

Szczecin, 20.11.2024

prof. dr hab. inż. Jacek Piskorowski
Katedra Inżynierii Systemów, Sygnałów i Elektroniki
Wydział Elektryczny
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

SEKRETARIAT
Rady Dyscypliny AEEITK

Wpłynęło dnia 26. 11. 2024

Zarejestrowano pod nr 510-11-6

Podpis *Om*

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Adriana Dudka pt.: „Generatywne modele procesów Gaussowskich w analizie zjawisk funkcjonalnych i wykrywaniu usterek”.

Podstawą formalną opracowania recenzji jest uchwała Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie z dnia 7 listopada 2024 roku, a także pismo o sygnaturze RD AEETK/510-11-2/24 Przewodniczącego Rady Dyscypliny dra hab. inż. Ryszarda Sroki z dnia 8 listopada 2024 roku. Promotorem opiniowanej rozprawy doktorskiej jest prof. dr hab. inż. Jerzy Baranowski.

1. Znaczenie podjętej tematyki

Opiniowana rozprawa doktorska dotyczy wykorzystania procesów gaussowskich do modelowania i analizy złożonych zjawisk funkcjonalnych oraz detekcji usterek w systemach technicznych. Wykorzystanie procesów gaussowskich dotyczy w szczególności systemów nieliniowych oraz systemów charakteryzujących się nagłymi zmianami stanu. Do zasadniczych wyzwań w tym zakresie Doktorant zaliczył przede wszystkim modelowanie tego typu systemów przy jednoczesnym uwzględnieniu niepewności predykcji, a także wykorzystanie modeli generatywnych w przypadku niewystarczających danych. Problematyka poruszona w rozprawie doktorskiej jest niezwykle istotna zarówno z teoretycznego, jak i praktycznego punktu widzenia. Skuteczne i efektywne wykrywanie usterek i anomalii w procesach przemysłowych ma kluczowe znaczenie z operacyjnego

punktu widzenia i pozwala na znaczące zmniejszenie ryzyka przestojów oraz redukcję kosztów. Anomalie w procesach przemysłowych mogą prowadzić do poważnych zakłóceń, a ich wczesne wykrycie jest kluczowe dla zapewnienia stabilności systemów oraz wydajności operacyjnej. Systemy detekcji usterek i anomalii oparte o modele procesów gaussowskich zapewniają predykcję przyszłego zachowania systemów oraz pozwalają na szacowanie niepewności przewidywań. Istotnym również jest, że modele procesów gaussowskich mogą być wykorzystane do tworzenia syntetycznych danych, co jest szczególnie przydatne w sytuacji, gdy rzeczywiste dane są ograniczone, trudno dostępne lub też gdy zebranie adekwatnego wolumenu danych w warunkach rzeczywistych jest kosztowne lub czasochłonne. Podjęta przez Doktoranta tematyka wpisuje się wprost w zakres dyscypliny *automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne*. Należy również podkreślić, że tematyka rozprawy doktorskiej jest niezwykle ważna i aktualna zarówno z teoretycznego, jak i praktycznego punktu widzenia.

2. Ogólna charakterystyka, zakres i cel rozprawy

Problematyka badawcza rozprawy doktorskiej dotyczy wykorzystania procesów gaussowskich w diagnostyce systemów technicznych, zarówno w kontekście predykcji, jak i wykrywania usterek. Doktorant podkreślił, że tradycyjne metody wykrywania usterek i anomalii, które wykorzystują głównie modele statystyczne oraz techniki uczenia maszynowego oparte na danych historycznych są powszechnie stosowane do przewidywania zachowania systemu. Niemniej jednak tego typu rozwiązania są zazwyczaj nieefektywne, a zwłaszcza w przypadku nieoczekiwanych zmian lub anomalii w działaniu systemów. W efekcie Doktorant słusznie wnioskuje, że konieczne jest poszukiwanie nowych podejść, które będą efektywne w przypadku systemów wykazujących nietypowe stany przejściowe oraz nieprzewidywane anomalie. W treści rozprawy doktorskiej Doktorant podkreśla, że efektywna diagnostyka systemów przemysłowych wymaga narzędzi, które nie tylko przewidują zachowanie systemu, ale również umożliwiają lepsze zrozumienie wewnętrznych zależności systemowych oraz wykrywanie anomalii w czasie rzeczywistym. Biorąc pod uwagę czytelnie i trafnie zdefiniowane potrzeby narzędzi diagnostycznych Doktorant zauważa, że procesy gaussowskie, ze względu na ich zdolność do modelowania złożonych nieliniowych zależności i szacowania przedziałów ufności, ułatwiają lepsze zrozumienie dynamiki systemów oraz wspierają precyzyjne wykrywanie anomalii. Doktorant słusznie zauważył, że modele procesów gaussowskich zyskują coraz większe uznanie z uwagi na coraz

