

AUTOMATYZACJA ODCINKA TECHNOLOGICZNEGO NA BAZIE LOGIKI ROZMYTEJ

Henryk Juszka, Marcin Tomasik

Akademia Rolnicza w Krakowie

Streszczenie. Na przykładzie procesu filtracji emulsji chłodząco-smarującej elementy robocze prasy tłoczącej opakowania (bodymakera), przedstawiono automatyzację tego procesu z zastosowaniem logiki rozmytej. Brak sterowania automatycznego tym odcinkiem technologicznym (przedmiot badań) uniemożliwił jego integrację z linią produkującą opakowania dla produktów rolno-spożywczych. Zakres pracy obejmował opracowanie systemu sterowania na bazie logiki rozmytej. Dopasowanie parametrów i współczynników sterowania oraz reguł sterowania rozmytego pozwoliło osiągnąć pozytywne wyniki weryfikacji empirycznej. We wnioskach wskazano na korzyści, jakie osiągnięto dzięki zastosowaniu logiki rozmytej do modelowania i sterowania procesami technologicznymi.

Słowa kluczowe: filtracja membranowa, sterowanie rozmyte, sterownik PLC

WSTĘP

Występujące w systemie filtracji membranowej obiekty sterowania są z reguły nieliniowe, nierzadko silnie nieliniowe. Problem sprawiają zmieniające się parametry pracy filtra, co utrudnia dobór nastaw regulatorów. Ze względu m.in. na nieliniowe charakterystyki pomp i przepływów, zależności ilościowe są trudne do określania. Pomocnym rozwiązaniem może być zastosowanie techniki mikroprocesorowej z narzędziami wspomagającymi sterowanie nieliniowe, tj. sterowanie rozmyte. Standardowe metody automatycznej regulacji stają się niewystarczające. Z drugiej strony doświadczony operator (ekspert) jest w stanie manipulując zaworami doprowadzić do chwilowego wyrównania zadanych wielkości. W przypadku, kiedy przepływ lub poziom jest największy – zmniejszy go, natomiast tam, gdzie przepływ (poziom) jest minimalny, powoli zwiększy jego wartość, na bieżąco kontrolując. Po serii kolejnych prób i przybliżeń zestaw wielkości będzie w przybliżeniu stabilny, aż do czasu samoczynnej zmiany poziomu lub przepływu.

Adres do korespondencji – Corresponding Author: Henryk Juszka, Marcin Tomasik, Katedra Energetyki Rolniczej Akademii Rolniczej w Krakowie, ul. Balicka 104, 30-149 Kraków, tel. 0-12 662-46-48, kom: 0501 549 897, e-mail: mtomasik@poczta.fm

Takie intuicyjne, oparte na doświadczeniu, „ręczne” sterowanie przenosi na potrzeby układów automatycznej regulacji technika fuzzy-logic, nazywana także sterowaniem rozmytym [Piegat 1999, Kacprzak 2001].

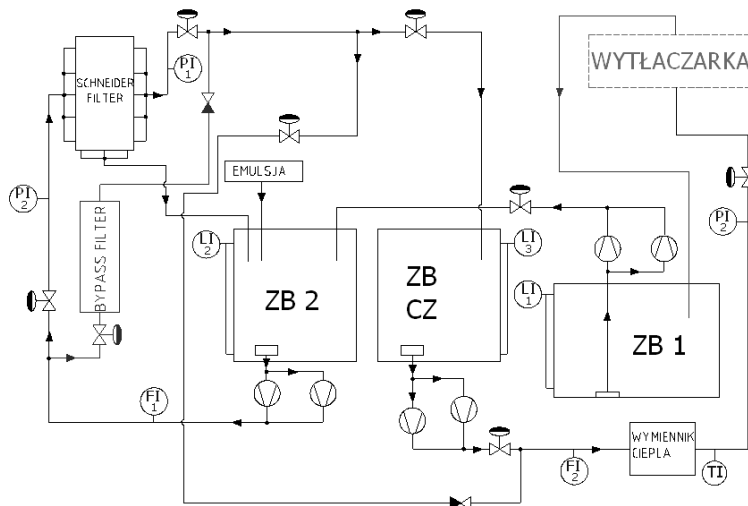
Realizacja procesów membranowych wymaga takiej konstrukcji aparatury, aby w ich przebiegu uzyskiwać możliwie duży, stabilny w czasie, strumień permeatu o odpowiednio niskiej zawartości składnika separowanego przez membranę [Adamczuk i in. 1996, Tomala 1999].

