AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH

DYSCYPLINA AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA I ELEKTROTECHNIKA

AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Niestandardowe metody identyfikacji i obserwacji stanu ciągłych modeli liniowych i rozszerzenie ich funkcjonalności dla celów wielowymiarowego sterowania adaptacyjnego procesem kondycjonowania szkła

Autor: mgr inż. Michał Drapała

Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Witold Byrski

Praca wykonana: Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Katedra Automatyki i Robotyki

Kraków, 2022

1. Wstęp

Sterowanie procesami przemysłowymi jest podstawowym obszarem zastosowań automatyki. Nowoczesne systemy automatycznej regulacji pozwalają na realizację skomplikowanych algorytmów sterowania działających w oparciu o zadany model dynamiki. Pomimo to, w praktyce przemysłowej najczęściej spotyka się jedynie proste pętle regulacji wykorzystujące regulatory PID. W przypadku procesów wielowymiarowych, dla których występują sprzężenia wewnętrzne, często rozwiązanie takie nie pozwala na w efektywną pracę danej instalacji, pomimo zapewnienia stabilności procesu. Dużym problemem są również powszechne zakłócenia i szumy pomiarowe, których wpływu często nie udaje się skompensować.

Przykładem wspomnianego procesu wielowymiarowego może być kondycjonowanie, stanowiące finalną część produkcji szkła opakowaniowego. Podczas tej procedury, temperatura roztopionego stopu szklarskiego musi zostać ustabilizowana z dokładnością do $1^{o}C$ według zadanego profilu, co odbywa się w długich ceramicznych kanałach nazywanych zasilaczami szklarskimi. Podczas kondycjonowania ujawnia się wiele wspomnianych poprzednio problemów związanych ze sterowaniem. Przedmiotem rozprawy doktorskiej są badania dotyczące wykorzystania całkowych metodologii identyfikacji parametrów i obserwacji stanu liniowych modeli MISO (Multiple Input Single Output) z czasem ciągłym do opisu dynamiki wspomnianego procesu i ich wykorzystanie podczas syntezy nowych algorytmów sterowania.

2. Tezy i zakres pracy

Zakres pracy zakładał przygotowanie adaptacyjnego algorytmu identyfikacji modeli procesu kondycjonowania szkła, który mógłby działać w czasie rzeczywistym podczas pracy instalacji. W dalszej części badań opracowano bazujące na nim algorytmy sterowania procesem.

Sformułowano dwie tezy rozprawy:

- Opracowana adaptacyjna metoda identyfikacji dla ciągłych liniowych układów MISO, bazująca na metodzie funkcji modulujących i wykorzystująca całkowe obserwatory stanu, pozwala na dokładne odwzorowanie dynamiki nieliniowego procesu kondycjonowania szkła.

- Stworzone adaptacyjne wersje algorytmów sterowania predykcyjnego, wykorzystujące zidentyfikowane modele z czasem ciągłym, pozwalają na efektywne sterowanie procesem kondycjonowania szkła.

3. Najważniejsze wyniki pracy

Badania opisane w pracy dotyczyły kilku obszarów tematycznych. Oprócz samych algorytmów identyfikacji i sterowania, zakładały również stworzenie symulacyjnego modelu pojedynczej strefy zasilacza. Najważniejsze problemy dyskutowane w rozprawie opisano krótko w poniższych punktach.

