

Problemy pomiarowe charakterystyki przepływowej przepustnicy motylkowej

Measurement problems of the flow characteristic of a butterfly throttle

ROBERT ŁUDZIENÍ, MARIUSZ WNĘK, STANISŁAW GIL

DOI 10.36119/15.2022.9.3

W publikacji omówiono problemy pomiarowe charakterystyki przepływowej przepustnicy motylkowej pracującej w warunkach laboratoryjnych. Przyjęte procedury badawcze były prowadzone w przedziale kąta otwarcia przepustnicy od 10° do 45° . W procedurach badawczych wykorzystano różne nastawy stałej czasowej dla czujnika pomiarowego strumienia płynu w przedziale 0,1-10 s. Otrzymane wyniki badań wpływu stałej czasowej przepływomierza wskazują, jakie są konsekwencje niewłaściwego doboru przepływomierza i aktuatora do przemysłowej instalacji przepływowej i potwierdzają wyniki badań przeprowadzonych z zainstalowanym w instalacji zaworem kulowym [5]. Na postać charakterystyki znaczący wpływ ma stała czasowa przepływomierza i nie powinna być zbyt duża. Wzrastają wówczas różnice wskazań przepływu między fazą otwierania i zamykania przepustnicy. Z punktu widzenia sterowania najlepszym rozwiązaniem byłoby zastosowanie programowej funkcji uśredniającej przebiegi fazy otwierania i zamykania przepustnicy. Funkcja ta powinna być dobierana do rzeczywistej charakterystyki przepływowej i prawdopodobnie będzie mieć postać funkcji złożonej.

Słowa kluczowe: charakterystyka przepływowa, przepustnica motylkowa, współczynnik przepływu, aktuator

The publication proposes measurement problems of the flow characteristic of a butterfly throttle operating in laboratory discusses. The adopted test procedures were carried out in the range of the throttle opening angle from 10° to 45° . Various settings of the time constant for the measurement sensor of the fluid flow in the range of 0.1-10 s were used in the test procedures. Test results for the influence of the flowmeter time constant indicate the consequences of improper selection of the flow meter and actuator for an industrial flow system and confirm the results carried out with a ball valve installed in the system [5]. The form of the characteristic is significantly influenced by the flowmeter time constant and it should not be too large. The differences in the flow indications between the opening and closing phases of the throttle then increase. From the control point of view, the best solution would be to use the software function averaging the course of the throttle opening and closing phase. This function should be matched to the real flow characteristic and will probably be a complex function.

Keywords: flow characteristic, butterfly throttle, flow factor, actuator

Wprowadzenie

W procesach przemysłowych od układów regulacji wymaga się stabilności, krótkich czasów regulacji oraz minimalizacji przeregulowań, a także uważnej kontroli i regulacji strumienia masy lub objętości przepływającego medium. Wymienione wyżej wymagania są szczególnie ważne w przypadkach, gdy transportowanym płynem jest ciecz o specyficznych własnościach fizykochemicznych i szkodliwym oddziaływaniu na środowisko. Na działanie takich układów wpływa charakterystyka obiektu regulacji, układu pomiarowego oraz różnego rodzaju zakłócenia. W przypadku niekorzystnych charakterystyk przepływowych zaworów mogą występować znaczne problemy z regulacją przepływu w instalacjach, zwłaszcza w początkowych stanach otwarcia zaworu [1-6].

Celem poniższej publikacji było zaproponowanie sposobu prowadzenia sterowania i regulacji w systemie przepływowym, a także wyjaśnienie problemów pomiaru i sterowania na podstawie charakterystyki przepływowej przepustnicy motylkowej.

Stanowisko badawcze i oprogramowanie

W analizie rzeczywistej charakterystyki elementu nastawczego typu przepustnica motylkowa wykorzystano przepływowe stanowisko badawcze przedstawione na rys. 1, które było wykorzystane również w badaniach modelowego zaworu kulowego i dokładnie opisane w pracy [5].