Celem pracy było opracowanie systemu sterowania linią filtracji emulsji na bazie logiki rozmytej.

System sterowania opracowano dla filtracji membranowej emulsji chłodząco smarującej stosowanej w procesie wytwarzania metalowych opakowań. Obiekt badań stanowiła linia technologiczna produkująca opakowania do napojów (puszek napojowych). Sterowanie pracą systemu filtracyjnego stanowiącego obiekt badań w ramach niniejszej pracy do czasu jego modernizacji realizowane było w układzie półautomatycznym. Koncepcja sterowania wykorzystuje doświadczenia zamieszczone w innych pracach [Tomasik 2006a, 2006b, 2006c].

OPIS SYSTEMU STEROWANIA

System sterowania procesem produkcji puszek napojowej jest zintegrowany w sieci ControlNet. Składa się ze sterowników PLC, wielu czujników, a także manipulatorów. Proces produkcyjny jest w pełni zautomatyzowany. Jedynym odcinkiem stanowiącym jednocześnie przedmiot badań o niepełnej automatyzacji i braku połączenia z siecią ControlNet była właśnie linia technologiczna filtracji emulsji chłodząco-smarującej. Całość sterowania tą linią realizowano na panelu w systemie półautomatycznym.



Rys. 1. Schemat systemu filtracji emulsji
Fig. 1. Scheme of the emulsion filtration system

Zamknięty system filtracyjny, jako przedmiot badań, umożliwia dokładną regulację i kontrolę wszystkich parametrów stanowiących o odpowiednich właściwościach emulsji chłodząco-smarującej. Do parametrów tych zalicza się m.in. temperaturę na wejściu do bodymakera (powinna wynosić 43°C). Najważniejszą zaletą takiego rozwiązania jest zapewnienie analitycznej kontroli jej jakości i składu chemicznego.

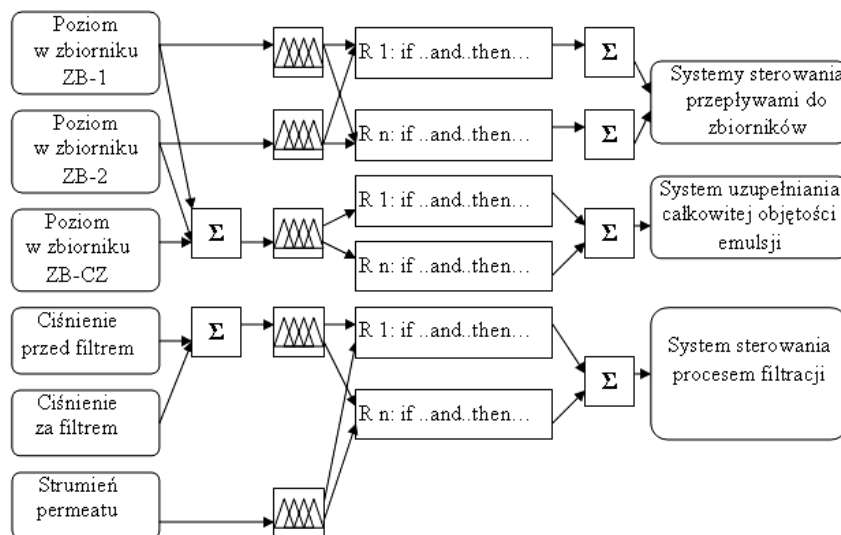
Zamieszczony na rysunku 1 system filtracyjny składa się z trzech zbiorników buforowych, filtra (prasa filtracyjna), pomp, filtra zapasowego (by-passowy) oraz systemu kontrolno-sterującego. Elementami pomiarowymi są czujniki: FI – natężenia przepływu, LI – poziomu cieczy, PI – ciśnienia, TI – temperatury. Przepływ emulsji w systemie rozpoczyna się od powracającej z bodymakera zabrudzonej cieczy – wpływa ona do zbiornika ZB-1. Następnie przepompowywana jest do zbiornika ZB-2. Tutaj następuje uzupełnianie jej ilości w obiegu oraz wstępne oczyszczanie poprzez zbieranie zanieczyszczeń z piany urządzeniem o nazwie „Oil Mop Skimmer”. Dalej kierowana jest na prasę filtracyjną (filtr membranowy), stąd oczyszczona przepływa do zbiornika ZB-CZ, dalej pompowana jest poprzez wymiennik ciepła (stabilizujący jej temperaturę) do wytłaczarki opakowań. W zbiorniku ZB 2 uzupełniana jest całkowita objętość emulsji w układzie.

