

dr hab. inż. Rafał Stanisławski, prof. uczelni
Katedra Informatyki
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki
Politechnika Opolska
e-mail: r.stanislawski@po.edu.pl

Opole, 2022-08-26

SEKRETARIAT
Rady Dyscypliny AEE

02. 09. 2022

Wpłynęło dnia
Zarejestrowano pod nr
Podpis

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy:

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

Autor rozprawy: mgr inż. Michał Drapała

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

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica, dra hab. inż. Ryszarda Sroki, prof. AGH, z czerwca 2022 roku.

1. Zawartość pracy i ocena formalna

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska zawiera łącznie 185 stron podzielonych na dziesięć rozdziałów podstawowych i cztery dodatkowe, literatury liczącej 116 pozycji, wykazów ważniejszych oznaczeń i skrótów oraz streszczeń w języku polskim i angielskim. Dysertacja została napisana w języku polskim.

W rozdziale pierwszym przedstawiono krótkie wprowadzenie do zagadnień poruszanych w pracy. Scharakteryzowano w nim koncepcję wielopoziomowych systemów sterowania, omówiono motywacje do podjęcia przeprowadzonych badań oraz zaprezentowano cele i tezy dysertacji. Ponadto w rozdziale pierwszym krótko scharakteryzowano strukturę pracy.

W rozdziale drugim przedstawiono szczegółowe wprowadzenie do zagadnienia identyfikacji systemów za pomocą modeli opisanych w czasie ciągłym. Omówiono wybrane metody identyfikacji systemów opartych zarówno na modelach o strukturze błędu wyjściowego, jak również równanowego. Opisano metody bezpośrednie bazujące na wielokrotnej filtracji sygnałów i metody oparte na charakterystyce spektralnej. Jednak szczególnie wnikliwie skupiono się na metodzie funkcji modułujących, której poświęcono większą część rozdziału. Opisano tutaj wszystkie niezbędne elementy związane z doбором funkcji modułujących oraz identyfikacją systemów z wykorzystaniem zarówno metody błędu równaniowego jak i wyjściowego. Autor omawia również problematykę ponownej identyfikacji systemu MISO (ang. *Multiple Input Single Output*). Powyższe rozważania zostają



zwieńczone propozycjami algorytmów identyfikacji i re-identyfikacji. Rozdział ma charakter teoretyczny i przedstawia wprowadzenie metod identyfikacji wykorzystywanych w dalszej części dysertacji.

Rozdział trzeci zawiera krótkie wprowadzenie teoretyczne do problematyki obserwatorów stanu. W tym rozdziale Autor syntetycznie charakteryzuje obserwatory asymptotyczne i dokładne, przy czym skupia się na tych drugich. Rozdział trzeci również ma charakter teoretyczny.

Rozdział czwarty wprowadza do zagadnień związanych z wytwarzaniem szkła w hutach, ze szczególnym uwzględnieniem procesu kondycjonowania szkła. Omówiono w tej części budowę pieca szklarskiego oraz zaprezentowano podstawowe układy regulacji tam stosowane. Następnie przedstawiono zasilacz szklarski oraz omówiono stosowane w nim układy regulacji. Na tej bazie wprowadzono do problematyki modelowania procesu kondycjonowania szkła w oparciu o modele o parametrach rozłożonych, zarówno wielo- jak i jedno-wymiarowych. W dalszej części rozdziału poruszono problematykę implementacji różnych narzędzi uproszczonego modelowania procesu za pomocą modeli, które mogą być efektywnie wykorzystane do budowania nowoczesnych predykcyjnych/adaptacyjnych systemów sterowania. Omówione zostały metody redukcji, modele fizyczne, jak również modele oparte na filtrach ortonormalnych. Rozdział ma charakter naukowo-techniczny i przedstawia właściwy przegląd stanu wiedzy otoczenia dysertacji.

Rozdział piąty omawia prace nad budową matematycznego modelu zasilacza z zastosowaniem modeli o parametrach rozłożonych. Zaprezentowane zostały założenia modeli zastosowanych do opisu procesów. Przedstawiono proces budowania modeli poszczególnych stref zasilacza, tj. a) strefa ze sterowanym ciśnieniem mieszanki i b) ze sterowanym ciśnieniem mieszanki i zaworem chłodzenia. W końcowej części rozdziału Doktorant dokonał weryfikacji otrzymanych wyników oraz opisał algorytm symulacji opracowanych modeli. Rozdział ten ma charakter raczej praktyczny, w którym Autor pokazuje autorskie wyniki prac nad budową i symulacją modeli o parametrach rozłożonych poszczególnych stref zasilacza.

