

Konstrukcja i analiza modelu symulacyjnego układu sterowania piecem indukcyjnym

Streszczenie. W pracy przedstawiono metodę opracowania modelu symulacyjnego układu sterowania piecem indukcyjnym z wykorzystaniem symulacji komputerowej w programie MATLAB[®]-Simulink. Istotę działania modelu zilustrowano na schematach blokowych. Omówiono wykorzystanie charakterystyki dynamicznej obiektu regulacji w aspekcie określenia stopnia niedoskonałości modelu. Analizowano wyniki symulacji off-line modelu układu sterowania.

Abstract. The paper presents a method to develop a simulation model induction furnace control system using a computer simulation in MATLAB[®]-Simulink program. The essence of the model is illustrated in the block diagrams. Were discussed use of the dynamic characteristics of the control object in terms of determining the degree of imperfection of the model. Results were analyzed off-line simulation model of the control system. (**Construction and analysis of simulation model induction furnace control system**).

Słowa kluczowe: piec indukcyjny, układ regulacji, model symulacyjny.

Keywords: induction furnace, control system, simulation model.

Wstęp

Obecnie obserwuje się wzrost zainteresowania zagadnieniami dotyczącymi zastosowania w energetyce ciepłej biomasy lignocelulozowej. Tego typu paliwo produkowane jest przemysłowo z różnych rodzajów roślin energetycznych i najczęściej dostępne jest w postaci granulowanego pelletu lub brykietu [1]. Ze względu na warunki eksploatacji palenisk, kotłów stosowanych w energetyce ciepłej, istotnym parametrem związanym z procesem spalania biomasy jest temperatura płynięcia popiołu. Przekroczenie tej temperatury skutkuje zalaniem rusztu płynnym popiołem (szlaką) – powoduje to wyłączenie kotła z eksploatacji. Występują różne temperatury płynięcia dla popiołów powstałych ze spalania pelletu lub materiałów palnych z jego domieszką. W celu utrzymania prawidłowych warunków eksploatacji kotła, zachodzi konieczność indywidualnego określenia temperatury płynięcia popiołu dla poszczególnych partii biomasy przeznaczonej do spalania. W związku z powyższym skonstruowano urządzenie umożliwiające analizę wymienionej właściwości popiołu. W Laboratorium Technologii Produkcji i Oceny Jakości Biopaliw Wydziału Inżynierii Produkcji i Energetyki Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie zastosowano urządzenie (piec indukcyjny) umożliwiające oznaczanie topliwości popiołu w wysokiej temperaturze metodą rurową zgodnie z normą [2]. Powstało ono w ramach współpracy z Wydziałem Elektrycznym Politechniki Częstochowskiej. Dla dostosowania parametrów pracy pieca do wytycznych, zawartych w dokumentach normatywnych konieczne jest wyposażenie go w poprawnie skonfigurowany system sterowania. Podjęto zatem badania zmierzające do określenia założeń ramowych dla projektu układu sterowania.

Cel i zakres

Celem pracy było opracowanie modelu symulacyjnego układu sterowania piecem indukcyjnym do oznaczania topliwości popiołu z biopaliw stałych w wysokiej temperaturze metodą rurową, w aspekcie zaprojektowania i skonfigurowania układu sterowania tym urządzeniem. Zakres pracy obejmował: integrację stanowiska pomiarowego, identyfikację właściwości dynamicznych obiektu sterowania poprzez wyznaczenie charakterystyki skokowej dla procesu, sformułowanie modelu symulacyjnego układu sterowania, symulację komputerową w środowisku Matlab-Simulink.