ZADANIA STEROWANIA ROZMYTEGO PROCESEM FITRACJI EMULSJI

Sterowanie procesem filtracji emulsji oparte zostało na dostarczanej przez modele Takagi-Sugeno informacji na temat kolejnych stanów procesu oraz działaniu regulatorów rozmytych wg metody Mamdaniego. Schemat blokowy przedstawiający zadania realizowane przez rozmyty system sterowania przedstawiono na rysunku 2. Odpowiednie wielkości liczbowe ulegają procesowi rozmycia do postaci lingwistycznej. Wybierana jest odpowiednia reguła sterująca. Jej wynik ulega procesowi wyostrzania do postaci konkretnej wielkości sygnału sterującego.

Jednym z istotnych zadań sterowania jest uzupełnianie objętości emulsji chłodząco-smarującej znajdującej się w systemie filtracyjnym i zasilającym bodymaker. Decyzje o objętości uzupełnianej emulsji podejmuje regulator, obliczający brakującą objętość na podstawie jej poziomów w trzech zbiornikach buforowych ZB-1, ZB-2 oraz ZB-CZ. Poziomy mierzone są przez czujniki zamontowane w każdym ze zbiorników, natomiast sterowanie wielkością strumienia uzupełniającego Q_{UZ} w zbiorniku ZB-2 realizuje zaprogramowany sterownik, poprzez zmianę stopnia otwarcia zaworu w przewodach doprowadzających nową emulsję do tego zbiornika.

Proponowana procedura przełączania pomiędzy filtracją membranową a filtrami by-passowymi, powinna być uruchamiana w chwili, kiedy zapas emulsji w zbiorniku ZB-CZ i całkowita objętość przefiltrowanej emulsji przez filtry by-passowe są w stanie zaspokoić zapotrzebowanie prasy tłoczącej puszkę przy bezpiecznym strumieniu zasilającym, tj. 130 do 200 gal min⁻¹ (492÷760 dm³·min⁻¹) [Bergeson i Reiling 1997].



Rys. 2. Schemat działania rozmytego systemu sterowania
 Fig. 2. Operation scheme of the fuzzy control system

Maksymalna sumaryczna objętość trzech zbiorników buforowych wynosi $39\,275\text{ dm}^3$. Jednak całkowita objętość emulsji nie powinna być większa od $19\,500\text{ dm}^3$ (sumaryczna pojemność ZB-1 i ZB-2) celem zabezpieczenia przed możliwością przelewania się na zewnątrz zbiorników. Stopień otwarcia zaworu uzupełniania emulsji, od którego zależy wielkość przepływu strumienia masy Q_{UZ} , zmienia się w zakresie od 0 dla współczynnika otwarcia $x = 0$ do $150\text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ przy $x = 1$.

Proces sterowania opisano za pomocą zbioru reguł rozmytych. Baza reguł (tablica decyzyjna) reprezentuje wiedzę o danym procesie i ma ona postać rozmytych zdań warunkowych.

W przypadku analizowanego zadania sterowania stworzono następującą bazę reguł, opisującą relacje zachodzące między poszczególnymi parametrami rozmytymi:

1. IF ($V_{CALK.} = S$) THEN $x_{UZ} = (B)$,
2. IF ($V_{CALK.} = MS$) THEN $x_{UZ} = (B)$,
3. IF ($V_{CALK.} = M$) THEN $x_{UZ} = (MB)$,
4. IF ($V_{CALK.} = MB$) THEN $x_{UZ} = (M)$,
5. IF ($V_{CALK.} = B$) THEN $x_{UZ} = (S)$.

Zapis ten należy odczytywać następująco:

1. Jeśli objętość całkowita $V_{CALK.}$ emulsji jest mała (S), to współczynnik otwarcia zaworu x_{UZ} ustaw duży (B)

Kolejnym zadaniem realizowanym poprzez rozmyty system sterowania jest utrzymywanie takich poziomów emulsji w zbiornikach ZB-1 oraz ZB-2, aby nie występowało zjawisko przelewania się tejże emulsji na zewnątrz.

