

Dr hab. inż. Ryszard Leniowski, prof. PRz
Katedra Informatyki i Automatyki
Wydział Informatyki i Elektrotechniki
Politechnika Rzeszowska
lery@kia.prz.edu.pl

Rzeszów, 20.12.2019

Recenzja pracy doktorskiej

Tytuł rozprawy: **Modelowanie i zaawansowane algorytmy sterowania procesami dystrybucji i wymiany ciepła**

Autor rozprawy: **mgr inż. Rafał Czubasiewicz**

Promotor rozprawy: **dr hab. inż. Jacek Czczot, prof. nzw. Pol. Śl.**

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Rafała Czubasiewicza, która została opracowana na prośbę Dziekana Wydziału Automatyki, Elektroniki i Informatyki, Politechniki Śląskiej w Gliwicach, prof. dr hab. inż. Joanny Polańskiej.

Ogólna charakterystyka rozprawy

Recenzowana rozprawa dotyczy problemów związanych z modelowaniem i regulacją układów wytwarzania i dystrybucji ciepła o małej mocy, pracujących w ograniczonej przestrzeni. Kontrolowanie wytwarzania i dystrybucji ciepła, rozumianego w praktyce budowlanej jako tzw. komfort cieplny, jest jednym z dwóch istotnych zadań jakie dotyczą każdego właściciela domu jednorodzinnego. Drugim zaś jest bezpieczeństwo, czyli ochrona zewnętrzna i wewnętrzna. Jeżeli dodatkowo uwzględnimy podawany przez Autora rozprawy fakt, że 46% instalacji grzewczych w Polsce ma źle nastrojone układy regulacji lub pracuje w układzie otwartym, ewentualnie wcale ich nie posiada, to zaczynamy rozumieć jak wielkie jest marnotrawstwo energii ciepłej, zwłaszcza na poziomie indywidualnych użytkowników. Nie podlega więc dyskusji, że niezwykle ważnym zadaniem jest poprawienie podanych wyników nawet o 10%, co bezpośrednio wpłynie na obniżenie kosztów związanych z ogrzewaniem. Z tego powodu tematyka rozprawy, związana z poprawą działania układów wytwarzania i dystrybucji ciepła jest bardzo ważna i stale aktualna. Ponadto postęp technologiczny, jaki dokonał się w dziedzinie wytwarzania ciepła (kotły gazowe o dużej sprawności, nowoczesne kotły elektryczne oraz zestawy solarne wraz wymiennikami), jego dystrybucji (rury i materiały izolacyjne, kaloryfery o zmniejszonym oporze przepływu, zawory dławiące i rozdzielające-

trójpołożeniowe oraz nowe generacje sensorów), a także w konstrukcji pomp zapewniających obieg ciepłego medium (sterowanie cyfrowe z regulatorami PWM), pozwala na realizację coraz lepszych i bardziej złożonych instalacji ciepłych. Dotyczy to zarówno użytkowników indywidualnych, którzy eksploatują instalacje małe, jak i firm, posiadających zazwyczaj instalacje rozłożone na większej przestrzeni i zawierające dużą ilość elementów składowych.

Aby obniżyć koszty związane z wytwarzaniem i dystrybucją ciepła, pojawiła się potrzeba opracowania metod wiarygodnego modelowania takich instalacji. Powinny one umożliwiać prawidłowe nastawianie szeroko stosowanych, standardowych regulatorów klasy PID, a także analizować i badać inne, alternatywne algorytmy regulacji, np. wykorzystujące modele odniesienia. Jednym z ważniejszych problemów, szczególnie istotnym dla instalacji ciepłych jest fakt, że realizacja nawet tego samego schematu (obiegu) ciepłego, wyposażonego w identyczne elementy, może się znacznie różnić z powodu odmiennych parametrów izolacyjnych, innych sposobów wentylacji pomieszczeń i usytuowania przeszkód w ogrzewanych przestrzeniach (np. meble) lub specyficznych lokalizacji działania zakłóceń (np. szczelność okien). Dlatego modelowanie i projektowanie takiego układu powinno mieć charakter indywidualny, nawet jeśli wykorzystywany jest sprawdzony szablon postępowania.

