

Mariusz ZYGMUNT

DZIAŁ ELEKTRO – AUTOMATYKI, GRUPA ŻYWIEC S.A., BROWAR W LEŻAJSKU
ul. II Armii Wojska Polskiego 5, 37-300 Leżajsk

Stabilizacja parametrów pracy pompy próżniowej z wykorzystaniem regulatora rozmytego

Mgr inż. Mariusz ZYGMUNT

W roku 2005 ukończył studia na wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej (specjalność systemy i sieci komputerowe). W roku 2009 ukończył studia doktoranckie na wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej. Od 1998 r. pracuje w dziale automatyki w 'Browarze w Leżajsku'. Interesuje się automatyką przemysłową, programowalnymi sterownikami logicznymi, systemami ekspertowymi i logiką rozmytą.



e-mail: mariusz.zygmunt@grupazywiec.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono praktyczne zastosowanie regulatora rozmytego do stabilizacji parametrów pracy pompy próżniowej. Opisano wymagania stawiane regulatorowi od strony podzespołów wykonawczych, jak również ograniczenia wynikające z zastosowanego układu sterowania. Zaprezentowano strukturę, tablicę decyzyjną, zmienne wejściowe i wyjściowa oraz uzyskaną powierzchnię sterowania. Pokazano zachowanie regulatora podczas pracy przy stałej wartości temperatury zadanej, przy jej zmianie skokowej, a także jej wpływ na parametry pracy pompy.

Słowa kluczowe: regulator rozmyty, układy sterowania.

Stabilization of vacuum pump work parameters with use of a fuzzy logic controller

Abstract

The paper presents practical application of a fuzzy logic controller to stabilization of work parameters of a vacuum pump shown in Fig. 1 cooperating with the machine filling bottles with beer. A fragment of the filling machine visualisation system (Fig. 2) containing a controlled object together with description of its main components is shown in Paragraph 2. The third paragraph of the paper is concerned with the requirements given to a controller from the executive component as well as limitations for program development resulting from the applied controller system. Paragraph 4 deals with a fuzzy controller. There is presented its structure (Fig. 3), controller decision chart (Fig. 4), input variables (Figs. 5 and 6) and output variable (Fig. 7). The obtained control surface of the applied controller is shown in Fig. 8. The description of program implementation in Simatic S5 controller is given in the fifth paragraph. The developed program includes a simplified way of calculations resulting from limitations of the central processing unit of the applied controller. In the sixth paragraph there are presented the results of operation controlled by the vacuum pump controller. The controller reaction during work at the given constant value of temperature and interferences is shown in Fig. 9. The unit was also tested with a step change of the given temperature and its influence on the obtained vacuum of the pump input was investigated.

Keywords: fuzzy logic controller, control systems.

1. Wstęp

W rozwiązaniach obecnej automatyki przemysłowej regulatory są niemalże podstawowymi komponentami układów sterowania. Jednakże klasyczne (analityczne) regulatory, zarówno jako osobne urządzenia, jak i zaimplementowane w postaci specjalizowanych funkcji w sterownikach przemysłowych (PLC) charakteryzują się pewnymi ograniczeniami przy sterowaniu obiektami o charakterystyce nieliniowej. Przy sterowaniu takimi obiektami rozwiązaniem może być algorytm oparty nie jak w przypadku regulatora klasycznego na zestawie wyliczeń analitycznych, lecz na bazie wiedzy składającej się z zestawu reguł odwzorowujących wiedzę

i doświadczenie w sposobie sterowania danym obiektem przez operatora, a często także jego projektanta.

Poniższy artykuł opisuje konkretne rozwiązanie dotyczące układu sterowania pracą pompy próżniowej przedstawionej na rys. 1, będącej integralnym podzespołem maszyny do rozlewania i kapslowania piwa butelkowego zwanej popularnie 'monoblokiem' w Browarze w Leżajsku [7].

