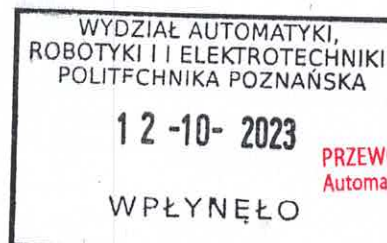




AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Wydział EAIiB

Katedra Automatyki i Robotyki



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

Kraków, dn.3.10.2023r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej
magistra inżyniera Pawła Sokólskiego
zatytułowanej**

Kooperacyjny układ sterowania turbozespołu elektrowni jądrowej.

Niniejsza recenzja została przygotowana na zlecenie Prof. dr. hab. inż. Wojciecha Szelaąga, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Poznańskiej - pismo z dnia 11.07.2023r. Zlecenie dotyczy oceny spełniania przez rozprawę doktorską mgr. inż. Pawła Sokólskiego: Kooperacyjny układ sterowania turbozespołu elektrowni jądrowej, warunków określonych w art. 187, ust 1, ustawy o stopniach i tytule naukowym.

1. Zagadnienia naukowe i naukowo-techniczne rozprawy

Tematyka recenzowanej rozprawy doktorskiej dotyczy analiz sterowania predykcyjnego z elementami kooperacji dla modelu matematycznego opisującego turbozespół pracujący w hipotetycznej elektrowni jądrowej opracowanego po dekompozycji problemu na podstawie uproszczonych modeli.

Na wstępie należy podkreślić iż rozprawa doktorska jest zrealizowana całościowo z wykorzystaniem narzędzi symulacyjnych. Jest to zrozumiałe, gdyż ze względów bezpieczeństwa nie jest możliwe prowadzenie prac na obiektach typu elektrownia jądrowa stanowiących infrastrukturę krytyczną. Ponadto, autor nie miał możliwości uruchomienia wybranej metody sterowania na obiekcie rzeczywistym, ani na modelu laboratoryjnym w odpowiedniej skali. Szkoda, gdyż modele turbiny parowej i generatora synchronicznego są powszechnie stosowane w jednostkach badawczych. Autor zaczerpnął modele szczegółowe z pracy [26] przedstawiającej model generatora synchronicznego oraz z pracy [18] opisującej model turbiny parowej. Modele nieliniowe wykorzystał do symulacji obiektów, zaś modele

Dr hab. inż. Adam Krzysztof Piłat, prof. uczelni

**Akademia Górniczo-Hutnicza im Stanisława Staszica w Krakowie
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej
Katedra Automatyki i Robotyki**

Kierownik laboratoriów: robotyki, fotowoltaiki i lewitacji magnetycznej
Al. A. Mickiewicza 30 C3-6, 30-059 Kraków,
tel. +48 12 61734844, fax +48 12 6341568
e-mail: ap@agh.edu.pl, home.agh.edu.pl/~ap, www.maglev.agh.edu.pl



uproszczone do syntezy sterowania. Opracowane metody sterowania poddał stosownym badaniom w różnych scenariuszach, zilustrował i skomentował wyniki.

Cel, teza i zakres rozprawy zostały sformułowane przez autora w rozdziale 1.2. Postawiona teza „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 wyzwalań zdarzeniowych wpływa to na znaczne zmniejszenie obciążenia łącza komunikacyjnego i optymalizuje pracę układu w stosunku do podstawowego schematu regulacji.”

2. Organizacja i redakcja rozprawy, odniesienia do literatury

Rozprawa obejmuje 268 stron maszynopisu, 88 pozycji literatury (s. 237÷247), spis rysunków, spis tabel, załącznik przedstawiający równania turbiny i jej parametry, załącznik B przedstawiający macierze modelu liniowego dla wybranego punktu pracy (nie w postaci ogólnej) i jego parametry, załącznik C przedstawiający modele turbozespołu (wartości liczbowe). Doktorant zadeklarował 12 publikacji związanych z tematyką rozprawy w latach 2011-2023, wśród których jest jedna praca samodzielna (z 2011 roku), pozostałe są wieloautorskie, w tym 7 pozycji pierwszego autorstwa. Rozprawa została podzielona na 9 rozdziałów (wliczając wstęp oraz podsumowanie i wnioski) oraz literaturę i załączniki. Pozycje bibliograficzne dobrze pokrywają zakres tematyczny rozprawy.

Praca została zredagowana dość starannie przy zachowaniu ogólnych zasad edytorskich. Uchybienia edycyjne wymieniłem w pkt. 5 niniejszej recenzji. Struktura pracy jest prawidłowa, a czytelnik jest w kolejnych rozdziałach zapoznawany z zagadnieniami oraz proponowanymi rozwiązaniami.

