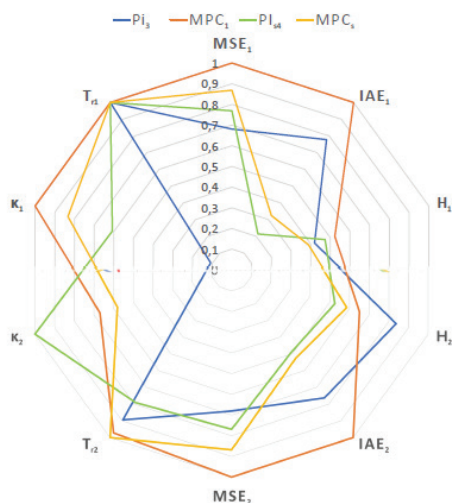
Po porównaniu wpływu wykorzystania wskaźnika oceny na jakość otrzymanego regulatora analizie zostały poddane same wskaźniki oceny oraz to, jak one pozwalają odzwierciedlić różne modyfikacje struktur regulacji. W ramach badań przeprowadzono eksperymenty mające na celu zaprojektowanie regulatora optymalnego PI oraz MPC. Ponadto w celu optymalizacji działania regulatora PI jego strukturę rozszerzano o dodatkowe mechanizmy mające na celu poprawienie jakości regulacji, tj. anti-windup oraz kompensację zakłóceń przy pomocy sprzężenia *feedforward*. Mechanizm anti-windup wykorzystuje algorytm *clamping*, czyli kończy całkowanie w momencie, gdy przekroczone zostaną ograniczenia sygnału sterującego oraz sygnał sterujący i wyjściowy są tego samego znaku [19]. Człon *feedforward* został zaimplementowany w strukturze przemysłowej przedstawionej na rys. 9. Taka struktura, o trzech parametrach: T_1 , T_2 oraz K , przy czym $T_2 > T_1$ nie wymaga modelu sygnałów zakłócających do ich kompensacji, skąd znalazła swoje zastosowanie w przemyśle. Stała czasowa T_1 stanowi o tym, jak szybko będzie narastał sygnał u_{ff} w odpowiedzi na zmianę sygnału zakłócającego, a T_2 – jak szybko zostanie ona wytłumiona.

Badania przeprowadzono w dwóch środowiskach: z obecnością szumu zakłóceń oraz przy braku szumu. Szum zakłóceń wprowadzony do układu ma rozkład Gaussa o średniej $\mu = 0$ i wariancji $\sigma^2 = 0,0007$. Został on dodany do sygnałów zakłócających. Regulatory zaimplementowano w środowisku MATLAB/Simulink. Parametry regulatorów PI oraz członu *feedforward* dobierano przy pomocy metod optymalizacji lokalnej, minimalizując kwadrat uchybu regulacji. Regulator predykcyjny wykorzystuje algorytm MPC (Model Predictive Control with State equations) i został zaprojektowany w aplikacji *MPC Designer* z przyborka *Model Predictive Control Toolbox*. Regulator predykcyjny swoje działanie opiera na modelu w postaci transmitancji (10), który został szerzej opisany w [20]. Trajektoria zadana dla obu zmiennych procesowych oraz sygnałów zakłócających została narzucona przez twórców modelu [51] i nie była modyfikowana na potrzeby badań.



Rys. 9. Schemat członu kompensującego zakłócenia *feedforward*; u_{ff} – sygnał wyjściowy członu *feedforward*

Fig. 9. Industrial design of disturbance decoupling feedforward; u_{ff} feedforward output



Rys. 10. Wskaźniki jakości regulacji dla regulatorów PI, MPC, PI_s oraz MPC_s; wskaźniki z indeksem 1 odnoszą się do pętli sterującej zmienną T_{sec, evap, out}, z indeksem 2 dotyczą pętli sterującej T_{SH}.
Fig. 10. Multicriteria radar plot for PI, MPC, PI_s and MPC_s; measures with index 1 apply to T_{sec, evap, out} loop, index 2 applies to T_{SH} loop

W wyniku badań wybrano cztery najlepiej dostrójone układy sterowania: PI o rozszerzonej strukturze oraz MPC przy obecności szumu zakłóceń, jak i przy ich braku – oznaczone dalej odpowiednio: PI, MPC, PI_s oraz MPC_s. Wartości badanych wskaźników jakości dla tych regulatorów zebrane są w tabelach 2 oraz 3.

