

Algorytm sterowania prędkością przepływu gazu w kalibratorze sond termooanemometrycznych

JAKUB SALA

Instytut Mechaniki Górotworu PAN, ul. Reymonta 27, 30-059 Kraków, Polska

MIROSLAW SOCHA 

*AGH, Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej,
Katedra Metrologii i Elektroniki, Al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska*

Streszczenie

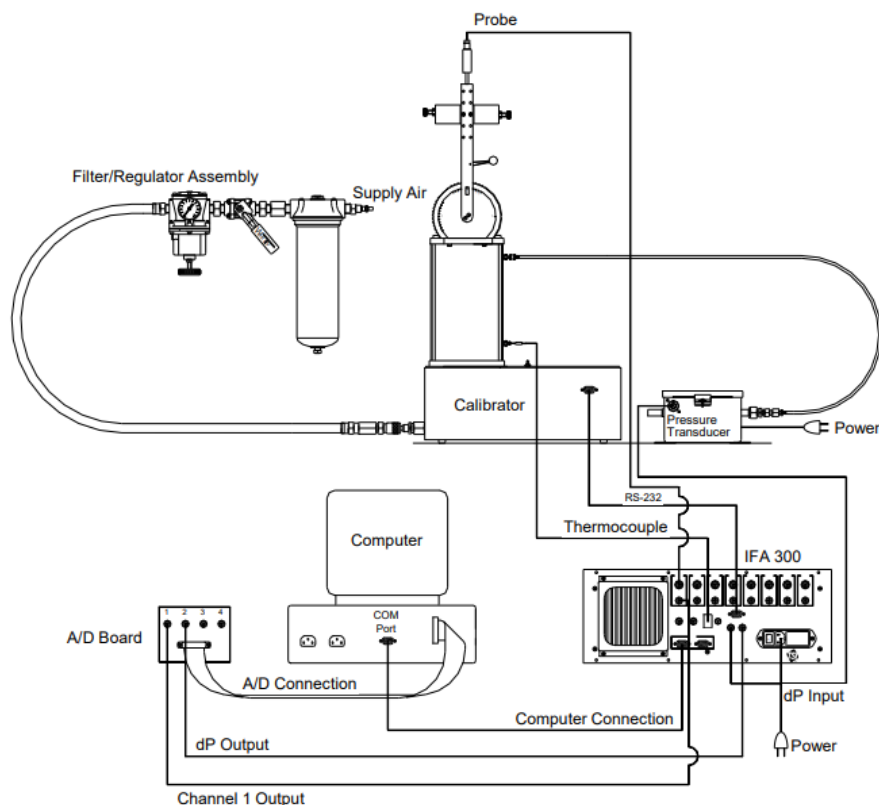
W pracy przedstawiono algorytm regulatora prędkości przepływu opracowany do sterowania kalibratorem sond termooanemometrycznych TSI Model 1129. Zaproponowany algorytm wykorzystuje kaskadową strukturę regulacji z wewnętrzną pętlą sterowania będącą cyfrowym regulatorem proporcjonalno-całkującym. Przedstawiono sposób wyznaczania algorytmu cyfrowego w oparciu o dyskretną transmitancję operatorową. Dokonano wstępnego doboru parametrów regulatora z wykorzystaniem metody Ziegler-Nicholsa. Zaproponowano parametry regulatora zapewniające poprawną pracę kalibratora dla całego zakresu pracy.

Słowa kluczowe: Pomiar przepływu powietrza, kalibracja, cyfrowy regulator PI, kaskadowa struktura regulacji, metoda Ziegler-Nicholsa

Wprowadzenie

Jedną z podstawowych działalności Pracowni Metrologii Przepływów IMG PAN jest projektowanie i wykonywanie termooanemometrycznych systemów pomiarowych. Na proces ten składa się wiele czynników i kończy się wykonaniem kalibracji układu pomiarowego [1,4]. Zakłada ona ustalenie relacji pomiędzy wielkością mierzoną przez kalibrowany przyrząd pomiarowy a wartością wielkości fizycznej realizowaną przez wzorzec jednostki miary [2]. W przypadku kalibracji sond anemometrycznych, wzorcowa prędkość przepływu realizowana jest z wykorzystaniem tuneli aerodynamicznych wyposażonych w odpowiednie przyrządy pomiarowe lub kalibratorów [3]. Jednym z takich urządzeń jest kalibrator sond termooanemometrycznych TSI Model 1129 (Rys. 1), który wchodzi w skład systemu termooanemometrycznego TSI IFA300. Kalibrator przeznaczony jest do wzorcowania sond współpracujących z systemem termooanemometrycznym IFA300. Wiąże się to z brakiem możliwości wykorzystania kalibratora w eksperymentach przepływowych z zakresu mechaniki płynów oraz wzorcowania sond konstruowanych w IMG PAN. Modernizacja stanowiska poprzez zastąpienie systemu IFA300 nowo skonstruowanym układem sterownia pracą kalibratora, pozwoli na pozbycie się tych ograniczeń i umożliwi wykorzystanie kalibratora w szerszym zakresie prac Pracowni. Kluczowym etapem w budowaniu nowego układu sterowania jest opracowanie algorytmów regulacji zapewniających stabilny wpływ powietrza z kalibratora.

W pracy przedstawiono kolejne etapy prowadzące do syntezy regulatora oraz analizę działania zastosowanych regulatorów o różnej strukturze. Na podstawie analizy budowy i sposobu działania kalibratora zaproponowano sposób identyfikacji dynamiki kalibratora oraz opracowano strukturę układu regulacji.