Alternatywne wyniki prac nad budowaniem modelu zasilacza z zastosowaniem liniowych modeli o parametrach skupionych i narzędzi identyfikacji systemów zostały zaprezentowane w rozdziale szóstym. W ramach rozdziału Autor prezentuje założenia procedury identyfikacyjnej, opisuje zastosowane modele oraz algorytmy identyfikacji. Następnie w rozdziale zostały obszernie zaprezentowane i omówione wyniki otrzymanych badań identyfikacyjnych. Podobnie jak poprzedni, ten rozdział ma charakter praktyczny.

W rozdziale siódmym przedstawiono wprowadzenie do zagadnień związanych ze sterowaniem predykcyjnym i adaptacyjnym. Dokonano klasyfikacji i przeglądu wybranych metod regulacji predykcyjnej opartej dla modelach liniowych oraz zasygnalizowano problematykę regulacji nieliniowej. Skupiono się na metodach opartych na modelach opisanych równaniami stanu zarówno z czasem ciągłym, jak i dyskretnym. Ponadto opisano również problematykę uwzględnienia ograniczeń sygnałów sterujących, jak również kompensacji zakłóceń mierzalnych występujących w procesie. Rozdział ten ma charakter teoretyczny i wprowadza algorytmy regulacji wykorzystane w kolejnych częściach pracy.

Badania symulacyjne nad implementacją sterowania predykcyjnego/adaptacyjnego dla poszczególnych stref zasilacza przedstawiono w rozdziale ósmym. W pierwszej kolejności przedstawiono założenia zastosowanych rozwiązań zarówno w czasie dyskretnym jak i ciągłym a następnie szczegółowo przedstawiono wyniki badań symulacyjnych. Algorytmy sterowania zaimplementowano



w warunkach symulacyjnych, w których użyto modele o parametrach rozłożonych procesu uzyskane w rozdziale piątym. Rozdział ósmy łączy wszystkie rozważania teoretyczne i praktyczne dokonane w poprzednich częściach pracy i stanowi w pewnym sensie zwięźczenie pracy.

Rozdział dziewiąty dysertacji ma charakter wdrożeniowy. Opisuje zasady implementacji opracowanego algorytmu w systemie czasu rzeczywistego, który może zostać zastosowany na obiekcie rzeczywistym. Ponadto zaprezentowano wyniki implementacji systemu w warunkach quasi-rzeczywistych.

W rozdziale dziesiątym zostało zawarte podsumowanie, wnioski z przeprowadzonych badań oraz kierunki potencjalnych przyszłych prac Doktoranta. W rozdziale zawarto również syntetyczny opis wkładu naukowego Doktoranta w przedmiotowej dysertacji.

W załącznikach A, B, C i D Przedstawiono tabele z wynikami prac symulacyjnych, które stanowią uzupełnienie do poprzednich rozdziałów. Wyodrębnienie załączników jest dobrym pomysłem, jednak brakuje w nich krótkiego wprowadzenia z opisem do której części dysertacji się odnoszą.

Układ pracy jest poprawny. Treści dysertacji zostały logicznie podzielone na poszczególne rozdziały pracy. Układ i zakres poszczególnych rozdziałów, podrozdziałów i sekcji nie budzi większych wątpliwości recenzenta. Jedyna wątpliwość dotyczy kolejności podrozdziałów 5.5 *Weryfikacja zidentyfikowanych modeli* i 5.6 *Implementacja algorytmów symulacji*. Wydaje się, że byłaby właściwa zamiana ich kolejności.

Warta szczególnego podkreślenia jest bardzo dobra strona edycyjna pracy. Rozdziały, podrozdziały, sekcje, nagłówki, stopki itp. utrzymane są tej samej konwencji, przez co praca bardzo dobrze wygląda. Rysunki są bardzo starannie przygotowane z dbałością o estetyczne i precyzyjne przedstawienie graficzne wyników badań oraz schematów blokowych. Język użyty w pracy jest czytelny i precyzyjny, przez co pracę czyta się dobrze. Jedyne wątpliwości budzą w tym aspekcie dwa elementy a) konsekwentny brak opisu skrótów w momencie pierwszego wystąpienia (problem tylko częściowo rozwiązuje tabela z opisem skrótów zamieszczona na początku dysertacji) oraz b) dość selektywny wybór opisu oznaczeń zestawionych na początku dysertacji. Należy ponadto zaznaczyć, że rozprawa jest bardzo dobrze przygotowana redakcyjnie. Występujące nieliczne błędy typograficzne zostały wypunktowane w dalszej części recenzji.