Wizualne porównanie wyników przedstawia rysunek 10. Indeks 1 oznaczono pętlę sterującą zmienną T_{sec, evap, out}, a indeksem 2 – sterującą zmienną T_{SH}. Wykres radarowy przedstawia stosunek najmniejszej wartości danego wskaźnika jakości uzyskaną spośród wszystkich porównywanych regulatorów do wartości dla danego regulatora. Oznacza to, że wartość wskaźnika była tym mniejsza, im bliżej zewnętrznej części wykresu znajduje się krzywa dotycząca danego regulatora. Na potrzeby wykonania wykresu uśredniono przeregulowania oraz czasy regulacji

Tab. 2. Porównanie wartości czasów regulacji i przeregulowań dla regulatorów PI, MPC, PI_s oraz MPC_s (indeks przy wskaźniku oznacza kolejne skoki wartości zadanej)

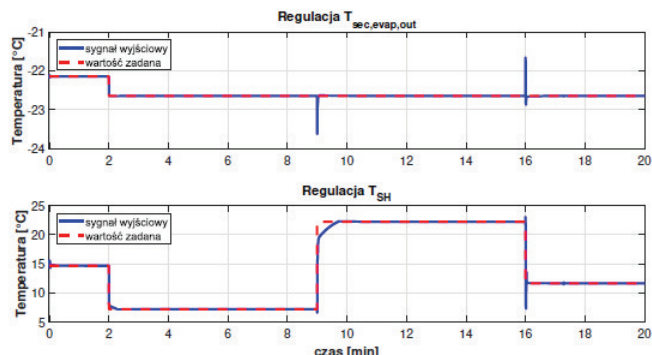
Tab. 2. Comparison of the settling times and overshoots for PI, MPC, PI_s and MPC_s controllers (measure index denotes consecutive setpoint steps)

Regulator	T _{sec, evap, out}		T _{SH}					
	κ [%]	T _r [s]	κ ₁ [%]	T _{r1} [s]	κ ₂ [%]	T _{r2} [s]	κ ₃ [%]	T _{r3} [s]
PI	0,93	2	17,79	8	1,02	24	75,92	6
MPC	0,1	2	0,99	8	0,6	23	20,48	4
PI _s	0,16	2	3,85	12	1,46	26	9,47	5
MPC _s	0,12	2	2,14	8	1,68	22	21,64	4

Tab. 3. Porównanie wartości wskaźników błędów regulacji dla regulatorów PI, MPC, PI_s i MPC_s

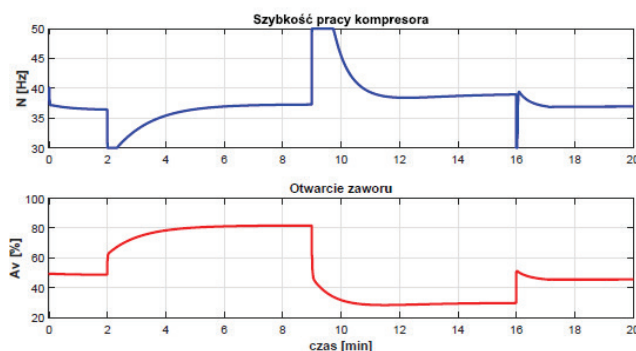
Tab. 3. Comparison of control error measures for PI, MPC, PI_s and MPC_s controllers

Regulator	T _{sec, evap, out}			T _{SH}		
	MSE·10 ⁻³	IAE·10 ⁻²	H	MSE	IAE	H
PI	1,496	0,309	0,420	0,368	0,102	0,837
MPC	1,019	0,241	0,523	0,312	0,078	0,651
PI _s	1,324	1,125	0,473	0,368	0,158	0,526
MPC _s	1,173	0,743	0,389	0,357	0,147	0,586



