

Dr hab. inż. Jerzy Kasprzyk, prof. Pol. Śl.  
Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki  
Politechnika Śląska  
ul. Akademicka 16  
44-100 Gliwice

Gliwice, 18.08.2022

S E K R E T A R I A T  
Rady Dyscypliny AEE

Wpłynęło dnia ..... 29. 08. 2022 .....  
Zarejestrowano pod nr .....  
Podpis .....

## RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

**mgr. inż. Michała Drapały pt. Niestandardowe metody identyfikacji i obserwacji stanu modeli liniowych i rozszerzenie ich funkcjonalności dla celów wielowymiarowego sterowania adaptacyjnego procesem kondycjonowania szkła.**

**Promotor rozprawy: Prof. dr hab. inż. Witold Byrski**

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, dr hab. inż. Ryszarda Sroki, prof. AGH z dnia 2.06.2022 o powołaniu przez Radę Dyscypliny na recenzenta ww. rozprawy doktorskiej oraz Umowa na wykonanie recenzji z dnia 23.06.2022.

### 1. Zakres, charakter i cel rozprawy

Do podstawowych zastosowań automatyki należy sterowanie procesami przemysłowymi. Przedmiotem recenzowanej rozprawy jest wykorzystanie zaawansowanych algorytmów identyfikacji i regulacji do sterowania konkretnym procesem przemysłowym, jakim jest kondycjonowanie szkła. Ze względu na nieliniowy charakter jest to proces trudny do modelowania i sterowania. Autor wykorzystuje tu znane z literatury metody wprowadzając do nich odpowiednie modyfikacje (które nazywa funkcjonalnościami) w celu ich zastosowania dla wybranego procesu. Praca zawiera opis teoretyczny wybranych metod identyfikacji i sterowania oraz szczegóły dotyczącej ich implementacji. Przedstawiono wyniki identyfikacji dla danych historycznych pochodzących z procesu kondycjonowania szkła, oraz wyniki badań algorytmów regulacji predykcyjnej uzyskanych na drodze komputerowej symulacji modelu matematycznego tego procesu. Tematykę recenzowanej rozprawy należy uznać za aktualną i ważną.

### 2. Zawartość rozprawy

Rozprawa liczy 185 stron, w tym 135 stron to tekst rozprawy podzielony na dziesięć rozdziałów, reszta to załączniki, bibliografia oraz spis oznaczeń. Układ rozprawy jest prawidłowy. Autor przechodzi od ogólnego postawienia problemu, poprzez opis metod modelowania do przedstawienia konkretnego procesu przemysłowego i jego identyfikacji, po czym omawia wybrane algorytmy sterowania oraz ich implementację z wykorzystaniem otrzymanych modeli.

Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie do tematyki rozprawy. Autor przedstawił motywację do podjęcia tematu, cel pracy oraz sformułował dwie tezy pracy, w których stwierdza, że opracowana metoda identyfikacji pozwala na dokładne odwzorowanie dynamiki procesu kondycjonowania szkła, a stworzone wersje algorytmów sterowania predykcyjnego pozwalają na efektywne sterowanie tym procesem.

Rozdział drugi zawiera przegląd metod identyfikacji systemów z czasem ciągłym. Autor wyróżnił tu trzy grupy metod: metody bazujące na wielokrotnej filtracji sygnałów, metody wykorzystujące spektralną charakterystykę sygnałów oraz metodę funkcji modulujących, która została przez niego wykorzystana w dalszej części pracy. Zaproponował także metodę reidentyfikacji opartą na podziale systemu MISO (Multi-Input-Single-Output) na podsystemy o jednym wejściu.

W rozdziale trzecim Autor omówił zagadnienie odtwarzania stanu systemu przy wykorzystaniu obserwatora. Przedstawił podstawy tworzenia obserwatorów asymptotycznych oraz obserwatora dokładnego dla zadanego skończonego przedziału czasu, umożliwiającego wyznaczenie stanu początkowego i końcowego na drodze całkowania.

