

Opole, dn.18.05.2022 r.

dr hab. inż. Maria Wrzuszcak
profesor Politechniki Opolskiej
Instytut Automatyki
Wydział Elektrotechniki Automatyki i Informatyki
Politechnika Opolska

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Rada Dyscypliny
Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika
wpłynęło dnia 24.05.2022
nr 5 zał.

RECENZJA ROZPRAWY

przedłożonej

Radzie Dyscypliny Automatyka Elektronika I Elektrotechnika Politechniki Śląskiej
celem uzyskania stopnia naukowego doktora w dziedzinie nauk inżyniersko-technicznych
w dyscyplinie automatyka elektronika i elektrotechnika

Tytuł rozprawy:

Zastosowanie znacznikowej metody czasu przejścia dla pomiarów strumienia objętości w układach sterowania

Autor rozprawy: mgr inż. Wojciech Błotnicki

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Dariusz Choiński, prof. Politechniki Śląskiej

Podstawa opracowania: zlecenie Przewodniczącej Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Pani Prof. Moniki Kwoka zgodnie z uchwałą nr 17/2022 z dnia 15.03.2022 Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Śląskiej.

1. Cel, zakres i charakter rozprawy

Pomiar strumienia objętości należy do jednego z najczęściej wykonywanych pomiarów a przy tym należy do jednego z najtrudniejszych zagadnień metrologicznych. Jednocześnie pomiarom tym stawiane są wymagania uzyskania możliwie dużej dokładności pomiarów. Rozróżnia się pomiary strumienia objętości w kanałach zamkniętych oraz w kanałach otwartych. Przedstawiona do recenzji praca zajmuje się zagadnieniami pomiaru strumienia objętości w kanałach otwartych z wykorzystaniem metod znacznikowych. Zastosowanie tych metod zwykle nie wymaga znaczących modyfikacji instalacji technologicznych i pozwala na wykonanie pomiarów przy relatywnie niskich kosztach.

Wśród znacznikowych metod pomiaru strumienia objętości wyróżnia się metodę czasu przejścia i metody rozcieńczania.

Metoda czasu przejścia polega na impulsowym podawaniu masowej porcji znacznika do badanego obiektu, a następnie rejestracji czasowego przebiegu stężenia znacznika w dwóch punktach kanału oddalonych od siebie w znanej odległości. Na stanowisku badawczym laboratoryjnym w Katedrze Pomiarów i Systemów Sterowania Politechniki Śląskiej Autor przeprowadził badania ze znacznikiem chemicznym w postaci chlorku sodu oraz ze znacznikiem barwnym.

Celem rozprawy było zbadanie zastosowania znacznikowych metod do pomiaru strumienia objętości oraz do identyfikacji parametrów modelu reaktora sonochemicznego dla celów syntezy algorytmów sterowania.

Przeprowadzone doświadczalnie badania pozwoliły na optymalizację czułości pomiaru strumienia objętości poprzez dobór rozmieszczenia punktu dozowania i umieszczenia czujnika konduktometrycznego. Wykorzystano zarejestrowane czasowe przebiegi stężenia znacznika do oceny mieszania, a dalej określenia stałej czasowej i opóźnienia kanału. Autor rozpoznał szersze możliwości zastosowania znacznikowej metody czasu przejścia do określenia modelu mieszania w reaktorach chemicznych, w oparciu o funkcje rozkładu czasu przebywania. Metoda ta jest stosowana w inżynierii procesowej między innymi do oceny parametrów mieszania w naczyniach reakcyjnych. Temu zagadnieniu poświęcona jest druga część pracy (rozdział 6 i 7).

Tematykę pracy uważam za aktualną i istotną.

2. Zawartość rozprawy

Rozprawa ma charakter eksperymentalno – teoretyczny. Składa się z ośmiu rozdziałów (141 stron), streszczenia w języku polskim i angielskim, wykazu symboli i oznaczeń oraz 46-ciu stron załączników, w których umieszczono szczegółowe informacje o stanowisku badawczym, wzorcowaniu przepływomierzy wody, skonstruowanym przetworniku konduktometrycznym oraz przedstawiono wyniki przeprowadzonych pomiarów wraz z oszacowaniem niepewności pomiarów. Bibliografia obejmuje 85 pozycji oraz wykaz norm dotyczących pomiarów przepływu.