Rys. 11. Przebiegi sygnałów wyjściowych procesu dla regulatora optymalnego MPC w warunkach bez szumu zakłóceń

Fig. 11. Process variables for optimal MPC controller in the undisturbed scenario

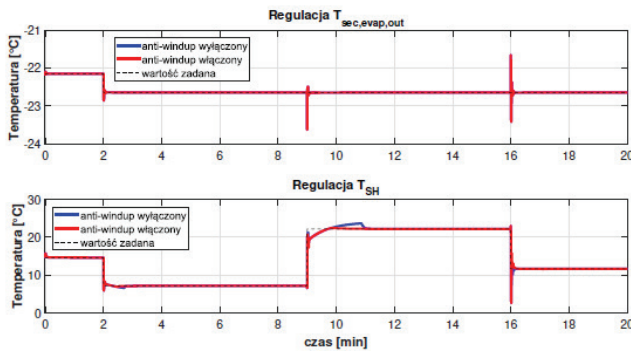


Rys. 12. Przebiegi sygnałów wejściowych procesu dla regulatora optymalnego MPC w warunkach bez szumu zakłóceń

Fig. 12. Manipulated variables for optimal MPC controller in the undisturbed scenario

dla trzech skoków wartości zadanej zmienną T_{SH}, oznaczając je odpowiednio κ₂ i T_{r2}.

Jak widać (rys. 13), mechanizm anti-windup skutecznie eliminuje przeregulowanie wynikające z nadmiernej akcji całkującej podczas osiągnięcia przez sygnał sterujący ograniczeń. Wartości



Rys. 13. Wpływ działania mechanizmów anti-windup oraz feedforward na jakość pracy regulatora optymalnego PI w warunkach bez szumu zakłóceń

Fig. 13. Anti-windup and disturbance decoupling feedforward impact on optimal PI control in the undisturbed scenario

wskaźników jakości uzyskane dla przedstawionych regulatorów są zbliżone do siebie, jednak w obu badanych środowiskach niższe wartości wskaźników uzyskały regulatory predykcyjne. Warto zauważyć, że wykładnik Hursta osiąga wartości zbliżone do $H = 0,5$, czyli do regulacji neutralnej.

5. Podsumowanie

W artykule dokonano analizy wpływu przyjętej postaci wskaźnika jakości jako celu strojenia regulatora na efektywność działania otrzymanego regulatora oraz porównania działania regulatorów PID oraz MPC na przykładowym obiekcie przy pomocy wybranych wskaźników jakości, zarówno przy obecności szumu zakłóceń, jak i przy jego braku.

Z przeprowadzonych eksperymentów można spróbować wyciągnąć wnioski na temat architektury regulatorów PID oraz stosowania różnych wskaźników jakości przy ich strojeniu. Po pierwsze podstawowa architektura PID potrafi zapewnić dobrą jakość regulacji nawet dla obiektów nieliniowych. Zastosowane regulatory PI przy odpowiednich nastawach dały dobrą jakość regulacji, a wskaźnik MSE zwracał ją jako najlepszą spośród wszystkich struktur.

Można również zauważyć, że wszystkie pozostałe wskaźniki wskazały na jedną strukturę, czyli regulator PID z ważeniem wartości zadanej, nastrojony przy pomocy wskaźnika IAE. Jednak biorąc pod uwagę fakt, że istnieją dwa tory sterowania i dwa regulatory, to z czterech parametrów do nastrojenia dla PI, dla PID z ważeniem wartości zadanej trzeba dobrać ich dwanaście.

