

## LOGIKA ROZMYTA W REGULACJI CIŚNIENIA BEZWZGLĘDNEGO ZASILAJĄCEGO AUTONOMICZNY APARAT UDOJOWY\*

*Marcin Tomasik, Henryk Juszka, Stanisław Lis*

*Katedra Energetyki i Automatykacji Procesów Rolniczych, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie*

**Streszczenie.** Celem pracy było sformułowanie założeń i konstrukcja układu regulacji i stabilizacji ciśnienia bezwzględne, zasilającego autonomiczny aparat udojowy. Układ ten może być również stosowany w innych rozwiązaniach bazujących na tzw. doju ćwiartkowym, ale musi być spełniony warunek, że ciśnienie ssące jest dostarczane indywidualnie do każdego kubka obsługującego ćwiartkę wymienia. Zakres pracy obejmował: opracowanie koncepcji systemu sterowania, budowę rzeczywistego obiektu, zaprogramowanie sterownika PLC dla przyjętego algorytmu sterowania (bazującego na wcześniejszych badaniach naukowych autorów) oraz weryfikację pracy systemu na stanowisku laboratoryjnym. Głównym elementem układu regulacji jest sterownik mikroprocesorowy, w którym zaprogramowano algorytm regulacji ciśnienia, korzystając z logiki rozmytej. Wyniki przeprowadzonych badań doświadczalnych pozwoliły na pozytywną ocenę opisywanego rozwiązania technicznego.

**Słowa kluczowe:** aparat udojowy, logika rozmyta, regulacja, sterownik PLC

### Wprowadzenie

Jednym z głównych problemów występujących w zmechanizowanym doju krów są wahania ciśnienia panującego w komorze podstrzykowej. Niekontrolowane jego zmiany skutkują problemami zdrowotnymi wymion krów, w konsekwencji spadkiem wydajności mlecznej. W pracach naukowych można spotkać rozwiązania polegające na stabilizacji ciśnienia kierowanego do komory podstrzykowej. Przykładem takiego mechanicznego układu stabilizacji ciśnienia w kolektorze aparatu udojowego jest rozwiązanie opatentowane przez Gedymina (2006), charakteryzujące się gumową przegrodą działającą na zasadzie membrany tłumiącej skoki ciśnienia w kolektorze. Sposobem na częściowe rozwiązanie problemu jest rozdzielenie ciśnienia ssącego od ciśnienia transportującego mleko w rurociągu (Wiercioch i in., 2011). Tego typu rozwiązania były proponowane m.in. jako kolek-

\* *Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2008-2011 jako projekt badawczy N N313 154435.*

tor z rozdzielnym transportem mleka i powietrza w pracy Kupczyka (1990) oraz autonomiczny aparat udojowy w pracy Juszki i in. (2011a). Rozpatrując przepływy powietrza w kolektorze oraz zmiany objętości, można zauważyć, że poważnym problemem jest zmiana objętości komory podstrzykowej, wynikająca z pracy gumy strzykowej; powoduje ona przetłaczanie powietrza do komory powietrznej kolektora. Zjawisko to jest wynikiem działania naczyń połączonych, które stanowią te dwie komory. W trakcie doju może zmieniać się objętość komór oraz ciśnienie w nich panujące. Przedstawiony w niniejszym artykule sposób regulacji i stabilizacji podciśnienia stanowi rozbudowę takiego układu naczyń połączonych o zbiornik akumulacyjny z mikroprocesorową regulacją i stabilizacją podciśnienia.

Celem pracy było opracowanie układu regulacji i stabilizacji ciśnienia bezwzględnego, zasilającego kolumnę kolektora autonomicznego aparatu udojowego.