Rozdział pierwszy jest wprowadzeniem, gdzie określono cel i zakres pracy, przedstawiono zagadnienia, których praca będzie dotyczyć oraz sformułowano tezy pracy. W rozdziale 2 wyszczególniono i porównano metody znacznikowe pomiaru strumienia objętości takie jak: metoda czasu przejścia, metoda rozcieńczania stałego strumienia wtrysku, integracyjna metoda rozcieńczania, metody optyczne.

W rozdziale 3 bardzo szczegółowo przedstawiono znacznikową metodę czasu przejścia oraz jej modyfikację. Opisano sposób doboru parametrów układu pomiarowego, wyznaczania współczynnika wzorcowania, profilu prędkości strugi oraz powierzchni przepływu.

W rozdziale 4 zatytułowanym „Stanowisko badawcze” przedstawiono model kanału otwartego, opis przeprowadzonego wzorcowego pomiaru objętości strumienia, układ do pomiaru stężenia znacznika (do tego celu zaprojektowano i wykonano dwukanałowy przetwornik konduktometryczny) oraz układ do pomiarów optycznych.

W rozdziale 5 opisano oraz przeanalizowano badania znacznikowej metody czasu przejścia oraz pomiary strumienia objętości. Badania przeprowadzono ze znacznikiem chemicznym oraz barwnym.

Rozdział 6 zatytułowano „Funkcja rozkładu czasu przebywania oraz jej zastosowanie”. Przedstawiono podstawy teoretyczne tej metody oznaczanej akronimem RTD (ang. Residence Time Distribution).

Metody znacznikowe, oprócz pomiaru strumienia objętości, znajdują również zastosowanie do oceny dynamiki transportu medium przez kanał lub określony zbiornik np.: reaktor, wymiennik, osadnik itp. Obserwacja znacznika wprowadzonego do danego naczynia, a dokładniej pomiar jego stężenia na wyjściu ze zbiornika pozwala na określenie parametrów mieszania zachodzącego w jego wnętrzu. Autor rozważał podawanie znacznika na różne sposoby: jako impuls stężenia, skokowa zmiana, zmiana okresowa oraz zmiana losowa. Analiza odpowiedzi impulsowej i/lub skokowej obiektu służy do wyznaczenia funkcji rozkładu czasu przebywania RTD. Autor w opisie metody oparł się na cytowanych publikacjach [Iller, 1992; Levenspiel, 1998, 2012 i inni]. Aby zachowanie znacznika możliwie dobrze odzwierciedlało przepływ materiału przez reaktor, znacznik nie powinien osadzać się na ścianach lub innych powierzchniach reaktora. W inżynierii procesowej stosuje się różnego rodzaju znaczniki: barwne, chemiczne a także radioaktywne. Na podstawie krzywej stężenia na wyjściu obiektu $C(t)$ będącą odpowiedzią na impulsową zmianę stężenia znacznika wyznacza się funkcję rozkładu czasu przebywania. W uogólnionym przypadku stężenie wyjściowe ze zbiornika jest powiązane ze stężeniem wejściowym wzorem całkowym (wzór 6.2). Na podstawie wartości całki można wyznaczyć stosunek stężenia wyjściowego do wejściowego, zwany również skumulowanym rozkładem czasu przebywania $F(t)$. Pochodna po czasie tej skumulowanej funkcji daje funkcję RTD (wzór 6.5).

Czas przebywania, odniesiony do stałej czasowej obiektu, umożliwia porównania funkcji charakteryzujących zachowanie się cząstek substancji w różnych reaktorach. Do tego celu wykorzystuje się analizę momentów funkcji RTD. Zazwyczaj do porównania wykorzystuje się pierwsze trzy momenty. Podano dwa przykłady zastosowań tej metody: dla reaktora rurowego z przepływem tłokowym (Plug Flow Reactor, akronim PFR) oraz dla reaktora z przepływem doskonale wymieszanym (Continuous Stirred Tank Reactor, akronim CSTR). W modelach określonych jako PFR i CSTR nieidealne uwzględniono istnienie strefy martwej, bocznikowanie oraz opóźnienie. Rozpatrzono również przypadek szeregowego połączenia dwóch reaktorów idealnych PFR oraz CSTR.