Metodyka

Proces projektowania systemu sterowania wymagał zidentyfikowania obiektu regulacji pod względem jego właściwości dynamicznych. Na stanowisku badawczym przeprowadzono w tym celu eksperyment, pozwalający wyznaczyć charakterystykę skokową. Charakterystyka ta jest odpowiedzią obiektu na zmianę standardową wejściowej wielkości w postaci skoku. W oparciu o nią możliwe było opracowanie modelu obiektu [3]. Analiza przeprowadzona z wykorzystaniem modelu, dostarcza wielu istotnych informacji na temat projektowanego układu sterowania. Przez model rozumie się tu abstrakcyjny opis wybranych cech systemu, wyrażony przy użyciu narzędzi formalnych w postaci schematów blokowych lub formuł matematycznych [4]. Metodyka zakładająca cykl projektowy układu sterowania w oparciu o model z powodzeniem wykorzystywana jest m.in. w przemyśle lotniczym i motoryzacyjnym [5, 6, 7]. Po zdefiniowaniu modelu przeprowadzono jego identyfikację, tj. wyznaczono takie wartości parametrów, które zapewniły zgodność zachowania modelu z analizowanym obiektem. Identyfikację modelu przeprowadzono na drodze symulacji off-line. Jej wyniki porównano z rzeczywistymi danymi charakteryzującymi rozpatrywany obiekt, co pozwoliło dostroić model tak, by uzyskać oczekiwany rezultat. Na bazie poprawnie działającego modelu obiektu regulacji, sformułowano model zamkniętego układu sterowania. Symulacja umożliwiła również dobranie nastaw regulatora PID.

Charakterystyka obiektu regulacji

Obiekt regulacji stanowi piec indukcyjny do oznaczania topliwości popiołu z biopaliw stałych w wysokiej temperaturze metodą rurową. Jego widok ogólny przedstawiono na rysunku 1.

Istota działania urządzenia bazuje na wykorzystaniu zjawiska rezonansu elektrycznego i wysokoczęstotliwościowego grzania indukcyjnego. Piec wyposażony został w kilkuzwojowy wzbudnik (wykonany z przewodzącej prąd elektryczny rurki chłodzonej wodą w obiegu zamkniętym), który kumuluje energię pola elektromagnetycznego w przewodzącej (wymiennej) rurze grafitowej. W czasie procesu nagrzewania grafit wydzielą tlenek i dwutlenek węgla w odpowiednich proporcjach, gwarantując atmosferę neutralną we wnętrzu rury.

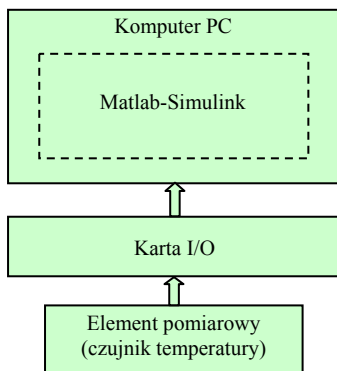
Urządzenie zasilane jest energią elektryczną prądu przemiennego 230 [V] o średnim poborze mocy [8].



Rys.1. Obiekt regulacji - piec indukcyjny do oznaczania topliwoci popiołu z biopaliw stałych

Określenie właściwości dynamicznych obiektu regulacji

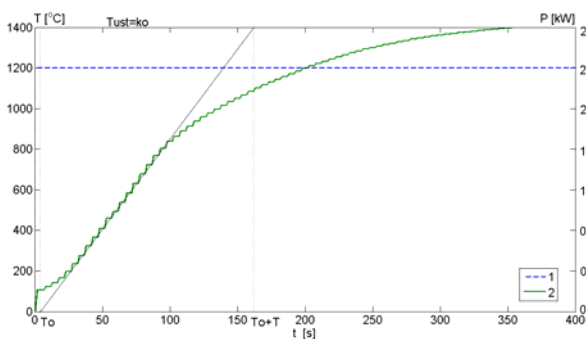
Schemat blokowy stanowiska badawczego do eksperymentalnej identyfikacji właściwości dynamicznych pieca indukcyjnego zilustrowano na rysunku 2.



Rys.2. Schemat blokowy stanowiska badawczego

Rysunek 2 przedstawia układ pomiarowy wykorzystujący środowisko MATLAB – Simulink z kartą I/O oraz elementem pomiarowym w postaci czujnika temperatury.

Na rysunku 3 zilustrowano sygnał wymuszenia i uzyskaną charakterystykę skokową dla obiektu sterowania.



