

Sterowanie procesem mikrofalowego suszenia wybranych owoców i warzyw

Streszczenie. W artykule analizowano sterowanie automatyczne procesem suszenia mikrofalowego wybranych owoców i warzyw. Przedstawiono metodę projektowania zamkniętego układu sterowania z wykorzystaniem modelowania i symulacji komputerowej. Opracowano modele obiektu i układu sterowania. Zastosowano algorytmy regulatorów PID oraz I-PD. Istotę działania modeli przedstawiono na schematach blokowych i wykresach. Analizowano wyniki symulacji komputerowej, dokonano oceny jakości sterowania z wykorzystaniem wskaźników całkowych.

Abstract. The article analyzes the automatic control of the microwave drying process of selected fruits and vegetables. The method of designing a closed control system using modeling and computer simulation is presented. Object and control system models have been developed. Algorithms controls PID and I-PD were used. The essence of models operation is presented in block diagrams and charts. Results of the computer simulation were analyzed, the quality of control was evaluated using integral indicators. (**Control of the microwave drying process of selected fruits and vegetables**)

Słowa kluczowe: suszenie mikrofalowe; modelowanie; sterowanie automatyczne.

Keywords: microwave drying; modeling; automatic control.

Wstęp

Suszenie jest jedną z najstarszych metod konserwacji owoców i warzyw. Celem zabiegu jest obniżenie zawartości wody do poziomu, który zahamuje procesy enzymatyczne i uniemożliwi rozwój mikroorganizmów podczas przechowywania. Jednocześnie suszenie powinno zapewnić zachowanie cech jakościowych, zwłaszcza pod względem zawartości składników odżywczych (witamin, białka, skrobi, barwników) związanych ze smakiem, wyglądem oraz zapachem i strukturą [1, 2]. Owoce i warzywa suszone są najczęściej metodą konwekcyjną, poprzez dostarczenie ciepła z czynnikiem suszącym [3, 4]. W ostatnich latach coraz częściej, jako źródło energii wykorzystywane są mikrofałe, w połączeniu z konwekcyjnym nawiewem lub podciśnieniem. Zastosowanie mikrofał skraca znacznie czas suszenia i poprawia jakość suszu [5, 6]. Odpowiedni dobór mocy umożliwia uzyskanie właściwej temperatury materiału, która nie spowoduje istotnego pogorszenia jakości owoców, czy warzyw.

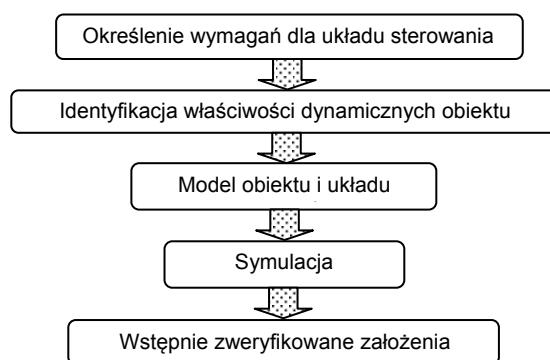
W związku z powyższym zasadne wydaje się rozwijanie konstrukcji urządzeń umożliwiających mikrofalowe suszenie owoców i warzyw. Urządzenia takie należy wyposażyć w system automatycznego sterowania umożliwiający precyzyjną kontrolę parametrów procesu suszenia. W opracowaniu przedstawiono wstępne prace projektowe zmierzające do określenia założeń ramowych dla projektu układu sterowania suszarką mikrofalową.

Cel i zakres pracy

Celem pracy było określenie, z wykorzystaniem modelu symulacyjnego, wstępnych parametrów dla integracji elementów systemu w projekcie układu sterowania suszeniem mikrofalowym wybranych owoców i warzyw. Zakres pracy obejmował: identyfikację właściwości dynamicznych obiektu sterowania poprzez analizę charakteru procesu, sformułowanie modelu symulacyjnego układu sterowania, symulację komputerową w środowisku Matlab®-Simulink.

