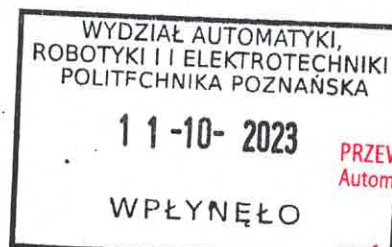


Dr hab. inż. Wojciech Hunek, Prof. Politechniki Opolskiej
Katedra Automatyki
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki
Politechnika Opolska
ul. Prószkowska 76
45-758 Opole
w.hunek@po.edu.pl

Opole, 22.08.2023



PRZEWODNICZĄCY RADY DISCYPLINY
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne
prof. dr hab. inż. Wojciech Szelaąg

Recenzja pracy doktorskiej

Pana mgra inż. Pawła SOKÓLSKIEGO

**pt. *„Kooperacyjny układ sterowania turbozespołu elektrowni jądrowej:
zastosowanie rozproszonej regulacji predykcyjnej i komunikacji
wyzwalanej zdarzeniowo”***

Niniejsza recenzja dotyczy rozprawy doktorskiej pt. *„Kooperacyjny układ sterowania turbozespołu elektrowni jądrowej: zastosowanie rozproszonej regulacji predykcyjnej i komunikacji wyzwalanej zdarzeniowo”* autorstwa Pana mgra inż. Pawła Sokólskiego, złożonej w ramach dyscypliny naukowej: automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne, objętej dziedziną nauk inżyniersko-technicznych. Promotorem oraz promotorem pomocniczym pracy doktorskiej są Panowie Profesorowie w osobach: Pan Prof. dr hab. inż. Dariusz Horla i Pan Prof. dr hab. inż. Bartosz Ceran. Wykonanie recenzji zlecono postanowieniem Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Poznańskiej, normowanym podjętą dnia 21 czerwca 2023 roku uchwałą nr 48/2022-2023. Postępowanie o nadanie Kandydatowi stopnia naukowego doktora zostało wszczęte w dniu 06.06.2023 roku.

1. Geneza

Liczne współczesne implementacje praktyczne wymagają odpowiednich narzędzi, które pozwalają na ich wydajne i bezpieczne użytkowanie. Trudno wyobrazić sobie sprawnie działający system rzeczywisty bez dedykowanych rozwiązań, obejmujących zarówno warstwę sprzętową, jak i programową. Stąd nie bez znaczenia jest ciągłe dostosowywanie, wręcz upraszczanie, na przykład poprzez redukcję, złożonych opracowań teoretycznych na potrzeby ich skutecznego wdrażania w przemyśle. Takiej idei przyświeca recenzowana dysertacja doktorska, w której szczegółowo przedstawiono oryginalną procedurę

projektowania zaawansowanych struktur sterowania turbozespołu elektrowni jądrowej. Celem zasadniczym rozprawy doktorskiej jest opracowanie nowego podejścia do kooperacyjnego sterowania wyzwalanego zdarzeniami złożonym obiektem infrastruktury krytycznej, przy zachowaniu akceptowalnych wskaźników jakości. Znamiennym jest, że nowa metoda gwarantuje działanie w szerokim zakresie zmiany punktu pracy systemu oraz prowadzi do minimalizacji obciążenia sieci komunikacyjnej. Na potrzeby poprawnej realizacji przedsięwzięcia, ze względu na brak możliwości weryfikacji otrzymanych wyników na obiekcie rzeczywistym, zaproponowano dwie klasy modeli: pierwszą obejmującą złożony model wirtualny dedykowany analizie i syntezie zjawisk występujących w diskutowanym systemie oraz drugą odpowiadającą potrzebom projektowania rozproszonej regulacji predykcyjnej opartej na mechanizmach adaptacji oraz kooperacji, a także komunikacji wyzwalanej zdarzeniowo. Elementem kluczowym podczas zadań projektowych był w tym przypadku zespół turbina parowa-generator synchroniczny obiegu wtórnego elektrowni jądrowej.

