

Metodyka optymalizacji algorytmu sterowania w aspekcie ograniczenia zużycia energii w procesie wytwarzania bioetanolu

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę sterowania automatycznego procesem wytwarzania bioetanolu. Opracowano modele symulacyjne obiektu i układu sterowania. Do sterowania zastosowano regulatory relay oraz PID. Analizowano wpływ algorytmu sterowania na zużycie energii w rozpatrywanym procesie. Opracowany system testowano z wykorzystaniem obiektu rzeczywistego. Istotę działania układu sterowania przedstawiono na schematach blokowych i wykresach.

Abstract. the article presents the analysis of the automatic control of the bioethanol production process. Simulation models were established for the object and the control system. Relay and PID regulators were used in the control system. The analysis covers the impact of the control system on energy consumption in the aforementioned process. The system was tested with the use of a real object. The nature of work of the control system was presented in a form of flow charts and graphs. **The analysis of the automatic control of the bioethanol production process**

Słowa kluczowe: bioetanol; modelowanie; sterowanie automatyczne; zużycie energii

Keywords: bioethanol; modelling; automatic control system; energy consumption

Wstęp

Rośnie świadomość ekologiczna uczestników rynku motoryzacyjnego, pojawia się szereg inicjatyw mających na celu uczynić transport bardziej przyjaznym dla środowiska. Jednym z przejawów takich dążeń jest stosowanie paliw pozyskiwanych z odnawialnych źródeł energii. Do tego typu paliw należy etanol z biomasy. Możliwe jest zastosowanie go bezpośrednio jako paliwa (technologia e-biofuell cell Nissana) lub jako komponentu w procesie wytwarzania biodiesla. W Polsce obserwuje się zainteresowanie osób prywatnych, w tym rolników oraz firm i instytucji dysponujących flotą pojazdów, możliwością produkcji biopaliw do własnych celów [1]. Aby wytworzyć bioetanol z przeznaczeniem na paliwo niezbędna jest kolumna destylacyjna/rektyfikacyjna. Jednym z podstawowych parametrów jej pracy jest temperatura. Do precyzyjnego kontrolowania jej przebiegu konieczny jest system sterowania mocą grzałki elektrycznej dostarczającej ciepło potrzebne do ogrzania rektyfikowanej cieczy. Rozważając aspekt ekologiczny istotny w przypadku rozpatrywanego procesu nie bez znaczenia jest ograniczenie zużycia energii stąd w opracowaniu analizowano wpływ algorytmu sterowania na zużycie energii.

Metodyka

Metodyka, według której przeprowadzono działania optymalizacyjne bazowała na iteracyjnej procedurze (rys.1).



Rys.1. Iteracyjna procedura optymalizacji układu sterowania

Na początku sformułowano założenia dla układu sterowania w aspekcie optymalizacji zużycia energii. Następnie opracowano model symulacyjny obiektu sterowania. Powstał on na podstawie eksperymentalnie wyznaczonej charakterystyki dynamicznej (identyfikacja obiektu). Model ten dostosowano poprzez potwierdzenie zgodności jego zachowania z obiektem, który odwzorowuje. W oparciu o dostosowany model obiektu powstał model symulacyjny

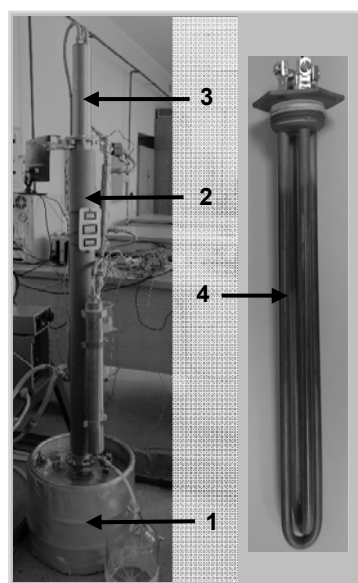
układu sterowania. Stanowił on bazę dla symulacji komputerowej umożliwiającej dobór parametrów algorytmu sterowania i analizę wpływu algorytmu na zużycie energii w analizowanym procesie. Końcowym etapem procedury był test algorytmu sterowania z wykorzystaniem obiektu rzeczywistego. W tym celu do pętli sprzężenia zwrotnego wirtualnego układu sterowania wprowadzono rzeczywiste elementy obiektu sterowania – przetwornik temperatury i układ grzałek [2, 3, 4, 5, 6].

