

Prof. dr hab. inż. Adrian Halinka  
Katedra Elektroenergetyki i Sterowania Układów  
Politechnika Śląska

Gliwice, 9 sierpnia 2023 roku

PRZEWODNICZĄCY RADY DISCYPLINY  
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika  
i Technologie Kosmiczne

prof. dr hab. inż. Wojciech Szelaąg

RECENZJA



rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Sokólskiego

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

## 1. Dane ogólne

Podstawą wykonania recenzji rozprawy doktorskiej, jest pismo (DR-012/97/2023) Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Poznańskiej, prof. dr hab. inż. Wojciecha Szelaąga, powołujące się na uchwałę (nr 48/2022-2023) Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Poznańskiej z dnia 21 czerwca 2023 roku oraz opracowanie pod ww. tytułem, o objętości 268 stron razem z wykazem literatury, spisem rysunków i tabel oraz załącznikami.

## 2. Charakterystyka tematu i tezy

Na przestrzeni wielu lat obserwuje się podejmowanie działań w obrębie szeroko rozumianej elektroenergetyki związanych z zaspokojeniem rosnącego popytu na energię elektryczną. Działania te ukierunkowane są przede wszystkim na zaspokojenie oczekiwań i wymagań odbiorców energii w odniesieniu do jej parametrów jakościowych jak i niezawodności dostaw. Wymagania te są jednocześnie konfrontowane z procesami decentralizacji i urynkowienia elektroenergetyki, których ważnym aspektem są zagadnienia (kryteria) ekonomiczne. Ostatnimi laty mocno akcentowane są również działania w kierunku dekarbonizacji krajowej elektroenergetyki poprzez, np. wprowadzanie elektrowni jądrowych w miejsce jednostek wytwórczych bazujących na węglu jako nośniku energii pierwotnej. Wynika z tego konieczność przededefiniowania tradycyjnego podejścia do zagadnień eksploatacji, planowania i automatyzacji pracy systemu elektroenergetycznego (SEE), którego głównym wątkiem były wymagania techniczne, uzupełniając je uwarunkowaniami ekonomicznymi oraz administracyjno-prawnymi. Traktując pracę SEE lub wydzielonych w nim struktur funkcjonalnych i topologicznych, jako proces przede wszystkim techniczny, wymagania jakościowe i niezawodnościowe generowanej, dystrybuowanej i użytkowanej energii elektrycznej wymuszają konieczność zapewnienia wysokich wymagań technicznych pracy sieci elektroenergetycznej w tym jednostek generacyjnych. Biorąc pod uwagę rozwijającą się decentralizację funkcjonalną struktur sieciowych, np. przez wyodrębnianie obszarów sieciowych lokalnie bilansujących się, powstawanie tzw. klastrów energii, wprowadzanie technologii klasy smart, zwiększający się udział lokalnych źródeł energii elektrycznej o różnorodnej postaci energii pierwotnej, a co za tym idzie dyspozycyjności mocy, należy zmienić postrzeganie pracy systemu elektroenergetycznego, jako procesu silnie dynamicznego o dużym stopniu rozproszenia funkcjonalnego i decyzyjnego. Wymusza to dużą elastyczność działania i nadążną adaptację jego elementów do pojawiających się wymagań i oczekiwań zarówno o charakterze technicznym jak i ekonomicznym.

Także działania w zakresie urynkowienia sektora elektroenergetyki powodują, że obserwuje się coraz częstsze fluktuacje rozptywu mocy, przede wszystkim w sieciach wysokich i najwyższych napięć. Duża rozpiętość wartości przesyłanej mocy jak również zmiana jej kierunkowości, wskutek, np. handlu transgranicznego czy zmiany warunków generacyjnych

(farmy wiatrowe, fotowoltaiczne), może powodować problemy w zapewnieniu prawidłowej pracy systemu elektroenergetycznego.

Wymienione składniki powodują istotne zmiany w funkcjonowaniu systemu elektroenergetycznego jak i silnie rzutują na jego bezpieczeństwo rozumiane jako zachowanie stabilnych warunków pracy. Wielowarstwowe przemiany zarówno w strukturze konfiguracyjnej systemu elektroenergetycznego jak i jego funkcjonalności oraz w oczekiwaniach odbiorców odnośnie jakości i niezawodności dostarczania energii elektrycznej powodują, że coraz istotniejsze staje się zachowanie odpowiedniego zapasu stabilności pracy systemu. Duża dynamika zmian zachodzących w pracy sieci elektroenergetycznej powoduje, że aktualnie istniejące warunki stabilnościowe często ulegają zmianie w wielu przypadkach zbliżając się do warunków granicznych lub je przekraczając. Jednym ze sposobów zapewnienia prawidłowej pracy SEE jest wprowadzenie jednostek wytwórczych o stabilnej mocy generowanej czy to w postaci systemowych bloków energetycznych dużej mocy (rzędu GW) czy rozproszonych jednostek modułowych, np. SMR o mocach nie przekraczających kilkuset MW.

Recenzowana praca jest dobrym przykładem działalności badawczej w zakresie nowoczesnych technik regulacyjnych i decyzyjnych w cyfrowych układach sterowania jednostek wytwórczych elektrowni jądrowych stanowiących skuteczny środek zapewnienia stabilnej (poprawnej) pracy systemu elektroenergetycznego. Doktorant, jako cel główny rozprawy przyjął rozwiązanie trudnego problemu, tj. opracowania nowej metodyki syntezy kooperacyjnego, układu sterowania systemem złożonym (regulatorem turbiny oraz regulatorem wzbudzenia generatora) bloku jądrowego w warunkach ograniczonego dostępu do obiektu rzeczywistego oraz optymalizacji jego działania poprzez zastosowanie komunikacji wyzwalanej zdarzeniowo.

