

wpłynęło dnia 24.04.2023

nr 12 zał. ....

Warszawa, dnia 17/04/2023

**Recenzja pracy doktorskiej mgr. inż. Patryka Grelewicza, zatytułowanej:**  
***Application of fusion of chosen control performance assessment methods for automatic diagnostics and performance improvement of control systems***

Praca poświęcona jest ocenie jakości układów sterowania w instalacjach przemysłowych z zastosowaniem zwłaszcza do dużych systemów, wykorzystujących wiele regulatorów typu PID (proporcjonalno – całkująco – różniczkujący).

Praca składa się z czterech rozdziałów.

Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie do problematyki oceny jakości układów regulacji. Autor odnosi się do praktyki przemysłowej, gdzie regulatory, po zainstalowaniu są dostrajane rzadko albo wcale, co skutkuje stopniowym pogarszaniem się jakości regulacji. Krótko wspomniane są zasady strojenia regulatorów, w oparciu o uproszczony model procesu (zwane czasem: proces reaction curve) oraz zdefiniowane zostają wskaźniki jakości regulacji oparte na wariancjach sygnałów, dokładniej „minimum-variance” i „generalized minimum-variance”. W ten sposób tematyka pracy została umiejscowiona w szerszym kontekście i podane zostały główne składowe, które dalej są używane w zaproponowanych rozwiązaniach. Sformułowany jest cel pracy, jest nim opracowanie systemu oceny jakości układów regulacji, który będzie:

- właściwy dla szerokiej gamy procesów przemysłowych,
- prosty obliczeniowo, tak by mógł być zaimplementowany w sterowniku przemysłowym,
- prosty w obsłudze, tak by nie wymagał skomplikowanych testów na instalacji,
- odpowiedni do oceny jakości regulacji w przypadku skokowych zmian wartości zadanej.

Rozdział drugi stanowi zasadniczą część pracy, wyjaśniając krok po kroku, podejście zaproponowane przez Autora. Wstępnie, ustala się klasę obiektów, które będą analizowane w pracy. Są to układy dynamiczne, które mogą być w miarę dokładnie aproksymowane przez układy liniowe drugiego rzędu z opóźnieniem. Zaproponowana jest metoda normalizacji parametrów takich układów tak aby uniezależnić wyniki od skali czasu oraz od wartości wzmocnienia statycznego układu. Sformułowana zostaje metodyka przeprowadzania badań, polegająca na obliczaniu wartości wybranych wskaźników jakości regulacji dla układu sterowanego regulatorem PI lub PID przy czym parametry regulatora będą „zakłócone” od wartości nominalnych. Rozpatruje się trzydzieści wskaźników jakości regulacji, analizując, które z nich najlepiej opisują zachowanie układu, analizując również korelacje między wskaźnikami tak aby można było pozostawić tylko kilka najważniejszych a resztę wyeliminować. Badania zostały przeprowadzone na modelu symulacyjnym przepływowego podgrzewacza elektrycznego. Dokonano również porównania wskaźników jakości regulacji opartych na odpowiedziach czasowych ze wskaźnikami opartymi na własnościach stochastycznych sygnałów. To pozwoliło autorowi sformułować hipotezę, że dla potrzeb jego pracy będzie wystarczające posługiwanie się wskaźnikami opartymi na odpowiedziach czasowych, ponieważ wymagają one mniejszego nakładu obliczeniowego.

Następnie opisany jest proces strojenia regulatora w taki sposób, ze uzyskane nastawy mogą być uznane za dobre i tym samym odpowiedzi czasowe układu zamkniętego z takimi nastawami regulatora mogą służyć za punkt odniesienia dla porównania z odpowiedziami rzeczywistego układu. Proponuje się, że „właściwe” nastawy regulatora będą wynikały z minimalizacji całki wartości bezwzględnej uchybu regulacji, dodatkowo z ograniczeniami odnośnie minimalnych dopuszczalnych wartości zapasu amplitudy i zapasu fazy. Następnie, dany układ regulacji zostanie zakwalifikowany jako „OK” – dobrej jakości, lub „NOK” – złej jakości w zależności od obliczonych wartości: całki z wartości bezwzględnej uchybu regulacji, oraz zapasów amplitudy i fazy. Następnie dokonano mapowania tych dwóch zbiorów: OK i NOK na przestrzeń wartości 30 wskaźników jakości regulacji po to aby określić jakie wartości tych wskaźników odpowiadają poprawnej pracy układu regulacji. Autor podaje liczbę 60000 wygenerowanych układów regulacji, na których przeprowadzono uczenie algorytmów klasyfikujących.