Rozdziały 1, 2 i 3 wprowadzają czytelnika w zagadnienie sterowania komponentem elektrowni jądrowej stanowiącej infrastrukturę krytyczną. W rozdziale czwartym autor przedstawił koncepcję obiektowej realizacji systemu sterowania. Rozdział piąty prezentuje modele matematyczne, a w rozdziale szóstym autor przytacza metody sterowania, które wykorzysta w dalszych badaniach. Rozdziały 7 i 8 stanowią trzon rozprawy, w których autor przedstawia proponowane algorytmy kooperacji oraz stosuje komunikację wyzwalaną zdarzeniowo. Tamże zawarte są ilustracje

funkcjonowania modeli turbozespołu oraz komunikacji. Rozdział 9ty stanowi podsumowanie rozprawy.

3. Osiągnięcia naukowe i uwagi pozytywne

Omawiana rozprawa doktorska stanowi wynik wieloletnich prac naukowo-badawczych autora i zespołu. Przykład turbozespołu elektrowni jądrowej został wybrany jako interesujący i ważny w świetle obecnych instalacji jak i przyszłych, które najprawdopodobniej będą miały miejsce na terenie naszego kraju. Tym samym problem uważam za ważny, aktualny i wartościowy z punktu widzenia rozwoju metod sterowania.

Autor skorzystał z modeli matematycznych znanych z literatury do symulacji nieliniowych obiektów. Modele te posłużyły jako obiekty poddawane sterowaniu przez lokalne regulatory opracowane na podstawie uproszczonych modeli liniowych. Autor opracował rozproszony kooperujący układ sterowania zespołu turbina-generator. Aby uwzględnić interakcje wprowadził mechanizm kooperacji i metodę zdarzeniowego wyzwiania komunikacji. Przeprowadzając liczne badania symulacyjne wykazał wady i zalety proponowanego rozwiązania. Regulację zrealizował proponując rozproszony układ regulacji predykcyjnej. Ponadto zastosował rekurencyjną metodę najmniejszych kwadratów do estymacji parametrów modelu. Autor zaproponował asynchroniczną komunikację wykazując aspekty odporności i obniżenia obciążenia jednostki obliczeniowej. Wyniki badań symulacyjnych analizował pod względem jakościowym wyznaczając całkowite wskaźniki ISE i ITSE.

W mojej ocenie oryginalne i pozytywne osiągnięcia rozprawy stanowią:

- zastosowanie kooperujących regulatorów predykcyjnych do sterowania modelem nieliniowym turbozespołu i przeprowadzenie badań symulacyjnych,
- opracowanie reguł kooperacji,
- opracowanie zasad wyzwających komunikację,
- ocena jakości sterowania poprzez zastosowanie całkowitych wskaźników,
- opracowanie uniwersalnej metody obiektowej dla realizacji regulatorów.

4. Wątpliwości i uwagi krytyczne

Analiza pracy przyczyniła się do sformułowania pytań, które zamieszczam poniżej odnosząc się do poruszanych w rozprawie zagadnień. Wiele wykresów jest nieczytelnych ze względu na zachodzenie na siebie przebiegów. Lepiej było przedstawić wykresy oddzielnie lub ilustrować błąd względem wzorca. Wnioskuje o przygotowanie wykresów, na których poszczególne sygnały są wyrysowane odrębnie w celu szczegółowej analizy i dyskusji wyników.

1. Autor rozprawy wykorzystał modele nieliniowe do realizacji zadań symulacji funkcjonowania turbosespołu. Modele liniowe uproszczone do realizacji zadań sterowania. Dlaczego autor nie skorzystał z nieliniowych metod sterowania predykcyjnego, które pozwalają na wykorzystanie modeli nieliniowych, rozwiązują zadanie optymalizacji z ograniczeniami, modele mogą zawierać parametry zmienne w czasie, ograniczenia równościowe i nierównościowe mogą być nieliniowe, a minimalizowana funkcja kosztu nie musi być kwadratowa?
2. Dokonana dekompozycja rzeczywiście upraszcza modelowanie i projektowanie sterowania. Czy jednak linearyzacja modelu globalnego całego turbosespołu nie przyniosła by oczekiwanych rezultatów? Za przykład można podać helikopter, w którym sterowanie lotem odbywa się poprzez umiejętnie sterowanie oboma wirnikami. Przecież autor miałby dostępny cały stan turbosespołu dla którego mógłby zaprojektować regulator od stanu. Więcej mógłby go sparametryzować w funkcji punktów pracy korzystając np. z logiki rozmytej.
3. Czy zaprojektowanie globalnego regulatora dyskretnego przy odpowiednio dobranym okresie dyskretyzacji nie przyniosłoby lepszych rezultatów aniżeli stosowanie wyzwalania zdarzeniami?
4. Jaka jest formuła regulatorów PID oraz ich parametry, gdyż są one wykorzystywane jako referencyjne? Czy możliwe jest dobranie innych nastaw regulatorów PID, aby uzyskać lepsze jakościowo rezultaty?
5. Jaki jest błąd aproksymacji funkcją kwadratową punktów pracy od mocy czynnej P_g (s.125)?
6. Jak wygląda struktura regulatora rozmytego oraz powierzchnie sterowania o którym autor wspomina na str. 123?