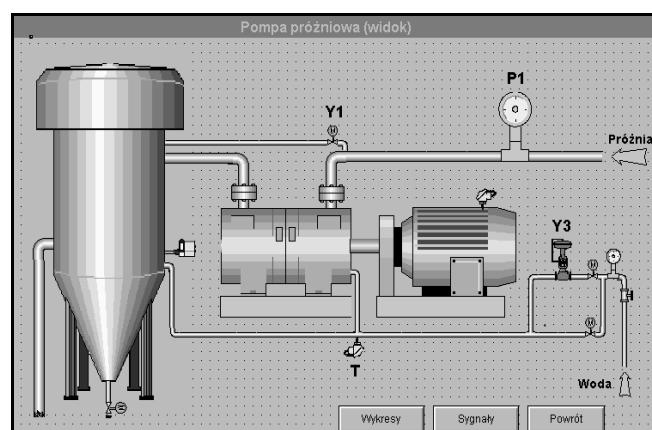


Rys. 1. Pompa próżniowa zintegrowana z monoblokiem
Fig. 1. Vacuum pump integrated with a filling machine

Istniejący układ sterowania rozbudowano programowo o moduł regulatora rozmytego FLC (ang. Fuzzy Logic Controller) [1, 2, 3, 4] uwzględniając ograniczenia zastosowanego sterownika [5, 6]. Moduł ten zapewnia stabilność pracy pompy próżniowej poprzez utrzymanie prawidłowych parametrów podciśnienia, które jest kluczowym czynnikiem zapewniającym zgodność rozlewane go piwa pod względem technologicznym i jakościowym z obowiązującymi coraz bardziej rygorystycznymi wymaganiami.

2. Obiekt sterowania

Schemat budowy fragmentu monobloku, tj. pompę próżniową wraz z oprzyrządowaniem, przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Fragment systemu wizualizacji monobloku – widok pompy próżniowej
Fig. 2. Fragment of filling machine visualisation system - view of the vacuum pump

Najważniejszymi podzespołami w systemie sterowania są:

- a) pompa próżniowa firmy „Speak Pumper” model VH 0500-41-30-000, służąca do wytworzenia podciśnienia niezbędnego dla prawidłowego technologicznie procesu napełniania butelek piwem,
- b) T – termometr (Pt100) z wbudowanym konwerterem sygnału wyjściowego (4-20 mA) mierzący temperaturę wody dostarczanej do pompy próżniowej,
- c) Y1 – zawór odprężający firmy „Burkert” typ 5281, zapewniający odprężanie pompy podczas gdy monoblok nie pracuje na pełnej wydajności, zapobiegając zjawisku kawitacji i jej skutkom,
- d) Y3 – zawór regulacyjny firmy „Burkert” typ 2632, regulujący dopływ świeżej wody uzdatnionej o temp. ok. 10 °C, uzupełniający jej ubytki oraz zapewniający utrzymanie stałej temperatury w pompie (ciepło wytwarzane podczas kompresji),
- e) P1 – przetwornik ciśnienia firmy „Endres+Hauser” Cerabar M PMP46-RE, o zakresie pomiarowym od -1 do 4 bara oraz wyjściu prądowym (4-20 mA). Jego zadaniem jest pomiar podciśnienia wytwarzanego przez pompę.

3. Ograniczenia układu sterowania

Program użytkowy sterujący pracą monobloku zaimplementowano na sterowniku Simatic S5 115U 944B. Jest to nienajmłodsza, jednak dobra i stabilna jednostka posiadająca ograniczenia w zakresie zasobów, mocy obliczeniowej oraz braku modułu wspomagającego obliczania na liczbach zmiennoprzecinkowych.

Ze względu na złożoność zaimplementowanego programu użytkowego oraz obsługę modułów komunikacyjnych wymagane było jak najmniejsze obciążenie sterownika dodatkowymi funkcjami programowymi. Znaczący wpływ na zajętość zasobów sterownika mają moduły wymiany informacji z podzespołami peryferyjnymi składające się z następujących trzech części:

- a) komunikacji szeregowej (protokół RK-512) z panelem operatorskim (Simatic PC 677), służącym do interaktywnej współpracy systemu sterowania z operatorem oraz do archiwizacji danych z przebiegu procesu technologicznego,
- b) komunikacji szeregowej (protokół 3964(R)) ze specjalizowanym sterownikiem nalewu firmy Siemens znajdującym się na kopule monobloku i odpowiadającym za ciągłe zarządzanie pracą 108 nalewaków z których każdy jest sterowany 4 zaworami elektromagnetycznymi,
- c) komunikacji szeregowej (SINEC L2-DP) z modułami binarnymi i analogowych wejść/wyjść rozproszonych.