2. Ocena merytoryczna pracy

Identyfikacja obiektów dynamicznych i nowoczesne układy regulacji predykcyjnej/adaptacyjnej to jedne z elementarnych nurtów dyscypliny *Automatyka i Robotyka*, która obecnie wchodzi w skład *Automatyki, Elektroniki i Elektrotechniki* w naukach inżynieryjno-technicznych. Powyższy obszar badawczy łączy zagadnienia teoretyczne, dotyczące konstrukcji nowych algorytmów identyfikacji systemów i sterowania, jak również praktycznych, związanych z implementacją omawianych algorytmów w procesach przemysłowych. Duży praktyczny potencjał tych obszarów pozwala na istotną poprawę pracy niezliczonych układów regulacji, a przez to na optymalizację kosztów, warunków pracy, i wielu innych parametrów. Ponadto, biorąc pod uwagę, że większość układów regulacji stosowana w przemyśle jest w dalszym ciągu oparta na regulatorach PID, omawiane zagadnienia nadal mają ogromny potencjał i jeszcze wiele lat będą wpływać na rozwój technologii przemysłowych w różnych obszarach. Należy zauważyć, że zdecydowana większość narzędzi identyfikacji opiera się

modelach zdefiniowanych w czasie dyskretnym. Decyduje o tym wiele czynników, jak np. prostota implementacji programowej układów dyskretnych, czy synchroniczny, spójny z modelami dyskretnymi charakter urządzeń elektronicznych stosowanych w przemyśle (np. sterowniki PLC). Dyskretny charakter modeli budowanych dla celów sterowania rzutuje następnie bezpośrednio na nowoczesne układy regulacji, które również zwykle opisane są w czasie dyskretnym. Z drugiej strony należy zauważyć, że równolegle, choć ze znacznie mniejszą intensywnością, prowadzone są badania nad narzędziami identyfikacji za pomocą modeli procesów zdefiniowanych w czasie ciągłym. Stosowanie modeli ciągłych w zadaniu predykcji i sterowania predykcyjnego jest znacznie bardziej złożone w stosunku do dyskretnych ale może mieć pewne zalety. Zaliczyć do nich można pracę modelu w tej samej dziedzinie czasu co opisywany proces, przez co, po spełnieniu pewnych warunków, parametry modelu mogą wprost opisywać pewne fizyczne cechy opisywanych procesów. W tym obszarze obecnie najbardziej popularna jest identyfikacja ciągłych modeli w przestrzeni stanu z zastosowaniem metod podprzestrzeni (ang. *subspace methods*). W ciągu ostatnich lat powstało w tym obszarze kilka interesujących prac, które opublikowane zostały w wiodących czasopismach naukowych z teorii i praktyki sterowania (wśród nich jest jedna praca współautorstwa Doktoranta). Ten obszar badawczy został również poruszony w przedmiotowej dysertacji.

W związku z powyższym Autor podejmuje pracę w ważnym i aktualnym obszarze badań, który ma swoje podstawy w światowej literaturze naukowej, jak również daje możliwości osiągnięcia nowych, istotnych wyników zarówno w ujęciu teoretycznym, jak również praktycznym. Ponadto recenzent jednoznacznie umiejscawia przedmiotową dysertację w dawnej dyscyplinie *Automatyka i Robotyka*, która jest obecnie zawarta w dyscyplinie *Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika* w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych.

Doktorant postawił sobie ambitny i ważny cel rozszerzenia wybranych narzędzi identyfikacji, obserwacji i sterowania predykcyjnego/adaptacyjnego w oparciu o modele ciągłe opisane w przestrzeni stanu o wielu wyjściach i jednym wejściu (MISO). Następnie Autor postawił cel implementacji opracowanych narzędzi do regulacji adaptacyjnej procesem kondycjonowania szkła w hucie szkła. Autor przedstawił dwie tezy rozprawy:

- Opracowana adaptacyjna metoda identyfikacji dla ciągłych liniowych układów MISO, bazująca na metodzie funkcji modulujących i wykorzystująca całkowite 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.