Analiza właściwości reaktora w oparciu o krzywą rozkładu czasu przebywania ma szerokie zastosowanie i jest powszechnie wykorzystywana. W swojej pracy Autor wykorzystał tę technikę do analizy dynamiki reaktorów sonochemicznych oraz porównania zachodzącego w nich mieszania przy załączonej i wyłączonej sonifikacji. Wyniki badań i wnioski z nich płynące opisano w rozdziale 7.

Ultradźwięki o wysokim natężeniu są wykorzystywane do wywoływania, przyspieszania i modyfikowania przebiegu reakcji chemicznych (syntezy, katalizy,

degradacji, polimeryzacji, hydrolizy). Zastosowanie technik sonochemicznych pozwala na uzyskanie wielu naturalnych produktów (np. białek, olejów, barwników, przypraw, bioetanolu itp.) bez użycia toksycznych odczynników, dodatkowo skracając czas i podnosząc wydajność reakcji, a także zwiększając czystość produktu, przez co wydajność produkcji może zostać istotnie poprawiona przy zmniejszeniu zużycia reaktantów. Wykorzystanie fali ultradźwiękowych do poprawy wydajności reakcji chemicznych jest przedmiotem intensywnych badań prowadzonych w różnych ośrodkach. Autor włączył się w prace zespołu zajmującego się zagadnieniami związanymi ze sterowaniem reaktorem sonochemicznym pod kierownictwem dr hab. inż. Dariusza Choińskiego, profesora Politechniki Śląskiej. Zespół zajmował się między innymi zagadnieniami sterowania tego typu obiektem.

Z punktu widzenia sterowania, reaktor sonochemiczny jest układem nieliniowym. Autor stwierdza, że efektywność reakcji sonochemicznej zależy od mocy elektrycznej dostarczanej do głowicy ultradźwiękowej, ale jest liniowa tylko w niewielkim zakresie. Zwiększanie mocy powyżej pewnej wartości granicznej prowadzi do spadku wydajności. Na przebieg zjawiska mają wpływ: poziomu medium w reaktorze, temperatura, ciśnienie oraz częstotliwość ultradźwięków. Aby zaprojektować sonoreaktor optymalny dla danej aplikacji, moc ultradźwięków powinna być znana. Do określenia ilości mocy ultradźwiękowej rozpraszanej w cieczy stosuje się metody kalorymetryczne, jednakże dotychczasowe badania w tym zakresie opisywały doświadczenia wykonywane poza normalną pracą reaktora. Zespół, do którego autor dołączył, zaproponował metodę estymacji mocy ultradźwięków na bieżąco (on-line) w reaktorze przepływowym [Ilewicz i inni, 2020]. W tym celu niezbędne było wyznaczenie parametrów reaktora oraz określenie jego modelu między innymi za pomocą metod znacznikowych i funkcji rozkładu czasu przebywania

Badania reaktora sonochemicznego przeprowadzono na stanowisku laboratoryjnym Katedry Automatyki i Robotyki, Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Stała czasowa oraz czas opóźnienia reaktora to jedne z kluczowych parametrów charakteryzujących jego pracę. Istotnym parametrem mającym wpływ na jakość sterowania jest stosunek tych dwóch wielkości. Ponadto, jak pokazują badania zespołu, w którym autor uczestniczył (publikacja [Ilewicz i inni, 2020]) oraz opisane w publikacjach innych autorów, parametry te nie są stacjonarne. Do wyznaczenia tych parametrów oraz dalszego opracowania modelu reaktora na potrzeby estymacji mocy ultradźwięków wykorzystano metody znacznikowe. Wyniki zarejestrowanych badań z sonifikacją oraz bez niej Autor przedstawił na 21 rysunkach oraz w formie zestawień parametrów w pięciu tablicach w rozdziale 7.

