

Ocena układu sterowania temperaturą z wykorzystaniem zespołu chłodzącego z modułem Peltiera

Streszczenie. Analizie poddano proces sterowania temperaturą z wykorzystaniem zespołu chłodzącego z modułem Peltiera. Badano jakość sygnału sterującego w idealnych warunkach i pod wpływem czynnika zakłócającego. Testy przeprowadzono z wykorzystaniem algorytmów regulatorów: dwustawnego, szeregowego PID i równoległego PID. Aby zrealizować postawiony cel opracowano układ doświadczalny. W oparciu o zarejestrowane na nim charakterystyki zamodelowano obiekt i układ sterowania. Przeprowadzono symulacje komputerowe a ich wyniki przedstawiono w postaci wykresów i tabel. Analizę przeprowadzono dla etapu prototypowania.

Abstract. The temperature control process using a cooling micro-unit equipped with a Peltier module was analyzed. In this process, the quality of the control signal was analyzed under ideal conditions and under the influence of a disturbing factor. The tests were carried out using the following controller algorithms: two-state, serial PID and parallel PID. In order to achieve the set goal, an experimental system was developed. Based on the characteristics recorded on it, the object and the control system were modeled. Computer simulations were carried out and their results were presented in the form of graphs and tables. The analysis was carried out for the prototyping stage. (Evaluation of the temperature control system using a cooling unit with a Peltier module)

Słowa kluczowe: sterowanie, moduł Peltiera, modelowanie komputerowe, symulacja komputerowa.

Keywords: control, Peltier module, computer modeling, computer simulation.

Wprowadzenie

Procesy chłodzenia są powszechnie wykorzystywane w życiu codziennym. Umożliwiają klimatyzację pomieszczeń, przechowywanie żywności, transport szczepionek i leków. Dominującym rozwiązaniem technicznym w systemach chłodniczych jest technologia sprężania pary [1]. Jednak w obliczu kryzysu energetycznego, potrzeby oszczędzania energii oraz konieczności ograniczenia szkodliwego wpływu na środowisko czynników chłodniczych, poszukiwane są alternatywne metody chłodzenia [2]. Wśród nich analizowane są rozwiązania techniczne wykorzystujące zjawisko termoelektryczne. Systemy chłodzenia/ogrzewania termoelektrycznego posiadają wiele zalet w stosunku do tradycyjnych rozwiązań technicznych [3]. Wśród nich można wymienić: brak płynów roboczych, cichą pracę, brak ruchomych części, niską emisję gazów cieplarnianych, małe rozmiary i niewielką masę, wysoką niezawodność, łatwość przełączania między trybami chłodzenia i ogrzewania oraz niskie koszty konserwacji. Obecnie praktyczne zastosowanie chłodzenia termoelektrycznego koncentruje się na jego wykorzystaniu w systemach klimatyzacji budynków i pojazdów, schładzania urządzeń elektronicznych i regulacji temperatury odzieży. Systemy te stosowane są także w medycynie, można tu wymienić chirurgię gałek ocznych, zamrażanie tkanek oraz chłodzenie preparatów biologicznych podczas ich przechowywania i transportu [4].

W procesie produkcji, cechy i właściwości produktu są najczęściej ustalane na etapie projektowania i wykonania prototypu, co pozwala na minimalizację kosztów związanych z ewentualnymi błędami. Wraz z wdrażaniem produktu, koszty eliminacji nieprawidłowości znacząco rosną. Jeśli wady zostaną wykryte dopiero na etapie użytkowania produktu przez klienta, producent narażony jest na poniesienie wyższych kosztów. W takim przypadku zależą one od wielkości produkcji seryjnej i obejmują wycofanie lub zmianę projektu, utratę reputacji a także potencjalnych transakcji i zamówień. Dodatkowo, może być konieczne wypłacenie rekompensat klientom [5].

Ze względu na powyższe istotne jest ograniczenie ryzyka wystąpienia awarii poprzez wdrożenie procedur testowania umożliwiających skuteczne wykrycie i usunięcie błędów we wstępnej fazie powstawania produktu, jeszcze na etapie projektowania.

