Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki

Metoda optymalizacji systemu sterowania w funkcji niezawodności

Streszczenie. W artykule przedstawiono metodę analizy systemów sterowania realizowaną na etapie projektowania poprzez modelowanie i symulację komputerową. Należy podkreślić, że koszty związane z usunięciem ewentualnych błędów systemu na tym etapie są najniższe. Na wybranym przykładzie przedstawiono optymalizację algorytmu sterowania i jego nastaw w funkcji niezawodności wyrażającej się w odporności systemu na zakłócenia. W celu przeprowadzenia analizy zbudowano model fizyczny obiektu sterowania. Następnie zarejestrowano charakterystykę skokową obiektu. Na jej podstawie opracowano modele symulacyjne obiektu i układu sterowania, które stanowiły bazę do analizy poprzez symulację komputerową. Wyniki symulacji ostatecznie zweryfikowano na modelu fizycznego obiektu sterowania.

Abstract. The article presents a method of analysis of control systems carried out at the design stage through modeling and computer simulation. It should be emphasized that the costs associated with the removal of possible system errors at this stage are the lowest. The selected example shows the optimization of the control algorithm and its settings as a function of reliability expressed in the system's resistance to disturbances. In order to carry out the analysis, a physical model of the control object was built. Then, the jump characteristics of the object were recorded. On its basis, simulation models of the object and the control system were developed, which were the basis for analysis by computer simulation. The simulation results were finally verified on the physical control object model. (Optimization method of control taking into account reliability)

Słowa kluczowe: niezawodność; modelowanie; symulacja komputerowa, sterowanie automatyczne **Keywords**: reliability; modeling; computer simulation, automatic control

Wstęp

Cechy i własności produktu w procesie produkcji najczęściej zostają określone na etapie projektowania i wykonania prototypu. Koszty związane z usunięciem ewentualnych błędów na tym etapie są najniższe. Na etapie wdrażania produktu koszty wyeliminowania nieprawidłowości znacząco wzrastają. Wówczas wykrycie błędów związane jest nie tylko z nakładami czasu poniesionymi na przeprowadzenie analiz i testowania, ale również z nakładami wynikającymi ze zużytych zasobów, wykorzystanych narzędzi i urządzeń. W przypadku konieczności usunięcia błędów dopiero na etapie użytkowania produktu przez klienta producent narażony jest na poniesienie największych kosztów. Wówczas zależa one od rozmiarów produkcji seryjnej i obejmują obciążenia wynikające z: wycofania bądź zmiany projektu, utraconych możliwości (w stosunku do poprawnie działającego systemu), utraty dobrej opinii oraz potencjalnych transakcji i zamówień, a także wypłaty ewentualnych rekompensat [1]. skonfigurowany układ sterowania Właściwie jest niezbędnym warunkiem poprawnego funkcjonowania systemu technicznego. Współcześnie takie układy bazują na cyfrowych urządzeniach elektronicznych i są nierzadko częścią systemów krytycznych zapewniających ciągłość usług mających kluczowe znaczenie dla funkcjonowania społeczeństwa [2, 3]. Istnieje szereg udokumentowanych przypadków awarii systemów sterujących [4]. Jako jedną z najczęściej spotykanych przyczyn awarii jest m.in. brak odporności systemu na zakłócenia [2]. Stąd w niniejszym opracowaniu zaproponowano metodę analizy systemów sterowania realizowaną na etapie projektowania poprzez modelowanie i symulację komputerową. W ramach badań przeprowadzono optymalizację algorytmu sterowania i jego nastaw w funkcji niezawodności wyrażającej się w odporności systemu na zakłócenia. Przykład dotyczył arbitralnie wybranego, uproszczonego procesu analizowano sterowanie temperatura przy wykorzystaniu wymuszonego obiegu powietrza.

