

Sterowanie programowe zaworem kulowym ze wspomaganie regulacją PID

Programme control of a ball valve with PID regulation

ROBERT ŁUDZIEN, MARIUSZ WNĘK, STANISŁAW GIL

W publikacji zaproponowano metodę prowadzenia sterowania i regulacji w systemie przepływowym, w którym niewłaściwie dobrano przepływomierz i aktuator sterujący regulacyjnym zaworem kulowym lub niewłaściwie je zestrojono. Na podstawie wykonanych pomiarów przemysłowych i uzyskanych charakterystyk przepływowych, wskazano przyczynę powstania nietypowego zbioru danych oraz zaproponowano ogólne rozwiązanie. Po przeprowadzeniu badań stwierdzono, że zmniejszanie stałej czasowej przetwornika przepływomierza poprawia jakość pomiarową urządzenia (uzyskuje się znaczne zmniejszenie różnicy wskazań przebiegów otwarcia i zamknięcia dla charakterystyki przepływowej). Wydaje się wskazane, aby poza właściwą wartością stałej czasowej przetwornika przepływomierza, zastosować też „szybki” aktuator, a najlepiej zmiennoprędkościowy. Rozwiązaniem problemów sterowania i regulacji przy niewłaściwym doborze przepływomierza i aktuatora jest wyznaczenie tzw. funkcji programowej, a następnie wprowadzenie jej do sterownika lub systemu komputerowego. Sterowanie w układzie automatyki prowadzone jest wstępnie zgodnie z funkcją programową, a potem według regulacji PID.

Słowa kluczowe: charakterystyka przepływowa, zawór kulowy, funkcja programowa, aktuator zmiennoprędkościowy

The publication proposes a solution of conducting control and regulation in the flow system, in which the flow meter and actuator controlling the regulating ball valve have been incorrectly selected or incorrectly adjusted. On the basis of the performed industrial measurements and the obtained flow characteristics, the reason for the creation of an atypical data set was indicated and a general solution was proposed. After the tests, it was found that reducing the time constant of the flowmeter transducer improves the measuring quality of the device (a significant reduction of the difference between the open and close waveforms for the flow characteristic is obtained). It seems advisable to use a “fast” actuator, preferably a variable speed actuator, in addition to the correct value of the time constant of the flowmeter converter. The solution to the problems of control and regulation with the wrong selection of the flow meter and actuator is the determination of the so-called programme function and then input it into the controller or computer system. Control in the automation system is initially carried out according to the programme function, and then according to the PID regulation.

Keywords: flow characteristic, ball valve, programme function, variable speed actuator

Wprowadzenie

W większości procesów przemysłowych, gdzie występują przepływy różnego rodzaju płynów wymagana jest uważna kontrola i regulacja strumienia masy lub objętości przepływającego medium. Od układów regulacji wymaga się stabilności, krótkich czasów regulacji oraz minimalizacji przeregulowań. Na działanie takich układów wpływa charakterystyka obiektu regulacji, układu pomiarowego oraz różnego rodzaju zakłócenia. Wymienione wyżej wymagania są szczególnie ważne w przypadkach, kiedy transportowanym płynem jest ciecz o specyficznych własnościach fizykochemicznych i szkodliwym oddziaływaniu na środowisko.

Przy niekorzystnych charakterystykach przepływowych zaworów mogą występować znaczne problemy z regulacją przepływu, zwłaszcza w początkowych stacjach otwarcia zaworu. Ponadto podczas otwierania i domykania zaworu mogą pojawiać się takie niekorzystne zjawiska, jak uderzenia hydrauliczne czy pulsacje ciśnienia o destrukcyjnym oddziaływaniu na armaturę i elektroniczną aparaturę kontrolno-pomiarową.

Elementami układów regulacji przepływu, sprawiającymi często znaczne problemy regulacyjne są niekorzystne charakterystyki przepływowe zaworów, które omówione są w dalszej części publikacji [1-5].