Zwartość rozprawy, opisana w poprzednim punkcie recenzji, wynika bezpośrednio z postawionych celów pracy i prowadzi do dowiedzenia obu w/w tez. Ostatecznie, do podstawowych osiągnięć dysertacji można zaliczyć:

- Opracowanie algorytmu identyfikacji modeli MISO ciągłych i dyskretnych opisanych w przestrzeni stanu z zastosowaniem funkcji modulujących i estymatorów adaptacyjnych. Zaproponowanie algorytmu re-identyfikacji poszczególnych torów systemu z zastosowaniem metody zmiennych instrumentalnych (wyniki przedstawiono w Rozdziale 2).



- Zaproponowanie modyfikacji algorytmów sterowania predykcyjnego w oparciu o modele ciągle implementujące filtry Laguerre'a polegającej na uwzględnieniu zakłóceń mierzalnych systemu przy implementacji filtru Kallmana w obserwatorze stanu. Implementacja numeryczna zaproponowanych algorytmów (wyniki zaprezentowano w Podrozdziałach 7.3-7.6, 8.1-8.4).
- Zastosowanie opracowanych narzędzi identyfikacji do modelowania i predykcji zmian temperatury w procesie kondycjonowania szkła. Przeprowadzenie analizy efektywności opracowanych modeli procesu (wyniki przedstawiono w Rozdziale 6).
- Zastosowanie opracowanych narzędzi sterowania predykcyjnego/adaptacyjnego do regulacji temperatury procesie kondycjonowania szkła. Przeprowadzenie analizy efektywności opracowanych układów regulacji oraz dokonanie analizy porównawczej wyników otrzymanych z zastosowaniem modeli ciągłych i dyskretnych (wyniki przedstawiono w Podrozdziałach 8.5 i 8.7).
- Opracowanie modelu o parametrach rozłożonych procesu kondycjonowania szkła w dwóch strefach zasilacza. Implementacja modelu w środowisku testowym do badań symulacyjnych opracowywanych narzędzi identyfikacji i sterowania predykcyjnego (wyniki pokazano w Rozdziale 5).
- Przeniesienie opracowanych narzędzi do środowiska quasi-przemysłowego opartego na systemie czasu rzeczywistego (wyniki pokazano w Rozdziale 9).

Wszystkie wyżej wymienione osiągnięcia są znaczące i stanowią istotny wkład Kandydata w rozwój dyscypliny *Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika* oraz finalnie doprowadziły do osiągnięcia celów pracy. Ponadto otrzymane w dysertacji wyniki jednoznacznie udowadniają obie postawione tezy.

Dużym atutem pracy jest zachowanie dobrego balansu między badaniami teoretycznymi i praktycznymi. Rozdziały drugi i siódmy stanowią wkład teoretyczny, natomiast rozdziały piąty, szósty i ósmy stanowią istotny wkład praktyczny Doktoranta. Rozdział dziewiąty, recenzent traktuje jako pracę wdrożeniową, która również skutkuje istotnym rezultatem praktycznym.

3. Analiza źródeł, pozycja rozprawy, znaczenie wyników Autora, umiejętność przedstawiania wyników

Motywacja dla podjęcia tematu rozprawy wyniknęła z dobrze przeprowadzonej przez Autora analizy literatury przedmiotu, liczącej 116 pozycji. Dzięki szerokiej analizie literaturowej został poprawnie odzwierciedlony aktualny stan wiedzy na temat wszystkich zagadnień podejmowanych w pracy. Jednak należy zaznaczyć, że Autor koncentruje się na klasycznych (i niezbyt nowych) pozycjach. Około 25% zestawionych pozycji bibliograficznych zostało opublikowanych w ciągu ostatnich dziesięciu lat. Nie należy tego faktu traktować jako wadę rozprawy, a raczej to wynik jej dość *niszowego* charakteru. Recenzentowi jednak zabrakło kilku pozycji bibliograficznych, które miały duży wpływ na rozwój rozważanych w pracy metod identyfikacji. Zaliczyć tu można pozycje:

R. Johansson, I. Verhaegen and C. T. Chou, Stochastic theory of continuous-time state-space identification, Proceedings of the 36th IEEE Conference on Decision and Control, 1997, pp. 1866-1871 vol.2, doi: 10.1109/CDC.1997.657856.