Metodyka

Podczas prac koncepcyjnych związanych z konstrukcją nowego urządzenia pierwszym etapem cyklu projektowego jest określenie założeń dotyczących jego funkcjonalności (rys.1).



Rys.1. Proces rozwoju aplikacji

Aby wstępnie zweryfikować czy zachowanie projektowanego układu sterowania będzie zgodne z przyjętymi założeniami konieczne jest przeprowadzenie badań symulacyjnych. W tym celu należy zidentyfikować obiekt sterowania pod względem właściwości dynamicznych. Można to uczynić poprzez wyznaczenie charakterystyki dynamicznej lub na podstawie wiedzy empirycznej posiadanej przez projektanta na temat obiektu i procesu technologicznego. W oparciu o powyższe powstaje model symulacyjny obiektu i układu sterowania. Model wymaga identyfikacji (dostrojenia) tj. potwierdzenia zgodności jego zachowania z obiektem, który odwzorowuje [7, 8]. Dostrojony model układu sterowania jest podstawą do przeprowadzenia symulacji komputerowej, która pozwala na dobór parametrów dla elementów składowych rzeczywistego systemu w taki sposób aby możliwe było osiągnięcie założonej na wstępie funkcjonalności [9]. W ramach niniejszego opracowania zastosowano przedstawioną metodykę do wstępnego określenia warunków ramowych dla projektu układu sterowania suszarką mikrofalową. Analizowano sterowanie urządzeniem z wykorzystaniem regulatorów, PID oraz I-PD.

Wadą algorytmu klasycznego regulatora PID jest wzmocnianie zakłóceń. Skutkiem tego jest pogorszenie jakości regulacji oraz wzrost prawdopodobieństwa wystąpienia oscylacji sygnału wyjściowego. Według literatury przedmiotu wymienione niepożądane działanie można wyeliminować poprzez zmodyfikowanie regulatora PID do postaci I-PD [9]. Cechą charakterystyczną algorytmu I-PD jest obecność na wejściu elementu różniczkującego sygnał

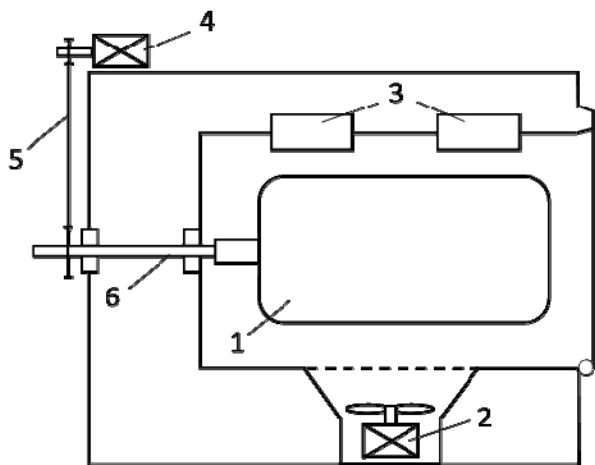
z układu regulacji a w torze wzmacnienia proporcjonalnego obecność ważonej wartości β , która mieści się w przedziale $\langle 0, 1 \rangle$. Nastawa ta określa, czy na wejście członu proporcjonalnego regulatora podany zostanie błąd regulacji ($\beta = 1$), czy też sygnał sterowany ($\beta = 0$).

Materiał poddawany suszeniu mikrofalowemu

Zakłada się, że procesowi suszenia zostaną poddane rozdrobnione warzywa korzeniowe: pietruszka, marchew, seler, burak ćwikłowy oraz drobne owoce: jagody, maliny, żurawina i truskawki. Owoce i warzywa należą do wysoko uwodnionych materiałów roślinnych.