Rozdział 8 stanowi podsumowanie pracy i wnioski.

3. Opinia o poprawności i oryginalności postawionych tez i stopnia w jakim zostały one wykazane

W rozdziale 1.3 Autor sformułował następujące tezy:

Synteza konstrukcji układu pomiarowego oraz metodyki pomiaru strumienia objętości z zastosowaniem znacznikowej metody czasu przejścia poprzez optymalizację parametrów metody i sposobu wyznaczania czasu przejścia chmury znacznika zapewnia poprawę niepewności.

Estymowanie wartości parametru kształtu funkcji rozkładu czasu przebywania znacznika umożliwia określenie opóźnienia oraz stałej czasowej badanego obiektu także dla przypadku recyrkulacji wstecznej.

Tezę pierwszą Autor udowodnił przeprowadzając badania opisane w rozdziałach 3, 4 i 5. Skoncentrował się na znacznikowej metodzie czasu przejścia w kanałach otwartych w celu wyznaczenia strumienia objętości. Jest to pomiar pośredni. Konieczna jest znajomość pola przekroju strugi oraz odległości pomiędzy miejscem dozowania znacznika i położeniem detektora jak również znajomość współczynnika wzorcowania k . Przy czym ważne jest rozmieszczenie punktów pomiarowych względem miejsca wstrzyknięcia znacznika z uwzględnieniem długości drogi mieszania. Na wynik pomiaru wpływa wiele czynników, takich jak: wypełnienie kanału, stężenie i ilość wstrzykiwanego znacznika, sposób podania znacznika, rozmieszczenie punktów pomiarowych, rodzaj znacznika oraz jego detektor.

Biorąc pod uwagę właściwości i możliwości techniczne stanowiska pomiarowego będącego do dyspozycji w laboratorium Autor zdecydował się na badania z wykorzystaniem chlorku sodu oraz zastosowaniu konduktometru jako detektora. Najpierw w celu określenia długości drogi mieszania znacznika oraz prawidłowego rozlokowania punktów pomiarowych na stanowisku Autor wykonał 15 serii po 10 pomiarów (dziesięciokrotne powtarzanie eksperymentu), dla różnych odległości detektora znacznika od miejsca wstrzyknięcia. Odległość ta była zmieniana od 0,3 m do 2,2 m. Wynikiem pomiaru był czasowy przebieg stężenia znacznika w danym punkcie pomiarowym, który ma kształt asymetrycznego piku. Do oceny jakościowej uzyskanych sygnałów wykorzystano trzy parametry: wysokość (amplitudę) piku, czas trwania impulsu (szerokość impulsu na poziomie 50% amplitudy piku) oraz pole powierzchni pod pikiem. Jako miarę powtarzalności wyników przyjęto odchylenie standardowe danego parametru pików w kolejnych seriach pomiarowych. Analizując wyniki badań Autor stwierdza, że na stanowisku badawczym wystarczające wymieszanie znacznika uzyskuje się w odległości około 0,5 m od miejsca jego iniekcji. Długości drogi mieszania uzyskane w wyniku doświadczeń okazały się mniejsze od wartości obliczonej według zaleceń Normy ISO 2975/6 oraz od wartości drogi mieszania podawanych przez innych autorów publikacji.

Autor przeprowadził również badania z wykorzystaniem znacznika barwnego, między innymi w celu określenia długości drogi mieszania. Jako detektor znacznika barwnego wykorzystano aparat fotograficzny. Algorytm analizy obrazu oparto na jednowymiarowej analizie intensywności barwy pikseli zlokalizowanych w poszczególnych miejscach obrazu kanału, stwierdzając największą czułość na barwnik składowej czerwonej. W wyniku badań otrzymano dla każdej serii pomiarowej położenie maksimum stężenia znacznika w funkcji czasu (w każdej sekundzie) oraz przekroje w poprzek kanału w miejscu wartości maksymalnej stężenia znacznika. Określenie długości drogi mieszania znacznika tą metodą dało podobny rezultat, mianowicie długość drogi mieszania znacznika wyniosła około 0,4 – 0,5 m.