Metodyka

Analizę rozpoczęto od opracowania stanowiska badawczego z modelem fizycznym obiektu sterowania. Następnie wyznaczono charakterystykę dynamiczną obiektu. Na podstawie charakterystyki sformułowano model symulacyjny obiektu, który następnie dostrojono a jego zgodność z obiektem potwierdzono. Na bazie dostrojonego modelu obiektu powstał model symulacyjny systemu sterowania. Stanowił on podstawę dla symulacji komputerowej umożliwiającej dobór parametrów algorytmu sterowania i analizę wpływu sygnału zakłócającego na system. Stopień odporności na oddziaływanie zakłóceń potraktowano jako wyznacznik niezawodności układu sterowania. W toku symulacji wskazano algorytm najlepiej spełniający kryterium odporności na sygnał zakłócający. Końcowym etapem analizy był test wskazanego algorytmu sterowania z wykorzystaniem obiektu rzeczywistego (modelu fizycznego). W tym celu do pętli sprzężenia zwrotnego wirtualnego układu sterowania wprowadzono rzeczywiste elementy obiektu sterowania - pomiarowy i wykonawczy. Symulację i test wykonano z wykorzystaniem środowiska Matlab[®]-Simulink [5-8].

Stanowisko badawcze

Na stanowisku badawczym zgodnie z przyjętą metodyką określono właściwości dynamicznych obiektu i przeprowadzono test prototypu systemu sterowania. Schemat stanowiska zilustrowano na rysunku 1.



Rys.1. Schemat stanowiska badawczego

Schemat zawiera następujące elementy funkcjonalne: model fizyczny obiektu (1), element pomiarowy w obiekcie sterowania – czujnik temperatury PT-100 (2), wzmacniacz sygnału czujnika temperatury (3), element wykonawczy w obiekcie sterowania – wentylator (4), wzmacniacz SAVP 2240 sygnału sterującego (5), element grzewczy (6), zasilacz elektryczny 24 VDC (7), komputer rejestrujący (8), terminal zaciskowy PCLD – 8710 karty I/O komputera rejestrującego (9), komputer sterujący (10), terminal zaciskowy PCLD – 8710 karty I/O komputera sterującego (11). Widok ogólny stanowiska badawczego zilustrowano na rysunku 2.



Rys.2. Widok ogólny stanowiska badawczego

Podstawowym elementem stanowiska jest model fizyczny obiektu sterowania. Przyjął on kształt prostopadłościanu o wymiarach: wysokość 45 cm, szerokość 45 cm i długość 60 cm. Wykonany został z transparentnych płyt ze szkła akrylowego połączonych ze sobą aluminiowymi łącznikami. W celu obniżenia wpływu otoczenia, obiekt zaizolowano płytami styropianowymi. Wewnatrz zainstalowano czujnik temperatury połączony ze wzmacniaczem sygnału Wzmocniony sygnał z czujnika trafia na wejście terminali zaciskowych kart wejścia-wyjścia. W górnej części modelu fizycznego obiektu sterowania zainstalowano wentylator stanowiący element wykonawczy. Element ten załączano za pośrednictwem wzmacniacza svanału sterujacego SAVP 2240. W dolnej części modelu fizycznego umieszczono element grzewczy o mocy 400 W, który pełnił rolę członu zakłócającego (rys.1-2).

Identyfikacja obiektu sterowania

Wstępnym etapem opracowania modelu symulacyjnego obiektu sterowania była identyfikacja jego właściwości dynamicznych poprzez eksperymentalne wyznaczenie charakterystyki skokowej. Podczas eksperymentu wnętrze modelu fizycznego ogrzano do temperatury 63,5°C. Temperatura ta utrzymywała się na stałym poziomie – stan ustalony obiektu. Następnie wyznaczono charakterystykę ochładzania się obiektu poprzez uruchomienie wentylatora. Działanie wentylatora stanowiło wymuszenie skokowe. Reakcja obiektu na wymuszenie w postaci spadku temperatury, to charakterystyka skokowa. Do jej rejestracji wykorzystano układ pomiarowy przedstawiony w opisie stanowiska badawczego (rys.1).