Cel i zakres pracy

Celem pracy była analiza wpływu algorytmu sterowania na zużycie energii w procesie wytwarzania bioetanolu. Zakres pracy obejmował: opracowanie stanowiska badawczego, określenie właściwości dynamicznych obiektu sterowania, sformułowanie modeli symulacyjnych obiektu i układu sterowania, symulację komputerową w środowisku Matlab-Simulink – oszacowanie wpływu algorytmu sterowania na zużycie energii, testy na obiekcie rzeczywistym.

Obiekt sterowania

Obiekt sterowania stanowi kolumna rektyfikacyjna. Jej widok ogólny przedstawiono na rys.2.

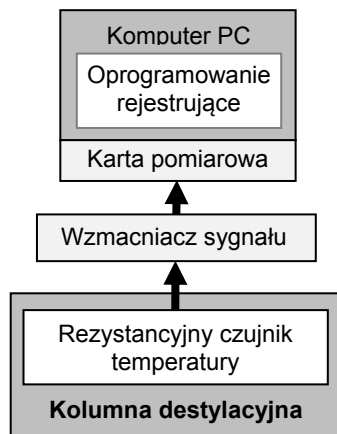


Rys.2. Kolumna rektyfikacyjna: 1 – zbiornik z grzałką, 2 – deflegmator, 3 – głowica chłodząca, 4 – grzałka

Urządzenie składa się ze zbiornika na destylowaną/rektyfikowaną ciecz (1), ze znajdującego się nad nim deflegmatorem (2) i z usytuowanej na górze chłodnicy (3) cieczy przeznaczonej do odbioru. Do zaistnienia procesu destylacji/rektyfikacji niezbędne jest dostarczenie ciepła, za to odpowiedzialne są dwie grzałki (4) zainstalowane w zbiorniku (1). Informacji o temperaturze w procesie dostarcza rezystancyjny przetwornik temperatury. Istota działania kolumny bazuje na wykorzystaniu przeciwprądowego kontaktu cieczy spływającej pod wpływem grawitacji w dół deflegmatora z przemieszczającymi się do góry oparami rektyfikowanej mieszaniny. Wewnątrz deflegmatora znajdują się elementy konstrukcyjne zwiększające powierzchnię kontaktu cieczy z oparami. W trakcie procesu około ¼ objętości cieczy kierowana jest do odbioru.

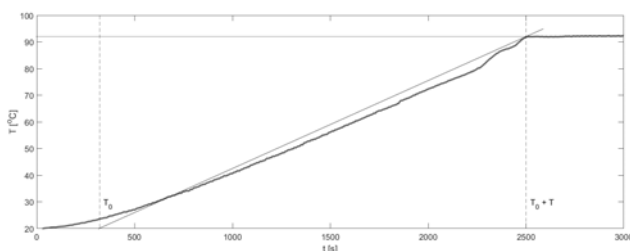
Model obiektu sterowania

Wstępnym etapem opracowania modelu obiektu sterowania było eksperymentalne wyznaczenie charakterystyki skokowej analizowanego pieca. W tym celu zastosowano układ rejestrujący przedstawiony na rysunku 3.



Rys.3. Schemat blokowy układu rejestrującego

Podczas eksperymentu zbiornik był wypełniony cieczą do destylacji/rektyfikacji (35 dm³). Ciecz znajdowała się w stanie ustalonym – temperatura 15,5 (°C). Aby wyznaczyć charakterystykę wywołano wymuszenie poprzez skokowy wzrost napięcia podawanego do układu grzałek o sumarycznej mocy $\Delta P = 4000$ (W). Reakcja obiektu na wymuszenie w postaci zmiany temperatury cieczy T , to poszukiwana charakterystyka skokowa. Rejestrowano ją do ustabilizowania się przebiegu. W eksperymencie zastosowano rezystancyjny czujnik PT100. Na rysunku 4 zilustrowano uzyskaną charakterystykę skokową dla obiektu sterowania.