Jeszcze trudniejsza sytuacja występuje w rozległych instalacjach ciepłych. Są one często remontowane i modernizowane, bez aktualizacji dokumentacji technicznej obiektu. W efekcie, podczas dłuższej eksploatacji parametry bieżącej instalacji mogą znacznie się różnić od jej pierwotnego stanu. Dlatego kluczowym zadaniem jest pozyskiwanie wiarygodnych danych z układów pomiarowych, tak aby możliwa była aktualizacja parametrów modelu lub jego struktury.

Niniejsza rozprawa doktorska dotyczy przedstawionych powyżej zagadnień, czyli modelowania procesów dystrybucji i wymiany ciepła oraz możliwości zastosowania nowoczesnych algorytmów do sterowania tymi procesami. Praca liczy 142 strony, nie wliczając spisu literatury i składa się z pięciu rozdziałów. Została napisana w języku polskim a jej redakcja jest staranna, przejrzysta z widoczną dbałością o szczegóły. Układ pracy jest klasyczny i nie budzi zastrzeżeń.

Zawartość rozprawy

Rozprawa składa się z 5 rozdziałów, włączając w to Wstęp i Podsumowanie. Wstęp zawiera streszczenie podejmowanych problemów, główne tezy oraz opis struktury pracy. Na uwagę zasługuje to, że Autor pisząc o problemach ciepłych wspomina również o problemie sterowania chłodem.

Rozdział drugi, dość krótki, zawiera tylko opis stanowiska laboratoryjnego, informacje na temat układu pomiarowego, opis interfejsu programu SCADA, opracowanego

z wykorzystaniem środowiska LabView oraz sposób kalibracji wybranych urządzeń pomiarowych.

Rozdział trzeci dotyczy zadań modelowania elementów składowych instalacji cieplnych, ale tylko tych, które występują w instalacji doświadczalnej. Jest jednym z dwóch rozdziałów głównych. Zawiera szczegółowy opis tworzenia modeli opartych na wynikach uzyskanych z eksperymentów oraz proces ich walidacji. Autor dąży do otrzymania nieskomplikowanych ale jednocześnie wystarczająco dokładnych modeli matematycznych, które nadawałyby się do wykorzystania w algorytmach sterowania implementowanych na dostępnych platformach sprzętowych o atrakcyjnej cenie, nawet dla indywidualnego inwestora (kotłownie domowe).

Rozdział czwarty poświęcono omówieniu trzech algorytmów sterowania wykorzystujących model odniesienia oraz klasyczne struktury PI, PID. Zawiera opis funkcji referencyjnych modeli, wyznaczenia liczbowych współczynników z zastosowaniem wyprowadzonych modeli. Uzupełnieniem przedstawionych zagadnień jest wyznaczenie nastaw dla regulatorów PI/ PID. Porównanie jakości działania algorytmów przebiega na drodze symulacji komputerowej oraz testów doświadczalnych, przy czym testowane są układy jednoobwodowe i wieloobwodowe. Wyniki pokazują dobre własności proponowanych w pracy metod sterowania.

W rozdziale piątym dokonano podsumowania uzyskanych efektów i przedstawiono wynikające z nich wnioski. Po nim znajduje się spis literatury, zawierający ponad 100 pozycji związanych z procesami cieplnymi, teorią i techniką regulacji automatycznej a także formalnymi rozporządzeniami prawnymi w sprawie warunków technicznych budynków odnoszącymi się do aspektów wymiany ciepła. Spis literatury zawiera zarówno pozycje „klasyczne” jak i nowe prace z liczną grupą, opisującą algorytmy sterowania oparte na modelu odniesienia. Spis literatury świadczy o tym, że Autor przeanalizował istniejące rozwiązania i wybrał do dalszej analizy metody, które powinny sprawdzić się w układach regulacji i dystrybucji ciepła.