Rozdział następny obejmuje opis procesu kondycjonowania szkła, na którym Doktorant testował opracowane metody identyfikacji i sterowania. Omówiony został także model matematyczny procesu, na podstawie którego wykonywano badania symulacyjne.

Problem symulacji zasilacza z rozbiciem na strefę ze sterowanym ciśnieniem mieszanki oraz strefę ze sterowanym ciśnieniem i zaworem chłodzenia został przedstawiony w rozdziale piątym. Autor dokonał także weryfikacji otrzymanych modeli oraz przedstawił implementację opracowanych algorytmów symulacji.

Rozdział szósty należy do najważniejszych rozdziałów pracy. Omówiono ogólne założenia dla procedury identyfikacji, reprezentację modelu o parametrach skupionych oraz zastosowany algorytm identyfikacji. Następnie Autor przedstawił wyniki eksperymentów przeprowadzonych na danych historycznych uzyskanych z procesu kondycjonowania szkła wraz z podsumowaniem.

Sterowanie predykcyjne jest tematem rozdziału siódmego. Wymieniono najważniejsze algorytmy MPC (Model Predictive Control) oraz przedstawiono dwa algorytmy wykorzystane w dalszej części pracy, tj. algorytm MPC dla obiektów opisanych równaniami stanu z czasem dyskretnym i równaniami stanu z czasem ciągłym. Algorytmy te zostały zmodyfikowane w celu wprowadzenia ograniczeń na sygnały sterujące oraz umożliwienia kompensacji zakłóceń mierzalnych.

Rozdział ósmy, podobnie jak szósty, należy do najważniejszych rozdziałów rozprawy. Rozdział zawiera opis adaptacyjnego regulatora predykcyjnego do sterowania temperaturą w strefach zasilacza. Omówiono modyfikacje algorytmu identyfikacji wykorzystywanego do strojenia algorytmów regulacji oraz implementację algorytmów MPC z czasem dyskretnym i ciągłym. Następnie przedstawiono wyniki badań symulacyjnych dla obu algorytmów i ich podsumowanie. Zaproponowano także wprowadzenie optymalizacji punktów pracy instalacji kondycjonowania szkła.

Ponieważ dotychczasowe badania oparte były na symulacjach w środowisku Matlab, stąd w rozdziale dziewiątym przedstawiono możliwość implementacji opracowanych algorytmów identyfikacji i sterowania w systemie czasu rzeczywistego. Autor zdecydował się na wykorzystanie systemu operacyjnego QNX 7.1, dla którego napisał aplikację testową.

Rozdział dziesiąty stanowi podsumowanie rozprawy zawierające wyszczególnienie najważniejszych jej rezultatów z podkreśleniem, że w pracy wykazano prawdziwość obu postawionych tez rozprawy.

W załącznikach przedstawiono otrzymane wartości parametrów modeli dla poszczególnych eksperymentów.

### **3. Opinia merytoryczna**

#### **Ocena zastosowanych metod badawczych**

Oceniana rozprawa porusza trudny problem identyfikacji i sterowania procesem przemysłowym o nieliniowej charakterystyce. Autor zastosował tu ciekawe i oryginalne

podejście do tego zadania. Spośród wielu znanych z literatury metod identyfikacji Autor wybrał te, które umożliwiają wyznaczenie na drodze eksperymentalnej modeli liniowych z czasem ciągłym dla danego punktu pracy. Modele te mogą być na bieżąco aktualizowane w celu wyznaczenia parametrów regulatora predykcyjnego, a więc jego adaptacji do zmieniających się warunków pracy. Wybór zarówno metod identyfikacji, jak i sterowania uważam za prawidłowy. Na podkreślenie zasługuje fakt, że Autor nie poszedł modną dziś drogą wykorzystania metod sztucznej inteligencji, ale starał się rozwiązać problem metodami klasycznymi, które umożliwiają lepszy wgląd we własności fizyczne modelowanego procesu.

