

Warszawa, 18.11.2022

Prof. dr hab. inż. Jan Maciej Kościelny
Instytut Automatyki i Robotyki
Wydział Mechatroniki
Politechnika Warszawska
ul. św. A. Boboli 8
02-525 Warszawa
tel. kom. 601 810 419
e-mail: jan.koscielny@pw.edu.pl

S E K R E T A R I A T
Rady Dyscypliny AEEITK

Wpłynęło dnia.....24.11.2022.....
Zarejestrowano pod nr
Podpisdm.....

**Recenzja
pracy doktorskiej
mgr inż. Pawła Króla**

**Optymalizacja sterowania obiektami przemysłowymi z uwzględnieniem kryterium
minimalizacji zużycia energii**

Praca została napisana w języku angielskim pt. The optimization of control on industrial facilities considering minimalization of energy consumption.

1. Tematyka rozprawy

Tematem rozprawy są zagadnienia modelowania oraz optymalizacji sterowania oczyszczalni ścieków w celu minimalizacji zużycia energii.

Przemysł odpowiada za 33% światowego zużycia energii i 38% emisji CO₂ do atmosfery. Oczyszczalnie ścieków mają znaczący udział w całkowitym zużyciu energii elektrycznej, oceniany na 4% produkcji tej energii. Najbardziej energochłonnym procesem oczyszczania ścieków jest napowietrzanie ścieków, które generuje do 60% kosztów całkowitego zużycia energii elektrycznej podczas oczyszczania ścieków. Tym problemem zajął się Autor rozprawy.

Temat badań dotyczy zatem bardzo aktualnego problemu wynikającego z konieczności minimalizacji zużycia energii ze względu na ograniczenia dostępu do surowców energetycznych oraz konieczność ochrony klimatu, w tym redukcji emisji CO₂. Podjęty temat dotyczy problemów wymagających pilnego rozwiązania, ma zatem wysoką rangę praktyczną.

2. Cel i zakres pracy

Motywacją do podjęcia badań było dążenie do uzyskania oszczędności energii elektrycznej wykorzystywanej w procesie oczyszczania ścieków przy jednoczesnym dążeniu do redukcji szkodliwej dla środowiska emisji CO₂

Zagadnienie analizowano na konkretnym przykładzie Oczyszczalni Ścieków „Płaszów” w Krakowie. Badania prowadzono w ramach programu GEKON-EPOS (GEKON2/02/266926.03.2015)

Autor sformułował tezę: *Kompleksowe modelowanie obiektów przemysłowych takich jak oczyszczalnie ścieków może być wykorzystane w optymalizacji sterowania prowadzącej do minimalizacji zużycia energii.*

Celem badań było opracowanie optymalnych algorytmów sterowania dmuchawami z uwzględnieniem kryterium minimalizacji zużycia energii. Do optymalizacji wykorzystano numeryczny model oczyszczalni (BSM1) bazujący na równaniach matematycznych stanowiących modele osadów czynnych ASM. Model ten został dostrojony do struktury i parametrów oczyszczalni ścieków „Płaszów”. Przeprowadzono analizę wrażliwości parametrów ścieków pod kątem ich znaczenia w procesie oczyszczania z zastosowaniem metody Morrisa. Podano sposób szacowania wartości kluczowego parametru ścieków wpływających do reaktora z zastosowaniem rozszerzonego filtra Kalmana.

3. Zawartość i struktura rozprawy

Praca liczy 165 stron i zawiera: abstrakt i streszczenie, spis treści, 10 rozdziałów oraz bibliografię. Poszczególne

Rozdział pierwszy jest wstępem do rozprawy i zawiera sformułowanie celu i tezy pracy oraz określenie zakresu rozprawy. W rozdziale drugim przedstawiono przegląd zagadnień związanych ze zużyciem energii w dużych obiektach przemysłowych, w tym w oczyszczalniach ścieków oraz przegląd metod wykorzystywanych w optymalizacji sterowania. Rozdział ten ma charakter przeglądu stanu badań w zakresie wysokosprawnych źródeł energii oraz efektywnych metod sterowania odbiornikami.

