

prof. dr hab. inż. Jerzy Świder
Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny
Katedra Automatykacji Procesów Technologicznych
i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania
ul. Konarskiego 18A, 44-100 Gliwice, tel.: (032)237-24-60

Wpłynęło dnia8.09.2022.....
Zarejestrowano pod nr
Podpis*Jm*.....

Gliwice, 2.09.2022 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Pawła Króla pt. „Optymalizacja sterowania obiektami przemysłowymi z uwzględnieniem kryterium minimalizacji zużycia energii”

opracowana na zlecenie Przewodniczącego
Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika
Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie,
dr. hab. inż. Ryszarda Sroki, prof. AGH,
z dnia 8.07.2022 r.,

wynikające z uchwały Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika AGH
z dnia 7.07.2022 r.

1. Uwagi ogólne

Zmiany klimatu, zmiany dostępnych źródeł surowców energetycznych, zmiany cen na rynkach paliw oraz transformacja branży energetycznej przyczyniają się do wzrostu kosztów energii elektrycznej, co z kolei stwarza konieczność optymalizacji jej zużycia. W tym kontekście istotną rolę odgrywają zagadnienia związane z działaniem energochłonnych układów technicznych w procesach przemysłowych. Jednym z takich istotnych konsumentów energii elektrycznej są oczyszczalnie ścieków komunalnych. Z uwagi na ciągły proces działania oczyszczalni, uzależniony od wielu parametrów, prowadzenie badań doświadczalnych na tych obiektach jest trudne, a często wręcz niemożliwe.

Doktorant skupił się w swoich badaniach na przemysłowym Zakładzie Oczyszczania Ścieków Płaszów (ZOŚP) w Krakowie. W ramach prowadzonych badań, wspieranych projektem GEKON-EPOS, utworzonym w celu wdrożenia Zintegrowanego Systemu Efektywności Energetycznej, będącego w swoich założeniach nadrzędnym systemem sterowania ZOŚP, swoje działania Doktorant oparł na wiodących, standardowych algorytmach opisujących funkcjonowanie oczyszczalni ścieków. Doktorant utworzył model symulacyjny reaktorów biologicznych oczyszczalni ścieków. Szczegółowej analizie poddał istniejący system sterowania ZOŚP, w kontekście możliwych obszarów ingerencji w ten system. Doktorant zdecydował się na użycie środowiska MATLAB/Simulink, w którym zaimplementował moduł, integrujący model BSM1 z modelem dmuchawy. Zwalidowany

model numeryczny procesu natleniania ścieków posłużył Doktorantowi do modyfikacji algorytmów sterowania dmuchawami w aspekcie minimalizacji zapotrzebowania układu na energię elektryczną.

W wyniku prowadzonych badań Doktorant postawił tezę:

„Kompleksowe modelowanie obiektów przemysłowych, takich jak oczyszczalnie ścieków, może być wykorzystane w optymalizacji sterowania, prowadzącej do minimalizacji zużycia energii”.

Z uwagi na to, że obiekt badań jest w stanie ciągłej eksploatacji, Doktorant podjął się zadania zbudowania modelu oczyszczalni, a w szczególności modelu reaktora i dmuchaw, w środowisku MATLAB/Simulink, budując w ten sposób „wirtualną oczyszczalnię ścieków”.

Ważnym elementem rozprawy jest opracowanie przez Doktoranta własnej procedury testowania niepewności w procesie sterowania reaktorami i dmuchawami oczyszczalni ścieków, stosując - do oceny wydajności procesu oczyszczania i do identyfikacji parametrów nieliniowego modelu - Rozszerzony Filtr Kalmana.

Autor postawił sobie cel zoptymalizowania, ze względu na kryterium minimalizacji zużycia energii, pracy stacji sześciu dmuchaw w układzie oczyszczalni ścieków. Zbudowany wirtualny model oczyszczalni posłużył Doktorantowi do poszukiwania optymalnych czasów przełączania oraz czasów postoju dmuchaw, działających w tym układzie. Dzięki zbudowanemu modelowi numerycznemu oczyszczalni ścieków, będącej obiektem badań, Doktorant wykazał, że istnieje możliwość obniżenia zużycia energii elektrycznej, koniecznej do skutecznego działania podobnych strukturalnie i funkcjonalnie obiektów przemysłowych.