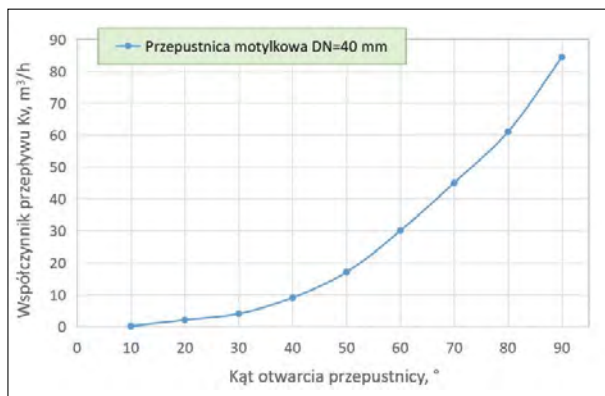
Na stanowisku zainstalowano przepustnicę motylkową o średnicy nominalnej 40 mm, której podstawowa charakterystyka przepły-

wowa została zaprezentowana na rys. 2 o maksymalnym współczynniku przepływu K_{VS} wynoszącym $84,4 \text{ m}^3/\text{h}$ [7]. Do sterowania nastawami przepustnicy wykorzystano jeden z najnowocześniejszych na rynku mikroprocesorowych aktuatorów elektrycznych.



Rys. 1. Stanowisko przepływowe dla elementów nastawczych, aktuatorów i układów sterownia
Fig. 1. Flow station for adjusting elements, actuators and control systems

dr inż. Robert Łudziień, AUMA Polska, Sosnowiec; dr inż. Mariusz Wnęk, <https://orcid.org/0000-0003-2485-7765>; Wydział Inżynierii Materiałowej, Politechnika Śląska, Katowice; 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: stanislav.gil@polsl.pl



Rys. 2. Podstawowa charakterystyka przepływowa badanej przepustnicy [7]
Fig. 2. Basic flow characteristics of the tested throttle [7]

- przepustnica znajduje się w pozycji zamkniętej,
- do aktuatora wysyłany jest sygnał nastawczy wskazujący graniczną pozycję kątową otwarcia przepustnicy,
- po uzyskaniu pozycji otwarcia przepustnicy do aktuatora wysyłany jest następnie sygnał nastawczy wskazujący pozycję zamknięcia przepustnicy,
- po uzyskaniu położenia zamknięcia przepustnicy procedura zostaje zakończona.

Po uwzględnieniu podstawowej charakterystyki przepływowej badanej przepustnicy, definiowanej przez współczynnik przepływu (rys. 2) oraz na podstawie wstępnie przeprowadzonych pomiarów wytypowano, że przyjęte procedury badawcze będą prowadzone w przedziale kąta otwarcia przepustnicy od 10° do 45°.

Dla kąta otwarcia wynoszącego 10° przepustnica nie realizuje przepływu lub może być on na tyle nieznaczny, że był pomijalny, co uwzględniono w nastawach odcięcia pomiarów dla przepływomierza. Ustawienia te korespondują z charakterystyką błędów pomiarowych [9]. Natomiast kąt otwarcia przepustnicy 45° był świadomie wybranym położeniem, dla którego realizowano pomiar strumienia płynu w zakresie działania przepływomierza.

W procedurach badawczych wykorzystano różne nastawy stałej czasowej dla czujnika pomiarowego strumienia płynu w przedziale 0,1-10 s. W badaniach rozważano również wpływ prędkości przejściowych dla aktuatora. Wartości te nastawiane były procentowo w zakresie 10-100%, co należy przyjąć, że wartość 100% odpowiada maksymalnej prędkości przejścia aktuatora (rys. 4). Procedurę tę oznaczono jako O/Z-τ(w) a w badaniach wykorzystano aktuator opisany jako A2.

Podczas badań laboratoryjnych przeprowadzono również procedurę oznaczoną jako ZOZ-Stop. Procedura ta przebiega w systemie od zamkniętej przepustnicy do jej otwarcia i ponownym jej zamykaniu w wytypowanym przedziale położenia kątowego. Procedura była realizowana w ten sposób, że

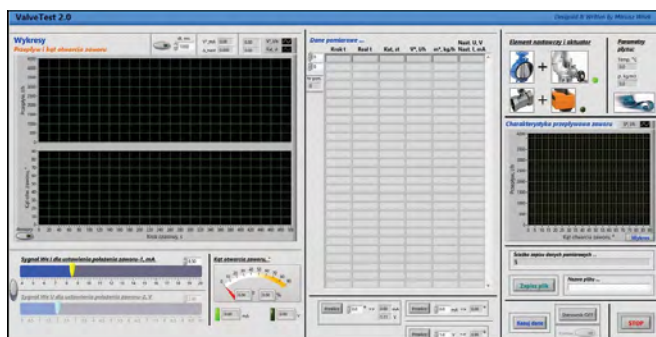
Zastosowany aktuator wyposażono w duży centralny wyświetlacz, który zapewnia informacje o stanie napędu i armatury i może być wykorzystywany zarówno w trybie sterującym, jak i regulacyjnym. Ponadto charakteryzuje się możliwością zmiennej prędkości obrotowej o wysokiej dokładności regulacji oraz pomiarem drogi i momentu obrotowego.