Rozwiązanie tego zadania opracowano i testowano w programie Matlab® za pomocą biblioteki funkcji do projektowania układów rozmytych *Fuzzy Logic Toolbox*. Utworzony plik zawierający procedury rozmywania, wnioskowania oraz wyostrzania posiadał rozszerzenie *FIS [The MathWorks 2002].

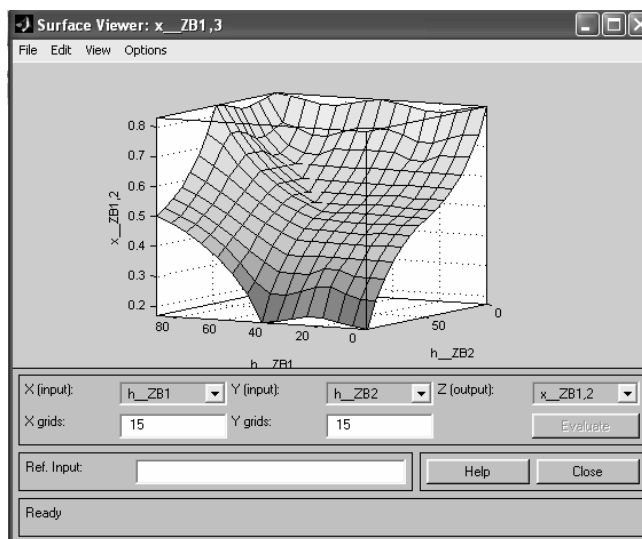
Wpisane reguły są następującej treści:

1. IF (h_ZB1 jest S) AND (h_ZB2 jest S) THEN ($x_ZB1,2 = B$)
2. IF (h_ZB1 jest S) AND (h_ZB2 jest M) THEN ($x_ZB1,2 = M$)
3. IF (h_ZB1 jest S) AND (h_ZB2 jest B) THEN ($x_ZB1,2 = S$)
4. IF (h_ZB1 jest M) AND (h_ZB2 jest S) THEN ($x_ZB1,2 = B$)
5. IF (h_ZB1 jest M) AND (h_ZB2 jest M) THEN ($x_ZB1,2 = M$)
6. IF (h_ZB1 jest M) AND (h_ZB2 jest B) THEN ($x_ZB1,2 = S$)
7. IF (h_ZB1 jest B) AND (h_ZB2 jest S) THEN ($x_ZB1,2 = B$)
8. IF (h_ZB1 jest B) AND (h_ZB2 jest M) THEN ($x_ZB1,2 = B$)
9. IF (h_ZB1 jest B) AND (h_ZB2 jest B) THEN ($x_ZB1,2 = M$)

Zapis ten należy odczytywać następująco:

1. Jeśli poziom w zbiorniku ZB 1 (h_ZB1) jest mały (S) i poziom w zbiorniku ZB 2 (h_ZB2) jest mały (S), to współczynnik otwarcia zaworu $x_ZB1,2$ należy ustawić duży (B).

Okno Surface Viewer (rys. 3) przedstawia płaszczyznę zależności współczynnika stopnia otwarcia zaworu od poziomów w zbiorniku ZB-1 i ZB-2, stanowiącą wykres powierzchni sterowania (zmiennnej wyjściowej) dla dwóch wybranych zmiennych wejściowych h_ZB-1 i h_ZB-2 .