Model obiektu sterowania i jego dostrojenie

Uzyskany przebieg charakterystyki stanowił bazę do opracowania transmitancyjnego modelu symulacyjnego obiektu sterowania G(s). Niezbędne wartość stałej czasowej T i opóźnienia transportowego T_o wstępnie odczytano z wykresu charakterystyki skokowej. Współczynnik wzmocnienia statycznego obiektu k_{ob} , obliczono jako stosunek zmiany sygnału wyjściowego Δy do zmiany sygnału wejściowego Δx [5].

Następie w celu wyznaczenia wartości parametrów modelu, które zapewniają jego zgodność z zachowaniem obiektu, niezbędne było jego dostrojenie. Dostrajanie modelu przeprowadzono w trakcie kolejnych symulacji komputerowych, podczas których korygowano parametry modelu tak aby uzyskać możliwie najlepszą zgodność z obiektem rzeczywistym [6]. Ostateczną postać modelu obiektu po dostrojeniu przedstawia zależność 1.

(1)
$$G(s) = 60,5 - 2,27\frac{1}{90s+1}$$

Indeks s w zależności (1) oznacza operator Laplace'a.

Ogólna koncepcja układu sterowania

Założenia dla systemu obejmują utrzymywanie wartości sterowanej na zadanym, stałym poziomie i odporność na czynnik zakłócający, która stanowi wskaźnik niezawodności systemu.

Analizie poddano podstawowy zamknięty układ sterowania. Jego strukturę przedstawiono w postaci schematu blokowego na rysunku 3.



Rys.3. Schemat blokowy układu sterowania

Aby w układzie utrzymać na zadanym poziomie sygnał wyjściowy y jego przebieg porównuje się w pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego z sygnałem wartości zadanej r kształtowanej według algorytmu bloku zadajnika. Różnica stanowiąca błąd regulacji e jest sygnałem wejściowym bloku regulatora. Na jej podstawie według algorytmu tego bloku obliczane jest oddziaływanie zwrotne u na obiekt sterowania, który reprezentowany jest przez bloki transmitancja operatorowa i opóźnienie transportowe. Na schemacie w pętli sterowania znajduje się również dodatkowy blok, nie będący częścią struktury układu – jest to generator sygnału zakłócającego. Blok ten symuluje oddziaływanie zakłócające. Jego obecność podczas badań symulacyjnych umożliwia analizę wpływu sygnału zakłócającego na jakość sterowania.



Rys.4. Schemat blokowy regulatora PID



Rys.5. Schemat blokowy regulatora I-PD



Rys.6. Schemat blokowy interakcyjnego regulator PID

Blok funkcjonalny *regulator* reprezentuje algorytmy regulatorów, które testowano pod kątem odporności na zakłócenia. Analizowano sterowanie z wykorzystaniem następujących regulatorów: PID, I-PD oraz interakcyjnego PID [3, 9, 10]. Schematy blokowe rzeczonych regulatorów przedstawiono na rysunkach 4-6.

Na schematach występują następujące oznaczenia: k_{ρ} – wzmocnienie proporcjonalne, T_i – czas całkowania (zdwojenia), T_d – czas różniczkowania (wyprzedzenia), β – określa rodzaj sygnału podawanego na wejście członu proporcjonalnego. Pozostałe symbole omówiono w opisie rysunku 3.

Model układu sterowania

Na bazie modelu obiektu sterowania (zależność 1) powstał model symulacyjny układu sterowania. Stanowił on bazę dla symulacji komputerowej umożliwiającej dobór nastaw, dobór algorytmu sterowania i optymalizację systemu w aspekcie zwiększonej odporności na zakłócenia w procesie. W środowisku Matlab-Simulink zaimplementowano 3 wersje układu sterowania – w konfiguracjach z regulatorami: PID, I-PD oraz interakcyjnym PID (rys.7). Najważniejsze symbole występujące na schemacie omówiono w opisach rysunków 3-6.