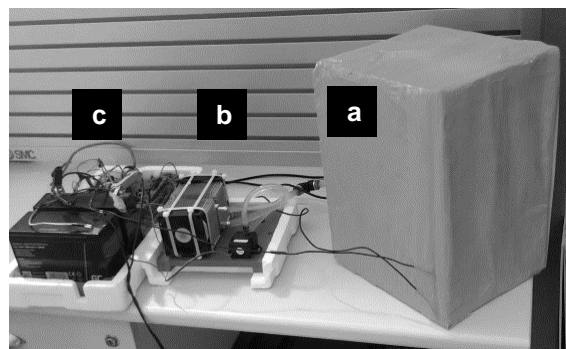
Stąd w niniejszym opracowaniu zaproponowano metodę analizy systemu sterowania realizowaną na etapie projektowania z wykorzystaniem modelowania i symulacji komputerowej. Założono możliwość optymalizacji algorytmu sterowania i jego nastaw w funkcji niezawodności wyrażającej się odpornością systemu na zakłócenia [6].

Metodyka

Badaniami objęto proces sterowania temperaturą z użyciem zespołu chłodzącego z modułem Peltiera. Aby zrealizować postawiony cel opracowano układ doświadczalny z komorą chłodzenia stanowiącą obiekt sterowania. Dla komory zarejestrowano charakterystykę skokową, która pozwoliła sformułować model transmitancyjny obiektu sterowania [7–10]. W oparciu o tę zależność w środowisku Matlab®-Simulink opracowano model symulacyjny układu sterowania. Model ten umożliwił przeprowadzenie symulacji komputerowych, podczas których badano wpływ wybranych regulatorów na jakość sterowania [11,12]. Analizowano jakość sygnału sterującego w warunkach idealnych i przy oddziaływaniu czynnika zakłócającego [6,13,14]. Wyniki badań przedstawiono w postaci wykresów i tabel.

Stanowisko badawcze

Podstawowym elementem układu doświadczalnego była komora chłodzenia (rys.1a).



Rys.1. Widok ogólny układu doświadczalnego

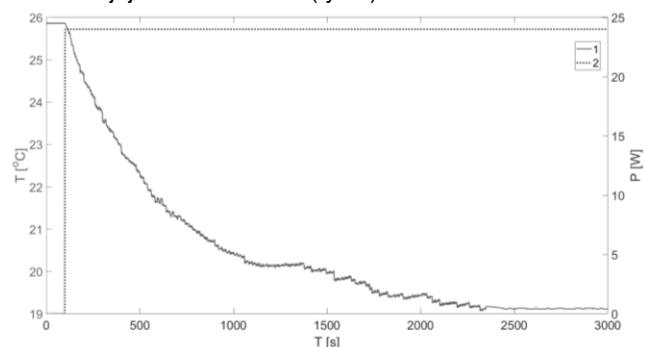
Wewnątrz niej zainstalowano przewody chłodnicze, które zapewniały wymuszony przez pompę obieg cieczy

chłodzącej. Ciepło z komory chłodzenia kierowane było do wodnego wymiennika ciepła. Do jego obu dłuższych ścian przylegały ogniwa Peltiera. Za ich pośrednictwem poprzez powietrzne wymienniki ciepła z wentylatorami, ciepło odprowadzono do otoczenia (rys.1b).

Za przebieg procesu chłodzenia odpowiadał układ bazujący na sterowniku sprzętowym w postaci mikrokontrolera AVR (rys.1c). Na jego wejście wprowadzono sygnał ze znajdującego się wewnątrz komory chłodzenia czujnika PT100. Wyjściowy sygnał sterujący kierowany był do ogniwa Peltiera w układzie chłodzenia (rys.1b).