Rys.3. Charakterystyka właściwości dynamicznych obiektu sterowania: 1 – wymuszenie skokowe, 2 – odpowiedź obiektu

Aby wyznaczyć eksperymentalnie charakterystykę skokową analizowanego obiektu wywołano wymuszenie skokowe poprzez skokowy wzrost mocy P . Wartość wyjściową obiektu (temperaturę spalania T) rejestrowano przy pomocy czujnika termoelektrycznego, dla którego

założono pomijalnie małą bezwładność cieplną. Przed wprowadzeniem wymuszenia, obiekt znajdował się w stanie ustalonym. Po wywołaniu skokowej zmiany wielkości wejściowej ($\Delta P = 2,5 \text{ kW}$), rejestrowano wzrost temperatury T do jej ustabilizowania się ($1400 \text{ }^\circ\text{C}$).

Model obiektu regulacji

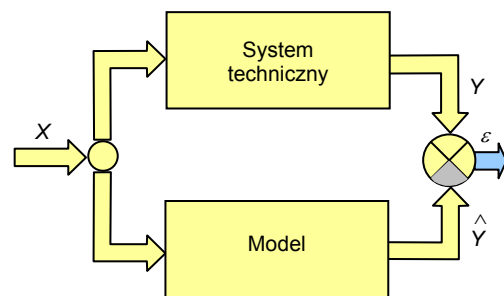
Na podstawie zarejestrowanej charakterystyki skokowej wyznaczono transmitancję operatorową $G(s)$ według zależności [3]:

$$(1) \quad G(s) = \frac{\Delta y m(s)}{\Delta x(s)} = k_{ob} \frac{1}{Ts + 1} e^{-T_0 s}$$

gdzie: k_{ob} – współczynnik wzmacnienia statycznego obiektu, T – stała czasowa, T_0 – opóźnienie transportowe.

Identyfikacja modelu obiektu regulacji

Dla modelu obiektu (w postaci transmitancji operatorowej) określono stopień niedoskonałości ε według schematu przedstawionego na rysunku 4 [4].



Rys.4. Schemat określenia stopnia niedoskonałości: X – sygnał sterujący (wymuszenie), Y – sygnał wyjściowy systemu, \hat{Y} – sygnał wyjściowy modelu

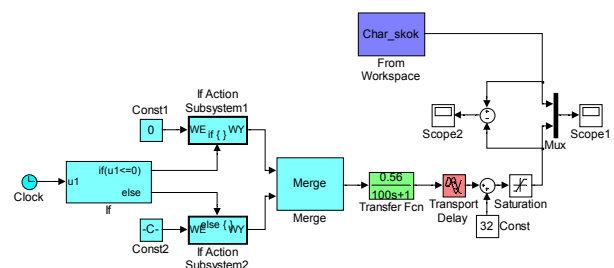
Stopień niedoskonałości ε należy rozumieć, jako różnicę pomiędzy sygnałami wyjściowymi rzeczywistego systemu technicznego i jego modelu

$$(2) \quad \varepsilon = Y - \hat{Y}$$

gdzie: Y – sygnał wyjściowy systemu, \hat{Y} – sygnał wyjściowy modelu.

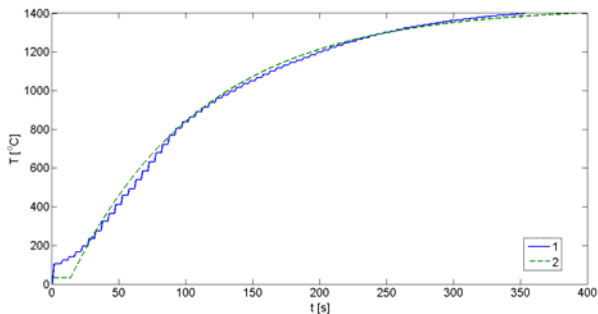
Symulacja komputerowa off-line strojenia modelu obiektu regulacji

Wartość ε zminimalizowano poprzez szereg symulacji podczas, których skorygowano parametry modelu. Badania symulacyjne prowadzono według schematu zilustrowanego na rysunku 5.