Rozdział trzeci dotyczy numerycznej reprezentacji procesu oczyszczania ścieków. Omówiono proces oczyszczania ścieków, kluczowe parametry oceny jakości ścieków. Podano koncepcje symulacji oczyszczalni ścieków komunalnych z wykorzystaniem znanego modelu numerycznego BSM1 opartego na równaniach matematycznych stanowiących modele osadów czynnych ASM. Przedstawiono szczegółowy opis modelu.

W rozdziale czwartym przedstawiono model oczyszczalni ścieków w Płaszowie, stanowiący przedmiot badań. Podano założenia projektowe i aspekty praktyczne brane pod uwagę w symulacji obiektu.

Cztery pierwsze rozdziały mają charakter wprowadzający, prezentujący motywację podjęcia badań oraz stan wiedzy i techniki, natomiast własne rozwiązania prezentowane są w dalszej części rozprawy.

Rozdział piąty zawiera opracowanie modelu numerycznego oczyszczalni ścieków w Płaszowie bazujący na środowisku BSM. Pierwsza wersja modelu numerowanego BSM1 opracowana w środowisku Matlab/Simulink przez zespół badawczy z Uniwersytetu w Lund została zaadoptowana do zamodelowania obiektu „Płaszów” w Krakowie, a parametry modelu zostały dostrojone na podstawie danych z systemu SCADA. Model obejmuje reaktor osadu czynnego podzielony na sekcje tlenowe i beztlenowe. Zawiera także model dmuchaw. Przeprowadzono symulacje tych obiektów.

W rozdziale szóstym analizowano wrażliwość parametrów ścieków pod kątem ich znaczenia w procesie oczyszczania z zastosowaniem metody Morrisa. Stwierdzono, że parametry określające zawartość azotu $\text{NH}_4^+ + \text{NH}_3$ oraz objętość ścieków mają największy wpływ na proces oczyszczania.

Rozdział siódmy przedstawia sposób szacowania parametru (SNH) azotu w ściekach wpływających do reaktora z zastosowaniem rozszerzonego filtra Kalmana (EKF). Szacowanie stanu jest implementowane w celu identyfikacji nieznanego parametru na podstawie modelu referencyjnego i pomiarów parametru azotu (SNH) w samym reaktorze.

W rozdziale ósmym przedstawiono wyniki symulacji prowadzonych w celu zmniejszenia zużycia energii elektrycznej przez oczyszczalnię ścieków. Analizowano wpływ jakości i ilości ścieków wpływających do reaktora na zużycie energii elektrycznej.

Optymalizacja zużycia energii elektrycznej z wykorzystaniem numerycznej modelu oczyszczalni ścieków jest tematem rozdziału dziewiątego. Rozdział dziesiąty jest podsumowaniem wyników pracy.

Wykaz cytowanej literatury zawiera 171 pozycji, w tym istotne publikacje związane z tematem rozprawy.

4. Osiągnięcia i oryginalne wyniki rozprawy

Praca ma charakter badawczo-projektowy. Oryginalne elementy pracy związane są z rozwiązaniem konkretnego problemu technicznego - optymalizacji sterowania oczyszczalni ścieków w aspekcie minimalizacji zużycia energii.

Podkreślić należy właściwe podejście metodyczne oraz prawidłowy dobór wykorzystywanych metod i narzędzi badawczych. W wyniku analizy stanu badań wykorzystano znane modele osadów czynnych ASM oraz ich implementację BSM w środowisku Matlab/Simulink do budowy modelu oczyszczalni ścieków „Płaszów” w Krakowie. Analizę wrażliwości parametrów modelu przeprowadzono z zastosowaniem metody Morrisa, a do szacowania wartości nieznanymi wejść wykorzystano rozszerzony filtr Kalmana. Wybory te świadczą o wysokich kompetencjach Doktoranta.

Osiągnięcia Autora rozprawy oraz jej oryginalne elementy dotyczą następujących zagadnień:

1. Opracowanie kompletnego modelu numerycznego oczyszczalni ścieków „Płaszów” w oparciu o BSM1 w środowisku Matlab/Simulink. Kompletność oznacza w tym przypadku integrację modelu numerycznego procesów zachodzących w biologicznej części oczyszczalni ścieków z modelem dmuchaw oraz dostrojenie parametrów ogólnego modelu do konkretnej oczyszczalni ścieków „Płaszów”. Model ten pozwala określić wielkość wymaganego strumienia nadmuchu powietrza na podstawie zapotrzebowania na podstawie zapotrzebowania na tlen w ściekach.
2. Przeprowadzenie symulacji procesów zachodzących w reaktorach ściekowych w Oczyszczalni Ścieków Płaszów w Krakowie. Symulowano pracę oczyszczalni w różnych warunkach eksploatacyjnych, badano przebiegi ze skrajnymi wartościami kluczowych parametrów w procesie oczyszczania ścieków. Przeprowadzono 81 eksperymentów symulacyjnych, obejmujących całą instalację od dopływu ścieków po zużycie energii elektrycznej.