C. Huang, A combined invariant-subspace and subspace identification method for continuous-time state-space models using slowly sampled multi-sine-wave data, *Automatica*, 2022, vol. 140, pp. 110261.

K. Santhosh, P.J. Varanasi, Nuclear norm subspace identification of continuous time state-space models with missing outputs, *Control Engineering Practice*, vol 95, 2020, pp. 104239.

Pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy reprezentowanej w literaturze światowej jest dobra. Doktorant jest współautorem pięciu publikacji naukowych obejmujących zakres recenzowaną dysertację. Jedna praca to artykuł opublikowany w indeksowanym na liście JCR czasopiśmie *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, dwie prace stanowią referaty na konferencji naukowej *Methods and Models in Automation and Robotics*, a dwie publikacje są referatami konferencyjnymi opublikowanymi w formie rozdziałów w monografiach wydawnictwa *Springer*.

Autor posiadał umiejętność poprawnego, przekonującego i precyzyjnego przedstawiania uzyskanych przez siebie wyników. Zarówno część merytoryczną rozprawy, jak również artykuły cechuje zwięzłość, jasność języka oraz precyzja.

4. Wady rozprawy, słabe strony, uwagi i pytania

Należy podkreślić, że poziom merytoryczny ocenianej dysertacji jest wysoki i recenzent nie dostrzegł w niej istotnych wad i niedostatków. Jednak warto również w nich wskazać na pewne, w większości drobne uchybienia oraz niejasności. Uwagi zostały wypunktowane i podzielone na dwie grupy, a) uwagi dyskusyjne i pytania oraz b) drobne uchybienia typograficzne i stylistyczne.

Uwagi dyskusyjne i pytania:

- 1) Teza pierwsza. Autor podaje sentencję, cyt. '...pozwala na dokładne odwzorowanie dynamiki nieliniowego...'. Uwaga dotyczy określenia 'dokładne', które w omawianym kontekście nie wydaje się precyzyjne. W ujęciu ścisłym oznaczałoby to, że model ma charakter deterministyczny i w procesie nie występują składowe stochastyczne tj. np. zakłócenia niemierzalne. Przeczą temu jednak wyniki porównania przebiegów czasowych modeli i procesu, w których można zaobserwować składową stochastyczną.
- 2) Autor wielokrotnie używa określenia *optymalny* w odniesieniu do modelu/sygnału/regulatora, np. strona 17 linie 10 i 22, strona 150 akapit 1. W ujęciu ścisłym *optymalność* oznacza wartość minimalną odniesioną do konkretnej funkcji/zależności, np. czasu, skumulowanego wskaźnika opartego na jednej lub kilku zmiennych, itp. Dlatego używanie zwrotu: *optymalny model*, czy *optymalny regulator* bez podania kontekstu może być niejednoznaczne.
- 3) Rozdział 2, strony 26-27. Co do zasady nie zgadzam się z opisami dwóch alternatywnych metod błędu wyjściowego, które zostały opisane w pierwszym (rys. 2.1) oraz drugim (rys. 2.2) akapicie. Liniowość i nieliniowość metod nie ma, zdaniem recenzenta, bezpośredniego związku z omawianymi metodami. Można się domyślić, że Autor opierał się na metodach identyfikacji dla specyficznej klasy dyskretnych modeli wielomianowych sprowadzających się do transmittancji dyskretnych (dla tej klasy układów przedmiotowe opisy są prawdziwe). Jednak, zgodnie



ze schematem z rys. 2.1 można z powodzeniem zastosować modele oparte na funkcjach ortonormalnych tj. Laguerre'a, Kautza, GOBF (ang. *Generalized Orthonormal Basis Functions*), itp., które klasyfikować należy jako metody liniowe.