Oryginalne osiągnięcia pracy

Rozprawa obejmuje kilka różnych zagadnień, powiązanych w sposób bezpośredni z zadaniem modelowania oraz sterowania procesem wytwarzania, dystrybucji i wymiany ciepła w pewnej, niezbyt skomplikowanej instalacji. Instalacja ta składa się z elektrycznego kotła, zespołu połączeń rurowych, zaworów regulacyjnych i odcinających, wymiennika ciepła, naczynia zbiorczego oraz z zestawu czujników pomiarowych przepływu i temperatury. W rozdziale drugim zaprezentowano instalację cieplną wraz z systemem SCADA i omówiono proces kalibracji wybranych układów pomiarowych (który ma charakter pomocniczy). Zasadniczym problemem jest jednak modelowanie elementów składowych instalacji cieplnej, przedstawione w rozdziale trzecim. Modelowane są: elektryczny kocioł, zawory regulacyjne,

wymiennik ciepła oraz rury. Proces polega na wzbogacaniu znanych, standardowych modeli tych układów o dodatkowe stałe czasowe, opóźnienia oraz nieliniowości z rozróżnieniem fazy nagrzewania i stygnięcia. W przypadku modelu kotła Autor eksperymentuje z pozycją dodatkowego członu dynamicznego, ostatecznie sprowadzając go na wyjście układu. Dostrajanie nieliniowości oraz parametrów członów dynamicznych odbywa się na podstawie oceny formalnych wskaźników jakości, czyli IAE (*Integral Absolute Error*) oraz ISE (*Integral Square Error*). Dopiero po obniżeniu ich do akceptowalnej wartości, Autor uznaje model za wiarygodny. Wymaga to przeprowadzenia licznych, czasochłonnych testów laboratoryjnych. Na koniec Autor dokonuje walidacji kompletnego modelu instalacji uzyskując dobrą zgodność z obiektem rzeczywistym.

Mając wiarygodny model Autor przechodzi do zaprezentowania trzech algorytmów regulacji, wykorzystujących model odniesienia, czyli B-BAC (*Balance Based Adaptive Control*), DCM (*Dynamic Contraction Model*) oraz IMC (*Internal Model Control*). Stanowią one alternatywę dla klasycznej struktury PID. Dla zastosowanego, uproszczonego modelu kotła, transmitancja regulatora DCM (równanie 4.15) oraz regulatora IMC (równanie 4.16) jest rodzajem filtra *Lead-Lag*. Własności regulatorów są oceniane w odniesieniu do regulatora PID (lub PI) za pomocą wspomnianych wskaźników ISE, IAE oraz IADO. Badania symulacyjne i eksperymentalne wskazują na nieznaczną przewagę nieliniowego regulatora B-BAC. Należy jednak dodać, że implementacje algorytmów nie zostały wykonane bez uchybień. Widać to wyraźnie na rysunkach 4.7 oraz 4.12. Występujące na wykresach „igły” w odpowiedziach układów wskazują, że regulator PID ma włączony człon D dla skokowej zmiany wartości zadanej. Jest to niewątpliwie usterka w konfiguracji tego regulatora, której skutkiem są niekorzystne przebiegi przejściowe. Oczywiście filtr *Lead-Lag* jest odporny na skoki wartości zadanej, podobnie jak regulator nieliniowy B-BAC. Mimo braku zabezpieczeń, np. w postaci odłączenia członu D dla toru wartości zadanej, porównanie własności regulacyjnych wymienionych algorytmów jest wartościowe. Pokazuje ono, że dla klasycznych obiektów cieplnych możliwe jest zastosowanie alternatywnych algorytmów regulacji, opartych na modelach odniesienia.