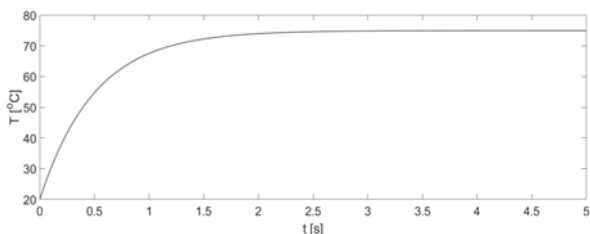
Obiekt sterowania

Obiekt sterowania stanowi suszarka mikrofalowa. Istota działania urządzenia bazuje na wykorzystaniu promieniowania mikrofalowego w procesie suszenia wybranych owoców i warzyw. Schemat urządzenia zilustrowano na rysunku 2.



Rys.2. Schemat suszarki mikrofalowej: 1 – komora suszenia, 2 – wentylator, 3 – magnetrony, 4 – silnik elektryczny, 5 – przekładnia

Suszarka składa się z wnęki mikrofalowej, przez którą przepływa powietrze wprawiane w ruch przez wentylator (2). Wewnątrz tej komory znajduje się zbiornik w kształcie walca (1) wykonany ze szkła o niskim współczynniku strat dielektrycznych. Za wytworzenie pola elektromagnetycznego odpowiadają dwa magnetrony o łącznej mocy 1200 W (3). W celu zapewnienia równomiernego nagrzewania suszonego materiału, stosuje się obrót bębna w czasie trwania procesu. Napęd zapewnia silnik elektryczny (4) połączony z wałem bębna poprzez przekładnię (5). Para wodna gromadząca się w wyniku parowania suszonego materiału odprowadzana jest kanałem przebiegającym w osi wału napędowego (6).



Rys.3. Charakterystyka czasowa obiektu sterowania

Model obiektu regulacji

Na podstawie badań własnych oraz wiedzy empirycznej o charakterze zjawisk towarzyszących procesowi suszenia

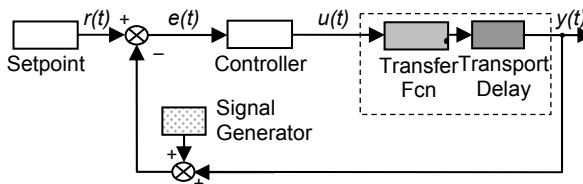
mikrofalowego sformułowano model transmitancyjny określający właściwości obiektu sterowania (1) [11].

$$(1) \quad G(s) = 0,0458 \frac{1}{0,5s + 1}$$

Charakterystykę czasową modelu zilustrowano na rys. 3.

Model układu regulacji

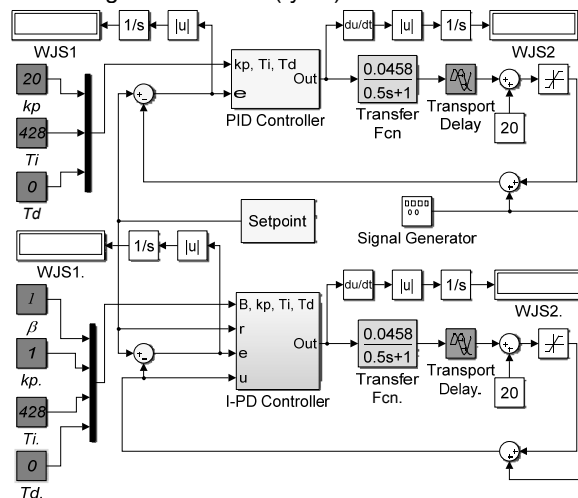
Z wykorzystaniem zależności (1) opisującej obiekt regulacji opracowano model symulacyjny układu regulacji. Jego schemat blokowy zilustrowano na rysunku 4.



