

Optimization of the bioethanol production process control algorithm in terms of designing the guideline executive systems

Optymalizacja algorytmu sterowania procesem wytwarzania bioetanolu w aspekcie projektowania układów wykonawczych



DOI: 10.15199/62.2025.5.1

The control of the rectification process was analyzed using selected control algorithms. The step characteristic was recorded at the test stand, based on which the math. form of the process operator transfer function was formulated. It was used to develop models of 3 versions of the control system in the Matlab®-Simulink environment, in configurations with the following controllers: relay, PID and PID + DD. During the computer simulation, an anal. of the control qual. was carried out in ideal conditions and in the presence of a disturbing signal with an amplitude of 5% of the set signal value and a frequency of 2 mHz. The anal. showed that the PID and PID + DD controllers provide better control qual. at the cost of greater wear of the actuators than the relay controller.

Keywords: rectification, control process, computer modeling and simulation, control quality

Analizowano sterowanie procesem rektyfikacji za pomocą wybranych algorytmów sterowania. Na stanowisku badawczym zarejestrowano charakterystykę skokową, na podstawie której sformułowano matematyczną postać transmitancji operatorowej procesu. Posłużyła ona do opracowania w środowisku Matlab®-Simulink modeli trzech wersji układu sterowania – w konfiguracjach z regulatorami: *relay*, PID oraz PID + DD. Podczas symulacji komputerowej przeprowadzono analizę jakości sterowania w warunkach idealnych i w obecności sygnału zakłócającego o amplitudzie 5% wartości sygnału zadanego i częstotliwości 2 mHz. Analiza wykazała, że regulatory PID oraz PID + DD zapewniają lepszą jakość regulacji kosztem większego zużycia elementów wykonawczych niż regulator *relay*.

Słowa kluczowe: rektyfikacja, proces sterowania, modelowanie i symulacja komputerowa, jakość sterowania

Według danych z 2023 r. ok. 95% światowej produkcji etanolu uzyskuje się w procesie fermentacji surowców. Badania nad biopaliwami koncentrują się na aspektach ekonomicznych produkcji bioetanolu, wpływie różnych surowców na intensyfikację fermentacji oraz optymalizacji sterowania urządzeniami wykorzystywanymi w tym procesie¹⁾. W literaturze można znaleźć propozycję innowacyjnej konfiguracji systemu do wytwarzania bioetanolu metodą zmiennociśnieniowej destylacji prowadzonej w dwóch

oddzielnych kolumnach, co w wyniku zmniejszonych strat ciepła pomiędzy tymi kolumnami powoduje znaczne obniżenie energochłonności²⁾. Innym przykładem optymalizacji procesu produkcji bioetanolu jest zastosowanie systemu sterowania zapewniającego dynamiczną optymalizację z uwzględnieniem jakości produktu i minimalizacji strat energii, uzyskując poprawę tych wskaźników. Yadav i Verma³⁾ przedstawili wyniki badań związanych z modelowaniem pracy wyparki wielostopniowej przeznaczonej



Dr inż. Marcin TOMASIAK (ORCID: 0000-0002-3152-4654) w roku 2001 ukończył studia na Wydziale Inżynierii Produkcji i Energetyki Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, gdzie w 2005 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych w inżynierii mechanicznej. Jest adiunktem na tym samym wydziale. Specjalność – systemy sterowania PLC, SCADA, AI, robotyka przemysłowa.



Dr inż. Stanisław LIS (ORCID: 0000-0002-7813-5322) w roku 2001 ukończył studia na Wydziale Inżynierii Produkcji i Energetyki Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, gdzie w 2009 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych w inżynierii mechanicznej. Jest adiunktem na tym samym wydziale. Specjalność – automatyzacja i robotyzacja procesów rolno-spożywczych.

* Adres do korespondencji:

Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, ul. Balicka 116, 30-149 Kraków, tel.: (12) 662-46-48, e-mail: marcin.tomasik@urk.edu.pl

do obróbki wstępnej biomasy. W wyniku zastosowania optymalnych nastaw systemu regulacji uzyskali oszczędności w zużyciu energii. De Freitas⁴⁾ w pracach badawczych analizował efekty stosowania dwóch systemów sterowania procesem zasilania bioreaktora wsadowego do wytwarzania bioetanolu. Autorzy stwierdzili istotną korelację pomiędzy periodycznym zasilaniem bioreaktora a produktywnością biomasy oraz czasem trwania procesu.