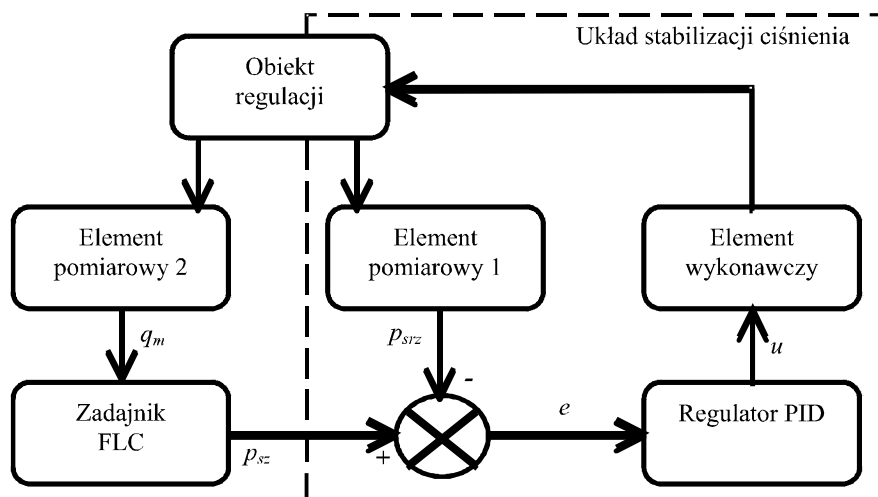
Zakres prac obejmował:

- budowę układu regulacji,
- zaprogramowanie sterownika PLC wg algorytmu zawierającego logikę rozmytą, opisującą relację ciśnienia bezwzględnego z chwilowym objętościowym natężeniem wypływu mleka z ćwiartki wymienia krowy,
- badania weryfikacyjne prowadzone na laboratoryjnym stanowisku udojowym.

### Układ regulacji ciśnienia bezwzględnego

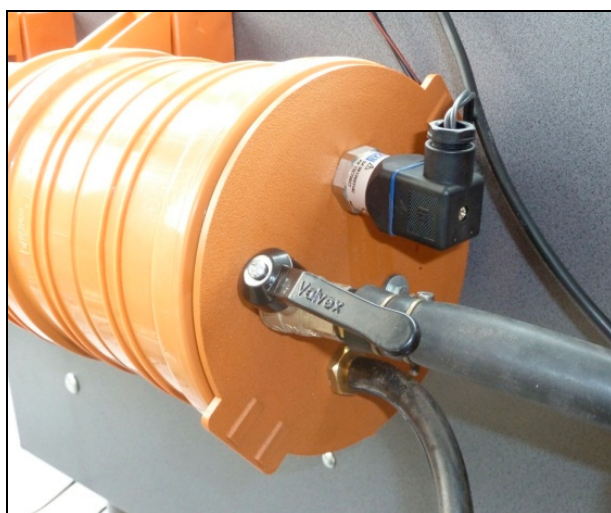
Przedstawiony układ automatycznej regulacji ciśnienia bezwzględnego w komorze podstrzykowej kubka udojowego powstał w następstwie prac modelowych prowadzonych w programie Matlab-Simulink (Lis i in., 2010; Tomasik i in., 2011). Pozytywne wyniki symulacji komputerowych pozwoliły na dopasowanie poszczególnych elementów konstrukcji tego układu. Schemat blokowy zamieszczony na rysunku 1 prezentuje przepływ sygnałów pomiędzy elementami układu sterowania. Układ automatycznej regulacji ciśnienia bezwzględnego w komorze podstrzykowej kubka udojowego wyposażony jest w dwa elementy pomiarowe. Pierwszy z nich określa wartość ciśnienia bezwzględnego powietrza  $p_s$  panującego w aparacie udojowym, skąd bezpośrednio trafia do komory podstrzykowej. Drugi wyznacza natężenie strumienia masowego mleka wypływającego ze strzyka krowy  $q_m$ . Ciśnienie bezwzględne jest wielkością regulowaną. Masowe natężenie strumienia mleka stanowi wielkość, na podstawie której obliczany jest sygnał wartości zadanej wielkości regulowanej. Układ regulacji działa w następujący sposób: *element pomiarowy 2* (czujnik strumienia masowego mleka) generuje sygnał odzwierciedlający natężenie strumienia masowego mleka wypływającego ze strzyka krowy  $q_m$ . Na podstawie tego sygnału *zadajnik FLC (Fuzzy Logic Controller)* oblicza wartość zadaną ciśnienia bezwzględnego w aparacie udojowym  $p_{sz}$ .

Węzeł sumujący porównuje obliczoną wartość zadaną z sygnałem z *elementu pomiarowego 1* (czujnik rzeczywistego ciśnienia bezwzględnego w aparacie udojowym  $p_{sz}$ ). Wynikiem jego działania jest różnica, będąca błędem regulacji  $e$ , który jest wprowadzany na wejście *regulatora PID*. *Regulator PID* oblicza oddziaływanie zwrotne na obiekt regulacji  $u$ , które realizuje *element wykonawczy* (zawór proporcjonalny).