Rys.4. Schemat blokowy modelu układu regulacji

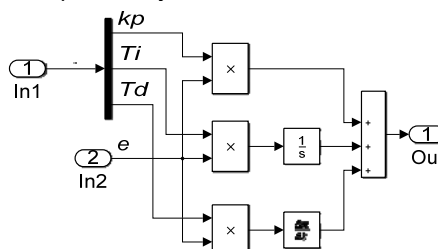
Znaczenie przedstawionych na schemacie bloków funkcjonalnych i symboli jest następujące: *Setpoint* – blok wartości zadanej, *Controller* – blok regulatora, *Transfer Fcn* – transmitancja obiektu regulacji, *Transport Delay* – opóźnienie transportowe, *Signal Generator* – blok reprezentujący oddziaływanie zakłócające, $r(t)$ – sygnał wartości zadanej, $e(t)$ – błąd regulacji, $u(t)$ – sygnał sterujący, $y(t)$ – sygnał wyjściowy modelu obiektu.

Następnie schematem blokowym model (rys.4) zaimplementowano w środowisku Matlab-Simulink. W programie tym powstał system zawierający zintegrowane dwie wersje układu regulacji, tj. z klasycznym regulatorem PID oraz regulatorem I-PD (rys.5).



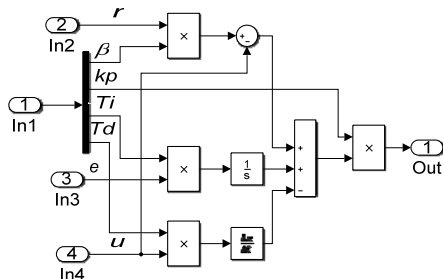
Rys.5. Schemat blokowy zintegrowanych modeli symulacyjnych układów regulacji z regulatorami PID i I-PD

Najważniejsze symbole występujące na schemacie omówiono w opisie do rysunku 4.



Rys.6. Schemat blokowy regulatora PID

Algorytmy zastosowanych regulatorów zapisane w postaci schematów blokowych zilustrowano na rysunkach 6 i 7. Znaczenie przedstawionych na rysunkach symboli jest następujące: In – wejście, Out – wyjście, k_p – wzmacnienie części proporcjonalnej, T_i – czas całkowania (zdwojenia), T_d – czas różniczkowania (wyprzedzenia), β – wzmacnienie w torze proporcjonalnym, regulatora I-PD, r – sygnał wartości zadanej, e – błąd regulacji, u – sygnał sterujący.



Rys.7. Schemat blokowy regulatora I-PD

Ocena jakości sterowania

Jakość sterowania zapewnianą przez zamodelowane układy z regulatorami PID i I-PD analizowano w toku badań symulacyjnych. Podczas badań określono wpływ sygnału zakłócającego na rozpatrywany system. Jako kryteria oceny przyjęto wskaźniki całkowite: $WJS1$ – całka z wartości bezwzględnej błęd (2), $WJS2$ – całka z wartości bezwzględnej pochodnej sygnału sterującego (3).

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

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

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

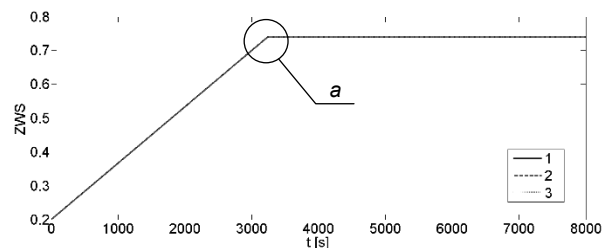
$WJS2$ dostarcza informacji na temat dynamiki sygnału sterującego, natomiast wartość wskaźnik $WJS1$ informuje o jakości sterowania (im jest ona niższa tym jakość sterowania jest lepsza) [12, 13, 14, 15].

W ramach badań symulacyjnych analizowano przebiegi *znormalizowanych wartości symulacji* komputerowej (ZWS) procesu sterowania dla obu rozpatrywanych regulatorów. Sygnał zadany temperatury kształtowany był według algorytmu przewidującego przyrost temperatury suszonych warzyw i owoców do wartości docelowej 74 [°C] z prędkością 1 [°C·min⁻¹]. Następnie utrzymanie tej wartości przez 72 [min]. Taki przebieg sterowania miał na celu logiczne potwierdzenie poprawności działania zamodelowanego systemu, nie odnosi się on do określonego rzeczywistego procesu.