W końcowej części rozdziału 2 Autor podaje przykłady weryfikacji opracowanych rozwiązań najpierw na kilku symulowanych obiektach regulacji a następnie na stanowisku laboratoryjnym reprezentującym system rozprowadzania energii cieplnej. Do celów weryfikacji laboratoryjnej, algorytmy obliczania wskaźników jakości oraz klasyfikacji zostały zaprogramowane w chmurze komputerowej.

Trzeci rozdział pracy zajmuje się implementacją opracowanych algorytmów w sterowniku przemysłowym. Dla osiągnięcia takiej implementacji kluczowe jest zredukowanie liczby wskaźników jakości regulacji z proponowanej wcześniej liczby 30 do bardziej rozsądnej liczby: kilku. Przedstawione są szczegółowe analizy korelacji między różnymi wskaźnikami a także wpływu ich usunięcia na jakość klasyfikacji. W wyniku przeprowadzonej analizy Autor proponuje zestaw siedmiu wskaźników do przeprowadzenia binarnej analizy jakości regulacji.

Krótki rozdział 4 podsumowuje wyniki przedstawione w pracy.

Uważam, że praca doktorska magistra inżyniera Patryka Grelewicza wnosi istotny wkład do dziedziny badań nad automatyka przemysłowa. Posiada wartość teoretyczną a także, potencjalnie, może mieć wartość praktyczną, w postaci dodatku/ aplikacji zainstalowanej w sterownikach przemysłowych i ułatwiającej pracę operatorów. Rozważania teoretyczne zamieszczone w pracy są poprawne. Wnioski są wyciągane rozważnie i są oparte na przeprowadzonej analizie, startując z różnych punktów odniesienia. Imponująca jest ilość przeprowadzonych testów symulacyjnych. W pewnym miejscu Autor wspomina o 60 tysiącach takich testów.

Za najważniejsze osiągnięcia pracy uważam:

- Podjęcie tematu systematycznej analizy wskaźników jakości regulacji
- Próba ujednoczenia oceny dla wskaźników związanych ze stanami przejściowymi oraz dla wskaźników związanych ze stanem ustalonym
- Propozycje w miarę jednolitego opisu dla transmitancji układów przemysłowych – uniezależnienie od fizycznych parametrów procesu

- Analiza i klasyfikacja wskaźników jakości regulacji za pomocą metod kojarzonych głównie ze sztuczną inteligencją
- Propozycja implementacji stworzonego systemu w sterowniku typu PLC, z obliczeniami wykonywanymi w chmurze.

Praca jest napisana w języku angielskim, z dużą starannością edytorską.

Wartym zauważenia jest również fakt, że częściowe wyniki pracy zostały opublikowane. Niektóre z publikacji są w wysoko notowanych czasopismach, jedna z nich ukazała się już po złożeniu pracy. (lista publikacji jest dodana na końcu recenzji).

Poniżej zamieszczam uwagi, które nasunęły mi się w czasie czytania pracy. Są to uwagi dyskusyjne, w głównej mierze sugestie dalszych kierunków badań, co do których chciałbym znać opinie Autora.

(1)

Na stronie 13 Autor pisze, że ważnym kierunkiem badań byłoby porównanie wskaźników jakości opartych na kryteriach stanu nieustalonego (zwykle całkowite wskaźniki jakości) ze wskaźnikami opartymi na kryteriach stanu ustalonego (wskaźniki związane z wariacjami sygnałów). Następnie, na stronie 26 Autor stwierdza dużą zbieżność oceny dokonanej na podstawie wskaźnika GMV (generalised minimum variance) z oceną dokonaną na podstawie wskaźników całkowitych (IAE, ITAE). Jest to bardzo ciekawy wątek badań: że na podstawie oceny wariacji sygnałów można wyciągać wnioski o szybkości odpowiedzi czasowych (np. skokowych) układu. Czy Autor próbował przeprowadzać testy/kontynuować badania w tym kierunku?

(2)

Również, bardzo proszę o wyjaśnienie Tabeli 2.2. Jakie obliczenia zostały wykonane w celu stwierdzenia dobrej lub złej zgodności wskaźników?

(3)

Rozdział 1.3 wymienia główne cele pracy. Nie rozumiem co Autor ma na myśli w celu 1.3: „The reference behavior of a closed loop system should be explicitly predefined”. Uważam, że wskaźniki jakości regulacji powinny pomóc w określeniu jakości dla jak najbardziej szerokiej klasy możliwych przebiegów zadanych. Bardzo proszę o wyjaśnienie.