Do oceny opracowanego układu sterowania kooperacyjnego wykorzystano całkowite wskaźniki jakości, tj. całą kwadrat uchybu sterowania (ISE) oraz całą kwadrat uchybu sterowania przemnożoną przez czas (ITSE) - dla trzech wielkości sterowanych: napięcia na wyjściu generatora, generowanej mocy czynnej oraz częstotliwości. Wskaźniki te pozwalają na agregację wielkości uchybów obu układów (regulatora turbiny i wzbudzenia) z całego czasu badań symulacyjnych (wskaźnik ISE) jak i na uwzględnienie szybkości zanikania błędu w czasie (wskaźnik ITSE). Posiłkowanie się wymienionymi wskaźnikami umożliwia porównanie rezultatów badań symulacyjnych pracy układów regulacji turbiny i wzbudzenia z różnymi systemami sterowania i w różnych warunkach wymuszania zmian ich pracy. Zaproponowany i opracowany w rozprawie układ sterowania powinien spełniać dwa zdefiniowane cele częściowe, mianowicie:

- minimalizować wskaźniki całkowite ISE oraz ITSE,
- minimalizować ilości komunikacji pomiędzy układami regulacji turbiny i wzbudzenia przy jednoczesnym zachowaniu jakości całego układu sterowania (wyrażonej wskaźnikami całkowitymi).

Opiniowana praca podzielona jest na 9 rozdziałów o różnej objętości i zakresie tematycznym, zawiera ponadto wykaz ważniejszych skrótów i symboli, spis literatury tematu, spis rysunków i tabel oraz 4 załączniki. Treść pracy można usystematyzować następująco: wprowadzenie do tematyki pracy, przedstawienie rozwoju i transformacji polskiej energetyki w kontekście wyzwań jej dekarbonizacji, sformułowanie celu pracy i jej tezy naukowej, omówienie zakresu rozprawy – rozdział 1; omówienie wykorzystanych w pracy narzędzi i metod obejmujących m.in.: obiekt wirtualny, sterowanie predykcyjne, rekurencyjną metodę najmniejszych kwadratów, sterowanie kooperacyjne i komunikację wyzwalaną zdarzeniowo – rozdział 2; wyniki studiów literaturowych Doktoranta z zakresu klasycznych układów regulacji turbiny i generatora, kooperacyjnych systemów sterowania i komunikacji wyzwalanej zdarzeniowo z akcentowaniem różnic pomiędzy wiedzą literaturową a działaniami badawczymi Doktoranta – rozdział 3; charakterystyka bloku wytwórczego elektrowni jądrowej i jej elementów składowych, przedstawienie sieci ich wzajemnych interakcji, stanowiącej podstawę do dekompozycji rozpatrywanego układu na turbinę parową i generator synchroniczny – rozdział 4; omówienie modeli matematycznych turbiny i generatora, tj. modelu nieliniowego stanowiącego wirtualny model odniesienia oraz dyskretnego modelu liniowego

wykorzystywanego w układzie regulacji predykcyjnej – rozdział 5; na bazie przeglądu literatury oraz norm przedstawienie klasycznych i zaawansowanych technik regulacji mocy czynnej i napięcia wyjściowego układu turbina-generator oraz przeanalizowanie algorytmów QDMC, stanowiących podstawę algorytmu rozproszonej, kooperacyjnej, regulacji predykcyjnej zaproponowanego w rozprawie – rozdział 6; przedstawienie i omówienie systemu sterowania układu turbina-generator w postaci rozproszonej, kooperacyjnej, regulacji predykcyjnej. Zaproponowanie trzech układów kooperujących stanowiących kombinację metod klasycznych i predykcyjnych. Badania symulacyjne, analiza wyników oraz ocena porównawcza skuteczności działania opracowanych algorytmów dla różnych wymuszeń działań regulacyjnych, która umożliwiła wybór optymalnej struktury i algorytmów kooperacyjnego systemu sterowania obiektem – rozdział 7; przedstawienie idei komunikacji wyzwalanej zdarzeniowo, omówienie technologii wyzwalania zdarzeniowego i czasowego, sformułowanie warunków wyzwalania zdarzeniowego komunikacji pomiędzy regulatorem turbiny i wzbudzenia generatora, przeprowadzenie badań i analiz wyników weryfikujących słuszność wyboru komunikacji wyzwalanej zdarzeniowo w opracowanym kooperującym systemie sterowania turbozespołu - rozdział 8; podsumowanie przeprowadzonych badań i analiz oraz wykazanie celowości i korzyści z dekompozycji funkcjonalnej obiektu sterowania, opracowania i weryfikacji modeli regulatorów wykorzystanych w syntezie układu sterowania oraz sformułowania struktury i algorytmów rozproszonego sterowania predykcyjnego z komunikacją wyzwalaną zdarzeniowo - rozdział 9; obszerny, wyczerpujący, liczący 88 pozycji zestaw literatury przedmiotu.

W tym kontekście uważam, że zarówno temat jak i cel oraz zakres rozprawy zostały wybrane zgodnie z aktualnymi potrzebami i trendami badawczymi w kraju i na świecie.

Główną tezę naukową pracy sformułowano na stronie 19 następująco:

***„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 wyzwalania zdarzeniowego wpływa to na znaczne zmniejszenie obciążenia łącza komunikacyjnego i optymalizuje pracę układu w stosunku do podstawowego schematu regulacji.”***

Biorąc pod uwagę łącznie temat, cel i zakres oraz powyższą tezę naukową należy stwierdzić, że rozpatrywane zagadnienie ma charakter naukowy odpowiedni na rozprawę doktorską.

### **3. Charakterystyka rozwiązania zagadnienia i użytych metod**

Ze sformułowanego celu, zakresu oraz tezy rozprawy wynika, że podstawowym zamierzeniem Doktoranta było opracowanie kooperacyjnego, wyzwalanego zdarzeniami systemu sterowania turbozespołem bloku jądrowego. Zaproponowany system sterowania powinien gwarantować dobre wartości wskaźników jakości sterowania, w szerokim zakresie zmian pracy obiektu sterowania przy minimalizacji obciążenia łącza komunikacyjnego. Dla oceny jakości pracy systemu sterowania oraz jego komponentów przeprowadzono bogate i wielowątkowe badania symulacyjne. Miały one określić właściwości systemu w zakresie minimalizacji błędu decyzyjnego (wyrażonego wartościami całkowitych wskaźników jakości), zwłaszcza w stanach wymuszeń wewnętrznych i zewnętrznych oraz porównania ich właściwości regulacyjnych z algorytmami realizującymi kryteria tradycyjne.