Rysunek 1. Schemat układu automatycznej regulacji  
Figure 1. Schematic representation of the autonomous control system

Głównym elementem układu sterowania i stabilizacji ciśnienia powietrza jest zbiornik tłumiący zmiany ciśnienia absolutnego wykonany z PCV (rys. 2). Wyposażony jest on w króćce do podłączania przewodów doprowadzających: ciśnienie absolutne z pompy próżniowej i atmosferyczne za pośrednictwem zaworu proporcjonalnego.



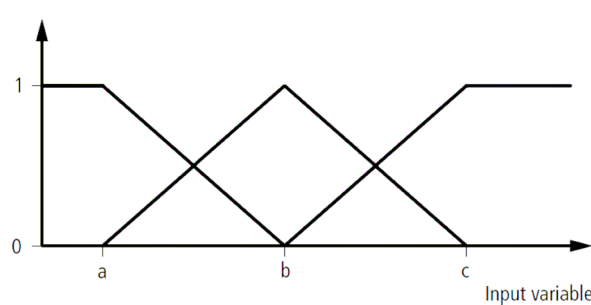
Rysunek 2. Układ stabilizacji podciśnienia  
Figure 2. The under pressure stabilization system

Zadaniem tego zaworu jest dozowanie powietrza atmosferycznego tak, aby uzyskiwać wartość wyznaczaną przez zadajnik FLC. Układ posiada czujnik ciśnienia bezwzględnego.

### Zadajnik ciśnienia bezwzględnego

Zadajnik jest elementem mającym za zadanie wyznaczyć wartość ciśnienia bezwzględnego w kubku udojowym dla aktualnej wartości natężenia strumienia masowego mleka, wypływającego ze strzyka wymienia krowy. Programowy zadajnik zrealizowano, bazując na logice rozmytej. Wykorzystano do tego celu blok funkcyjny FuzzyLogic z jednym wejściem, jednym wyjściem oraz trzema regułami sterowania. „Rozmycie” wielkości wejściowej (Input variable) w bloku funkcyjnym zadajnika FLC przeprowadzono wg następującej procedury (rys. 3).

- zmienną wejściową jest natężenie strumienia masowego mleka wypływającego ze strzyka krowy,
- zmienną wyjściową jest ciśnienie bezwzględne w komorze podstrzykowej,
- wartość „1a” natężenia wypływu mleka wynosi  $0,8 \text{ (g}\cdot\text{s}^{-1}\text{)}$ ,
- wartość „1b” natężenia wypływu mleka wynosi  $2 \text{ (g}\cdot\text{s}^{-1}\text{)}$ ,
- wartość „1c” natężenia wypływu mleka wynosi  $25 \text{ (g}\cdot\text{s}^{-1}\text{)}$ .



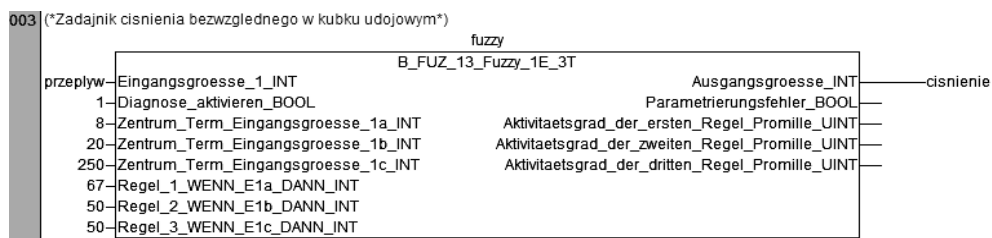
Rysunek 3. Rozmywanie wielkości wejściowej na 3 przedziały w sterowniku PLC  
 Figure 3. Fuzzing the input value into 3 sections in PLC controller

Docelowo blok ten będzie posiadał dwa wejścia, drugie będzie stanowił pochodną po czasie sygnału pierwszego, dająca informację o trendzie zmian wypływu mleka. Również reguł sterujących będzie więcej, aby uzyskać większą precyzję sterowania.

Dobrano następujące reguły sterowania:

- jeśli natężenie wypływu mleka przyjmuje wartość „1a”, to ciśnienie bezwzględne jest równe 50 (kPa),
- jeśli natężenie wypływu mleka przyjmuje wartość „1b”, to ciśnienie bezwzględne jest równe 60 (kPa),
- jeśli natężenie wypływu mleka przyjmuje wartość „1c”, to ciśnienie bezwzględne jest równe 67 (kPa).