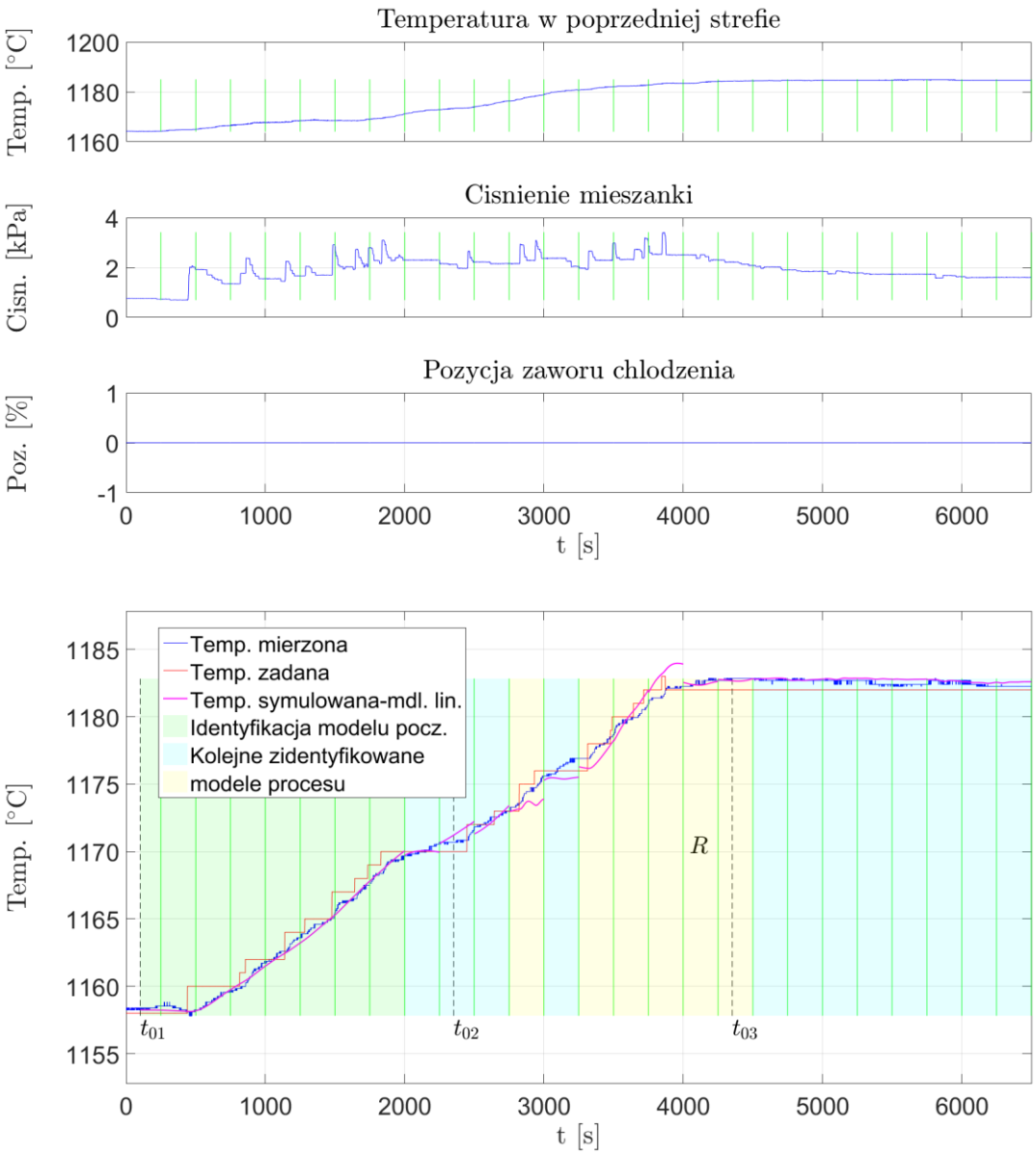
3.1. Metoda adaptacyjnej identyfikacji liniowych modeli dynamiki procesu kondycjonowania szkła

Topienie szkła jest skomplikowanym procesem fizyko-chemicznym. Do jego opisu stosuje się najczęściej układ trzech równań różniczkowych o parametrach rozłożonych: równania transportu ciepła, równania Naviera-Stokesa oraz równania zachowania masy dla cieczy nieściśliwej [1, 2]. W przypadku samego procesu kondycjonowania, stosowany jest również uproszczony model jednowymiarowy oparty o równanie transportu ciepła [3].

Zastosowanie tego typu modeli w rzeczywistych instalacjach przemysłowych jest często niemożliwe z uwagi na ich komplikację, jak również często nieznajomość wielu parametrów pracy instalacji. Zamiast nich, wykorzystywane są często prostsze modele liniowe zdolne do opisu dynamiki procesu w pobliżu danego punktu pracy. Modele tego typu mogą być identyfikowane w oparciu o dane procesowe.