### **Ocena wykorzystanego piśmiennictwa oraz ogólnej wiedzy Kandydata w danej dyscyplinie naukowej**

Bibliografia jest bardzo obszerna i liczy 116 pozycji, z czego 5 pozycji jest współautorstwa Doktoranta – jedna z listy JCR, pozostałe pochodzą z materiałów konferencyjnych. Wybór literatury jest na ogół trafny i odpowiadający zakresowi pracy, aczkolwiek w kilku przypadkach lepiej by było, gdyby Autor powołał się na pozycje źródłowe, a nie na wtórne informacje z podręczników.

Wiedza Doktoranta jest solidnie ugruntowana w zakresie dyscypliny naukowej automatyka, elektronika i elektrotechnika. Autor dobrze orientuje się w zakresie zaawansowanych metod identyfikacji i sterowania, które umiejętnie wykorzystuje do realizacji postawionego celu pracy.

### **Ocena omówienia uzyskanych wyników badań i ich praktycznego wykorzystania**

Na ogół Autor przedstawia wyniki badań oraz analizę problemu w sposób zrozumiały i przy użyciu właściwych środków, chociaż czasami niezbyt precyzyjnie i zbyt pobieżnie. Brak jest czasami odpowiednich komentarzy do przedstawionych rysunków z wynikami. Ponadto są miejsca, w których Autor nie precyzuje, jaki wzór ma na myśli i czytelnik musi się domyślać o co Autorowi chodzi. Przede wszystkim czasami trudno jest rozróżnić, czy Autor stosuje opis w postaci równań stanu, czy opis wejściowo-wyjściowy. Przykłady takich braków zostały wymienione w punkcie 4.

Pierwsza uwaga dotyczy sposobu oceny modeli otrzymywanych na drodze identyfikacji. Autor ogranicza się tu do porównania zmierzonego wyjścia obiektu z symulowanym wyjściem modelu, i to tylko dla tych samych danych, które wzięte były do identyfikacji. To niestety nie wystarcza, gdyż zdarza się, że model zły (w sensie odzwierciedlenia własności dynamicznych obiektu) potrafi dobrze śledzić za wyjściem obiektu, co dobrze ilustruje przykład umieszczony w punkcie 2.4.2. Uzyskany na drodze identyfikacji model toru sterowania od pierwszego wejścia jest błędny, nie tylko ze względu na olbrzymie różnice w wartościach parametrów modelu symulowanego i zidentyfikowanego. Przede wszystkim błędnie modeluje własności dynamiczne tego toru. Wystarczy tu porównać bieguny obu transmitancji lub ich odpowiedzi skokowe. Wydaje się, że przyczyną słabego wyniku identyfikacji pierwszego toru sterowania jest zbyt słabe pobudzenie. Pierwsze wejście jest sygnałem nieustannie pobudzającym drugiego rzędu, natomiast w modelu są 4 parametry do identyfikacji, a więc potrzebne byłoby pobudzenie co najmniej czwartego rzędu.

Druga uwaga dotyczy prezentacji wyników w rozdziale szóstym. Tutaj Autor pogrupował zestawy parametrów badanych algorytmów w tabelę, natomiast wyniki identyfikacji zamieścił w załączniku A, co bardzo utrudnia czytelnikowi zorientowanie się w charakterze rezultatów. Stanowczo brak jest tutaj jakiegóż głębszej analizy tych wyników, w szczególności oceny własności dynamicznych modeli uzyskanych dla różnych zestawów danych lub choćby porównania modeli MISO ze wspólnym mianownikiem z modelami o różnych mianownikach w obu torach sterowania. Samo przedstawienie parametrów modeli

nie wystarcza, bo na podstawie ich wartości trudno jest ocenić własności dynamiczne modelu. Modele te mają służyć wyznaczeniu parametrów regulatora predykcyjnego, a to oznacza, że własności tego regulatora mogą się dramatycznie zmienić dla kolejnych faz procesu. Także samo porównanie temperatury zmierzonej z symulowaną przez model może nie wystarczyć, o czym wspomniano wyżej.