Część doświadczalna

Surowce

Do analizy procesu sterowania rektyfikacją zastosowano mieszaninę rektyfikacyjną otrzymaną na bazie wodnego roztworu sacharozy. Proces fermentacji przeprowadzono z wykorzystaniem wysoko tolerancyjnego na etanol szczepu drożdży gorzelnicznych, zapewniającego wydajną konwersję cukrów do alkoholu etylowego. Fermentację prowadzono w warunkach kontrolowanych, przy utrzymywaniu temperatury i pH w zakresie rekomendowanym w literaturze branżowej⁵⁾. W początkowej fazie procesu zastosowano napowietrzanie w celu intensyfikacji namnażania drożdży.

Aparatura

Analizę sterowania procesem rektyfikacji przeprowadzono na stanowisku pomiarowym przedstawionym na rys. 1. Podstawowym elementem systemu doświadczalnego była kolumna rektyfikacyjna. Urządzenie składa się ze zbiornika na rektyfikowaną ciecz (1), umieszczonego nad nim deflegmatora (2) oraz chłodnicy (3) zlokalizowanej w górnej części układu, przeznaczonej do skraplania i odbioru destylatu. Proces rektyfikacji wymaga dostarczenia ciepła, co realizowano za pomocą grzałki o mocy 4 kW zainstalowanej w zbiorniku (1). Na schemacie widoczne są elementy pomiarowe (czujniki temperatury PT-100) (4)–(6), wzmacniacze sygnałów czujników temperatury (7)–(9), wzmacniacz sygnału sterującego elementem grzewczym (10), komputer sterujący (11), terminal zaciskowy karty I/O komputera sterującego (12), komputer rejestrujący (14) i terminal zaciskowy karty I/O komputera rejestrującego (13). Działanie kolumny opiera się na przeciwprądowym kontakcie cieczy destylacyjnej, która spływa grawitacyjnie

w dół deflegmatora, z unoszącymi się ku górze oparami rektyfikowanej mieszaniny. W celu zwiększenia efektywności wymiany masy i ciepła wewnątrz deflegmatora umieszczone były elementy konstrukcyjne zwiększające powierzchnię kontaktu cieczy z oparami. W trakcie procesu ok. 25% objętości etanolu było kierowane do odbioru jako produkt końcowy.

Metodyka badań

Badaniami objęto sterowanie procesem rektyfikacji. Podczas doświadczenia zbiornik (1) (rys. 1) wypełniony był mieszaniną rektyfikacyjną o objętości 25 dm³. Mieszanina znajdowała się w stanie ustalonym w temp. 20°C. Na wstępie przeprowadzono identyfikację obiektu sterowania (kolumny rektyfikacyjnej) stanowiącego reprezentację analizowanego procesu. W literaturze fachowej opisano wiele metod identyfikacji obiektów regulacji. Przykładowo, zgodnie z podejściem przedstawionym przez Nagy⁶⁾, identyfikacja procesu rektyfikacji w ramach metod doświadczalnych może być realizowana poprzez pomiary funkcji przejściowej, analizę charakterystyk częstotliwościowych, badania impulsowe oraz analizę korelacyjną^{7, 8)}.