W pracy wykorzystane metodę funkcji modulujących dla układów z czasem ciągłym [4] do opisu dynamiki pojedynczej strefy zasilacza szklarskiego. Wprowadzono modyfikację standardowego algorytmu dla układów z wieloma wejściami i jednym wyjściem (MISO), która zakłada iteracyjną reidentyfikację poszczególnych podsystemów z wykorzystaniem metody zmiennych instrumentalnych. Pozwala ona na otrzymanie modeli podsystemów z różnymi mianownikami transmitancji, dzięki czemu możliwy jest dokładniejszy opis dynamiki opisywanego zjawiska.

Działanie algorytmu zostało zweryfikowane dla historycznych danych procesowych, pochodzących z rzeczywistej instalacji kondycjonowania szkła. Eksperymenty zostały przeprowadzone dla dwóch ostatnich stref zasilacza. Dla pierwszej z nich temperatura roztopionego szkła mogła być regulowana za pomocą ciśnienia mieszanki gazowo-powietrznej i zaworu regulacyjnego powietrza chłodzenia. W przypadku drugiej ze stref możliwe były jedynie zmiany pierwszego z wymienionych parametrów pracy. W obydwu przypadkach uwzględniono dodatkowo wpływ temperatury napływającego szkła z poprzedniej strefy zasilacza na temperaturę mierzoną w strefie bieżącej. Przykładowe wyniki eksperymentu zamieszczono na rysunku 1 (podrozdział 6.4).



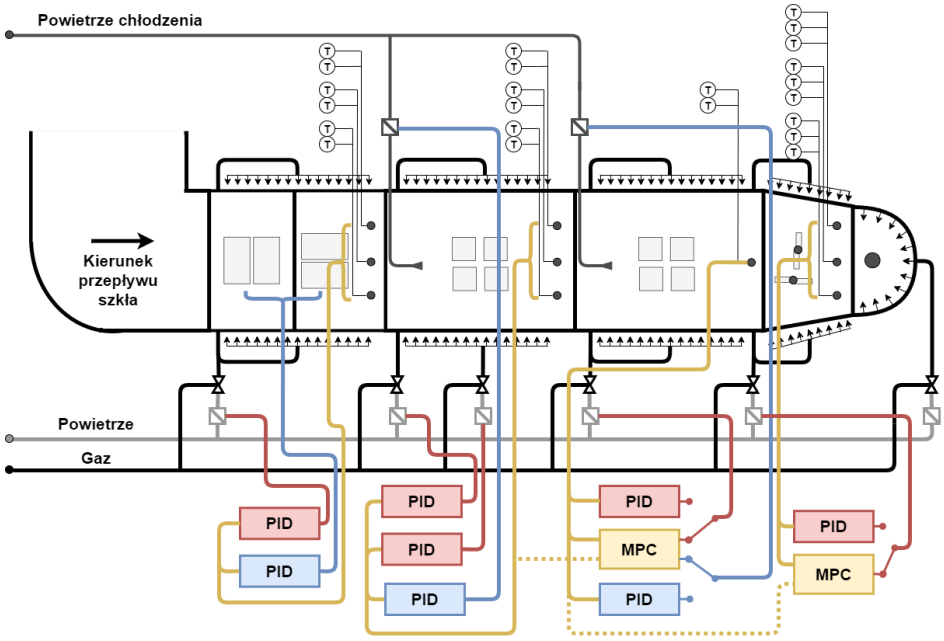
Rysunek 1. Sygnały wejściowe i symulowana odpowiedź modelu w porównaniu z temperaturą mierzoną w strefie zasilacza

Różnymi kolorami oznaczono interwały czasowe, w których obowiązywały kolejne modele procesu. Pierwszy przedział, zaznaczony na zielono, dotyczy identyfikacji początkowego modelu systemu. Przerywane linie oznaczają kolejne punkty linearyzacji. Różowa linia odnosi się do przewidywanego wyjścia systemu wyliczonego na drodze symulacji. Podczas symulacji posłużono się dokładnymi obserwatorami stanu [5] w celu wyznaczenia warunków początkowych na krańcach kolejnych interwałów.