Na przedstawionych poniżej wykresach zilustrowano następujące przebiegi ZWS: 1 – wartość zadaną temperatury, 2 – sygnał wyjściowy układu sterowania z regulatorem PID, 3 – sygnał wyjściowy układu sterowania z regulatorem I-PD.

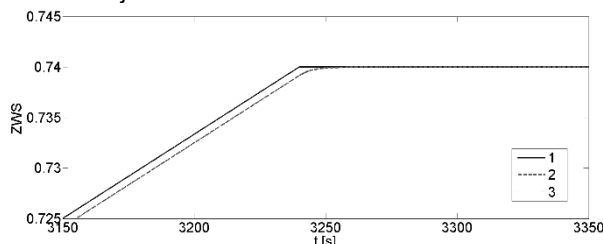
Symulacja komputerowa dla warunków idealnych

Wstępnie analizie poddano działanie układu w warunkach idealnych tj. bez obecności zakłóceń. Wyniki symulacji zilustrowano na rysunku 8.



Rys.8. Wyniki symulacji dla układów sterowania – brak zakłóceń

Aby ułatwić ich analizę wyodrębniono nierzawiczny etap procesu i oznaczono go jako szczegół a (rys.9). W wyszczególnionym przedziale czasu, zgodnie z sygnałem zadanym, wartość regulowana przechodzi z fazy wzrostu do stabilizacji.



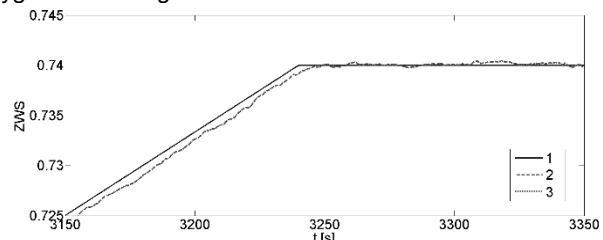
Rys.9. Wybrany etap symulacji procesu sterowania – brak zakłóceń

Dla obu rozpatrywanych regulatorów wskaźniki całkowite przyjęły analogiczne wartości tj. $WJS1 = 2,76$ i $WJS2 = 11,79$.

Analizując przedstawione na wykresach przebiegi sygnałów 2 i 3 oraz wartości wskaźników $WJS1$ i $WJS2$, należy stwierdzić, iż algorytmy badanych regulatorów podczas symulacji komputerowej dla warunków idealnych zapewniają analogiczną jakość sterowania. Przedstawione przebiegi nie odbiegają od sygnału wartości zadanej reprezentowanego przez krzywą 1. Ponadto należy podkreślić, że nie stwierdzono wpływu wartości nastawy β regulatora I-PD na jakość sterowania.

Symulacja komputerowa w obecności sygnału zakłócającego

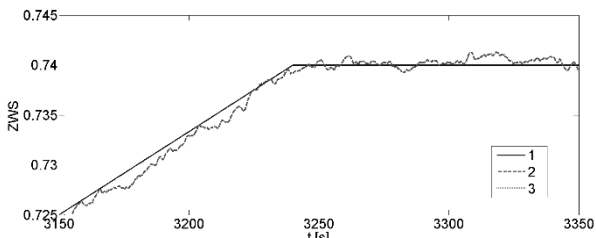
W dalszej kolejności analizowano przebieg sterowania z uwzględnieniem sygnału zakłócającego o przebiegu losowym, jego parametry były następujące: wartość częstotliwości wynosiła 0,002 [Hz] a amplituda odpowiednio: 1 %, 3 % i 5 % maksymalnej amplitudy sygnału zadanego.