Opisane moduły komunikacyjne obsługiwane są kolejno po wykonaniu programu użytkowego w obiegu każdej pętli programowej, a dodatkowo wykonywany jest podprogram kontroli rejestru przesuwnego przy wykorzystaniu przerwań sprzętowych (Simatic 6ES5 434-7LA12). Przesunięcie kopuły o 1 butelkę generuje 1 takt główny i 5 podtaktów, co przy maksymalnej wydajności daje około 70 przerwał w ciągu sekundy.

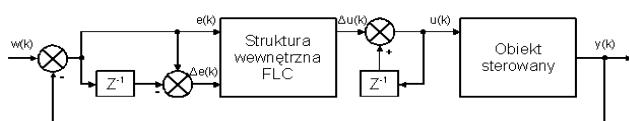
Nadmierne rozbudowywanie programu użytkowego negatywnie wpłynęłoby nie tylko na dostępne zasoby sterownika, ale także na wydłużenie cyklu obiegu pętli programowej, co z kolei pogorszyłoby komunikację z poszczególnymi modułami komunikacyjnymi, a szczególnie spowolniłoby transfer danych do systemu wizualizacji. Kolejnym ograniczeniem był podzespol wykonańcy – zawór regulacyjny sterujący płynnym dozowaniem zimnej wody (Y3). Jego budowa oparta jest na przesuwającym się w korpusie tłoku, przemieszczającym się skokowo na zasadzie upuszczania i dobijania powietrza przez pozycjoner ustalający jego otwarcie. Rozwiążanie to nie pozwala na wykonanie małych zmian otwarcia zaworu przy niewielkich zmianach sygnału sterującego wystawianego przez regulator. Rozwiążaniem było takie zestroszenie regulatora, aby wystąpienie najmniejszej zmiany uchybu było przekładane na proporcjonalnie dużą zmianę sygnału wyjściowego.

4. Regulator FLC

Zastosowanie klasycznych układów regulacji temperatury nie pozwoliło na utrzymanie poziomu regulacji w zadanym zakresie

zmian $\pm 0,3$ °C, ze względu na bardzo nieliniowy charakter obciążenia układu regulacji temperatury, którym jest pompa próżniowa. Ponadto, trudności w utrzymaniu temperatury w tym przedziale wynikały z bardzo niestabilnych warunków pracy objawiających się zmienną ilością odpompowywanego gazu z monobloku, a także ustawniczym załączaniem układu odprężania. Zarówno pierwotnie zamontowany układ mechanicznego regulatora opartego na termostacie firmy ‘Danfoss’, jak i następnie zaprogramowany system sterowania wykorzystujący dwustanowy element wykonawczy, dawały rozrur temperatury wody zasilającej pompę próżniową w granicach $\pm 1,0$ °C. Na wbudowanym w sterowniku programowym regulatorze PID udało się uzyskać wahania na poziomie $\pm 0,5$ °C. Dopiero odpowiednio zestroszony regulator FLC zapewnił utrzymywanie poziomu regulacji w zadanym zakresie oraz płynne zmiany temperatury w procesie regulacji przestawnej tzn. odpowiedzi układu na zmiany temperatury zadanej.

Zastosowano układ regulatora typu PI, przedstawiony na rys. 3.



Rys. 3. Struktura układu sterowania z regulatorem FLC
Fig. 3. Structure of control system with FLC

Znaczenie poszczególnych symboli:

- $w(k)$ – wartość zadana
- $e(k)$ – wartość uchybu
- $\Delta e(k)$ – wartość zmiany uchybu ($k-1$)
- $u(k)$ – wartość sygnału sterującego
- $\Delta u(k)$ – wartość zmiany sygnału sterującego
- $y(k)$ – wartość sygnału wyjściowego ze sterowanego obiektu.

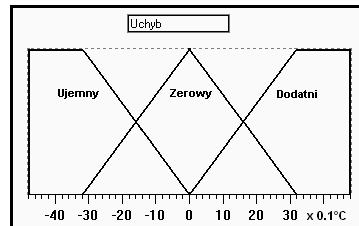
Użyto system Mamdaniego, w którym sygnałami wejściowymi są uchyb $e(k)$ i jego zmiana $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$, a wyjściem regulatora jest zmiana sygnału sterującego $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$.