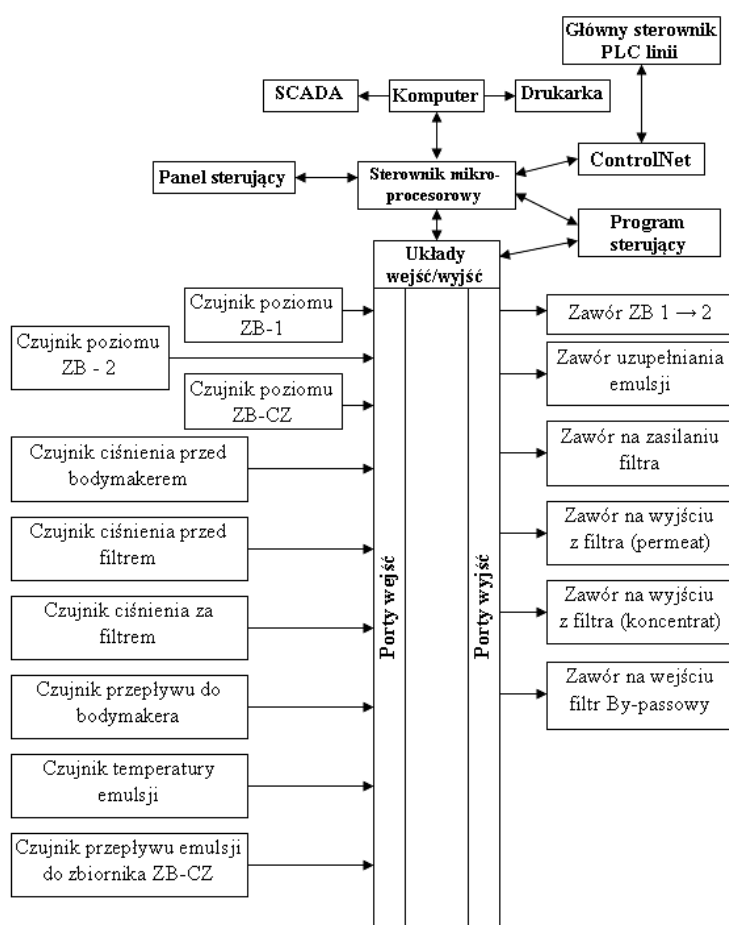


Rys. 3. Wykres powierzchni sterowania (zmiennnej wyjściowej) dla dwóch wybranych zmiennych wejściowych h_ZB-1 i h_ZB-2

Fig. 3. Diagram of the control surface (input variable) for two selected input variables h_ZB-1 and h_ZB-2

KONSTRUKCJA AUTOMATYCZNEGO SYSTEMU STEROWANIA

W sterowaniu linią filtracji emulsji wykorzystano modele poszczególnych procesów zamieszczone w pracach [Tomasik 2006a, 2006b, 2006c]. Stanowią one podstawę predykcyjnego systemu sterowania. Pozwalają na obliczanie sygnałów sterujących przy uwzględnieniu przewidywanej odpowiedzi. System predykcyjny wykorzystuje kompleksowe modele procesów oraz modele sterowania. W przypadku sterowania systemem filtracji emulsji chłodząco-smarującej, modele Takagi-Sugeno oraz modele sterowania wg Mamdaniego tworzą strukturę takiego systemu.



Rys. 4. Schemat blokowy systemu sterowania filtracją emulsji chłodząco-smarującej
 Fig. 4. Block scheme of the system for control of the cooling and lubrication emulsion filtration

W skład urządzeń koniecznych dla realizacji tego rozwiązania wchodzi m.in.:

- czujniki pomiarowe mierzące następujące wielkości: poziom emulsji w poszczególnych zbiornikach (ZB-1, ZB-2, ZB-CZ), przepływomierze (przepływ do bodymakera, uzupełnianej emulsji, permeatu), ciśnienia (na zasilaniu bodymakera, na wejściu i wyjściu filtra membranowego);
- urządzenia wykonawcze: pompy tłoczące, zawory z siłownikami elektrycznymi;
- sterownik PLC z możliwością realizacji sterowania rozmytego;
- system SCADA w celu archiwizacji pomiarów, realizacji alarmów, obserwacji trendów i wizualizacji procesu.

Schemat blokowy przedstawiający wymianę informacji w tym systemie zilustrowano na rysunku 4. Na podstawie informacji uzyskiwanej z czujników sterownik PLC realizuje zaprogramowany program i wylicza wielkości sterujące.

Jeżeli sterownik jest wyposażony w odpowiednie oprogramowanie, możliwa jest budowa układu regulacji zgodnie z logiką rozmytą. Sterownik z aplikacją sterowania rozmytego można zaprogramować m.in. w języku C, umożliwiającym tworzenie bloków programowych, które są wykonywane kilkakrotnie szybciej niż bloki napisane w logice drabinkowej. Język programowania C używany w sterownikach serii GE Fanuc 90-70 wykorzystuje powszechnie stosowany kompilator Microsoft C/C++. W przypadku zastosowania sterownika PLC firmy Siemens, np. z jednostką centralną S7-314, dysponujemy oprogramowaniem Fuzzy Control++, w którym najpierw należy skonfigurować blok danych (DB30) zawierający wszystkie informacje niezbędne do wykonywania obliczeń poprzez specjalny blok funkcyjny (FB30).