Porównując wskaźniki jakości możemy zauważyć, że wskaźnik minimalno-kwadratowy, który mocno karze za wszelkie duże odchylenia, znalazł najwięcej zestawów parametrów zapewniających stabilne działanie, ale jednocześnie nie jest to rozwiązanie idealne. Wskaźnik IAE, który jest bardziej odporny niż MSE dla regulatora z ważeniem wartości zadanej wyznaczył parametry, które w rezultacie dały regulatory bardziej odporne na zakłócenia. Ostatecznie pozostałe dwa, jeszcze bardziej odporne wskaźniki, również wskazały go jako najlepszy spośród wszystkich, jednak algorytm optymalizacji posługując się wyłącznie nimi dawał gorsze rezultaty.

Analizując otrzymane wyniki można wysnuć przypuszczenie, że wskaźniki odporne wskazywały na bardziej agresywne regulatory. Finalnie w związku z tym, że układy strojone były na modelu liniowym, to testowane na oryginalnym obiekcie często okazywały się być niestabilne.

W obu środowiskach, niezależnie od obecności szumu najniższe wartości wskaźników jakości uzyskiwały regulatory pre-

dykcyjne. Pomimo faktu, iż wykorzystują one liniowy model procesu do minimalizacji błędów regulacji, optymalnie sterują procesem i kompensują wpływ zakłóceń mimo braku uwzględnienia sygnałów zakłócających w modelu i algorytmie regulacji.

Regulator PI w wersji podstawowej nie osiąga najlepszej jakości regulacji. Prostymi dostępnymi przemysłowo metodami, takimi jak ograniczanie całkowitego mechanizmu anti-windup oraz wykorzystanie członu kompensującego zakłócenia feedforward można znacząco poprawić jakość regulacji. Dodatkowo, przedstawiona struktura feedforward jest wygodna z racji, iż nie wymaga modelu sygnału zakłócającego.

Używanie różnych wskaźników jakości regulacji dostarcza wiele informacji o sterowaniu procesem. Wiele estymatorów, np. błąd minimalno-kwadratowy, nie są odporne na szum ani na odbiegnięcia od modelu i mogą złudnie oceniać jakość regulacji. Dlatego warto posługiwać się wskaźnikami, które rzetelnie oceniają jakość regulacji niezależnie od warunków oraz modelu, takimi jak błąd IAE lub parametry γ i σ_o . Rozkłady te znacznie lepiej aproksymują rozkład statystyczny uchybu regulacji. Analiza przeskalowanego zasięgu jest narzędziem rzadko stosowanym w automatyce. W warunkach przemysłowych, przy obecności szumów i zakłóceń oraz braku modelu dynamiki procesu, wartość wykładnika Hursta równa 0,5, która odzwierciedla optymalne sterowanie procesem, jest praktycznie nieosiągalna. Wykładnik ten dostarcza jednak wielu wartościowych informacji na temat pracy regulatorów i może być bardzo użytecznym, niestandardowym narzędziem oceny działania regulatora.

Powyżej opisane analizy miały na celu pokazanie potencjalnych możliwości wynikających z rozszerzenia klasycznie stosowanych wskaźników oceny wykorzystujących błąd średniokwadratowy o podejścia odporne. Wykorzystując wyniki dotyczące regresji odpornej, statystyki odpornościowe czy też niegaussowskie miary persystencji zaproponowano i zastosowano do zadania projektowania, jak i oceny jakości sterowania, alternatywne wskaźniki w postaci odpornościowego odchylenia standardowego wykorzystującego logistyczną ψ funkcję σ_o , współczynnika skali γ gruboogonowego α -stabilnego rozkładu gęstości prawdopodobieństwa, czy też wykładnik Hursta H .

Przedstawione wyniki nie wyczerpują tematu. Ciekawym zagadnieniem byłoby dalsze systematyczne testowanie proponowanych wskaźników odpornych, jako wewnętrznego wskaźnika jakości regulatora predykcyjnego, jako wskaźnika jakości podczas zadania modelowania czy też klasycznej optymalizacji. Owe kierunki badań są raczej bardzo rzadkie w literaturze, a wyniki dotyczące wskaźników odpornych oferują wysokie efektywności, szczególnie w sytuacji występowania w danych anomalii oraz wartości odstających.