Baza wiedzy w formie tablicy decyzyjnej przedstawiona na rys. 4 zawiera 9 reguł dobranych wg zasady zdrowego rozsądku, których poprawność potwierdzono przeprowadzonymi próbami.

Zm_uchyb		Uchyb		
		Ujemna	Zerowa	Dodatnia
Ujemny		Zerowe	Dodatni	Dodatni
Zero		Ujemne	Zerowe	Dodatni
Dodatni		Ujemne	Ujemne	Zerowe

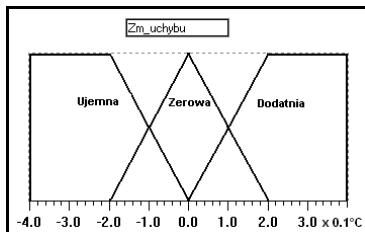
Rys. 4. Tablica decyzyjna regulatora
Fig. 4. Controller decision chart

Funkcja wejściowa ‘Uchyb’ $e(k)$ (rys. 5), składa się z trzech zbiorów rozmytych (Ujemny, Zero, Dodatni).



Rys. 5. Zbiory rozmyte opisujące uchyb $e(k)$
Fig. 5. Fuzzy logic sets describing error $e(k)$

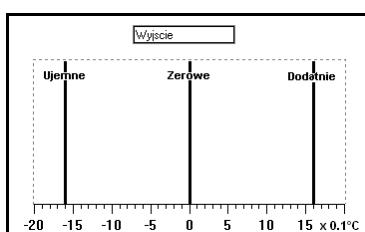
Funkcja wejściowa ‘Zmiana uchybu’ $\Delta e(k)$, również składa się z trzech zbiorów rozmytych (Ujemna, Zero, Dodatnia), gdzie aktualna zmiana uchybu (wartość ostra $\Delta e(k)$) jest przyporządkowywana do poszczególnych zbiorów (rys. 6).



Rys. 6. Zbiory rozmyte opisujące zmianę uchybu $\Delta e(k)$
Fig. 6. Fuzzy logic sets describing the change of error $\Delta e(k)$

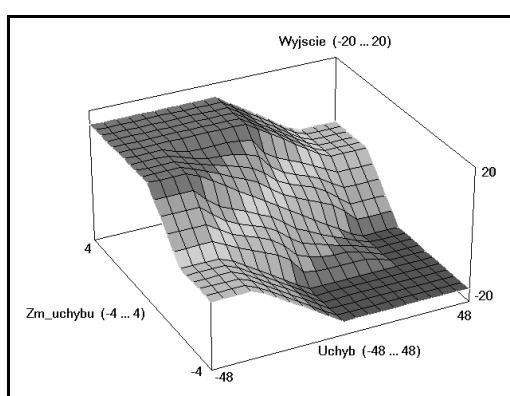
Osie wszystkich funkcji, zarówno wejściowych jak i wyjściowych, są w jednostkach temperatury ($x 0,1^{\circ}\text{C}$).

Do wyliczenia wyjścia $\Delta u(k)$ wykorzystano metodę wysokości (popularnie zwaną metodą singletonów), ze względu na minimalną złożoność obliczeniową. Na rys. 7 przedstawiono zbiór singletonów wyjściowych (Ujemne, Zerowe i Dodatnie).



Rys. 7. Singletons opisujące zmianę wyjścia $\Delta u(k)$
Fig. 7. Singletons describing output change $\Delta u(k)$

W ten sposób uzyskano powierzchnię sterowania regulatora przedstawioną na rys. 8.