2. Ocena rozprawy

Autor zawarł swoją pracę na 165 stronicach i podzielił ją na 10 głównych rozdziałów oraz 34 podrozdziały, uzupełniając ją wykazem 171 pozycji literatury. Najstarsza cytowana publikacja była wydana w 1960 roku, natomiast 20 pozycji to publikacje z ostatnich 5 lat. Blisko 90 % cytowanych pozycji literatury to pozycje angielskojęzyczne, a 5 z cytowanych pozycji to pozycje współautorstwa Doktoranta. Szkoda, że Doktorant nie przyłożył należnych starań do przygotowania tego zestawienia. Aż 23 pozycje są niepełne (brak wydawcy, miejsca i czasu wydania) lub są niepoprawnie sformatowane (poz.: 9, 17, 45, 52, 55, 58, 60, 61, 70, 73, 82, 87, 92, 102, 106, 107, 108, 113, 116, 124, 134, 147, 150, 152).

Po streszczeniu pracy w języku angielski i języku polskim Doktorant przedstawił w rozdziale pierwszym genezę podjęcia się tematyki rozprawy, omówił jej zakres, sformułował tezę rozprawy, wskazał elementy oryginalnego wkładu autorskiego, a następnie naszkicował założoną strukturę pracy.

W rozdziale drugim, zatytułowanym *Zużycie energii przez duże obiekty przemysłowe*, Doktorant omówił aspekty zużycia energii przez takie obiekty, zwracając szczególną uwagę na procesy związane ze zużyciem energii elektrycznej w trakcie oczyszczania ścieków, w aspekcie jego minimalizacji. Ważnym podrozdziałem tego rozdziału jest podrozdział 2.4, poświęcony wyborowi algorytmów użytych w procesie optymalizacji systemu sterowania w aspekcie minimalizacji zużycia energii, spośród takich metod, jak: harmonogramowanie zadań, programowanie matematyczne, optymalne sterowanie, optymalizacja przeszukiwania siatki oraz zastosowanie łańcucha bloków (blockchain). Doktorant zdecydował, że spośród analizowanych metod, metoda blockchain nie będzie w dysertacji zastosowana.

W rozdziale trzecim, zatytułowanym *Numeryczna reprezentacja procesu oczyszczania ścieków*, Doktorant opisał zasadnicze elementy procesu oczyszczania ścieków, zwracając uwagę na kluczowe parametry oceny jakości tego procesu. Autor przywołał opublikowane w 1987 r. numeryczne narzędzie ASM1 (Activated Sludge Model No.1) do modelowania procesu oczyszczania ścieków w przestrzeni stanów, z trzynastoma zmiennymi stanu, charakteryzującymi ściek, i standardowe narzędzie BSM1 (Benchmark Simulation Model No. 1), przeznaczone do oceny wydajności algorytmów sterowania w procesie oczyszczania ścieków. W przypadku ocenianej dysertacji dotyczy to algorytmów sterowania dmuchaw i układów natleniania ścieków. Doktorant przywołał również kolejne modyfikacje modeli ASM i BSM. Z uwagi na zaimplementowany w środowisku MATLAB/Simulink bazowy model BSM1, Doktorant zdecydował się na użycie tego środowiska numerycznego w swojej dysertacji. W tym rozdziale Doktorant wyróżnił układ dmuchaw oczyszczalni ścieków jako najbardziej energochłonny podukład systemu, generujący ponad 60 % kosztów zużycia energii elektrycznej. Stąd Jego decyzja o próbie optymalizacji sterowania tym właśnie podukładem, ze względu na kryterium minimalizacji kosztów. Doktorant przypomniał zaimplementowane w modelu BSM1 równanie bilansu masy rozpuszczonego tlenu w danej strefie i uzasadnił użycie tego modelu do symulacji procesu oczyszczania biologicznego. Ostatnim podrozdziałem rozdziału trzeciego jest rozdział, w którym Autor opisał modelowanie przepływu powietrza w reaktorach, służącego do natleniania ścieków. Doktorant krótko przedstawił teoretyczne podstawy wprowadzania tlenu do ścieku oraz podstawy numerycznej reprezentacji procesu napowietrzania w oczyszczalni ścieków, a także zależności matematyczne, opisujące wskaźnik przepływu tlenu ORT (Oxygen Transfer Rate) oraz standardową wydajność przepływu tlenu SOTE (Standard Oxygen Transfer Efficiency).