(4)

Na stronie 31, w punkcie 2 Autor dyskutuje potrzebę odniesienia wskaźników jakości regulacji do wymagań technologicznych procesu. Natomiast na stronie 34 Autor pisze: „the reference PID tunings are calculated by minimization of the IAE index for a closed loop response to a load disturbance”, czyli przedstawione wyniki klasyfikacji są opracowane w odniesieniu do szczególnego kryterium jakości regulacji, mianowicie: całki z wartości bezwzględnej uchybu regulacji, oraz zapasów amplitudy i fazy. Jakie kroki należałoby podjąć gdyby chciał zmienić te kryteria, na przykład pozwolić na bardziej agresywne działanie regulatora?

(5)

Na stronach 47 i 48 Autor pisze o planowanych rozszerzeniach pracy, tak aby zupełnie uniezależnić się od modelu obiektu. Czy jest to możliwe? W jaki sposób Autor planuje rozszerzyć prezentowany system? W tym kontekście proszę również o wyjaśnienie ostatniego zdania we wspomnianym wyżej akapicie: „ Then, any assessment basing only on the value of the normalized distance is not possible.”

Kilka uwag edytorskich:

Jaki jest związek Appendix 1 z tematyką pracy? Gdzie jest zawarta tam informacja wykorzystywana?

Dlaczego Appendix 3 nie jest włączony do głównego tekstu pracy?

Publikacje [22] i [41] wydają się być tą samą publikacją.

Publikacje autora:

Uwaga: publikacje [3] i [4] wydają się być tą samą publikacją.

1. K. Stebel, M. Frączak, P. Grelewicz, J. Czczot, and T. Kłopot, “Adaptive predictive controller for energy-efficient batch heating process,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 192, no. April, p. 116954, 2021, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.116954.
2. T. Kłopot, P. Skupin, P. Grelewicz, and J. Czczot, “Practical PLC-based Implementation of Adaptive Dynamic Matrix Controller for Energy-Efficient Control of Heat Sources,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 0046, no. c, pp. 1–1, 2020, doi: 10.1109/tie.2020.2987272.
3. P. Grelewicz, P. Nowak, M. Frączak, and T. Kłopot, “Practical Verification of the Advanced Control Algorithms Based on the Virtual Commissioning Methodology – case study,” 2018.
4. P. Grelewicz, P. Nowak, M. Frączak, and T. Kłopot, “Practical Verification of the Advanced Control Algorithms Based on the Virtual Commissioning Methodology - A Case Study,” 2018

- 23rd Int. Conf. Methods Model. Autom. Robot. MMAR 2018, pp. 217–222, 2018, doi: 10.1109/MMAR.2018.8485990.
5. T. Kłopot, P. Skupin, M. Metzger, and P. Grelewicz, "Tuning strategy for dynamic matrix control with reduced horizons," *ISA Trans.*, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.isatra.2018.03.003.
  6. P. Grelewicz, P. Nowak, J. Czczot, and J. Musiał, "Increment Count Method and Its PLC-Based Implementation for Autotuning of Reduced-Order ADRC with Smith Predictor," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 68, no. 12, pp. 12554–12564, 2021, doi: 10.1109/TIE.2020.3045696.
  7. P. Grelewicz, P. Nowak, J. Czczot, and M. Fraczkak, "Corelation between Conventional and Data-Driven Control Performance Assessment Indices for Heating Process," in *Proceedings of the 2019 22nd International Conference on Process Control, PC 2019*, 2019, pp. 86–90, doi: 10.1109/PC.2019.8815041.
  8. Patryk Grelewicz, Tung Khuat, J. Czczot, Pawel Nowak, Tomasz Kłopot, Bogdan Gabrys, *Application of Machine Learning to Performance Assessment for a Class of PID-Based Control Systems*, January 2023, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems PP(99):1-13* DOI: 10.1109/TSMC.2023.3244714.

Reasumując: uważam, że recenzowana praca doktorska spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, zgodnie z Ustawą o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz.U. z 2017 r. poz. 1789), oraz zgodnie z Ustawą z 3 lipca 2018 r. – Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2018 r. poz. 1669 z póź. zm.) w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne i wnoszę o przyjęcie rozprawy i jej dopuszczenie do publicznej obrony.

Równocześnie stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska spełnia warunki kwalifikujące ją do wyróżnienia i wnioskuję o wyróżnienie rozprawy.

*Andrzej Ordys*

Dr hab. inż. Andrzej Ordys  
Wydział Mechatroniki,  
Politechniki Warszawskiej