Potwierdzenie skuteczności proponowanych algorytmów odbywa się na drodze symulacyjnej oraz na drodze eksperymentalnej. Rozważane są struktury jednoobwodowe oraz struktura dwupętlowa (ale nie jest to układ kaskadowy). Struktura dwupętlowa działa lepiej od układu jednoobwodowego, gdyż generuje mniejsze przeregulowania i charakteryzuje się większą szybkością odpowiedzi.

Istotne elementy rozprawy

Doktorant przedstawił wyniki dowodzące głównych tez pracy, czyli że:

- zaawansowane algorytmy sterowania są w stanie zapewnić lepszą jakość regulacji pracy obiektów cieplnych w porównaniu do klasycznych rozwiązań;

- badania symulacyjne prowadzone w oparciu o dokładny model procesu umożliwiają przeniesienie opracowanych układów regulacji wraz z nastawami, bezpośrednio do układu sterowania obiektem rzeczywistym, bez konieczności wykonywania dodatkowego strojenia.

Do osiągnięć Autora zaliczam:

- Przeprowadzenie modelowania elementów składowych instalacji cieplnej, w tym wykorzystanie metody modelowania odwrotnego w celu określenia dodatkowych członów elektrycznego kotła.
- Przeprowadzenie identyfikacji współczynników modelu (wymiennika ciepła) za pomocą schematu obliczeniowego o strukturze regulatora PI.
- Przeprowadzenie rzetelnych badań porównawczych dla grupy algorytmów sterowania, wykorzystujących model odniesienia.
- Pokazanie, że pewne realizacje algorytmów MR (*Model Reference*) wykorzystujące uproszczone modele obiektów mogą przypominać strukturę filtru *Lead-Lag*.

Dzięki wymienionym powyżej działaniom i uzyskanym efektom, praca może być dobrym materiałem wyjściowym do opracowania samodzielnego oprogramowania lub programowej wtyczki do innych pakietów programowych, przeznaczonego do projektowania i strojenia układów sterowania i dystrybucji ciepła. To potrzebne narzędzie powinno zawierać szereg dodatkowych składników, o których wspomniano w uwagach krytycznych. Zaprezentowany w pracy system SCADA może być traktowany jako pierwszy krok w tym kierunku.

Zagadnienia i uzyskane wyniki są prezentowane klarownie i przekonująco. Wpływ na to ma staranna redakcja oraz duża ilość ilustracji ułatwiająca poznanie i analizowanie zagadnień.

Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Wymienione poniżej uwagi nie są powiązane z kolejnością rozdziałów.

1. Autor analizuje źródła nieliniowości charakterystyk urządzeń dla fazy nagrzewania i stygnięcia oraz skalę zastępczych opóźnień, wpływających bezpośrednio na działanie układu regulacji. Nie uwzględnia jednak potrzeby starannej filtracji mierzonych sygnałów. W kotłach (również elektrycznych) w trakcie grzania przepływającej wody, warstwa medium dotykająca grzałki może przechodzić w parę rozpuszczaną w cieczy (obserwowane jako charakterystyczny szum grzałki). Powoduje to zaburzenie odczytu temperatury, objawiające się szumem pomiarowym dodawanym do odczytywanych danych. Warto zastanowić się nad możliwościami poprawy odczytu temperatury.
2. Laboratoryjna instalacja wymiany ciepła wydaje się być dość prosta i mało reprezentatywna dla instalacji komercyjnych. Instalacje we współczesnych domach

jednorodzinnych są dużo bardziej skomplikowane, często zawierają mieszacze strumieni- zawory trójdrogowe, zabezpieczenia, kilka źródeł ciepła np. kocioł gazowy i elektryczny, wiele odbiorników – kaloryferów, mat grzejnych itp., a nawet połączenia typu *bypass*. W instalacji laboratoryjnej bardzo brakuje długich rur transportowych, które spowodowałyby wystąpienie zjawisk typowych dla instalacji przemysłowych. Czy prowadzono prace w kierunku urealnienia instalacji laboratoryjnej?