Model obiektu sterowania

Na stanowisku badawczym (rys.1) zidentyfikowano właściwości dynamiczne obiektu sterowania poprzez wyznaczenie charakterystyki skokowej. W tym celu wymuszono skokowy wzrost mocy $\Delta P = 24$ [W] dostarczonej do układu chłodzenia. W efekcie czego w komorze chłodzącej zaobserwowano obniżenie temperatury z $25,87^{\circ}\text{C}$ do $19,13^{\circ}\text{C}$. Przebieg temperatury rejestrowano do czasu jej ustabilizowania (rys.2).



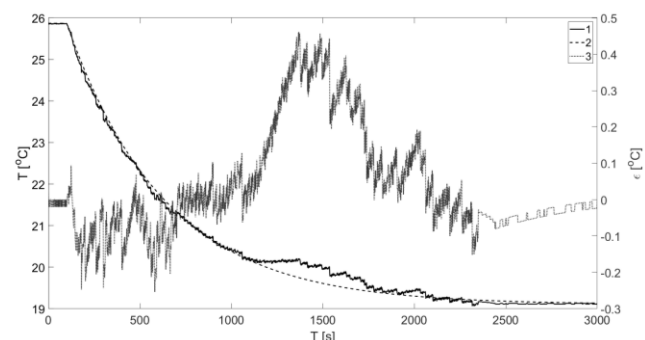
Rys.2. Identyfikacja właściwości dynamicznych obiektu: 1 – Charakterystyka skokowa obiektu, 2 – wymuszenie

Na podstawie zarejestrowanej charakterystyki dynamicznej sformułowano transmitancyjny model obiektu sterowania (inercyjny pierwszego rzędu) [7,8,10]. Wyraża go zależność:

$$(1) \quad G(s) = 0,282 \frac{1}{540s + 1}$$

gdzie: $G(s)$ – transmitancja operatorowa, s – operator Laplace'a.

Charakterystyki dynamiczne obiektu, rzeczywistą i obliczaną przez model zilustrowano na rys.3.



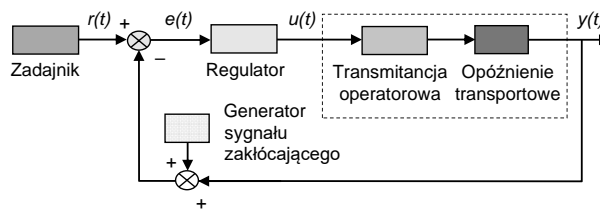
Rys.3. Właściwości dynamiczne obiektu sterowania: 1 – odpowiedź obiektu rzeczywistego na wymuszenie, 2 – odpowiedź modelu obiektu na symulowane wymuszenie, 3 – przebieg błędu dopasowania

Niedokładność odwzorowania obiektu rzeczywistego przez model rozumiana jako różnica pomiędzy sygnałami wyjściowymi, obiektu (krzywa nr 1 na rys.3) i modelu

(krzywa nr 2 na rys.3) mieści się w przedziale pomiędzy -0,25 i 0,46.

Model układu sterowania

Z wykorzystaniem zależności (1) opisującej obiekt sterowania opracowano model symulacyjny układu sterowania. Jego schemat blokowy zilustrowano na rysunku 4.