Celem publikacji było zaproponowanie sposobu prowadzenia sterowania i regula-

cji w systemie przepływowym, w którym niewłaściwie dobrano lub zestrojono przepływomierz i aktuator sterujący regulacyjnym zaworem kulowym. Nieodpowiednie zestawienie wskazanych elementów znacząco utrudnia prawidłowe prowadzenie procesu technologicznego związanego z właściwą regulacją strumienia płynu.

Badania przemysłowe

Na podstawie badań przeprowadzonych na instalacji przemysłowej zarejestrowano i zaprezentowano charakterystyki, które znacząco odbiegały od charakterystyk przepływowych prezentowanych powszechnie w literaturze [4,6]. Charakterystyki te dotyczyły zaworu kulowego

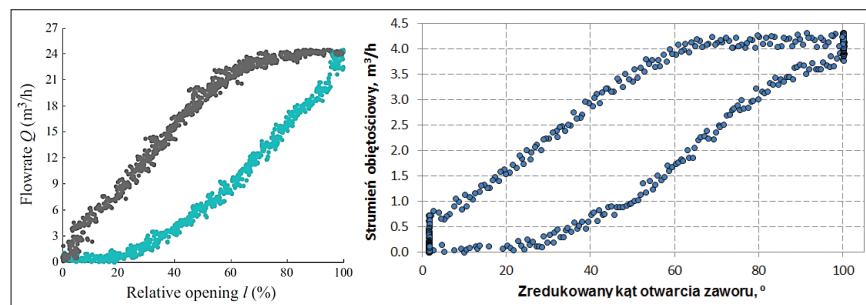
dr inż. Robert Łudzień – AUMA Polska, Sosnowiec; dr inż. Mariusz Wnęk, <https://orcid.org/0000-0003-2485-7765>;

dr hab. inż. Stanisław Gil, prof. PŚ, <https://orcid.org/0000-0003-3397-0620> – Wydział Inżynierii Materiałowej, Politechnika Śląska, Katowice. Adres do korespondencji / Corresponding author: stanislaw.gil@polsl.pl

zastosowanego w instalacji, a ich nietypowość dotyczyła kształtu przedstawiającego pewien rodzaj histerezy. Nietypowy kształt charakterystyki przepływowej odzwierciedlał duże trudności w sposobie prowadzenia procedury sterowania lub regulacji dla danej instalacji przemysłowej. W głównej mierze problem polegał na tym, że przebieg dla fazy otwierania zaworu nie pokrywał się z przebiegiem dla fazy jego zamykania (rys. 1).

Otrzymane w badaniach przemysłowych charakterystyki wzbudziły głębokie zainteresowanie, gdyż powinny być jednoznaczne, aby dostarczyć pełnej i poprawnej informacji pomocnej do projektowania, planowania i prowadzenia procesu sterowania, a przede wszystkim regulacji. Po pewnym czasie podobne charakterystyki opublikowali Cui i inni [1]. Charakterystyki te dotyczyły zaworu kulowego, które wskazywały inne wartości strumienia dla procesu otwierania zaworu, a inne dla procesu jego zamykania. W publikacji tej nie wytłumaczono przyczyn zaistnienia takiego zjawiska.

Na podstawie wykonanych pomiarów przemysłowych i uzyskanych charakterystyk przepływowych oraz potwierdzających je danych literaturowych, wskazano przyczynę powstania takiego zbioru danych oraz zaproponowano ogólne rozwiązanie [5].



Rys. 1.

Strumień płynu w funkcji zredukowanego stopnia otwarcia zaworu: a) wyniki badań wg literatury [1]; b) wyniki badań własnych

Fig. 1. Flow rate as a function of the reduced degree of valve opening: a) literature research [1]; b) personal research

Stanowisko badawcze

W oparciu o wyniki badań przemysłowych [4,5] i przesłanki literaturowe [1], przeprowadzono badania laboratoryjne, których celem było uzyskanie danych dla różnych zmiennych konfiguracyjnych przepływomierza i sposobu działania aktuatora sterującego zaworem kulowym. Na podstawie otrzymanych wyników zaprezentowany zostanie w dalszej części publikacji sposób poprawy jakości sterowania i regulacji.

