

*Numerycznie efektywne algorytmy regulacji predykcyjnej
bazujące na modelach liniowych i nieliniowych*
Autoreferat

dr inż. Piotr Marusak
Politechnika Warszawska
Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych
Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej

Warszawa 2019

1 Imię i nazwisko

Piotr Marusak

2 Posiadane stopnie naukowe

2003 – doktor nauk technicznych w dziedzinie Automatyka i Robotyka (z wyróżnieniem)
Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych
Rozprawa: *Regulacja predykcyjna obiektów nieliniowych z zastosowaniem techniki DMC i modelowania rozmytego*; Warszawa, październik 2002, promotor: prof. dr hab. inż. Piotr Tatjewski

1997 – magister inżynier w dziedzinie Informatyka, specjalność Systemy Sterowania i Wspomagania Decyzji (z wyróżnieniem)
Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych, Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej
Praca dyplomowa: *Sterowanie silnie nieliniowego obiektu elektromechanicznego*; Warszawa, sierpień 1997, promotor: doc. dr inż. Jerzy Pułaczewski

3 Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

od 2003 – adiunkt w Instytucie Automatyki i Informatyki Stosowanej, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych, Politechniki Warszawskiej

od 2002 do 2003 – asystent w Instytucie Automatyki i Informatyki Stosowanej, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych, Politechniki Warszawskiej

4 Wskazanie osiągnięcia naukowego

Niżej wymienione publikacje wchodzi w skład osiągnięcia, o którym mowa w art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki.

Tytuł cyklu powiązanych tematycznie publikacji, obejmującego 13 pozycji to:

Numerycznie efektywne algorytmy regulacji predykcyjnej bazujące na modelach liniowych i nieliniowych

Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego mają charakter zarówno autorski jak i współautorski. Przy każdej pozycji podany jest Impact Factor (IF) czasopisma z roku publikacji (jeśli dotyczy) oraz liczba punktów MNiSW (zaczepnięta z Repozytorium Politechniki Warszawskiej).

Cykl powiązanych tematycznie publikacji

[H1] Piotr Marusak: Easily reconfigurable analytical fuzzy predictive controllers: actuator faults handling. Lecture Notes in Computer Science, vol. 5370, 2008, str. 396–405, DOI:10.1007/978-3-540-92137-0_44 (MNiSW: 10).

- [H2] Piotr Marusak, Piotr Tatjewski: *Actuator fault tolerance in control systems with predictive constrained set-point optimizers*. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, vol. 18, no. 4, 2008, str. 539–551, DOI:10.2478/v10006-008-0047-2 (MNiSW: 20, IF: – (okres przejściowy po trafieniu do JCR, przed obliczeniem IF w roku 2009 po raz pierwszy)).
- [H3] Piotr Marusak: *Advantages of an easy to design fuzzy predictive algorithm in control systems of nonlinear chemical reactors*. Applied Soft Computing, vol. 9, no. 3, 2009, str. 1111–1125, DOI:10.1016/j.asoc.2009.02.013 (MNiSW: 24; IF: 2,415).
- [H4] Piotr Marusak: *Efficient model predictive control algorithm with fuzzy approximations of nonlinear models*. Lecture Notes in Computer Science, vol. 5495, 2009, str. 448–457, DOI:10.1007/978-3-642-04921-7_46 (MNiSW: 10).
- [H5] Piotr Marusak, Piotr Tatjewski: *Effective dual-mode fuzzy DMC algorithms with on-line quadratic optimization and guaranteed stability*. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, vol. 19, no. 1, 2009, str. 127–141, DOI:10.2478/v10006-009-0012-8 (MNiSW: 20; IF: 0,684).
- [H6] Piotr Marusak: *Numerically efficient analytical MPC algorithm based on fuzzy Hammerstein models*. Lecture Notes in Computer Science, vol. 6594, 2011, str. 177–185, DOI:10.1007/978-3-642-20267-4_19 (MNiSW: 13).
- [H7] Piotr Marusak, Suwat Kuntanapreeda: *Constrained model predictive force control of an electrohydraulic actuator*. Control Engineering Practice, vol. 19, no. 1, 2011, str. 62–73, DOI:10.1016/j.conengprac.2010.09.002 (MNiSW: 30; IF: 1,481).
- [H8] Piotr Marusak: *Efficient MPC algorithms based on fuzzy Wiener models and advanced methods of prediction generation*. Lecture Notes in Computer Science (Lecture Notes in Artificial Intelligence), vol. 7267, 2012, str. 292–300, DOI:10.1007/978-3-642-29347-4_34 (MNiSW: 15).
- [H9] Suwat Kuntanapreeda, Piotr Marusak: *Nonlinear extended output feedback control for CSTRs with van de Vusse reaction*. Computers and Chemical Engineering, vol. 41, 2012, str. 10–23, DOI:10.1016/j.compchemeng.2012.02.010 (MNiSW: 35; IF: 2,091).
- [H10] Piotr Marusak: *Disturbance measurement utilization in the efficient MPC algorithm with fuzzy approximations of nonlinear models*. Lecture Notes in Computer Science, vol. 7824, 2013, str. 307–316, DOI:10.1007/978-3-642-37213-1_32 (MNiSW: 15).
- [H11] Piotr Marusak: *Methods of prediction improvement in efficient MPC algorithms based on fuzzy Hammerstein models*. Transactions on Computational Collective Intelligence XIV, Lecture Notes in Computer Science, vol. 8615, 2014, str. 158–179, DOI:10.1007/978-3-662-44509-9_8 (MNiSW: 5).
- [H12] Piotr Marusak: *Output constraint handling in analytical MPC algorithms based on Hammerstein models with presumed trajectory of future control changes*, w pracy pod redakcją R. Szewczyka i in.: *Challenges in automation, robotics and measurement techniques, Advances in Intelligent Systems and Computing 440*, Springer, 2016 Proceedings of AUTOMATION-2016, March 2-4, 2016, Warsaw, Poland, ISBN 978-3-319-29356-1, str. 351–361, DOI:10.1007/978-3-319-29357-8_32 (MNiSW: 15).
- [H13] Piotr Marusak, Suwat Kuntanapreeda: *A neural network based implementation of an MPC algorithm applied in the control systems of electromechanical plants*. 8th TSME–International

Conference on Mechanical Engineering, TSME-ICoME 2017, Arnoma Grand Hotel Bangkok; Thailand, 12–15 grudnia 2017; IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 297, 7 February 2018, Article number 012042, DOI:10.1088/1757-899X/297/1/012042 (MNIŚW: 15).

4.1 Zwięzły opis osiągnięcia naukowego

Cykl publikacji składa się z 13 artykułów; ich zawartość jest następująca:

- W pracy [H1] zaproponowałem algorytm regulacji predykcyjnej w wersji analitycznej z jednostkowym horyzontem sterowania, bazujący na modelu rozmytym z modelami lokalnymi w postaci odpowiedzi skokowych. Algorytm ten jest łatwy w rekonfiguracji dla obiektów SISO (o jednym wejściu i jednym wyjściu) lub o dwóch wejściach i dwóch wyjściach. Przedstawiłem także zaproponowaną przeze mnie metodę rekonfiguracji tego typu algorytmów w przypadku wystąpienia blokady elementu wykonawczego. Metoda ta polega na odpowiedniej modyfikacji macierzy dynamicznej. Zaproponowałem ponadto rozwiązania pozwalające dokładniej regulować wybrane wyjście obiektu.
- Artykuł [H2] zawiera opis metod rekonfiguracji algorytmów regulacji predykcyjnej w wersji numerycznej w przypadku wystąpienia blokad elementów wykonawczych. W takim przypadku, w celu kontynuowania działania układu regulacji do czasu usunięcia awarii, należy dokonać rekonfiguracji algorytmu polegającej na dodaniu do jego sformułowania ograniczeń równościowych. Metoda jest więc prostsza w realizacji niż zmiana modelu obiektu, na którym bazuje algorytm. Ponadto, oprócz rekonfiguracji samego algorytmu regulacji warto wziąć pod uwagę możliwość jak najlepszego prowadzenia procesu, w szczególności w warunkach ograniczeń, wykorzystując w tym celu zadanie optymalizacji punktu pracy.
- W artykule [H3] zaproponowałem metodę szybkiego i stosunkowo prostego projektowania rozmytych algorytmów regulacji predykcyjnej wykorzystującą zalety modeli rozmytych z następnikami w postaci odpowiedzi skokowych obiektu, otrzymanych w okolicy kilku punktów pracy. Skuteczność metody zilustrowałem przykładami układów sterowania nieliniowych obiektów – reaktorów chemicznych. Pokazałem, że dzięki użyciu zaproponowanego podejścia, można w stosunkowo prosty sposób, poprawić funkcjonowanie układu regulacji w stosunku do przypadku, gdy używa się algorytmu bazującego na modelu liniowym.
- Z kolei algorytm przedstawiony w pracy [H4] opracowałem jako rozwiązanie możliwie uniwersalne, które może bazować na dowolnym modelu nieliniowym generującym sygnał wyjściowy naśladujący zachowanie obiektu regulacji. Model ten jest używany do otrzymania odpowiedzi swobodnej. Oprócz tego modelu, zaproponowany przeze mnie algorytm regulacji korzysta także z modelu rozmytego z następnikami w postaci odpowiedzi skokowych obiektu (pozyskanych z modelu służącego do otrzymania odpowiedzi swobodnej lub bezpośrednio z obiektu regulacji). Model rozmyty jest z kolei używany podczas otrzymywania macierzy dynamicznej.
- Mechanizm zapewnienia stabilności algorytmów regulacji predykcyjnej w wersji numerycznej został zaproponowany w pracy [H5]. Mechanizm ten bazuje na podejściu dwufazowym (ang. dual-mode). W podejściu tym, w otoczeniu punktu równowagi stosuje się regulator stabilizujący. Jest to regulator opisany prawem regulacji, w którym nie uwzględnia się ograniczeń. Zakłada się bowiem, że pracuje on wewnątrz obszaru dopuszczalnego. W wersji podstawowej algorytmu, w tej roli wykorzystuje się regulator ze sprzężeniem od stanu, jednak korzystne może być użycie regulatora nieliniowego czy to regulatora rozmytego (w

szczególności predykcyjnego) czy też innego typu, jak np. [H9]. Na zewnątrz otoczenia punktu równowagi jest używany algorytm predykcyjny, uwzględniający ograniczenia, np. odpowiednio zmodyfikowany (przez dodanie zaproponowanego w artykule ograniczenia stabilizującego) efektywny obliczeniowo algorytm korzystający z linearyzacji modelu rozmytego. Warto zauważyć, że zaproponowane dla stabilnych obiektów podejście można w łatwy sposób zaadaptować w przypadku algorytmów regulacji predykcyjnej bazujących także na innych modelach obiektów niż rozmyte, w szczególności strukturyzowanych Hammersteina i Wienera.

- W pracy [H6] zaproponowałem znacznie uproszczony algorytm regulacji predykcyjnej w wersji analitycznej bazujący na modelach strukturyzowanych typu Hammersteina (z nieliniowym blokiem statycznym poprzedzającym liniowy blok dynamiczny, zob. np. [14, 15]), dla obiektów SISO. W algorytmie tym, dzięki uproszczonemu sposobowi otrzymywania macierzy dynamicznej oraz odpowiedniemu doborowi parametru kary za przyrosty sterowania, korzystającego z kształtu charakterystyki statycznej obiektu, można uzyskać stosunkowo proste prawo regulacji. Jednocześnie w algorytmie tym odpowiedź swobodna jest otrzymywana z wykorzystaniem nieliniowego modelu procesu. Jest to więc algorytm typu NPL (z nieliniową predykcją odpowiedzi swobodnej i linearyzacją), oferujący adekwatną dla tej grupy algorytmów jakość regulacji.
- Zaproponowany przeze mnie mechanizm uwzględniania ograniczeń wyjść obiektu regulacji na całym horyzoncie predykcji, w algorytmie analitycznym, oparty na modelu obiektu w postaci równania różnicowego, został opisany w pracy [H7]. Następnie mechanizm ten został przetestowany przez Współautora w układzie regulacji rzeczywistego obiektu. Warto zauważyć, że istotnym zagadnieniem przy projektowaniu układów regulacji jest możliwość uwzględniania ograniczeń. W przypadku numerycznych algorytmów regulacji predykcyjnej, ograniczenia są naturalnym elementem sformułowania algorytmu. W przypadku regulatorów z prawem regulacji, czy to predykcyjnych, czy innych, można skorzystać z mechanizmu rzutowania sterowań na zbiór ograniczeń w celu uwzględnienia ograniczeń sygnału sterującego. Problem pojawia się w przypadku potrzeby uwzględnienia ograniczeń nałożonych na przewidywane wartości sygnału wyjściowego. Rozwiązaniem tego problemu może być wykorzystanie modelu obiektu regulacji w celu otrzymania predykcji, która następnie służy do odpowiedniej modyfikacji sterowania tak, aby ograniczenia wyjść były spełnione. Można przy tym predykcję oprzeć na założeniu jednostkowego horyzontu sterowania. Warto wspomnieć o tym, że testy zostały przeprowadzone w układzie regulacji rzeczywistego obiektu elektromechanicznego, wymagającego stosunkowo krótkiego czasu próbkowania a spełnienie ograniczeń wyjścia było w badanym przypadku związane z bezpieczeństwem obiektu regulacji.
- W artykule [H8] zaproponowałem zaawansowaną metodę predykcji zachowania obiektu regulacji z wykorzystaniem modelu strukturyzowanego Wienera (z liniowym blokiem dynamicznym poprzedzającym nieliniowy blok statyczny, zob. np. [14, 15]) i uwzględnieniem sekwencji sygnału sterującego wyznaczonej w poprzedniej iteracji algorytmu. Predykcja ta jest liniowa względem zmiennych decyzyjnych problemu optymalizacji kwadratowej rozwiązywanego przez algorytm regulacji w każdej iteracji. W związku z tym algorytm predykcyjny, który z tej predykcji korzysta może osiągnąć jakość regulacji zbliżoną do oferowanej przez algorytmy NMPC (z nieliniową optymalizacją) a przy tym być numerycznie efektywnym. Zaproponowane algorytmy są uproszczoną wersją algorytmów numerycznych (z optymalizacją kwadratową bez ograniczeń powtarzaną w każdej iteracji).