większą dostępność bardzo wydajnych obliczeniowo narzędzi i zasobów. W efekcie możliwe jest obecnie wykorzystanie modeli procesów gaussowskich do bardzo złożonych problemów. Doktorant podkreśla w rozprawie doktorskiej, że procesy gaussowskie mogą modelować dane z dużą głębią i dokładnością, tworząc sztuczne zbiory danych, które odzwierciedlają funkcjonalne zachowanie systemów w warunkach normalnych oraz w obecności anomalii. Jest to w szczególności istotne w sytuacjach, gdy pozyskanie dużego wolumenu danych rzeczywistych jest kosztowne, ograniczone lub niepraktyczne. W efekcie procesy gaussowskie nie tylko umożliwiają wykrywanie anomalii, ale także służą jako dodatkowe źródło danych, które może poprawić wydajność innych narzędzi.

Biorąc pod uwagę czytelnie i trafnie określone wyzwania jako cel rozprawy doktorskiej Doktorant wskazuje dostarczenie kompleksowego rozwiązania do diagnostyki danych i wykrywania błędów z naciskiem na analizę funkcjonalną, a także rozwiązanie problemu niewystarczających danych do modelowania z wykorzystaniem generatywnych modeli procesów gaussowskich. W rezultacie Doktorant sformułował następujące tezy rozprawy doktorskiej:

- *procesy gaussowskie mogą wypełnić lukę w analizie zjawisk funkcjonalnych i diagnostyce* poprzez modelowanie złożonych nieliniowych zależności i dostarczanie kwantyfikacji niepewności, co jest kluczowe dla dokładnych prognoz i interpretowalnych wyników;
- *generatywne modele procesów gaussowskich mogą być użyteczne w diagnostyce* gdy brakuje danych, ponieważ pozwalają na tworzenie syntetycznych zbiorów danych odzwierciedlających właściwości funkcjonalne systemu, co zwiększa skuteczność algorytmów diagnostycznych.

Cele rozprawy doktorskiej zostały osiągnięte poprzez wykorzystanie modeli procesów gaussowskich w obszarach inżynierii sterowania i przetwarzania sygnałów z uwzględnieniem metod implementacyjnych oraz wydajności. Przeprowadzono analizę wydajności obliczania generatywnych modeli procesów gaussowskich, a także zaproponowano metodę zwiększania wydajności obliczeniowej procesów gaussowskich poprzez wykorzystanie węzłów Czebyszewa oraz Szybkiej Transformaty Fouriera (FFT). Zaproponowano ponadto metodę wykrywania przejściowych anomalii w sygnałach, metodę diagnostyki usterek silników indukcyjnych wykorzystującą modele procesów gaussowskich oraz modele mieszanin Gaussa

(GMM), metodę diagnostyki baterii litowo-jonowych, a także metodę modelowania przestrzennego zanieczyszczeń powietrza.

Cele oraz tezy pracy zdefiniowano w precyzyjny sposób. Można stwierdzić, że postawione cele pracy są istotne i aktualne na tle obecnego stanu wiedzy w zakresie wykrywania anomalii i usterek w procesach przemysłowych oraz generowania syntetycznych danych procesowych. Cele oraz tezy pracy odpowiadają zakresowi i tematyce rozprawy oraz determinują zakres przeprowadzonych badań. Uważam, że podjęcie tematu rozprawy doktorskiej było celowe zarówno ze względów poznawczych, teoretycznych oraz praktycznych. Tezy pracy zostały prawidłowo postawione, natomiast cele główne rozprawy doktorskiej zostały zrealizowane.

3. Struktura rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska mgr inż. Adriana Dudka pt.: „Generatywne modele procesów Gaussowskich w analizie zjawisk funkcjonalnych i wykrywaniu usterek” ma formę tematycznie powiązanego cyklu 6 artykułów naukowych. Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska obejmuje treści wszystkich artykułów. Cztery artykuły zostały opublikowane w czasopiśmie naukowych. Dwie kolejne prace zostały opublikowane w materiałach międzynarodowych konferencji naukowych. Rozprawa doktorska została przygotowana w języku angielskim i obejmuje również streszczenie, wykaz skrótów i symboli matematycznych, wprowadzenie (zawierające motywację, charakterystykę procesów gaussowskich, a także tezy oraz problemy badawcze), szczegółowy przegląd przeprowadzonych badań, wnioski końcowe i kierunki dalszych badań, a także wybraną bibliografię. Tematycznie powiązany cykl artykułów naukowych obejmuje następujące prace:

[1] **A. Dudek** (wkład 80%) and J. Baranowski. "Gaussian Processes for Signal Processing and Representation in Control Engineering". In: Applied Sciences 12.10 (2022).