Rys.10. Wybrany etap symulacji dla układu sterowania w obecności losowego sygnału zakłócającego o maksymalnej amplitudzie 1 %

Tabela 1. Wartości całkowitych wskaźników jakości sterowania dla losowego sygnału zakłócającego o maksymalnej amplitudzie 1%

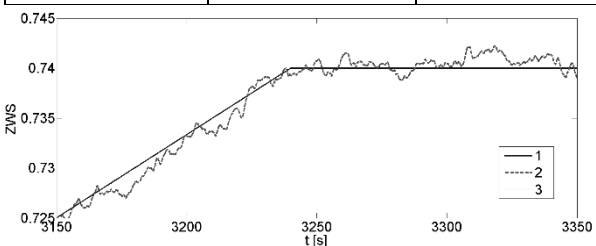
Regulator	PID	I-PD
Wskaźnik		
WJS1	40,11	40,11
WJS2	250,60	168,70



Rys.11. Wybrany etap symulacji dla układu sterowania w obecności losowego sygnału zakłócającego o maksymalnej amplitudzie 3 %

Tabela 2. Wartości całkowitych wskaźników jakości sterowania dla losowego sygnału zakłócającego o maksymalnej amplitudzie 3%

Wskaźnik \ Regulator	PID	I-PD
WJS1	120,00	120,00
WJS2	752,90	505,00



Rys.12. Wybrany etap symulacji dla układu sterowania w obecności losowego sygnału zakłócającego o maksymalnej amplitudzie 5 %

Tabela 3. Wartości całkowitych wskaźników jakości sterowania dla losowego sygnału zakłócającego o maksymalnej amplitudzie 5%

Wskaźnik \ Regulator	PID	I-PD
WJS1	200,00	200,00
WJS2	1252,00	841,30

Analizując wyniki symulacji zilustrowane wykresami i opisane wskaźnikami całkowitymi należy stwierdzić, iż wraz ze wzrostem amplitudy sygnału zakłócającego równomiernie wzrastają i utrzymują się na tym samym poziomie wartości wskaźników WJS1 dla obu regulatorów, oznacza to analogiczną jakość sterowania zapewnianą przez algorytmy tych regulatorów. W przypadku układu wykorzystującego algorytm regulatora PID zaobserwowano większą dynamikę sygnału sterującego o czym informują wartości wskaźników WJS2. Przedstawione przebiegi 2 i 3 na poszczególnych wykresach nie odbiegają w znaczącym stopniu od sygnału wartości zadanej reprezentowanego przez krzywą 1, oznacza to, że jakość sterowania należy uznać za akceptowalną. Należy stwierdzić, że tak jak w przypadku symulacji dla warunków idealnych, w tym wypadku również nie stwierdzono wpływu wartości nastawy β regulatora I-PD na jakość sterowania.

Wnioski

- Przeprowadzone badania symulacyjne wskazują, iż możliwe jest sterowanie temperaturą suszenia mikrofalowego przy zastosowaniu układu regulacji z regulatorami PID lub I-PD. Uzyskane przebiegi wielkości sterowanej nie odbiegają w znaczącym stopniu od sygnału wartości zadanej, oznacza to, że jakość sterowania należy uznać za akceptowalną.
- Algorytmy analizowanych regulatorów podczas symulacji komputerowej dla warunków idealnych (bez zakłóceń) oraz w obecności losowego sygnału zakłócającego zapewniają analogiczną jakość sterowania. System wykorzystujący algorytm regulatora

PID charakteryzuje się jednak większą dynamiką sygnału sterującego.

- Nie stwierdzono wpływu wartości nastawy β regulatora I-PD na jakość sterowania zarówno dla warunków idealnych jak i dla symulacji pracy układu w obecności zakłóceń.
- Zaproponowana metodyka prac koncepcyjnych umożliwia rozwój projektu układu sterowania oparty na modelach obiektu i układu regulacji.