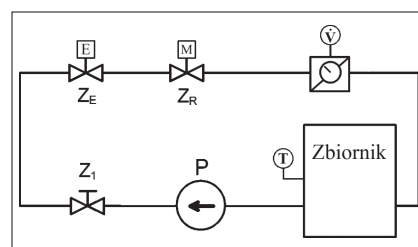
W procedurze badawczej wykorzystano stanowisko Katedry Informatyki Prze-

mysłowej Politechniki Śląskiej (spełniające warunki normy PN-EN 60534-2-3 [7]), które umożliwia prowadzenie badań zgodnie z procedurą IEC – 534/ISA S75 (PN-EN 1267 [8]), a na potrzeby badań do opublikowania zostało dodatkowo przeorganizowane. Ogólny schemat stanowiska przedstawiono na rys.2, na którym oznaczono: pompę (P), zawór dławiący (Z₁), elektrozawór (Z_E), regulacyjny zawór kulowy (Z_R), przepływomierz (V), zbiornik i czujnik temperatury (T).

Wykorzystany na stanowisku regulacyjny zawór kulowy o DN25 charakteryzuje się kształtowanym otworem [3], stałoprocentową charakterystyką regulacyjną i współczynnikiem Kvs = 6,3 m³/h. Zawór ten sterowany jest automatycznie poprzez sprzęgnięty z nim stałoprędkościowy aktuator o zakresie działania 0-90°, czasie przejścia 35 s i minimalnym momencie obrotowym 10 Nm przy napięciu znamionowym. Aktuator ten jest sterowany analogowym, standaryzowanym sygnałem napięciowym w zakresie 0-10 V. Aktuator jest wyposażony w czujniki położenia kątowego z analogowym przetwornikiem napięciowym o zakresie 2-10 V oraz z możliwością zmiany do zakresu 0-10 V.

Ze względu na potrzebę modyfikacji „szybkości pomiarowej” przepływomierza, w badaniach wykorzystano przepływomierz MAGFLO® o elektromagnetycz-

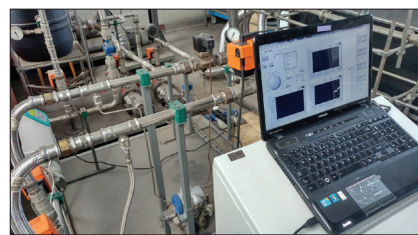
no na zapis 4 pomiarów na sekundę, co było wartością wystarczającą.



Rys. 2.

Schemat stanowiska do badań przepływowych armatury

Fig. 2. Diagram of the research stand for the flow armature testing



Rys. 3.

Stanowisko do badań przepływowych armatury

Fig. 3. Research stand for the flow armature testing

Badania laboratoryjne

Zestawiając elementy wyposażenia stanowiska badawczego należy pamiętać, że zaworem regulacyjnym układu jest zawór kulowy, który ze względu na swoją konstrukcję charakteryzuje się strefą nieczułości definiowaną przez kąt martwy ϕ_0 , poniżej którego pole przepływowe zaworu jest zerowe [10]. Z tego też względu sterowanie takim zaworem przebiega w przedziale $\phi \in (\phi_0, 90^\circ)$. Kąt martwy zaworu można wyznaczyć analitycznie [10] lub wykonać badanie stanowiskowe.

Ze względu na wykorzystanie przepływomierza z przetwornikiem umożliwiającym zmianę stałej czasowej wyjścia prądowego opracowano procedurę, oznaczoną jako OE, która polegała na tym, że przy maksymalnie otwartym zaworze regulacyjnym następowało otwarcie elektrozaworu Z_E (rys. 2) i rozpoczynał się maksymalny przepływ zależny od wydajności pompy i oporów sieci. Powyższa procedura miała na celu symulację wymuszenia skokowego strumienia płynu i rejestrację wskazań przepływomierza dla różnych nastaw jego stałej czasowej. Do badań wytypowano cztery takie nastawy: 0,1 s, 2 s, 5 s i 7 s.