Następna uwaga dotyczy rozdziału ósmego. Autor w punkcie 8.5 przedstawia wyniki eksperymentów dla dwóch regulatorów predykcyjnych z czasem ciągłym i dyskretnym, ale nie precyzuje, które dokładnie przedstawione w rozdziale siódmym algorytmy zostały wykorzystane. Należałoby się tu odwołać do konkretnych równań.

Kolejna uwaga dotyczy przykładu z rozdziału dziewiątego. Nie rozumiem, dlaczego Autor przedstawił tu eksperyment wykonany dla innych danych niż w rozdziale ósmym. W tej sytuacji trudno jest ocenić, na ile uproszczenia algorytmu wprowadzone w aplikacji dla czasu rzeczywistego mogły spowodować pogorszenie działania regulatora w stosunku do wersji oryginalnej z rozdziału ósmego. Poza tym wypadałoby porównać wyniki uzyskane za pomocą algorytmu MPC z klasycznym, dobrze nastrojonym regulatorem PID aby wykazać ich przydatność w praktyce.

Szkoda, że Autorowi nie udało się przetestować zaproponowanych algorytmów na rzeczywistym obiekcie. Recenzent zdaje jednak sobie sprawę z trudności w tym względzie i uznaje przedstawione wyniki badań symulacyjnych za wystarczające do pokazania możliwości praktycznego ich wykorzystania.

Jeżeli chodzi o redakcję rozprawy, to nie jest ona mocną stroną Autora. Występuje dość dużo tzw. literówek, poza tym Autor ma duży problem z prawidłową interpunkcją. Stanowczo nadużywa przecinków, co niepotrzebnie rozbija szyk zdania. Uwagi szczegółowe dotyczące redakcji przedstawiono w dalszej części recenzji.

#### 4. Ważniejsze uwagi szczegółowe

1. Na początku rozprawy Autor umieścił spis ważniejszych oznaczeń, co jest bardzo cenne. Niestety spis ten jest nie do końca spójny z tym, co znajduje się w rozprawie, np.  $N$  oznacza tu parametry funkcji modulującej, ale bywa także liczbą przedziałów, liczbą funkcji modulujących (str. 32), liczbą wybranych chwil czasu (str. 34);  $T$  czasem oznacza temperaturę, czasem przedział czasu. Brak jest wielu ważnych oznaczeń stosowanych w rozdziałach czwartym i piątym. Autor powinien także tu wskazać, jak oznacza czas ciągły, a jak dyskretny. Brak jest konsekwencji w rozróżnieniu między skalarami, wektorami i macierzami. W przypadku parametrów występuje takie rozróżnienie, w przypadku sygnałów już nie, i czytelnik ma problemy w rozróżnieniu, czy np.  $u$  oznacza jedno wejście, czy wiele wejść, a nie zawsze wynika to z kontekstu, jako że w tekście rozprawy Autor wielokrotnie swobodnie przeskakuje od obiektów o jednym wejściu (SISO) do wielowejsciowych (MISO). W efekcie czasami sam się gubi, co jest skalarem, co wektorem a co macierzą.
2. Str. 25 – Autor pisze o modelach dyskretnych. Powinien zaznaczyć, że chodzi o modele dyskretne w czasie. Możemy mieć do czynienia z modelami dyskretnymi w sensie wartości zmiennych, np. zmienne stanu kodowane za pomocą całkowitoliczbowych funkcji czasu.
3. Str. 25 – Autor wprowadza macierze  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , ale nie podaje równania stanu i wyjścia modelu liniowego, czytelnik musi się domyślać jak to równanie wygląda. Równanie (2.1) sugeruje, że chodzi o obiekt MIMO, ale w (2.2) już rozpatruje tylko SISO.
4. Str. 25 – W równaniu (2.2) występuje parametr  $a_0$  różny od 1 i Autor dyskutuje przyczyny jego wprowadzenia, ale w dalszej części pracy czasem przyjmuje  $a_0=1$ , a czasem nie, i nie bardzo wiadomo dlaczego.