7. Czy jest możliwe zilustrowanie działania zaproponowanej metody sterowania przy obecności symulowanych zakłóceń (np. na sygnałach pomiarowych)? Jaka jest wówczas jakość sterowania?
8. Co można powiedzieć o stabilności, sterowalności i obserwowalności analizowanego modelu liniowego? Czy aspekty związane ze stabilnością układu otwartego i zamkniętego były podejmowane?
9. Czy w świetle kooperacji i sterowania należy rozważać zagadnienia związane z awarią komunikacji? Jak taka awaria wpłynie na funkcjonowanie turbozespołu? Czy można pokazać wynik symulacji proponowanej metody sterowania przy wystąpieniu takiej awarii (krótko lub długotrwałej)?
10. Dlaczego otwarcie zaworu sterującego było analizowane wyłącznie w zakresie 50-100%?
11. Czy w rzeczywistości możliwe są tak krótkotrwałe zmiany prędkości obrotowej jak to przedstawiono na rysunkach 7.8, 7.14, 7.19, 7.24, 7.29, 7.34, 7.39, 7.44? Analogicznie w przypadku napięcia i mocy czynnej? Proszę o przedstawienie wybranych fragmentów wykresów w powiększeniu w celu analizy stanów dynamicznych symulowanego systemu.
12. Co autor rozumie pod pojęciem „szybka dynamika generatora”? s.96
13. Autor zastosował metodę estymacji parametrów: s. 94 „...opisujące dynamikę turbozespołu, których parametry aktualizowane są w każdym kroku symulacji z wykorzystaniem algorytmu RLS” oraz komentarze w innych miejscach (s. 25, 94, 135, 213, 222, 226). Skoro pomiary są wykonywane w każdym kroku to dlaczego nie zastosować regulatora od stanu? Proszę skomentować warunki estymacji względem sterowania kooperacyjnego i komunikacji zdarzeniowej.
14. Proszę doprecyzować stwierdzenie s.205 „...tłumi oscylacje elektromechaniczne z zadowalającą jakością ...”
15. Czy można podać uogólnienie zależności 8.1 i 8.2 w powiązaniu z dynamiką obiektu, poziomem zakłóceń itp. tak aby otrzymać gwarancję poprawnego funkcjonowania układu zamkniętego, w szczególności gwarancję asymptotycznej stabilności?
16. Co autor miał na myśli pisząc na s. 222: „brak ciągłej ... znaczne oscylacje...”? Proszę o doprecyzowanie.
17. Czy można zdefiniować najdłuższą dopuszczalną przerwę w komunikacji aby zagwarantować stabilność pracy turbozespołu?

5. Wybrane uwagi edycyjne

Należy podkreślić fakt, iż praca została dość dobrze zredagowana, w tym opatrzona równaniami matematycznymi oraz ilustracjami. W tekście rozprawy można zauważyć następujące uchybienia edycyjne:

tekst:

- s. 14, *tez* → *też*,
- s. 25 *otrzymać możliwie wysokiej jakości regulacji* → *otrzymać możliwie wysoką jakość regulacji*,
- s. 28, *zdarzewniowo* → *zdarzeniowo*,
- s. 61, *Część wysokokopreżna i niskopreżna wraz z upustami modeluje się w analogiczny sposób* → *Część wysokokopreżną i niskopreżną wraz z upustami modeluje się w analogiczny sposób*,
- s. 65, *„... pracy generatora, co ... pracę generatora.”*,
- S. 65, *wynikający ze* → *wynikające ze*,
- s. 74, *krzywe magnesowania i wartości parametrów ... ich wartości poza punktami ...*
- s. 84, *linearyzacji* → *linearyzacji*,
- s. 137, 173, 214 *Matlab* → *MATLAB* (to jest nazwa własna),
- s. 158, *obliczane jest jedynie jedna wartość* → *obliczana ...*,
- s. 175, *Tab. 7.1, w Rozdziale* → *w rozdziale*,
- s. 209, *solwera* → *solwera*,
- formatowanie symboli używanych w tekście i w równaniach jest odmienne od symboli zamieszczonych na rysunkach (np. rys. 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 itp.),
- s. 226 *„udało się”* – czy to oznacza, że uzyskany rezultat jest wynikiem przypadku?