W kolejnej procedurze badawczej, oznaczonej jako OZA, wykorzystano wymuszenie standardowe w postaci zmiennego w czasie sygnału. Procedura ta

rejestruje charakterystykę dynamiczną odpowiedzi na zadane wymuszenie, zarówno dla fazy otwierania zaworu jak i jego zamykania. Przyjęta procedura OZA została przeprowadzona dla wcześniej przyjętych stałych czasowych przepływomierza. W wyniku zastosowania aktuatora o czasie przejścia 35 s zmieniła się postać zarejestrowanej charakterystyki pod względem jej dynamiki, natomiast ciągle była to postać charakterystyki inercyjnej. Z tego też powodu spodziewane były inne wartości stałych czasowych uzyskanych charakterystyk w porównaniu z nastawioną stałą czasową przetwornika przepływomierza.

Analiza badań

Wykorzystując badania stanowiskowe wyznaczono na wstępie kąt martwy ϕ_0 dla badanego kulowego zaworu regulacyjnego, który wyniósł ok. $14,4^\circ$. Elementy pomiarowe temperatury, strumienia płynu, ciśnienia są zwyczajowo elementami inercyjnymi, zatem przy interpretacji uzyskanych pomiarów można posłużyć się powszechnie znaną ich charakterystyką czasową. W procedurze analizy wykorzystano charakterystykę inercji pierwszego rzędu z przesunięciem, a w metodologii poszukiwania parametrów tej funkcji wykorzystano metodę najmniejszych kwadratów (MNK) [11].

$$y(t) = K \left[1 - \exp\left(-\frac{t-a}{\tau}\right) \right] \cdot 1(t-a), \quad (1)$$

gdzie:

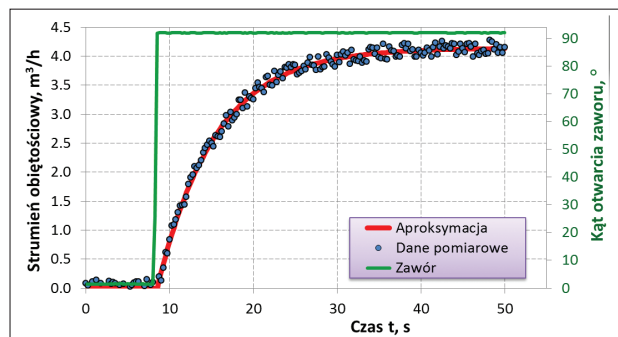
- K – wartość maksymalna ustalona;
- t – czas,
- a – przesunięcie funkcji,
- τ – stała czasowa.

Zgodnie z procedurą OE przeprowadzono badania charakterystyk odpowiedzi skokowych dla różnych nastaw stałych czasowych przetwornika przepływomierza. Na rys. 4 zaprezentowano charakterystykę skokową dla stałej czasowej przetwornika wynoszącej 7 s. W wyniku przeprowadzonej analizy z wykorzystaniem MNK uzyskano następujące parametry funkcji (1): $K = 4,14 \text{ m}^3/\text{h}$, $a = 8,5 \text{ s}$ oraz $\tau = 6,9 \text{ s}$.

Przeprowadzone w procedurze OE badania wykazały, że ustawiana w przepływomierzu stała czasowa wyjścia prądowego ma wpływ na informacje przekazywane do systemu rejestracji pomiarów a uzyskiwane przebiegi danych pomiarowych o charakterystyce inercyjnej potwierdzają wartość ustawionej stałej czasowej.

W analizie danych z procedury OZA wykorzystano również aproksymację iner-

Rys. 4. Charakterystyka skokowa z badań dla procedury OE (przetwornik $\tau = 7 \text{ s}$)
Fig. 4. Jump characteristic from the tests for the OE procedure (transducer $\tau = 7 \text{ s}$)



cją pierwszego rzędu z przesunięciem oraz MNK, jako metodologię wyznaczenia współczynników funkcyjnych.

Ze względu na fluktuacje pomiarów przeprowadzono wstępnie optymalne określenie parametru K a następnie wartości a oraz τ . W wyznaczeniu wartości K poszukiwano minimum funkcji MNK dla wytypowanego zakresu K, co zaprezentowano na rys. 5.