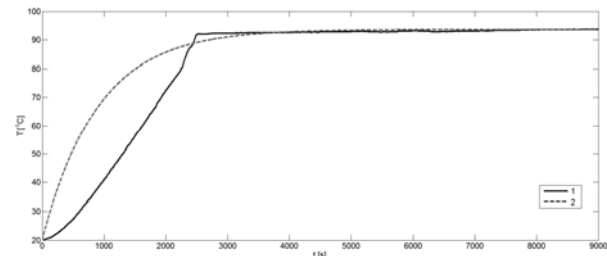
Rys.4. Charakterystyka skokowa obiektu sterowania

Jej przebieg (rys.4) stanowił bazę do opracowania transmitancyjnego modelu symulacyjnego $G(s)$, wyraża go zależność 1.

$$(1) G(s) = 0,0184 \frac{1}{900s + 1}$$

gdzie: s – operator Laplace'a

Wstępnie odczytane z wykresu (rys.4) wartość stałej czasowej T i opóźnienia T_0 stanowiące parametry modelu skorygowano w trakcie kolejnych symulacji komputerowych tak aby charakterystyka modelu możliwie dokładnie odzwierciedlała charakterystykę obiektu rzeczywistego (rys. 5).

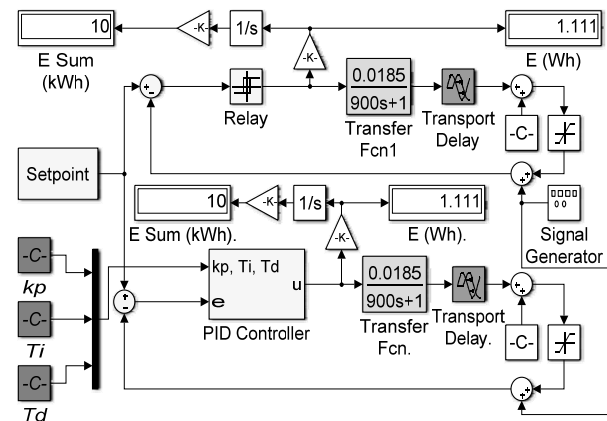


Rys.5. Charakterystyki skokowe: 1 – obiektu rzeczywistego, 2 – modelu transmitancyjnego

Na podstawie wykresu (rys.5) należy stwierdzić, iż dokładność modelu z punktu widzenia sterowania analizowanym procesem jest odpowiednia.

Model układu sterowania

Z wykorzystaniem zależności (1) opisującej obiekt regulacji opracowano model symulacyjny układu sterowania. Stanowił on bazę dla symulacji komputerowej umożliwiającej dobór algorytmu sterowania i jego optymalizację w aspekcie obniżenia zużycia energii w procesie. W środowisku Matlab-Simulink zaimplementowano 2 wersje układu sterowania – w konfiguracjach z regulatorami: dwustawnym (relay) i PID (rys.6) [7, 8, 9, 10, 11].



Rys.6. Schemat blokowy zintegrowanych modeli symulacyjnych układów sterowania z regulatorami relay i PID

Znaczenie najważniejszych bloków funkcjonalnych na schemacie jest następujące: Setpoint reprezentuje zadany przebieg temperatury, Controller to transmitancja regulatora, transfer fcn i transport delay reprezentują obiekt sterowania. Na schemacie w pętli sterowania znajduje się również dodatkowy blok, nie będący częścią struktury układu – jest to signal generator. Blok ten symuluje oddziaływanie zakłócające. Jego obecność podczas badań symulacyjnych umożliwia analizę wpływu sygnału zakłócającego na jakość sterowania. Ponadto na schemacie występują następujące symbole: kp –

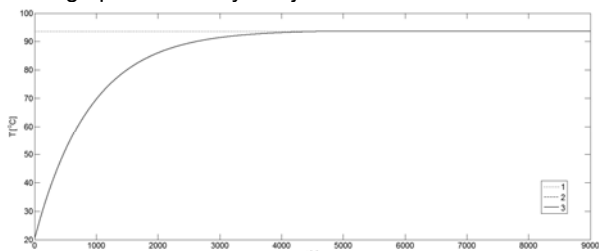
wzmocnienie części proporcjonalnej, T_i – czas całkowania (zdwojenia), T_d – czas różniczkowania (wyprzedzenia). Podczas symulacji komputerowej sygnał zadany kształtowany był według algorytmu przewidującego przyrost i utrzymanie temperatury cieczy w zbiorniku kolumny (rys.2) na poziomie zapewniającym właściwy przebieg procesu.