- Regulator z obserwatorem i stanem rozszerzonym o całą uchybu regulacji, bazujący na modelu obiektu regulacji, który można wykorzystać w podejściu dwufazowym do zapewnienia stabilności w otoczeniu punktu równowagi opisaliśmy ze Współautorem w pracy [H9]. Mój wkład polegał na zaprojektowaniu obserwatora oraz regulatora ze stanem rozszerzonym. Wykorzystanie kryterium Lapunowa podczas projektowania regulatora zapewniło stabilność układu regulacji. Badania przeprowadzono w układzie regulacji nieliniowego reaktora chemicznego o trudnej dynamice.
- W pracy [H10] algorytm regulacji z artykułu [H4] rozszerzyłem o uwzględnianie pomiaru zakłócenia. Zaproponowałem przy tym dwa podejścia do opracowywania mechanizmów wykorzystania pomiaru zakłócenia:
 1. Korzystające z rozmytego modelu procesu z modelami lokalnymi w postaci odpowiedzi skokowych, uwzględniających wpływ zakłócenia. Gdy już taki model jest dostępny, odpowiednią modyfikację można przeprowadzić w każdym algorytmie regulacji predykcyjnej, dzięki dodaniu odpowiednich korekt do odpowiedzi swobodnej.
 2. Korzystające z nieliniowego modelu obiektu. W tym przypadku potrzebne jest dysponowanie modelem, który opisuje wpływ danego wejścia zakłócającego na proces lub trzeba taki model zidentyfikować.
- W pracy [H11] zaproponowałem metodę zaawansowanej predykcji zachowania obiektu regulacji z wykorzystaniem modelu strukturyzowanego Hammersteina. W artykule tym zaprezentowałem różnego rodzaju techniki prowadzące do otrzymania predykcji liniowej względem przyrostów sterowania. Można przy tym, w zależności od potrzeb, skonstruować predykcję mniej lub bardziej dokładnie odwzorowującą zachowanie obiektu nieliniowego. W związku z tym algorytm predykcyjny, który korzystać będzie z tej predykcji może osiągnąć jakość regulacji zbliżoną do oferowanej przez algorytm NMPC a przy tym być numerycznie efektywnym. Na łatwość opracowania regulatora wpływa także wykorzystanie w jego sformułowaniu modelu części dynamicznej w postaci odpowiedzi skokowej. W pracy tej, oprócz mechanizmu uwzględniania zakłócenia opartego na modelu rozmytym w postaci zakłóceńowych odpowiedzi skokowych (jak w [H10]), zaproponowałem także mechanizm oparty na wykorzystaniu modelu typu Hammersteina, w którym uwzględniony został wpływ zakłócenia na wyjście obiektu regulacji.
- Zaproponowany przeze mnie mechanizm uwzględniania ograniczeń wyjść obiektu regulacji na całym horyzoncie predykcji, w algorytmie analitycznym bazującym na modelu Hammersteina i założeniu kształtu trajektorii sterowania opisałem w pracy [H12]. Zauważmy, że tak, jak mechanizm z pracy [H7], zaproponowane podejście znacznie rozszerza możliwości oferowane przez analityczne algorytmy predykcyjne, które były do tej pory zarezerwowane dla algorytmów w wersji numerycznej. Dodatkowo, dzięki manipulacji kształtem trajektorii sterowania, można wpływać na zachowanie regulatora.
- Kolejne podejście do numerycznie efektywnych implementacji algorytmów regulacji predykcyjnej polega na ich przedstawieniu numerycznych wersji w postaci sieci neuronowych. Testowanie właściwości takiego podejścia jest opisane w artykule [H13]. W pracy tej numeryczne algorytmy regulacji predykcyjnej bazujące na modelach wejście-wyjście, z miękkimi ograniczeniami wyjść obiektu, zostały sformułowane jako rekurencyjne sieci neuronowe, w zamiśle generujące takie samo rozwiązanie, jak procedura optymalizacji liniowo-kwadratowej, lecz w krótszym czasie. Podejście to przetestowaliśmy ze Współautorem symulacyjnie w układach regulacji obiektów elektromechanicznych, wymagających stosunkowo krótkich okresów próbkowania. Testy te wykazały umiarkowaną przydatność

podejścia wymagającego bardzo uważnego dobierania parametrów algorytmu aby otrzymać rozwiązanie, zwłaszcza w krótkim czasie.

4.2 Omówienie wyników prac badawczych

Opisany w poprzednim rozdziale cykl publikacji zawiera opis szeregu efektywnych numerycznie algorytmów regulacji korzystających z modeli rozmytych Takagi–Sugeno i strukturyzowanych Hammersteina i Wienera oraz mechanizmów mających na celu poprawę jakości regulacji dzięki uwzględnieniu ograniczeń przewidywanych wartości wyjść obiektu, pomiaru zakłócenia czy informacji o blokadzie elementu wykonawczego. Przedstawione rozwiązania mogą zostać użyte przy opracowywaniu algorytmu regulacji dla konkretnego zastosowania. Warto na nie spojrzeć jako na opcje (elementy algorytmu regulacji), które można wykorzystać w algorytmie regulacji, w zależności od potrzeb. Zostaną one teraz opisane pod tym kątem, ze wskazaniem publikacji, w których zostały przedstawione. Zaprezentowano przy tym wyniki eksperymentów potwierdzające przydatność zaproponowanych rozwiązań.

Algorytmy analityczne (z prawem regulacji) [H1], [H6], [H9]

W analitycznych algorytmach regulacji predykcyjnej, dzięki pominięciu ograniczeń na etapie wyznaczania sterowań, sterowania wyznacza się korzystając ze wzoru analitycznego. Warto zauważyć, że pierwsze wersje algorytmów regulacji predykcyjnej były formułowane właśnie w taki sposób, a algorytmy regulacji predykcyjnej w wersji numerycznej pojawiły się na dalszym etapie rozwoju algorytmów regulacji predykcyjnej.

Pomimo stosunkowo dużego uproszczenia, regulatory oparte na prawie regulacji są przydatne w co najmniej kilku przypadkach:

- zastosowania do obiektów regulacji o szybkiej dynamice;
- zastosowania jako regulatorów stabilizujących, w podejściu dwufazowym (dual-mode);
- w diagnozowaniu poprawności działania algorytmów w wersji numerycznej, zaimplementowanych na urządzeniach cyfrowych generujących sterowanie [13].

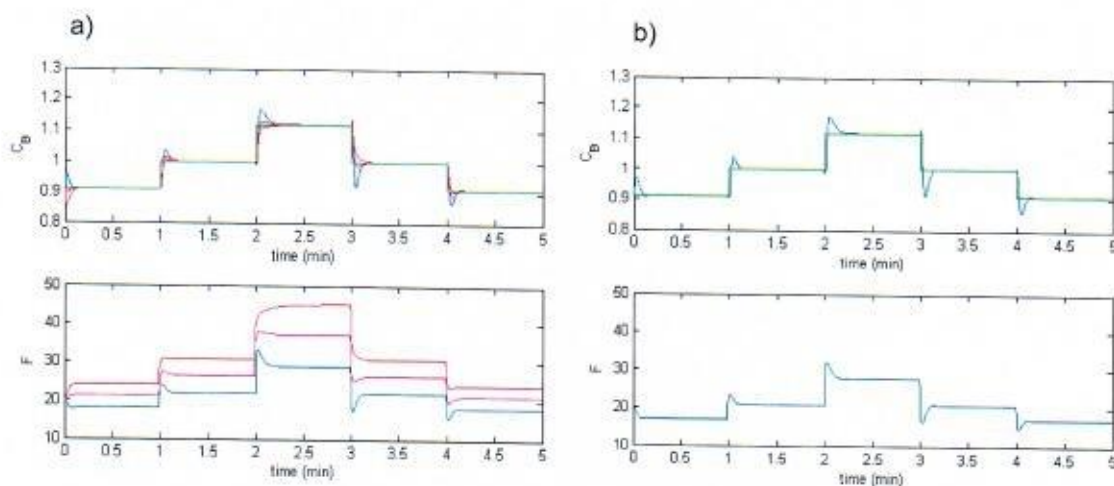
Skoncentrujemy się na dwóch pierwszych zastosowaniach.

Pierwsze z wymienionych zastosowań jest istotne, gdy wymagane są stosunkowo krótkie czasy próbkowania. W takim przypadku, nawet rozwiązywanie zadania programowania kwadratowego z liniowymi ograniczeniami może trwać zbyt długo. Często istotne jest w tym przypadku uwzględnianie ograniczeń, również tych nałożonych na przewidywane wartości wyjść obiektu. Może być ono nawet istotniejsze od użycia w algorytmie regulacji modelu nieliniowego, zob. np. [H7]. Ograniczenia w algorytmach analitycznych uwzględnia się w sposób przybliżony, przez modyfikację sterowań już wyznaczonych przez algorytm regulacji. Możliwe jest w szczególności uwzględnianie ograniczeń nałożonych na wyjścia obiektu, w przypadku SISO, nawet na całym horyzoncie predykcji, co zostało opisane w dalszej części niniejszego rozdziału.

Drugie z zastosowań bazuje na spostrzeżeniu, że algorytmy w wersji analitycznej są naturalnym wyborem w przypadku zastosowania w algorytmach typu dual-mode, w roli regulatorów stabilizujących. Co więcej, dzięki użyciu algorytmów bazujących na modelach nieliniowych można osiągnąć lepsze właściwości całego algorytmu dwufazowego [H5]. W tym przypadku istotna jest możliwość projektowania stabilnych układów regulacji z algorytmami analitycznymi bazującymi na modelach nieliniowych. Przy czym można się w tym przypadku posłużyć technikami opartymi na kryterium stabilności Lapunowa, zob. np. [H9].

Należy w tym miejscu wspomnieć o rozwiązaniu, w którym bierze się pod uwagę ograniczenia na etapie wyznaczania prawa regulacji. W rezultacie otrzymuje się kawałkami liniowe prawo regulacji algorytmu MPC (zob. np. [1, 16, 17, 63]). Podejście to staje się jednak skomplikowane nawet w przypadku zastosowania do stosunkowo prostych obiektów regulacji (jest stosunkowo mało skomplikowane tylko w przypadku bardzo prostych problemów). W ogólności, bowiem, liczba regulatorów między którymi następują przełączenia może być znacząca, co jest główną wadą tego podejścia. Z tego też względu skoncentrowałem się na klasycznych algorytmach w wersji analitycznej modyfikując je w taki sposób, aby przy zachowaniu ich prostoty otrzymać algorytmy, w których w stosunkowo łatwy sposób można uwzględniać ograniczenia, w szczególności na całym horyzoncie predykcji.

W przypadku drugiego zastosowania algorytmów analitycznych, można skorzystać ze wspomnianego już podejścia do projektowania regulatorów, opartego na kryterium Lapunowa. Przykład zastosowania takiego regulatora został przedstawiony w [H9]. Zaletą tego algorytmu jest to, że na etapie projektowania zapewniona jest stabilność układu regulacji, co naturalnie predestynuje go do roli regulatora stabilizującego w algorytmie dwufazowym. Główną wadą jest to, że proces jego projektowania jest bardziej skomplikowany niż regulatorów predykcyjnych w wersji analitycznej. Algorytm w wersji z całkowaniem uchybu regulacji działa jednak w sposób zadowalający. Eliminuje uchyb w stanie ustalonym nawet w przypadku odstrojenia parametrów obiektu (zob. rys. 1 *strona lewa*; symulowanie niedokładności modelowania), czy też działania zakłócenia (zob. rys. 1 *strona prawa*).



Rys. 1: Odpowiedzi układu regulacji z regulatorem analitycznym na zmiany wartości zadanej; a) uzyskane w przypadku odstrajania parametrów obiektu, b) uzyskane w przypadku wzrostu zakłócenia o 10%; góra – wyjście, dół – sterowanie [H9]

W przypadku obiektów SISO, można znacznie uprościć analityczne algorytmy regulacji predykcyjnej bazujące na modelach Hammersteina dzięki uproszczonemu sposobowi otrzymywania macierzy dynamicznej oraz odpowiedniemu doborowi parametru kary za przyrosty sterowania, korzystającego z kształtu charakterystyki statycznej obiektu [H6], [Hu7]. Zauważmy, że w takim razie, w każdej iteracji algorytmu odpowiedź skokowa, od której zależy macierz dynamiczna, jest adaptowana do nieliniowości. (Zauważmy, że podejście to można także łatwo zastosować w przypadku modeli Wienera [Hu11].) Warto przy tym zauważyć, że w zaproponowanym algorytmie odpowiedź swobodna jest otrzymywana z wykorzystaniem nieliniowego modelu procesu.

W związku z tym jakość regulacji przez ten algorytm oferowana jest porównywalna z jakością algorytmów NMPC, jak w przypadku innych algorytmów typu NPL.

Struktura algorytmów predykcyjnych może zostać dalece uproszczona w przypadku obiektów SISO oraz obiektów o dwóch wejściach i dwóch wyjściach, gdy założy się jednostkowy horyzont sterowania, jak w pracy [H1]. Uproszczenie to może być następnie wykorzystane do łatwiejszej rekonfiguracji algorytmu regulacji (jak w przywołanej pracy). W pracy tej zaproponowano algorytmy regulacji predykcyjnej bazujące na rozmytym modelu obiektu z następnikami w postaci odpowiedzi skokowych. Wspomniane uproszczenie struktury, które można otrzymać w przypadku obiektów SISO oraz o dwóch wejściach i dwóch wyjściach prowadzi w praktyce do otrzymania algorytmów analitycznych, jednak w przypadku ogólnym, który jest w tej pracy rozważany, otrzymuje się algorytm będący na pograniczu algorytmów analitycznych i numerycznych. Jest tak, ponieważ prawo regulacji musi być w nim zmieniane w każdej iteracji algorytmu, jednak wyznaczenie sterowania odbywa się znacznie prościej niż w wyniku rozwiązania zadania optymalizacji liniowo-kwadratowej. Warto zauważyć, że tego typu podejście można zastosować w przypadku otrzymania dowolnej predykcji liniowej względem przyrostów sterowań. Użycie konkretnej metody wyznaczania sterowania może więc zależeć od danego zastosowania. Warto przy tym pamiętać, że w przypadku tego typu algorytmów można zastosować metody uwzględniania ograniczeń wyjść opisane dalej.