- 4) Strona 30 linia 5. W inwersji w równaniu (2.9) potrzebujemy informacji o sygnałach w przedziale od t_0 do t . Przedstawiona w pracy informacja, że potrzebne są wartości w czasach t_0 i t jest prawdziwa wyłącznie w specyficznym przypadku.
- 5) Sekcja 2.4.1. Autor bardzo szczegółowo opisuje autorską procedurę ponownej identyfikacji. Sama procedura jest interesująca i nie budzi wątpliwości recenzenta. Jednak w opisie zabrakło bardziej szczegółowych informacji dotyczących ograniczeń stosowania zaproponowanej metody, pomimo, że Autor sam spotkał się z jej ograniczeniami. Przykładem może tu być warunek niezależności liniowej sygnałów wejściowych, której brak uniemożliwia rozdzielanie poszczególnych torów modelu. Dlatego nasuwają się dwa pytania a) jaka może być korelacja pomiędzy sygnałami w poszczególnych torach która prowadzi do satysfakcjonujących wyników? b) jakie są ew. inne ograniczenia zaproponowanej metody?
- 6) Sekcja 2.4.1. Proponowany przez Doktoranta algorytm ponownej identyfikacji sprawia wrażenie dość skomplikowanego. Stąd nasuwa się pytanie o złożoność obliczeniową zaproponowanego algorytmu.
- 7) Doktorant w kilku miejscach pracy opisywał problem niestabilnych rezultatów identyfikacji (np. komentarz na stronie 43 linia 20). Recenzentowi nasuwają się w tym miejscu dwa pytania a) o przyczyny otrzymywania niestabilnych wyników identyfikacji pomimo stabilnego procesu oraz b) metody zmniejszania ryzyka występowania takich problemów.
- 8) Podrozdział 5.3. Autor wyznacza parametry modeli z zastosowaniem sympleksowych metod optymalizacji (metoda *fminsearch*) w drodze wielokrotnych symulacji. Czy doktorant spotkał się z problemem występowania minimów lokalnych? Jeśli tak, to w jaki sposób rozwiązywał te problemy?
- 9) Rys. 6.5, 6.7-6.12, 8.6, 8.8, 8.11, 8.13, 8.14, 8.17. W przebiegach czasowych odpowiedzi modeli procesu (Temp. symulowana-mdl) można zauważyć występowanie nieciągłości. Z czego one wynikają i jak są eliminowane przy zastosowaniu modelu w zadaniu sterowania?
- 10) Generalnie w całej pracy Doktorant nie opisuje wymiarów macierzy i wektorów stosowanych we wzorach. Wprowadzenie tych opisów znacznie ułatwiłoby czytanie pracy.

Drobne uchybienia typograficzne i stylistyczne:

- Strona 25 linia 8. Jest *wykorzystania*, powinno być *wykorzystaniem*.
- Strona 34 linia 7. Autor wprowadził opis splotu bez stosownego komentarza.
- Strona 134 linia 16. Jest *wpływu*, powinno być *wpływ*.
- W pracy zdarzają się zwroty nieprecyzyjne i potoczne. Np. strona 69 zwrot: *zasilacz szklarski jest dłuższy niż szerszy*, strona 117 zwrot *...nieco słabszych maszyn...*, itp.



- W pracy Autor nie opisuje skrótów przy pierwszym ich wystąpieniu. Co prawda opisy skrótów i oznaczeń zostały zamieszczone na początku pracy, ale ich wprowadzenie w miejscu pierwszego wystąpienia ułatwiłoby czytanie pracy.
- Tabela ważniejszych oznaczeń matematycznych przedstawia tylko opis wybranych oznaczeń. Wiele, również często wykorzystywanych w pracy oznaczeń nie zostało zamieszczonych w wykazie. Uwzględnienie ich ułatwiłoby czytanie pracy.

Należy podkreślić, że przedstawione powyżej uwagi, mają w większości charakter dyskusyjny. Ponadto główne uwagi nie odnoszą się do kluczowych kontrybucji Doktoranta. W związku z tym nie obniżają one bardzo pozytywnej oceny pracy.

5. Podsumowanie recenzji i wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska stanowi, zdaniem recenzenta, oryginalne rozwiązanie ważnego problemu naukowego oraz wykazuje dużą ogólną wiedzę teoretyczną i aplikacyjną Kandydata w dyscyplinie naukowej *Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika*, a także Jego umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Zatem stwierdzam, że **rozprawa mgr inż. Michała Drapały spełnia z nadmiarem** warunki określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 poz. 1668) z późniejszymi zmianami.

Uwzględniając oryginalność rozwiązania problemu naukowego przedstawionego w rozprawie, specjalistyczną wiedzę Kandydata w dyscyplinie *Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika* oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej **wnoszę o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Drapały do publicznej obrony.**

Prof. Stanisław