Sposób postawienia i rozwiązania tego problemu, przeprowadzone i przedstawione analizy teoretyczne jak i zastosowane środki symulacyjne dowodzą, że Doktorant zna i swobodnie posługuje się metodami pracy naukowej.

Jako obiekt sterowania przyjęto blok energetyczny elektrowni jądrowej z reaktorem wodnym ciśnieniowym PWR pracujący w układzie kogeneracyjnym. W obiekcie sterowania wyróżniono dwa podstawowe obiekty cząstkowe, tj. turbinę parową oraz generator synchroniczny. Brak w

polskim systemie elektroenergetycznym takich jednostek wytwórczych pociągał za sobą potrzebę opracowania jego modelu matematycznego pełniącego rolę obiektu wirtualnego. W celu sformułowania opisu matematycznego modelu bloku energetycznego Doktorant scharakteryzował budowę bloku jądrowego dokonał podziału obiektu na tzw. obiekt pierwotny i wtórny jak i omówił ich poszczególne elementy składowe. Przedstawił granice omawianego obiektu sterowania w strukturze systemu elektroenergetycznego oraz nakreślił sieć wewnętrzną wzajemnych interakcji pomiędzy elementami obiektu złożonego. Działania te posłużyły do dekompozycji obiektu na dwa główne elementy pierwotne turbinę parową i generator synchroniczny. Dalsze działania Doktoranta w tym zakresie koncentrowały się na opracowaniu dwóch modeli matematycznych układu turbina - generator:

- modelu nieliniowego uwzględniającego nieliniowości magnetyczne, stanowiącego wirtualny model odniesienia do wyników badań symulacyjnych, pozwalający na „ocenę jakości” regulacji;
- dyskretnego, liniowego modelu uproszczonego, wykorzystywanego do syntezy lokalnych układów regulacji turbiny i generatora – stanowiącego punkt wyjścia dla proponowanego układu regulacji predykcyjnej. W pracy przyjęto estymację on-line parametrów modelu z wykorzystaniem rekurencyjnej metody najmniejszych kwadratów (RLS).

Dla celów weryfikacji opracowanych modeli obiektu przeprowadzono symulacyjne badania testowe w których dla różnych warunków pracy generatora (wymuszanej skokowo zmianie produkowanej mocy czynnej), porównano zbieżność przebiegów czasowych produkowanej mocy czynnej, napięcia generatora i prędkości kątowej uzyskanych z uproszczonego modelu liniowego o parametrach identyfikowanych on-line metodą RLS (w obecności układów regulacji QDMC turbiny i generatora) z nieliniowym modelem złożonym. Pomimo zmian punktu pracy jednostki generacyjnej uzyskano zadowalającą zbieżność rezultatów badań, co potwierdza zasadność wykorzystania uproszczonych modeli liniowych o zmiennych parametrach na potrzeby syntezy układów regulacji automatycznej.

W celu opracowania algorytmu rozproszonej, kooperacyjnej, regulacji predykcyjnej układu turbina-generator wykorzystywanego do regulacji mocy czynnej oraz poziomu napięcia na wyjściu generatora synchronicznego, na wstępie omówiono znane, klasyczne (oparte przede wszystkim na regulacji proporcjonalno-całkującej PI) i zaawansowane (wykorzystujące logikę rozmytą, harmonogramowanie wzmocnienia oraz układy predykcyjne z adaptacją parametrów on-line) struktury sterowania. Wyniki przeprowadzonych analiz, głównie w oparciu o źródła literaturowe pozwoliły na przyjęcie do dalszych badań rozwiązań opartych na układach regulacji predykcyjnej DMC oraz jego wersji QDMC rozwiązującej zadanie programowania kwadratowego online. Regulacja predykcyjna bazująca na modelu obiektu turbogeneratora, umożliwia sterowanie obiektami wielowymiarowymi uwzględniając sformułowane dla nich ograniczenia i wewnętrzne interakcje. Doktorant w pracy zaproponował podział algorytmu na dwa składniki, tj. blok identyfikacji modelu obiektu i blok regulatora. Blok modelu obiektu dokonuje jego identyfikacji on-line na podstawie jego bieżących wejść i wyjść oraz bloku regulatora. Wyznaczone, aktualne parametry modelu są przekazywane do bloku MPC w każdym kroku regulacji. Zapewnia to wyznaczenie sygnału sterującego w oparciu o aktualny model obiektu.

W rozprawie rozważano trzy rozwiązania bloku regulacji predykcyjnej:

- regulator QDMC turbiny,
- regulator QDMC generatora,
- regulatory QDMC turbiny i regulatora jednocześnie.

Przeprowadzono szereg badań symulacyjnych porównujących działanie lokalnego regulatora bazującego na algorytmie klasycznym (regulator PI), na analitycznym rozwiązaniu zadania optymalizacji (regulator predykcyjny DMC) oraz regulatora predykcyjnego QDMC. Przyjęto scenariusz zakładający obecność jednego regulatora klasycznego turbiny lub generatora przy predykcyjnym regulatorze drugiego obiektu cząstkowego, tj. generatora lub turbiny. Analizowano wpływ skokowej zmiany wartości zadanej mocy czynnej o 10% w interwałach

czasowych co 20 sekund na przebiegi czasowe: generowanej mocy czynnej, napięcia na wyjściu generatora, prędkości kątowej oraz stopnia otwarcia zaworu sterującego turbiny.

Uzyskane rezultaty, w postaci całkowitych wskaźników jakości ISE jednoznacznie potwierdzają zasadność zastosowania regulatora QDMC dla turbiny i generatora zamiast obecnie stosowanych regulatorów PI.