Uwzględnianie ograniczeń wyjść w algorytmach analitycznych [H7], [H12]

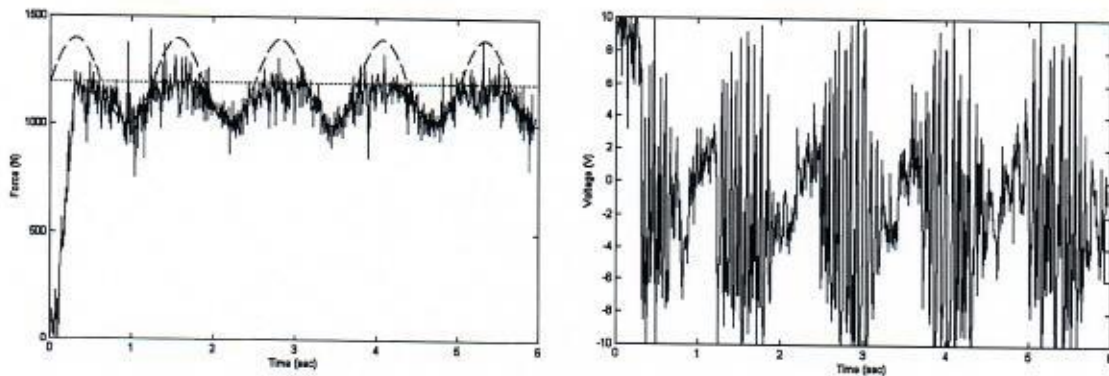
W przypadku istnienia w układzie regulacji ograniczeń ich zignorowanie, w przypadku ograniczeń dotyczących sygnałów sterujących, może wpłynąć negatywnie na jakość działania układu regulacji. Uwzględnianie ograniczeń w algorytmach numerycznych jest naturalne i wynika wprost z postaci zastosowanego algorytmu. Większym problemem jest uwzględnianie ograniczeń w algorytmach analitycznych. W standardowych, analitycznych algorytmach predykcyjnych, zwykle stosuje się mechanizm rzutowania sterowań na zbiór ograniczeń. Mechanizm ten jest stosunkowo prosty i polega na odpowiednim modyfikowaniu przyrostów sterowań, według reguł wynikających z istniejących ograniczeń (zob. np. [57]).

Pominięcie w algorytmie ograniczeń nałożonych na wyjścia obiektu sterowania może wpłynąć negatywnie na jakość produktu lub nawet na bezpieczeństwo procesu. Idea mechanizmów uwzględniania ograniczeń nałożonych na wartości wyjść obiektu regulacji w algorytmach analitycznych polega na takim modyfikowaniu wartości sterowania, aby wymusić spełnienie ograniczeń nałożonych na wartości wyjścia obiektu. Dotychczas jednak mechanizmy uwzględniania ograniczeń nałożonych na wyjścia obiektu pozwalały ograniczać jedynie pierwszą wartość z horyzontu predykcji a problemem było wpływanie na dalsze przewidywane wartości wyjścia z horyzontu predykcji. Rozwiązaniem tego problemu, w przypadku obiektów o jednym wejściu i jednym wyjściu, jest

1. założenie krótkiego horyzontu sterowania [H7] lub
2. założenie trajektorii sterowania w postaci funkcji [H12].

Następnie stosuje się reguły modyfikacji sterowań, jak te przedstawione w wymienionych artykułach.

Pierwszy przypadek uwzględniania ograniczeń nałożonych na wyjście obiektu regulacji został przetestowany w układzie regulacji rzeczywistego obiektu. Warto zauważyć, że ograniczenie miało zapobiec uszkodzeniu urządzenia. Testy te wypadły pomyślnie, co ilustruje rys. 2. Zauważmy, że wyjście obiektu pozostaje na ograniczeniu (1200 N), pomimo wartości zadanej znacznie to ograniczenie przekraczającej.



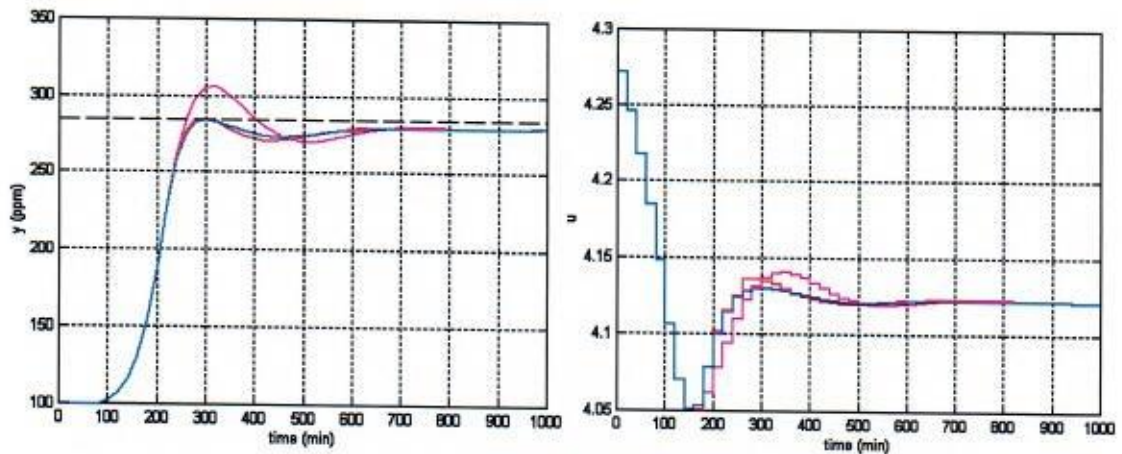
Rys. 2: Odpowiedzi układu regulacji z regulatorem MPC na okresowe zmiany wartości zadanej $\bar{F}(t) = 1200 + 200\sin 5t$; ograniczenie wyjścia $F_{max} = 1200N$ uwzględnione w regulatorze; po lewej – wyjście, po prawej – sterowanie [H7]

Skorzystanie z maksymalnie skróconego horyzontu sterowania pozwala na uwzględnienie ograniczeń nałożonych na wartości wyjścia obiektu regulacji na całym horyzoncie predykcji nie tylko w algorytmach bazujących na modelach liniowych w postaci równania różnicowego [H7], czy odpowiedzi skokowych [Hu5], ale także na modelach nieliniowych w szczególności rozmytych typu Takagi–Sugeno (z następnikami w postaci odpowiedzi skokowych) [Hu9], Hammersteina [Hu13], Wienera oraz innych. Metoda korzystać może bowiem z dowolnej predykcji opartej na linearyzacji modelu nieliniowego, która zależy liniowo od przyszłych wartości lub przyrostów sterowania.

Drugi z wymienionych przypadków bazuje na założeniu, że trajektoria przyszłych przyrostów sterowania ma postać funkcji (przypadek ten może być traktowany, jako uogólnienie pierwszego). Zaproponowane podejście rozwija więc ideę wykorzystywaną w algorytmie Predictive Functional Control (PFC) [2, 53, 54]. Mechanizm ten, jak poprzednio, polega na takim modyfikowaniu wartości sterowania, aby wymusić spełnienie ograniczeń nałożonych na wartości wyjścia obiektu, co w połączeniu z założoną trajekcją przyszłych przyrostów sterowania, umożliwia, w przypadku obiektu o jednym wejściu i jednym wyjściu, wpływanie na wartości wyjścia i sterowania z całego horyzontu predykcji. Podejście to można w analogiczny sposób zastosować nie tylko w przypadku modeli Hammersteina jak w pracy [H12], ale także innych (przypadek dla modeli liniowych został opisany w [Hu4], [Hu6]).

Przedstawione podejście działa bardzo dobrze, o czym świadczą przykładowe przebiegi z rys. 3. Jeśli ograniczenie nie jest uwzględniane w regulatorze, jest ono znacznie przekroczone (linia różowa na rys. 3). Po zastosowaniu zaproponowanego mechanizmu, sygnał wyjściowy nie przekracza wartości maksymalnej (linie czerwona i niebieska na rys. 3). Zauważmy, że aby ograniczenie nie zostało przekroczone, sygnał sterujący jest modyfikowany przez regulator z wyprzedzeniem, co pozytywnie wpływa na jakość regulacji.

Zaproponowane mechanizmy są stosunkowo proste i nie komplikują w sposób znaczący algorytmu. Ponadto można wybrać, ile przyszłych, przewidywanych wartości wyjścia obiektu będzie ograniczanych i w których chwilach. Umożliwia to dostosowanie mechanizmów do danego problemu i uproszczenie regulatora gdy zachodzi taka potrzeba. Ponadto, jeśli można oszacować błędy modelowania, można wiedzy o nich użyć przy wprowadzaniu marginesów bezpieczeństwa do ograniczeń nałożonych na wyjścia obiektu. Wówczas im lepsze będzie oszacowanie błędów modelowania, tym lepszy będzie ostateczny wynik działania mechanizmu uwzględniania ograniczeń.



Rys. 3: Odpowiedzi układu regulacji z regulatorem HMPC na zmianę wartości zadanej do $\bar{y} = 280\text{ppm}$; ograniczenia wyjścia: nie wzięte pod uwagę (różowe), uwzględnione na całym horyzoncie predykcji (czerwone), uwzględnione tylko w ostatniej chwili z horyzontu predykcji (niebieskie); linia przerywana – ograniczenie; po lewej – wyjście; po prawej – sterowanie [H12]

Dużą zaletą opisanych mechanizmów uwzględniania ograniczeń jest możliwość ich użycia praktycznie w dowolnych algorytmach analitycznych (nie tylko w algorytmach predykcyjnych), zob. np. [Hu14]. Algorytmy te oferują wówczas możliwości zarezerwowane do tej pory dla algorytmów predykcyjnych w wersji numerycznej (uwzględnianie ograniczeń w wielu przyszłych chwilach). Co więcej, algorytmy analityczne wyposażone w zaproponowane mechanizmy mogą być szczególnie przydatne w układach regulacji, w których użycie innego rodzaju algorytmów (np. algorytmów regulacji predykcyjnej w wersji numerycznej) nie powiedzie się ze względu na zbyt duży stopień złożoności tych algorytmów oraz zbyt długi czas potrzebny na wyznaczenie sterowania (w przypadku obiektów o szybkiej dynamice).

Reasumując, zaproponowane metody uwzględniania ograniczeń nałożonych na wyjścia obiektu regulacji są mało skomplikowane a ponadto w stosunkowo łatwy sposób można w nich uwzględnić niedokładność modelowania. Dzięki zastosowaniu opracowanych mechanizmów możliwe jest uwzględnianie ograniczeń nałożonych na wyjście obiektu regulacji na całym horyzoncie predykcji (lub w wybranych chwilach w przyszłości) nie tylko w przypadku algorytmów numerycznych ale także w przypadku algorytmów analitycznych. Możliwości algorytmów w wersji analitycznej mogą więc być znacznie rozszerzone, przyczyniając się do polepszenia jakości regulacji i umożliwienia realizacji nowych zadań.

Algorytmy regulacji predykcyjnej w wersji numerycznej [H3], [H4], [H8], [H11]

Zastosowanie algorytmu regulacji bazującego na modelu liniowym do nieliniowego obiektu może przynieść niesatysfakcjonujące rezultaty lub jakość regulacji może zostać poprawiona dzięki użyciu algorytmów bazujących na modelach nieliniowych. Niestety, bezpośrednie użycie modelu nieliniowego w zadaniu optymalizacji rozwiązywanym przez algorytm regulacji predykcyjnej prowadzi do otrzymania zadania optymalizacji nieliniowej, w ogólności niewypukłej. W konsekwencji otrzymane zadanie optymalizacji ma stosunkowo duże zapotrzebowanie na moc obliczeniową, czas potrzebny na otrzymanie sterowania nie może być z góry określony, a rozwiązanie nawet

gdy zostanie znalezione, może być jedynie rozwiązaniem lokalnym. Z tego powodu dość szybko pojawiły się algorytmy bazujące na modelach nieliniowych, z linearyzacją.

Dlatego przedmiotem mojego zainteresowania są także algorytmy predykcyjne w wersji numerycznej korzystające z różnych sposobów linearyzacji. Sformułowanie zadania optymalizacji jest w nich uproszczone dzięki wykorzystaniu faktu, że w algorytmach predykcyjnych z linearyzacją, możliwe jest podzielenie procesu otrzymywania predykcji na dwa zasadnicze etapy: wyznaczenie macierzy dynamicznej, służącej do opisanie wpływu przyszłych przyrostów sterowań na zachowanie obiektu regulacji oraz wyznaczenie części zależnej od wpływu przeszłych przyrostów sterowań na zachowanie obiektu (odpowiedzi swobodnej). Dekompozycję tę wykorzystałem w taki sposób, aby otrzymać algorytmy umożliwiające jak najłatwiejszą ich syntezę. W konsekwencji otrzymuje się efektywne obliczeniowo algorytmy numeryczne oparte na optymalizacji kwadratowej. Jednocześnie mogą one oferować, w zależności od wersji, jakość regulacji znacznie lepszą od oferowanej przez algorytmy bazujące na modelach liniowych a zbliżoną do tej, którą oferują algorytmy z nieliniową optymalizacją (NMPC).

Metody wyznaczania predykcji opisane w cyklu artykułów mogą zostać użyte w algorytmach regulacji predykcyjnej w wersji numerycznej, w których sterowanie jest wyznaczane w każdej iteracji algorytmu w wyniku rozwiązania zadania optymalizacji kwadratowej z ograniczeniami lub bez. Ta druga wersja jest szybsza i mniej wymagająca obliczeniowo. De facto jest to wersja pośrednia między klasycznie rozumianymi algorytmami analitycznymi z prawem regulacji a klasycznie rozumianymi algorytmami numerycznymi z zadaniem optymalizacji z ograniczeniami liniowymi rozwiązywanym w każdej iteracji algorytmu.

W celu otrzymania efektywnych obliczeniowo algorytmów, w każdej iteracji jest otrzymywana liniowa aproksymacja modelu obiektu. Wyznaczenie predykcji może być następnie przeprowadzone z wykorzystaniem zarówno modelu nieliniowego, jak i jego liniowego przybliżenia. Ponieważ jest możliwe zastosowanie modelu nieliniowego w różny sposób, istnieje grupa algorytmów, które różnią się stopniem złożoności oraz oferowaną jakością regulacji. W związku z tym jest możliwe dobranie najlepszego z tych algorytmów do danego zastosowania w taki sposób, aby otrzymać najlepszy kompromis między stopniem złożoności algorytmu a uzyskaną jakością regulacji. Przy czym bardziej zaawansowane metody predykcji są naturalnym rozwinięciem metod prostszych.

Istotnym elementem algorytmu jest użyty model procesu. W pewnych przypadkach, dzięki postaci tego modelu, wyznaczenie predykcji może stać się łatwiejsze. Zebrane w cyklu publikacje, zawierają przedstawienie zaproponowanych przeze mnie metod wyznaczania predykcji bazujących na modelach rozmytych typu Takagi-Sugeno, a także na modelach strukturyzowanych Hammersteina oraz Wienera.