5. Str. 26 i 27 – Autor pisze o liniowej zależności kwadratowych wskaźników jakości od nieznanymi parametrów. Tymczasem wskaźniki te zależą od parametrów kwadratowo, dlatego przez różniczkowanie można wyznaczyć wzory analityczne w celu minimalizacji tych wskaźników. Poza tym nie bardzo rozumiem dyskutowaną tu różnicę między modelem OE z rys. 2.2 a modelem EE z rys. 2.3.
6. Str. 27 – Na rys. 2.3  $y_m(t)$  nie jest wyjściem modelu, tak jak na rys. 2.2.
7. Str. 29 – Nie rozumiem rozróżnienia między metodami OEM a EEM dla  $a_0=1$ . W jaki sposób można wyznaczyć parametry modelu jeżeli  $a_0=1$ ?
8. Str. 35 – co Autor rozumie pod hasłem „Optymalna identyfikacja parametrów”? Poprzednio omawiana metoda najmniejszych kwadratów też jest optymalna w sensie minimalizacji sumy kwadratów błędów. Skąd we wzorze (2.34) wzięło się oznaczenie  $e^T$ ?
9. Str. 38 – „Do wyjścia systemu został dodany szum biały” – chyba do próbek wyjścia. Dla sygnałów ciągłych nie można zdefiniować białego szumu.
10. Str. 40 – Autor pisze, że metody opisane w podrozdziałach 2.1, 2.2 i 2.3 pozwalają na otrzymanie modelu w postaci transmitancji MISO, ale tylko w 2.3 rozpatruje przypadek o wielu wejściach. W 2.1 i 2.2 omawia tylko SISO. Dalej stwierdza, że estymator MNK nie jest asymptotycznie obciążony tylko w przypadku gdy zakłócenia są w postaci białego szumu. Co Autor tu rozumie przez zakłócenia, np. w przypadku modelu EE?
11. Str. 40 i 41 – Autor pisze o sygnałach wyjściowych, ale rozpatruje tylko jedno wyjście.
12. Punkt 2.4.1 – Stanowczo brak jest tutaj przedstawienia równań opisujących system MISO. Z rys. 2.7 niewiele wynika. Podobnie co to jest  $y_{sim}$ ? Jak się to ma do poprzedniej dyskusji o modelach EE i OE?
13. Str. 43 – Co to jest wskaźnik  $J$  w modelach lokalnych?
14. Str. 44 do 46 – W algorytmach występują  $y$  z daszkiem, co one reprezentują?
15. Punkt 2.4.2 – Symulowany jest obiekt ciągły, ale identyfikacja prowadzona jest na podstawie próbek. Jaki był okres próbkowania, gdyż to ma istotne znaczenie dla wyników identyfikacji? Do 10 sekundy podsystem 2 nie był w ogóle pobudzany. Jak więc obliczano zmienne instrumentalne dla tego przedziału czasu? Brak tu jest szczegółowej dyskusji uzyskanych wyników pod kątem porównania własności dynamicznych uzyskanych modeli z systemem symulowanym.
16. Rozdział 3 – Tutaj pojawia się obiekt MIMO, a w pracy mamy do czynienia co najwyżej z MISO. W dodatku mamy teraz model w postaci równania stanu, poprzednio była to postać wejściowo-wyjściowa. Dlaczego liczba wejść jest teraz oznaczona przez  $p$ ?
17. Str. 52 – Co oznacza, że macierz  $W$  jest większa od zera?
18. Podrozdział 3.2 – Jakie muszą być spełnione warunki, aby rzeczywiście można było powiedzieć, że mamy do czynienia z obserwatorem dokładnym?
19. Podrozdział 4.2 – Zwyczajowo w równaniach różniczkowych cząstkowych używa się symbolu  $\partial$  a nie  $d$ . Podobnie dalej w pracy.
20. Str. 63 – Brak podania źródła dla wzorów (4.4) oraz (4.5).
21. Rozdział 5 – W wielu przypadkach brak jest podania jednostek w tabelach parametrów oraz wartości błędu MSE. Poza tym lepiej by było zamiast wartości średniokwadratowej podać odchylenie standardowe błędu, gdyż wyrażone by było w takich samych jednostkach, jak wyjście.
22. Str. 73 – Na jakiej podstawie przyjęto, że zmiana wartości współczynnika odpowiedzialnego za wychładzanie strefy może być aproksymowana przez funkcję kwadratową?
23. Str. 73 i następne – Niektóre rysunki są zbyt małe, przydałyby się także odpowiednie komentarze do prezentowanych wykresów.