Rys. 1. Stanowisko kalibrowania sond systemu IFA300 z wykorzystaniem kalibratora TSI Model 1129 [6]

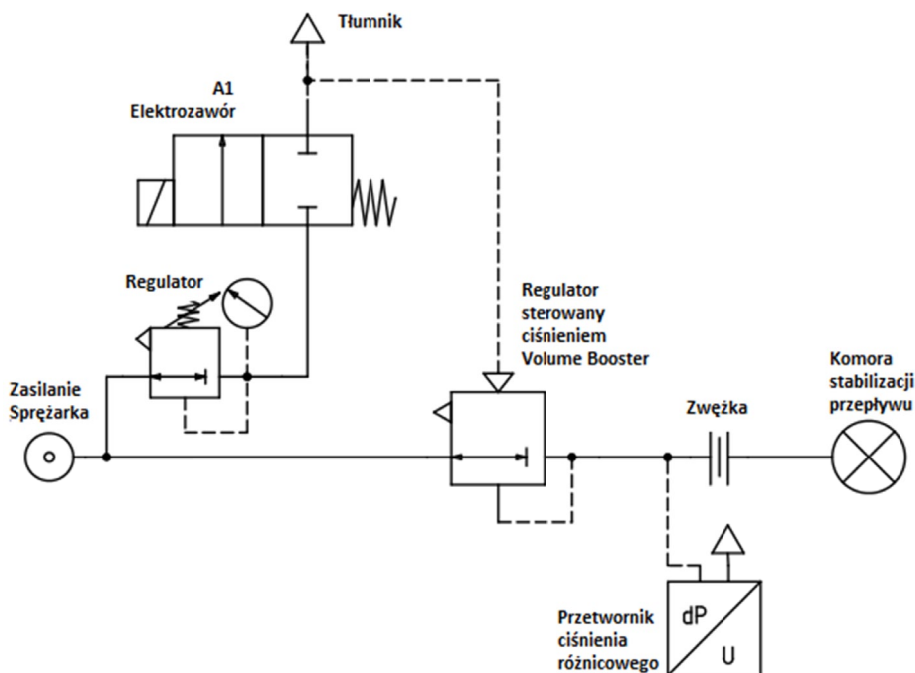
Budowa kalibratora sond termooanemometrycznych TSI Model 1129

Kalibrator TSI model 1129 jest urządzeniem pneumatycznym. Jego schemat blokowy przedstawiono na rysunku 2. Centralnym elementem urządzenia jest cylindryczna komora stabilizacji przepływu zakończona odpowiednio wyprofilowanym zwężeniem, zwanym dyszą wylotową. Bezpośrednio za nią znajduje się obszar, w którym umieszcza się sondy termooanemometryczne. Element ten jest zmieniany w zależności od wybranego zakresu prędkości. Kalibrator wyposażony jest w dwie dysze o średnicy 10 mm oraz 14 mm. Do górnej części komory stabilizacji przepływu zamontowany jest ruchomy statyw. Uchwyt trzymający sondę zamocowany jest na łożyskowanej obrotowej podstawie. Umożliwia to obrót sondy w jej osi. Podstawa ta zamocowana jest na ramieniu, które umożliwia zmianę położenia obrotowej podstawy, obracając sondę względem strumienia przepływu. Statyw ten umożliwia wzorcowanie sond wielowłóknowych, które wykorzystuje się do pomiaru wektora prędkości. W dolnej części komory umieszczona jest termopara typu „T”. Na wlocie komory umieszczona jest kryza, bezpośrednio przed którą mierzone jest ciśnienie różnicowe względem ciśnienia barometrycznego. Pomiar ciśnienia różnicowego dokonywany jest przez przetwornik MKS Baratron®. Zastosowane są kryzy pozwalające na zwiększenie dokładności i czułości pomiaru dla niskich prędkości przepływu. Dostępny zestaw dysz wylotowych oraz kryz pozwala na pomiar z zakresu prędkości od 0.1 m/s do 150 m/s. Ze względu na wydajność sprężarki, w pracy zastosowano zestaw nr 3, zaprojektowany na zakres prędkości 0.1 m/s do 5 m/s.

Sposób sterowania przepływem wymaga omówienia zasady działania układu pneumatycznego. Powietrze z wejścia układu dostarczane jest na regulator sterowany ciśnieniem „Volume Booster”, utrzymujący stałe ciśnienie na wlocie komory stabilizacji przepływu. Ciśnienie to jest zależne od ciśnienia sterującego. Ciśnienie sterujące uzyskuje się zmieniając ilość dopływu powietrza z elektrozaworu, przy czym część powietrza wypływa przez tłumik. Zmieniając stopień otwarcia elektrozaworu kontroluje się prędkość wypływającego powietrza z kalibratora. Elektrozawór sterowany jest poprzez modulację szerokości impulsów PWM. Zwiększając współczynnik wypełnienia d zwiększa się średnia wartość napięcia elektrozaworu. Zastosowana częstotliwość PWM to 18 kHz.

Układ IFA300 sterujący pracą kalibratora zastąpiono nowym urządzeniem mikroprocesorowym, realizującym zadania kontrolno-pomiarowe. Na nowym układzie zaimplementowano algorytmy akwizycji

danych, regulacji oraz identyfikacji obiektu przedstawione w tej pracy. Opracowano również oprogramowanie umożliwiające sterowanie pracą opracowanego urządzenia z poziomu komputera PC.



Rys. 2. Schemat pneumatyczny kalibratora Model 1129 TSI

Wyznaczanie prędkości przepływu kalibratora TSI Model 1129

Eksperymenty pomiarowe przeprowadzone w Pracowni Metrologii Przepływów IMG PAN [5] świadczą o poprawnym działaniu kalibratora. Prędkość przepływu wyznaczona została z zależności podanej w instrukcji kalibratora [6]. W przedstawionych równaniach uwzględnia się wielkości mierzone takie jak: temperaturę medium, ciśnienie otoczenia oraz ciśnienie różnicowe.