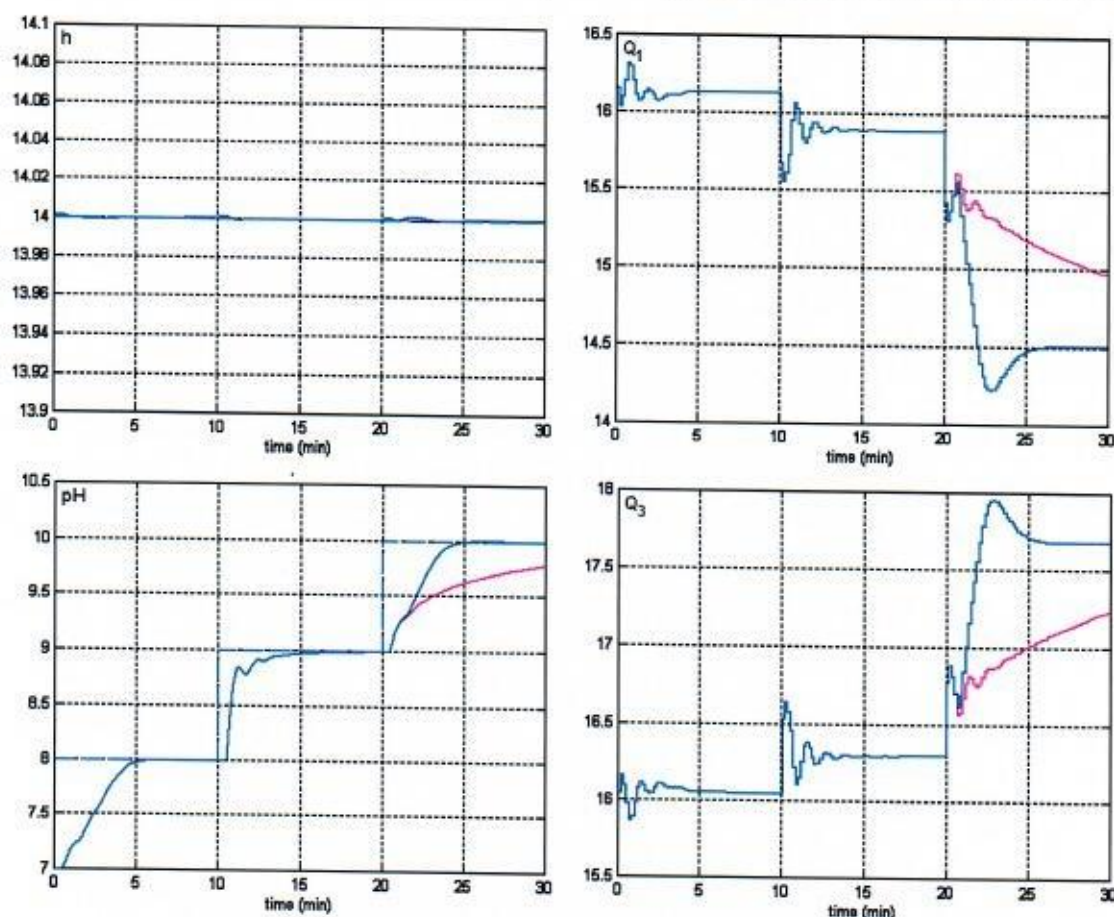
Metoda szybkiego projektowania algorytmów rozmytych typu SL [H3]

Najpierw zostanie omówiona metoda szybkiego i stosunkowo prostego projektowania algorytmów regulacji predykcyjnej, dla nieliniowych obiektów regulacji, bazująca na łatwych do pozyskania modelach rozmytych [H3]. Modele te są bowiem założone z odpowiedzi skokowych obiektu. Dzięki temu, proces opracowania modelu rozmytego jest stosunkowo prosty. Wystarczy bowiem pozyskać kilka zestawów odpowiedzi skokowych, z okolic kilku punktów pracy. Następnie, korzystając z wiedzy eksperckiej można przyjąć postać poprzedników oraz funkcji przynależności, które dodatkowo mogą zostać dostrojone.

Algorytm typu SL (z sukcesywną linearyzacją) bazujący na rozważanym modelu rozmytym może zostać opracowany stosunkowo szybko i w prosty sposób dzięki postaci tego modelu. Ponadto w algorytmie tym odpowiedź skokowa potrzebna do sformułowania problemu optymalizacji

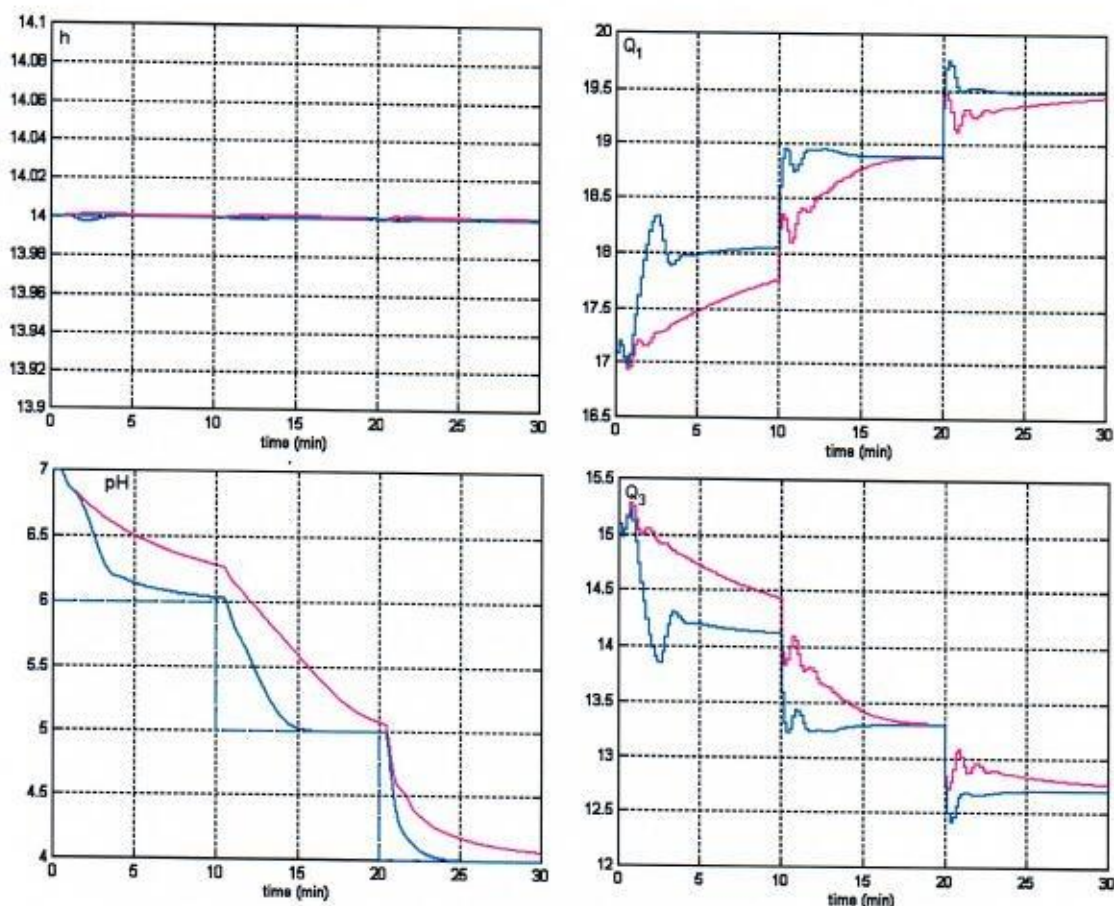
w każdej iteracji, jest otrzymywana bezpośrednio po wykonaniu wnioskowania rozmytego. Odpowiedź swobodna jest zaś generowana analogicznie, jak w przypadku algorytmów bazujących na modelach liniowych. Stosując omawiane podejście można w stosunkowo prosty sposób, poprawić funkcjonowanie układu regulacji w stosunku do przypadku, gdy używa się algorytmu predykcyjnego bazującego na modelu liniowym.

Przykładowe przebiegi wygenerowane w układzie regulacji reaktora pH przedstawione zostały na rys. 4 i 5. Przebiegi niebieskie zostały otrzymane z wykorzystaniem regulatora FMPC bazu-



Rys. 4: Odpowiedzi układów regulacji reaktora pH z regulatorami DMC (linie różowe) i FMPC (linie niebieskie) na zmiany wartości zadanej pH w górę; po lewej – wyjścia; po prawej – sterowania [H3]

jącego na modelu rozmytym złożonym z siedmiu zestawów odpowiedzi skokowych, zaś różowe – konwencjonalnego DMC (bazującego na modelu z okolic jednego punktu pracy). Przebiegi otrzymane z regulatorem FMPC są znacznie szybsze. Uzyskane wyniki świadczą o tym, że pomimo swojej prostoty, zastosowanie zaproponowanego podejścia pozwala na uzyskanie poprawy działania układu regulacji w stosunku do układu z konwencjonalnym (bazującym na modelu liniowym) algorytmem predykcyjnym, w stosunkowo łatwy sposób.

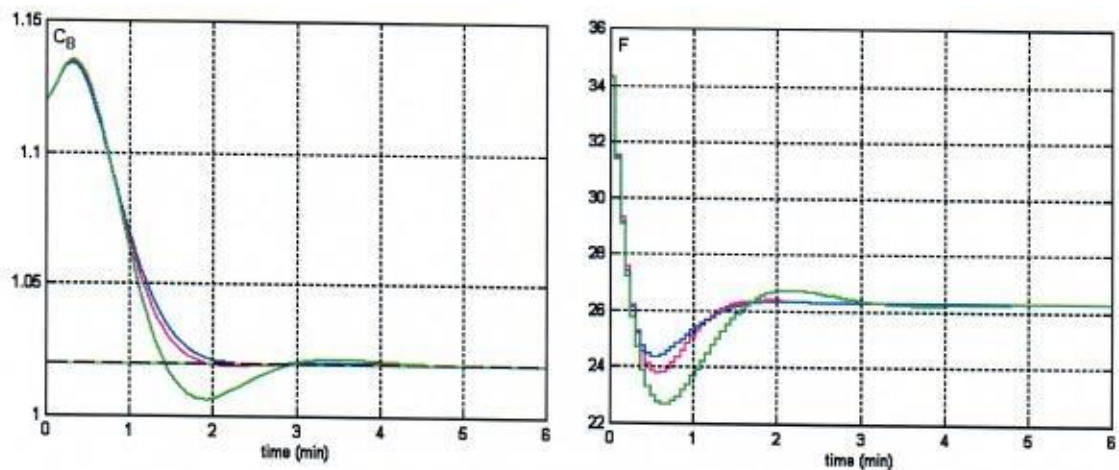


Rys. 5: Odpowiedzi układów regulacji reaktora pH z regulatorami DMC (linie różowe) i FMPC (linie niebieskie) na zmiany wartości zadanej pH w dół; po lewej – wyjścia; po prawej – sterowania [H3]

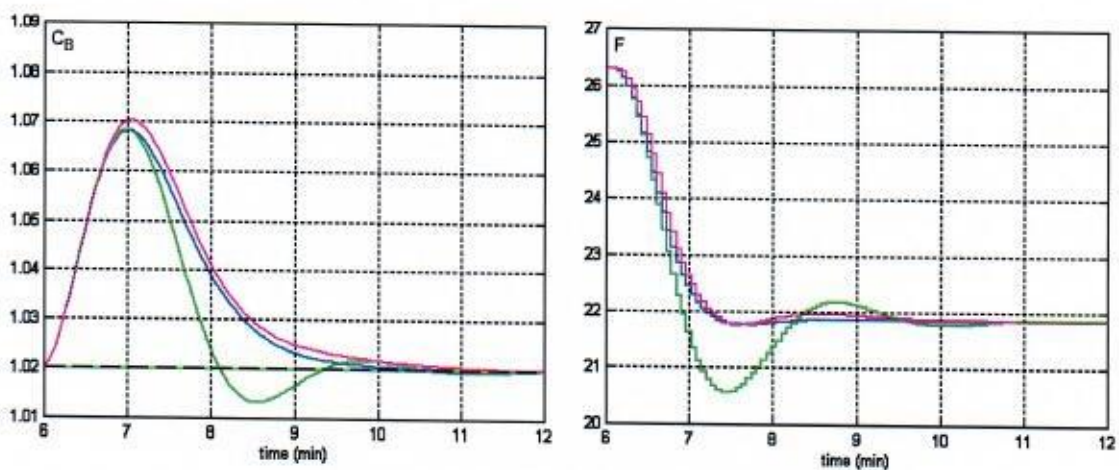
Algorytm typu NPL bazujący na modelach nieliniowym i rozmytym [H4]

Algorytm typu NPL wykorzystuje dwa modele: oryginalny, nieliniowy do wyznaczenia odpowiedzi swobodnej oraz łatwy do uzyskania, rozmyty będący zestawem odpowiedzi skokowych obiektu, używany do wyznaczenia macierzy dynamicznej, uaktualnianej w każdej iteracji algorytmu [H4], [H10]. Po wyznaczeniu odpowiedzi swobodnej w opisany w przytoczonych artykułach sposób, należy jeszcze otrzymać macierz dynamiczną potrzebną do predykcji wpływu zmian sterowań, generowanych przez algorytm, na wyjścia obiektu. Można to zrobić korzystając z łatwego do otrzymania modelu rozmytego typu Takagi–Sugeno opisanego wyżej.

Opisane podejście jest podejściem przybliżonym, jednak może przynieść rezultaty porównywalne z tymi otrzymanymi z algorytmem NMPC, zob. rys. 6 i 7. Zauważmy, że algorytm FMPC2 (linie niebieskie) generuje w rozważanym przykładzie przebiegi zbliżone do tych otrzymanych z algorytmem NMPC (linie różowe). Jednocześnie, przynosi zdecydowanie lepsze rezultaty niż standardowy algorytm LMPC bazujący na modelu liniowym (linie zielone), zarówno w przypadku zmiany wartości zadanej (rys. 6), jak i zakłócenia (rys. 7).



Rys. 6: Odpowiedzi układów regulacji z regulatorami NMPC (linie różowe), FMPC2 (linie niebieskie) i LMPC (linie zielone) na zmianę wartości zadanej; po lewej – wyjście; po prawej – sterowanie [H4]

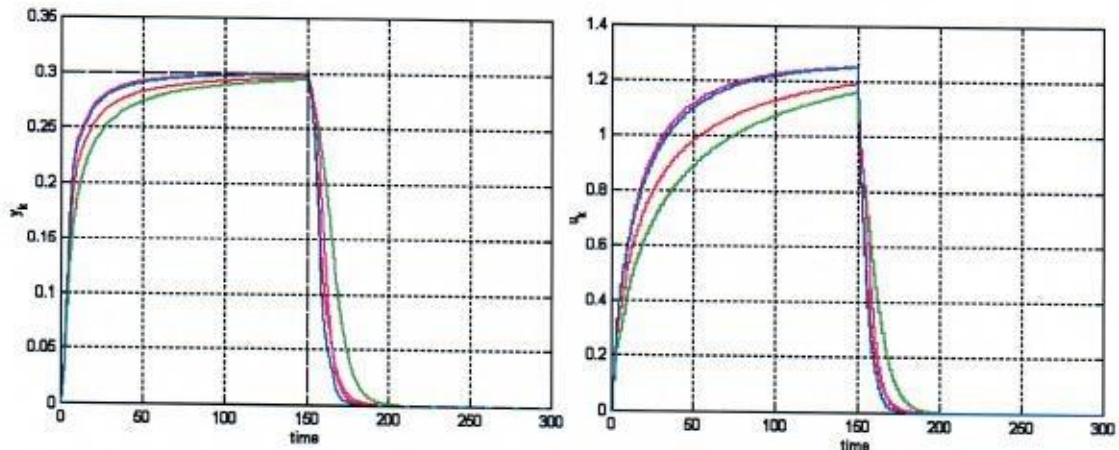


Rys. 7: Odpowiedzi układów regulacji z regulatorami NMPC (linie różowe), FMPC2 (linie niebieskie) i LMPC (linie zielone) na zmianę zakłócenia; po lewej – wyjście; po prawej – sterowanie [H4]

Warto zauważyć, że zaproponowany algorytm może być używany nie tylko jako algorytm pracujący samodzielnie, ale także jako algorytm pomocniczy, działający w układach regulacji z algorytmem NMPC, aby poprawić jego właściwości numeryczne. Może on bowiem zostać użyty do wygenerowania startowej trajektorii sterowań dla procedury optymalizacji nieliniowej. Jeśli procedura ta poprawi startową trajektorię sterowań w założonym czasie (w ciągu jednego okresu próbkowania), wówczas nowo obliczone sterowania mogą być użyte. W przeciwnym wypadku, można wykorzystać sterowania wygenerowane przez zaproponowany algorytm, które i tak oferują dobrą jakość regulacji.