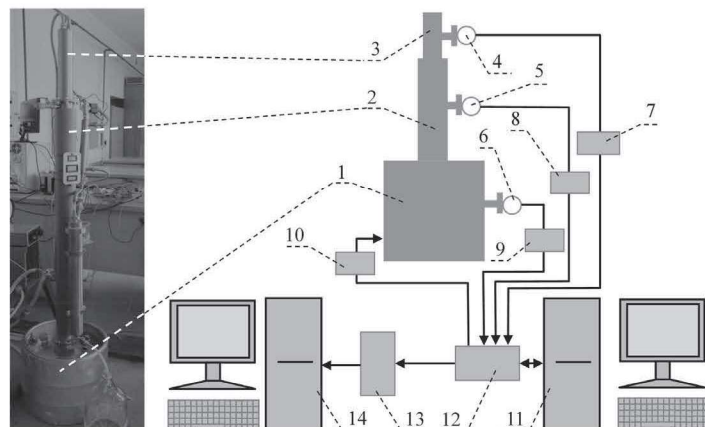


Fig. 1. Schematic diagram of the test stand

Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego

W prezentowanej pracy zastosowano pierwszą z wymienionych metod. Na podstawie pomiaru sygnału wyjściowego układu (temperatury – krzywa 1 na rys. 2) w stanie nieustalonym sformułowano matematyczną postać transmitancji operatorowej badanego obiektu. Uzyskany model obiektu (matematyczna postać transmitancji operatorowej) dostrajano i zweryfikowano pod kątem zgodności z obiektem rzeczywistym. Kończącą jego postać przedstawia zależność (1):

$$G(s) = 0,0685 \frac{1}{7970s+1} \quad (1)$$

w której $G(s)$ oznacza transmitancję operatorową, a s operator Laplace'a.

Przebieg odpowiedzi modelu obiektu (zależność 1) na wymuszenie i charakterystykę skokową obiektu rzeczywistego zilustrowano na rys. 2.



Dr inż. Adam TARNIOWY (ORCID: 0009-0007-7343-5397) w roku 1991 ukończył studia na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Ceramiki AGH w Krakowie. W 1996 r. uzyskał stopień doktora nauk chemicznych na tym samym wydziale. Od 2014 r. pracuje jako adiunkt w Instytucie Nauk Inżynieryjno-Technicznych w Małopolskiej Uczelni Państwowej im. rtm. Witolda Pileckiego w Oświęcimiu. Specjalność – inżynieria materiałowa.

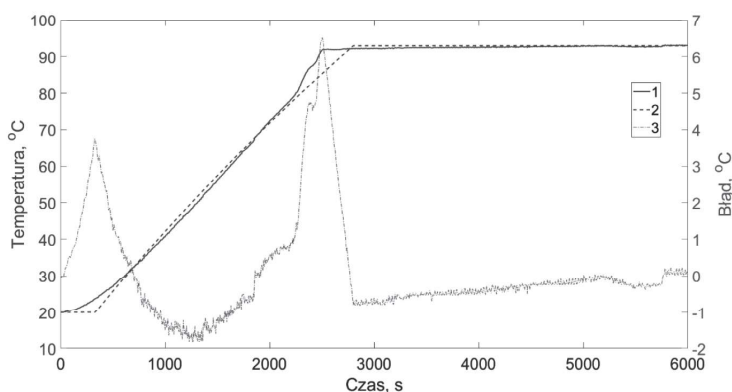


Fig. 2. Analyzed signals: 1 – output of the real object, 2 – output of the transmittance model, 3 – model fitting error

Rys. 2. Analizowane sygnały: 1 – wyjściowy obiekt rzeczywisty, 2 – wyjściowy model transmitancyjny, 3 – błąd dopasowania modelu

Na podstawie analizy modelu obiektu sformułowano koncepcję sterowania i zamodelowano układ regulacji, który posłużył do przeprowadzenia symulacji komputerowych. Umożliwiły one analizę wpływu zastosowanego regulatora na jakość sterowania. W środowisku Matlab-Simulink zaimplementowano 3 wersje układu sterowania, w konfiguracjach z regulatorami: *relay*, PID oraz PID + DD^{9, 10)} (rys. 3). Na przedstawionym schemacie kluczowe bloki funkcjonalne pełnią następujące funkcje: *setpoint* wprowadza do układu zadany przebieg temperatury; bloki *controller* reprezentują algorytmy regulatorów, które testowano w aspekcie jakości sterowania; transfer *fcn* oraz transport *delay* reprezentują obiekt sterowania. Dodatkowo w pętli sterowania umieszczono blok *signal generator*, który nie jest częścią struktury układu. Pełni on funkcję źródła zakłóceń, umożliwiając analizę ich wpływu na jakość sterowania podczas badań symulacyjnych.