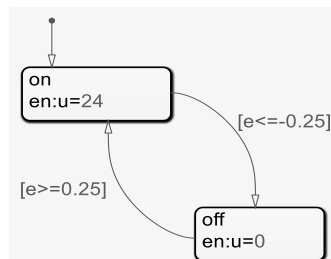


Rys.4. Schemat blokowy modelu symulacyjnego układu sterowania

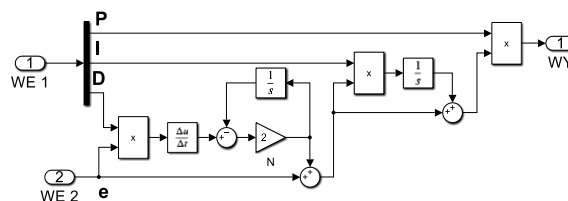
Znaczenie przedstawionych na schemacie bloków funkcjonalnych i symboli jest następujące: *zadajnik* – blok wartości zadanej, *regulator* – blok reprezentujący algorytmy regulatorów, które w pracy analizowano, *transmitancja operatorowa i opóźnienie transportowe* – reprezentują model obiektu sterowania, $r(t)$ – sygnał wartości zadanej, $e(t)$ – błąd regulacji, $u(t)$ – sygnał sterujący, $y(t)$ – sygnał wyjściowy modelu obiektu. 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 (szum pomiarowy). Jego obecność podczas badań symulacyjnych umożliwia analizę wpływu sygnału zakłócającego na jakość sterowania.

Algorytmy regulatorów

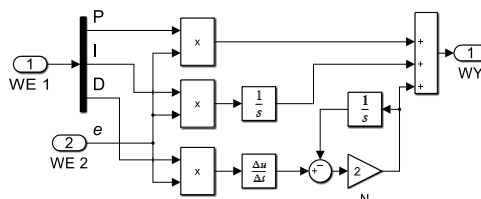
Analizie poddano proces sterowania z wykorzystaniem trzech regulatorów – dwustawnego, szeregowego PID i równoległego PID (rys.5-7).



Rys.5. Schemat typu stateflow regulatora dwustawnego



Rys.6. Schemat blokowy regulatora szeregowego PID



Rys.7. Schemat blokowy regulatora równoległego PID

Znaczenie symboli przedstawionych na schematach jest następujące: e – błąd regulacji, P – wzmacnienie

proporcjonalne, I – wzmacnienie całkujące, D – wzmacnienie różniczkujące, 1/s – operacja całkowania, $\Delta u/\Delta t$ – operacja różniczkowania, N – współczynnik filtra dolnoprzepustowego w torze pochodnej.

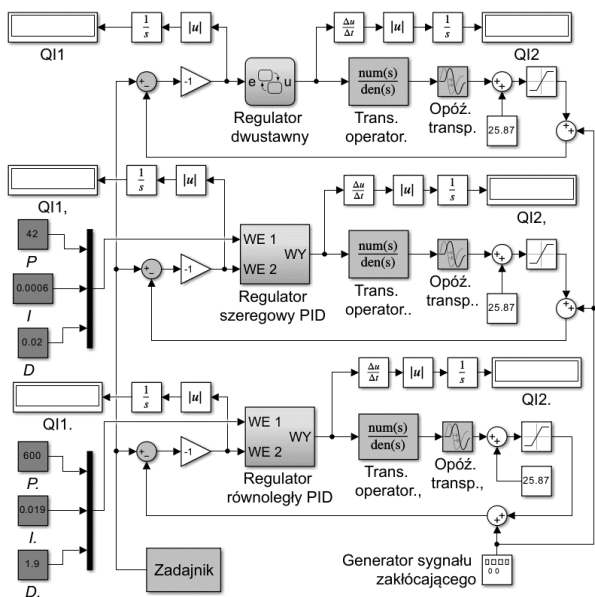
Algorytm regulatora dwustawnego sformułowano w oparciu o narzędzie stateflow umożliwiające zapis scenariusza działań przy wykorzystaniu notacji maszyny skończonej (rys.5).

Algorytmy obu regulatorów PID składają się z trzech członów funkcjonalnych – proporcjonalnego, całkującego i różniczkującego. Połączenie tych członów w układ szeregowy powoduje wzajemne ich oddziaływanie na siebie. W ten sposób współczynnik wzmacnienia P wpływa na wszystkie trzy działania korekcyjne a stała czasowa różniczkowania D wywiera wpływ na stałą czasową całkowania I (rys.6).

Przy równoległym połączeniu członów funkcjonalnych, sygnał wyjściowy regulatora jest sumą wzmacnienia proporcjonalnego sygnału błęd, jego całki oraz jego pochodnej. Przy tym algorytmie każda nastawa regulatora jest niezależna i nie wpływa na inne (rys.7) [11,15,16].