Analiza sterowania z wykorzystaniem symulacji komputerowej

Istotą przeprowadzonych badań symulacyjnych było wstępne określenie wpływu algorytmu sterowania na zużycie energii w rozpatrywanym procesie. W tym celu analizowano przebieg sygnału sterującego na wyjściu regulatora. Sygnał ten powiązany z mocą elementu wykonawczego pozwala oszacować zużycie energii. Należy podkreślić, iż uzyskane w ten sposób wartości mają charakter szacunkowy. Mają na celu wstępnie ułatwić wybór rodzaju regulatora w funkcji obniżenia zużycia energii. Wartości te są uzyskane w wyniku symulacji komputerowej i wskutek uproszczeń przyjmowanych podczas modelowania mogą odbiegać od wyniku rzeczywistego. Ich zadaniem nie jest jednak precyzyjne odwzorowanie rzeczywistości a zarysowanie charakteru zjawiska tak aby możliwe było podjęcie decyzji na temat wyboru regulatora.

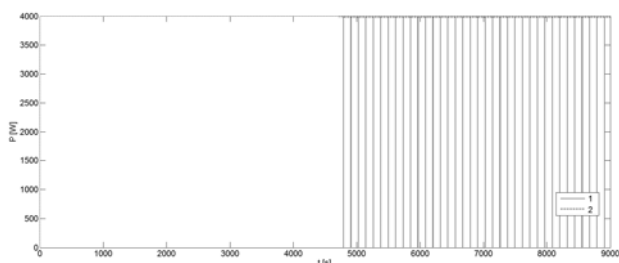
Zarejestrowane przebiegi zestawiono na wykresach. Na rysunku 6 przedstawiono wykres temperatury rektyfikowanej cieczy w zbiorniku kolumny (rys.2) podczas symulowanego procesu.

Przyjęty czas trwania procesu 2,5 [h] odpowiada warunkom rzeczywistym. Wartość sygnału zadanej temperatury cieczy ustalono na poziomie właściwym dla przebiegu procesu rektyfikacji.



Rys.7. Wyniki symulacji: 1 – wartość zadana temperatury, 2 i 3 – temperatura w procesie sterowanym z wykorzystaniem algorytmów regulatorów relay i PID

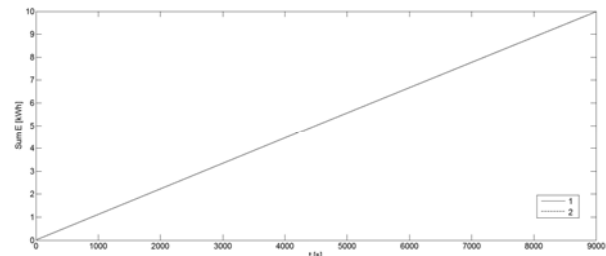
Na podstawie wykresu (rys.6) należy stwierdzić, że temperatura utrzymywana jest w sposób prawidłowy w przypadku obu zastosowanych algorytmów regulacji. Sygnały regulatorów sterujących temperaturą poprzez moc elementów wykonawczych zilustrowano na rysunku 7.



Rys.8. Sygnały sterujące regulatorów: 1 – relay, 2 – PID

Przebiegi te są charakterystyczne dla zastosowanych regulatorów. Do około połowy analizowanego interwału czasu moc przez obydwa regulatory utrzymywana jest na maksymalnym poziomie 4 [kW]. Po tym czasie sygnał regulatora dwustawnego, w celu utrzymania zadanej

temperatury, na zmianę przyjmuje dwie wartości 0 i 4 [kW]. Wartość sygnału regulatora PID natomiast w drugiej połowie analizowanego przedziału czasu zostaje obniżona z poziomu maksymalnego do 3,98 [kW]. Przebiegi jednostkowego zużycia energii w symulowanym procesie sterowania są odzwierciedleniem sygnałów sterujących analizowanych regulatorów. Całkowite sumaryczne zużycie energii dla obu regulatorów wynosi 10 [kWh], przebiegi te nie różnią się między sobą (rys.9).