Podstawowa idea wyznaczania odpowiedzi swobodnej w algorytmach typu NPL polega na użyciu nieliniowego modelu obiektu przy założeniu, że sygnały sterujące nie zmieniają się na całym horyzoncie predykcji. Takie podejście do wyznaczania odpowiedzi swobodnej oparte na modelach Wienera zostało opisane w pracy [Hu10]. Zauważmy jednak, że algorytmy regulacji predykcyjnej w każdej iteracji generują w ogólności nie jedno sterowanie a trajektorię przyszłych sterowań (jeśli przyjmie się, że horyzont sterowania jest dłuższy od 1). Taką trajektorię przyszłych sterowań można wykorzystać w kolejnej iteracji, w celu poprawienia jakości predykcji. Podejście tego typu, oparte na modelach Wienera zaproponowałem w pracy [H8]. W tym przypadku, klasyczna odpowiedź swobodna jest zastępowana odpowiedzią na przyszłe sterowania, czerpane z trajektorii wyznaczonej w poprzedniej iteracji algorytmu. Dzięki temu odpowiedź wymuszana, obliczana z wykorzystaniem macierzy dynamicznej, która jest mniej dokładnym modelem, niż ten użyty do wyznaczenia zmodyfikowanej odpowiedzi swobodnej, jest wyznaczana dla mniejszych przyrostów sterowania. Jest tak, ponieważ zmiennymi decyzyjnymi w problemie optymalizacji są teraz w praktyce korekty trajektorii przyszłego sterowania, wyznaczonej w poprzedniej iteracji algorytmu. Z tego względu otrzymana predykcja jest dokładniejsza od tej z klasyczną odpowiedzią swobodną. Dalszą poprawę jakości predykcji można otrzymać po uzależnieniu elementów macierzy dynamicznej od zmodyfikowanej odpowiedzi swobodnej.

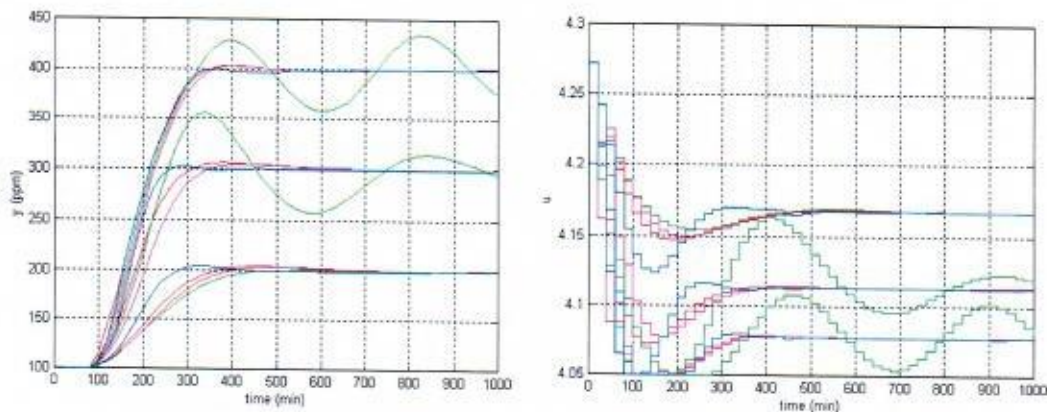
Zaproponowane podejście przetestowałem symulacyjnie; przykładowe odpowiedzi zostały pokazane na rys. 8. W przypadku algorytmu WMPC1 (linie różowe na rys. 8) została zastosowana klasyczna macierz dynamiczna, w przypadku WMPC2 (linie niebieskie na rys. 8) – zmodyfikowana macierz dynamiczna. Najwolniejszym z algorytmów jest LMPC oparty na modelu liniowym (linie zielone na rys. 8). W przypadku algorytmów bazujących na modelu nieliniowym i zmianie wartości zadanej z 0 do 0,3, algorytmy WMPC1 i WMPC2 są szybsze niż algorytm NMPC (linie czerwone na rys. 8); obydwa algorytmy WMPC generują podobne odpowiedzi. W przypadku zmiany wartości zadanej z 0,3 do 0, wszystkie trzy algorytmy bazujące na modelu nieliniowym generują podobne odpowiedzi, przy czym algorytm WMPC2 jest najszybszy.



Rys. 8: Odpowiedzi układów regulacji z algorytmami NMPC (linie czerwone), WMPC1 (linie różowe), WMPC2 (linie niebieskie), LMPC (linie zielone), na zmiany wartości zadanej; po lewej – wyjście, po prawej – sterowanie [H8]

Algorytm regulacji predykcyjnej typu NPL bazujący na modelach Hammersteina został zaproponowałem w pracy [Hu8]. Z kolei algorytm z zaawansowaną odpowiedzią swobodną, wyznaczaną w sposób analogiczny do opisanego wcześniej dla modeli Wienera, przedstawiłem w artykule [Hu12]. Dalsze uogólnienie tego podejścia przedstawiłem w pracy [H11]. Zauważmy bowiem, że w przypadku wyznaczania odpowiedzi na trajektorię przyszłych sterowań uzyskaną w ostatniej iteracji algorytmu, zmiennymi decyzyjnymi problemu optymalizacji kwadratowej, będącego podstawą algorytmu, są korekty trajektorii sterowania. Im te korekty będą mniejsze, a ich wpływ na wyjście obiektu jest obliczany z wykorzystaniem macierzy dynamicznej, bazującej zwykle na modelu mniej dokładnym niż model nieliniowy użyty do wyznaczania zaawansowanej odpowiedzi swobodnej, tym predykcja będzie lepsza (przy założeniu, że model nieliniowy jest dokładny). W związku z tym, w razie potrzeby, warto sprawić, aby te korekty były jak najmniejsze a predykcja w jak największej części była wyznaczana z wykorzystaniem modelu nieliniowego. Można to osiągnąć dzięki iteracyjnemu poprawianiu predykcji, jak to opisałem w pracy [H11]. Ponadto zamieściłem tam spostrzeżenie, że możliwe jest użycie w zadaniu optymalizacji innego od standardowego wskaźnika jakości, co ma wpływ na działanie algorytmu regulacji.

Przykładowy wynik ilustrujący zalety opisanego podejścia został zaprezentowany na rys. 9. Algorytm HMPC1 (linie różowe na rys. 9) wykorzystuje standardowy wskaźnik jakości w za-



Rys. 9: Odpowiedzi układu regulacji na zmiany wartości zadanej do $\bar{y}_1 = 200$ ppm, $\bar{y}_2 = 300$ ppm i $\bar{y}_3 = 400$ ppm; NMPC (linie czerwone), HMPC1 (linie różowe), HMPC2 (linie niebieskie), LMPC (linie zielone); po lewej – wyjście, po prawej – sterowanie [H11]

daniu optymalizacji kwadratowej z ograniczeniami liniowymi rozwiązywanym w każdej iteracji algorytmu, zaś HMPC2 (linie niebieskie na rys. 9) – zmodyfikowany wskaźnik jakości. Zauważmy, że wszystkie algorytmy bazujące na modelu nieliniowym działają lepiej od LMPC, który do predykcji wykorzystuje model liniowy (linie zielone na rys. 9). Algorytm NMPC (linie czerwone na rys. 9) jest nieco szybszy od algorytmu HMPC1, chociaż oba algorytmy działają podobnie. Natomiast algorytm HMPC2 jest najszybszy spośród rozważanych algorytmów zwłaszcza w przypadku zmian wartości zadanej do $\bar{y}_1 = 200$ ppm i do $\bar{y}_2 = 300$ ppm.

Implementacja algorytmów regulacji predykcyjnej w wersji numerycznej w postaci rekurencyjnej sieci neuronowej [H13]

Jedno z podejść mających na celu implementację numerycznie efektywnych algorytmów regulacji predykcyjnej polega na przedstawieniu numerycznych wersji tych algorytmów w postaci sieci neuronowych. Problem optymalizacji kwadratowej rozwiązywany przez algorytmy regulacji predykcyjnej w każdej iteracji może bowiem zostać przedstawiony jako układ równań różniczkowych mający takie samo rozwiązanie, jak wyjściowe zadanie optymalizacji. Taki układ równań różniczkowych może być z kolei interpretowany jako rekurencyjna sieć neuronowa. W pracy [H13] podejście to zostało przetestowane dla numerycznych algorytmów regulacji predykcyjnej bazujących na liniowych modelach wejście-wyjście, z miękkimi ograniczeniami wyjść obiektu, które zostały przedstawione w postaci dyskretnej, rekurencyjnej sieci neuronowej. Działanie tak sformułowanych algorytmów zostało sprawdzone w układach regulacji z ograniczeniami dwóch obiektów elektromechanicznych, wymagających stosunkowo krótkich okresów próbkowania.

Przeprowadzone testy przyniosły interesujące wyniki odnośnie przydatności podejścia. Jest bowiem możliwe otrzymanie, z wykorzystaniem przedstawionej metody, rozwiązania takiego, jak z użyciem procedury optymalizacji kwadratowej. Wymaga to jednak bardzo uważnego dobrania parametrów algorytmu, w szczególności żądanej dokładności rozwiązania. To wiąże się z kolei z czasem potrzebnym na wykonanie obliczeń. Jeśli żądana dokładność rozwiązania będzie zbyt duża, czas potrzebny na otrzymanie rozwiązania może być znaczący. Algorytmy regulacji predykcyjnej sformułowane w postaci rekurencyjnej sieci neuronowej mogą więc być szybsze od swoich konwencjonalnych odpowiedników, jednak bardzo istotną kwestią jest odpowiednie dobranie parametrów algorytmu. W przeciwnym wypadku algorytm będzie działał zbyt wolno lub może być nawet rozbieżny. Istotne jest tu w szczególności zastosowanie niezbyt długiego horyzontu sterowania, jak to uczyniono w przykładach z artykułu. Łatwo zauważyć, że zaprezentowane sformułowanie algorytmu regulacji predykcyjnej jako sieci neuronowej jest takie, iż stosunkowo łatwo można byłoby przedstawić podejście wykorzystając w przypadku numerycznych algorytmów regulacji predykcyjnej bazujących na modelach nieliniowych, z linearyzacją. Zważywszy jednak na wymienione cechy podejścia, jego zastosowanie, choć niewątpliwie interesujące, wydaje się być w tym przypadku problematyczne.

Zapewnianie stabilności [H5]

W pracy [H5] zaproponowano metodę zapewniania stabilności układów regulacji z algorytmami regulacji predykcyjnej z linearyzacją, w wersji numerycznej, bazującymi na modelach rozmytych typu Takagi-Sugeno. Metoda ta jest oparta na podejściu, w którym z dopuszczalności rozwiązań wynika stabilność układu regulacji z algorytmem z linearyzacją. Nie jest przy tym wymagana optymalność wyznaczonej sekwencji sterowań, tzn. można skorzystać z dowolnego sposobu generacji sterowań pod warunkiem, że spełniają one założone ograniczenia.

Głównym wymaganiem postawionym przy opracowywaniu tego typu algorytmów w wersji numerycznej jest wymóg, aby w każdej iteracji takiego algorytmu było rozwiązywane zadanie programowania kwadratowego z liniowymi ograniczeniami. Dzięki temu algorytm jest efektywny obliczeniowo. Ponadto, takie sformułowanie problemu daje gwarancję znalezienia rozwiązania problemu optymalizacji, jeśli tylko takie rozwiązanie istnieje, tzn. jeśli narzucone ograniczenia nie są sprzeczne. Zauważmy przy tym, że w przypadku braku ograniczeń nałożonych na wyjścia obiektu jeśli rozwiązanie nie istnieje, oznacza to, że zadanie zostało źle sformułowane. Natomiast w przypadku uwzględniania ograniczeń nałożonych na wyjścia obiektu, można zastosować (i często ma to miejsce) mechanizm ich relaksacji, np. mechanizm ograniczeń miękkich.

Warto zaznaczyć, że problem zapewnienia stabilności układów regulacji z algorytmami z linearyzacją jest bardziej skomplikowany od zapewniania stabilności algorytmów typu NMPC korzystających z optymalizacji nieliniowej powtarzanej w każdej iteracji algorytmu, ponieważ problem ten doczekał się wielu rozwiązań bazujących na optymalności otrzymywanego rozwiązania zadania optymalizacji.

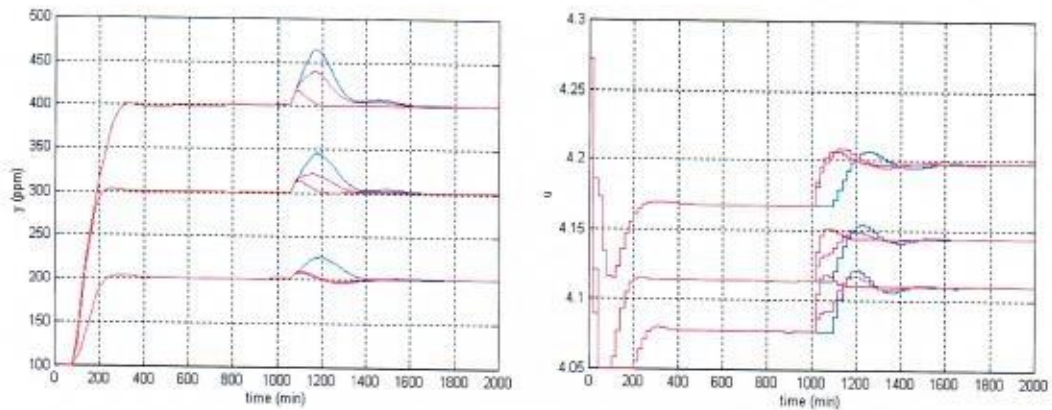
Podejście dwufazowe bazuje na idei zaproponowanej w [49] a rozwiniętej w pracy [56]. Polega na zastosowaniu dwóch regulatorów. Pierwszy z nich, uwzględniający ograniczenia powinien sprowadzić trajektorię układu sterowania do (wypukłego) zbioru docelowego W , który zawiera punkt równowagi i znajduje się wewnątrz obszaru dopuszczalnego. Drugi regulator, stabilizujący, jest regulatorem, który nie uwzględnia ograniczeń i pracuje, gdy stan procesu znajduje się wewnątrz zbioru W . Regulator stabilizujący jest projektowany w taki sposób, aby był asymptotycznie stabilny w zbiorze W a dowolna trajektoria układu zaczynająca się w zbiorze W , pozostawała w tym zbiorze.