System posiada zaprogramowane komunikaty alarmowe informujące o odpowiednich stanach alarmowych. Powodują one realizację przypisanych procedur oraz informują o zaistniałych okolicznościach do nich przypisanych. Alarmy przypisane są do maksymalnych poziomów w zbiornikach, maksymalnego dopuszczalnego ciśnienia przed membraną oraz maksymalnej dopuszczalnej różnicy ciśnień na membranie (różnica transmembranowa), a także do braku emulsji w systemie uzupełniania jej stanu. Również wielkość ciśnienia na zasilaniu bodymakera w emulsję ma przypisany odpowiedni alarm informujący o innym niż zalecane ciśnieniu zasilającym.

BADANIA DOŚWIADCZALNE

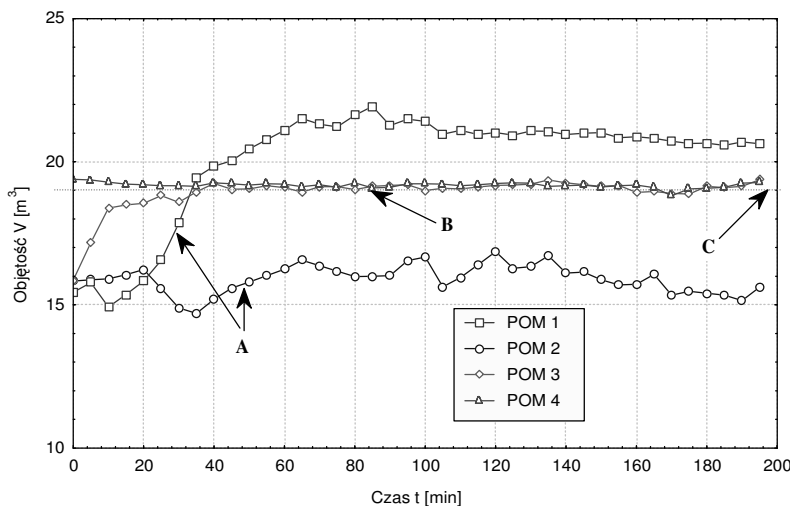
Jednostką sterującą PLC był sterownik GE Fanuc serii 90-70. Zaprogramowanie sterownika zrealizowano w zalecanym oprogramowaniu Proficy Machine Edition®. Za pomocą modułu Logic Developer PLC można tworzyć programy, wykorzystując proste w użyciu języki: drabinkowy (Ladder) oraz listy instrukcji (Instruction List) lub tekst strukturalny. Można również dołączać wcześniej przygotowane i skompilowane programy w języku C.

Odczytu wskazań dokonano z czujników pomiarowych podłączonych do systemu sterowania, odstęp pomiędzy kolejnymi odczytami wynosił 5 min. Przeprowadzono 20 serii pomiarowych. Do systemu sterowania podłączony został komputer przemysłowy, na którym zainstalowane zostało oprogramowanie wizualizacyjne rejestrujące zda-

zenia w czasie rzeczywistym oraz prowadzące archiwizację i wyświetlające alarmy. Z archiwum tego komputera pobrano dane do weryfikacji modelu.

Wyniki badań doświadczalnych pomiaru całkowitej objętości emulsji chłodząco-smarującej przedstawiono na rysunku 5.

Przed uruchomieniem systemu automatycznego sterowania odcinkiem technologicznym realizującym utrzymywanie zadanej objętości całkowitej poprzez uzupełnianie jej stanu wykonano dwie serie pomiarów na pracującej linii w trybie ręcznego sterowania, oznaczonych jako A. Pomiar 1 jest przykładem nadmiernej objętości emulsji w układzie (zbyt duża objętości uzupełnianej emulsji). Pomiar 2 jest bezpośrednim pomiarem przed uruchomieniem systemu. Pomiar 3 i 4 (B) są pomiarami zarejestrowanymi podczas pracy przedstawionego systemu sterowania opartego na logice rozmytej.



Rys. 5. Całkowita objętość emulsji chłodząco-smarującej w systemie filtracji

Fig. 5. Total volume of the cooling and lubrication emulsion in the filtration system