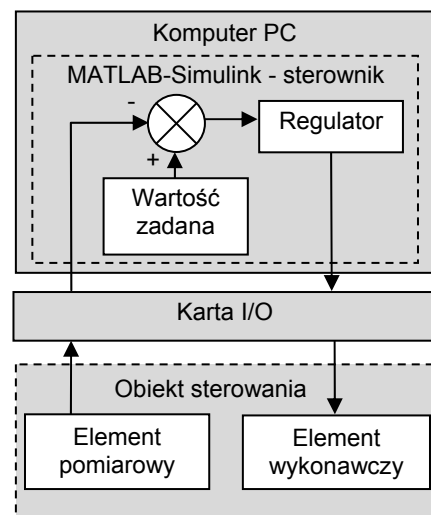


Rys.9. Sumaryczne zużycie energii dla układu sterowania z regulatorami: 1 – relay, 2 – PID

Reasumując, na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych należy stwierdzić, iż algorytmy analizowanych regulatorów zapewniają zbliżoną, akceptowalną jakość sterowania a sumaryczne zużycie energii w obu przypadkach jest na tym samym poziomie. Na tej podstawie należy stwierdzić, iż w przypadku procesu rektyfikacji nie zaobserwowano wpływu rodzaju algorytmu sterowania na zużycie energii. W związku z powyższym do dalszych badań na obiekcie rzeczywistym należy zaproponować łatwiejszy w implementacji regulator relay.

Analiza 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 opracowano stanowisko badawcze. Składało się ono z wirtualnego układu sterowania utworzonego w środowisku Matlab-Simulink, do którego włączono rzeczywiste elementy obiektu sterowania – pomiarowy i wykonawczy (rys.10).

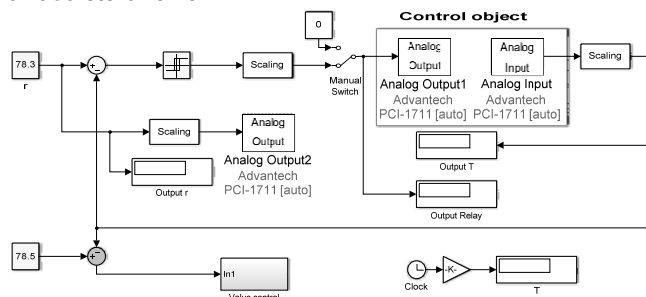


Rys. 10. Schemat blokowy stanowiska badawczego do analizy procesu sterowania z wykorzystaniem obiektu rzeczywistego

Specyfika tego etapu badań wymagała takiego przekształcenia modelu układu regulacji zilustrowanego schematem na rys.5, które umożliwi komunikację z otoczeniem systemu. W tym celu bloki reprezentujące

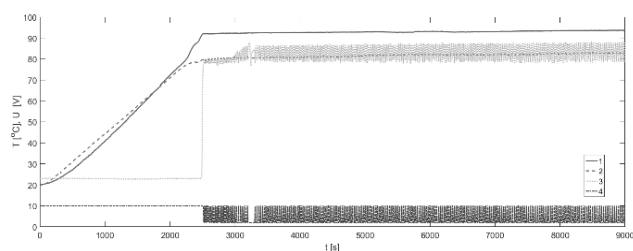
model obiektu zastąpiono blokami wejścia (Analog Input) i wyjścia (Analog Output) analogowego. Dodano także bloki skalowania (scale) sygnałów wejściowego i wyjściowego. W ten sposób powstał system komunikujący się za pośrednictwem karty I/O z rzeczywistym obiektem sterowania (rys.11).

Istotą tego etapu badań było eksperymentalne potwierdzenie poprawności działania zaproponowanego układu sterowania.



Rys.11. Schemat blokowy systemu w analizie procesu sterowania z wykorzystaniem obiektu rzeczywistego

Do sterowania zastosowano wskazany na podstawie symulacji komputerowej algorytm regulatora dwustawnego. Przeprowadzono eksperyment trwający 2,5 [h], parametry procesu sterowania zarejestrowano (rys.12).