Zaproponowane w rozprawie regulatory QDMC wykorzystują nieparametryczny model obiektu w postaci charakterystyki odpowiedzi skokowej. Dla otrzymania takiej postaci modelu obiektu zaproponowano jego obliczanie w każdym kroku regulacji na podstawie identyfikowanego w aktualnym punkcie pracy modelu dyskretnego obiektu, co sprowadza się do realizacji następujących zadań:

- określenia struktury modelu dyskretnego postaci wejście-wyjście,
- identyfikacji parametrów modelu w każdym kroku działania algorytmu regulacji,
- obliczenia, dla każdego kroku regulacji modelu odpowiedzi skokowej na podstawie aktualnego modelu dyskretnego,
- wykorzystania modelu odpowiedzi skokowej w algorytmie regulatora MPC.

Finalnie w rozprawie, m.in. ze względu na charakter obiektowego podejścia do modelowania obiektu złożonego i układu sterowania turbozespołu bloku jądrowego, zdecydowano się na wykorzystanie sterowania kooperacyjnego. Zaproponowana przez Doktoranta struktura takiego systemu sterowania składa się z dwóch autonomicznych układów regulacji turbiny oraz generatora, które wspólnie sterują turbozespołem bazując na współpracy obliczeniowej, dokonywaniu wspólnych pomiarów i podejmowaniu decyzji regulacyjnych. W takiej strukturze nie istnieje nadrzędny układ koordynujący, regulator turbiny i regulator generatora w czasie pracy udostępniają swoje dane jak i korzystają z dostępnych informacji zewnętrznych. Każdy z układów regulacji posiada swój niezależny cel działania, poprzez kooperację składający się na wspólny cel układu regulacji turbozespołu.

Dodatkowo, zastosowanie modularności struktury systemu sterowania pozwala na względnie łatwy dalszy jego rozwój czy to przez ulepszenie elementów istniejących, czy poprzez wprowadzenie dodatkowych modułów funkcjonalnych.

Dla minimalizacji negatywnego wpływu interakcji pomiędzy turbiną a generatorem, czego następstwem może być pogorszenie jakości produkowanej energii elektrycznej, opracowany system sterowania kooperacyjnego uzupełniono o dodatkowy kanał komunikacji bezpośredniej. Pozwala on na wymianę wypracowanego sygnału sterującego pomiędzy regulatorami turbiny i wzbudzenia generatora.

**Przeprowadzone w rozprawie badania i analizy pozwoliły na opracowanie autorskiej koncepcji systemu rozproszonej regulacji predykcyjnej DMPC opartego o koordynację dwóch układów regulacji QDMC turbiny i wzbudzenia generatora, wymieniających się informacją o aktualnie wypracowanych wartościach sygnałów sterujących.**

Dla oceny jakości pracy opracowanego systemu sterowania turbozespołem bloku jądrowego przeprowadzono wielowątkowe badania symulacyjne z wykorzystaniem pakietu programowego Matlab/Simulink, których rezultaty pozwoliły na ocenę skuteczności działania systemu jak i na jej odniesienie do tradycyjnych rozwiązań regulatorów, tj. regulatora PI dla turbiny oraz regulatora PI ze stabilizatorem systemowym dla układu wzbudzenia generatora. Symulacje obejmowały szereg scenariuszy wymuszenia działania regulatorów, których źródło miało charakter wewnętrzny jak i było spowodowane zdarzeniami zewnętrznymi. Scenariusze badań obejmowały przede wszystkim:

- zmianę referencyjnej mocy czynnej generatora synchronicznego. Zmiana o 10% następowała od mocy znamionowej do 50% mocy znamionowej generatora w 20 sekundowych interwałach czasowych.
- Przy referencyjnej zmianie mocy czynnej generatora następowała skokowa zmiana poboru pary na potrzeby kogeneracji (modelowana zmianą temperatury w systemie ciepłowniczym).

- Przy zadanym, stałym poziomie mocy generacyjnej (85% mocy czynnej generatora), następowała skokowa zmiana obciążenia cieplnego w interwałach 30 sekundowych (realizowana poprzez skokową zmianę temperatury 100°C, 10°C i 70°C).
- Przy zadanym, stałym poziomie mocy generacyjnej (70% mocy czynnej generatora), następowała w 30 sekundowych przedziałach czasowych skokowa zmiana parametrów pracy wytwornicy pary (zmiana ciśnienia pary na wejściu zaworu sterującego o -5%, -5% i +10%).
- Skokową zmianę napięcia od strony systemu elektroenergetycznego o +5% i -5% wartości napięcia znamionowego.
- Skokową zmianę częstotliwości systemu elektroenergetycznego o +0,1% i -0,1% częstotliwości znamionowej.
- Przy referencyjnej zmianie mocy czynnej generatora obserwowano wpływ zmiany horyzontu predykcji regulatorów QDMC na pracę systemu sterowania. Przyjęto horyzonty predykcji na poziomie 30, 43 oraz 60. Wyniki analiz rezultatów badań pozwoliły wyznaczyć optymalne (tzn. takie, które pozwoliły na znaczące zmniejszenie oscylacji napięcia generatora przy akceptowalnym czasie regulacji mocy) horyzonty predykcji dla regulatorów QDMC odpowiednio dla turbiny równy 43 oraz generatora o wartości 17.
- Przy referencyjnej zmianie mocy czynnej generatora i skokowej zmianie poboru pary na potrzeby kogeneracji następowało przerwanie komunikacji pomiędzy regulatorami QDMC turbiny i generatora.

Przeprowadzone badania symulacyjne obejmowały również dodatkowy wątek pozwalający na analizę wpływu zmiany parametrów regulatora kooperacyjnego na szybkość stabilizacji mocy generatora i stabilność pracy układu.