Z przekonaniem uważam, że podjęcie tematyki badawczej przedstawionej w ramach dysertacji jest w pełni zasadne, a wręcz oczekiwane z punktu widzenia silnie przejawiającego się w niej wątku implementacyjnego. Potrzeba wykorzystania współczesnych osiągnięć teorii sterowania w praktyce niesie znamiona ugruntowanej synergii. Tak postawione cele i zadania doprowadziły do sformułowania tezy rozprawy doktorskiej w następującym brzmieniu:

„Zastosowanie technik kooperacyjnego sterowania automatycznego w systemie turbina parowa-generator synchroniczny – pracującym ze zmiennym obciążeniem w określonym zakresie i podlegającym zewnętrznym zakłóceniom – poprawia stabilność pracy systemu w porównaniu do przypadku bez kooperacji. Wraz z wykorzystaniem wyzwiania zdarzeniowego wpływa to na znaczne zmniejszenie obciążenia łącza komunikacyjnego i optymalizuje pracę układu w stosunku do podstawowego schematu regulacji.”

Przejawiający się w tezie wątek stabilności został przez Autora szczegółowo opisany i w pełni uzasadniony.

2. Struktura pracy

Napisana w języku polskim praca doktorska składa się ze spisu treści, streszczenia wraz ze słowami kluczowymi, streszczenia wraz ze słowami kluczowymi w języku angielskim, listy skrótów i symboli, dziewięciu rozdziałów,

wykazu bibliografii, spisu rysunków, spisu tabel oraz czterech załączników (w ostatnim zawarto autorskie oraz współautorskie publikacje Pana mgr inż. Pawła Sokólskiego). Integralną część rozprawy stanowi płyta kompaktowa z jej zawartością. Dysertacja doktorska liczy 268 stron w części zasadniczej oraz zawiera 88 pozycji literaturowych. Poniżej syntetycznie scharakteryzowano główne rozdziały pracy doktorskiej.

Rozdział 1 → Wprowadza w ciekawą problematykę rozwoju energetyki z umocowaniem w postaci rozwiązań dedykowanych współczesnym systemom elektroenergetycznym. Dla osób nieparających się w swych badaniach przedstawionymi tutaj treściami, rozdział ten stanowi zupełne kompendium wiedzy i preludium do dalszych rozważań nad istotą pracy. W rozdziale zawarto również zakres i cel oraz tezę rozprawy, jak również motywację podjęcia wysiłku badawczego.

Rozdział 2 → Istotny rozdział objaśniający pojęcie obiektu wirtualnego oraz przybliżający mechanizmy rekurencyjnej metody najmniejszych kwadratów, sterowania predykcyjnego (DMPC, MPC, DMC, QDMC), sterowania kooperacyjnego i komunikacji wyzwalanej zdarzeniowo.

Rozdział 3 → Stanowi popartą literaturą retrospekcję klasycznych oraz przegląd współczesnych rozwiązań stowarzyszonych z treściami rozprawy doktorskiej, ostatecznie prowadząc do specyfikacji oryginalnego wkładu dysertacji.

Rozdział 4 → Jeden z kluczowych rozdziałów traktuje o analizie strukturalnej i dekompozycji funkcjonalnej finalnie prowadzących do wyodrębnienia składowych bloku elektrowni jądrowej, ze szczególnym naciskiem położonym na elementy turbiny i generatora, i wskazania sieci powiązań występujących pomiędzy nimi. W rozdziale tym wyjaśniono także użyty w pracy mechanizm projektowania obiektowego.

Rozdział 5 → W rozdziale przedstawiono dwa typy modeli turbiny i generatora (wraz z otoczeniem): rodzaj pierwszy uwzględniający nieliniowość (stowarzyszony z wirtualnym modelem odniesienia) oraz rodzaj drugi, uproszczony, w postaci liniowych równań różnicowych, zaproponowany na potrzeby syntezy sterowania predykcyjnego. Rozdział wieńczy wypracowany liniowy model dyskretny zespołu turbina-generator poddany analizie porównawczej z modelem nieliniowym w kontekście użycia mechanizmów RLS i QDMC.

Rozdział 6 → To przegląd klasycznych układów regulacji turbozespołu oraz propozycja nowych struktur będących podwalinami proponowanego w pracy oryginalnego podejścia w postaci adaptacyjnego i kooperującego DMPC (implementującego raczej mechanizm QDMC) z komunikacją wyzwalaną zdarzeniowo.