W rozdziale czwartym, zatytułowanym *Studium przypadku Oczyszczalni Ścieków Płaszów*, Doktorant opisał strukturę tej oczyszczalni, zwracając szczególną uwagę na proces biologicznego oczyszczania, a także na system reaktorów napowietrzania. Na podstawie dostępnych Doktorantowi danych wynika, że ponad 35 % całkowitej energii elektrycznej,

zużywanej przez ZOŚP, zużywają dmuchawy. Po krótkim opisie systemu napowietrzania ZOŚP Doktorant zamieścił przykłady graficznej dokumentacji wyników pomiarów tlenu i amoniaku w układzie, a także przebiegi zużycia energii w czasie, prezentowane i gromadzone w stosowanym w ZOŚP systemie SCADA.

Rozdział piąty dysertacji to *Numeryczny model Oczyszczalni Ścieków Płaszów*. Stosując środowisko MATLAB/Simulink Doktorant zbudował model w systemie BSM1, dokonując jego stosownych modyfikacji. Następnie Doktorant, stosując zbudowany model, przeprowadził ciąg symulacji działania reaktorów w ZOŚP. Doktorant zasygnalizował metody, które zostaną przez Niego użyte do walidacji modelu BSM1, takie jak analiza wrażliwości metodą symulacji Morrisa, kontrola wydajności za pomocą filtra Kalmana oraz estymacja parametrów modelu z użyciem rozszerzonego filtra Kalmana.

Rozdział szósty dysertacji to opis przyjętego modelu wrażliwości. Doktorant przedstawił tu koncepcję algorytmów badania wrażliwości i na tej podstawie przeprowadził analizę wrażliwości procesu BSM1. Doktorant przybliżył w kilku zdaniach metodę przesiewową Morrisa. Podsumowaniem rozdziału szóstego jest jego podrozdział 6.4, w którym Doktorant przeprowadził analizę wrażliwości modelu BSM1 na zmiany parametrów na wejściu układu, z której wynika, że związki amoniaku mają tu największe znaczenie, a zatem w całym procesie oczyszczania ścieków największą uwagę należy poświęcić parametrom opisującym zawartość amoniaku w ścieku.

W najobszerniejszym, bo liczącym 24 stronie tekstu, rozdziale siódmym pt. *Estymacja stanu bazująca na filtrze Kalmana*, Doktorant przypomniał matematyczną koncepcję rozszerzonego filtra Kalmana (EKF - Extended Kalman Filter) i jego użycie w procesie estymacji stanu układu, a w tym szczególnym przypadku - do oszacowania dopływu ścieków do ZOŚP, estymacji warunków początkowych procesu dopływu ścieków, także przy uwzględnieniu nieliniowości modelu, poprzez bezśladowy filtr Kalmana (UKF - Unscented Kalman Filter). Po jednostronicowym przeglądzie literatury w zakresie estymacji stanu procesu oczyszczania ścieków, używając danych z systemu SCADA ZOŚP z okresu 21 dni, Doktorant przeprowadził estymację stanu układu za pomocą filtra Kalmana, oszacowując nieznaną wartość stanu układu w postaci zawartości płynnego azotu w ściekach, pomimo braku precyzyjnych informacji o parametrach wejściowych. Po dokonanej analizie Doktorant stwierdził, że zbudowany przez Niego model BSM1 został zwalidowany i może być użyty do poszukiwania optymalnego sterowania układem dmuchaw w aspekcie kryterium minimum zużycia energii elektrycznej. Ramowy tok postępowania Doktorant przedstawił na rys. 107 (str. 127) jako działanie w następujących krokach:

- zmienny dopływ doprowadzanych ścieków,
- analiza Morrisa wrażliwości modelu,
- walidacja modelu pod kątem wrażliwych parametrów, z użyciem filtra Kalmana,

- przyjęcie decydujących parametrów na wejściu do układu,
- optymalizacja sterowania poprzez wybór różnych czasów opóźnienia włączania dmuchaw.