Rys.5. Schemat blokowy dostrojenia modelu

Symulację inicjowano wprowadzając wymuszenie skokowe na wejście bloków reprezentujących obiekt regulacji. Sygnał wymuszenia pozorowany przez instrukcję warunkową *If* kierowano na wejście bloków funkcjonalnych *Transfer Fcn* i *Transport Delay*, reprezentujących obiekt regulacji. Blok *From Workspace* służył wczytaniu z przestrzeni roboczej MATLAB-a do Simulink-a, przebiegu zdjętej podczas eksperymentu charakterystyki skokowej fizycznego obiektu. Blok *Mux* umożliwił wyświetlenie w oknie bloku *Scope* dwóch charakterystyk jednocześnie – dzięki temu możliwe jest porównanie charakterystyki rzeczywistej z przebiegiem obliczonym przez model. Stan wyjścia modelu zestawiono z wczytanym do przestrzeni roboczej Matlab-a przebiegiem charakterystyki dynamicznej rzeczywistego obiektu (rys.6).



Rys.6. Charakterystyki dynamiczne: 1 – obiektu rzeczywistego, 2 – modelu (transmitancji)

Jako miarę stopnia niedoskonałości zastosowano zależność ε_i

$$(3) \quad \varepsilon_i = \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m \left| \frac{Y - \hat{Y}}{Y} \right|$$

gdzie: Y – wartości rzeczywiste temperatury, \hat{Y} – wartości temperatury otrzymane z modelu, m – liczba danych.

Dla sygnałów zilustrowanych na rysunku 6 wartość średniego absolutnego błędu predykcji ε_i wyniosła 5,3 [%].

Na podstawie wartości błędu oraz analizy przebiegów przedstawionych na rysunku 6 należy stwierdzić, iż opracowany model opisuje działanie obiektu sterowania z wystarczającą dokładnością. Wynik dostrojenia modelu należy uznać za pozytywny. Ostateczną jego postać po dostrojeniu przedstawia zależność

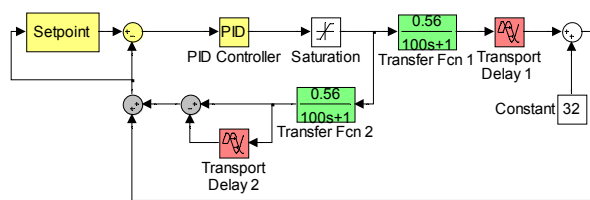
$$(4) \quad G(s) = 0,56 \frac{1}{100s + 1} e^{-14s}$$

Model układu regulacji

Na bazie sformułowanego modelu obiektu regulacji opracowano model systemu sterowania. Zastosowano adaptacyjny układ sterowania bazujący na strukturze predyktora Smitha. Układy tego typu stosuje się dla obiektów sterowania, w których występują znaczne opóźnienia. Schemat blokowy modelu zrealizowany w środowisku Matlab-Simulink zilustrowano na rysunku 7.

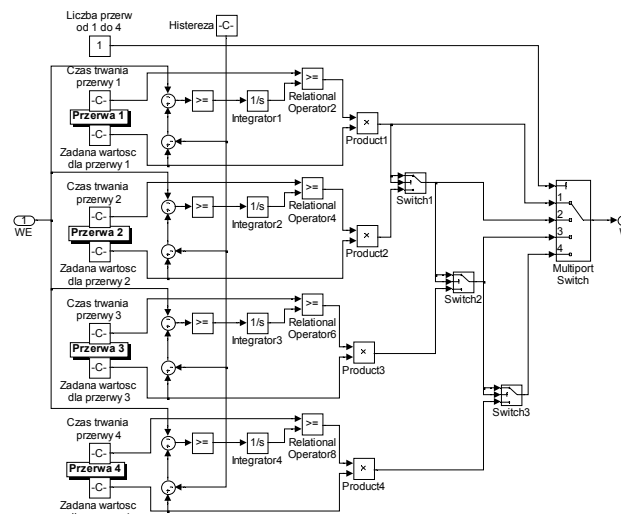
Znaczenie najważniejszych, przedstawionych na schemacie bloków funkcjonalnych jest następujące: subsystem *Setpoint* reprezentuje wartość zadaną temperatury, blok *PID Controller* przedstawia transmitancję regulatora, bloki *Transfer Fcn 1* i *Transport Delay 1*