Ze względu na to, że omawiane algorytmy bazują na aproksymacjach nieliniowego modelu procesu, opisana metoda bazuje na rozwiązaniu przedstawionym w pracy [56] i opiera się na spostrzeżeniu, że stabilność układu regulacji z algorytmem predykcyjnym w wersji numerycznej może być, w przypadku gdy dysponujemy dokładnym modelem obiektu regulacji, zapewniona dopuszczalnością rozwiązań tego zadania optymalizacji. W takim razie, jeśli ograniczenia nie będą zmienne w czasie, to wyznaczenie w pierwszej iteracji algorytmu zestawu sterowań spełniających narzucone ograniczenia oznacza, że układ regulacji z rozważanym algorytmem jest stabilny. Co jednak trzeba podkreślić, aby uzyskać taki rezultat, do zbioru ograniczeń należy dodać równościowe ograniczenie stabilizujące [H5]. Zauważmy, że ograniczenie to, nałożone na sterowania, jest takiej postaci iż zaproponowane podejście może zostać w łatwy sposób zaadaptowane do algorytmów z linearyzacją bazujących na innego typu modelach, jak np. Hammersteina czy Wienera.

Metody uwzględniania pomiaru zakłócenia [H10], [H11]

Pierwsza metoda uwzględniania pomiaru zakłócenia w algorytmie regulacji predykcyjnej z linearyzacją wykorzystuje rozmyty model wpływu zakłócenia na wyjścia obiektu. Zauważmy, że przy tworzeniu takiego modelu można skorzystać z zalet modeli rozmytych i otrzymać (z obiektu bądź z dokładnego modelu obiektu) kilka odpowiedzi na skok zakłócenia. Następnie, na ich podstawie można sporządzić model rozmyty typu Takagi–Sugeno [H10], [H11]. Model ten jest następnie używany w celu dodania do odpowiedzi swobodnej składników zależnych od zakłócenia. Warto zauważyć, że z opisanego tutaj podejścia, można skorzystać w każdej odmianie algorytmów w wersji numerycznej korzystających z linearyzacji. Metoda ta sprowadza się bowiem do odpowiedniej modyfikacji predykcji i może zostać użyta na przykład wówczas, gdy chcemy rozszerzyć możliwości już opracowanego algorytmu regulacji.

W przypadku algorytmów typu NPL, w których do wyznaczenia odpowiedzi swobodnej stosuje się model nieliniowy, można zastosować także dokładniejsze podejście, pod warunkiem, że model służący do wyznaczania predykcji zawiera w sobie opis wpływu zakłócenia na obiekt regulacji. Druga metoda uwzględniania pomiaru zakłócenia w algorytmie regulacji predykcyjnej z linearyzacją jest koncepcyjnie prostsza od pierwszej. Metoda ta bazuje na pomiarach lub estymatach zakłócenia oraz modelu nieliniowym. Zauważmy, że jeśli w modelu nieliniowym użytym do wyznaczenia odpowiedzi swobodnej w algorytmie typu NPL zawarte są zależności wyjść od zmiennych zakłócających, wówczas podczas wyznaczania odpowiedzi swobodnej wystarczy wykorzystać informacje o wartościach lub estymatach zakłóceń aby ich wpływ uwzględnić w predykcji. Podejście to w wersji ogólnej, dla modeli nieliniowych przedstawiłem w pracy [H10], zaś jego wersję dla modeli Hammersteina – w artykule [H11].



Rys. 10: Odpowiedzi układu regulacji na zmiany wartości zadanej do $\bar{y}_1 = 200$ ppm, $\bar{y}_2 = 300$ ppm i $\bar{y}_3 = 400$ ppm na początku eksperymentu i na zmiany zakłócenia w tysięcznej minucie; pomiar zakłócenia: niewykorzystany (linie niebieskie), wykorzystany metodą pierwszą (linie różowe), wykorzystany metodą drugą (linie czerwone); po lewej – wyjście, po prawej – sterowanie [H11]

Przykładowy wynik zastosowania obydwu metod, w tym pierwszej – z modelem liniowym, w układzie regulacji obiektu nieliniowego z opóźnieniem, został przedstawiony na rys. 10. W przypadku braku wykorzystania któregośkolwiek mechanizmu uwzględnienia pomiaru zakłócenia, algorytm generuje stosunkowo duże uchyby po zmianie zakłócenia (linie niebieskie na rys. 10). Dodanie najprostszego mechanizmu uwzględnienia pomiaru zakłócenia (linie różowe na rys. 10) znacznie poprawia jakość regulacji, zwłaszcza w przypadku pracy obiektu w okolicy wartości zadanej $\bar{y}_1 = 200$ ppm, w której został pozyskany model wpływu zakłócenia na działanie obiektu. Dalsza poprawa kompensacji zakłócenia następuje po zastosowaniu drugiej metody uwzględniania pomiaru zakłócenia, wykorzystującej model nieliniowy (linie czerwone na rys. 10).

Rekonfiguracja po blokadzie elementu wykonawczego [H1], [H2]

Istotnym zagadnieniem we współczesnej automatyce jest takie projektowanie układów sterowania, aby były one odporne na zaistniałe sytuacje awaryjne (ang. fault-tolerant control systems) [18, 19]. W niniejszym rozdziale podsumowane zostały wyniki badań, dotyczących opracowania sposobów rekonfiguracji algorytmów sterowania predykcyjnego w sytuacjach awarii elementów wykonawczych [H1], [H2], [Hu1], [Hu2], [Hu3]. Założono, przy tym, że głównym celem jest zapewnienie kontynuacji sterowania w sposób możliwie mało zmieniony w stosunku do tego sprzed wystąpienia awarii. Takie podejście powinno umożliwić zminimalizowanie ewentualnych strat do czasu usunięcia awarii.

Metody rekonfiguracji zostały opracowane tak, że można z nich skorzystać zarówno w przypadku algorytmów regulacji predykcyjnej bazujących na modelach liniowych, jak i nieliniowych. Podczas badań założono, że dostępny jest moduł diagnostyki uszkodzeń. To szerokie zagadnienie zostało opisane w szeregu książek, np. w [18, 19]; informacje o zastosowaniu w diagnostyce sieci neuronowych można znaleźć w pracy [50], a w [64] – m. in. technik inteligencji obliczeniowej (ang. soft computing). Znacznym ułatwieniem przy projektowaniu regulatorów jest dostęp do wartości sygnału przekazywanego do obiektu zapewniany przez element wykonawczy, a według

autorów pracy [51] tego typu urządzenia wykonawcze stają się standardem. W takim przypadku można znacznie uprościć algorytmy predykcyjne. Ponadto, algorytmy te otrzymają praktycznie najszybciej jak to jest możliwe informację o ewentualnej awarii.

W algorytmach regulacji predykcyjnej dzięki zmianie modelu obiektu regulacji można w stosunkowo łatwy sposób uzyskać tolerancję na pojawiające się w procesie awarie. Jednak w przypadku blokad elementów wykonawczych, mechanizmy tolerowania tego typu uszkodzeń można uprościć bazując bądź na zmianie ograniczeń uwzględnianych w regulatorze bądź na zmianie jedynie struktury modelu (tzn. brane jest pod uwagę to, że w sytuacji awaryjnej, z punktu widzenia regulatora tracona jest możliwość wpływania któryś ze sterowań na zachowanie obiektu), a nie jego parametrów.

Podstawowe podejście do rekonfiguracji polega na wprowadzeniu, po wykryciu blokady elementu wykonawczego, ograniczeń równościowych nałożonych na przyrosty sterowania, w torze nastawczym którego element wykonawczy uległ zablokowaniu. Zauważmy, że w przypadku algorytmu w wersji numerycznej, oznacza to w praktyce eliminację części zmiennych decyzyjnych z problemu optymalizacji rozwiązywanego w każdej iteracji algorytmu. Zastosowanie tego podejścia jest stosunkowo proste i nie komplikuje w znaczący sposób samego algorytmu, a pomimo to może wyraźnie podnieść jakość regulacji [H1], [H2].

Inne podejście polega na zastosowaniu modelu obiektu z wyłączeniem torów wejście-wyjście dla sterowania, w torze nastawczym którego wystąpiła blokada elementu wykonawczego [H1]. Modyfikacja ta sprowadza się do zmiany macierzy dynamicznej. W przypadku obiektu o wielu zmiennych sterujących i wielu wyjściach oraz odpowiedniej postaci macierzy dynamicznej, modyfikacja ta polega na eliminacji kolumn macierzy dynamicznej opisujących zależność wyjść obiektu od sterowania, w torze którego element wykonawczy uległ awarii. Ponadto modyfikacji ulegnie wektor zmiennych decyzyjnych. Podejście to jest przeznaczone praktycznie dla algorytmów analitycznych, ponieważ w przypadku algorytmów numerycznych jest równoważne podejściu podstawowemu, polegającemu na dodaniu ograniczeń równościowych. Po zastosowaniu zmienionego modelu, należy obliczyć parametry regulatora. Zastosowanie zaprezentowanego podejścia w algorytmie analitycznym przynosi poprawę działania układu w stosunku do przypadku zastosowania jedynie ograniczenia równościowego i jest równoważne mechanizmowi wprowadzenia ograniczeń w algorytmie numerycznym.

W przypadku, gdy nie dysponuje się nadmiarową zmienną sterującą, po blokadzie jednego z elementów wykonawczych, zmienne wyjściowe są w ogólności niedokładnie regulowane. Jeśli któraś z nich powinna być regulowana dokładniej, można skorzystać ze zmiany wag kwadratów uchybów tej zmiennej we wskaźniku jakości regulatora [H1]. Rozważyłem możliwość zmiany wartości parametrów dostrajalnych we wskaźniku jakości algorytmów predykcyjnych, w celu uzyskania lepszej stabilizacji jednego z wyjść i opisałem wpływ tego rodzaju zmian na działanie układu regulacji. Przedyskutowałem możliwość osiągnięcia tego samego celu przez zastosowanie odpowiednich ograniczeń, połączone z usunięciem części składników ze wskaźnika jakości algorytmu predykcyjnego.

Na podstawie analizy charakterystyk statycznych, można podjąć decyzję o rezygnacji z części ograniczeń nałożonych na wartości wyjściowe, jeśli wiadomo, że wartość, która jest możliwa do uzyskania w danych warunkach awaryjnych znajduje się dostatecznie daleko od swoich ograniczeń. W przeciwnym jednak wypadku może być nawet konieczne wprowadzenie bardziej restrykcyjnych ograniczeń nałożonych na wartości wyjściowe. Niestety, użycie bardziej restrykcyjnych ograniczeń w regulatorze może pociągnąć za sobą problemy związane z brakiem rozwiązań dopuszczalnych. Zauważmy także, że istnieje również problem odpowiedniego, do zaistniałej sytuacji, doboru wartości zadanych (mogący potęgować problem poprzedni). Z drugiej strony, optymalizacja punktu pracy, podczas wykonywania swoich zadań, wykorzystuje zwykle dokładny model statyki procesu.

Współpraca z zadaniem optymalizacji punktu pracy [H2]

Szersze możliwości przeciwdziałania skutkom awarii istnieją w strukturach z regulatorami predykcyjnymi współpracującymi z optymalizacją punktu pracy, dzięki wykorzystaniu dokładnego modelu statycznego procesu [H2]. W strukturze takiej za wyznaczanie pożądaných wartości zadanych odpowiada warstwa optymalizacji, która dysponuje dokładnym modelem statycznym obiektu regulacji. Model ten, na podstawie informacji z elementów wykonawczych, może zostać odpowiednio zmodyfikowany. Dzięki przekazaniu warstwie optymalizacji informacji o awarii, będzie ona generować wartości zadane odpowiednio dla zaistniałej sytuacji. Wówczas, ciężar tolerowania awarii jest w naturalny sposób rozłożony między elementy układu sterowania.

Zauważmy ponadto, że to warstwa optymalizacji dba o realizację nadrzędnego celu sterowania, zapisanego w jej wskaźniku jakości. Dysponując modelem statycznym, w stosunkowo łatwy sposób może wykryć ewentualną niemożność jego zrealizowania, co z kolei może pomóc w podjęciu decyzji o przeprowadzeniu instalacji w obszar bezpiecznej pracy lub czasowej (do chwili usunięcia awarii) zmianie celu pracy instalacji (np. jedynie ograniczenie wartości jednej ze zmiennych dotychczas regulowanych czy też odsunięcie wartości zadanych od istotnych ograniczeń).

Inne publikacje habilitanta powiązane z cyklem

- [Hu1] Piotr Marusak: *Układy regulacji predykcyjnej tolerujące uszkodzenia elementów wykonawczych: dokładna stabilizacja wybranego wyjścia*. Pomiary Automatyka Robotyka nr 2'2007, CD-ROM "Materiały konferencyjne Automation 2007", referat nr 47; streszczenie na str.12.
- [Hu2] Piotr Marusak: *Układy sterowania z regulatorami predykcyjnymi tolerujące uszkodzenia elementów wykonawczych: modyfikacja warstwy optymalizacji*. Pomiary Automatyka Robotyka nr 2'2007, CD-ROM "Materiały konferencyjne Automation 2007", referat nr 48; streszczenie na str.12.
- [Hu3] Piotr Marusak: *Actuator Fault Toleration in Control Systems with Analytical Predictive Controllers and Output Constraints*. 13th IEEE/IFAC International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics MMAR 2007, Szczecin, 27-30 sierpnia 2007, str. 825-832.
- [Hu4] Piotr Marusak: *Regulatory predykcyjne z założoną trajektorią przyrostów sterowania i uwzględnianiem ograniczeń sygnału sterującego*. Pomiary Automatyka Robotyka nr 2'2008, str. 581-590.
- [Hu5] Piotr Marusak: *Analytical predictive controllers with efficient handling of output constraints*, w pracy pod redakcją: K. Malinowskiego i L. Rutkowskiego: *Recent advances in control and automation*, Academic Publishing House EXIT, Warszawa 2008, ISBN 978-83-60434-43-7, str. 131-140; zaprezentowano w języku polskim podczas XVI Krajowej Konferencji Automatyki.
- [Hu6] Piotr Marusak: *Regulatory predykcyjne z założoną trajektorią przyrostów sterowania i uwzględnianiem ograniczeń nałożonych na wyjścia obiektu regulacji*. Pomiary Automatyka Robotyka nr 2/2009, str. 496-505.
- [Hu7] Piotr Marusak: *Efficient predictive control algorithm based on fuzzy Hammerstein models: a case study*, w pracy pod redakcją X.Z. Gao i in.: *Soft computing in industrial applications: algorithms, integration, and success stories*, *Advances in Intelligent and Soft Computing* 75, Springer, 2010, ISBN 978-3-642-11281-2, str. 11-20, DOI:10.1007/978-3-642-11282-9_2.