Autorzy: dr hab. inż. Bogusława Łapczyńska-Kordon, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Inżynierii Mechanicznej i Agrofizyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, e-mail: Boguslawa.Lapczynska-Kordon@ur.krakow.pl; dr inż. Stanisław Lis, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Energetyki i Automatykacji Procesów Rolniczych, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, e-mail: Stanislaw.Lis@ur.krakow.pl; dr inż. Marcin Tomasiak, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Energetyki i Automatykacji Procesów Rolniczych, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, e-mail: Marcin.Tomasik@ur.krakow.pl.

LITERATURA

- Khraisheh MAM, McMinn WAM and Magee TRA. Quality and structural changes in starchy foods during microwave and convective drying. *Food Research International* 2004, 37(5) 497–503.
- Beaudry C, Raghavan GSV, Ratti C and Rennie TJ. Effect of four drying methods on the quality of osmotically dehydrated cranberries. *Drying Technology* 2004, 22(3), 521–539.
- Nijhuis HH, Toringa HM, Muresan S, Yukel D, Leguijt and Kloek W. Approaches to improving the quality of dried fruits and vegetables. *Trends in Food Science & Technology* 1998, 9, 13–20.
- Korzeniewska E., Duraj A., Krawczyk A., Identyfikacja wyjątków sensorycznych funkcji organizmu przy zastosowaniu nowoczesnej metody monitoringu e-włókien, *Przegląd Elektrotechniczny* 89 (2013), nr.12, 123-127
- Orsat V, Changrue V, Raghavan GSV, Microwave drying of fruits and vegetables. *Stewart Post-Harvest Rev*, 2006, 6:4–9.
- Sagar VR, Suresh Kumar P. Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review. *J Food Sci Technol*. 2010, 47(1), 15–26. doi: 10.1007/s13197-010-0010-8.
- Tarnowski W., Projektowanie układów regulacji automatycznej. Ciągłych z liniowymi korektorami ze wspomaganiami za pomocą Matlab'a. *Wyd. Uczelniane Politechniki Koszalińskiej*, Koszalin, 2008.
- Tadeusiewicz R., Biocybernetyka. Metodyczne podstawy dla inżynierii biomedycznej. *Wyd. Naukowe PWN*, Warszawa, 2014.
- Kaliczyńska M., Lis S., Tomasiak M., Drożdż T., A Formal Model in Control Systems Design. Recent Advances in Systems, Control and Information Technology. *Proceedings of the International Conference SCIT 2016*. 543, 211-219.
- Gruk W., Habecki S., Piotrowski R. Implementacja niekonwencjonalnych regulatorów PID w sterowniku programowalnym. *Pomiary Automatyka Robotyka*, 2017, R. 21, 1, 31–39.
- Łapczyńska-Kordon B. Model suszenia mikrofalowo-podciśnieniowego owoców i warzyw. Rozprawa habilitacyjna. *Inżynieria Rolnicza*. Kraków, 2007, 10 (98).
- Lis S., Tomasiak M., Nęcka K., Oziębłowski M., Nawara P., Kiełbasa P., Ostafin M., Drożdż T. Analiza wpływu sygnału zakłócającego na jakość klasycznego i neuronowo-rozmytego sterowania piecem indukcyjnym. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2016, 12, 89-92.
- Śmierciak P., Ziółkowski E., Comparison of Energy Consumption in the Classical (PID) and Fuzzy Control of Foundry Resistance Furnace. *Archives of foundry engineering*, 3 (2012), vol. 12, s. 129-132.
- Śmierciak P., Ziółkowski E., Kryteria optymalizacji w systemach sterowania rozmytego piecami odlewniczymi. *Archives of foundry engineering*, 2 (2014), vol. 14, s. 95-100.
- Śmierciak P., Ziółkowski E., Wpływ wybranych parametrów zakłóceń na jakość klasycznego i rozmytego sterowania piecem oporowym. *Archives of foundry engineering*, 4 (2014), vol. 14, s. 123-126.