[2] **A. Dudek** (wkład 80%) and J. Baranowski. "Efficient Gaussian Process Calculations Using Chebyshev Nodes and Fast Fourier Transform". In: Electronics 13.11 (2024).

[3] J. Baranowski, **A. Dudek** (wkład 50%), and R. Mularczyk. "Transient Anomaly Detection Using Gaussian Process Depth Analysis". In: 2021 25th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR). 2021, pp. 221–226.

[4] **A. Dudek** (wkład 50%), K. Jarzyna, and J. Baranowski. "Mixture Based Classifier Using Gaussian Processes for Induction Motor Diagnosis". In: Proceedings of the IECON 2024 - 50th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 3-6 November, Chicago, USA, 2024.

[5] **A. Dudek** (wkład 80%) and J. Baranowski. "Modelling of Li-Ion battery state-of-health with Gaussian processes". In: Archives of Electrical Engineering vol. 72, No 3 (2023), pp. 643–659.

[6] **A. Dudek** (wkład 80%) and J. Baranowski. "Spatial Modeling of Air Pollution Using Data Fusion". In: Electronics 12.15 (Aug. 2023), p. 3353.

Artykuł [1] jest typową pracą przeglądową, w której dokonano analizy istotnych zastosowań procesów gaussowskich. W szczególności dokonano przeglądu wykorzystania procesów gaussowskich w inżynierii sterowania do identyfikacji systemów, wykrywania błędów oraz sterowania predykcyjnego. Odniesiono się również do przetwarzania sygnałów w kontekście modelowania szeregów czasowych i wyodrębniania wzorców z zaszumionych danych. W ramach artykułu poruszono także temat technik obliczeniowych dla procesów gaussowskich. W pracy [2] przedstawiono nowe podejście do modelowania procesów gaussowskich, które znacznie zmniejsza złożoność obliczeniową i zachowuje informacje o modelowanej funkcji poprzez wykorzystanie węzłów Czebyszewa i FFT. Zaproponowana przez Doktoranta metoda zmniejsza wymiarowość problemu, a także zwiększa wydajność procesów gaussowskich jako modelu generatywnego. W efekcie model generatywny zachowuje wysoką dokładność przy niższych kosztach obliczeniowych. W pracy [3] przedstawiono nową metodę wykrywania anomalii podczas stanów przejściowych przy użyciu kombinacji procesów gaussowskich oraz funkcji głębi danych. Opracowana metoda została przetestowana na kaskadowo połączonych zbiornikach hydraulicznych. Uzyskane wyniki potwierdziły skuteczność zaproponowanej metody w dokładnym modelowaniu stanu bez usterek i anomalii oraz wykrywania odchyłeń wskazujących na usterki. Model procesów gaussowskich skutecznie wygenerował wystarczającą ilość danych dla obu przypadków w celu wykorzystania algorytmów głębi danych. W pracy [4] zaprezentowano metodę diagnostyki silników indukcyjnych wykorzystującą klasyfikację probabilistyczną z wykorzystaniem GMM w połączeniu z wnioskowaniem bayesowskim oraz modelami procesów gaussowskich. Integracja tych metod umożliwiła modelowanie złożonych, nieliniowych zależności i zapewnia solidne możliwości klasyfikacji nawet w zaszumionym

środowisku. Praca [5] poświęcona jest modelowaniu stanu akumulatorów litowo-jonowych za pomocą procesów gaussowskich. Zaproponowana metoda okazała się skuteczna w określaniu stanu zużycia baterii oraz predykcji tego stanu. W pracy [6] przedstawiono metodę modelowania przestrzennego zanieczyszczeń powietrza. Opracowana metoda może zapewnić precyzyjne prognozy poziomów zanieczyszczenia powietrza poprzez wykorzystanie fuzji danych z różnych źródeł.