Rys.7. Schemat blokowy zintegrowanych modeli symulacyjnych układów sterowania z regulatorami PID, I-PD oraz interakcyjnym PID

Analiza niezawodności układu sterowania

Istotą badań symulacyjnych przeprowadzonych w oparciu o model przedstawiony na rysunku 7 było wskazanie regulatora optymalnego pod względem zapewnienia odporności układu sterowania na sygnał zakłócający. Rozpatrywano proces obniżenia temperatury z 60,5 °C do 45 °C i utrzymania jej na tym poziomie. Jako kryteria oceny zastosowano całkowe wskaźniki jakości *WJS1* i *WJS2*. Gdzie *WJS1* to całka z wartości bezwzględnej błędu regulacji (2), natomiast *WJS2* to całka z wartości bezwzględnej pochodnej sygnału sterującego (3) [11, 12, 13, 14].

(2)
$$WJS \ 1 = \int_{tp}^{t_f} |e| dt$$

(3)
$$WJS \ 2 = \int_{t}^{t_{f}} \left| \frac{du}{dt} \right| dt$$

gdzie: e – uchyb w układzie $\frac{du}{dt}$ sterowania, – pochodna sygnału sterującego, t – $\frac{du}{dt}$ czas, t_p – początek interwału czasowego sterowania, t_f – koniec interwału czasowego sterowania.

WJS2 dostarcza informacji na temat dynamiki sygnału sterującego, natomiast wartość wskaźnik *WJS1* informuje o jakości sterowania, im wartość ta jest niższa tym jakość sterowania jest lepsza.

Wstępnie analizie poddano działanie układu (rys.7) bez zakłóceń. Stwierdzono, iż algorytmy regulatorów PID i PID interakcyjnego podczas symulacji komputerowej dla warunków idealnych (bez zakłóceń) zapewniają zbliżoną jakość sterowania. Ich przebiegi nie odbiegały od sygnału wartości zadanej, przy czym dla systemu z interakcyjnym regulatorem PID zarejestrowano nieznacznie lepszą wartość wskaźnika *WSJ1* (686,9 wobec 725). System z regulatorem I-PD okazał się znacznie gorszy od dwóch poprzednich. Wartość zadaną osiągnął z dużym opóźnieniem. Wskaźnik *WSJ1* wynosił 6828.

W dalszej kolejności analizowano proces sterowania z uwzględnieniem sygnału zakłócającego o przebiegu losowym, częstotliwości 2 [mHz] i amplitudzie 5 % maksymalnej wartości sygnału zadanego. Wyniki symulacji dla zamodelowanego systemu (rys.7) poddanego oddziaływaniu sygnału zakłócającego przedstawiono na rys. 8. Wartości wskaźników WSJ1 i WSJ2 przedstawiono w tabeli 1.



Rys.8. Wyniki symulacji sterowania w obecności losowego sygnału zakłócającego o maksymalnej amplitudzie 5%: 1 – wartość zadana temperatury, 2 – sygnał wyjściowy układu sterowania z regulatorem PID, 3 – sygnał wyjściowy układu sterowania z regulatorem I-PD, 4 – sygnał wyjściowy układu sterowania z regulatorem PID interakcyjnym

Tabela 1. Wartości całkowych wskaźników jakości sterowania dla sygnału zakłócającego o amplitudzie 5%

,	J 1(J	-	
	Regulator Wskaźnik	PID	I-PD	PID interakcyjny
	WJS1	5073	8771	5356
	WJS2	5010	4.198·10 ⁴	$1.028 \cdot 10^4$