24. Rys. 5.1 – Wybór koloru pomarańczowego jest nieszczęśliwy, lepiej gdyby był np. zielony. Uwaga ta dotyczy także wielu innych wykresów.
25. Str. 79 – Co to jest okno identyfikacji oraz interwały o stałej zadanej długości? Co to jest punkt pracy? Zwykle punkt pracy definiuje się jako wartość sygnału (np. wyjścia) w stanie ustalonym, a nie jako chwilę czasu. Nie rozumiem stwierdzenia, że nowe modele są otrzymywane na podstawie danych procesowych pojawiających się w trakcie symulacji lub dla rzeczywistego procesu.
26. Str. 80 – Wzór (6.1) podaje definicje macierzy, ale jak wygląda równanie modelu? W punkcie 2.3 rozpatrywano model wejściowo-wyjściowy. Gdzie tu występuje  $D$ ? Poza tym dla MISO  $C$  jest wektorem, a  $D$  skalarem. Jeżeli mamy równanie stanu, to gdzie tu możemy mówić o różnych mianownikach?
27. Str. 83 – Tutaj stan jest oznaczony przez  $x$ , ale  $u$  już nie, więc nie wiadomo, czy mamy do czynienia z obiektem MISO czy SISO. Ponadto  $G_1$  jest wektorem, a nie macierzą, a w przypadku SISO także  $G_2$ .
28. Algorytm 5 – Tu warto by było odwołać się do wzoru na wskaźnik  $E$ .
29. Str. 85 – Przydałby się komentarz odnośnie tabel 6.2 i 6.3, skąd taki a nie inny ich dobór.
30. Rys. 6.5 i następne – Skąd pomysł na wprowadzenie skrótu mdl. ? Nieszczęśliwy dobór koloru dla temperatury zadanej.
31. Tabela 6.4 – Wymagane byłoby podanie jednostek. Poza tym lepiej by było zamiast wartości średniokwadratowej podać odchylenie standardowe błędu, gdyż wyrażone by było w stopniach Celsjusza. Uwaga dotyczy także Tabel 8.5, 8.6 oraz 8.8.
32. Podrozdziały 7.1 i 7.2 – Przedstawiono różne wersje algorytmów MPC, ale jaki jest ich związek z dalszą częścią rozprawy? Warto by tu było wyjaśnić znaczenie poszczególnych skrótów, mimo że na początku występuje spis akronimów. Poza tym należałoby się raczej odwołać do źródeł pierwotnych niż wtórnych.
33. Str. 101 – Niepotrzebny indeks  $m$  przy  $u$  we wzorze (7.2).
34. Wzory (7.1) i (7.15) – Jaki jest związek między macierzami występującymi w obu wzorach?
35. Str. 104 – Jaki jest wpływ wartości parametru  $p$  w macierzy  $A_p$  na uzyskane wyniki?
36. Str. 105 –  $\eta$  jest macierzą a nie wektorem.
37. Wzór (7.30) – Jak należy rozumieć nierówność w przypadku wektorów?
38. Wzór (7.34) – Teraz  $u$  jest skalarem.
39. Wzór (7.41) – Jak należy rozumieć tę nierówność?
40. Wzór (7.42) – Występuje tu skrót myślowy nie do przyjęcia. Jeżeli  $G$  oznaczają transmitancje, to  $y$ ,  $u$ ,  $\omega$  muszą być odpowiednimi transformatami (Laplace'a lub Fouriera). I znowu pojawia się pytanie o wymiarowość modelu.
41. Wzory (7.44) i (7.54) – Jeżeli  $\omega$  jest skalarem, to  $B_{dm}$  jest wektorem, a nie macierzą.
42. Rozdział 8 – Zwykle przez adaptacyjny regulator MPC rozumie się taki, w którym z kroku na krok dokonuje się aktualizacji jego parametrów. Tu natomiast adaptacja oznacza, że co jakiś czas następuje ponowna identyfikacja i przeliczenie parametrów regulatora.
43. Str. 115 – Co to jest najwyższa pochodna mianownika transmitancji?
44. Str. 117 – Czy macierze we wzorze (8.3) pochodzą z dyskretyzacji zidentyfikowanego modelu ciągłego, czy powstały na drodze identyfikacji modelu dyskretnego?
45. Str. 119 – Co to jest  $\lambda_{act}$ ? W tekście oraz spisie oznaczeń nie ma o tym wzmianki.
46. Str. 120 – Co w sytuacji gdy odrzucane są modele ewidentnie niepoprawne?
47. Tabela 8.2 – Jak dobrano parametry regulatora PI?
48. Str. 122 – Co to jest Wyd. rzeczywiste i Wyd. zapisane?