Bibliografia

1. Ordys A., Uduehi D., Johnson M.A., *Process Control Performance Assessment – From Theory to Implementation*. Springer-Verlag, London 2007.
2. 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.
3. 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, No. 39, 2016, 10366–10376, DOI: 10.1021/acs.iecr.6b02907.
4. Häggblom K.E., *Process control laboratory*. [www.users.abo.fi/khaggblo/PDC/PDC7.pdf] 2017. Accessed: 2019-05-05.
5. Ziegler J.G., Nichols N.B., *Optimum settings for automatic controllers*. "Transactions ASME", Vol. 64, 759–768, 1942.
6. Cohen G.H., Coon G.A., *Theoretical consideration of retarded control*. "Transactions ASME", Vol. 75, 827, 1953.

Tab. 4. Wskaźniki jakości dla wszystkich testowanych układów

Tab. 4. Control performance measures for all simulated scenarios

	MSE				IAE			
	MSE	IAE	med.	mscal	MSE	IAE	med.	mscal
1	4,1751	2,0953	1,1548	2,0325	3,9562	2,0289	1,0144	1,9802
2	x	x	x	x	x	x	x	x
3	0,0101	0,0153	0,0007	0,0011	0,0100	0,0145	0,0005	0,0009
4	0,0128	0,0485	0,0289	0,0443	0,0133	0,0527	0,0326	0,0497
5	0,0101	0,0150	0,0007	0,0009	0,0101	0,0153	0,0006	0,0010
6	0,0128	0,0486	0,0286	0,0443	0,0135	0,0543	0,0331	0,0503
7	0,0849	0,2896	0,3674	0,3955	0,0645	0,2408	0,2944	0,3210
8	0,0863	0,2908	0,3578	0,4005	0,0666	0,2433	0,2858	0,3279
9	0,0101	0,0152	0,0006	0,0008	0,0214	0,0299	0,0010	0,0014
10	0,0128	0,0484	0,0286	0,0440	0,0243	0,0609	0,0278	0,0432
11	0,0102	0,0160	0,0007	0,0011	0,0137	0,0491	0,0013	0,0023
12	0,0129	0,0494	0,0292	0,0446	x	x	x	x
13	0,0101	0,0149	0,0005	0,0007	0,0100	0,0145	0,0008	0,0012
14	0,0133	0,0528	0,0322	0,0491	0,0131	0,0514	0,0320	0,0484
15	0,0101	0,0152	0,0006	0,0009	0,0101	0,0153	0,0007	0,0011
16	0,0128	0,0485	0,0288	0,0443	0,0128	0,0485	0,0289	0,0443
17	0,0101	0,0148	0,0005	0,0008	0,0101	0,0150	0,0007	0,0011
18	0,0160	0,0469	0,0226	0,0347	0,0160	0,0467	0,0225	0,0344

1. PD równoległy 2. PD równoległy z błędami pomiarowymi 3. PI równoległy 4. PI równoległy z błędami pomiarowymi
 5. PID równoległy 6. PID równoległy z błędami pomiarowymi 7. PD szeregowy 8. PD szeregowy z błędami pomiarowymi
 9. PI szeregowy 10. PI szeregowy z błędami pomiarowymi 11. PID szeregowy 12. PID szeregowy z błędami pomiarowymi
 13. PID równoległy z filtrem różniczkowania 14. PID równoległy z filtrem różniczkowania z błędami pomiarowymi
 15. PID równoległy z różniczkowaniem wyjścia 16. PID równoległy z różniczkowaniem wyjścia z błędami pomiarowymi
 17. PID równoległy z ważeniem wartości zadanej 18. PID równoległy z ważeniem wartości zadanej z błędami pomiarowymi

7. Åström K.J., Hägglund T., *Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins*. "Automatica", Vol. 20, No. 5, 645–651, 1984, DOI: 10.1016/0005-1098(84)90014-1.