Na podstawie teoretycznych zależności, opisanych w dokumentacji [7], prędkość „Calibration Velocity” wyznacza się z następującej definicji:

$$U(\Delta p, T, P) = M \cdot a \quad (1)$$

- Δp – ciśnienie różnicowe [Pa],
- T – temperatura gazu w punkcie stagnacji [°C],
- P – ciśnienie atmosferyczne [Pa],
- M – liczba Macha,
- a – prędkość dźwięku w przepływającym gazie [m/s],
- U – prędkość „Calibration Velocity” [m/s].

Prędkość dźwięku w przepływającym gazie zostanie szerzej omówiona w dalszej części pracy. Liczbę Macha wyznacza się z równania Bernoullego dla gazów ściśliwych:

$$M = \sqrt{\frac{2 \left(\frac{P + \Delta p}{P} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 2}{\gamma - 1}} \quad (2)$$

- P – Ciśnienie atmosferyczne [Pa],
- Δp – ciśnienie różnicowe [Pa],
- γ – wykładnik adiabaty (C_p/C_v) (dla powietrza: $\gamma = 1.399$),
- M – liczba Macha.

Następnie na podstawie równania Newton-Laplace'a wyznacza się prędkość dźwięku dla gazów idealnych:

$$a_0 = \sqrt{\gamma R(T + 273.15)} \quad (3)$$

- T – temperatura gazu w punkcie stagnacji [$^{\circ}\text{C}$],
 $R = \bar{R}/MW$ – indywidualna stała gazowa [$\text{J}/(\text{kgK})$],
 MW – masa cząsteczkowa gazu (dla powietrza: $MW = 28.994$ [kg/kmol]),
 \bar{R} – uniwersalna stała gazowa ($\bar{R} = 8314$ [$\text{J}/(\text{kmolK})$]),
 a_0 – prędkość dźwięku w punkcie stagnacji [m/s].

Jest to prędkość dźwięku wyznaczona w punkcie stagnacji. Dla przepływającego gazu prędkość dźwięku wynosi:

$$a = a_0 \sqrt{\frac{1}{M^2 \left(\frac{\gamma}{2} - \frac{1}{2} \right) + 1}} \quad (4)$$

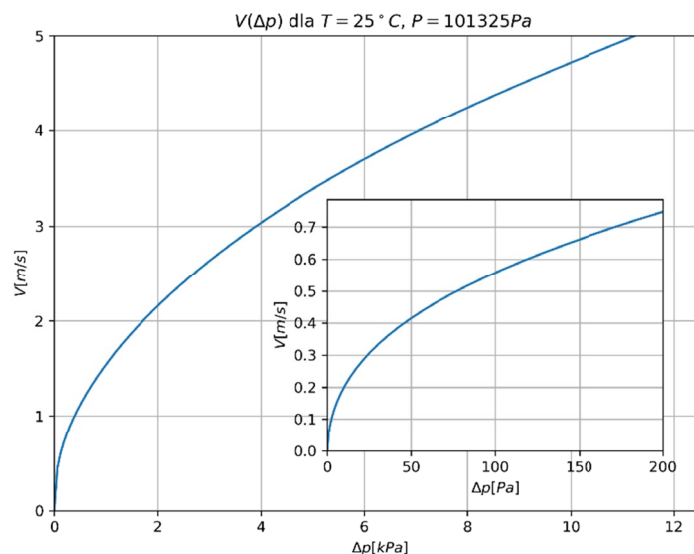
Wyznaczoną prędkość koryguje się uwzględniając wpływ zwężki. Dla zestawu TSI nr 3. prędkość wyznacza się z użyciem wielomianu korygującego:

$$V(U) = k + aU + bU^2 + cU^3 + dU^4 + eU^5 + fU^6 + gU^7 + hU^8 + iU^9 \quad (5)$$

gdzie:

$$\begin{aligned}
 k &= -0.01366 \\
 a &= 0.057953 \\
 b &= -0.0017365 \\
 c &= 6.7386e-05 \\
 d &= -1.5064e-06 \\
 e &= 2.0689e-08 \\
 f &= -1.7582e-10 \\
 g &= 8.9361e-13 \\
 h &= -2.4661e-15 \\
 i &= 2.8118e-18
 \end{aligned}$$

Dla warunków normalnych: temperaturze powietrza $T = 25^{\circ}\text{C}$ i ciśnieniu atmosferycznym $P = 1$ atm = 101325 Pa, wyznaczono zależność prędkości przepływu V w funkcji ciśnienia różnicowego Δp (Rys. 3).

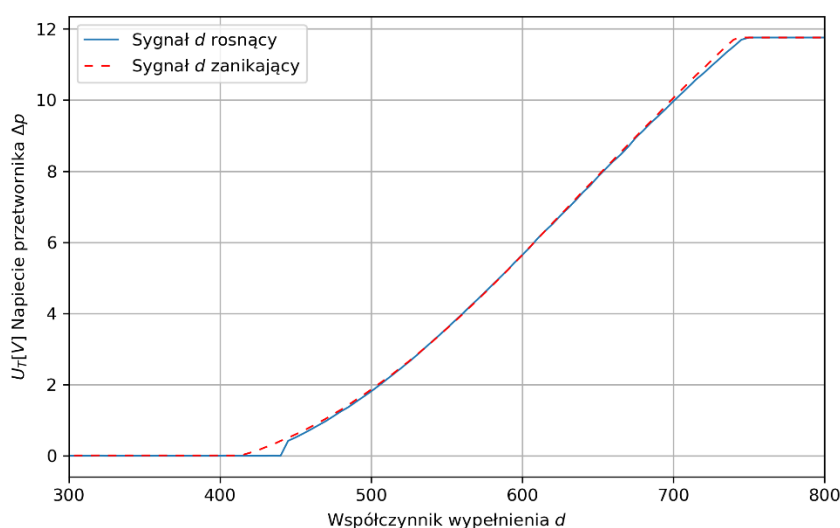


Rys. 3. Prędkości przepływu V w funkcji ciśnienia różnicowego Δp w temperaturze $T = 25^{\circ}\text{C}$ i ciśnieniu atmosferycznym $P = 1$ atm = 101325 Pa (dla zestawu nr 3)