W jedenastostronicowym rozdziale ósmym pt. *Testowanie działania reaktora przy zmiennych warunkach pracy dmuchaw* Doktorant przeanalizował wpływ jakości i objętości ścieków na zużywanie energii elektrycznej przez ZOŚP i stwierdził, że zbudowany i zwalidowany, kompleksowy model oczyszczalni ścieków Płaszów może być podstawą wdrożenia algorytmów sterowania, prowadzących do obniżenia kosztów zużywanej energii elektrycznej.

W dwunastostronicowym rozdziale dziewiątym pt. *Optymalizacja sterowania w celu minimalizacji zużycia energii* Doktorant poddał analizie wpływ czasów opóźnienia włączania dmuchaw na zużycie energii, a następnie opracował propozycję optymalizacji układu sterowania ze względu na kryterium minimalizacji zużycia energii elektrycznej przez ZOŚP. Wnioski Autor wyciągnął na podstawie wyników przeprowadzonych i udokumentowanych symulacji. Zwrócił jednak uwagę na fakt, że przynoszące efekt oszczędności zużycia energii elektrycznej wydłużenie czasów opóźnienia włączania dmuchaw może negatywnie wpłynąć na jakość ścieków, poprzez okresowe niedobory przepływu powietrza. Autor dysertacji słusznie stwierdza, że ten aspekt musi być brany pod uwagę w dalszych badaniach w tym obszarze. Użycie w tym procesie modelu numerycznego układu, czyli w efekcie wirtualnego modelu oczyszczalni ścieków, wraz z układem napowietrzania i jego sterowaniem, pozwala na prowadzenie badań niedostępnych w przypadku obiektu rzeczywistego. Autor dysertacji rozpoczął analizę od nastawienia opóźnienia czasów włączania dmuchaw, równego jednej godzinie i zmieniał ten czas do wartości czterech godzin. Wniosek Doktoranta, że zmniejszenie zużycia energii elektrycznej przez dmuchawy można osiągnąć poprzez wydłużenie czasu pracy dmuchaw w okresie ich maksymalnej wydajności i minimalizacji czasu ich pracy w okresach najmniejszej ich wydajności, jest w pełni uzasadniony. Oczywiście, okresy te zależą od ilości i jakości ścieków na wejściu do oczyszczalni, i nie są z góry określone.

Chciałbym prosić, żeby Doktorant, podczas obrony, rozwinął wątek okresowego niedoboru przepływu powietrza i naszkicował swoją koncepcję prowadzenia dalszych badań w zakresie rozbudowy algorytmów sterowania, radzących sobie z tym problemem. Proszę również o wyjaśnienie przyjęcia granicznych wartości opóźnień czasów włączania dmuchaw na poziomie jednej godziny i czterech godzin.

W rozdziale dziesiątym (4 stronicie) Doktorant dokonał podsumowania wyników swoich badań podkreślając, że zbudowany model numeryczny ZOŚP może być podstawą do

prowadzenia działań optymalizujących zużycie energii elektrycznej przez ten zakład, podkreślając wdrożeniowy charakter prowadzonych prac. Wykonane przez Doktoranta badania i uzyskane rezultaty w obszarze optymalizacji sterowania pracą dmuchaw ze względu na kryterium minimalizacji zużycia energii elektrycznej, odnoszą się do konkretnego obiektu, którym jest ZOŚP, i tam mogą zostać podjęte praktyczne próby ich wdrożenia. Zastosowanie opracowanych wniosków do innych oczyszczalni ścieków jest możliwe, ale wymaga dogłębnej analizy panujących tam warunków realizacji procesu.