4. Ogólna ocena rozprawy

Autor rozprawy doktorskiej zrealizował postawione cele w sposób adekwatny, używając do tego właściwej metodyki badań. Przyjęte założenia są uzasadnione. W sposób przejrzysty odniesiono się do źródeł. Cele rozprawy doktorskiej zostały osiągnięte poprzez opracowanie, implementację oraz weryfikację metod opartych na modelach procesów gaussowskich, służących do wykrywania oraz predykcji usterek i anomalii w procesach przemysłowych. Opracowano ponadto metody generowania syntetycznych danych procesowych. Jak już wcześniej podkreślono, rozprawa doktorska ma formę tematycznie powiązanego cyklu 6 artykułów naukowych. Z przedstawionego oświadczenia określającego indywidualny wkład merytoryczny oraz procentowy wkład w powstanie rozprawy doktorskiej wynika, że mgr inż. Adrian Dudek jest pierwszym autorem pięciu publikacji. W czterech pracach, których współautorem jest jedynie promotor rozprawy doktorskiej, wkład procentowy Doktoranta został określony na poziomie 80%, co należy uznać za wkład dominujący. W pozostałych dwóch pracach Doktorant ma 50% udział. Można więc uznać, że Doktorant ma istotny i dominujący udział w przygotowaniu publikacji stanowiących podstawę rozprawy doktorskiej. Do najistotniejszych osiągnięć Doktoranta należy zaliczyć przede wszystkim:

- analizę procesów gaussowskich w odniesieniu do technik obliczeniowych;
- opracowanie algorytmów konwersji wartości funkcji w punktach Czebyszewa za pomocą FFT na współczynniki szeregu, optymalizując czas obliczeń przy zachowaniu wysokiej dokładności modelu;
- opracowanie metodologii wykrywania anomalii w stanach przejściowych przy użyciu kombinacji modeli procesów gaussowskich oraz funkcji głębi danych;

- opracowanie generatywnych modeli procesów gaussowskich do estymacji probabilistycznej i syntezy danych, umożliwiających dokładną estymację gęstości i wydajne próbkowanie w scenariuszach z niekompletnymi danymi;
- opracowanie modelu mieszanin Gaussa (GMM) zintegrowanego z modelem procesów gaussowskich do dokładnego i wczesnego wykrywania usterek silnika indukcyjnego;
- opracowanie metody diagnostyki baterii litowo-jonowych;
- opracowanie metody modelowania przestrzennego zanieczyszczeń powietrza.

5. Pytania i uwagi krytyczne

- a. W rozdziale pierwszym rozprawy zadeklarowano udział Doktoranta w projekcie NCN pt. „*Prediction and Detection of Process Faults*”. Proszę wyjaśnić w jakim charakterze Doktorant brał udział we wskazanym projekcie. W jakim zakresie wyniki przedstawione w rozprawie doktorskiej są efektem tego projektu?
- b. Jakie techniki obliczeniowe oferują obecnie największą wydajność i skalowalność w przypadku wykorzystania procesów Gaussa?
- c. W jakim zakresie wydajność obliczeniowa stoi obecnie na przeszkodzie w praktycznym wykorzystaniu procesów Gaussa do predykcji i diagnostyki usterek w złożonych procesach przemysłowych?
- d. Jak jest definiowana przejściowa anomalia w procesie przemysłowym. Jakie typy anomalii rozważano?
- e. Jakie było kryterium doboru funkcji głębi danych? Jakie inne funkcje głębi danych są obiecujące do wykorzystania w połączeniu z procesami Gaussa?
- f. Czy i w jakim zakresie określono optymalną wielkość prób dla procesów Gaussa?

Wskazane pytania i komentarze mają charakter dyskusyjny i nie wpływają na ogólnie pozytywną ocenę wyników zawartych w opiniowanej rozprawie doktorskiej.

6. Wniosek końcowy

Podsumowując stwierdzam, że mgr inż. Adrian Dudek wykazał się dużą wiedzą z zakresu procesów stochastycznych, optymalizacji, systemów sterowania oraz przetwarzania sygnałów. Rozprawa doktorska mgr inż. Adriana Dudka pt.: „Generatywne modele

procesów Gaussowskich w analizie zjawisk funkcjonalnych i wykrywaniu usterek” jest oryginalnym, interesująco przedstawionym, uzasadnionym i twórczym wkładem w dyscyplinę *automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne*. Niniejsza rozprawa doktorska zawiera poprawnie sformułowany i rozwiązany problem badawczy oraz posiada duży aspekt praktyczny. Stanowi zatem oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

W efekcie stwierdzam, że rozprawa doktorska mgra inż. Adriana Dudka **spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim**, które zostały określone w artykule 187 ust. 1 i ust. 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz.U. z 2018 poz. 1668 z późn. zm.). W związku z powyższym **wniosuję o dopuszczenie mgra inż. Adriana Dudka do publicznej obrony rozprawy doktorskiej** przed Radą Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie.

Z uwagi na wysoką wartość merytoryczną rozprawy doktorskiej, oryginalność zaproponowanych metod i narzędzi, a także duże znaczenie diagnostyki i predykcji uszkodzeń w procesach przemysłowych **wniosuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgra inż. Adriana Dudka**. Doktorant jest współautorem co najmniej dwóch artykułów z tematyki doktoratu opublikowanych w czasopismach z listy JCR.

J.P. —