**Uzyskane rezultaty potwierdziły skuteczność opracowanego systemu sterowania w ograniczonej czasowo reakcji na wymuszenie regulacyjne przy zachowaniu jego stabilności. Posiłkując się wartościami całkowitych wskaźników jakości wykazano lepszą jakość sterowania opracowanego systemu w odniesieniu do rozwiązań klasycznych.**

Następne zagadnienie poruszane w rozprawie dotyczyło możliwości ograniczenia nadmiarowej komunikacji poprzez wyzwalanie zdarzeniowe w opracowanym systemie sterowania. Badania koncentrowały się na ocenie wpływu redukcji wymiany informacji pomiędzy regulatorem turbiny i generatora na skuteczność pracy systemu sterowania. W celu ograniczenia liczby wiadomości przesyłanych przez łącze komunikacyjne rozważano wykorzystanie wyzwalania czasowego oraz zdarzeniowego. W konsekwencji zaproponowano wyzwalanie komunikacji pomiędzy regulatorami zdarzeniami przekraczającymi przyjęte progi nieczułości, tj. 1% zmiany sygnału sterującego  $\alpha$  (regulator turbiny) oraz 0,00001(jednostki względne) zmiany sygnału sterującego  $E_{fd}$  (regulator wzbudzenia generatora). Rozważania teoretyczne uzupełniono badaniami symulacyjnymi dwóch regulatorów MPC o takich samych parametrach, przy czym jeden wykorzystywał komunikację (jedno- i dwukierunkową) wyzwalaną zdarzeniowo, drugi jej nie posiadał. Przy skokowej zmianie mocy produkowanej przez generator synchroniczny oceniano jakość regulacji regulatorów turbiny i wzbudzenia generatora za pomocą wartości wskaźników ISE. Analizie poddano również wpływ poziomu redukcji wyzwalania komunikacji na uzyskiwane rezultaty.

Podsumowując można stwierdzić, że tekst rozprawy jest przykładem celowego, metodycznego i skutecznego działania Doktoranta. Jej treść obrazuje łatwość i swobodę działania Autora w zagadnieniach, m.in. modelowania liniowego i nieliniowego elementów i obiektów złożonych struktur wytwórczych energetyki, obiektowego podejścia do projektowania systemów sterowania, syntezy układów regulacji, klasycznych i zaawansowanych (predykcyjnych) algorytmów sterowania, formułowania algorytmów kooperacji, wykorzystania w kooperujących systemach sterowania komunikacji wyzwalanej zdarzeniowo, określania wartości progowych kryteriów decyzyjnych regulatorów inicjujących komunikację.

**W moim przekonaniu w rozprawie przyjęto i zastosowano odpowiednie metody naukowe i środki realizacji do rozwiązania postawionych problemów i wykazania jej tezy.**

#### **4. Wartość merytoryczna rozpatrywanej rozprawy**

Wartość pracy obrazują dokonania Doktoranta zarówno w zakresie badań teoretycznych jak i symulacyjnych. Prawidłowe i efektywne wykorzystanie współczesnej wiedzy przy formułowaniu nowego, rozproszonego, kooperującego systemu sterowania obiektu złożonego turbina-generator synchroniczny, w którym wykorzystano estymację parametrów modelu obiektu on-line z użyciem rekurencyjnej metody najmniejszych kwadratów oraz komunikację wyzwalaną zdarzeniowo, swoboda w opracowywaniu wielowariantowych modeli symulacyjnych obiektu i układów regulacji stanowią składniki wartościujące recenzowaną pracę. Na wartość pracy wskazują również bogate i wszechstronne badania symulacyjne pozwalające na ocenę (z wykorzystaniem, m.in. wskaźników ISE) poprawności działania opracowanych algorytmów, wykazania w nich liderów, ich syntezę oraz analizę porównawczą skuteczności decyzyjnej opracowanego systemu sterowania w odniesieniu do odpowiedników „klasycznych”.

**Moim zdaniem główne osiągnięcia Autora to:**

- **Logiczne i precyzyjne postawienie problemu badań, ich celu i tezy.**
- **Opracowanie liniowych i nieliniowych modeli obiektu sterowania w postaci bloku wytwórczego elektrowni jądrowej.**
- **Zastosowanie estymacji parametrów modelu on-line obiektu złożonego z wykorzystaniem rekurencyjnej metody najmniejszych kwadratów.**
- **Opracowanie reguł obiektowego podejścia do konstrukcji układu regulacji turbozespołu, pozwalających na jego łatwą modyfikację i uzupełnienie funkcjonalne.**
- **Sformułowanie zasad kooperacji układów regulacji predykcyjnej turbiny i układu wzbudzenia generatora, bazujących na ich autonomii regulacyjnej oraz możliwości wzajemnej komunikacji.**
- **Ogólna poprawa całkowych wskaźników jakości sterowania blokiem wytwórczym w odniesieniu do rozwiązań klasycznych, poprzez wykorzystanie kooperującej, adaptacyjnej, regulacji predykcyjnej.**
- **Uzyskanie stabilnej pracy układu regulacji niezależnie od modelowanych warunków obciążeniowych turbozespołu.**
- **Optymalizacja wymiany danych w kooperacyjnych układach regulacji, poprzez opracowanie zasad wyzwalających komunikację bez obniżenia jakości sterowania (ocenianej wartościami całkowych wskaźników jakości), pozwalającą na minimalizację obciążenie łącza komunikacyjnego.**
- **Przeprowadzenie szerokich, wielowątkowych badań symulacyjnych weryfikujących poprawność decyzyjną opracowanych algorytmów regulacji i kooperującego systemu sterowania oraz przeprowadzenie analizy porównawczej skuteczności ich działania w stosunku do odpowiedników „klasycznych”.**

#### **5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne**

W trakcie lektury treści pracy nasunęły się pewne uwagi i pytania zarówno o charakterze ogólnym jak i szczegółowym.