3.2. Regulator predykcyjny z kompensacją wpływu mierzalnych zakłóceń

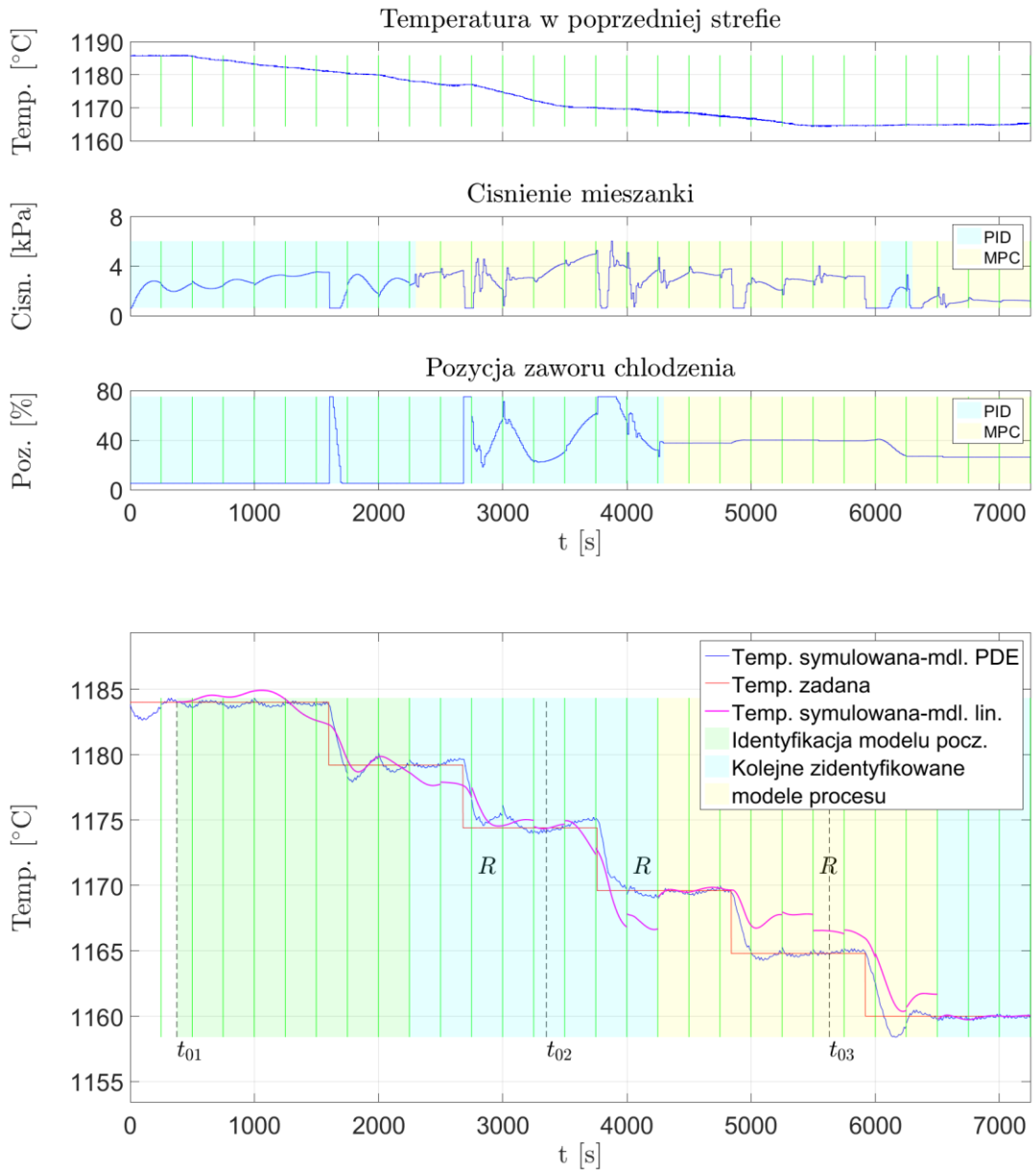
W oparciu o stworzony poprzednio algorytm identyfikacji, zaimplementowano regulator predykcyjny wykorzystujący model systemu w postaci równań stanu z czasem ciągłym. Użyta idea została opisana w pracy [6] i opiera się o wykorzystanie ortonormalnych funkcji Laguerre'a podczas wyliczania pochodnych przyszłych sygnałów sterujących. W porównaniu z oryginalnym algorytmem, dodano modyfikację polegającą na kompensacji wpływu temperatury szkła w poprzedniej strefie zasilacza podczas wyliczania sterowań. Pozwoliło to z wyprzedzeniem reagować na wspomniane mierzalne zakłócenie. Dodatkowo, w trakcie wyliczania wartości sygnału sterującego w kolejnych chwilach próbkowania, zastosowano filtr Kalmana do uzyskania potrzebnej wartości stanu systemu pomiędzy tymi próbkami.