- [Hu8] Piotr Marusak: *On prediction generation in efficient MPC algorithms based on fuzzy Hammerstein models*. Lecture Notes in Computer Science (Lecture Notes in Artificial Intelligence), vol. 6113, 2010, str. 136–143, DOI:10.1007/978-3-642-13208-7_18.
- [Hu9] Piotr Marusak: *A mechanism of output constraint handling for analytical fuzzy controllers*. Lecture Notes in Computer Science (Lecture Notes in Artificial Intelligence), vol. 6097, 2010, str. 222–227, DOI:10.1007/978-3-642-13025-0_24.
- [Hu10] Piotr Marusak: *Application of fuzzy Wiener models in efficient MPC algorithms*. Lecture Notes in Computer Science (Lecture Notes in Artificial Intelligence), vol. 6086, 2010, str. 669–677, DOI:10.1007/978-3-642-13529-3_71.
- [Hu11] Piotr Marusak: *Efektywny obliczeniowo, analityczny algorytm regulacji predykcyjnej bazujący na modelach Wienera*, w pracy pod redakcją K. Malinowskiego i R. Dindorfa: *Postępy automatyki i robotyki, część 2*, Politechnika Świętokrzyska, 2011, ISBN 978–83–88906–49–7, str. 133–142.
- [Hu12] Piotr Marusak: *Advanced prediction method in efficient MPC algorithm based on fuzzy Hammerstein models*. Lecture Notes in Computer Science (Lecture Notes in Artificial Intelligence), vol. 6922, 2011, str. 193–202, DOI:10.1007/978-3-642-23935-9_19.
- [Hu13] Piotr Marusak: *Efficient mechanism of output constraint handling for analytical predictive controllers based on Hammerstein models*, w pracy pod redakcją R. Szewczyka i in.: *Recent advances in automation, robotics and measuring techniques*, Advances in Intelligent Systems and Computing 267, Springer, 2014, ISBN 978–3–319–05352–3, str. 137–146, DOI:10.1007/978-3-319-05353-0_14.
- [Hu14] Piotr Marusak, Suwat Kuntanapreeda: *Output constrained IMC controllers in control systems of electromechanical actuators*. Control Theory and Technology, vol. 13, 2015, str. 245–255, DOI:10.1007/s11768-015-4047-0.

5 Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo–badawczych

5.1 Autorstwo lub współautorstwo innych publikacji naukowych

Część pozostałych publikacji habilitanta można podzielić na następujące grupy tematyczne:

- Seria artykułów dotyczących współdziałania regulatorów predykcyjnych z optymalizacją punktu pracy, w różnych konfiguracjach [20]–[34], [58, 59]. Moim szczególnym zainteresowaniem cieszyły się takie struktury z regulatorami bazującymi na modelach rozmytych ([40, 41, 43, 47]); rekonfiguracja w strukturze zintegrowanej, przeprowadzona w reakcji na awarię elementów wykonawczych jest tematem pracy [39];
- Artykuły dotyczące rekonfiguracji układów sterowania z algorytmami predykcyjnymi po wystąpieniu awarii elementów pomiarowych [37, 38, 46]. W tym przypadku warto zauważyć, że oprócz standardowego podejścia, czyli sterowania w oparciu o wyjście modelu, którym dysponuje algorytm regulacji predykcyjnej, warto zadbać o spełnienie ograniczeń. Przy czym zastosowanie w tym celu poddanego odpowiedniej rekonfiguracji zadania optymalizacji punktu pracy, może przyczynić się do poprawy jakości sterowania;
- Badania związane z projektem nr 4. z rozdz. 5.2, będące owocem prac nad regulatorem pompy ciepła typu powietrze–woda [55], [60]–[62]. Prace te były prowadzone we współpracy

z ekspertami z Wydziału Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej oraz firmy Plum sp. z o. o.;

- Artykuły na temat badania odporności implementacji algorytmów regulacji predykcyjnej na błędy [3]–[13]. Prace w tym zakresie były prowadzone we współpracy z ekspertami z Instytutu Informatyki Politechniki Warszawskiej;
- Artykuły dotyczące modelowania zmian stężenia glukozy we krwi pacjenta chorego na cukrzycę [52] oraz propozycji algorytmów regulacji predykcyjnej mających na celu stabilizację tego stężenia [35].

Brałem również udział w opracowaniu części jednego z rozdziałów wydania III zmienionego i rozszerzonego *Poradnika Inżyniera Elektryka*, który ukazał się nakładem Wydawnictw Naukowo-Technicznych WNT [36] (tematyka obejmująca: algorytmy regulacji IMC, regulację predykcyjną z przesuwającym horyzontem, regulację DMC, modelowanie rozmyte i regulację rozmytą, sztuczne sieci neuronowe, sterowniki PLC i systemy HMI/SCADA).

Ciekawą metodę strojenia rozmytego regulatora predykcyjnego w wersji analitycznej przedstawiłem w pracy [44]. Podejście wykorzystuje zalety oferowane przez modele rozmyte. Na przykładzie zademonstrowano strojenie regulatora polegające na zmianach funkcji przynależności a ostatecznie nietypowy sposób wyznaczania sił odpalenia reguł, w którym są one kombinacją sił odpalenia reguł dwóch regulatorów rozmytych.

Strojenia analitycznego rozmytego regulatora predykcyjnego dotyczy także praca [45]. Tym razem w procesie tym użyta została procedura optymalizacji. Strojenie polega na zmianie kształtu funkcji przynależności. Przy czym dzięki udowodnieniu stabilności wyjściowego układu regulacji przy pomocy konserwatywnego kryterium Tanaki–Sugeno, strojenie odbywa się bez ryzyka utraty stabilności projektowanego układu regulacji. Interesujący jest ostateczny wynik procesu strojenia – uproszczenie struktury regulatora przez eliminację jednego z regulatorów lokalnych.

Artykuł [42] zawiera opis modyfikacji dobrze znanego algorytmu regulacji predykcyjnej DMC. Nowe sformułowanie wykorzystuje ideę wyznaczania trajektorii sterowania jako kombinacji funkcji bazowych. Takie podejście jest uogólnieniem konwencjonalnego algorytmu DMC. Ponadto pokazałem, że dzięki odpowiedniemu doborowi funkcji bazowych można wpływać na zachowanie układu regulacji.

Interesujący jest również artykuł [48], w którym zaproponowałem wykorzystanie w celu wykrywania uszkodzeń faktu, że w algorytmach regulacji predykcyjnej na bieżąco oceniana jest jakość modelu, na którym algorytm bazuje, przez porównywanie jego wyjścia z wartością wyjścia obiektu. Metoda może zostać więc użyta w algorytmach regulacji predykcyjnej dowolnego typu, bazujących zarówno na liniowych, jak i nieliniowych modelach obiektów.

5.2 Udział w projektach badawczych

1. Projekt badawczo-rozwojowy – *Opracowanie i wdrożenie zaawansowanego systemu sterowania (APC) dla instalacji wytwarzania amoniaku* w ramach Projektu sektorowego *INNO-CHEM*; Działanie 1.2 *Sektorowe programy B+R*, I Oś priorytetowa *Wsparcie prowadzenia prac B+R przez przedsiębiorstwa* Programu Operacyjnego *Inteligentny Rozwój 2014-2020*; data rozpoczęcia 13-01-2017, planowana data zakończenia 31-03-2019, wykonawca.
2. Projekt badawczo-rozwojowy – *Optymalizacja kontroli pracy Jednostki Produkcyjnej Nawozy w Grupie Azoty Zakłady Azotowe Kędzierzyn SA pod kątem zmniejszania kosztów procesu wytwarzania nawozów azotowych w ciągu produkcyjnym od amoniaku, poprzez kwas azotowy i neutralizację - Etap I*; data rozpoczęcia 15-05-2017, data zakończenia 31-12-2017, wykonawca.

3. Projekt badawczo-rozwojowy – *Przeprowadzenie usługi modelowania matematycznego oraz opracowania i badania algorytmów regulacji adaptacyjnej w układach aktywnej redukcji hałasu*; data rozpoczęcia 04-11-2013, data zakończenia 30-06-2015, wykonawca.
4. Projekt badawczo-rozwojowy w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka (POIG.01.03.01-00-071/12) – *Opracowanie i konstrukcja regulatora pompy ciepła typu powietrze-woda*; data rozpoczęcia 01-04-2013, data zakończenia 31-10-2015, wykonawca.
5. Projekt badawczo-rozwojowy – *Algorytmy identyfikacji budynku z systemem wentylacji pożarowej oraz algorytmy regulacji systemem napowietrzania i usuwania dymu*; data rozpoczęcia 30-05-2011, data zakończenia 30-06-2012, wykonawca.
6. Projekt badawczo-rozwojowy – *Opracowanie algorytmu regulacji procesem spalania i adaptacyjnego algorytmu określającego zapotrzebowanie obiektu na energię*; data rozpoczęcia 15-11-2010, data zakończenia 30-09-2011, wykonawca.
7. Projekt badawczo-rozwojowy – *Usługi doradcze w zakresie opracowania i weryfikacji algorytmu ekologicznego spalania węgla*; data rozpoczęcia 15-11-2010, data zakończenia 30-08-2011, wykonawca.
8. Projekt MNiSW (508/G/1031/0025) – *Efektywne algorytmy optymalizującego sterowania predykcijnego z modelami neuronowymi i rozmytymi procesów nieliniowych*; data rozpoczęcia 30-06-2009, data zakończenia 29-12-2011, wykonawca.
9. Projekt MNiSW (3T11A005/28) – *Wielozadaniowe algorytmy sterowania predykcijnego*; data rozpoczęcia 17-05-2005, data zakończenia 30-06-2007, wykonawca.
10. Grant Dziekana WEiTI PW – *Analiza efektów błędów w systemach reaktywnych z algorytmami regulacji predykcyjnej*; data rozpoczęcia 01-07-2008, data zakończenia 31-12-2008, wykonawca.
11. Grant Dziekana WEiTI PW – *Badanie wybranych algorytmów regulacji predykcyjnej w dawkowaniu insuliny u chorych na cukrzycę*; data rozpoczęcia 01-07-2008, data zakończenia 31-12-2008, wykonawca.
12. Grant Dziekana WEiTI PW – *Symulacyjne badanie wiarygodności zaawansowanych algorytmów sterowania*; data rozpoczęcia 01-06-2007, data zakończenia 31-12-2007, wykonawca.
13. Grant Dziekana WEiTI PW – *Metody optymalizującego sterowania predykcijnego*; data rozpoczęcia 05-07-2004, data zakończenia 31-12-2004, wykonawca.
14. Grant Dziekana WEiTI PW – *Regulacyjno-optymalizacyjne algorytmy sterowania predykcijnego*; data rozpoczęcia 24-09-2003, data zakończenia 31-12-2003, kierownik.
15. Grant JM Rektora PW – *Diagnostyka urządzeń wykonawczych i jej zastosowanie w układach automatyki tolerujących uszkodzenia*; data rozpoczęcia 01-09-2003, data zakończenia 31-12-2003, wykonawca.
16. Grant Centrum Naukowego Automatyki i Technik Informacyjno-Decyzyjnych (CATID) Politechniki Warszawskiej – *Algorytmy modelowania, regulacji i detekcji uszkodzeń procesów przemysłowych*; data rozpoczęcia 20-03-2003, data zakończenia 31-08-2003, wykonawca.

Bibliografia

- [1] Alberto Bemporad, Manfred Morari, Vivek Dua i Efstratios Pistikopoulos: The explicit linear–quadratic regulator for constrained systems; *Automatica*, 38(1):3–20, 2002.
- [2] Eduardo Camacho i Carlos Bordons: *Model Predictive Control*. Springer–Verlag, London, 1999.
- [3] Piotr Gawkowski, Konrad Grochowski, Maciej Ławryńczuk, Piotr Marusak, Janusz Sosnowski, Piotr Tatjewski: *Testing fault robustness of Model Predictive Control algorithms*. Lecture Notes in Computer Science, vol. 6150, 2010, str. 109–124.
- [4] Piotr Gawkowski, Maciej Ławryńczuk, Piotr Marusak, Janusz Sosnowski, Piotr Tatjewski: *Dependability of Explicit DMC and GPC Algorithms*. 2nd International Multiconference on Computer Science and Information Technology, Wisła, 15–17 października 2007, str. 903–912.
- [5] Piotr Gawkowski, Maciej Ławryńczuk, Piotr Marusak, Janusz Sosnowski, Piotr Tatjewski: *Dependability of the Explicit DMC Algorithm for a Rectification Process*. 2nd International Multiconference on Computer Science and Information Technology, Wisła, 15–17 października 2007, str. 779–788.
- [6] Piotr Gawkowski, Maciej Ławryńczuk, Piotr Marusak, Janusz Sosnowski, Piotr Tatjewski: *Dependability of the Software Implementation of the Explicit DMC Algorithm*. IADIS International Journal on Computer Science and Information Systems, vol. 3, no. 1, 2008, str. 44–58.
- [7] Piotr Gawkowski, Maciej Ławryńczuk, Piotr Marusak, Piotr Tatjewski, Janusz Sosnowski: *Software implementation of explicit DMC algorithm with improved dependability*, w pracy pod redakcją: T. Sobh i in.: *Novel Algorithms and Techniques in Telecommunications, Automation and Industrial Electronics*, Springer, 2008, ISBN 978–1–4020–8736–3, str. 214–219.
- [8] Piotr Gawkowski, Maciej Ławryńczuk, Piotr Marusak, Janusz Sosnowski, Piotr Tatjewski: *Improving dependability of an explicit DMC algorithm software implementation*, w pracy pod redakcją: K. Malinowskiego i L. Rutkowskiego: *Recent advances in control and automation*, Academic Publishing House EXIT, Warszawa 2008, ISBN 978–83–60434–43–7, str. 333–342.
- [9] Piotr Gawkowski, Maciej Ławryńczuk, Piotr Marusak, Janusz Sosnowski, Piotr Tatjewski: *Towards a fault-robust GPC implementation*, w pracy pod redakcją Z. Kowalczyka: *Diagnosis of processes and systems*, Pomorskie Wydawnictwo Naukowo–Techniczne, Gdańsk 2009, ISBN 978–83–926806–3–5, str. 131–140.
- [10] Piotr Gawkowski, Maciej Ławryńczuk, Piotr Marusak, Janusz Sosnowski, Piotr Tatjewski: *Fault sensitivity of explicit DMC and GPC algorithms*. Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems, vol. 3, no. 1, 2009, str. 52–56.
- [11] Piotr Gawkowski, Maciej Ławryńczuk, Piotr Marusak, Piotr Tatjewski, Janusz Sosnowski: *On improving dependability of the numerical GPC algorithm*. European Control Conference 2009, Budapest, Hungary, 23–26 sierpnia 2009, str. 1377–1382.
- [12] Piotr Gawkowski, Maciej Ławryńczuk, Piotr Marusak, Piotr Tatjewski, Janusz Sosnowski: *Dependability comparison of explicit and numerical GPC algorithms*, w pracy pod redakcją M. Iskander i in.: *Technological developments in education and automation*, Springer, 2010, ISBN 978–90–481–3655–1, str. 419–424.