3. W pracy nie zamieszczono charakterystyk dynamicznych dla granicznych punktów pracy (minimalna i maksymalna moc grzałki oraz praca pompy obiegowej z maksymalnym przepływem). Czy były one zdejmovane?
4. Prawa sterowania DCM opisane równaniem (4.15) oraz IMC (równanie 4.16) są w tym przypadku typowymi członami Lead-Lag. To istotny wniosek wynikający z przeprowadzonych badań, który nie został odpowiednio skomentowany.
5. Realizacje algorytmów PID nie powinny różniczkować skokowej wartości zadanej. W efekcie otrzymuje się wówczas przebiegi odpowiedzi zawierające impulsy typu „igła”, takie jak na rys.4.5, 4.7, świadczące o niedopatrzaniu projektanta.
6. Porównanie rys. 4.8 i 4.11 wskazuje, że regulator PI+FeedF wykazuje większą dynamikę od B-BAC i posiada jeszcze rezerwy w zakresie doboru nieco lepszych nastaw. Przebiegi cechują się mniejszymi przeregulowaniami w stosunku do B-BAC. Warto ten rezultat skomentować.
7. Układ kaskadowy 4.3.3 można zrealizować nieco inaczej. Zamienienie pętli wewnętrznej (temperatury) na sterowanie przepływem spowodowałoby uzyskanie struktury serwomechanizmu o bardzo dobrych własnościach dynamicznych. Czy był rozważany taki wariant?
8. Realizacja sterowania przepływem wymaga dodania pompy obiegowej sterowanej falownikiem (modulacja PWM) co jest standardem w nowoczesnych kotłach CO. Brak tego elementu w instalacji obniża praktyczną wartość uzyskanych wyników. Czy rozważano takie usprawnienie?
9. W pracy nie wspomniano o warunkach sterowania za pomocą komputera (lub mikrokontrolera). Warto było by sprawdzić dolną wartość okresu próbkowania, przy której układy pracują dobrze (oddzielnie dla każdego rodzaju regulatora). Zbadanie wpływu okresowej utraty danych pomiarowych na jakość metod sterowania było by również mile widziane w kontekście przyszłych implementacji technicznych.

10. Na koniec, warto było by porównać otrzymane wyniki z układem regulacji RST strojonym do całej instalacji wg. zasady: "co nie jest regulatorem jest obiektem". Taka sytuacja występuje na przykład wtedy, gdy nie możemy selektywnie wyznaczać charakterystyk kolejnych elementów tworzących instalację cieplną.

Uwagi natury redakcyjnej

Praca jest zredagowana bardzo starannie. W początkowej części pracy zamieszczono mały, bardzo pomocny wykaz oznaczeń i skrótów. Liczne rysunki, tabele oraz schematy są czytelne, opatrzone właściwymi podpisami, które w wyczerpujący sposób informują o prezentowanych zjawiskach. Zamieszczone wzory wykorzystują indeksowanie górne i dolne. Indeksowanie dolne jest dwustopniowe (tj. indeks do indeksu), co może niekiedy utrudniać uważną ich analizę, przykładowo wzór (4.32) W celu poprawienia czytelności można wprowadzić separujące przecinki lub dodatkową spację. Do kilku wykresów można było by dodać lupę w celu pokazania powiększonych fragmentów. Rysunki 2.2 oraz 2.3 powinny być większe.

Konkluzja

Pomimo wymienionych uwag krytycznych, przedstawioną do oceny rozprawę oceniam wysoko. Uważam, że praca spełnia ustawowe i zwyczajowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Rafała Czubasiewicza do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Uważam, że rozprawa stanowi istotny wkład w obszarze projektowania algorytmów sterowania procesami dystrybucji i wymiany ciepła. Praca ma spory potencjał komercjalizacyjny.

Stwierdzam, że praca p.t. „Modelowanie i zaawansowane algorytmy sterowania procesami dystrybucji i wymiany ciepła” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki obowiązującą obecnie w Polsce.

Ryszard Leniowski