*Uwagi ogólne:*

1. W rozprawie często używane jest pojęcie „częstotliwość napięcia”. Częstotliwość jest wielkością ogólnosystemową (sieciową) a nie dedykowaną jedynie sygnałom napięciowym. Jej stabilna wartość determinuje m.in. synchroniczny charakter pracy systemu elektroenergetycznego (SEE). Jest parametrem wspólnym, definiującym cechy wielu sygnałów pomiarowych, np. prądów czy wielkości elektrycznych mocy czynnej, biernej, energii elektrycznej itd.
2. Badania symulacyjne – ujmując je od strony elektrycznej w zasadzie koncentrowały się na skokowej zmianie zadanej mocy generowanej przez jednostkę wytwórczą i obserwacji na to zdarzenie weryfikowanego systemu sterowania kooperacyjnego. Zasymulowano również zmianę częstotliwości i napięcia systemowego w postaci skoku ich wartości. Jednak nie podano źródła lub przyczyny takiego zachowania się SEE. W rzeczywistości stany awaryjne lub zakłóceniami mogą w sposób dynamiczny zachwiać bilansem mocy czynnej lub biernej w SEE, co skutkuje zmianami (również o charakterze dynamicznym) częstotliwości i napięcia w systemie a w konsekwencji i bloku energetycznym. Przykładem może być udany cykl automatyki SPZ (samoczynne ponowne załączenie) 3 fazowej jako reakcji na wystąpienie zwarcia w linii przesyłowej wysokiego napięcia zlokalizowanej w pobliżu elektrowni. Następuje wówczas gwałtowny spadek mocy odbiorczej (odbiorcy odcięci od źródła energii) i ważna jest wówczas reakcja układów regulacji turbozespołu - nie na zmianę mocy zadanej ale zmianę mocy eksploatacyjnej. Jeżeli zakłócenie zwarcia miało charakter przemijający to automatyka SPZ po udanym cyklu łączeniowym (przy sprawdzeniu warunków synchronicznych połączenia) ponownie powiąże elektrownię z odciętymi strukturami odbiorczymi – interesujące byłoby reakcje proponowanego systemu sterowania turbozespołem na taką sekwencję zdarzeń. Czy przewiduje się badania weryfikujące opracowaną koncepcję systemu sterowania dla rzeczywistych zdarzeń sieciowych?
3. Kolejnym, interesującym przypadkiem badań były by kołysania mocy występujące podczas pracy SEE, zarówno takie których środkiem kołysań jest struktura sieciowa SEE jak i w przypadku poślizgu biegunów generatora. W przypadku braku reakcji, m.in. układów regulacji bloków energetycznych zdarzenie takie w konsekwencji spowoduje reakcje układów elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej eliminacyjnej bloku energetycznego lub elementów struktury sieciowej. Czy prowadzono lub czy przewiduje się prowadzenie takich badań symulacyjnych w kontekście analiz reakcji systemu sterowania na występujące zdarzenie?
4. Jedną z wielkości mierzonych na potrzeby pracy systemu sterowania jest napięcie generatora  $U_g$ . Czy jest to wartość skuteczna napięcia fazowego (1 harmonicznej) na wyjściu generatora (na wyprowadzeniu mocy z generatora)? Czy jest to napięcie fazowe „wyznaczone” ze zbioru trzech napięć fazowych  $U_{gL1}$ ,  $U_{gL2}$ ,  $U_{gL3}$ ? Która wartość napięcia fazowego będzie „podawana” do systemu sterowania w przypadku niesymetrii ich wartości. Przykładowo w trakcie cyklu 1 fazowej automatyki SPZ na linii wyprowadzenia mocy z bloku jądrowego lub wynikające z niesymetrii przepływów fazowych (praca farm wiatrowych czy fotowoltaicznych)? W którym miejscu bloku energetycznego dokonuje się tego pomiaru?
5. Proszę o rozwinięcie kwestii oceny dynamiki działania kooperującego systemu sterowania na zdarzenia i inercji na wymuszenie regulacyjne obiektu sterowania (turbozespołu) oraz kwestii dynamiki zmian mocy czynnej i biernej w SEE w kontekście podejmowania działań regulacyjnych? Na stronie 205 jest zapis: „*Dodatkowe badania symulacyjne pozwoliły przeanalizować wpływ zmiany parametrów regulatora na szybkość stabilizacji mocy generatora i stabilność pracy układu.*” Jakie badania symulacyjne pozwoliły na taką analizę? Czy jako zmienne parametry regulatora traktuje się również zmianę warunków pracy układu pierwotnego blok energetyczny – zewnętrzny SEE?
6. Dlaczego w opracowaniu modelu złożonego, traktowanego jako model referencyjny nie uwzględniono nieliniowości magnetycznych transformatora blokowego? Czy jest to założenie właściwe dla dowolnych warunków pracy bloku energetycznego?



7. W rozważaniach zawartych w rozdziale 5.1.4 wyznaczano parametry nasycenia magnetycznego stojana generatora w postaci wartości wzmożeń  $K_d$  i  $K_q$ . Czy obliczone wartości wzmożeń  $K_d$  i  $K_q$  są takie same dla dowolnego generatora? Są one zależne od cech zastosowanego materiału ferromagnetycznego i konstrukcji generatora, np. cylindryczny lub jawnobiegunowy?