8. McMillan G.K., *Good tuning: A pocket guide*. ISA, 2 edition, 2006.

9. Visioli A., *Practical PID control*. Springer Science & Business Media, 2006.

10. ODwyer A., *Handbook of PI and PID controller tuning rules*. Imperial College Press, 2003.

11. Seborg D.E., Edgar T.F., Mellichamp D.A., Doyle F.J., *Process Dynamics and Control*, 4th ed. Wiley, 2016.

12. Rousseeuw P.J., *Robust regression and outlier detection*. Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics. John Wiley, New York 1987.

13. Huber P.J., Ronchetti E.M., *Robust Statistics*. Wiley, Hoboken, 2009.

14. Verboven S., Hubert M., *LIBRA: A MATLAB library for robust analysis*. "Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems", Vol. 75, No. 2, 127–136, 2005, DOI: 10.1016/j.chemolab.2004.06.003.

15. Smuts J.F., Hussey A., *Requirements for successfully implementing and sustaining advanced control applications*. Proceedings of the 54th ISA POWID Symposium, 89–105, 2011.

16. Jelali M., *Control performance management in industrial automation: assessment, diagnosis and improvement of control loop performance*. Springer-Verlag, London 2013.

17. Domański P.D., *Non-Gaussian properties of the real industrial control error in SISO loops*. Proceedings of the 19th International Conference on System Theory, Control and Computing, 877–882, 2015, DOI: 10.1109/ICSTCC.2015.7321405.

18. Tatjewski P., *Sterowanie zaawansowane obiektów przemysłowych*. IBUK Libra, 2016.

19. MathWorks. *MATLAB Documentation*. The MathWorks Inc., 1994–2018.

20. Cajo R., Zhao S., Ionescu C.M., De Keyser R., Plaza D., Liu S., *IMC based PID control applied to the benchmark PID18*. "IFAC-PapersOnLine", Vol. 51, No. 4, 2018, 728–732, DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.06.210.

21. Spinner T., Srinivasan B., Rengaswamy R., *Data-based automated diagnosis and iterative retuning of proportional-integral (PI) controllers*. "Control Engineering Practice", Vol. 29, 23–41, 2014, DOI: 10.1016/j.conengprac.2014.03.005.

22. Hägglund T., *Automatic detection of sluggish control loops*. "Control Engineering Practice", Vol. 7, No. 12, 1505–1511, 1999, DOI: 10.1016/S0967-0661(99)00116-1.

med.				mscal			
MSE	IAE	med.	mscal	MSE	IAE	med.	mscal
4,6029	2,2378	2,6354	2,1693	0,4538	0,7595	0,9985	1,1057
x	x	x	x	0,4569	0,7688	0,9844	1,1191
2,0021	1,2258	0,3704	0,5994	0,2697	0,2804	0,0046	0,0066
x	x	x	x	x	x	x	x
2,3836	1,2882	0,3246	0,5706	2,9242	1,3963	0,2951	0,5354
x	x	x	x	x	x	x	x
0,0143	0,0750	0,0779	0,0859	0,0938	0,2972	0,3488	0,3985
0,0162	0,0798	0,0698	0,0944	0,1145	0,3234	0,3278	0,4309
2,9848	1,4160	0,2829	0,5906	3,3737	1,5223	0,4490	0,8345
x	x	x	x	x	x	x	x
3,4629	1,5161	0,5403	0,7863	3,2850	1,5629	0,4409	0,9075
x	x	x	x	x	x	x	x
0,0101	0,0148	0,0006	0,0008	0,0101	0,0147	0,0005	0,0008
0,0130	0,0502	0,0312	0,0469	0,0132	0,0521	0,0320	0,0483
0,0102	0,0152	0,0006	0,0008	0,0101	0,0152	0,0007	0,0010
0,0128	0,0485	0,0288	0,0442	0,0128	0,0485	0,0288	0,0442
0,1106	0,0732	0,0010	0,0014	0,1471	0,1497	0,1120	0,1357
0,1222	0,1046	0,0251	0,0394	0,1571	0,1801	0,1260	0,1607