Zależność prędkość V w funkcji ciśnienia Δp wykazuje nieliniowość. Fakt ten został uwzględniony przy projektowaniu struktury regulatora.

Struktura algorytmu regulacji

Na potrzeby syntezy struktury dyskretnego regulatora, wyznaczono charakterystykę statyczną przetwornika ciśnienia różnicowego Δp w postaci zależności napięcia wyjściowego z przetwornika Δp w funkcji wartości mierzonego ciśnienia, zadawanego przez zmianę wypełnienia impulsu d sterującego elektrozaworem (Rys. 4). Ze względu na stałoprzecinkową reprezentację wartości d w programie urządzenia, przyjęto zmienność d od 0 do 1000, co odpowiada współczynnikowi wypełnienia od 0 do 100%. Wyznaczona charakterystyka cechuje się niewielką histerezą oraz na pewnym przedziale jest zbliżona do funkcji liniowej. Praca w zakresie charakterystyki zbliżonej do liniowej $U_T(d_{PWM})$ pozwala na zastosowanie regulatorów typu proporcjonalnego lub proporcjonalno-całkującego. Charakterystykę zbliżoną do liniowej uzyskuje się poprzez dodanie do współczynnika impulsu d wartości d_{offset} , dla którego w stanie ustalonym elektrozawór jest otwarty a napięcie przetwornika ciśnienia różnicowego wynosi $U_T = 1$ V. Podczas procesu regulacji elektrozawór utrzymuje stan otwarty.



Rys. 4. Charakterystyka statyczna zależności napięcia przetwornika Δp w funkcji wartości wypełnienia impulsu d dla temperatury $T = 24^\circ\text{C}$ i ciśnieniu atmosferycznym $P = 1 \text{ atm} = 1031 \text{ hPa}$

Kolejnym krokiem była identyfikacja parametrów dynamicznych obiektu. Elektrozawór, układ pneumatyczny oraz przetwornik ciśnienia Δp uznano za jeden obiekt. Przeprowadzono badanie odpowiedzi układu na skokową zmianę napięcia elektrozaworu, realizowaną przez zmianę współczynnika d od 0 do wartości zadanej d_z . Sygnałem wyjściowym było napięcie przetwornika ciśnienia różnicowego U_T . Na wykresie (Rys. 5) przedstawiono uzyskane odpowiedzi czasowe ze znormalizowanym sygnałem:

$$U_{Tnorm}(t) = \frac{U_T(t)}{U_{Tmax}} \quad (6)$$

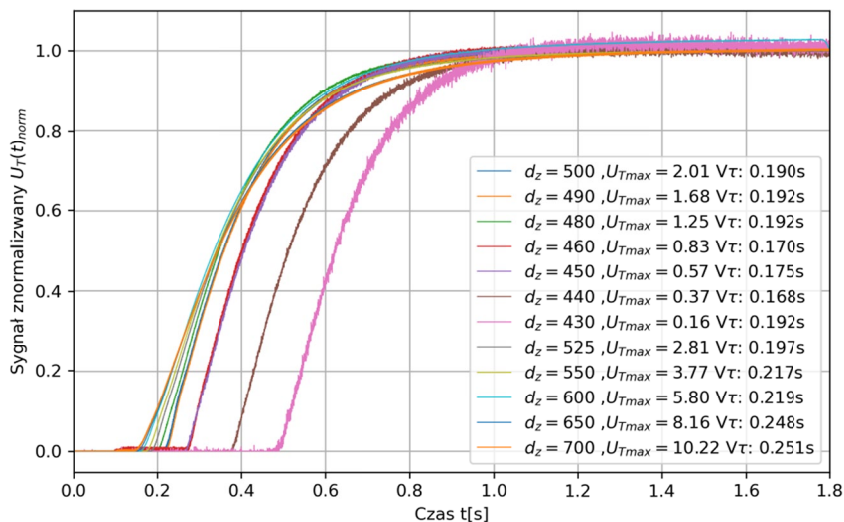
$U_T(t)$ – napięcie przetwornika Δp ,

U_{Tmax} – ustalone napięcie uzyskane dla danego współczynnika d ,

U_{Tnorm} – znormalizowany sygnał przetwornika Δp .