Przedstawione schematy regulatorów PID zawierają filtr dolnoprzepustowy w torze różniczkowania. Przyjęcie niskiej wartości współczynnika filtra ($2 < N < 20$) zapobiega wzmacnieniu szumu pomiarowego o wysokiej częstotliwości – dzięki temu zabiegowi ogranicza się wpływ szumu na sygnał sterujący [12].

Na podstawie ogólnej koncepcji sterowania wyrażonej w postaci schematu przedstawionego na rysunku 4 w środowisku Matlab-Simulink opracowano model do badań symulacyjnych. Zawierał 3 wersje układu sterowania, każdą z innym regulatorem tj. dwustawnym, szeregowym PID i równoległym PID (rys.8).



Rys.8. Schemat blokowy modelu symulacyjnego

Ocena jakości sterowania

Jako kryteria oceny jakości sterowania przyjęto wskaźniki całkowite. Były to, $QI1$ – całka z wartości bezwzględnej uchybu (2), $QI2$ – całka z wartości bezwzględnej pochodnej sygnału sterującego (3).

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

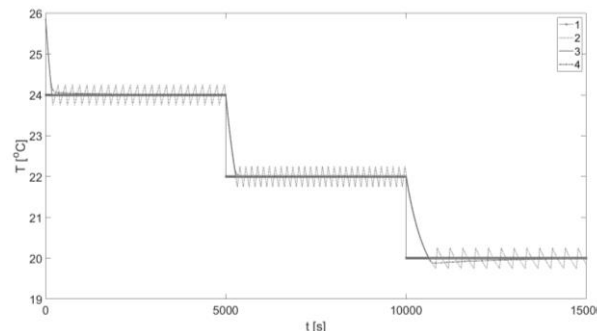
$$(3) \quad QI2 = \int_{t_p}^{t_f} \left| \frac{du}{dt} \right| dt$$

gdzie: e – uchyb w układzie sterowania, du/dt – pochodna sygnału sterującego, t – czas, t_p – początek interwału czasowego sterowania, t_f – koniec interwału czasowego sterowania.

$QI2$ dostarcza informacji na temat dynamiki sygnału sterującego, natomiast wartość wskaźnik $QI1$ informuje o jakości sterowania (im wartość ta jest niższa tym jakość sterowania jest lepsza) [6,13,14].

Symulacja komputerowa dla warunków idealnych

W pierwszej kolejności jakość sterowania (zależności 2 i 3) analizowano przy braku zakłóceń w pętlach sterowania układów zilustrowanych na rysunku 8. Wyniki przedstawiono na rysunku 9 i w tabeli 1.



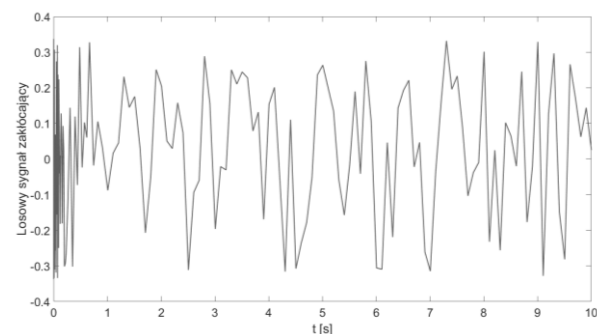
Rys.9. Wyniki symulacji sterowania – brak zakłóceń

Tab.1. Wartości całkowitych wskaźników jakości sterowania – brak zakłóceń

Regulator \ Wskaźnik	Dwustawny	Szeregowy PID	Równoległy PID
QI1	2677	1264	1008
QI2	0,43	103	102,70

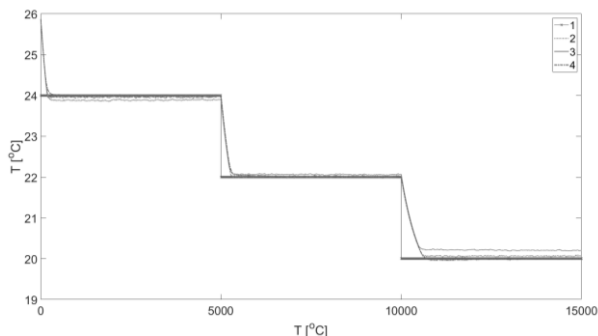
Symulacja komputerowa w obecności sygnału zakłócającego