Podobnie jak poprzednio, przeprowadzono eksperymenty symulacyjne dla dwóch ostatnich stref zasilacza, dla których regulatory predykcyjne zastąpiły istniejące regulatory PID. Te drugie są jedynie używane pomocniczo w przypadku gdy nie są dostępne modele dynamiki dla danego wejścia systemu. Schemat pętli regulacji dla analizowanego zasilacza przedstawiono na rysunku 2 (porozdział 8.1).



Rysunek 2. Pętle regulacji temperatury szkła w strefach zasilacza

Eksperymenty potwierdziły, że zaimplementowany regulator predykcyjny z czasem ciągłym jest w stanie ustabilizować zadaną temperaturę szkła, jednocześnie minimalizując przeregulowania. Zaadoptowane podejście na ogół sprawdzało się lepiej niż w przypadku klasycznego algorytmu z czasem dyskretnym. Przykładowe wyniki działania regulatora zaprezentowano na rysunku 3 (podrozdział 8.5).

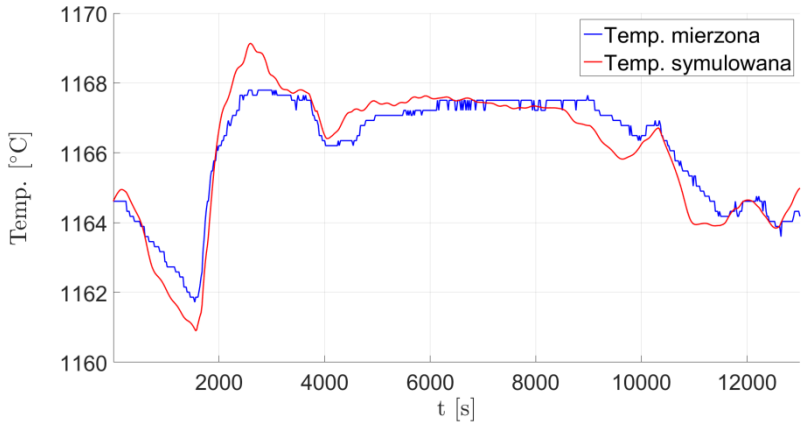


Rysunek 3. Sygnały wejściowe i symulowana odpowiedź modelu dla regulatora predykcyjnego z czasem ciągłym

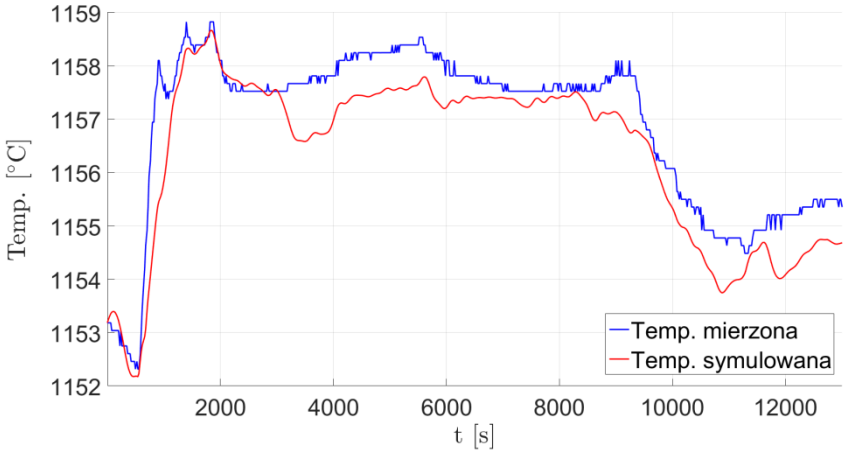
W pracy przeprowadzono również eksperymenty z optymalizacją wartości zadanych temperatur w stanie ustalonym na podstawie zidentyfikowanych modeli. Ich wyniki przedstawiono w podrozdziale 8.7.