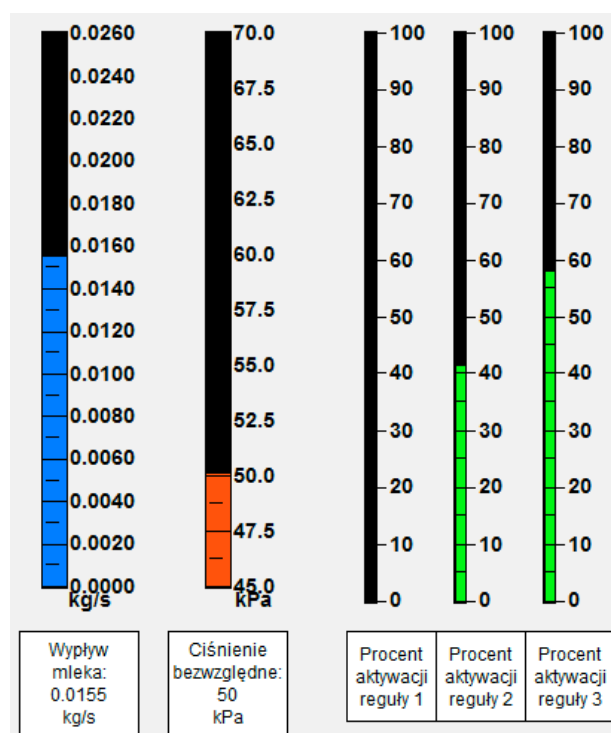
Blok funkcyjny zadajnika FLC zaprogramowany dla sterownika PLC przedstawiono na rysunku 4.



Rysunek 4. Blok funkcyjny zadajnika FLC

Figure 4. Functional block of PLC controller

Do weryfikacji pracy układu sterowania z zadajnikiem FLC zaprogramowano wizualizację przedstawiającą jego działanie (rys. 5). W oknie widoczne są: chwilowe masowe natężenie wypływu mleka i odpowiadające mu ciśnienie bezwzględne (wyliczone przez zadajnik) oraz procent aktywacji poszczególnych reguł sterowania.



Rysunek 5. Wizualizacja pracy zadajnika ciśnienia bezwzględnego

Figure 5. Visualization of the operation of the absolute pressure controller

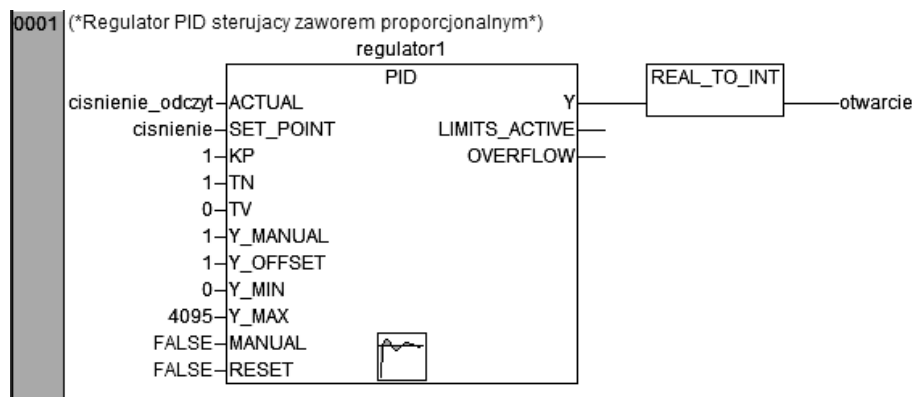
### Regulator ciśnienia powietrza dla kolektora aparatu udojowego

Aby skutecznie sterować ciśnieniem bezwzględny, należy zaprogramować regulator PID. Zadaniem regulatora jest sterowanie zaworem proporcjonalnym tak, aby w zbiorniku panowało ciśnienie wyznaczone przez zadajnik FuzzyLogic (Juszka i in., 2011b). Regulator PID pracuje w układzie sprzężenia zwrotnego. Konieczny dla działania regulatora PID błąd regulacji  $e$  (rys. 1) wyznaczany jest jako różnica pomiędzy wartością z FLC a wartością zmierzona przez czujnik ciśnienia absolutnego umieszczony w zbiorniku.