reprezentują czynnik transmitancji obiektu i opóźnienie transportowe, zaś bloki *Transfer Fcn 2* i *Transport Delay 2* to estymaty transmitancji i opóźnienia transportowego użyte w predyktorze.



Rys.7. Schemat blokowy modelu symulacyjnego układu sterowania z predyktorem Smitha

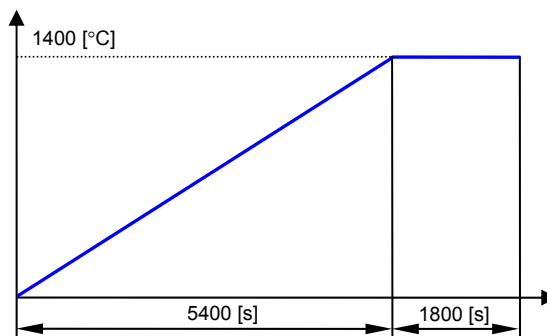
Wnętrze subsystemu *Setpoint* przedstawiono na rysunku 8.



Rys.8. Schemat blokowy subsystemu Setpoint

Symulacja komputerowa of-line modelu układu regulacji

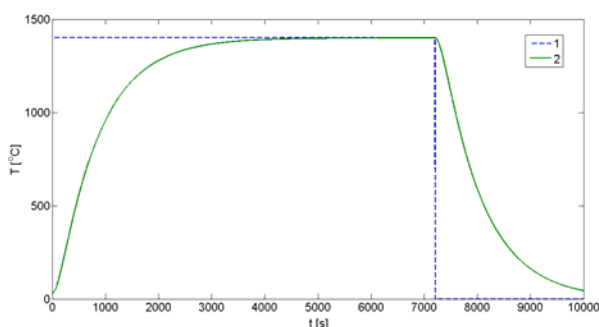
Poprawność działania modelu symulacyjnego układu regulacji zweryfikowano podczas symulacji of-line. Sygnał zadany temperatury wytworzono w subsystemie *Setpoint* w oparciu o wytyczne dokumentu normatywnego [2]. Zaprogramowany algorytm sterowania przewiduje uzyskanie zadanej temperatury 1400 [°C] po upływie 90 [min], a następnie utrzymanie jej wartości przez 30 [min] (rys.9).



Rys.9. Plan sterowania temperaturą

Nastawy regulatora PID umożliwiające realizację algorytmu dobrano podczas kolejnych eksperymentów

symulacyjnych. Czynności związane z ich doborem prowadzono wielokrotnie, aż do uzyskania oczekiwanego rezultatu. Wynik symulacji zilustrowano na rysunku 10.



Rys.10. Sygnały modelu: 1 – wejściowy (wartość zadana temperatury), 2 – wyjściowy (obliczona temperatura)

Analizując zilustrowane przebiegi można zaobserwować, iż wartość sygnału temperatury wytworzona przez model (linia 2) rośnie przez 5400 [s] do uzyskania zadanej wartości (linia 1). Następnie ustabilizowany przebieg temperatury utrzymuje się przez 1800 [s]. Po tym czasie sygnał wartości zadanej (linia 1) wymusza wyłączenie układu.