23. Visioli A., *Method for proportional-integral controller tuning assessment*. "Industrial & Engineering Chemistry Research", Vol. 45, No. 8, 2741–2747, 2006, DOI: 10.1021/ie0508482.
24. Salsbury T.I., *A practical method for assessing the performance of control loops subject to random load changes*. "Journal of Process Control", Vol. 15, No. 4, 393–405, 2005, DOI: 10.1016/j.jprocont.2004.08.004.
25. Zhao Y.M., Xie W.F., Tu X.W., *Performance-based parameter tuning method of model-driven PID control systems*. "ISA Transactions", Vol. 51, No. 3, 393–399, 2012, DOI: 10.1016/j.isatra.2012.02.005.
26. Zheng B., *Analysis and auto-tuning of supply air temperature PI control in hot water heating systems*. PhD thesis, Dissertation of University of Nebraska, 2007.
27. Yu Z., Wang J., *Performance assessment of static lead-lag feedforward controllers for disturbance rejection in PID control loops*. "ISA Transactions", Vol. 64, 67–76, 2016, DOI: 10.1016/j.isatra.2016.04.016.
28. Horch A., *A simple method for detection of stiction in control valves*. "Control Engineering Practice", Vol. 7, No. 10, 1221–1231, 1999, DOI: 10.1016/S0967-0661(99)00100-8.
29. Howard R., Cooper D., *A novel pattern-based approach for diagnostic controller performance monitoring*. "Control Engineering Practice", Vol. 18, No. 3, 279–288, 2010, DOI: 10.1016/j.conengprac.2009.11.005.
30. Choudhury M.A.A.S., Shah S.L., Thornhill N.F., *Diagnosis of poor control-loop performance using higher-order statistics*. "Automatica", Vol. 40, No. 10, 1719–1728, 2004, DOI: 10.1016/j.automatica.2004.03.022.
31. Li Y., O’Neill Z., *Evaluating control performance on building HVAC controllers*. International Building Performance Simulation Association, 962–967, Hyderabad, India, 2015.
32. Domański P.D., *Statistical measures for proportional–integral–derivative control quality: Simulations and industrial data*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 232(4):428–441, 2018.
33. Harris T.J., *Assessment of closed loop performance*. "Canadian Journal of Chemical Engineering", Vol. 67, No. 5, 856–861, 1989, DOI: 10.1002/cjce.5450670519.
34. Meng Q.W., Gu J.Q., Zhong Z.F., Ch S., Niu Y.G., *Control performance assessment and improvement with a new performance index*. 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 4081–4084, 2013.
35. Afshar Khamseh S., Khaki Sedigh A., Moshiri B., Fatehi A., *Control performance assessment based on sensor fusion techniques*. "Control Engineering Practice", Vol. 49, 14–28, 2016, DOI: 10.1016/j.conengprac.2016.01.008.
36. Salsbury T.I., Alcalá C.F., *Two new normalized EWMA-based indices for control loop performance assessment*.