W ramach pracy przygotowano aplikację ValveTest 2.0 (rys. 3) wykorzystując przemysłowe środowisko programistyczne – LabVIEW. Oprogramowanie ValveTest 2.0 umożliwia wybranie pary badawczej – aktuatora i elementu nastawczego oraz różnego typu nastaw tj.: sygnału standaryzowanego dla ustawienia kąta położenia elementu nastawczego, częstotliwości zapisu danych, ścieżki zapisu i nazwy pliku danych pomiarowych. Oprogramowanie umożliwia również uzyskanie następujących informacji: przepływ (objętościowy i masowy) oraz otwarcie zaworu w funkcji czasu, wartości sygnałów standaryzowanych (sterujących i pomiarowych), parametry płynu oraz charakterystykę przepływową – przepływ w funk-

substancji stałych nie powinna przekraczać 40 %, co zostało spełnione. Wartość maksymalna mierzzonego strumienia płynu wynosiła 4500 l/h. Temperatura, ciśnienie, gęstość oraz lepkość nie mają wpływu na wynik pomiaru. Czujnik przepływomierza elektromagnetyczny jest dedykowanym urządzeniem do pomiarów przepływu wody, wody do picia, ścieków surowych i oczyszczonych, szlamów, zawiesin, osadów i odcieków w gospodarce wodno-ściekowej. Dla czujnika elektromagnetycznego wykorzystano przetwornik pomiarowy o dokładności pomiaru 0,25 % [9]. Jako wyjście informacyjne wybrano wyjście prądowe ze standaryzowanym sygnałem 4-20 mA.

Procedury badawcze

W badaniach dotyczących prezentowanej pracy wykorzystano między innymi procedurę otwórz-zamknij dla różnych stałych czasowych przepływomierza i oznaczano ją jako O/Z-τ. Procedura ta została zdefiniowana w sposób następujący:

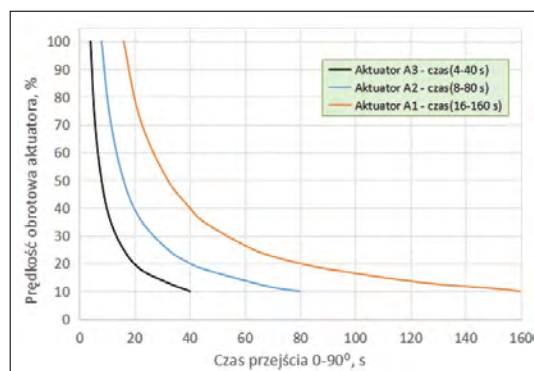


Rys. 3. Program ValveTest 2.0 do obsługi instalacji przepływowej i pomiarów elementu nastawczego
Fig. 3. ValveTest 2.0 software for flow line operation and actuator measurement

cji otwarcia elementu nastawczego. Zapisywane są dane pomiarowe i sterujące do pliku .csv, który następnie może być obrabiany w różnych aplikacjach umożliwiających wizualizację lub analizę danych.

Do pomiaru strumienia objętości płynu zastosowano przepływomierz elektromagnetyczny MAGFLO®, który stanowi wiarygodne i dokładne rozwiązanie w zakresie pomiarów przepływów cieczy przewodzących [8]. Przewodność mierzonej cieczy powinna być nie mniejsza niż 5 μS/cm, a zawartość w niej

Rys. 4. Typy aktuatora i czasy przejścia dla położenia kątowego 0-90°
Fig. 4. Actuator types and transition times for angular position 0-90°



z systemu ValveTest 2.0 były zadawane nastawy położenia kąтового poprzez prądowy sygnał standardyzowany w przedziale 7-10,5 mA z krokiem przystosowym 0,5 mA. Założony zakres nastawczy sygnału prądowego odpowiada położeniom kątowym przepustnicy między 16,8° a 36,5°. Po wprowadzeniu danej nastawy położenia kąтового następowało przemieszczenie otwarcia przepustnicy do danej pozycji, zatrzymanie napędu w tej pozycji na kilka sekund (do ustabilizowania się przepływu) a następnie zadanie nowej pozycji położenia przepustnicy.