równania i opisy równań:

- s. 64, symbole m_k i m_{ac} jako strumienie, a nie masa,
- s. 64, opis równania 5.13 – brak przepływu masowego w równaniu, brak opisu symbolu f ,
- s. 175, opis równania 7.7 – brak opisu parametrów a, b, c .

rysunki i wykresy:

- wiele rysunków było skalowanych w dokumencie, co spowodowało ich zniekształcenie,

- s. 30, rys. 3.1 nieczytelny (zbyt mała czcionka),
- s. 197 ÷ 200, legenda na rysunkach zawiera QDMC zamiast QDMC1 według scenariusza opisanego na str. 197,
- s.219, „w 20. sekundzie symulacji.” → „w 20 sekundzie symulacji.”,

literatura:

- [21],niekompletna
J. A. Hernandez, H. A. Botero, J. D. Ospina and J. C. Perez, "Excitation System Parameters Estimation Using Evolutionary Algorithms," *2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, Caracas, Venezuela, 2006*, pp. 1-6, doi: 10.1109/TDCLA.2006.311487.
- [26], brak wydawcy
Imieliński, A. Model Matematyczny Generators Synchronicznego dla Potrzeb Symulatora Pełnozakresowego. Ph.D. Thesis, Gdańsk University of Technology, Gdańsk, Poland, 1987.
- [46], niekompletna
Chaber, P., Ławryńczuk, M. (2017). Implementation of Analytical Generalized Predictive Controller for Very Fast Applications Using Microcontrollers: Preliminary Results. In: Mitkowski, W., Kacprzyk, J., Oprędkiewicz, K., Skruch, P. (eds) Trends in Advanced Intelligent Control, Optimization and Automation. KKA 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 577. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-60699-6_37
- [71], "number please" – co to znaczy ?
Sokółski, P.; Rutkowski, T.A.; Ceran, B.; Złotecka, D.; Horla, D. Numbers, Please: Power- and Voltage-Related Indices in Control of a Turbine-Generator Set. *Energies* 2022, 15, 2453. <https://doi.org/10.3390/en15072453>
- [78], brak wydawcy
Piotr Tatjewski; *Advanced Control of Industrial Processes, Structures and Algorithms*; Springer London, 2007, doi.org/10.1007/978-1-84628-635-3

6. Przydatność rozprawy dla nauk technicznych

Przedstawiona do recenzji rozprawa zdaniem recenzenta stanowi interesujące osiągnięcie w rozwoju nauk technicznych, w szczególności ukierunkowanych na analizę sterowania kooperacyjnego i regulacji wyzwalanej zdarzeniowo.

Przedstawienie zagadnienia dla modelu symulacyjnego turbozespołu wykazało, że możliwe jest skuteczne zaprojektowanie układu sterowania. Praca ta może stanowić punkt wyjścia do dalszych rozważań nad zdecentralizowanymi układami sterowania, zwłaszcza w zakładach przemysłowych, gdzie funkcjonują różne urządzenia z lokalnymi pętlami regulacji. Tego typu rozwiązanie sterowania nadrzędnego pozwoliłoby zoptymalizować globalne sterowanie i jednocześnie ograniczyć ruch sieciowy w rozproszonym systemie sterowania. Widzę również przydatność tego rozwiązania w automatyce budynkowej, w szczególności w sterowaniu systemem ogrzewania.

7. Wniosek końcowy

Zdaniem recenzenta, rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Sokólskiego prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne oraz oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dotyczącego zastosowania technik kooperacyjnego sterowania i tym samym spełnia wymagania stawiane w art. 187. Ust. 1. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz.U.2023.0.742 - Ustawa z dnia 20 lipca 2018r. stawiane pracom na stopień doktora nauk technicznych.

Wnoszę o dopuszczenie przedmiotowej rozprawy doktorskiej do publicznej obrony pracy doktorskiej w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

Recenzent

Dr hab. inż. Adam Krzysztof Piłat, prof. uczelni