Kolejnym zadaniem pomiarowym dla Autora było wyznaczenie czasu przejścia znacznika pomiędzy punktami pomiarowymi (pomiędzy sygnałem wejściowym i

wyjściowym). W normie ISO2975/6 dotyczącej pomiarów przepływu wyróżniono następujące sposoby pomiaru czasu przejścia: poprzez pomiar przedziału czasu odpowiadającego wartościom maksimum pików, poprzez pomiar przedziału czasu odpowiadającego „środkom ciężkości” sygnałów, poprzez pomiar przedziału czasu odpowiadającego połowom odcinka równoległego łączącego punkty odpowiadające 50% amplitudy sygnałów oraz poprzez pomiar przedziału czasu odpowiadającego połowie krzywej stężenia. Autor dysertacji, a wcześniej również inni autorzy cytowanych prac poszukiwali modelu matematycznego sygnału znacznika uzyskując lepsze lub gorsze rezultaty. Przebieg czasowy stężenia znacznika przechodzącego przez przekrój pomiarowy ma charakter impulsowy zaszumiony, kształtem przypomina niesymetryczny pik. Autor recenzowanej pracy zaproponował modele w postaci funkcji Gaussa (wzór 3.1, model 1), wielomianowej modyfikacji funkcji Gaussa 1-go stopnia (wzór 3.2, model 2) oraz funkcji będącej złożeniem dwóch funkcji Gaussa (wzór 3.3, model 3) stwierdzając, że błędy powstałe w procesie przetwarzania zarejestrowanych sygnałów (filtrowanie szumu, odcięcie tła) jak i błędy aproksymacji będą miały wpływ na błąd wyznaczenia czasu przejścia, a co zatem idzie na błąd pomiaru strumienia objętości.

Na rysunku 5.10 przedstawiono rezultaty aproksymacji z wykorzystaniem wymienionych trzech modeli dla przykładowego sygnału. Jako kryteria oceny dopasowania danych do zaproponowanych modeli przyjęto trzy: porównanie sum kwadratów różnic modelu i danych (SKR), analizę sygnału będącego różnicą danych pomiarowych oraz modelu, a także porównanie odchylenia standardowego czasów przejścia wyznaczonych na podstawie wykorzystanych modeli.

Na podstawie analizy kryterium sum kwadratów różnic (Tabela 5.3), stwierdzono że, najlepsze rezultaty dopasowania funkcji aproksymującej uzyskano dla modelu drugiego, natomiast najgorsze dla modelu pierwszego, co wydają się potwierdzać również wyniki obserwacji wzrokowej rezultatów dopasowania na Rys. 5.10. Innym sposobem oceny dopasowania zaproponowanych modeli do otrzymanych danych pomiarowych była analiza sygnału będącego różnicą sygnału zarejestrowanego oraz jego modelu (rys. 5.11). Dla tak otrzymanych przebiegów wykonano dla każdego sygnału test zgodności χ^2 sprawdzający hipotezę, że populacja należy do rozkładu normalnego. Dla sygnałów po aproksymacji z wykorzystaniem trzech modeli wyznaczono czas przejścia w sposób podany przez normę ISO 2975/6 a wyniki zestawiono w Tabeli 5.4. W kolejnych tabelach Tab. 5.5 – Tab. 5.7 Autor zestawiał swoje wyniki pomiarów czasu przejścia oraz wartości strumienia objętości z wynikami pomiaru uzyskanymi w tym samym laboratorium przez innych autorów (dyplomantów w Instytucie Automatyki Politechniki Śląskiej) z wykorzystaniem innych modeli aproksymacji. Wszystkie przeprowadzone doświadczenia, mające na celu ocenę jakości dopasowania przedstawionych modeli do przebiegów stężenia znacznika, pokazały jednoznacznie, że najlepszym modelem jest model nr 2 (asymetryczna modyfikacja piku Gaussa), który pozwala wyznaczyć czas przejścia oraz strumień objętości z najmniejszą niepewnością.

