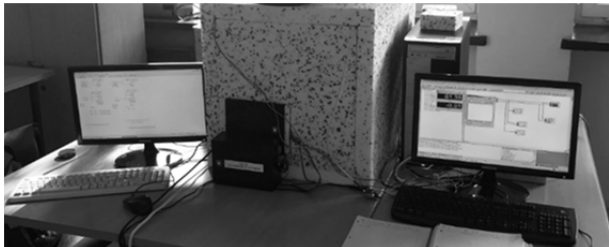


sygnału czujnika temperatury (3), element wykonawczy w obiekcie sterowania – wentylator (4), wzmacniacz SAVP 2240 sygnału sterującego (5), element grzewczy (6), zasilacz elektryczny 24 VDC (7), komputer rejestrujący (8), terminal zaciskowy PCLD – 8710 karty I/O komputera rejestrującego (9), komputer 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 zainstalowano na płytach styropianowych. Wewnątrz 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 sygnału sterującego 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 wartości 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].

Następnie 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.

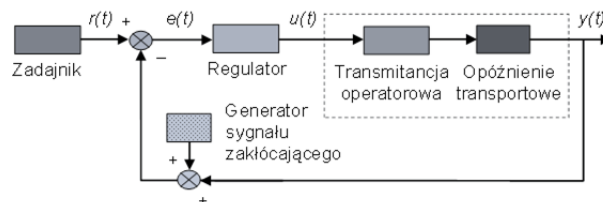
$$(1) \quad G(s) = 60,5 - 2,27 \frac{1}{90s+1}$$

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

Ogólna koncepcja układu sterowania

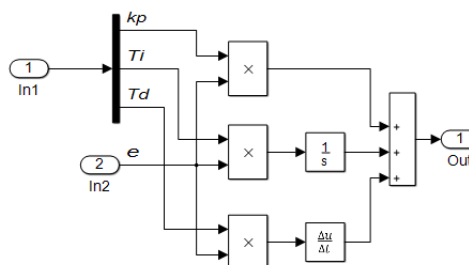
Założenia dla systemu obejmują utrzymywanie wartości sterowanej na zadanym, stałym poziomie i odporność na czynnik zakłócający, która stanowi wskaźnik niezawodności systemu.

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

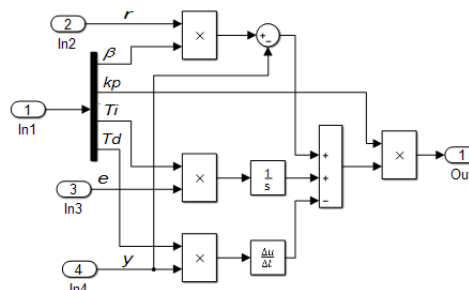


Rys.3. Schemat blokowy układu sterowania

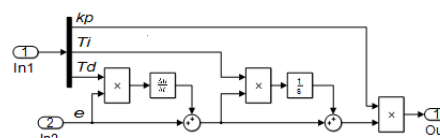
Aby w układzie utrzymać na zadanym poziomie sygnał wyjściowy y jego przebieg porównuje się w pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego z sygnałem wartości zadanej r kształtowanej według algorytmu bloku *zadajnika*. Różnica stanowiąca błąd regulacji e jest sygnałem wejściowym bloku *regulatora*. Na jej podstawie 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 umożliwi analizę wpływu sygnału zakłócającego na jakość sterowania.



Rys.4. Schemat blokowy regulatora PID



Rys.5. Schemat blokowy regulatora I-PD



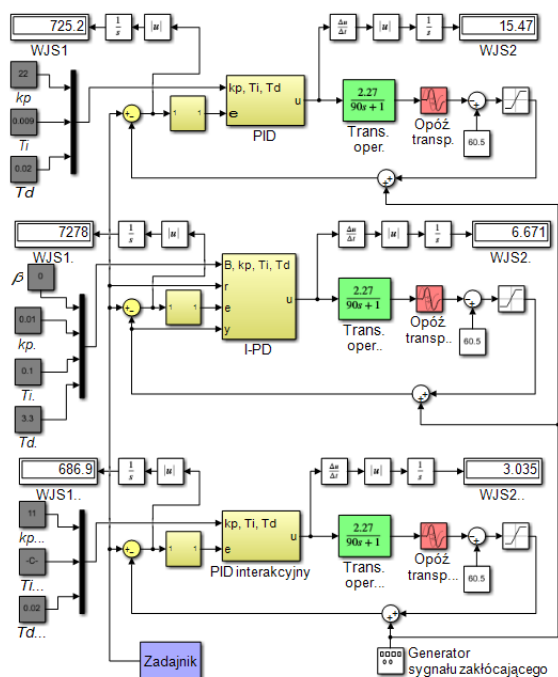
Rys.6. Schemat blokowy interakcyjnego regulatora PID