- [13] Piotr Gawkowski, Maciej Ławryńczuk, Piotr Marusak, Janusz Sosnowski, Piotr Tatjewski: *Fail-bounded implementations of the numerical model predictive control algorithms*. Control and Cybernetics, vol. 39, no. 4, 2010, str. 1117–1134
- [14] Fouad Giri, Er-Wei Bai (Eds): *Block-oriented Nonlinear System Identification; Lecture Notes In Control And Information Sciences*. Springer-Verlag, Berlin, 2010.
- [15] Andrzej Janczak: *Identification of nonlinear systems using neural networks and polynomial models: a block-oriented approach*. Springer, Heidelberg, 2005.
- [16] Colin Jones, Eric Kerrigan i Jan Maciejowski: Lexicographic perturbation for multiparametric linear programming with applications to control; *Automatica*, 43(10):1808–1816, 2007.
- [17] Eric Kerrigan i Jan Maciejowski: Feedback min-max model predictive control using a single linear program: robust stability and the explicit solution; *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 14(4):395–413, 2004.
- [18] Józef Korbicz, Jan Kościelny, Zdzisław Kowalczyk i Wojciech Cholewa: *Fault diagnosis: models, artificial intelligence, applications*. Springer-Verlag, Berlin, 2004.
- [19] Jan Kościelny: *Diagnostyka zautomatyzowanych procesów przemysłowych*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa, 2015.
- [20] Maciej Ławryńczuk, Piotr Marusak, Piotr Tatjewski: *Bieżąca optymalizacja punktu pracy procesów regulowanych algorytmem predykcyjnym*. XV Krajowa Konferencja Automatyki, Warszawa, 27–30 czerwca 2005, str. 291–296.
- [21] Maciej Ławryńczuk, Piotr Marusak, Piotr Tatjewski: *Optimising predictive range control for a distillation process*. 11th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics MMAR 2005, Międzyzdroje, 29 sierpnia – 1 września 2005, str. 379–384.
- [22] Maciej Ławryńczuk, Piotr Marusak, Piotr Tatjewski: *Integrating predictive control with steady-state optimisation*. 12th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics MMAR 2006, Międzyzdroje, 28–31 sierpnia 2006, str. 445–452.
- [23] Maciej Ławryńczuk, Piotr Marusak, Piotr Tatjewski: *Struktury i algorytmy współdziałania regulacji predykcyjnej i bieżącej optymalizacji ekonomicznej*. *Pomiary Automatyka Kontrola* nr 10/2007, str. 55–61.
- [24] Maciej Ławryńczuk, Piotr Marusak, Piotr Tatjewski: *An Integrated Structure with Economic Optimisation and Constrained Model Predictive Control: an Application to a MIMO pH Reactor*. IEEE Region 8 Conference on Computer as a Tool EUROCON 2007, Warszawa, 9–12 września 2007, str. 785–792.
- [25] Maciej Ławryńczuk, Piotr Marusak, Piotr Tatjewski: *Set-Point Optimisation and Predictive Constrained Control for Fast Feedback Controlled Processes*. 13th IEEE/IFAC International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics MMAR 2007, Szczecin, 27–30 sierpnia 2007, str. 357–362.
- [26] Maciej Ławryńczuk, Piotr Marusak, Piotr Tatjewski: *An Efficient MPC Algorithm Integrated with Economic Optimisation for MIMO Systems*. 13th IEEE/IFAC International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics MMAR 2007, Szczecin, 27–30 sierpnia 2007, str. 295–302.

- [27] Maciej Ławryńczuk, Piotr Marusak, Piotr Tatjewski: *Multilayer and integrated structures for predictive control and economic optimisation*. 11th IFAC/IFORS/IMACS/IFIP Symposium on Large Scale Systems: Theory and Applications, Gdańsk, 23–25 lipca 2007, CD-ROM, referat nr 60.
- [28] Maciej Ławryńczuk, Piotr Marusak, Piotr Tatjewski: *Economic efficacy of multilayer constrained predictive control structures: an application to a MIMO neutralisation reactor*. 11th IFAC/IFORS/IMACS/IFIP Symposium on Large Scale Systems: Theory and Applications, Gdańsk, 23–25 lipca 2007, CD-ROM, referat nr 93.
- [29] Maciej Ławryńczuk, Piotr Marusak, Piotr Tatjewski: *Efficient model predictive control integrated with economic optimisation*. 15th Mediterranean Conference on Control and Automation MED'07, Athens, Greece, 27–29 czerwca 2007, CD-ROM, referat nr T27-001.
- [30] Maciej Ławryńczuk, Piotr Marusak, Piotr Tatjewski: *Optymalizujące sterowniki predykcyjne w układach sterowania z ograniczeniami*, w pracy pod redakcją: K. Malinowskiego i L. Rutkowskiego: *Sterowanie i automatyzacja: aktualne problemy i ich rozwiązania*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2008, ISBN 978-83-60434-42-0, str. 437–446.
- [31] Maciej Ławryńczuk, Piotr Marusak, Piotr Tatjewski: *Cooperation of model predictive control with steady-state economic optimisation*. *Control and Cybernetics*, vol. 37, no. 1, 2008, str. 133–158 (MNIŚW: 15; IF: 0.69).
- [32] Maciej Ławryńczuk, Piotr Marusak, Piotr Tatjewski: *Piecewise linear steady-state target optimization in control systems with MPC: a case study*. 17th IFAC World Congress, Seoul, Korea, 6–11 lipca 2008, str. 13169–13174.
- [33] Maciej Ławryńczuk, Piotr Marusak, Piotr Tatjewski: *On cooperation of set-point optimisation and predictive control based on Hammerstein models*. 7th Workshop on Advanced Control and Diagnosis ACD 2009, Zielona Góra, 19–20 listopada 2009, CD-ROM.
- [34] Maciej Ławryńczuk, Piotr Marusak, Piotr Tatjewski: *Współdziałanie regulacji predykcyjnej i bieżącej optymalizacji punktu pracy w strukturach sterowania z modelami Wienera*. *Pomiary Automatyka Robotyka* nr 2/2010, str. 470–480.
- [35] Maciej Ławryńczuk, Piotr Marusak, Piotr Tatjewski: *Efficient predictive control algorithms based on soft computing approaches: application to glucose concentration stabilization*, w pracy pod redakcją M. Iskander i in.: *Technological developments in education and automation*, Springer, 2010, ISBN 978-90-481-3655-1, str. 425–430.
- [36] Andrzej Marusak, Piotr Marusak, Andrzej Masłowski: *Automatyka i robotyka*, w pracy zbiorowej: *Poradnik inżyniera elektryka*, tom 1 (wydanie III zmienione i rozszerzone), Wydawnictwa Naukowo-Techniczne WNT, Warszawa 2009, ISBN 978-83-204-2937-4, str. 647–737.
- [37] Piotr Marusak: *Predictive control algorithms in constrained control systems tolerating sensor faults*. 12th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics MMAR 2006, Międzyzdroje, 28–31 sierpnia 2006, str. 797–804.
- [38] Piotr Marusak: *Predictive Controllers Integrated with Economic Optimization in Constrained Control Systems Tolerating Sensor Faults*. 13th IEEE/IFAC International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics MMAR 2007, Szczecin, 27–30 sierpnia 2007, str. 535–542.

- [39] Piotr Marusak: *Predictive controllers integrated with economic optimization tolerating actuator faults: application to a nonlinear plant*, w pracy pod redakcją: J. Korbicz, K. Patana, M. Kowala: *Fault diagnosis and fault tolerant control*, Academic Publishing House EXIT, Warszawa 2007, ISBN 978-83-60434-32-1, str. 173-185.
- [40] Piotr Marusak: *Efficient fuzzy predictive algorithms with integrated economic optimization: a case study*. 3rd IFAC Workshop on Advanced Fuzzy and Neural Control AFNC 2007, Valenciennes, Francja, 29-30 października 2007, CD-ROM, referat nr MO5-1.
- [41] Piotr Marusak: *Rozmyte modele Takagi-Sugeno w układach zintegrowanej regulacji predykcyjnej i optymalizacji punktu pracy*. *Pomiary Automatyka Robotyka* nr 2'2008, str. 571-580.
- [42] Piotr Marusak: *DMC algorithm with basis functions*, w pracy pod redakcją: K. Malinowskiego i L. Rutkowskiego: *Recent advances in control and automation*, Academic Publishing House EXIT, Warszawa 2008, ISBN 978-83-60434-43-7, str. 141-150.
- [43] Piotr Marusak: *Efficient fuzzy predictive economic set-point optimizer*. *Lecture Notes in Computer Science (Lecture Notes in Artificial Intelligence)*, vol. 5097, 2008, str. 273-284.
- [44] Piotr Marusak: *On design of fuzzy analytical predictive controllers: a case study*, w pracy pod redakcją: L. Rutkowskiego, R. Tadeusiewicz, L.A. Zadeha, J. Zurady: *Computational intelligence: methods and applications*, Academic Publishing House EXIT, Warszawa 2008, ISBN 978-83-60434-50-5, str. 93-102.
- [45] Piotr Marusak: *Machine tuning of stable analytical fuzzy predictive controllers*. *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 5495, 2009, str. 430-439.
- [46] Piotr Marusak: *Disturbance measurement utilization in easily reconfigurable fuzzy predictive controllers: sensor fault tolerance and other benefits*. *Lecture Notes in Computer Science (Lecture Notes in Artificial Intelligence)*, vol. 6086, 2010, str. 551-559.
- [47] Piotr Marusak: *Efficient predictive control and set-point optimization based on a single fuzzy model*. *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 6594, 2011, str. 215-224.
- [48] Piotr Marusak: *Wykorzystanie właściwości algorytmów regulacji predykcyjnej w detekcji uszkodzeń*. *Pomiary Automatyka Robotyka* nr 2/2012, str. 338-343.
- [49] Hannah Michalska i David Mayne: *Robust receding horizon control of constrained nonlinear systems*; *IEEE Transactions on Automatic Control*, 38(11):1623-1632, 1993.
- [50] Krzysztof Patan: *Artificial Neural Networks for the Modelling and Fault Diagnosis of Technical Processes*. Springer-Verlag, Berlin, 2008.
- [51] S.Joe Qin i Thomas Badgwell: *A survey of industrial model predictive control technology*; *Control Engineering Practice*, 11(7):733-764, 2003.
- [52] Dariusz Radomski, Maciej Ławryńczuk, Piotr Marusak, Piotr Tatjewski: *Modeling of glucose concentration dynamics for predictive control of insulin administration*. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, vol. 30, 2010, str. 41-53
- [53] John Rossiter: *Model-Based Predictive Control*. CRC Press, Boca Raton, 2003.
- [54] John Rossiter i Jacques Richalet: *Handling constraints with Predictive Functional Control of unstable processes*; *Proceedings of the American Control Conference, Anchorage, AK, USA*, pages 4746-4751, 2002.

- [55] Marian Rubik, Piotr Ziętek, Piotr Tatjewski, Piotr Marusak, Maciej Ławryńczuk, Michał Szumski, Maciej Szumski: *Wpływ sterowania elektronicznym zaworem rozprężnym i wydajnością sprężarki na parametry pracy pompy ciepła typu powietrze-woda*. Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja, vol. 1, nr 10, 2018, str. 22–28.
- [56] Pierre Scokaert, David Mayne i James Rawlings: Suboptimal model predictive control (feasibility implies stability); *IEEE Transactions on Automatic Control*, 44(3):648–654, 1999.
- [57] Piotr Tatjewski: *Sterowanie zaawansowane obiektów przemysłowych. Struktury i algorytmy. Wydanie drugie zmienione*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa, 2016.
- [58] Piotr Tatjewski, Maciej Ławryńczuk, Piotr Marusak: *Linking nonlinear steady-state and target set-point optimisation for model predictive control*. International Conference Control 2006, Glasgow, Scotland, 30 sierpnia – 1 września 2006, CD-ROM, referat nr 172.
- [59] Piotr Tatjewski, Maciej Ławryńczuk, Piotr Marusak: *Integrated predictive optimiser and constraint governor for processes with basic feedback control*. European Control Conference 2009, Budapest, Hungary, 23–26 sierpnia 2009, str. 3359–3364.
- [60] Piotr Tatjewski, Maciej Ławryńczuk, Piotr Marusak, Marian Rubik, Piotr Ziętek, Maciej Szumski: *Założenia do konstrukcji regulatora pomp ciepła systemu powietrze/woda (a/w)*, w pracy pod redakcją M. Beslera i M. Fijewskiego: *Air, Heat & Energy in Buildings 2014*, Politechnika Wroclawska, Wydział Inżynierii Środowiska Instytut Klimatyzacji i Ogrzewnictwa, 2014, ISBN 978-83-929704-8-4, str. 481–486.
- [61] Piotr Tatjewski, Maciej Ławryńczuk, Piotr Marusak, Marian Rubik, Piotr Ziętek, Maciej Szumski, Michał Szumski: *Opracowanie i konstrukcja regulatora pompy ciepła typu powietrze-woda: modelowanie obiektu*. Pomiary Automatyka Robotyka nr 1/2015, str. 20–28.
- [62] Piotr Tatjewski, Maciej Ławryńczuk, Piotr Marusak, Marian Rubik, Piotr Ziętek, Maciej Szumski, Michał Szumski: *Design and implementation of the air/water heat pump controller with increased coefficient of performance*. 21st IEEE Conference on Methods and Models in Automation and Robotics MMAR 2016, Międzyzdroje, 29 sierpnia–1 września 2016, str. 959–964.
- [63] Petter Tondell, Tor Johansen i Alberto Bemporad: An algorithm for multiparametric quadratic programming and explicit MPC solutions; *Automatica*, 39(3):489–497, 2003.
- [64] Marcin Witczak: *Modelling and estimation strategies for fault diagnosis of non-linear systems: from analytical to soft computing approaches*. Springer-Verlag, Berlin, 2007.

P. Marusak