*Uwagi szczegółowe:*

1. Na stronie 27 pracy napisano: „*Założonym celem jest polepszenie nadążania za trajektorią zadaną mocy czynnej oddawanej do SEE oraz minimalizacja zakłóceń częstotliwości i amplitudy napięcia (zapewnienie jakości).*” Czy w przypadku zaburzenia bilansu mocy czynnej w SEE jako całości, tzn. łącznie z analizowanym blokiem wytwórczym nadal celem będzie nadążanie za „trajektorią zadaną mocy czynnej”? Jak rozumiane są „zakłócenia częstotliwości”, czy jako zjawisko wywołane stanami awaryjnymi (zakłóceniami w SEE), czy będących efektem wzajemnych interakcji pomiędzy regulatorem turbiny a wzbudzenia generatora?
2. Jak rozumieć sformułowanie zawarte na stronie 45 pracy: „*Ruch obrotowy uzwojeń wirnika w polu magnetycznym powoduje indukowanie się w nich napięcia, a co za tym idzie - generowania energii elektrycznej.*”? Uzwojenie wzbudzenia wirnika zasilane jest tzw. napięciem wzbudzenia pochodzącym z magneśnicy (wzbudzenie maszynowe) lub układu prostownikowego (wzbudzenie statyczne).
3. Jak rozumieć schemat układu wirnika z prostownikiem przestawiony na rysunku 4.6? Jaki sygnał przemienny i jak powstający przekształca prostownik w wirniku?
4. Na stronie 52 pracy napisano: „*Różnice częstotliwości napięcia powodują powstawanie prądów stabilizujących prowadzących do zmiany prędkości obrotowej wału generatora i co za tym idzie, zrównania częstotliwości napięcia z częstotliwością systemu.*” Co to są i jak powstają prądy stabilizujące? W jaki sposób wpływają na zmiany prędkości obrotowej wału generatora?
5. Na stronie 53 pojawia się sformułowanie: „*Ponieważ są to trójfazowe napięcia przemienne istotne są nie tylko wartości tych napięć  $U_g$  i  $U_s$ , ale i kąt  $\delta$  wynikający z różnicy ich częstotliwości.*” Kąt  $\delta$  zwany kątem mocy dla jednostki generacyjnej określa przesunięcie kątowe pomiędzy siłą elektromotoryczną wzbudzenia a napięciem na wyjściu generatora (na wyprowadzeniu mocy do SEE). W praktyce kąt  $\delta$  wyraża poziom obciążenia danej jednostki generacyjnej nie jest natomiast wynikiem różnicy częstotliwości. W takim przypadku blok wytwórczy i SEE nie pracowałyby synchronicznie.
6. W równaniu 5.31 na stronie 73 reaktancje macierzy  $Z$  są mnożone przez pulsację. Czy w macierzy nie powinny być odpowiednie indukcyjności przemnożone przez pulsację?
7. Czy równanie 5.22 wyznacza wartość skuteczną napięcia fazowego, czy międzyprzewodowego na wyjściu generatora?
8. Nie do końca zrozumiała jest treść zamieszczona na stronie 119 pracy: „*W związku z tym, w ramach rozprawy rozpatrywana jest jedynie możliwość zmiany pracy układu regulacji napięcia wzbudzenia w normalnych stanach pracy.*” W normalnych (synchronicznych) warunkach pracy SEE powinien być zachowany bilans zarówno mocy czynnej jak i biernej nie wymagający podejmowania działań regulacyjnych. Jakie „normalne stany pracy” mogą taką potrzebę regulacji inicjować?
9. Z czego wynikają silne przesterowania napięcia wzbudzenia w chwili skokowej zmiany mocy czynnej generacyjnej zamieszczone na rysunku 7.11?
10. W jaki sposób treść zawarta na stronie 190 rozprawy: „*W takim przypadku, dla regulatora QDMC wskaźnik jakości jest prawie czterokrotnie mniejszy niż ma to miejsce w przypadku regulatora PI. Regulator PI ma natomiast dwukrotnie mniejszy wskaźnik jakości w przypadku stabilizacji prędkości kątowej i napięcia generatora (mniejsza wartość wskaźnika oznacza lepszą jakość regulacji).*” koresponduje z wynikami zamieszczonymi w tabeli 7.5?

11. Jak interpretować przebieg prędkości kątowej zamieszczony na rysunku 7.34? Zmiana częstotliwości w SEE powinna skutkować takim wyregulowaniem mocy czynnej generatora by zmianę tą zniwelować, doprowadzając do częstotliwości synchronicznej tj. 50Hz. W tym przypadku następuje stabilizacja na innej wartości częstotliwości.
12. Na stronie 204 pracy stwierdzono: „Brak informacji od drugiego z pary układów regulacji doprowadził do poważnych zakłóceń napięcia generatora.” Czym te zakłócenia się przejawiały i na jakim poziomie wartości?
13. Na stronie 212 pracy napisano: „Układ sterowania turbiną wysyła aktualizację, gdy zmiana sygnału sterującego  $\alpha$  przekroczy 1% (8.1). Sterownik generatora wysyła aktualizację, gdy sygnał sterujący  $E_{fd}$  przekroczy 0,00001 j.w.(8.2).” Co zdecydowało o przyjęciu takich progów inicjujących wymianę danych pomiędzy regulatorami turbiny i wzbudzenia?
14. Czy sugerowane wykorzystanie sieci komunikacyjnej do celów komunikacji wyzwalanej zdarzeniowo jest lepszym rozwiązaniem niż zastosowanie dedykowanego łącza komunikacyjnego?

Pragnę podkreślić, że powyższe uwagi i wątpliwości mają charakter dyskusyjny i nie umniejszają wartości recenzowanej pracy.

Także poziom edytorski pracy jest dobry. Pewne zastrzeżenia budzi czytelność (rozdzielczość) niektórych rysunków, fragmenty analizy uzyskanych wyników oraz użyte sformułowania. Pojawiają się również pewne przeoczenia czy błędy edytorskie, np.:

str. 25: Jest „w celu dostosowywania się układu do zmiany parametrów układu (...)”. O jaki układ chodzi?

str. 26: Jest „model nieparametryczny obliczany na podstawie parametrycznego modelu liniowego (...)”. Model czego?

str. 28: Jest „Komunikację wyzwalaną zdarzeniowo opisuje szerzej rozdział 8.” Powinno być: „Komunikację wyzwalaną zdarzeniowo opisuje szerzej rozdział 8.”

str. 38 Jest „metody sterowania kooperującego systemu turbozespołem”. Sugeruje się „metody sterowania kooperującego turbozespołem.”

str.39 Podpis pod rysunkiem 4.1 jest właściwy przy założeniu, że elektrownia posiada tylko jeden blok jądrowy. W schemacie brak transformatora blokowego.

str. 47 Błędny podpis pod rysunkiem 4.6.

str. 51 Jest: „Pierwszym omawianym połączeniem pomiędzy obiektami składowymi turbozespołu jest połączenie wewnętrzne pomiędzy turbiną i generatorem. Oba

te obiekty połączone są wspólnym wałem, na którym są one osadzone” Zazwyczaj na wspólnym wale osadzony jest wirnik generatora, jego stojan przyjmuje położenie stacjonarne.

Str. 64 W równaniu 5.13 nie ma zmiennej  $\dot{m}$  - przepływy masowe przez poszczególne stopnie.