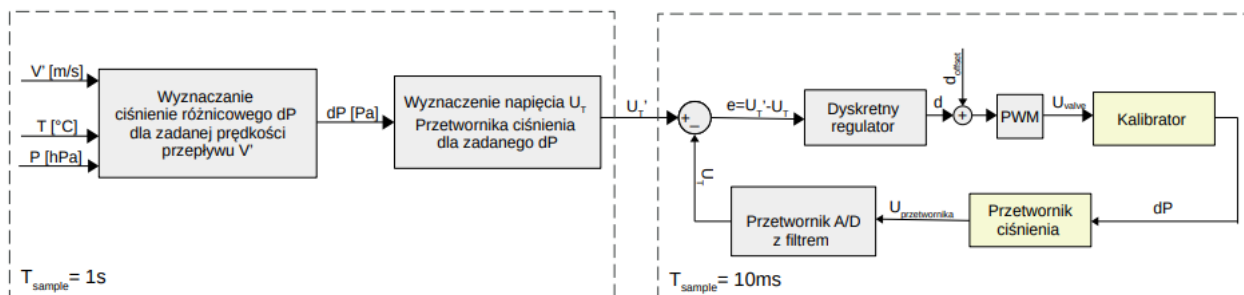
Na podstawie wykresu (Rys. 5) określono odpowiedź dynamiczną. Obiekt aproksymowano obiektem I rzędu i wyznaczono stałą czasową τ . Na tej podstawie przyjęto czas próbkowania, uznano za odpowiedni czas próbkowania $T_s = 10 \text{ ms}$ ($T_s \approx \tau_{\text{średnie}}/18$). Jest to wartość wystarczająca do wiernego zrekonstruowania sygnału.

W wyniku przeprowadzonych analiz zaproponowano kaskadową strukturę regulacji. Jej schemat przedstawiono na rysunku 6. W wewnętrznej pętli sterowania sygnałem zwrotnym jest napięcie przetwornika



Rys. 5. Znormalizowana odpowiedź sygnału przetwornika Δp na skok wypełnienia impulsu d

ciśnienia różnicowego U_T . Sygnałem referencyjnym jest U_T' wyznaczanym na podstawie zadanej prędkości V' , temperatury T i ciśnienia atmosferycznego P . Pomiar temperatury i ciśnienia atmosferycznego, ze względu na zastosowane przetworniki, dokonuje się co 1 s.



Rys. 6. Schemat blokowy układu regulacji (kolorem szarym zaznaczono człony realizowane cyfrowo)

Sygnał referencyjny U_T' wyznacza się na podstawie liniowej charakterystyki przetwornika ciśnienia różnicowego dla ciśnienia Δp odpowiadającej zadanej prędkości w danych warunkach. Ciśnienie różnicowe Δp odpowiadające zadanej prędkości wyznacza się rozwiązując nieliniowe równanie :

$$V(U(\Delta p, T, P)) = V_{ref} \quad (7)$$

Do jego rozwiązania wykorzystano metodą bisekcji [8].

Algorytm cyfrowy regulatora PI

Zdefiniowanie algorytmu cyfrowego regulatora wymaga znajomości transmitancji dyskretnego regulatora. W tym celu należy dokonać dyskretyzacji transmitancji ciągłej regulatora PI. Przy wykorzystaniu metody Tustina do dyskretyzacji [9,10], transmitancja regulatora dyskretnego PI wynosi:

$$G(z) = \frac{K_1 z + K_2}{z - 1} \quad (8)$$

Współczynniki K_1, K_2 wynoszą odpowiednio:

$$K_1 = K_p + K_i \frac{T_s}{2T_i}, \quad K_2 = K_i \frac{T_s}{2T_i} - K_p \quad (9)$$

gdzie:

- K_p – wzmacnienie członu proporcjonalnego regulatora ciągłego,
- K_i – wzmacnienie członu proporcjonalno-całkującego regulatora ciągłego,
- T_i – czas całkowania,
- $T_s = T_{s1}$ – czas próbkowania.

Algorytm cyfrowy uzyskuje się poprzez dokonanie odwrotnej transformacji Z. W tym celu dokonano kolejnych przekształceń:

$$G(z) = \frac{y(z)}{e(z)} = \frac{K_1 z + K_2}{z - 1} \quad (10)$$

$$\frac{y(z)}{e(z)} = \frac{K_1 + K_2 z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (11)$$

$$d(z) - d(z)z^{-1} = K_1 e(z) + K_2 e(z)z^{-1} \quad (12)$$

gdzie:

- $d(k)$ – sygnał wyjściowy,
- $e(k) = U_T(k) - U_T'(k)$ – uchyb regulacji.

Dokonyjąc odwrotnej transformacji Z, otrzymuje się algorytm:

$$d(k) = K_1 e(k) + K_2 e(k-1) + d(k-1) \quad (13)$$

Suma sygnałów wyjściowy pochodzący z bloku całkującego i proporcjonalnego, wynosi:

$$d_p(k) = K_p e(k) \quad d_I(k) = K_1 e(k) + K_2 e(k-1) + d(k-1) - K_p e(k) \quad (14)$$

Dobór nastaw regulatora PI metoda Ziegler-Nicholsa

Strojenie układu sterowania metodami heurystycznymi pozwala na wstępny dobór parametrów. Do wstępnego strojenia regulatora P zastosowano II metodę Zieglera-Nicholsa. Metoda wymaga wyznaczenia w sposób empiryczny wzmacnienia krytycznego K_u dla którego powstają nie tłumione oscylacje na wyjściu układu. Następnie na podstawie K_u można obliczyć K_p , korzystając z tabeli 1. Znając okres oscylacji krytycznych P_u można wyznaczyć parametry regulatorów PI, PID.