Podczas zmian położenia przepustnicy rejestrowane były (przez dedykowane oprogramowanie ValveTest 2.0) różne parametry, m.in.: kąt otwarcia przepustnicy, przepływ, sygnał nastawczy i położeniowy przystony. Wszystkie sygnały zostały dobrane jako standardyzowane prądowe w zakresie 4-20 mA.

Badania laboratoryjne

W celu sprawdzenia powtarzalności pomiarów przeprowadzono badania dla kilku stałych czasowych przepływomierza tj.: 0,1 s, 1 s, 5 s i 10 s. Badania były prowadzone w procedurze otwórz-zamknij (O/Z). Czas przejścia aktuatora 0-90° ustawiono na wartość 35 s. Wartość ta koresponduje z czasem aktuatora stałoprędkościowego, który był wykorzystywany w badaniach z kształtowym zaworem kulowym.

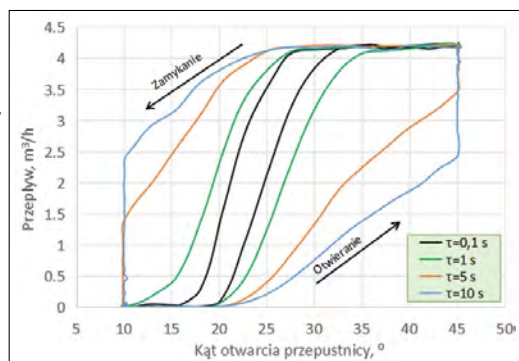
Na rys. 5 przedstawiono potwierdzenie powtarzalności pomiarów, dla przykładowych nastaw zarówno przepływomierza, jak i aktuatora. Wskazuje to na możliwość pominięcia wielokrotnego powtarzania wybranych procedur i znacznie przyspieszyło badania i obróbkę danych.

Rys. 6 przedstawia porównanie charakterystyk przepływowych dla ustawionych stałych czasowych przepływomierza o wartościach 0,1 s, 1 s, 5 s i 10 s. Z przedstawionego zestawienia wynika, że wraz ze wzrostem stałej czasowej charakterystyka jakby „pęcznieje”, a wartości przepływu coraz bardziej różnią się dla operacji zamykania i otwierania dla danego położenia przepustnicy. Przykładowo dla kąta otwarcia elemen-

tu nastawczego 25° i stałej czasowej 1 s dla przepływomierza zarejestrowano strumień objętości o wartości około 1,3 m³/h podczas otwierania i 3,8 m³/h podczas zamykania przepustnicy. Dla przytoczonego położenia kąтового występuje różnica we wskazaniach przepływu wynosząca aż 2,5 m³/h, co stanowi 61,9 % w stosunku do uśrednionego przepływu maksymalnego. Natomiast dla stałej czasowej 0,1 s, różnica ta wynosi ok. 1,4 m³/h, czyli 34,2%. Dla stałych czasowo-

Rys. 6. Charakterystyki przepływowe dla różnych nastaw stałej czasowej τ przepływomierza

Fig. 6. Flow characteristics for different settings τ of the flowmeter time constant



wych 5 s i 10 s są na tyle duże, że nie zaleca się takich nastaw dla przepływomierza, gdyż nie są właściwe z punktu widzenia regulacji.