Rozdział 7 → Istotny rozdział traktuje o autorskim podejściu do rozproszonej regulacji predykcyjnej opartej na mechanizmie kooperacji zespołem turbina-generator. Ostatecznie scharakteryzowano tu wypracowane podejście w kontekście stabilności i odporności. W rozdziale podano szereg scenariuszy symulacyjnych.

Rozdział 8 → Kluczowy rozdział wprowadza w problematykę komunikacji wyzwalanej zdarzeniowo oraz precyzuje warunki wyzwalania komunikacji. Badania symulacyjne w pełni uzasadniają użycie mechanizmu event-triggered w kooperującym układzie DMPC turbozespołu.

Rozdział 9 → To podsumowanie, wnioski i zestawienie problemów otwartych.

W tym miejscu należy zaznaczyć, że następowanie treści kolejnych rozdziałów dysertacji jest racjonalne i nie budzi żadnych zastrzeżeń. Struktura pracy jest dobrze dobrana, co bez wątplenia zwiększa jej przejrzystość.

3. Wartość merytoryczna rozprawy doktorskiej

Recenzowana praca doktorska należy do interdyscyplinarnych osiągnięć, łączących dorobek kilku nauk. Co więcej, ma charakter implementacyjny, co jest oczekiwane z punktu widzenia transferu rezultatów teoretycznych do praktyki. Ważnym jest, że rozwiązania w niej prezentowane cechuje uniwersalność, pozwalająca na ich wszechstronne użycie, w tym przypadku na potrzeby optymalnej pracy elektrowni jądrowej. Istotą nowego podejścia jest zapewnienie jakości energii elektrycznej podczas pracy znamionowej i oddziaływających zakłóceniach (odbiór ciepła, kogeneracja) z wykorzystaniem kooperacyjnego układu sterowania i komunikacji wyzwalanej zdarzeniowo przy asyście rozproszonej regulacji predykcyjnej. Cel osiągnięto poprzez zastosowanie wielu technik, między innymi w postaci: dodania dodatkowego kanału komunikacyjnego, użycia asynchronicznej wymiany informacji o wypracowanej wartości sygnałów

sterujących, zastosowania mechanizmu RLS, predefiniowania sygnałów wejściowych (stopień otwarcia zaworu sterującego turbiny, napięcie wzbudzenia generatora) i wyjściowych (moc czynna, amplituda i częstotliwość napięcia generatora) turbozespołu, zdefiniowania zakłóceń, określenia celu sterowania, użycia danych generatora GTHW-600 oraz turbiny 4CK-465 współpracujących z siecią sztywną SEE, nieuwzględnienia stanów awaryjnych, uproszczenia procesów rzeczywistych, potwierdzenia działania w czasie rzeczywistym uwzględniającego ograniczenia podejścia DMPC/QDMC, wreszcie zdefiniowania interesujących problemów otwartych.

Odnośnie do dorobku naukowego mgr inż. Pawła Sokólskiego, to jest on dobry. W bazie danych Web of Science Core Collection znaleźć można 9 wiodących publikacji Kandydata (na dzień 28 sierpnia 2023 roku). Indeks Hirscha wyniósł $h=4$. Znamiennym jest, że cztery najnowsze pozycje zostały opublikowane w czasopiśmie z tzw. 'listy filadelfijskiej', tj. Energies (IF=3.2). Świadczy to o dobrze planowanych pracach trudnej sztuki łączenia teorii z praktyką.

Reasumując, Pan mgr inż. Paweł Sokółski wykazał się bardzo dobrą znajomością zagadnień tematycznie związanych z całym procesem projektowania odpornych struktur sterowania obiektem rzeczywistym. Przewijające się w rozprawie zagadnienia pogranicza współczesnej teorii sterowania oraz implementacji rzeczywistej zaowocowały nowym, interesującym podejściem.