Tab. 1. Współczynniki metody Ziegler-Nicholsa

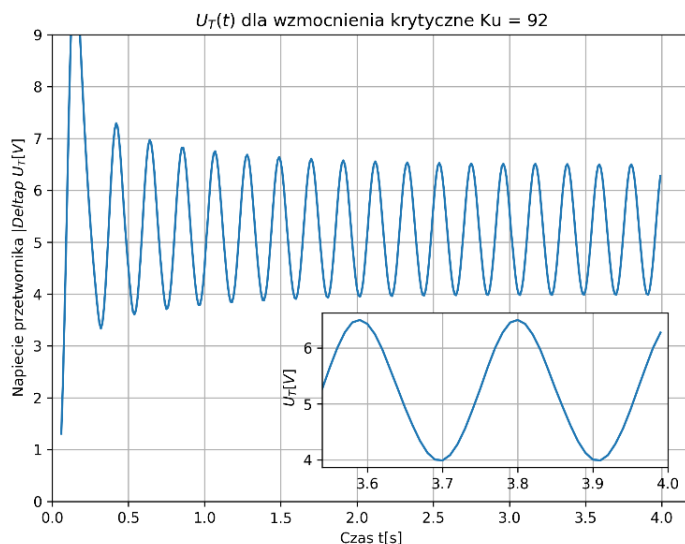
Typ regulacji	K_p	K_i	K_d
P	$0.5K_u$	—	—
PI	$0.45K_u$	$1.2K_p/P_u$	—
PID	$0.6K_u$	$2K_p/P_u$	$K_p P_u/8$

Na podstawie odpowiedzi układu (Rys. 7) wyznaczono wzmacnienie krytyczne wynoszące $K_u = 92$ oraz okres drgań krytycznych wynoszące $P_u = 0.21$ s. Na tej podstawie wyznaczono parametry P i PI dla metody Ziegler-Nicholsa – tabela 2.

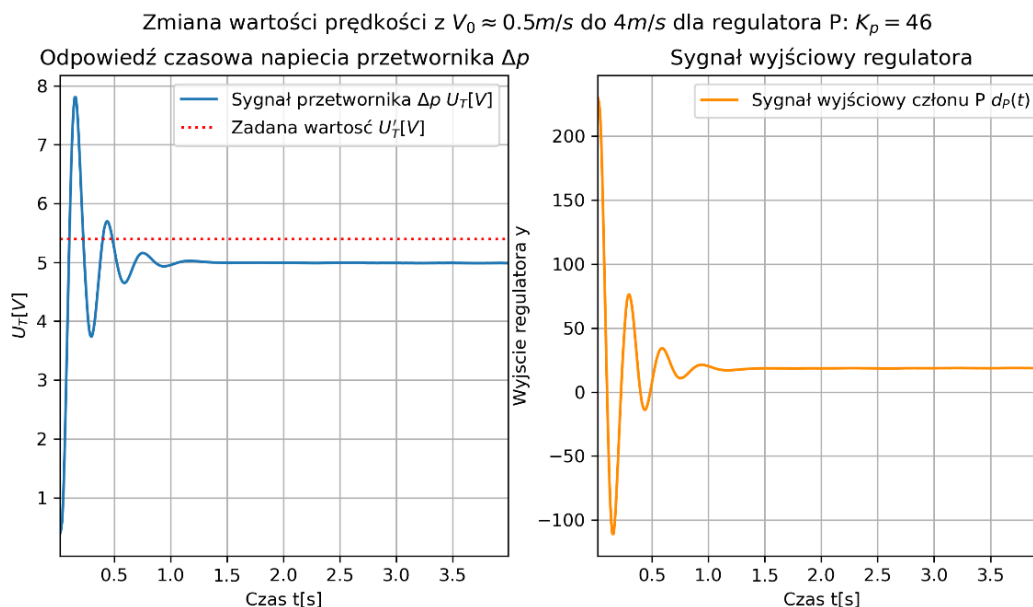
Tab. 2. Wyznaczone współczynniki z wykorzystaniem metody Ziegler-Nicholsa

Typ regulacji	K_p	K_i
P	46.0	—
PI	41.4	236.6

Zbadano odpowiedź układu na skokową zmianę prędkości od $V_0 \approx 0.5$ m/s do $V = 4$ m/s dla regulatora P (Rys. 8) oraz PI (Rys. 9) dobranego metodą Ziegler-Nicholsa. Następnie wyznaczono wskaźniki jakości regulacji.



Rys. 7. Nietłumione oscylacje dla wzmocnienia krytycznego wynoszącego $K_u = 92$ oraz okres drgań krytycznych $P_u = 0.21$ s

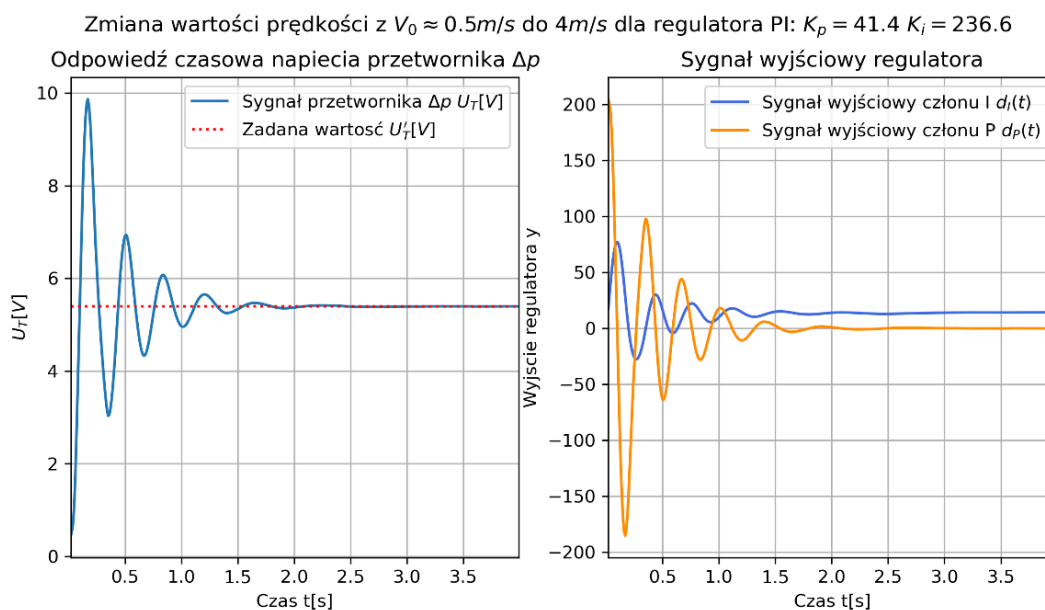


Rys. 8. Odpowiedź skokowa układu dla regulatora P dobranego metoda Ziegler-Nicholsa $K_p = 46$, $e_u = 0.404$ V, $\kappa = 55.7\%$, $t_o = 0.09$ s, $t_R = \infty$