Oprogramowanie CoDeSys przeznaczone do zaprogramowania sterownika PLC posiada bibliotekę *Util.lib.*, w której znajduje się blok funkcyjny regulatora PID. W bloku tym konieczne jest zaprogramowanie następujących parametrów niezbędnych do jego poprawnej pracy:

- wartość rzeczywista wielkości regulowanej,
- wartość zadana,
- współczynnik wzmocnienia części P,
- czas całkowania, odwrotny współczynnik wzmocnienia części I,
- czas różniczkowania, współczynnik wzmocnienia części D,
- offset wielkości nastawczej,
- dolna i górna granica wielkości nastawczej.

Blok funkcyjny regulatora PID widoczny z poziomu programatora sterownika PLC zamieszczono na rysunku 6.



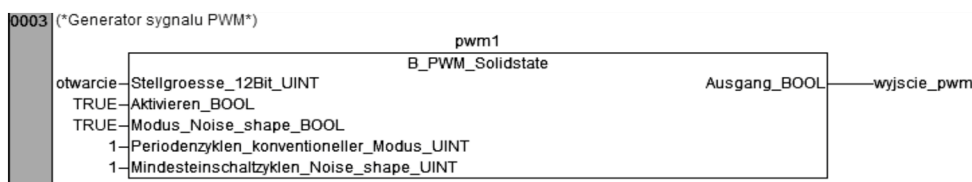
Rysunek 6. Blok funkcyjny regulatora PID  
 Figure 6. Functional block of PID controller

Wartość wyjściowa bloku PID jest zmienną typu REAL, dlatego na wyjściu regulatora zastosowano dodatkowo blok funkcyjny REAL\_TO\_INT przekształcający wartość typu REAL na wartość całkowitą typu INT. Zmiana typu danych wynika z wejścia bloku PWM (modulacja szerokości impulsu) sterującego zaworem, które oczekuje danych 12 bitowych typu INT.

### Sterowanie zaworem

W prowadzonych badaniach doświadczalnych testowano dwie metody sterowania zaworem: za pomocą sygnału PWM oraz sygnałem analogowym (opcja zaworu proporcjonalnego). Sygnał PWM (Pulse-Width Modulation) to sygnał sterujący o regulowanej szerokości impulsów. Sterowanie PWM pozwala sterować w sposób ciągły za pomocą wartości dyskretnych (0,1). Dzięki temu za pomocą wyjścia cyfrowego można sterować np. zaworem proporcjonalnym. Częstotliwość sygnału PWM jest stała i musi być na tyle duża, by element wykonawczy nie oscylował z tą częstotliwością, czyli okres musi być krótszy niż czas bezwładności elementu wykonawczego.

W programie CoDeSys sygnał PWM uzyskuje się za pomocą bloku funkcyjnego B\_PWM\_Solidstate (rys. 7), należącego do biblioteki Closed-Loop Control Toolbox.

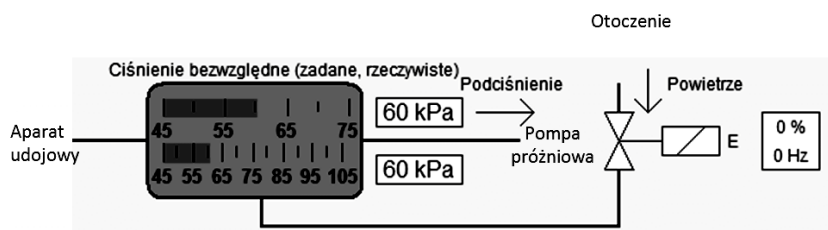


Rysunek 7. Blok funkcyjny generujący sygnał PWM

Figure 7. Functional block generating PWM signal

Niestety zastosowanie tego sygnału w sterowniku Moeller XC wiąże się z pewnymi ograniczeniami. Okres sygnału nie może być krótszy niż czas trwania cyklu programu. W badaniach doświadczalnych ustalono, że maksymalna uzyskiwana częstotliwość przy kompletnym programie sterującym wynosi około 160 Hz. Zastosowanie zaworu proporcjonalnego z sygnałem wejściowym analogowym przyniosło lepsze rezultaty, jednak jest kosztowniejsze w realizacji o ok. 50%.

Prezentowany układ podciśnienia odzwierciedlono w formie wizualizacji, która umożliwia obserwację jego pracy oraz rejestrację danych do analizy (rys. 8).