Str. 69 Jest: „ (...) przekształcenia układu współrzędnych (osie u, v, w) związanego z nieruchomym stojanem (w stosunku do którego pole magnetyczne wiruje) na układ współrzędnych związany z obracającym się wirnikiem (osie d, q, 0).” Oznaczenie współrzędnych fazowych to L1, L2 i L3.

Str. 70 Zamieszczone na rysunkach 5.5 i 5.6 schematy zastępcze dotyczą generatorów cylindrycznych czy jednobiegunowych? Należy to doprecyzować.

Str. 76 Jest: „Po uwzględnieniu omawianych współczynników macierze  $\mathbf{X}$  i  $\mathbf{Z}$  (5.39),(5.31) przyjmują następującą postać”. Macierz  $\mathbf{X}$  opisuje równanie 5.37 a macierz  $\mathbf{Z}$  równanie 5.38.

Str. 77 Pod równaniem 5.38 jest: „gdzie  $K_d$ ,  $K_q$  oraz  $\omega_r$  są zmienne w zależności od punktu pracy generatora.” W tym równaniu nie ma tych zmiennych.

Str. 100 W równaniu 6.5 brak nawiasu kwadratowego.

Str. 111 Jest: „W przypadku regulatora generatora i amplitudy napięcia  $U_g$ ”. Nie ma regulatora generatora i amplitudy napięcia. Jest regulator wzbudzenia generatora który wpływa na poziom (amplitudę) napięcia wyjściowego generatora.

Str. 119 Jest: „za pracę generatora przestaje odpowiadać regulator napięcia, a jego rolę przejmują odpowiednie systemy zabezpieczeń i ograniczeń [49]” Powinno być: „za pracę generatora przestaje odpowiadać regulator napięcia, a jego rolę przejmują odpowiednie systemy zabezpieczeń i ograniczeń [49]”.

Str. 122 Jest: „Analizie poddano układy regulacji wykorzystujące logikę rozmytą, harmonogramowanie wzmocnienia (ang. *gain scheduling*) oraz układy z predykcją z adaptacją parametrów on-line.” Powinno być: „Analizie poddano układy regulacji wykorzystujące logikę rozmytą, harmonogramowanie wzmocnienia (ang. *gain scheduling*) oraz układy predykcyjne z adaptacją parametrów on-line”.

Str. 125 Jest: „Takie podejście pozwala w wykorzystać wiedzę o obiekcie sterowania (model) oraz lepiej, w stosunku do poprzednich rozwiązań, nadążać za zmianami zachodzącymi w obiekcie (adaptacja)”. Powinno być: „Takie podejście pozwala wykorzystać wiedzę o obiekcie sterowania (model) lepiej, w stosunku do poprzednich rozwiązań, nadążać za zmianami zachodzącymi w obiekcie (adaptacja)”.

Str. 125 Jest: „Najpopularniejszymi algorytmami regulacji predykcyjnej MPC są MAC (ang. *Model Alorhythmic Control*)”. Prawdopodobnie „*Model Algorhythmic Control*”.

Str. 125 Jest: „wykorzystujący model w postaci odpowiedzi skokowej oraz GPC”. Powinno być: „wykorzystujący model w postaci odpowiedzi skokowej oraz GPC”.

Str. 146 Jest: „Układy regulacji turboszespołu wpływają wzajemnie swoją pracą poprzez silną interakcję obiektów sterowania (turbiny i generatora)”. Powinno być: „Układy regulacji turboszespołu wpływają wzajemnie na swoją pracę poprzez silną interakcję obiektów sterowania (turbiny i generatora)”.

Str. 159 Jest: „który uwzględni wpływ zmiennych dodatkowych na wyjścia sterowany” Powinno być: „który uwzględni wpływ zmiennych dodatkowych na wyjścia sterowane”.

Str. 202 podpis nad rysunkiem 7.43 jest „napięcie wzbudzenia”, prawdopodobnie chodzi o „napięcie generatora”.

Str. 208 Jest: „co skutkuje znacznym zmniejszeniem obciążenia operacyjnego systemu pomiędzy występowanie takich zdarzeń”. Powinno być: „co skutkuje znacznym zmniejszeniem obciążenia operacyjnego systemu pomiędzy występowaniem takich zdarzeń”.

Str. 234 Jest: „w kooperacyjnych układach sterowania mających na celu minimalizację obciążenia sieci przesyłowych”. Sugeruje się: „w kooperacyjnych układach sterowania mających na celu minimalizację obciążenia sieci transmisyjnych (lub komunikacyjnych)”.

Niezrozumiałe jest kryterium porządkowania spisu literatury. Wiele pozycji literaturowych nie jest w pełni identyfikowanych, np. pozycje: [17], [21], [32], [43], [45] – brak numerów stron; brak informacji o wydawcy publikacji [49], [56], [67].

## 6. Wnioski końcowe

Zaprezentowana w pracy autorska koncepcja systemu rozproszonej regulacji predykcyjnej DMPC opartego o koordynację dwóch układów regulacji QDMC turbiny i wzbudzenia generatora, wymieniających się informacją o aktualnie wypracowanych wartościach sygnałów sterujących, opracowanie modeli nieliniowego i liniowego (o nadążnej estymacji parametrów) obiektu sterowania, przeprowadzenie wielowariantowych badań symulacyjnych oraz analiza uzyskanych wyników potwierdzają zdolności naukowe i umiejętności badawcze Doktoranta. Doktorant rozwiązał poprawnie sformułowany problem naukowy. Za pomocą dostępnych, nowoczesnych metod naukowych i badawczych udowodnił postawioną przez siebie tezę.

6.1 Na podstawie lektury przedstawionej mi do recenzji rozprawy doktorskiej i analizy jej treści stwierdzam, że recenzowana praca spełnia kryteria oraz wymogi stawiane rozprawom doktorskim zawarte w ustawie z 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478) oraz w towarzyszących jej aktach prawnych w **dyscyplinie naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne**, określonej w rozporządzeniu Ministra Edukacji i Nauki z 11 października 2022 roku (Dz. U. poz. 2202).

6.2 Wnioskuje o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.