4. Uwagi

Jak wcześniej wspomniano, dysertacja doktorska jest napisana dobrym językiem, chociaż niektóre zdania są zbyt długie, co utrudnia czytelnikowi zrozumienie prezentowanych treści. Od tekstów technicznych wymaga się zwięzłości, często prowadzącej do stosowania zdań pojedynczych, a nie wielokrotnie złożonych. Ponadto w pracy, prawdopodobnie ze względu na jej znaczną objętość, zauważyć można szereg różnego typu przekłamań. Niektóre mają charakter stylistyczny i gramatyczny, kolejne spotkać można w podpisach pod rysunkami, także w samych rysunkach, w opisie formuł matematycznych i odniesieniach do nich. Przykładami mogą być tu: rysunek 5.19, rysunek 6.2, rysunek 6.20, wzór 6.5 etc. Ponadto, niektóre rysunki są mało czytelne, a nieliczne akronimy doczekały się różnej interpretacji w wykazie skrótów i w tekście dysertacji (np. ISE, ITSE). Rysunki 8.6 i 8.8 wydają się być umieszczone w złych miejscach. Konkludując, nie sposób odnieść się indywidualnie do wszystkich drobnych omyłek — mają one wyłącznie charakter redakcyjny. Znamiennym jest, że dyskutowane przekłamanie w żaden sposób nie obniżają dobrej merytoryki

recenzowanej rozprawy. Co więcej, chociaż w oryginalnej/autorskiej części pracy wyraźnie obserwowany jest duży wydzźwięk ostatnio wydanych publikacji naukowych, to część z pozostałych pozycji literaturowych mogłyby doczekać się aktualizacji. Kończąc, na słowa uznania zasługują wyczerpujące wprowadzenia do kolejnych rozdziałów tematycznych, pozwalające osobom nieparającym się w swych badaniach naukowych na swobodną analizę prezentowanych w pracy treści.

Po lekturze przedłożonej rozprawy recenzentowi nasunęły się cztery zagadnienia wartę do omówienia podczas obrony pracy doktorskiej (proszę także o ustosunkowanie się do nich w sposób pisemny i przesłanie na adres: w.hunek@po.edu.pl). Brzmie one następująco:

1. Formuły (8.1)-(8.2) oraz (8.3)-(8.4) przedstawiają odpowiednio poprawne i niepoprawne warunki wyzwalania w kooperacyjnym układzie rozproszonej regulacji predykcyjnej turbozespołu z komunikacją wyzwalaną zdarzeniowo. Bardzo proszę o podanie procedury, o ile istnieje, doboru dyskutowanych parametrów w kontekście optymalnej pracy układu sterowania (minimalizacja predefiniowanych wskaźników jakości, minimalny odsetek załączeń, praca z ograniczeniami etc.).
2. W Rozdziale 8.3 rozprawy przedstawiono symulacyjne badania testowe zaproponowanego algorytmu wyzwalania zdarzeniowego. Trzy scenariusze potwierdzają poprawną i niewłaściwą pracę układu sterowania podczas komunikacji jednokierunkowej i dwukierunkowej. Badania oparto na otrzymaniu podobnych wskaźników jakości i estymat parametrów modeli w równolegle prowadzonych zadaniach komunikacji wyzwalanej zdarzeniowo oraz komunikacji wyzwalanej czasem. Rzeczywiście, w dobrze skonfigurowanych przykładach (pierwszy i trzeci) wskaźniki jakości są identyczne. Drugi scenariusz, zdaniem Autora, przynosi niepowodzenie. W dwóch omawianych wcześniej scenariuszach zastosowanie mechanizmu ET skutkowało powodzeniem. Czy zdaniem Autora rozprawy poprawne działanie algorytmu można rozpatrywać w kontekście jednak bardzo małych wartości uzyskanych wskaźników jakości. Czy możliwym jest uzyskanie lepszych wskaźników i „zredukowanej” komunikacji w układzie ET niż w konfiguracji TT?
3. Proszę pokrótce zsyntetyzować wpływ predefiniowanych w algorytmie sterowania horyzontów predykcji na przyjęte w pracy doktorskiej wskaźniki jakości.
4. Proszę szerzej omówić genezę stabilności, którą obserwuje się w nowym podejściu.

Podsumowując, uważam, że teza recenzowanej pracy doktorskiej została udowodniona i rozprawa spełnia wymogi obowiązującej ustawy sejmowej. Zatem wnioskuję o dopuszczenie Pana mgr inż. Pawła Sokólskiego do publicznej obrony pracy doktorskiej przed Radą Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Poznańskiej.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Jurek D...'.