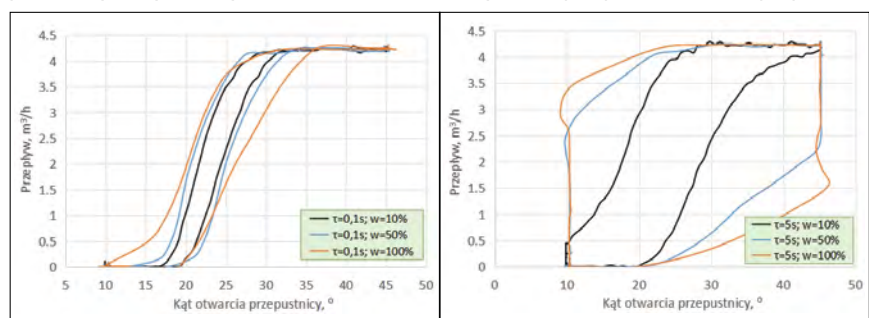
Badania wpływu stałej czasowej przepływomierza wskazują, jakie są konsekwencje niewłaściwego doboru przepływomierza i aktuatora do przemysłowej instalacji przepływowej i potwierdzają badania przeprowadzone z zainstalowanym w instalacji zaworem kulowym [5]. Z przedstawionych danych pomiarowych (rys. 6) wynika, że w doborze

elementów przemysłowej infrastruktury przepływowej tj. przepływomierza i elementu sterującego zaworem regulacyjnym, istotny jest właściwy dobór czasu reakcji przepływomierza, który jest zdefiniowany przez jego stałą czasową pomiaru oraz odpowiednią prędkość aktuatora określaną przez czas przejścia pomiędzy skrajnymi pozycjami determinującymi zamknięcie i pełne otwarcie zaworu.

Z prezentowanego przykładu wynika jest sytuacja, że najlepszym wyborem dla aktu-

atora, którego czas przejścia pomiędzy skrajnymi położeniami wynosił 35 s, jest dobór stałej czasowej dla przepływomierza o wartości 0,1 s. Dla takiego doboru elementów instalacji przepływowej wskazania przepływu, dla danego kąta położenia zaworu, różnią się o ponad 30%, jednakże są one najmniejsze spośród innych nastaw stałej czasowej przepływomierza, zatem zalecane.

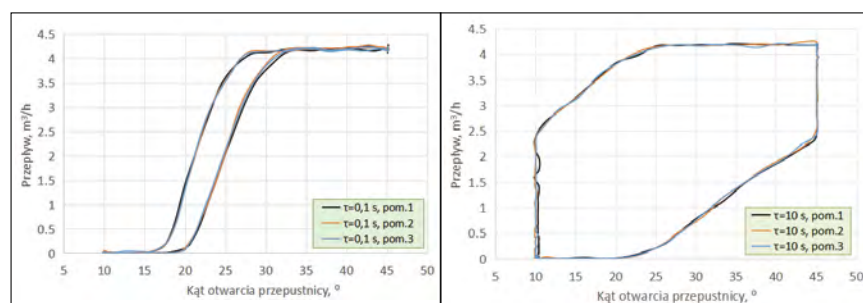
W efekcie otrzymanych wyników z procedury O/Z- τ przeprowadzono kolejną procedu-



Rys. 7.

Porównanie charakterystyk przepływowych dla stałych czasowych τ przepływomierza 0,1 s i 5 s oraz dla różnych prędkości przejściowych aktuatora

Fig. 7. Comparison of flow characteristics for flowmeter time constants τ of 0,1 s and 5 s and for different transient speeds w of the actuator



Rys. 5.

Procedura otwórz-zamknij O/Z- τ dla różnych stałych czasowych τ przepływomierza

Fig. 5. Open-close procedure O/Z- τ for different time constants τ of the flow meter

rę badawczą O/Z- $\tau(w)$. Celem były badania charakterystyk przepływowych przy wybranej stałej czasowej i dla różnych nastaw prędkości obrotowych aktuatora, z których wytypowano następujące: 10%, 50% i 100%. Uzyskane wyniki zaprezentowano na rys. 7. Można zauważyć, podobnie jak dla procedury O/Z- τ , że znaczący wpływ na postać charakterystyki ma stała czasowa przepływomierza i nie powinna być zbyt duża. Wzrastają wówczas różnice wskazań przepływu między fazą otwierania i zamykania przepustnicy.

W przypadku ustawienia stałej czasowej przepływomierza na 0,1 s uzyskano najlepszą wśród przeprowadzonych badań charakterystykę przepływową dla 10 % prędkości kątowej aktuatora. Dla kąta otwarcia przepustnicy 25° odnotowano przepływ około 2,4 m³/h podczas otwierania i 3,4 m³/h podczas zamykania elementu nastawczego. Różnica dla prezentowanego przypadku wynosi 23 % w stosunku do średniego przepływu maksymalnego.