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_p – wzmacnienie proporcjonalne, T_i – czas całkowania (zdwojenia), T_d – czas różniczkowania (wyrzedzenia), 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 całkowite wskaźniki jakości $WJS1$ i $WJS2$. Gdzie $WJS1$ to całka z wartości bezwzględnej błędnej regulacji (2), natomiast $WJS2$ to całka z wartości bezwzględnej pochodnej sygnału sterującego (3) [11, 12, 13, 14].

$$(2) \quad WJS1 = \int_{t_p}^{t_f} |e| dt$$

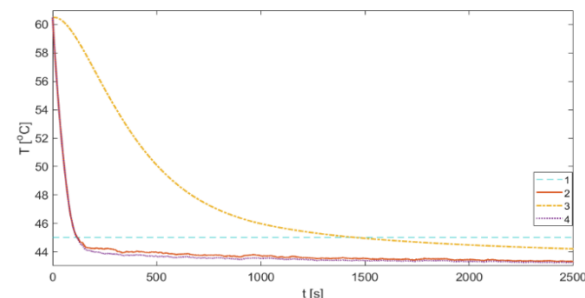
$$(3) \quad WJS2 = \int_{t_p}^{t_f} \left| \frac{du}{dt} \right| dt$$

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

$WJS2$ dostarcza informacji na temat dynamiki sygnału sterującego, natomiast wartość wskaźnika $WJS1$ 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 $WJS1$ (686,9 wobec 725). System z regulatorem I-PD okazał się znacznie gorszy od dwóch poprzednich. Wartość zadaną osiągnął z dużym opóźnieniem. Wskaźnik $WJS1$ wynosił 6828.

W dalszej kolejności analizowano proces sterowania z uwzględnieniem sygnału zakłócającego o przebiegu losowym, częstotliwości 2 [mHz] i amplitudzie 5 % maksymalnej wartości sygnału zadanej. Wyniki symulacji dla zamodelowanego systemu (rys.7) poddanego oddziaływaniu sygnału zakłócającego przedstawiono na rys. 8. Wartości wskaźników $WJS1$ i $WJS2$ 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 całkowitych wskaźników jakości sterowania dla sygnału zakłócającego o amplitudzie 5%

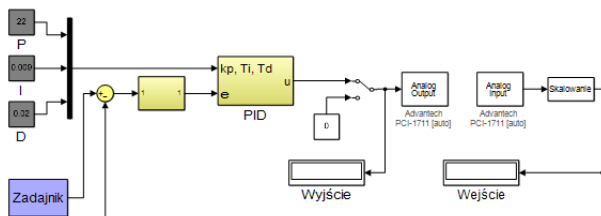
Regulator / Wskaźnik	PID	I-PD	PID interakcyjny
WJS1	5073	8771	5356
WJS2	5010	$4,198 \cdot 10^4$	$1,028 \cdot 10^4$

Analizując wyniki symulacji dla procesu w obecności sygnału zakłócającego (rys.8 i tab.1) należy stwierdzić, że najwyższą (najgorszą) wartość przyjął wskaźnik $WJS1$ dla regulatora I-PD. Jest to wynikiem tego, że system z tym regulatorem z dużym opóźnieniem zbliża się 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.

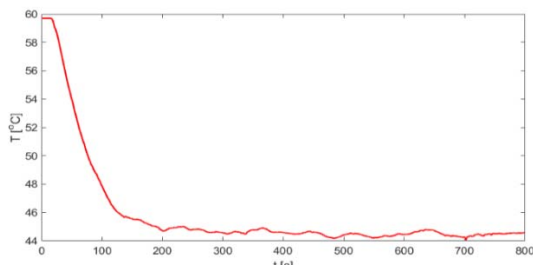
Weryfikacja poprawności sterowania z wykorzystaniem obiektu rzeczywistego

Ostatecznym potwierdzeniem poprawności wniosków sformułowanych na podstawie symulacji komputerowej jest analiza procesu sterowania z wykorzystaniem obiektu rzeczywistego. Aby ją przeprowadzić zapisany w środowisku Matlab-Simulink model układu sterowania z regulatorem PID przekształcono do postaci umożliwiającej komunikację z obiektem sterowania. W tym celu dwa bloki funkcjonalne schematu reprezentujące model obiektu zastąpiono 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

złożyć, 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 Bioprocusów, Energetyki i Automatykacji, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, e-mail: stanislaw.lis@urk.edu.pl; dr inż. Marcin Tomasiak, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Inżynierii Bioprocusów, Energetyki i Automatykacji, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, e-mail: marcin.tomasiak@urk.edu.pl; prof. dr hab. inż. Henryk Juszka, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Inżynierii Bioprocusów, Energetyki i Automatykacji, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, e-mail: henryk.juszka@urk.edu.pl.

LITERATURA

- [1] 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/p092.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] Skrucich 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 wspomaganiami 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, Tomasiak 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, Tomasiak 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 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.