Charakterystykę odpowiedzi na zmienne w czasie wymuszenie, dla nastawy przepływomierza $\tau = 7 \text{ s}$, przedstawiono na rys. 6. Wyznaczona wartość stałej czasowej dla prezentowanej charakterystyki wyniosła 10,7 s. Ciekawszą formę otrzymanych charakterystyk pokazano na rys. 7 i jak można zauważyć:

- uzyskane charakterystyki nie pokrywają się dla przejścia otwierającego i zamykającego zawór regulacyjny;
- przebiegi zamykania nie są właściwe, gdyż wykazują przepływ poniżej wartości kąta martwego;
- przebiegi otwierania nie są właściwe, gdyż wykazują zaniżony przepływ dla

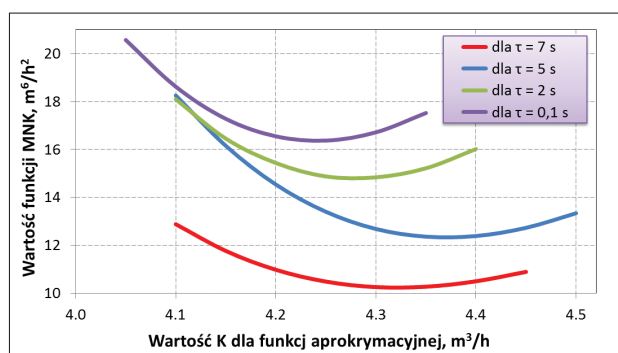
kątów większych od 70° , a powinny wskazywać już przepływ maksymalny.

Jak wskazuje analiza badań zmniejszenie stałej czasowej przetwornika przepływomierza poprawia jakość pomiarową urządzenia – uzyskuje się znaczne zmniejszenie różnicy wskazań przebiegów otwarcia i zamknięcia dla charakterystyki przepływowej.

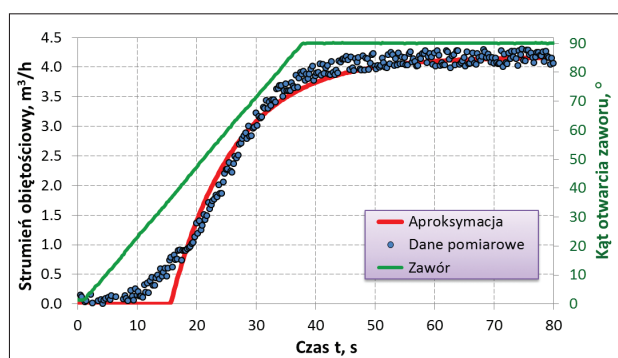
Na podstawie otrzymanych wyników, można stwierdzić, że jedyną w miarę właściwą charakterystyką spośród prezentowanych jest charakterystyka dla najmniejszej ustawionej stałej czasowej przepływomierza. Zatem wprowadzając uśrednienie dla przebiegów otwierania i zamykania można wyznaczyć charakterystykę nominalną, która byłaby do uzyskania przy właściwym doborze aktuatora i przepływomierza, co gwarantowałoby dobrą jakość ze względu na proces regulacji.

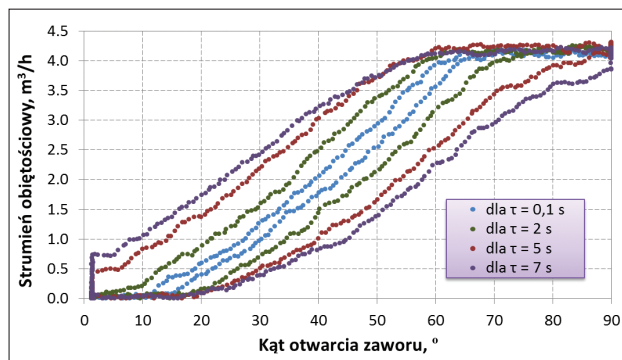
W przypadku braku możliwości zmiany przepływomierza lub braku możliwości wprowadzenia właściwych nastaw związanych ze stałą czasową przetwornika

Rys. 5. Charakterystyki optimum K (dla różnych τ przepływomierza)
Fig. 5. Characteristics of the optimum K (for different τ of the flow meter)