Opracowane środowisko symulacyjne umożliwia testowanie efektywności energetycznej procesu natleniania bez ingerencji w procesy oczyszczalni ścieków oraz prototypowanie nowych scenariuszy sterowania, bez ryzyka związanego z prowadzeniem eksperymentów na rzeczywistym obiekcie.

Na podstawie opracowanego modelu numerycznego przeprowadzono symulacje pod kątem poszukiwania rozwiązań redukujących zużycie energii elektrycznej. Symulacja umożliwia prowadzenie walidacji pracy oczyszczalni oraz analizę efektywności różnych algorytmów sterowania pod kątem zużycia energii elektrycznej podczas procesu napowietrzania. Należy podkreślić, że do walidacji wyników badań symulacyjnych wykorzystywano dane pomiarowe z systemu SCADA.

3. Przeprowadzenie analizy wrażliwości parametrów ścieków na proces ich oczyszczania i wskazanie kluczowych parametrów. Na podstawie analiza Morrisa stwierdzono, że parametry opisujące azot $\text{NH}_4^+\text{+NH}_3$ w ściekach (SNH) wpływających ma kluczowy wpływ na proces oczyszczania i zapotrzebowanie na energię. Innym czynnikiem wpływającym znacząco na proces oczyszczania i zużycie energii elektrycznej przez dmuchawy ma wielkość dopływu ścieków.
4. Opracowanie układu sterowania zespołem sześciu dmuchaw optymalizującego zużycie energii elektrycznej. Zastosowano rozwiązanie na podstawie programowania matematycznego (z wykorzystaniem wyszukiwania siatki). Procesy w oczyszczalni są silnie nieliniowe, co utrudnia rozwiązanie problemu. Do optymalizacji wykorzystano model numeryczny oczyszczalni ścieków. Przedstawiony algorytm jest oryginalną implementacją planowania zadań, podejściem brute force.

Doktorant zaproponował modyfikację stosowanego układu sterowania procesu napowietrzania reaktorów w celu minimalizacji zużycia energii elektrycznej. Zastąpił układ stabilizacji ciśnienia w kolektorze przez proporcjonalny układ regulacji przepływu powietrza do natleniania reaktorów biologicznych. Każda sekcja w każdym reaktorze jest sterowana osobno na podstawie pomiarów (sondy tlenowe) jakości ścieków. Sprężone przez dmuchawy powietrze dostarczane jest do sekcji napowietrzanej w reaktorach biologicznych przez zawory dławiące i napowietrzające dyfuzory. Przepływ sterowany jest przez posobne włączanie/wyłączanie dmuchaw z dobieranym opóźnieniem oraz regulację kąta nachylenia łopatek.

Na podstawie danych z systemu SCADA określono dla potrzeb optymalizacji charakterystyki dmuchaw, wyrażone jako pobór mocy na jednostkę przepływu powietrza. Autor zastosował strategię sterowania, która zakłada pierwszeństwo uruchamiania dmuchaw najbardziej wydajnych oraz uruchomienie dmuchawy nie później niż to konieczne. Dmuchawy są sterowane w taki sposób, aby pracowały w optymalnym obszarze pracy.

Badania symulacyjne potwierdziły istotny wpływ czasów opóźnienia start/stop dmuchaw na zużycie energii elektrycznej. Symulację ograniczono do wybranych wartości wejściowych. Autor zwrócił uwagę, że opracowane rozwiązanie optymalizacyjne nie jest rozwiązaniem optymalnym, gdyż badano jedynie przebiegi ze skrajnymi wartościami kluczowych parametrów w procesie oczyszczania ścieków oraz zmniejszenie zużycia energii elektrycznej osiągnięte jest kosztem pogorszenia procesu natleniania i wzrostu bakterii w ściekach. Jednak zaproponowany algorytm pozwala uzyskać oszczędności rzędu kilku procent w zużyciu energii elektrycznej.