W następnym kroku Autor wyznaczał współczynnik wzorcowania k kanału, który zgodnie z definicją jest stosunkiem średniej prędkości strugi w całym przekroju

przepływowym do prędkości punktowej, wyznaczonej na podstawie różnicy czasów przejścia znacznika pomiędzy detektorami. Wyniki uzyskane na drodze doświadczalnej metodą znacznika chemicznego oraz barwnego zestawiono w Tab. 5.12 i 5.13. W celu porównania sygnałów uzyskanych dwiema różnymi metodami Autor zastosował normalizację ich wysokości (wartość maksymalną sygnału przyjmując za 1).

Średnie wartości współczynników wzorcowania k uzyskanych przy powtarzaniu eksperymentu metodą zaproponowaną przez Autora porównano z wynikami uzyskanymi przez Drozdowskiego [Drozdowski, 2021], który przy wyznaczaniu czasów przejścia wykorzystał metodologię zalecaną w normie ISO2975/6 i zestawiono w Tab. 5.9 i 5.10. Wyniki te nie różnią się znacząco. W większości przypadków uzyskano odchylenie standardowe współczynnika wzorcowania k mniejsze lub zbliżone do uzyskanego w pracy cytowanego autora. Poprawę powtarzalności można zauważyć zwłaszcza dla metod wrażliwych na zakłócone sygnały, tj. wyznaczania początku narastania sygnału oraz maksimum stężenia. Natomiast w przypadku metod uśredniających (środek ciężkości, połowy krzywej stężenia) powtarzalność uzyskanych wyników była podobna.

Ostatnim etapem części doświadczanej pracy w zakresie znacznikowej metody czasu przejścia było wykonanie pomiaru strumienia objętości. Uwzględniono wnioski płynące z przeprowadzonych badań dotyczące: doboru parametrów układu pomiarowego, sposobu wyznaczania czasu przejścia, a także wyznaczania współczynnika wzorcowania k . Wyniki podano w Tab. 5.14, 5.15. Następnie oszacowano złożoną niepewność pomiaru uwzględniając: niepewność pomiaru powierzchni przepływowej, niepewność pomiaru odległości pomiędzy detektorami, niepewność wyznaczenia czasu przejścia znacznika, niepewność wyznaczenia współczynnika wzorcowania. Szacowanie niepewności pomiaru przeprowadzono zgodnie z wytycznymi przewodnika wyznaczania niepewności GUM [JCGM 100, 2008]. Estymację tę przeprowadzono prawidłowo z dużą skrupulatnością wykazując że na niepewność pomiaru strumienia objętości największy wpływ mają: niepewności współczynnika wzorcowania oraz niepewność wyznaczenia czasu przejścia. Jak wykazano w pracy, zaproponowany przez Autora algorytm wyznaczania czasu przejścia pozwolił na zmniejszenie rozrzutu tej wielkości, co w konsekwencji pozwala na zmniejszenie niepewności tej wielkości składowej, a zatem również niepewności wielkości wyjściowej. Wyniki końcowe wraz z niepewnością zestawiono w Tab. 5.26. Uzyskano poprawę dokładności pomiarów strumienia objętości o ok. 3%, można więc uznać udowodnienie tezy pierwszej.

Druga teza pracy dotyczy zastosowania funkcji czasu przebywania znacznika RTD (Residence Time Distribution). Tym zagadnieniem Autor zajmował się w rozdziale 6 i 7. Jak przedstawiono już w p. 2 niniejszej recenzji analiza właściwości reaktora w oparciu o krzywą rozkładu czasu przebywania jest wykorzystywana w inżynierii procesowej, pozwala np. określać czas mieszania składników.