Rys. 6. Charakterystyka dla zmiennego wymuszenia dla procedury OZA (przetwornik $\tau = 7 \text{ s}$)
Fig. 6. Characteristics for variable forcing signal for the OZA procedure (transducer $\tau = 7 \text{ s}$)





Rys. 7.
Strumień płynu w funkcji
kąta otwarcia zaworu
Fig. 7. Fluid flow as a function
of valve opening angle

przepływomierza proponuje się rozwiązanie polegające na wyznaczeniu funkcji programowej sterowania zaworem. Jednakże w tym przypadku pojawia się dodatkowy i niezbędny warunek – jest nim możliwość wprowadzenia tej funkcji do sterownika lub systemu komputerowego.

Idea tego rozwiązania polega na tym, aby sterowanie zaworem, a tym samym i strumieniem płynu odbywało się wg wytypowanej funkcji programowej lub zestawu takich funkcji w zakresie od bieżącej nastawy w pobliżu nowej nastawy, a następnie uruchomienie procedury tzw. doregulowania w oparciu o regulację PID.

Przykład rozwiązania

W prezentowanym przykładzie rozważana była instalacja identyczna z układem laboratoryjnym, przy czym założono, że przetwornik przepływomierza charakteryzuje się stałą czasową o wartości 5 s (dla analizy przykładu wprowadzono taką nastawę). Następnie można wybrać jedną z dwóch ścieżek postępowania:

- przeprowadzić procedurę OZA w celu pozyskania charakterystyki przedstawionej na rys. 7 i wyznaczyć funkcję uśredniającą (należy uwzględnić kąt martwy i stan nasycenia),
- przeprowadzić zmodyfikowaną procedurę OZA z wyznaczeniem tzw. punktów charakterystycznych, czyli wartości dla stanów ustalonych w wybranych położeniach zaworu regulacyjnego.

W prezentowanym przykładzie wybrano drugi sposób rejestracji charakterystyki przepływowej. Na podstawie wytypowanych punktów charakterystycznych wyznaczono przebieg funkcyjny, który jest przybliżeniem nominalnej charakterystyki przepływowej. Sterowanie zaworem przyjęto w zakresie od kąta martwego do kąta 70°, powyżej którego występuje stan nasycenia, w którym strumień płynu praktycznie nie zmienia swojej wartości. Zatem jest to obszar niesterowalny i nie powinien być rozważany w procedurach regulacyjnych automatyki. Dla tak przedstawionych da-

nych proponuje się następującą postać funkcji programowej (2), co zaprezentowano na rys. 8.

$$\dot{V}(\varphi) = \begin{cases} k_1 \left[\left(\varphi - \varphi_0 - \vartheta_1 \right) \left(1 - \exp\left(-\frac{\varphi - \varphi_0}{\vartheta_1} \right) \right) \right] & \text{dla } \varphi_0 < \varphi < 50^\circ \\ k_2 \left[1 - \exp\left(-\frac{\varphi - \delta}{\vartheta_2} \right) \right] + \gamma & \text{dla } 50^\circ \leq \varphi \leq 70^\circ \end{cases} \quad (2)$$

gdzie:

k_1, k_2 – współczynniki funkcji, m^3/h ;

φ – kąt otwarcia zaworu, $^\circ$;

φ_0 – kąt martwy, $^\circ$;

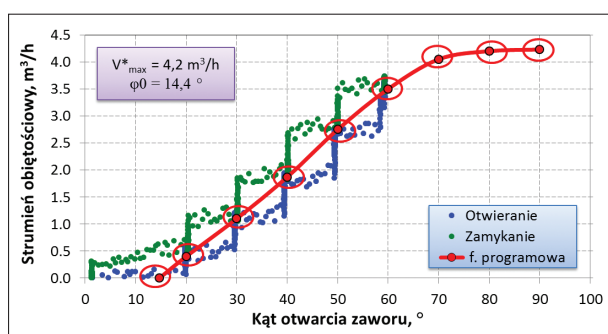
δ – wartość przesunięcia funkcji, $^\circ$;

ϑ – współczynnik dynamiki funkcji, $^\circ$;