Analizując wyniki symulacji dla procesu w obecności sygnału zakłócającego (rys.8 i tab.1) należy stwierdzić, że najwyższą (najgorszą) wartość przyjął wskaźnik WSJ1 dla regulatora I-PD. Jest to wynikiem tego, że system z tym regulatorem z dużym opóźnieniem zbliża sie do wartości zadanej a w dalszej kolejności nie utrzymuje jej precyzyjnie (krzywa nr 3 na rys.8). Znacznie lepszy wynik osiągnięto w przypadku interakcyjnego regulatora PID (krzywa nr 4 na rys.8). Wartość wskaźnika WJS1 jest tu niższa niż w przypadku regulatora I-PD. Najlepszy rezultat (najniższa wartość WJS1) podczas tej analizy uzyskano dla regulatora PID (krzywa nr 2 na rys.8). Przebieg krzywych nr 2 i 4 (rys.8) reprezentujących systemy z regulatorami, klasycznym PID i interakcyjnym są zbliżone co oznacza podobną jakość sterowania.

Reasumując, na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych należy stwierdzić, iż wyłączając regulator I-PD algorytmy dwóch pozostałych regulatorów zapewniają zbliżoną, akceptowalną jakość sterowania w warunkach idealnych i w obecności sygnału zakłócającego. W związku z powyższym do dalszych badań na obiekcie rzeczywistym należy zaproponować bardziej rozpowszechniony regulator PID.

Weryfikacja poprawności sterowania z wykorzystaniem obiektu rzeczywistego

Ostatecznym potwierdzeniem poprawności wniosków sformułowanych na podstawie symulacji komputerowej jest analiza procesu sterowania z wykorzystaniem obiektu rzeczywistego. Aby ją przeprowadzić zapisany w środowisku Matlab-Simlulink model układu sterowania z regulatorem PID przekształcono do postaci umożliwiającej komunikację z obiektem sterowania. W tym celu dwa bloki funkcjonalne schematu reprezentujące model obiektu zstąpiono blokami wejścia (Analog Input) i wyjścia (Analog Output) analogowego. Dodano także blok skalowania sygnału wejściowego. W ten sposób powstał system komunikujący się za pośrednictwem karty I/O z rzeczywistym obiektem sterowania (rys.9). Komunikacja realizowana była przez człony pomiarowy i wykonawczy.



Rys.9. Schemat blokowy systemu w analizie procesu sterowania z wykorzystaniem obiektu rzeczywistego

W oparciu o tak powstały system przeprowadzono szereg eksperymentów trwających około 13 [min], parametry procesu sterowania zarejestrowano (rys. 10).



Rys.10. Wyniki badań z wykorzystaniem obiektu rzeczywistego - temperatura w obiekcie

Analizując przedstawiony na wykresie przebieg sygnału należy stwierdzić, iż opracowany układ sterowania działa poprawnie. Układ sterowania z regulatorem PID, którego sygnał wyjściowy reprezentuje przedstawiona krzywa utrzymuje temperaturę na zadanym poziomie.

Wnioski

1. Przeprowadzona analiza wykazała, że zaproponowana metodyka prac koncepcyjnych umożliwia rozwój projektu układu sterowania w oparciu o modele obiektu i systemu.

2. W trakcie doboru i strojenia algorytmu sterowania według zaproponowanej metody możliwe jest uwzględnienie niezawodności systemu rozumianej jako odporność na zakłócenia.

3. Sprawdzenie podczas symulacji komputerowej niezawodności systemu sterowania poprzez poddanie go testom w obecności sygnału zakłócającego pozwala

założyć, że w sytuacji wystąpienia stanów awaryjnych, docelowy fizyczny system działający w czasie rzeczywistym zachowa się poprawnie i utrzyma sterowaną wartość na zadanym poziomie.