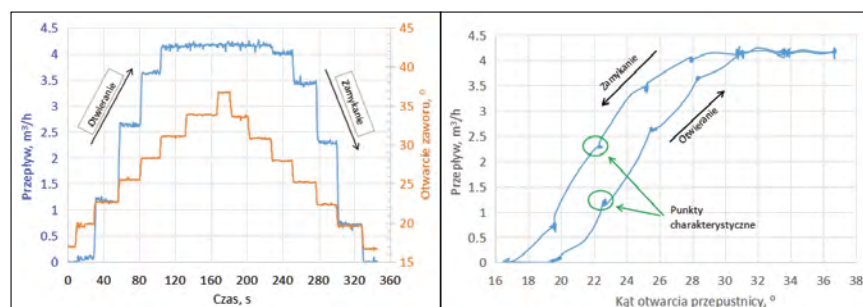
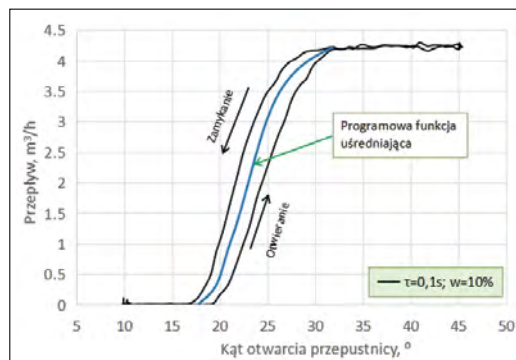
Najlepszym rozwiązaniem z punktu widzenia sterowania byłoby właściwe dobranie stałej czasowej przetwarzania dla czujnika pomiarowego i odpowiedni dobór aktuatora dla zastosowanej przepustnicy. Wskazane dopasowanie aktuatora powinno być związane z czasem przejścia między skrajnymi położeniami kątowymi. W przypadku napędów stałoprędkościowych wymagany byłby odpowiedni dobór napędu pod względem wskazywanej prędkości a w przypadku zmiennoprędkościowych – właściwa nastawa prędkości przejścia. Natomiast jeżeli wcześniej dobór aktuatora nie został trafnie przeprowadzony to rozwiązaniem może być zastosowanie programowej funkcji uśredniającej przebiegi fazy otwierania i zamykania przepustnicy (rys. 8). Funkcja ta powinna być dobierana do rzeczywistej charakterystyki przepływowej i prawdopodobnie będzie mieć postać funkcji złożonej ze względu na nietypowy kształt charakterystyki, który nie jest łatwo opisać pojedynczym równaniem.

W ramach eksperymentów laboratoryjnych przeprowadzono badania wg kolejnej procedury – ZOZ-Stop. Wyniki wykonania tej procedury przedstawiono na rys. 9, na którym pokazano charakterystykę przepływu oraz otwarcia zaworu w funkcji czasu, co bardzo dobrze oddaje ideę wybranej procedury. Natomiast przedstawiając wybrane dane w postaci charakterystyki przepływowej dla wybranego typu przepustnicy i aktuatora można zauważyć, że zatrzymywanie aktuatora w wybranych pozycjach kątowych nie powoduje znacznego przybliżania danych dotyczących wartości strumienia płynu względem fazy otwierania i zamykania. Jednakże procedura ta wyznacza tzw. punkty charakterystyczne związane z zatrzymaniem napędu w wybranych pozycjach. Punkty te mogą ułatwić przygotowanie programowej funkcji uśredniającej, wykorzystywanej następnie w procesie sterowania.

Wnioski

1. Przyjęte procedury badawcze były prowadzone w przedziale kąta otwarcia przepustnicy od 10° do 45°. W procedurach badawczych wykorzystano różne nastawy stałej czasowej dla czujnika pomiarowego strumienia płynu w przedziale 0,1-10 s. Wartości prędkości przejściowych dla aktuatora nastawiane były procentowo w zakresie 10-100% i należy przyjąć, że wartość 100% odpowiada maksymalnej

Rys. 8. Charakterystyka przepływowa wg procedury O/Z- $\tau(w)$ dla stałej czasowej przepływomierza 0,1 s i 10 % prędkości kątowej aktuatora wraz z programową funkcją uśredniającą
Fig. 8. Flow characteristic according to the O/Z- $\tau(w)$ procedure for the flowmeter time constant 0.1 s and 10 % of the angular velocity of the actuator with the software averaging function