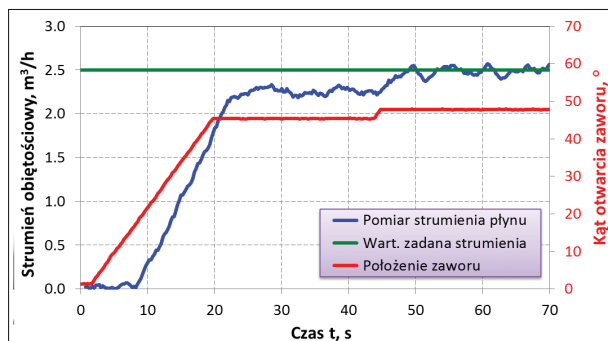
γ – współczynnik przesunięcia wartości rzędnych dla odciętej δ , m^3/h .

Należy zaznaczyć, że wszystkie wartości i współczynniki występujące w prezentowanej funkcji programowej, jak rów-

Rys. 8.
Charakterystyka zmodyfikowanej procedury OZA z funkcją programową
Fig. 8. Characteristics of the modified OZA procedure with programme function



Rys. 9.
Charakterystyka sterowania wg funkcji programowej wspomaganą regulacją PID
Fig. 9. Control characteristics according to the programme function supported by PID control



niez w każdej innej dowolnie wybranej, muszą być wyznaczone indywidualnie dla danej instalacji.

Dla proponowanej funkcji programowej (2) wyznaczono następujące wartości współczynników i innych wartości: $k_1 = 7,85 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{h}$; $k_2 = 1,51 \text{ m}^3/\text{h}$; $\varphi_0 = 14,7^\circ$; $\delta = 50^\circ$; $\vartheta_1 = 4,37 \cdot 10^{-1}^\circ$; $\vartheta_2 = 14,01^\circ$; $\gamma = 2,73 \text{ m}^3/\text{h}$.

Ostatnim krokiem jest wprowadzenie wyznaczonej funkcji programowej do sterownika lub komputerowego systemu sterowania, którego program jest odpowiednio przygotowany. Po wprowadzeniu nowej nastawy strumienia płynu układ automatyki wykorzystuje wstępnie charakterystykę programową, na podstawie której ustawia zawór w położeniu gwarantującym zakładany przepływ. Jeżeli ta wartość odbiega o pewien ustalony próg (względny lub bezwzględny), to do sterowania włącza się procedura regulacji PID i następuje „dosterowanie” napędu do takiej pozycji, aby uzyskać pożądany przepływ. Działanie zaproponowanego rozwiązania przedstawiono na rys. 9.

Ponadto należy zauważyć, że wartość stałej czasowej przetwornika przepływomierza wraz z prędkością aktuatora, kształtując dynamikę charakterystyki przepływowej, mają również wpływ na wyznaczenie wartości zużycia płynu w wybranym przedziale czasu. Wykorzystanie charakterystyk dla wyższych stałych czasowych przepływomierza zaniża wartości tzw. „licznika zużycia”. Wymienione niekorzystne skutki są tym bardziej odczuwalne, im częściej następują zmiany wartości zadanych strumienia. W przypadku procesów, gdzie

ważne jest dawkowanie różnych płynów w celu otrzymania założonej mieszanki, może to stanowić kolejny problem jakości procesu. Wydaje się wskazane, aby poza właściwą wartością stałą czasowej przetwornika przepływomierza, zastosować aktuator „szybki”, a najlepiej zmiennoprędkościowy. To pierwsze rozwiązanie może stanowić utrudnienie w procesie doregulowania wartości strumienia, natomiast to drugie rozwiązanie nie posiada tej negatywnej cechy. Po wprowadzeniu nowej nastawy strumienia aktuator zmieniłby położenie zaworu do pozycji wyznaczonej z funkcji programowej, przy wykorzystaniu swojej najwyższej prędkości, a następnie podczas doregulowania wartości strumienia (z wykorzystaniem regulacji PID) korzystałby z prędkości niższych.