- 2015 American Control Conference (ACC), 962–967, 2015, DOI: 10.1109/ACC.2015.7170858.
37. Shardt Y., Zhao Y., Qi F., Lee K., Yu X., Huang B., Shah S., *Determining the state of a process control system: Current trends and future challenges*. “The Canadian Journal of Chemical Engineering”, Vol. 90, No. 2, 217–245, 2012, DOI: 10.1002/cjce.20653.
 38. Schlegel M., Skarda R., Cech M., *Running discrete Fourier transform and its applications in control loop performance assessment*. 2013 International Conference on Process Control (PC), 113–118, 2013, DOI: 10.1109/PC.2013.6581393.
 39. Nesić Z., Dumont G.A., Davies M.S., Brewster D., *CD control diagnostics using a wavelet toolbox*. Proceedings CD Symposium, IMEKO, Vol. XB, 120–125, 1997.
 40. Lynch C.B., Dumont G.A., *Control loop performance monitoring*. “IEEE Transactions on Control Systems Technology”, Vol. 4, No. 2, 185–192, 1996.
 41. Zhou Y.F., Wan F., *A neural network approach to control performance assessment*. “International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics”, Vol. 1, No. 4, 617–633, 2008, DOI: 10.1108/17563780810919159.
 42. Pillay N., Govender P., *A data driven approach to performance assessment of PID controllers for setpoint tracking*. “Procedia Engineering”, Vol. 69, 1130–1137, 2014 DOI: 10.1016/j.proeng.2014.03.101.
 43. Domański P.D., *Non-Gaussian and persistence measures for control loop quality assessment*. “Chaos”, 322(043105), 2016, DOI: 10.1063/1.4946772.
 44. Zhang J., Jiang M., Chen J., *Minimum entropy-based performance assessment of feedback control loops subjected to non-Gaussian disturbances*. “Journal of Process Control”, Vol. 24, No. 11, 1660–1670, 2015, DOI: 10.1016/j.jprocont.2014.08.003.
 45. Knierim-Dietz N., Hanel L., Lehner J., *Definition and verification of the control loop performance for different power plant types*. Technical report, Institute of Combustion and Power Plant Technology, University of Stuttgart, 2012.
 46. Borak S., Misiorek A., Weron R., *Models for heavy-tailed asset returns*. [In:] Cizek P., Härdle, W. K., Weron R. (eds), *Statistical tools for finance and insurance*, 21–56. Springer, New York, 2nd edition, 2011.
 47. Koutrouvelis I.A., *Regression-type estimation of the parameters of stable laws*. “Journal of the American Statistical Association”, Vol. 75, No. 372, 918–928, 1980, DOI: 10.2307/2287182.
 48. Peters E.E., *Teoria chaosu a rynki kapitałowe*. WIG Press, Warszawa, 1997.
 49. Spinner T., Srinivasan B., Rengaswamy R., *Data-based automated diagnosis and iterative retuning of proportional-integral (PI) controllers*. “Control Engineering Practice”, Vol. 29, 23–41, 2014, DOI: 10.1016/j.conengprac.2014.03.005.
 50. BENCHMARK PID 2018, *Benchmark for PID control of refrigeration systems based on vapour compression* (version: july 2017). [<http://servidor.dia.uned.es/~fmorilla/benchmarkPID2018>]. Accessed: 2019-05-05.
 51. Bejarano G., Alfaya J.A., Rodriguez D., Morilla F., Ortega M.G., *Benchmark for PID control of refrigeration systems based on vapour compression*. “IFAC-PapersOnLine”, Vol. 51, No. 4, 497–502, 2018, DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.06.144.
 52. Pudlik W., *Termodynamika*, wydanie III – cyfrowe. [pbc.gda.pl/Content/4098/pbc_termodynamika.pdf]. Accessed: 2019-05-05.

Comparison of Various Controller Parameters Optimization Strategies for Industrial Processes Using Different Control Performance Assessment Indexes

Abstract: Control quality is a crucial issue in modern industry. The engineer’s goal is to set control parameters and assess it constantly in order to maximize the efficiency of the process and watch the condition of actuators. The article describes a number of Control Performance Assessment indexes. They are applied to two tasks: controller tuning and the assessment of the quality of an already tuned control strategy. It presents a comparison between different indexes applied to various structures of the PID control algorithm. Finally the results are compared with Model Predictive Control. The analysis uses well known nonlinear industrial benchmark of a refrigeration system based on vapour compression.

Keywords: Control Performance Assessment, PID, MPC, Hurst exponent, R/S analysis

inż. Konrad Bogusz

konrad_bogusz@yahoo.com

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



inż. Bartosz Rajkowski

bartosz.rajkowski@gmail.com

Absolwent kierunku Automatyka i Robotyka na Wydziale Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej kontynuujący naukę na studiach II stopnia. Zainteresowania naukowe obejmują między innymi zaawansowane struktury regulacji oraz metody optymalizacji parametrów regulatorów.



dr hab. inż. Paweł D. Domański

p.domanski@ia.pw.edu.pl

ORCID: 0000-0003-4053-3330

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.