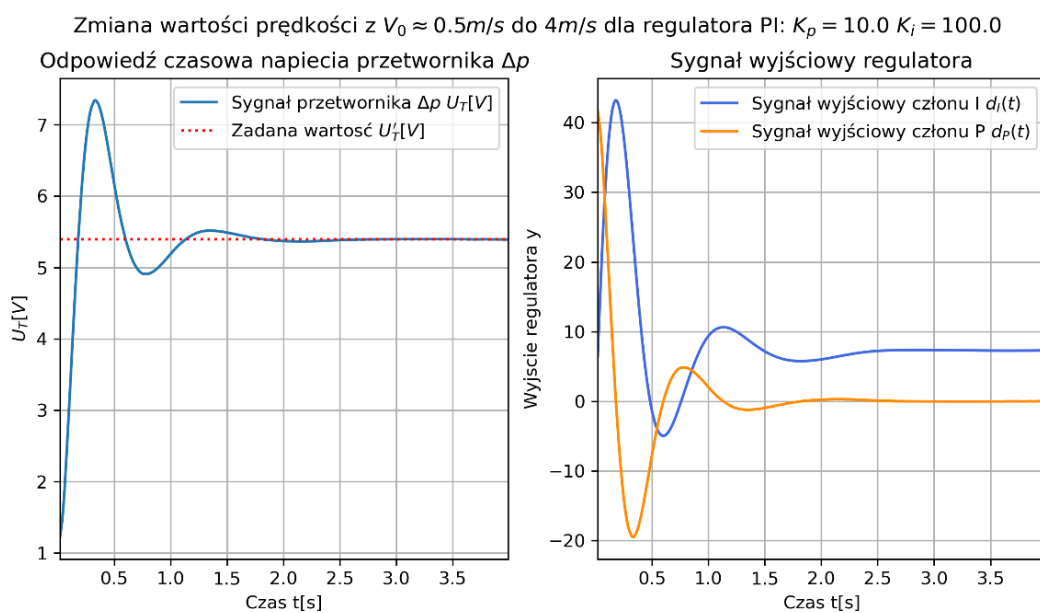
Regulator typu P charakteryzuje się znacznym uchybem ustalonym. Minimalizację uchybu ustalonego umożliwia dodanie członu całkującego do regulatora, uzyskując regulator typu PI. Metoda Ziegler-Nicholsa sprawdziła się jako metoda wstępnego doboru parametrów regulatora PI. Uzyskano odpowiedź układu o krótkim czasie regulacji z dużą wartością przesterowania. Zmniejszenie wzmocnienia członu proporcjonalnego oraz całkującego do wartości $K_p = 10$, $K_i = 100$ pozwoliło na uzyskanie lepszych parametrów regulacji: przeregulowanie $\kappa = 36.1\%$ względem $\kappa = 82.9\%$, czas regulacji $t_R = 1.35$ s względem $t_R = 1.44$ s.

Ocena działania algorytmu regulacji

Najważniejszym kryterium doboru algorytmu regulacji jest zapewnienie poprawnej pracy urządzenia w całym zakresie generowanych prędkości przepływu. Poprawność działania algorytmu regulacji sprawdzono badając odpowiedź układu na skok jednostkowy o zadanej prędkości z zakresu od $V_0 \approx 0.5$ m/s do 4 m/s (Rys. 11). Następnie wyznaczono wskaźniki jakości regulacji, wyniki zanotowano w tabeli 3. Uzyskane



Rys. 9. Odpowiedź skokowa układu dla regulatora PI dobranego metodą Ziegler-Nicholsa $K_p = 41.4$ oraz $K_i = 236.6$, $e_u = 0$, $\kappa = 82.9\%$, $t_o = 0.08$ s, $t_R = 1.44$ s