Metody analityczne

Badania symulacyjne przeprowadzono w środowisku Matlab®-Simulink. Ich wyniki przedstawiono w postaci wykresu i tabel. Dla symulacji przyjęto czas trwania procesu 2,5 h, co odpowiada warunkom rzeczywistym przeprowadzonych doświadczeń. Sygnał zadany kształtowany był wg algorytmu przewidującego przyrost i utrzymanie temperatury cieczy w zbiorniku kolumny (rys. 1) na poziomie zapewniającym właściwy przebieg procesu. W trakcie symulacji analizowano jakość sygnału sterującego w warunkach idealnych i przy oddziaływaniu czynnika zakłócającego^{11, 12)}. Przebieg sygnału zakłócającego był losowy, jego częstotliwość wynosiła 2 mHz, a amplituda 5% maksymalnej wartości sygnału zadanego.

Jako kryteria oceny jakości sterowania zastosowano całkowite wskaźniki jakości $QI1$ i $QI2$, gdzie $QI1$ to całka z wartości bezwzględnej błęd regulacji przedstawiona zależnością (2), natomiast $QI2$ to całka z wartości bezwzględnej pochodnej sygnału sterującego (3):

$$QI1 = \int_{t_p}^{t_f} |e| dt \quad (2)$$

$$QI2 = \int_{t_p}^{t_f} \left| \frac{du}{dt} \right| dt \quad (3)$$

w których e oznacza błąd sterowania, du/dt pochodną sygnału sterującego, t czas, t_p początek interwału czasowego sterowania, a t_f koniec interwału czasowego sterowania.

$QI2$ dostarcza informacji na temat dynamiki sygnału sterującego (niższa wartość oznacza mniejsze zużycie elementów wykonawczych). Wartość wskaźnika $QI1$ informuje o jakości sterowania, im wartość ta jest niższa, tym jakość sterowania jest lepsza.