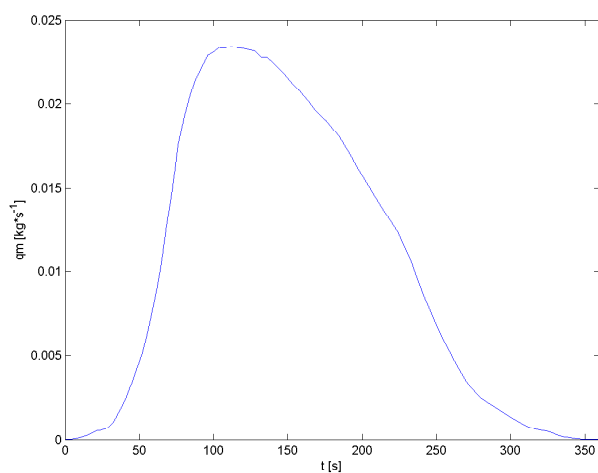
Rysunek 8. Wizualizacja układu podciśnieniowego

Figure 8. Visualization of the under pressure system

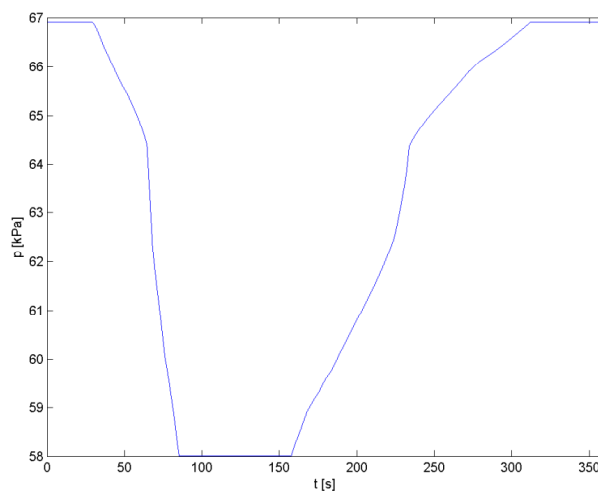
### Analiza pracy zadajnika ciśnienia bezwzględnego

Rysunek 9 (a i b) przedstawia wykresy obrazujące działanie układu sterowania i stabilizacji ciśnienia absolutnego dostarczanego do kolektora. Wartość ciśnienia rejestrowano za pomocą karty pomiarowej. Zastosowano czujniki ciśnienia absolutnego o dokładności 0,25%. Układ testowano w warunkach laboratoryjnych. Jako cieczy mlekozastępczej użyto wody destylowanej (Ordolff, 2001; Zaninelli i Tangorra, 2006).

a)



b)



Rysunek 9. Wynik działania układu sterowania i stabilizacji; a) – natężenie strumienia masowego mleka, b) – ciśnienie bezwzględne powietrza w kolektorze

Figure 9. Results of operation of the control and stabilization system; a) – intensity of the milk mass stream, b) – absolute pressure of air in the collector



Wykres „a” przedstawia średnią wartość strumienia masowego mleka wypływającego ze strzyka krowy ( $qm$ ) podczas całego doju (Ambord i Bruckmaier, 2010). Widoczną charakterystykę uzyskano poprzez dozowanie cieczy do kolektora ręcznym zaworem. Przebieg tej wielkości fizycznej został zaczerpnięty z literatury. Stanowiła ona sygnał wejściowy dla zadajnika FLC. Na wykresie „b” przedstawiono przebieg ciśnienia bezwzględnego ( $p$ ) panującego w kubku udojowym, będący wynikiem działania omawianego zadajnika FLC. Wyniki pomiarów ciśnienia rejestrowanych przez kartę pomiarową trafiały do programu Matlab, gdzie w czasie rzeczywistym były filtrowane.

Na podstawie wykresów zamieszczonych na rysunku 9 można stwierdzić, że ciśnienie bezwzględne w kubku udojowym odpowiada przyjętym założeniom zmian ciśnienia, tzn. nie przekracza dopuszczalnych wartości, zmiany zachodzą płynnie, istnieją korelacje pomiędzy chwilowym objętościowym natężeniem wypływu mleka a ciśnieniem ssącym w kolektorze.

