

Streszczenie rozprawy doktorskiej

mgr inż. Adrian Ciesielski

Nieliniowe sterowanie predykcyjne procesem produkcji bioetanolu metodą fermentacji ciągłej

Przedmiotem niniejszej pracy jest nieliniowe sterowanie predykcyjne procesem produkcji bioetanolu metodą fermentacji ciągłej. Proces realizowany jest z udziałem drożdży *Saccharomyces cerevisiae*. Wzrost mikroorganizmów odbywa się na podłożu glukozowym w warunkach aerobowych i jest opisany dobrze zweryfikowanym strukturalnym-niesegregowanym modelem kinetycznym. Zaliczany jest on do grupy modeli cybernetycznych i uwzględnia obecność trzech reakcji biochemicznych: fermentacji glukozy, utleniania etanolu i utleniania glukozy. Reakcje te składają się na uproszczony model metabolizmu komórkowego. Rozpatrywany proces prowadzony jest w dwóch typach modelowych bioreaktorów. Pierwszym z nich jest zbiornikowy bioreaktor przepływowy z idealnym wymieszaniem, drugim natomiast zbiornikowy bioreaktor przepływowy z częściową recyrkulacją masy i zagęszczeniem biomasy. Oba typy aparatów są powszechnie wykorzystywane w procesie produkcji bioetanolu na skalę przemysłową. Dla obu konfiguracji procesowych sformułowano modele matematyczne, w postaci układów nieliniowych równań różniczkowych zwyczajnych. Zbadano wpływ wybranych parametrów procesowych na występowanie zjawisk stacjonarnych i dynamicznych w analizowanych obiektach, przeprowadzając analizę nieliniową ich modeli matematycznych. Jako parametry bifurkacyjne w przypadku pierwszego bioreaktora użyto stężenie glukozy w strumieniu zasilającym aparat oraz szybkość rozcieńczania. Natomiast analizę nieliniową modelu bioreaktora z recyrkulacją przeprowadzono wykorzystując jako parametry bifurkacyjne szybkość rozcieńczania i współczynnik recyrkulacji. W celu analizy danych opracowano metodę jakościowej interpretacji struktury gałęzi stanów stacjonarnych. Metoda ta umożliwia wykrywanie zmian metabolicznych zachodzących w komórkach biomasy, związanych ze zmianą wartości parametrów procesowych. Wykorzystując tą metodą skonstruowano mapy procesowe. Zawierają one między innymi informacje ilościowe o generowanych w bioreaktorze stężeniach produktu oraz informacje jakościowe na temat zachodzących zmian w systemie metabolicznym komórek biomasy. Mapy te skonstruowano w układach współrzędnych przyjętych parametrów bifurkacyjnych. Na ich podstawie określono optymalne zakresy parametrów, dla których proces może być prowadzony stabilnie i bezpiecznie. Następnie diagramy poddano digitalizacji. Jego wynikiem było wyrażenie przebieg linii granicznych w postaci funkcji matematycznych. Funkcje te wchodzi w skład numerycznej biblioteki ograniczeń procesowych. Stanowi ona integralną część wykorzystanego w pracy algorytmu sterowania predykcyjnego.

Badania nad układem sterowania zbiornikowego bioreaktora przepływowego prowadzono w dwóch etapach. Obejmowały one rozważania nad jakością sterowania bioreaktorem za pomocą nieliniowego regulatora MPC ze zintegrowaną biblioteką ograniczeń procesowych w porównaniu z regulacją za pomocą klasycznego regulatora PI. Jako zmienną sterowaną przyjęto stężenie bioetanolu. Jako zmienną sterującą użyto szybkość rozcieńczania. Szczególną uwagę zwrócono na wpływ wartości generowanych przez oba regulatory sygnałów sterujących na zachodzące zmiany metaboliczne w komórkach biomasy oraz graniczne wartości parametrów procesowych. W pierwszym etapie analizie poddano działanie regulatora PI. Stwierdzono, że nie jest możliwe dobranie uniwersalnych wartości parametrów nastaw regulatora. Nie ma pewności, że w momencie pojawienia się wymuszenia, regulator będzie generował wartości sygnałów sterujących w bezpiecznym z procesowego punktu widzenia zakresie. W rezultacie układ procesowy po przekroczeniu granicznych wartości parametrów procesowych może znajdować się przez dłuższy okres czasu w niepożądanym obszarze operacyjnym. Jak potwierdziły przeprowadzone w drugim etapie badania numeryczne, unikanie tego typu sytuacji jest możliwe poprzez wykorzystanie nieliniowego algorytmu sterowania MPC. Regulator MPC wyznaczając optymalne wartości sygnałów sterujących przeszukuje tylko zadany zakres zmiennych sterujących. W rezultacie generowane wartości sygnałów sterujących nie wykraczają poza zdefiniowane wartości graniczne. Posiadając zaproponowaną w niniejszej pracy bibliotekę ograniczeń procesowych, można zawęzić obszar poszukiwań optymalnych wartości sygnału sterującego. Skracają to czas osiągnięcia przez sterowany obiekt zadanej wartości.

Podczas badań nad układem sterowania bioreaktora z częściową recyrkulacją strumienia masy i zagęszczenia biomasy, zsyntetyzowano dwuwymiarowy nieliniowy regulator predykcyjny. Analogicznie jak w poprzednim przypadku został on zintegrowany z biblioteką ograniczeń procesowych. Również i w tym przypadku zmienną sterowaną było stężenie bioetanolu. Jako zmienne sterujące wykorzystano szybkość rozcieńczania i współczynnik recyrkulacji. Przeprowadzone symulacje numeryczne dowiodły, że zaproponowany regulator jest w stanie efektywnie sterować procesem produkcji bioetanolu za pomocą tych dwóch zmiennych sterujących. Generowane wartości obu sygnałów sterujących spełniały w każdym przypadku narzucone ograniczenia procesowe i nie wykraczały poza ich dozwolone wartości. Z uwagi na fakt, iż wartości stężeń bioetanolu na sporządzonych mapach procesowych są izoliniami możliwe jest osiągnięcie nieskończonej liczby stanów stacjonarnych charakteryzujących takimi samymi wartościami stężenia bioetanolu, świadome kierowanie procesu w kierunku zaplanowanego punktu pracy sprowadza się do umiejętnego doboru wartości parametrów nastawy regulatora predykcyjnego. Co więcej, możliwe jest osiągnięcie zadanych punktów pracy dla zmiennych sterujących z szerokiego przedziału ich wartości.

30.09.2021 r.