3.3. Środowisko testowe pozwalające na sprawdzenie działania algorytmów identyfikacji i sterowania

Opracowane w ramach pracy algorytmy identyfikacji i sterowania zostały sprawdzone z wykorzystaniem stworzonego środowiska testowego. Model strefy zasilacza opracowano na podstawie jednowymiarowego modelu w postaci nieliniowego cząstkowego równania różniczkowego opisanego w pracy [3]. Oryginalny model, uwzględniający pojedyncze wejście w postaci ciśnienia mieszanki gazowo-powietrznej, rozszerzono o dodatkowe sterowanie w postaci położenia zaworu powietrza chłodzenia, dzięki czemu możliwa była symulacja zmian temperatury roztopionego szkła w obydwu analizowanych strefach zasilacza. Wartości parametrów modeli zostały dobrane na podstawie zarejestrowanych danych historycznych. Porównanie symulowanych temperatur szkła z zarejestrowanymi danymi procesowymi przedstawiono na rysunkach 4 i 5.



Rysunek 4. Porównanie symulowanego wyjścia modelu PDE z temperaturą mierzoną dla modelu strefy zasilacza z podwójnym sterowaniem



Rysunek 5. Porównanie symulowanego wyjścia modelu PDE z temperaturą mierzoną dla modelu strefy zasilacza z pojedynczym sterowaniem

Symulacja obiektu fizycznego była przeprowadzana w środowisku MATLAB, podobnie jak eksperymenty opisane w rozdziale 8. pracy. Dodatkowo najważniejsze algorytmy identyfikacji i sterowanie procesem zostały zaimplementowane w wielowątkowej aplikacji działającej w systemie operacyjnym czasu rzeczywistego QNX 7.1. Jej opis zawarto w rozdziale 9. pracy. Zamieszczono tam również wyniki eksperymentów, w których aplikacja odpowiadała za sterowanie symulowanym systemem złożonym z dwóch stref zasilacza szklarskiego.

4. Podsumowanie

W dysertacji została przedyskutowana idea wykorzystania niestandardowych algorytmów identyfikacji i obserwacji stanu systemów z czasem ciągłym dla procesu kondycjonowania szkła. Podczas badań wyniknęła konieczność modyfikacji matematycznych algorytmów w celu umożliwienia ich implementacji w rzeczywistym systemie sterowania komputerowego. W ramach wykonanych prac stworzono adaptacyjny algorytm identyfikacji modeli procesu, który został przetestowany dla danych historycznych, pochodzących z rzeczywistej instalacji produkcji szkła. W pracy dokonano również syntezy modeli dynamiki zasilaczy szklarskich w postaci cząstkowych równań różniczkowych. W dalszych rozdziałach doktoratu przedstawiono algorytmy regulacji predykcyjnej i ich modyfikacje służące dostosowaniu do specyfiki procesu kondycjonowania. Zostały one przetestowane dla modeli stref zasilacza w postaci wspomnianych poprzednio równań cząstkowych.

Przeprowadzone eksperymenty pozwoliły zweryfikować tezy przedstawione na początku rozprawy. Na podstawie wyników przedstawionych w rozdziale 6 można stwierdzić, że dynamika analizowanego procesu przemysłowego jest odzwierciedlana z wystarczającą dokładnością za pomocą otrzymanych modeli liniowych. Natomiast rezultaty otrzymane dla postawionych zadań sterowania, zaprezentowane w rozdziałach 8 i 9, świadczą o możliwości wykorzystania stworzonego algorytmu identyfikacji podczas strojenia regulatora predykcyjnego i optymalizacji punktów pracy instalacji w stanie ustalonym.