Ponadto stwierdzono, że zaprogramowany system sterujący zadajnikiem ciśnienia bezwzględnego powietrza dla komory podstrzykowej kubka udojowego spełnia postawione przed nim zadania. Kolejnym krokiem w badaniach nad rozwojem tego układu będzie jego weryfikacja w warunkach eksploatacyjnych.

## Wnioski

1. Zaprogramowana metodami logiki rozmytej aplikacja, realizująca funkcję zadajnika ciśnienia bezwzględnego, pozwala na skorelowanie natężenia wypływu mleka ze strzyka krowy z ciśnieniem bezwzględnym, panującym w komorze podstrzykowej kubka udojowego. Taki moduł sterujący nie wpływa znacząco na wydłużenie cyklu programowego sterownika PLC XC-101.
2. Dla polepszenia dokładności pracy układu i lepszego odzwierciedlenia powiązań pomiędzy ciśnieniem ssącym w komorze podstrzykowej a chwilowym wypływem mleka ze strzyka wymienia krowy, konieczne jest zwiększenie liczby reguł oraz rozmycie wartości na większą liczbę przedziałów w regulatorze FLC.

## Literatura

- Ambord, S.; Bruckmaier, R. M. (2010). Milk flow-dependent vacuum loss in high-line milking systems: Effects on milking characteristics and teat tissue condition. *J. Dairy Sci*, 93, 3588-3594.
- Gedymin, M. *Kolektor do dojarki*. Instytut Technologiczno-Przyrodniczy. Falenty. Polska. Opis patentowy 208606. Zgłosz. P. 371053 z 05.11.2004. Opubl. 15.05.2006.
- Juszka, H.; Lis, S.; Tomasik, M. (2011a). Koncepcja dwukomorowego kolektora autonomicznego aparatu udojowego. *Inżynieria Rolnicza*, 8(133), 161-165.
- Juszka, H.; Lis, S.; Tomasik, M. (2011b). Validation of a model of the negative pressure set value signal formation in the cow machine milking. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 56(2), 68-71.
- Kupczyk, A. *Kolektor do dojarki*. Instytut Budownictwa, Mechanizacji i Elektryfikacji Rolnictwa. Warszawa. Polska. Opis patentowy, 160311. Zgłosz. P. 279845 z 13.06.1989. Opubl. 19.03.1990.
- Lis, S.; Juszka, H.; Tomasik, M. (2010). Sterowanie podciśnieniem w autonomicznym aparacie udojowym. *Inżynieria Rolnicza*, 5(123), 129-135.

- Ordolff, D. (2001). Introduction of electronics into milking Technology. *Computers and Electronics in Agriculture*, 30, 125–149.
- Tomasik, M.; Juszka, H.; Lis, S. (2011). Blok funkcyjny „Fuzzy Logic” w sterowaniu PLC autonomicznym aparatem udojowym. *Inżynieria Rolnicza*, 8(133), 277-283.
- Wiercioch, M.; Luberański, A.; Szlachta, J.; Skalska, D. 2011. Wpływ zakłóceń w instalacji próżniowej dojarki na parametry pracy wybranych pulsatorów. *Inżynieria Rolnicza*, 8(133), 285-292.
- Zaninelli, M.; Tangorra, F.M. (2006). Development and testing of a „free-flow” conductimetric milk meter. *Computers and Electronics in Agriculture*, 57, 166-176.

## **FUZZY LOGIC IN THE REGULATION OF THE ABSOLUTE PRESSURE SUPPLYING AN AUTONOMOUS MILKING UNIT**

**Abstract.** The objective of the paper was to formulate and construct the control and stabilization system of absolute pressure, supplying autonomous milking unit. This system may also be used in different solutions basing on the so-called quarter milking, however, one requirement must be met - suction pressure is individually supplied to each cup operating a quarter of an udder. The scope of the paper included: developing the concept of the control system, construction of a real facility, programming PLC controller for the accepted control algorithm (basing on the previous scientific research of authors) and verification of the system operation on the laboratory stand. The main element of the control system is a microprocessor controller, where algorithm of pressure control, with the use of fuzzy logic, was programmed. Results of the experimental research allowed a positive assessment of the described technical solution.

**Key words:** milking unit, fuzzy logic, control, PLC controller.

**Adres do korespondencji:**

Marcin Tomasik; e-mail: Marcin.Tomasik@ur.krakow.pl  
Katedra Energetyki i Automatykacji Procesów Rolniczych  
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie  
ul. Balicka 116B  
30-149 Kraków