Wnioski

Na podstawie badań laboratoryjnych wyciągnięto następujące wnioski

- analiza wyników wykazała nietypowy kształt charakterystyk strumienia płynu w funkcji stopnia otwarcia zaworu (rys. 7), a ich wykorzystanie w procesie sterowania strumieniami płynów jest bardzo niewygodne i stwarza znaczące problemy regulacyjne;
- przeprowadzone w procedurze OE badania wykazały, że ustawiana w przepływomierzu stała czasowa wyjścia prądowego ma wpływ na informacje przekazywane do systemu rejestracji pomiarów a uzyskiwane przebiegi danych pomiarowych o charakterystyce inercyjnej potwierdzają wartość ustawionej stałej czasowej;

- problem, który się pojawia w układach sterowania i regulacji strumieniem polega na niewłaściwym skorelowaniu działania zaworu i przetwornika pomiaru strumienia płynu, przede wszystkim pod względem tzw. „szybkości” działania. Ostatecznie skutkuje to problemami w prowadzeniu procesu regulacji i objawia się tzw. efektem pompowania napędem;
- przy nieodpowiednio dobranym przepływomierzu i elemencie sterującym zaworem opcją poprawy wzajemnej zależności tych elementów jest właściwa nastawa czujnika pomiarowego pod względem doboru jego stałej czasowej. Jednakże może to mieć miejsce tylko dla wysoko zaawansowanych technologicznie układów przetwarzania strumienia, które mają taką możliwość korekty;
- w przypadku braku możliwości zmiany stałej czasowej przepływomierza zaproponowano rozwiązanie związane z przygotowaniem tzw. funkcji programowej, którą wprowadza się do sterownika lub systemu komputerowego;
- według proponowanego rozwiązania system początkowo wykorzystuje w sterowaniu funkcję programową a następnie przechodzi do fazy doregulowania żądanego strumienia stosując już regulację PID;
- przedstawiono przykład zastosowania proponowanego rozwiązania wg funkcji programowej ze wspomaganie regulacją PID;
- wprowadzenie do systemu aktuatora zmiennoprędkościowego poprawiłoby

działanie regulacji wg proponowanego rozwiązania i zmieniłoby jakość wskazań tzw. „licznika zużycia”.

LITERATURA

- [1] Cui B., Zhe Z., Zhu Z., Wang H., Ma G.: Influence of opening and closing process of ball valve on external performance and internal flow characteristics. *Experimental Thermal and Fluid Science* Vol. 80 (2017) 193-202.
- [2] Wiśniowicz A.: Charakterystyki przepływowe armatury odcinającej. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, Nr 4 (2004) 122-124.
- [3] Tomeczek J., Puszer A., Wnęk M.: Sposób kształtowania regulacyjnych charakterystyk przepływowych elementów nastawczych strumienia płynu. *Pomiary Automatyka Kontrola* Vol. 53, Nr 11 (2007) 38-43.
- [4] Gil S., Wnęk M., Łudzień R.: Przepływowy model instalacji dystrybuowania kwasu siarkowego. *Instal*, Nr 12 (2018) 32-36.
- [5] Gil S., Wnęk M., Łudzień R.: Badania charakterystyki przepływowej dla modelowego zaworu kulowego. *Instal*, Nr 12 (2019) 34-38 DOI 10.36119/15.2019.12.4.
- [6] Puszer A., Tomeczek J.: Nowa generacja elementów regulacyjnych mediów gazowych dla hutniczych pieców grzewczych. *Hutnik* Nr 11 (2001) 430-435.
- [7] PN-EN 60534-2-3: 2001. Przemysłowe zawory regulacyjne. Wydajność przepływu. Procedury badań. PKN, Warszawa 2001.
- [8] PN-EN 1267: 2012. Armatura przemysłowa – Badanie oporu przepływu wodą. PKN, Warszawa 2012.
- [9] <https://automatyka-siemens.pl/8-przeplywomierze/elektromagnetyczne> (08-08-2020).
- [10] Puszer A., Wnęk M.: Charakterystyki regulacyjne zaworów kulowych. *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja* Nr 1 (2012) 33-35.
- [11] <http://www.ekonometria.wne.uw.edu.pl/uploads/Main/MNK.pdf> (10-08-2020)