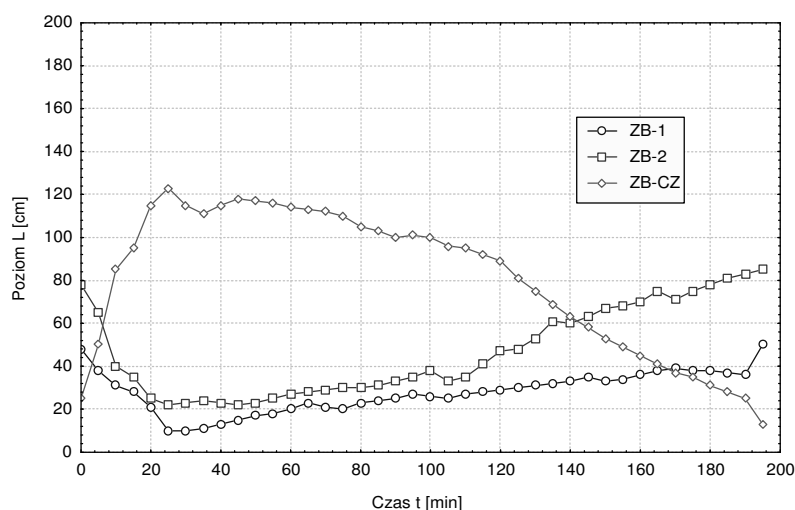
Charakterystyka lokalnych błędów względnych dla pomiaru pierwszego rozpoczyna się od błędu wynoszącego 17%. Należy jednak wziąć pod uwagę fakt, że system automatycznego sterowania rozpoczął pracę dla objętości całkowitej $15\,860\text{ dm}^3$ (pomiar 3), jako kontynuację cyklu z pomiaru 2. W trakcie dalszej pracy systemu nie zanotowano większego błędu, niż 2%.

Na rysunku 6 znajdują się charakterystyki poziomu w poszczególnych zbiornikach wykonywane na podstawie pomiarów z serii bezpośredniej przed uruchomieniem automatycznego systemu. Niski stan poziomów w tych zbiornikach jest wynikiem małej objętości całkowitej emulsji w zbiornikach.

Na rysunku 7 zamieszczono wyniki pomiarów poziomu odczytane po uruchomieniu automatycznego systemu sterowania. Poprzez A oznaczono włączenie filtrów bypassowych. System sterujący został tak zaprogramowany, aby te filtry załączały się

jeszcze przed opróżnieniem zbiornika ZB-CZ. Moment załączenia inicjowany jest przy poziomie emulsji w tym zbiorniku wynoszącym 52 cm. Pozostawiony zapas przy mniejszej wydajności filtrów ma zagwarantować niezmienny strumień emulsji chłodząco-smarującej zasilający prasę tłoczącą opakowania do końca operacji wymiany wkładów w filtrze membranowym.

Najistotniejszym parametrem przedstawianym na rysunku 7 z punktu widzenia bezpieczeństwa prowadzonego procesu wyłaczania opakowań jest utrzymywanie odpowiedniego poziomu emulsji. Wydłużono cykl filtracji membranowej. Odpowiednie jej prowadzenie pozwoliło na lepsze wykorzystywanie tego systemu.

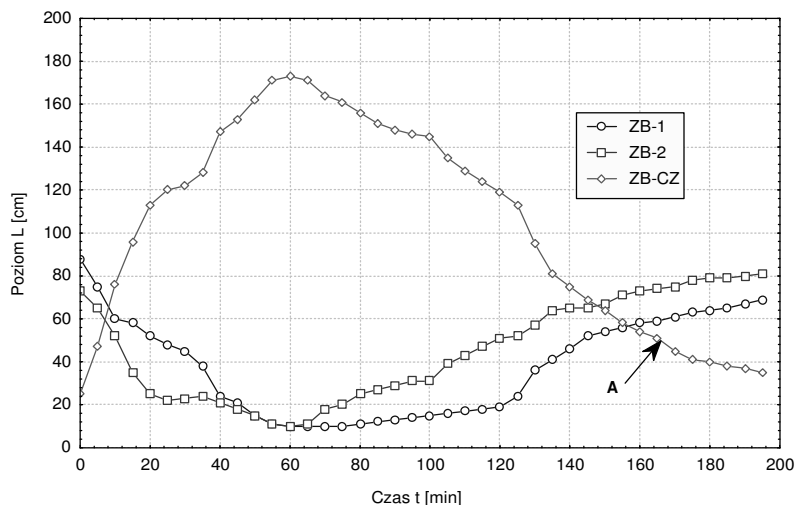


Rys. 6. Pomiar poziomu w zbiornikach przed uruchomieniem systemu automatycznego sterowania opartego na logice rozmytej

Fig. 6. Measurement of the level in the tanks before launching the automatic control system based on fuzzy logic

Poziom 52 cm, przy którym załączane są filtry by-passowe, osiągnąć po ok. 170 min od chwili uruchomienia filtracji membranowej. Przez cały cykl pracy opracowanego systemu sterowania utrzymywany był większy poziom w zbiorniku ZB-CZ, niż przy poprzednim rozwiązaniu układsterowania.