Aspekty oryginalności ocenianej dysertacji:

- przeprowadzona przez Doktoranta modyfikacja modelu BSM1 i jego integracja z modelem dmuchaw układu napowietrzania ścieków, zgodnie z parametrami ZOŚP;
- utworzenie algorytmu optymalizacyjnego, działającego na zbudowanym, wirtualnym modelu ZOŚP, czyli na numerycznym modelu realnej oczyszczalni ścieków, zaimplementowanym w środowisku MATLAB/Simulink;
- podejmowanie decyzji w układzie sterowania pracą dmuchaw w warunkach niepewności, wynikających z niedoboru danych wejściowych;
- modyfikowanie opóźnień w działaniu dmuchaw w celu optymalizacji sterowania procesem oczyszczania ścieków ze względu na kryterium zużycia energii.

Oceniam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Pawła Króla zwiera, we właściwych proporcjach, wszystkie elementy oczekiwane w tego typu pracach, a więc: staranne studium współczesnej literatury przedmiotu; sformułowanie na tej podstawie celu badawczego; postawienie tezy rozprawy; szczegółową analizę obiektu badań; opis sposobu prowadzenia badań i analizę wyników doświadczalnych; identyfikację parametrów fizykalnych obiektu, niezbędnych do zbudowania odpowiedniego modelu symulacyjnego; weryfikację doświadczalną wyników symulacji; zaproponowanie własnej metody modyfikacji układu sterowania optymalnego, ze względu na przyjęte kryteria; weryfikację wyników symulacji poprzez ich porównanie z dostępnymi wynikami parametrów procesu oczyszczania ścieków, uzyskanymi z systemu SCADA użytkowanego w rzeczywistym obiekcie, podczas jego ciągłej eksploatacji; walidację modelu numerycznego; właściwe wnioskowanie, w tym także w odniesieniu do dowiedzenia słuszności postawionej tezy rozprawy, a także wskazanie obszarów dalszych badań, niezbędnych do znalezienia rozwiązań problemów nie objętych zakresem przeprowadzonych analiz.

Nie znalazłem w pracy żadnych istotnych uchybień merytorycznych ani formalnych. Drobne korekty edytorskie naniosłem na egzemplarzu pracy.

3. Wniosek końcowy

Podjęty przez Doktoranta temat jest ważnym problemem badawczym w zakresie trudnego do pełnego, analitycznego ujęcia zagadnienia sterowania procesem oczyszczalni ścieków, mieszczącym się w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika. Przedmiotem ocenianej rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej i społecznej.

Doktorant, po analizie literaturowej obszaru zainteresowań dysertacji, sformułował jej cel jako zoptymalizowanie, ze względu na kryterium minimalizacji zużycia energii, pracy stacji sześciu dmuchaw w układzie oczyszczalni ścieków. Na podkreślenie zasługuje istotna integracja części analitycznej i numerycznej przeprowadzonych badań z częścią praktyczną, odnoszącą się do konkretnego, realnego, złożonego obiektu technicznego.

Stwierdzam, że mgr inż. Paweł Król udowodnił w swojej Dysertacji, że potrafi jednoznacznie sformułować cel badań, postawić tezę pracy, zaplanować i przeprowadzić konieczne badania doświadczalne, a także badania z zastosowaniem metod numerycznych, budując w efekcie wirtualny model oczyszczalni ścieków, przydatny w procesie poszukiwania optymalnego sterowania, a także wyciągnąć na tej podstawie użyteczne wnioski.

Biorąc pod uwagę uzyskane efekty recenzowanej pracy doktorskiej mgr. inż. Pawła Króla pt. „Optymalizacja sterowania obiektami przemysłowymi z uwzględnieniem kryterium minimalizacji zużycia energii” stwierdzam, że mieszczą się one w obszarze zainteresowań dyscypliny automatyka, elektronika i elektrotechnika, a opiniowana praca może być podstawą nadania stopnia naukowego doktora nauk inżynieryjno-technicznych, zgodnie z Ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz.U.2022.574, i wnoszę o dopuszczenie pracy do publicznej obrony.