Autorzy: dr inż. Stanisław Lis, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Inżynierii Bioprocesów, Energetyki i Automatyzacji, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, e-mail: stanislaw.lis@urk.edu.pl; dr inż. Marcin Tomasik, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Inżynierii Bioprocesów, Energetyki i Automatyzacji, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, e-mail: marcin.tomasik@urk.edu.pl; prof. dr hab. inż. Henryk Juszka, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Inżynierii Bioprocesów, Energetyki i Automatyzacji, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, e-mail: henryk.juszka@urk.edu.pl.

LITERATURA

- Skotnicka-Zasadzień B. Doskonalenie procesu produkcyjnego w przedsiębiorstwie przemysłowym z zastosowaniem metod projektowania jakości, (2020); http://www.ptzp.org.pl/files/konferencje/kzz/artyk_pdf_2013/p09 2.pdf.
- [2] Kröger W. Der Umgang mit systemischen Risiken Das Angebot des International Risk Governance Council, Präsentation in der Vortragsreihe "Umgang mit gesellschaftsrelevanten Risiken", ETH Zürich (2005); http://www.lsa.ethz.ch/news/050413-Vortragsreihe-ETH-Handout.pdf.
- [3] Skruch P, Długosz M, Mitkowski W. Mathematical methods for verification of microprocessor-based PID controllers for improving their reliability. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability (2015); 17(3): 327–333.
- [4] Sauser B J, Reilly R R, Shenhar A J. Why projects fail? How contingency theory can provide new insights – A comparative analysis of NASA's Mars Climate Orbiter loss. International Journal of Project Management (2009); 27: 665–679.
- [5] Tarnowski W., Projektowanie układów regulacji automatycznej. Ciągłych z liniowymi korektorami ze wspomaganiem za pomocą Matlab'a. Wyd. Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, ISSN 0239-7129 (2008).
- [6] Tadeusiewicz R. Biocybernetyka. Metodyczne podstawy dla inżynierii biomedycznej. Wyd. Naukowe PWN, Warszawa (2014), ISBN 978-83-01-17376-0.
- [7] Knaga J, Lis S, Kurpaska S, Łyszczarz P, Tomasik M. Optimisation of Energy Use in Bioethanol Production Using a Control Algorithm. Processys, 9, 282 (2021). https://doi.org/10.3390/pr9020282.
- [8] Klempka R., Stankiewicz A., Modelowanie i symulacja układów dynamicznych. Wyd. AGH, Kraków, ISBN 83-7464-060-X (2006).
- [9] Gruk W, Habecki S, Piotrowski R. Implementacja niekonwencjonalnych regulatorów PID w sterowniku programowalnym. Pomiary Automatyka Robotyka (2017); 21, 1: 31–39.
- [10] Rajinikanth V, Latha K. Setpoint weighted PID controller tuning for unstable system using heuristic algorithm, Archives of Control Sciences (2012); 4: 481–505.
- [11] Kaliczyńska Małgorzata, Lis Stanisław, Tomasik Marcin [i in.], W: Recent Advances in Systems, Control and Information Technology. Proceedings of the International Conference SCIT 2016, Szewczyk Roman, Kaliczyńska Małgorzata (red.), Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer, ISBN 978-3-319-48922-3, (2017), 543, 211-219.
 [12] Śmierciak P., Ziółkowski E., Comparison of Energy
- [12] Śmierciak P., Ziółkowski E., Comparison of Energy Consumption in the Classical (PID) and Fuzzy Control of Foundry Resistance Furnace. Archives of foundry engineering, ISSN 1897-3310, 3 (2012), vol. 12, s. 129-132.
- [13] Śmierciak P., Ziółkowski E., Kryteria optymalizacji w systemach sterowania rozmytego piecami odlewniczymi. Archives of foundry engineering, ISSN 1897-3310, 2 (2014), vol. 14, s. 95-100.
- [14] Śmierciak P., Ziółkowski E., Wpływ wybranych parametrów zakłóceń na jakość klasycznego i rozmytego sterowania piecem oporowym. Archives of foundry engineering, ISSN 1897-3310, 4 (2014), vol. 14, s. 123-126.