Rys.12. Wyniki badań z wykorzystaniem obiektu rzeczywistego: 1 – temperatura w zbiorniku, 2 – temperatura w deflegmatorze, 3 – temperatura w chłodnicy, 4 – sygnał sterujący regulatora relay

W procesie destylacji/rektyfikacji zmiana składu destylowanej cieczy w zbiorniku (rys.2) wskutek stopniowego odparowania etanolu powoduje wzrost jej temperatury. Stanowi to jeden z czynników zakłócających, który musi zostać skorygowany przez układ sterowania. Analizując przedstawione na wykresie przebiegi sygnałów należy stwierdzić, iż opracowany układ sterowania działa poprawnie. Regulator dwustawny, którego sygnał sterujący reprezentuje krzywa 4 utrzymuje temperaturę destylowanej cieczy w zbiorniku na zadanym poziomie (krzywa nr 1). Dzięki temu wartości temperatur w deflegmatorze (krzywa nr 2) i chłodnicy (krzywa nr 3) również są odpowiednie dla procesu.

Wnioski

1. Na podstawie badań symulacyjnych z wykorzystaniem modelu układu sterowania stwierdzono, iż w przypadku analizowanego procesu rodzaj algorytmu sterowania nie ma wpływu na sumaryczne zużycie energii.
2. Przeprowadzone badania symulacyjne wskazują, że możliwe jest sterowanie temperaturą w procesie wytwarzania bioetanolu przy zastosowaniu układu sterowania z regulatorami relay i PID. Uzyskane przebiegi wielkości sterowanej nie odbiegają

w znaczącym stopniu od sygnału wartości zadanej, oznacza to, że jakość sterowania należy uznać za akceptowalną.

3. Podczas analizy procesu sterowania z wykorzystaniem obiektu rzeczywistego stwierdzono, iż układ sterowania z regulatorem relay zapewnia poprawne sterowanie analizowanym procesem.
4. Zaproponowana metodologia prac koncepcyjnych umożliwia rozwój projektu układu sterowania w oparciu o modele obiektu i układu sterowania.

Autorzy: dr inż. Stanisław Lis, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Inżynierii Bioprocessów, Energetyki i Automatykacji, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, e-mail: S.Lis@ur.krakow.pl; dr inż. Marcin Tomasik, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Inżynierii Bioprocessów, Energetyki i Automatykacji, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, e-mail: M.Tomasik@ur.krakow.pl. dr inż. Tomasz Szul, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Inżynierii Bioprocessów, Energetyki i Automatykacji, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, e-mail: T.Szul@urk.edu.pl. mgr inż. Piotr Łyszczarz, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Inżynierii Bioprocessów, Energetyki i Automatykacji, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, e-mail: P.Lyszczarz@urk.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Wcisło G., Strzelczyk M.: Określenie wpływu rodzaju użytego oleju rzepakowego do produkcji biopaliw na skład frakcyjny RME. *Mechanika Czasopismo Techniczne*. (2012) nr 5, s. 291-298.
- [2] 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).
- [3] Tadeusiewicz R., Biocybernetyka. Metodyczne podstawy dla inżynierii biomedycznej. Wyd. Naukowe PWN, Warszawa, ISBN 978-83-01-17376-0 (2014).
- [4] Klempka R., Stankiewicz A., Modelowanie i symulacja układów dynamicznych. Wyd. AGH, Kraków, ISBN 83-7464-060-X (2006).
- [5] Lebiada M.; Rymaszewski J.; Korzeniewska E.: Simulation of Thermal Processes in Superconducting Pancake Coils Cooled by GM Cryocooler MICRO THERM' 2013 Microtechnology and Thermal Problems In Electronics 2014
- [6] Pawlak R.; Lebiada M.; Tomczyk M.; Rymaszewski J.; Korzeniewska E.; Walczak M.: Modelling and applications of conductive elements on textile materials COMPEL-The International Journal For Computation And Mathematics In Electrical And Electronic Engineering 2018; 37(5), pp. 1645-1656.
- [7] Lis S., Tomasik M., Nęcka K., Drożdż T., Nawara P., Wrona P., Oziębłowski M. Konstrukcja i analiza modelu symulacyjnego układu sterowania piecem indukcyjnym. *Przegląd Elektrotechniczny*. 12, s. 147-150 (2015).
- [8] Lis S., Tomasik 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*. 12, 89-92 (2016).
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.