5. Potencjał aplikacyjny wyników badań. Wyniki pracy doktorskiej mogą być wykorzystane bezpośrednio w oczyszczalni ścieków „Płaszów” w Krakowie. Wyniki badań można przenieść także na inne podobne oczyszczalnie ścieków. Wymaga to zawsze dostrojenia modelu numerycznego oczyszczalni. Natomiast stosowana metodyka badań, całościowy

model numeryczny oczyszczalni, koncepcja sterowania oraz wnioski praktyczne podane w p. 10.2. powinny być w pełni użyteczne.

Można stwierdzić, że postawiony cel rozprawy został zrealizowany - wykazano możliwość stosowania algorytmów optymalizacji energetycznej w przemysłowych instalacjach oczyszczalni ścieków.

5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne.

Zasadniczy zarzut dotyczy oczywistości sformułowanej tezy „*Kompleksowe modelowanie obiektów przemysłowych takich jak oczyszczalnie ścieków może być wykorzystane w optymalizacji sterowania prowadzącej do minimalizacji zużycia energii*”. Bez znajomości odpowiednich modeli nie ma możliwości prowadzenia nie tylko optymalizacji, ale także zaawansowanego sterowania i diagnostyki procesów. Nakłady konieczne na budowę modeli są często dominującą częścią kosztów ponoszonych na projektowanie tych zadań. Oczywiście do każdego zadania powinien być dobrany odpowiedni typ modelu z uwzględnieniem wymagań stawianych przed nim. Obowiązuje zasada modelu wystarczającego: model powinien być możliwie najprostszy, byleby był wystarczający do danego zadania.

W pracy brak solidnego uzasadnienia wyboru metody sterowania optymalnego. Autor decyduje się na wybór rozwiązania będącego formą optymalizacji metodą wyszukiwania siatki, podejściem brute force. Dlaczego zrezygnowano z próby matematycznego sformułowania zadania optymalizacji, stosowanego powszechnie w przypadku problemów sterowania optymalnego? Zagadnienie sterowania dmuchawami w oczyszczalni ścieków wydaje się podobne do problemu rozdziału obciążenia na równoległe pracujące aparaty technologiczne. Proszę o wyjaśnienia w tej kwestii podczas obrony pracy.

Trzeci zarzut dotyczy zbyt dużej objętości pracy (165 stron), która jest spowodowana rozwlekłym stylem formułowania treści oraz wieloma powtórzeniami.

Zauważyłem ponadto kilka drobnych usterek, ale nie mają one istotnego znaczenia dla ogólnej oceny pracy. Zostaną one przekazane Autorowi w celu ich eliminacji w przyszłych publikacjach.

6. Podsumowanie

Praca ma charakter badawczo-projektowy. Lokuje się w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika. Pracę oceniam jako dobrą. Na podstawie lektury pracy można stwierdzić, że Autor jest dociekliwym naukowcem, umiejącym rozwiązywać trudne problemy badawcze. Świadczy o tym sposób rozumowania, umiejętność formułowania wniosków, rzetelność prowadzonych symulacji i analiz.

Podniesione wyżej uwagi krytyczne i dyskusyjne nie wpływają na ogólną pozytywną ocenę pracy, zawierającej oryginalne osiągnięcia naukowe oraz wartościowy materiał badawczy. Poziom użyteczności praktycznej uzyskanych wyników jest znaczący. Autor wniknął głęboko w problemy techniczne oczyszczalni ścieków. Sformułował aktualny i ważny w aspekcie ekonomicznym i ochrony środowiska problem badawczy oraz podał jego rozwiązanie. Wykazał tym samym umiejętność rozwiązywania trudnych problemów badawczych i technicznych. O wysokich kompetencjach Autora świadczą zarówno oryginalne elementy pracy jak też odwołania do literatury światowej.

W związku z powyższym stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska pana mgr. inż. Pawła Króla spełnia wszystkie wymagania stosownej ustawy o tytułach i stopniach naukowych. Wnoszę zatem o przyjęcie opiniowanej rozprawy oraz jej dopuszczenie do publicznej obrony przez Radę Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and a long vertical stroke extending downwards.