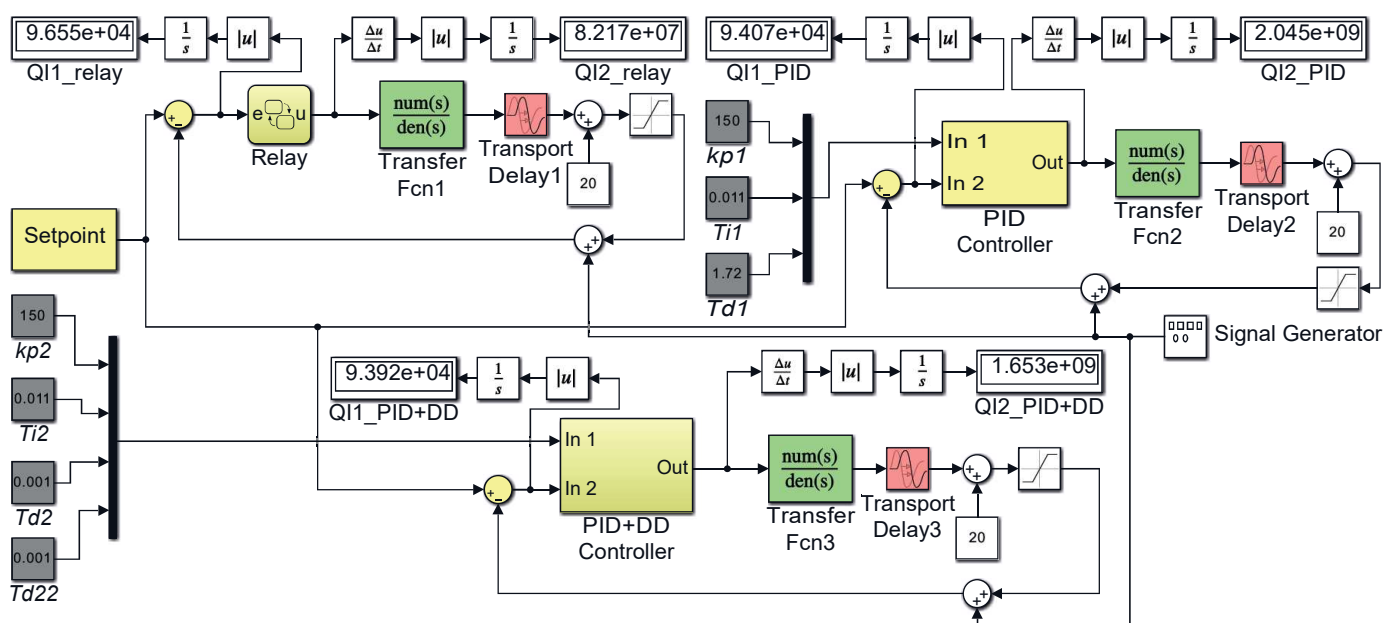


Fig. 3. Block diagram of integrated simulation models of control systems with relay, PID and PID + DD controllers

Rys. 3. Schemat blokowy zintegrowanych modeli symulacyjnych układów sterowania z regulatorami *relay*, PID oraz PID + DD

Table 1. The values of integral control quality indicators in ideal conditions

Tabela 1. Wartości całkowych wskaźników jakości sterowania w warunkach idealnych

Regulator	Relay	PID	PID + DD
Wskaźnik			
QI	$1,064 \cdot 10^5$	$7,831 \cdot 10^4$	$7,831 \cdot 10^4$
QD	1033	$3,111 \cdot 10^5$	$4,505 \cdot 10^5$

Table 2. The values of integral control quality indicators for a random interference signal with a maximum amplitude of 5%

Tabela 2. Wartości całkowych wskaźników jakości sterowania przy sygnale zakłócającym o losowym przebiegu z maksymalną amplitudą 5%

Regulator	Relay	PID	PID + DD
Wskaźnik			
QI	$9,922 \cdot 10^4$	$9,407 \cdot 10^4$	$9,392 \cdot 10^4$
QD	$8,217 \cdot 10^7$	$2,044 \cdot 10^9$	$1,654 \cdot 10^9$

Wyniki badań i ich omówienie

Wstępnie analizie poddano działanie zamodelowanego układu bez zakłóceń. Wyniki symulacji zilustrowano na rys. 4. Wartości całkowych wskaźników jakości dla rozpatrywanych regulatorów przedstawiono w tabeli 1.

Analizując przedstawione na wykresie (rys. 4) przebiegi sygnałów 3 i 4 oraz wartości wskaźników QI i QD (tabela 1), należy stwierdzić, że algorytmy badanych regulatorów podczas symulacji komputerowej dla warunków idealnych (bez zakłóceń) zapewniały analogiczną jakość sterowania. Przebiegi te nie odbiegały znacząco od sygnału wartości zadanej reprezentowanej przez krzywą nr 1. Temperatura w zbiorniku była utrzymywana w sposób prawidłowy. Analizując krzywą 2 reprezentującą układ sterowania z regulatorem *relay*, można zaobserwować, że sygnał ten był swoisty dla zastosowanego algorytmu. Na podstawie analizy wskaźnika QD pozwalającego ocenić wpływ regulatora na układ wykonawczy, należy stwierdzić, że najmniejsze zużycie elementów wykonawczych powodował regulator *relay* charakteryzujący się małą wartością wskaźnika QD w zestawieniu z porównywanymi regulatorami.

Wyniki symulacji dla zamodelowanego systemu poddanego oddziaływaniu sygnału zakłócającego przedstawiono w tabeli 2.

Analizując wyniki symulacji dla procesu w obecności sygnału zakłócającego opisane wskaźnikami całkowitymi (tabela 2), można stwierdzić logiczną korelację między sygnałem zakłócającym a wartościami całkowych wskaźników jakości QI i QD . Mianowicie dla analizowanych algorytmów regulatorów sygnał zakłócający wywołał wzrost wartości wskaźników, co jest zrozumiałe. Również tym razem najwyższą wartość przyjął wskaźnik QI dla regulatora *relay*. W przypadku układu wykorzystującego algorytm tego regulatora ponownie zaobserwowano także najmniejszą dynamikę sygnału sterującego (o czym informuje wartość wskaźnika QD) w porównaniu z pozostałymi regulatorami.