49. Str. 148 – „Dzięki procedurze reidentyfikacji ...” – dlaczego Autor pisze tu o różnych macierzach stanu, skoro przy opisie metody zmiennych instrumentalnych używał opisu wejściowo-wyjściowego.
50. Str. 150 – Autor pisze, że zmiany temperatury szkła były symulowane z wykorzystaniem modeli opisanych w pracach od [75] do [80]. Tymczasem z rozdziału piątego wynika, że Autor korzystał tylko z pracy [79] – wzór (5.1), przy czym model ten nieco zmodyfikował i uprościł – wzory (5.2) i (5.5), a następnie dokonał estymacji wprowadzonych parametrów  $K_I - K_d$ .
51. Str. 150 – Co to znaczy, że dynamika procesu jest odzwierciedlana z wystarczającą dokładnością?

## 5. Uwagi dyskusyjne

Autor potraktował temat bardzo szeroko, czasami zbyt szeroko. Opisuje wiele metod czy algorytmów, których w efekcie nie wykorzystuje. Stąd przy pierwszym czytaniu czytelnik może pogubić się w tym, co stanowi istotę rozprawy. Rozumiem, że Doktorantowi zależało na pokazaniu szerszego tła, ale wystarczyłoby tu tylko krótka wzmianka o innych możliwych rozwiązaniach, bez szczegółowego opisu tych, których nie wykorzystał. W ten sposób rozprawa zyskałaby na zwartości i przejrzystości.

Druga sprawa. Autor traktuje temperaturę poprzedniej strefy jako zakłócenie mierzalne. Zgodnie z monografią Findeisena: *Wielopoziomowe układy sterowania*. (PWN, Warszawa, 1974) wydaje mi się to niepoprawne. Temperatura poprzedniej strefy nie jest zakłóceniem, ale wejściem narzuconym (nie manipulowanym). Zakłóceniem (mierzalnym) może być np. temperatura otoczenia.

## 6. Wniosek końcowy

Przedstawione wyżej uwagi krytyczne nie wpływają na moją pozytywną ocenę recenzowanej rozprawy doktorskiej. Rozprawa zawiera oryginalne rozwiązanie trudnego problemu badawczego i ma potencjał aplikacyjny. Autor wykazał się znajomością zarówno tematyki modelowania trudnych obiektów, jak i niestandardowych algorytmów sterowania. Tematyka rozprawy w pełni odpowiada **dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika**. Uważam, że recenzowana praca spełnia wymagania określone w ustawie „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” z dnia 20 lipca 2018 r. i **wnoszę o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.**