W dalszej kolejności analizowano proces sterowania z uwzględnieniem sygnału zakłócającego o przebiegu losowym, częstotliwości 2 [mHz] i amplitudzie 5% maksymalnej wartości sygnału zadanego. Fragment przebiegu sygnału zakłócającego zilustrowano na rysunku 10.



Rys.10. Sygnał zakłócający o przebiegu losowym, częstotliwości 2 [mHz] i amplitudzie 5%

Wyniki symulacji dla systemów (rys.8) poddanych oddziaływaniu sygnału zakłócającego (rys.10) przedstawiono na rysunku 11.



Rys.11. Wyniki symulacji sterowania w obecności losowego sygnału zakłócającego o maksymalnej amplitudzie 5%: 1 – wartość zadana temperatury, 2 – sygnał wyjściowy układu sterowania z regulatorem dwustawnym, 3 – sygnał wyjściowy układu sterowania z szeregowym regulatorem PID, 4 – sygnał wyjściowy układu sterowania z równoległym regulatorem PID

Dla przedmiotowej symulacji wyznaczono wartości wskaźników $QI1$ i QI , które przedstawiono w tabeli 2.

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

Regulator \ Wskaźnik	Dwustawny	Szeregowy PID	Równoległy PID
$QI1$	3317	3306	3706
$QI2$	$3,02 \cdot 10^4$	$5,14 \cdot 10^6$	$4,66 \cdot 10^6$

Analiza wyników

Analizując przedstawione na wykresie (rys.9) przebiegi sygnałów oraz wartości wskaźników $QI1$ i $QI2$ (tab.1) należy stwierdzić, iż algorytmy badanych regulatorów PID pozwalają uzyskać zbliżoną jakość sterowania. Najlepszy rezultat otrzymano dla równoległego regulatora PID. Najgorszy wynik odnotowano w przypadku regulatora dwustawnego. Należy jednak podkreślić, że uzyskanie takiego wyniku wymagało znacząco niższej dynamiki sygnału sterującego ($QI2 = 0,43$) niż w przypadku regulatorów PID ($QI2 = 103$ i $102,70$) (tab.1).

Na podstawie analizy wyników symulacji dla procesu w obecności sygnału zakłócającego (rys.11, tab.2) należy stwierdzić znaczący wzrost wartości wskaźników $QI2$ w porównaniu z symulacją dla warunków idealnych. Wzrost ten wynika z reakcji algorytmów sterowania na sygnał zakłócający (rys.10). Zaobserwowana szybkość zmian przebiegów odpowiada dynamice zmian sygnału zakłócającego.

Wartości wskaźnika $QI1$ dla analizowanych regulatorów są zbliżone i mieszczą się w przedziale 3306 - 3317.

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych należy stwierdzić, że w ujęciu ogólnym algorytmy regulatorów podczas symulacji komputerowej dla warunków idealnych (bez zakłóceń) zapewniają jakość sterowania umożliwiającą utrzymanie wartości regulowanej na poziomie nie odbiegającym od wartości zadanej.

Na podstawie wyników symulacji dla układu sterowania w obecności czynnika zakłócającego, można stwierdzić, że w celu utrzymania wartości regulowanej na zadanym poziomie, regulatory oddziałują zwrótnie na obiekt sterowania poprzez sygnały sterujące o dużej dynamice zmian. Co jest naturalną reakcją na występowanie sygnału zakłócającego i szybkość zmian jego przebiegu.

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; mgr inż. Arkadiusz Kapusta, e-mail: kontakt.arkadiuszkapusta@gmail.com; mgr inż. Tomasz Kluzek, e-mail: tomasz.kluzek@onet.pl.