Dalsze prace nad rozwijaniem i udoskonalaniem systemu sterowania powinny zmierzać w kierunku opracowania systemu odpowiedzialnego za jakość składu chemicznego emulsji, a więc dozowanie i kontrolę dodatków polepszających właściwości chłodzące, smarujące oraz neutralizujące wpływ emulsji na smak przechowywanych w opakowaniach produktów.



Rys. 7. Charakterystyki dynamiczne poziomu emulsji sterowanego automatycznie
 Fig. 7. Dynamic characteristics of the automatically controlled emulsion level

Prezentowane w pracy rozwiązanie z powodzeniem może być stosowane w innych systemach opartych na procesach membranowych nie tylko w rolno-spożywczych procesach produkcyjnych.

WNIOSKI

1. Zaprogramowanie systemu sterowania z uwzględnieniem modeli poszczególnych procesów składających się na filtrację membranową skraca procedury strojenia regulatora oraz umożliwia bezpieczny rozruch.

2. Zastosowanie logiki rozmytej w aplikacji sterującej, zapewniło lepsze wykorzystanie emulsji w układzie. Poziom emulsji w zbiorniku zasilającym wyłaczarkę opakowań zapewniał ciągłą bezawaryjną pracę tego urządzenia.

3. Sterowanie rozmyte sprawdziło się jako narzędzie do wyznaczania parametrów sterowania w warunkach niekorzystnych zjawisk towarzyszących procesowi i wprowadzających nieliniowości do obiektów.

4. Wymierne korzyści zastosowania automatycznego systemu sterowania linią filtracji emulsji chłodząco-smarującej opartego na logice rozmytej i programowalnym sterowniku logicznym to:

- ostrzeganie o stanach alarmowych oraz pełna archiwizacja procesu,
- włączenie poprzez sieć przemysłową dostępu do systemu sterowania linią produkcyjną,
- wyeliminowanie stanów przelewania się emulsji poza zbiorniki (zmniejszenie strat, ochrona środowiska itp.),
- utrzymywanie stałej objętości emulsji chłodząco-smarującej w systemie filtracji.

PIŚMIENNICTWO

- Adamczuk P., Koter S., Kujawski W. 1996. Membrany i membranowe techniki rozdziału. Wyd. UMK, Toruń.
- Bergeson B.T., Reiling M. 1997. Wytwarzanie dwuczęściowej puszkii napojowej. Williamson, Wielka Brytania.
- Kacprzak J. 2001. Wieloetapowe sterowanie rozmyte. WNT, Warszawa.
- Pieगत A. 1999. Modelowanie i sterowanie rozmyte. Exit, Warszawa.
- Tomala D. 1999. Przeciwdziałanie zapychaniu membran filtracyjnych. Przemysł Ferment. Owoc.-Warz. 5, 22–26.
- Tomasik M. 2006a. Modelowanie procesu napełniania zbiorników w systemie filtracji membranowej. Acta Sci. Pol., Technica Agraria 5(1), 37–48.
- Tomasik M. 2006b. Model rozmyty filtracji membranowej. Acta Sci. Pol., Technica Agraria 5(1), 49–59.
- Tomasik M. 2006c. Symulacja komputerowa systemu filtracji emulsji. Acta Sci. Pol., Technica Agraria 5(2) (w druku).
- The MathWorks. 2002. Fuzzy Logic Toolbox For Use with Matlab®. User's Guide.

FUZZY LOGIC IN THE CONTROL OF THE MEMBRANE FILTRATION SYSTEM

Abstract. The study presents the problems of automatic control of the filtration system of the emulsion that cools and lubricates working elements of the packaging press (body-maker). Lack of automatic control of this technological section (the subject of the study) made it impossible to integrate it with the packaging production line for agricultural and food products. The scope of the study comprised preparation of the control system on the basis of fuzzy logic. Working out the parameters and control factors, as well as the principles for fuzzy control allowed for achieving positive results of empirical verification. Conclusions point to the benefits achieved owing to the application of fuzzy logic for modelling and control of technological processes.

Keywords: automation, emulsion, membrane filtration, fuzzy logic

Praca naukowa finansowana ze środków KBN w latach 2005–2006 jako projekt badawczy.

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 5.04.2006