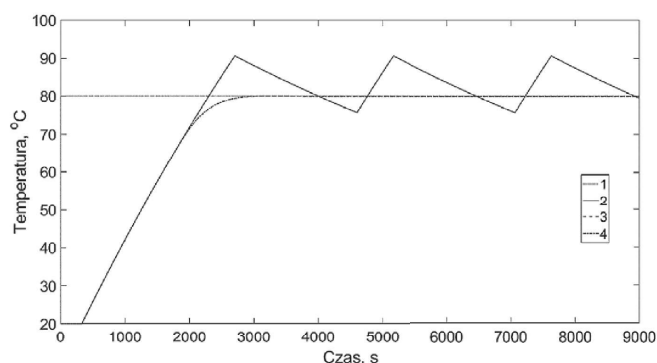


Fig. 4. Temperature control simulation results (no interference): 1 – temperature setpoint, 2 – output signal of the control system with relay controller, 3 – output signal of the control system with PID controller, 4 – output signal of the control system with PID + DD controller

Rys. 4. Wyniki symulacji sterowania przebiegiem temperatury (brak zakłóceń): 1 – wartość zadana temperatury, 2 – sygnał wyjściowy układu sterowania z regulatorem *relay*, 3 – sygnał wyjściowy układu sterowania z regulatorem PID, 4 – sygnał wyjściowy układu sterowania z regulatorem PID + DD

Podsumowanie

Na podstawie badań symulacyjnych przeprowadzonych z wykorzystaniem modelu obiektu sterowania zweryfikowanego na obiekcie rzeczywistym stwierdzono, że najgorszym rozwiązaniem pod względem jakości sterowania (zarówno w warunkach idealnych, jak i dla systemu działającego w obecności czynnika zakłócającego) jest regulator *relay* (wskaźnik QI).

Najmniejsze zużycie elementów wykonawczych powoduje regulator *relay* (informuje o tym wskaźnik QD – niższa wartość oznacza mniejsze zużycie elementów wykonawczych).

Regulatory PID oraz PID + DD zapewniają zbliżoną jakość sterowania w warunkach idealnych oraz w obecności sygnału zakłócającego (wskaźnik QI – im wartość ta jest niższa tym jakość sterowania jest lepsza).

Otrzymano: 07-04-2025

Zrecenzowano: 17-04-2025

Zaakceptowano: 23-04-2025

Opublikowano: 19-05-2025

LITERATURA

- [1] N. Arifeen, R. Wang, I. Kookos, C. Webb, A. Koutinas, *Biotechnol. Prog.* 2007, **23**, nr 6, 1394.
- [2] I. Pataro, M. Americanod da Costa, B. Joseph, *Comput. Chem. Eng.* 2020, **143**, 107075.
- [3] D. Yadav, O. Verma, *Heliyon* 2020, **6**, nr 7, 04349.
- [4] H. De Freitas, J. Olivo, C. Andrade, *Comput. Techn. Eng.* 2017, **10**, nr 11, 1763.
- [5] M. Salam, J. Popul, *Ther. Clin. Pharmacol.* 2024, **31**, nr 1, 656.
- [6] I. Nagy, *Regulacja kolumn rektyfikacyjnych. Inżynieria chemiczna*, WNT, Warszawa 1976.
- [7] R. Tadeusiewicz, *Biocybernetyka: metodologiczne podstawy dla inżynierii biomedycznej*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2014.
- [8] S. Lis, J. Knaga, S. Kurpaska, S. Famielec, P. Łyszczarz, M. Machaczka, *Energies* 2024, **17**, nr 20, 5031.
- [9] W. Gruk, S. Habecki, R. Piotrowski, *Pomiary Automatyka Robotyka* 2017, **21**, nr 1, 31.
- [10] W. Tarnowski, *Projektowanie układów regulacji automatycznej ciągłych z liniowymi korektorami ze wspomaganie za pomocą Matlab'a*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2008.
- [11] E. Ziółkowski, P. Śmierciak, *Arch. Foundry Eng.* 2015, **15**, nr 4, 133.
- [12] J. Knaga, S. Lis, S. Kurpaska, P. Łyszczarz, M. Tomasik, *Processes* 2021, **9**, nr 2, 9020282.