LITERATURA

- [1] Sugarman SC. HVAC Fundamentals, Third Edition. CRC Press; 2020.
- [2] Pezzutto S, Quaglini G, Riviere P, Kranzl L, Novelli A, Zambito A, et al. Screening of Cooling Technologies in Europe: Alternatives to Vapour Compression and Possible Market Developments. Sustainability 2022;14:2971. <https://doi.org/10.3390/su14052971>.
- [3] Enescu D. Thermoelectric Energy Harvesting: Basic Principles and Applications. In: Enescu D, editor. Green Energy Advances, IntechOpen; 2019. <https://doi.org/10.5772/intechopen.83495>.
- [4] Jouhara H, Żabnieńska-Góra A, Khordehghah N, Doraghi Q, Ahmad L, Norman L, et al. Thermoelectric generator (TEG) technologies and applications. International Journal of Thermofluids 2021;9:100063. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2021.100063>.
- [5] Skotnicka-Zasadzień B. Doskonalenie procesu produkcyjnego w przedsiębiorstwie przemysłowym z zastosowaniem metod projektowania jakości 2020. <https://docplayer.pl/28898393-Doskonalenie-procesu-produkcyjnego-w-przedsiębiorstwie-przemysłowym-z-zastosowaniem-metod-projektowania-jakosci.html> (accessed August 2, 2023).
- [6] Knaga J, Lis S, Kurpaska S, Łyszczarz P, Tomasik M. Optimisation of Energy Use in Bioethanol Production Using a Control Algorithm. Processes 2021;9. <https://doi.org/10.3390/pr9020282>.
- [7] Tarnowski W. Projektowanie układów regulacji automatycznej. Ciągłych z liniowymi korektorami ze wspomaganiami za pomocą Matlab'a. Koszalin: Uczelniane Politechniki Koszalińskiej; 2008.
- [8] Liu T, Wang Q-G, Huang H-P. A tutorial review on process identification from step or relay feedback test. Journal of Process Control 2013;23:1597–623. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2013.08.003>.
- [9] Gielżecki J, Jakubowski T. The Simulation of Temperature Distribution in a Ground Heat Exchanger—GHE Using the Autodesk CFD Simulation Program. In: Mudryk K, Werle S, editors. Renewable Energy Sources: Engineering, Technology, Innovation, Cham: Springer International Publishing; 2018, p. 333–43. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72371-6_32.
- [10] Tadeusiewicz R. Biocybernetyka: metodologiczne podstawy dla inżynierii biomedycznej. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN; 2014.
- [11] Gruk W, Habecki S, Piotrowski R. Implementacja niekonwencjonalnych regulatorów PID w sterowniku programowalnym. Pomiary Automatyka Robotyka 2017;R. 21, nr 1. https://doi.org/10.14313/PAR_223/31.
- [12] Sahu RK, Panda S, Rout UK. DE optimized parallel 2-DOF PID controller for load frequency control of power system with governor dead-band nonlinearity. International Journal of Electrical Power & Energy Systems 2013;49:19–33. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.12.009>.
- [13] Śmierciak P, Ziółkowski E. Wpływ wybranych parametrów zakłóceń na jakość klasycznego i rozmytego sterowania piecem oporowym. Archives of foundry engineering 2014;14:123–6.
- [14] Ziółkowski E, Śmierciak P. Porównanie wyników symulacji wpływu kształtu i amplitudy zakłóceń na jakość sterowania piecem oporowym w układzie z regulatorem PID lub rozmytym. Archives of Foundry Engineering 2015;15:133–8.
- [15] Skruch P, Długosz M, Mitkowski W. Mathematical methods for verification of microprocessor-based PID controllers for improving their reliability. EiN 2015;17:327–33. <https://doi.org/10.17531/ein.2015.3.1>.
- [16] Rajinikanth V, Latha K. Setpoint weighted PID controller tuning for unstable system using heuristic algorithm. Archives of Control Sciences 2012;22:481–505. <https://doi.org/10.2478/v10170-011-0037-8>.