Dysponując krzywą stężenia na wyjściu obiektu $C(t)$ będącą odpowiedzią na impulsową zmianę stężenia znacznika można wyznaczyć funkcję rozkładu czasu przebywania. Funkcje rozkładu czasu przebywania stanowią podstawę do wyboru właściwego

modelu transportu w reaktorach przepływowych. Określenie rozkładu czasu przebywania w reaktorze jest niezmiernie ważne przy optymalizacji warunków prowadzenia reakcji chemicznych, gdyż czas przebywania, a więc czas, jaki mieszanina reakcyjna znajduje się wewnątrz reaktora w określonych warunkach determinuje jej konwersję oraz selektywność. Ponadto wyznaczenie charakterystyki RTD pozwala na zidentyfikowanie parametrów reaktora, a tym samym ułatwia właściwy jego dobór. Zakłada się, że reaktory mogą posiadać tak zwane obejście, gdy część substancji przedostaje się bezpośrednio do wyjścia reaktora, oraz strefę martwą, która ogranicza efektywną objętość zbiornika. Te „nieidealności” reaktora uwidaczniają się na charakterystykach rozkładu czasu przebywania $E(t)$ oraz skumulowanego rozkładu czasu przebywania $F(t)$.

Autor wykorzystał metodę znacznikową do analizy dynamiki reaktorów sonochemicznych oraz porównania zachodzącego w nich mieszania przy załączonej i wyłączonej sonifikacji. Ważnym zagadnieniem jest określenie mocy ultradźwięków. W tym celu niezbędne było wyznaczenie parametrów reaktora oraz określenie jego modelu między innymi za pomocą metod znacznikowych i funkcji rozkładu czasu przebywania. Stała czasowa oraz czas opóźnienia reaktora to jedne z kluczowych parametrów charakteryzujących jego pracę. Istotnym parametrem mającym wpływ na jakość sterowania jest stosunek tych dwóch wielkości. Do wyznaczenia tych parametrów oraz opracowania modelu reaktora na potrzeby estymacji mocy ultradźwięków Autor wykorzystał między innymi metody znacznikowe i funkcje rozkładu czasu przebywania. Wyniki badań, zarówno w postaci danych liczbowych (tabela 7.2), jak i w formie wykresów rozkładów czasu przebywania RTD (Rys. 7.2) pokazują istotny wpływ sonifikacji na zachodzące w reaktorze procesy mieszania. Z punktu widzenia zagadnienia sterowania, przy braku ultradźwięków uwidacznia się opóźnienie transportowe, zwłaszcza dla niższych wartości strumienia objętości płynącego przez reaktor.

Analizując wyznaczone charakterystyki, Autor zaproponował model reaktora jako złożenie dwóch reaktorów: jednego z przepływem tłokowym PFR, który odwzorowywał opóźnienie oraz drugiego reaktora odwzorowującego zjawiska mieszania. Takie połączenie dwóch modeli opisane zostało jako splot ich funkcji RTD. Autor rozpatrzył trzy rodzaje tego typu modeli matematycznych odwzorowujących przebiegi funkcji czasów przebywania (w jednym z badanych modeli występowała recyrkulacja wsteczna - back mixing). Przebiegi rozkładów czasu przebywania dla rozważanych modeli przedstawiają wykresy na Rys. 7.4 – 7.6 a estymowane wartości czasu zatrzymania i stałej czasowej Tabela 7.3, natomiast opóźnienia Tabela 7.4. Stosunek opóźnienia do stałej czasowej τ/t_0 w funkcji natężenia strumienia objętości przepływającego przez reaktor przy włączonej sonifikacji oraz przy wyłączonej sonifikacji przedstawiono z kolei na rys. 7.7.

Uzyskane przez Autora wyniki w postaci parametrów dynamicznych reaktora sonochemicznego udowadniają postawioną tezę, że estymacja wartości parametrów kształtu funkcji rozkładu czasu przebywania znacznika umożliwiła określenie opóźnienia oraz stałej czasowej badanego obiektu, także w przypadku wystąpienia recyrkulacji wstecznej, a estymowane parametry mogą zostać wykorzystane do sterowania procesami w reaktorach przemysłowych.