5. Publikacje autora rozprawy

1. W. Byrski, **M. Drapała**, J. Byrski. “An Adaptive Identification Method Based on the Modulating Functions Technique and Exact State Observers for Modeling and Simulation of a Nonlinear MISO Glass Melting Process”. In: *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science* 29.4 (2019), pp. 739–757. doi: 10.2478/amcs-2019-0055

2. W. Byrski, **M. Drapała**. “Adaptive Identification Method for Simulation and Control of Glass Melting Process”. In: *2019 24th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*. Międzyzdroje, Poland, 2019, pp. 133–138. doi: 10.1109/MMAR.2019.8864721

3. W. Byrski, **M. Drapała**. “An Algebraic Approach to Solving the Problem of Identification by the Use of Modulating Functions and Convolution Filter. Glass Conditioning Process”. In: *Advanced, Contemporary Control — Proceedings of KKA 2020 - The 20th Polish Control Conference, Łódź, Poland, 2020*. Ed. by A. Bartoszewicz, J. Kabziński, and J. Kacprzyk. Vol. 1196. Advances in Intelligent Systems and Computing. Springer, 2020, pp. 80–91. doi: 10.1007/978-3-030-50936-1_7

4. W. Byrski, **M. Drapała**, J. Byrski. “New On-line Algorithms for Modelling, Identification and Simulation of Dynamic Systems Using Modulating Functions and Non-asymptotic State Estimators: Case Study for a Chosen Physical Process”. In: *International Conference of Computer Science 2021*. Ed. by M. Paszyński et al. Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 284–297. doi: 10.1007/978-3-030-77970-2_22

5. **M. Drapała**, W. Byrski. “Continuous-Time Model Predictive Control with Disturbances Compensation for a Glass Forehearth”. In: *2021 25th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*. Międzyzdroje, Poland, 2021, pp. 366-371. doi: 10.1109/MMAR49549.2021.9528433

6. W. Byrski, **M. Drapała**. “A New Version of the On-Line Adaptive Non-standard Identification Procedure for Continuous-Time MISO Physical Processes”. In: *Intelligent and Safe Computer Systems in Control and Diagnostics, DPS 2022*. Ed. by Z. Kowalczuk. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 545. Springer, Cham,, pp. 423-436. doi: 10.1007/978-3-031-16159-9_34

7. W. Byrski, **M. Drapała**. “On-line process identification using the Modulating Functions Method and non-asymptotic state estimation”. In: *Archives of Control Sciences*, 32.3 (2022), pp. 535-555. doi: 10.24425/acs.2022.142845

Literatura

[1] R. G. C. Beerkens. “Modeling of the Melting Process in Industrial Glass Furnaces”. In: *Mathematical Simulation in Glass Technology*. Ed. by H. Loch and D. Krause. Schott Series on Glass and Glass Ceramics. Springer, 2002. Chap. 2.1, pp. 17–73.

[2] L. Huisman. “Control of glass melting processes based on reduced CFD models”. PhD thesis. Technische Universiteit Eindhoven, 2005.

[3] S. Henkel, A. Kharitonov, and O. Sawodny. “Modelling and Optimisation of a Glass Feeder Considered as a Distributed Parameter System”. In: *SICE Annual Conference 2007*. Kagawa. Japan, 2007, pp. 2950–2954.

[4] W. Byrski and J. Byrski. “The role of parameter constraints in EE and OE methods for optimal identification of continuous LTI models”. In: *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science* 22.2 (2012), pp. 379–388.

[5] J. Byrski and W. Byrski. “State estimators and observers for continuous and discrete linear systems. Part 2. Integral observers for exact state reconstruction”. In: *Science, Technology and Innovation* 5.2 (2019), pp. 23–33.

[6] L. Wang. *Model predictive control system design and implementation using MATLAB*. Advances in Industrial Control. London: Springer, 2009.