Rys. 8. Powierzchnia sterowania
Fig. 8. Control surface

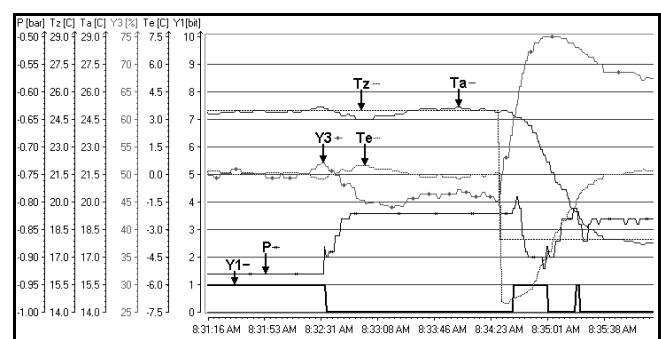
5. Implementacja w sterowniku Simatic S5

Brak obsługi liczb zmiennoprzecinkowych niemalże wymusił niestandardowe podejście podczas realizacji regulatora FLC. Polegało ono na uproszczeniu bazy reguł, braku normalizacji zmiennych wejściowych i wyjściowej oraz uproszczeniu modułu defuzyfikacji. Przy obliczeniach funkcji przynależności zamiast standardowego mnożenia wykorzystano funkcje przesunięcia bitów SLW w słowach reprezentujących wartości, co daje mnożenie danej wartości przez wielokrotność liczby 2 (2^n).

Program został zaimplementowany w sterowniku przy użyciu bloku: funkcyjnego FB zawierającego program użytkowy, bloku danych DB przechowującego parametry i dane oraz funkcji specjalnej FB 243 (dzielenie zmiennych stałoprzecinkowych), której użyto do wyliczenia wartości zmiany wyjścia $\Delta u(k)$.

6. Wyniki

Ciągła archiwizacja wyników pracy układu pozwoliła na analizę przebiegu pracy regulatora. W pierwszej części rys. 9 (do 8:34:23 AM) przedstawiono pracę układu przy stałej temperaturze zadanej T_z i zmiennych obciążeniach pompy próżniowej. Pochodzą one podczas pracy monobloku ze zmianą szybkości lub załączania zaworu odpowiadającego pompie próżniowej Y_1 przy zatrzymaniu lub obniżonej wydajności.



Rys. 9. Wyniki pracy układu pompy próżniowej
Fig. 9. Results of vacuum pump work

Druga część wykresu (po 8:34:23 AM) przedstawia reakcję regulatora na skokową zmianę wartości temperatury zadanej T_z z 25 na 18°C przy dodatkowych zakłócenach spowodowanych pracą zaworu Y_1 . Gdy wartość uchybu temperatury Te ustabilizuje się w okolicach zera przy braku zakłóceń, widoczna jest zmiana uzyskiwanego podciśnienia P na wejściu pompy próżniowej. Parametr ten obrazuje zmianę uzyskiwanego podciśnienia P w zależności od temperatury wody zasilającej pompę próżniową.

7. Podsumowanie

W artykule przedstawiono praktyczne zastosowanie regulatora rozmytego do stabilizacji parametrów pracy pompy próżniowej współpracującym z urządzeniem do rozlewania piwa butelkowego w 'Browarze w Leżajsku'. Pracujący od maja 2009 r. układ stabilizuje działanie pompy próżniowej wpływając na poprawę jednego z istotnych parametrów rozlanego do butelek piwa (*foreign gas*), co potwierdzają systematycznie prowadzone badania przez zakładowe laboratorium analityczne.

Dalsza rozbudowa układu (badania) polegała będzie na zaprojektowaniu i implementacji programowej modułu automatycznej kompensacji temperatury wody zasilającej pompę w celu uzyskania stabilnego (na zadanym poziomie) podciśnienia z wykorzystaniem systemu ekspertowego opartego na sieciach Petriego.

8. Literatura

- [1] Driankov D., Hellendoorn H., Reinfrank M.: Wprowadzenie do sterowania rozmytego. WNT, Warszawa 1996.
- [2] Piegat A.: Modelowanie i sterowanie rozmyte. EXIT, Warszawa 2003.
- [3] Rutkowska D., Piliński L., Rutkowski L.: Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte. PWN, Warszawa 1997.
- [4] Yager R. R., Filev D. P.: Podstawy modelowania i sterowania rozmytego. WNT, Warszawa 1995.
- [5] Król A., Moczko-Król J.: S5/S7 Windows: programowanie i symulacja sterowników PLC firmy SIEMENS. Nakom, Poznań 2000.
- [6] Simatic S5-115U Programmable Controller. Siemens AG 1991.
- [7] DTR: Maszyna do napełniania butelek Innofil ER108. KHS, 05/95.