Analiza wyników

Opierając się na wynikach symulacji zilustrowanych na wykresie (rys.10) należy uznać, że algorytm regulatora PID przy dobranych podczas symulacji nastawach poprawnie wypracował oddziaływanie zwrotne na obiekt regulacji. Uzasadnione jest więc stwierdzenie, iż przyjęte założenia dla układu sterowania temperaturą w piecu indukcyjnym są poprawne i powinny zostać wykorzystane podczas symulacji sprzętowej on-line. Symulacja ta dostarczy ostatecznego potwierdzenia poprawności założeń projektowych oraz właściwego działania programu sterującego. Będzie mieć formę walidacji na stanowisku laboratoryjnym, gdzie do pętli sprzężenia zwrotnego wirtualnego układu sterowania włączone zostaną rzeczywiste elementy obiektu sterowania - przetwornik temperatury i falownik. Powstanie w ten sposób prototyp układu sterowania piecem indukcyjnym.

Wnioski

1. Charakterystyka skokowa, zdjęta dla pieca indukcyjnego do oznaczania topliwości popiołu z biopaliw stałych w wysokiej temperaturze metodą rurową, odzwierciedla obiekt proporcjonalny inercyjny.
2. Porównanie wytworzonej przez dostrojony model symulacyjny charakterystyki dynamicznej z charakterystyką rzeczywistą obiektu regulacji wskazuje, iż rozpatrywany model dostarcza informacji o działaniu obiektu sterowania z wystarczającą dokładnością.

3. Algorytm regulatora PID sterujący temperaturą w piecu indukcyjnym gwarantuje utrzymanie zadanej wartości.
5. Opracowany model symulacyjny umożliwi w przyszłości integrację stanowiska badawczego do symulacji sprzętowej on-line oraz budowę prototypu układu sterowania.
6. Przeprowadzone badania stanowią etap w rozwoju projektu układu sterowania piecem indukcyjnym.

LITERATURA

- [1] Kalembsa D., Ilość i skład chemiczny popiołu z biomasy roślin energetycznych. *Acta Agrophysica*, ISSN 1243-4125, (2006), nr 7(4), s. 909-914
- [2] PN-ISO 540:2001 Paliwa stałe, Oznaczanie topliwości popiołu w wysokiej temperaturze metodą rurową
- [3] Tarnowski W., Projektowanie układów regulacji automatycznej. Ciągłych z liniowymi korektorami ze wspomaganiami za pomocą Matlab'a. Wyd. Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, ISSN 0239-7129, (2008)
- [4] Tadeusiewicz R., Biocybernetyka. Metodyczne podstawy dla inżynierii biomedycznej. Wyd. Naukowe PWN, Warszawa, ISBN 978-83-01-17376-0, (2014)
- [5] Kurytnik I. P., Lis S., Drożdż T., Telega A., Metoda szybkiego prototypowania w opracowaniu algorytmu sterowania instalacją solarną. *Pomiary Automatyka Kontrola*, 5 (2014), 325-328
- [6] Mrozek B., Mrozek Z.: MATLAB i Simulink. Gliwice, Wyd. HELION, (2004)
- [7] Speedgoat., Real-Time Testing using Simulink: Continuous verification and validation. Materiały firmy. Pozyskano z: <http://www.speedgoat.ch/Applications.aspx>, (2014)
- [8] Gąsiorowski A., Posyłek Z., Drożdż T., Prototypowe stanowisko laboratoryjne do badania topliwości popiołu metodą rurową, *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, 1 (2015), 144-148

Autorzy: dr inż. Stanisław Lis, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, E-mail: Stanislaw.Lis@ur.krakow.pl; dr inż. Marcin Tomasik, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, E-mail: Marcin.Tomasik@ur.krakow.pl; dr inż. Krzysztof Nęcka, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, E-mail: Krzysztof.Necka@ur.krakow.pl; dr inż. Tomasz Drożdż, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, E-mail: Tomasz.Drozdz@office.urk.edu.pl; dr inż. Piotr Nawara, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, E-mail: rnawara@cyf-kr.edu.pl; dr inż. Paulina Wrona, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, E-mail: Paulina.Wrona@ur.krakow.pl;

Autorzy: dr inż. Maciej Oziębłowski i dr inż. Łukasz Bobak, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wydział Nauk o Żywności, ul. Chełmońskiego 37, 51-630 Wrocław, E-mail: Maciej.Oziembowski@up.wroc.pl;