Rys. 9. Charakterystyka czasowa i przepływowa wg procedury ZOZ-Stop
Fig. 9. Time and flow characteristics according to the ZOZ-Stop procedure

- prędkości przejścia aktuatora.
2. Potwierdzona została powtarzalność pomiarów, dla przykładowych nastaw zarówno przepływomierza jak i aktuatora.
3. Wraz ze wzrostem stałej czasowej charakterystyka „pęcznieje”, a wartości przepływu coraz bardziej różnią się dla operacji zamykania i otwierania w przypadku danego położenia przepustnicy.
4. Wyniki badań dla wpływu stałej czasowej przepływomierza pokazują, jakie są konsekwencje niewłaściwego doboru przepływomierza i aktuatora do przemysłowej instalacji przepływowej i potwierdzają wyniki badań przeprowadzonych z zainstalowanym w instalacji zaworem kulowym [5].
5. Najlepszym wyborem dla aktuatora, którego czas przejścia pomiędzy skrajnymi położeniami wynosił 35 s, jest dobór stałej czasowej dla przepływomierza o wartości 0,1 s. Dla takiego doboru elementów instalacji przepływowej wskazania przepływu, dla danego kąta położenia zaworu, różnią się o ponad 30%, jednakże są one najmniejsze spośród innych nastaw stałej czasowej przepływomierza, zatem zalecane.
6. Na postać charakterystyki znaczący wpływ ma stała czasowa przepływomierza i nie powinna być ona zbyt duża. Wzrastają wówczas różnice wskazań przepływu między fazą otwierania i zamykania przepustnicy. Czas przejścia aktuatora również ma wpływ na uzyskiwaną rzeczywistą charakterystykę przepływową, gdyż koresponduje ze stałą czasową przetwarzania czujnika pomiarowego przepływomierza.
7. Z punktu widzenia sterowania najlepszym rozwiązaniem byłoby zastosowa-

nie programowej funkcji uśredniającej przebiegi fazy otwierania i zamykania przepustnicy. Funkcja ta powinna być dobierana do rzeczywistej charakterystyki przepływowej i prawdopodobnie będzie mieć postać funkcji złożonej.

8. Dobranie właściwej nastawy stałej czasowej czujnika przepływomierza oraz odpowiedniego czasu przejścia aktuatora spowodowało uzyskanie najlepszych rezultatów spośród prowadzonych badań – postać rzeczywistej charakterystyki przepływowej (histereza) jest najmniej rozbieżna (najbardziej smukła/chuda) między pomiarami dla fazy otwierania/zamykania i dla porównywanego przypadku położenia kątowego wynosiła ok. 23% w stosunku do średniego przepływu maksymalnego.

LITERATURA

- [1] Cui B., Zhe Z., Zhu Z., Wang H., Ma G. (2017). Influence of opening and closing process of ball valve on external performance and internal flow characteristics. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 80, 193-202.
- [2] Wiśniowicz, A. (2004). Charakterystyki przepływowe armatury odcinającej. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 4, 122-124.
- [3] Tomeczek J., Puszer A., Wnęk M. (2007). Sposób kształtowania regulacyjnych charakterystyk przepływowych elementów nastawczych strumienia płynu. *Pomiary Automatyka Kontrola*, 53(11), 38-43.
- [4] Gil S., Wnęk M., Łudziń R. (2018). Przepływowy model instalacji dystrybuowania kwasu siarkowego. *Instal*, 12, 32-36.
- [5] Gil S., Wnęk M., Łudziń R. (2019). Badania charakterystyki przepływowej dla modelowego zaworu kulowego. *Instal*, 12, 34-38.
- [6] Łudziń R., Wnęk M., Gil S. (2020). Sterowanie programowe zaworem kulowym ze wspomaganie regulacją PID. *Instal*, 9, 26-29.
- [7] https://www.abovalve.com/wp-content/uploads/2022/06/EN_Concentric_900_Email.pdf (03-07-2022).
- [8] https://automatyka-siemens.pl/fileadmin/user_upload/KK_MAG5100W.pdf (06-07-2022).
- [9] https://automatyka-siemens.pl/fileadmin/user_upload/KK_MAG5000.pdf (06-07-2022)