4. Analiza źródeł bibliograficznych

Bibliografia obejmuje 85 pozycji oraz wykaz 8 norm dotyczących pomiarów przepływu. Na początku listy umieszczono 8 publikacji autorskich i współautorskich, w tym w wysoko punktowanym czasopiśmie *Energies*, MDPI (2020 r) oraz 2 artykuły w *Przeglądzie Elektrotechnicznym* z roku 2009 oraz 2013. Pozycje literaturowe obejmują pomiary przepływów a w szczególności metody znacznikowe, pomiary konduktometryczne oraz podręczniki i publikacje z dziedziny chemii, sonochemii i mechaniki płynów. Kilka cytowanych pozycji literaturowych to prace dyplomowe magisterskie realizowane również w Instytucie Automatyki Politechniki Śląskiej, do który Autor się odnosił lub porównywał wyniki. Zestawiona i cytowana bibliografia jest właściwie dobrana i wyczerpuje literaturę przedmiotu.

5. Ocena rozprawy w stosunku do stanu wiedzy reprezentowanej przez literaturę światową

Przeprowadzone doświadczenia z wykorzystaniem metod znacznikowych pozwoliły na określenie parametrów dynamicznych badanego reaktora, a także wykazały różnice w zachowaniu reaktora przy włączonej i wyłączonej sonifikacji. Niezależnie od przyjętego modelu, stosunek stałej czasowej do czasu opóźnienia τ/t_0 przy włączonej sonifikacji malał wraz ze wzrostem strumienia objętości przepływającego przez reaktor, podczas gdy w przypadku wyłączonej sonifikacji wartość ta w przybliżeniu pozostawała stała. Właściwość ta uwidacznia istotną różnicę w dynamice badanego układu w przypadku włączonych i wyłączonych ultradźwięków. Znajomość parametrów modelu reaktora sonochemicznego jest ważna z punktu widzenia doboru sterowania obiektem reaktora i przebiegiem procesu sonifikacji.

Tematykę podjętą w pracy doktorskiej uważam za aktualną i celową. Wyniki pomiaru strumienia objętości, ich dokładność, mogą wpływać wprost na koszty poboru medium (woda, substancje chemiczne), określają urobek z kopalni transportowany taśmociągami, dozowanie składników podczas procesu technologicznego. Stąd ważność podjętego w pracy doktorskiej zagadnienia. Z kolei zakres wykorzystania reaktorów sonochemicznych jest bardzo szeroki, stąd istnieje potrzeba określenia ich właściwości w celu opracowania skutecznego algorytmu sterowania. Rezultaty pracy wpisują się do dorobku naukowego w skali wiedzy reprezentowanej przez literaturę światową.

6. Uwagi szczegółowe

- Na rys. 4.4 na wyjściu wzmacniacza operacyjnego nie powinno być zaznaczone źródło, natomiast rys. 4.5 jest bardzo uproszczony.
- Wykresy fazy na rys. 4.7 nie odpowiadają modelom wzmacniacza operacyjnego i danym katalogowym.
- Na rys. 5.4 na osi pionowej jest opis: „wskaźnik niepowtarzalności”, co Autor rozumie pod tym terminem?

- Opisy do wykresów na rysunkach 5.7 i 5.8 są niejasne.
- Na str. 103 oraz w spisie oznaczeń na str. 9 przekłamanie w rozwinięciu akronimu RTD (jest Resistance Time Distribution zamiast Residence Time Distribution).
- Dwukrotnie występuje ta sama numeracja dwu różnych tabeli (Tab.7.3) na str.123 i 124.

Reasumując, praca napisana jest językiem komunikatywnym. Na podkreślenie zasługują staranne opracowania wyników pomiarów zarówno w tekście pracy, jak również tych umieszczonych w obszernych dodatkach (wykresy, estymacja niepewności pomiarów).

7. Ocena ogólna

Przedstawioną do oceny pracę mgr inż. Wojciecha Błotnickiego oceniam pozytywnie.

Stwierdzam, że praca spełnia warunki określone w art.14 ust. 2 pkt 2 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2017 r. poz. 1789), § 6 ust.1 Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 2018 r. poz. 261),

i wnoszę o dopuszczenie rozprawy doktorskiej do publicznej obrony.

M. Wzruszozak