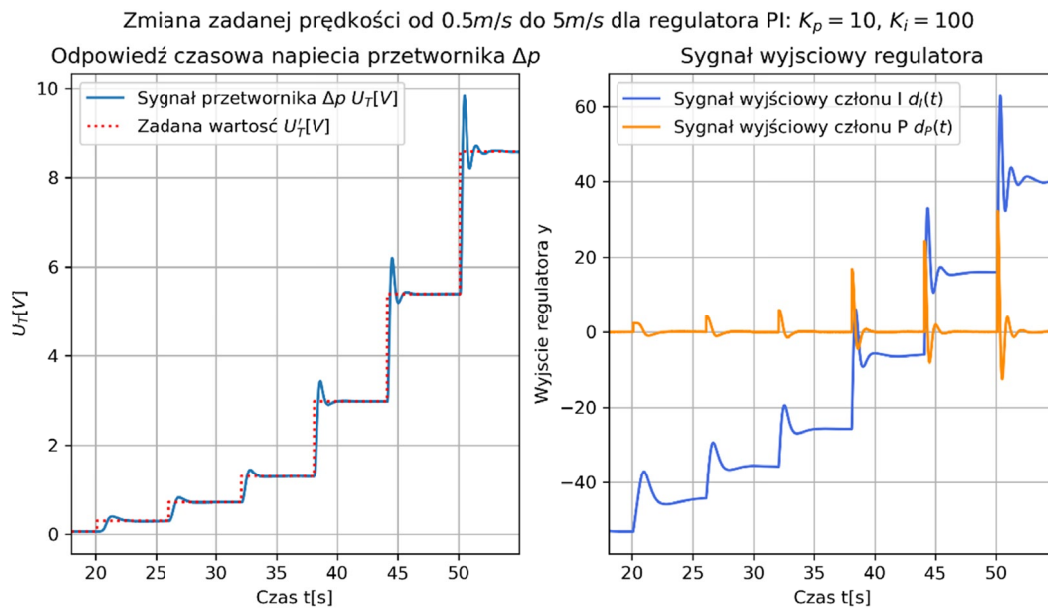


Rys. 10. Odpowiedź skokowa układu dla regulatora PI dla wzmocnień $K_p = 10$ oraz $K_i = 100$, $e_u = 0.0$, $\kappa = 36.1\%$, $t_o = 0.09$ s, $t_R = 1.35$ s

wyniki można uznać za zadowalające, umożliwiając zastosowanie tego algorytmu regulacji w procesie sterowania prędkością przepływu generowanego przez kalibrator.

Tab. 3. Wskaźniki jakości odpowiedzi skokowej z rysunku 11

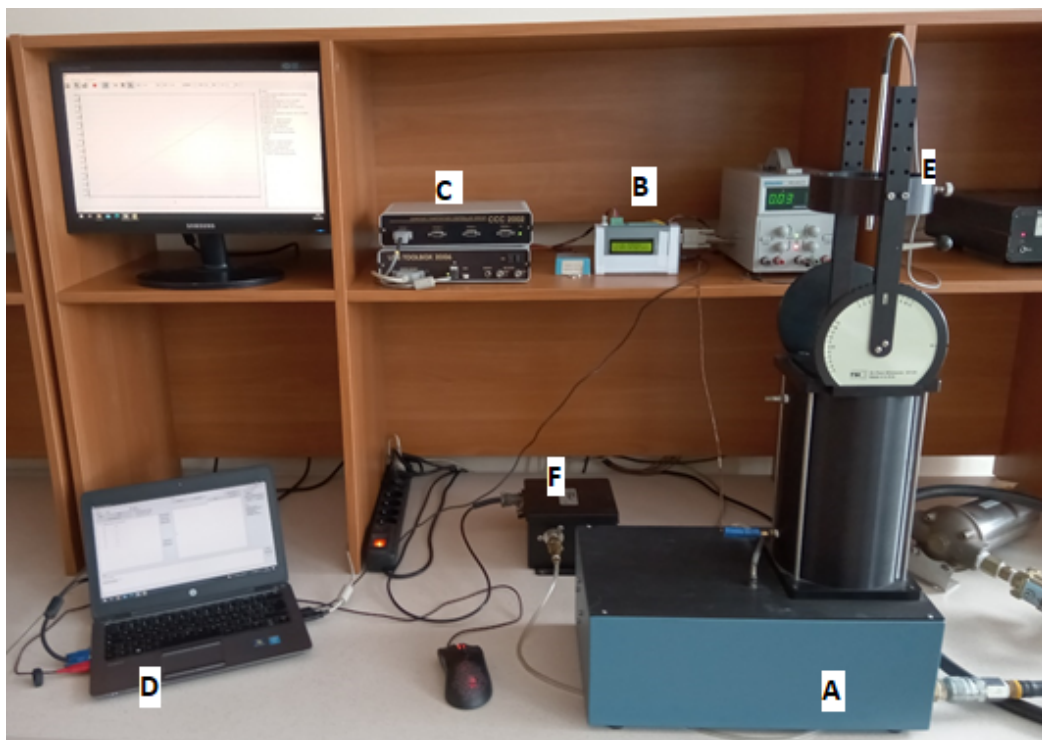
Zadana prędkość V [m/s]	Napięcie zadane U_T' [V]	Przeregulowanie κ [%]	Czas odpowiedzi t_o [s]	Czas regulacji t_R [s]
1.0	0.297	33.6	0.88	4.94
1.5	0.716	15.3	0.57	1.67
2.0	1.301	11.0	0.46	1.27
3.0	2.981	15.1	0.31	1.30
4.0	5.395	15.0	0.26	1.12
5.0	8.600	14.5	0.23	0.99



Rys. 11. Odpowiedź skokowa układu dla regulatora PI $K_p = 10$ oraz $K_i = 100$ przy zmianie zadawanej prędkości

Podsumowanie

Opracowano algorytm sterowania prędkością przepływu gazu w kalibratorze sond termooanemometrycznych. Zaproponowany cyfrowy regulator proporcjonalno całkujący został dostrojony uzyskując stabilną pracę w pełnym zakresie prędkości. Czas regulacji został skrócony do kilku sekund w porównaniu do czasu regulacji przy sterowaniu kalibratorem przez układ IFA300.



Rys. 12. Stanowisko kalibratora prędkości z układem sterownia, w którym zastosowano omawiany w pracy algorytm regulacji

- A) Kalibrator sond termooanemometrycznych TSI Model 1129; B) Opracowany sterownik kalibratora; C) Bezmostkowy stałotemperaturowy układ termooanemometryczny Constant-Temperature Controlled Circuit CCC 2002 Paweł Ligęza [11];
- D) Komputer z oprogramowaniem sterujące układ termooanemometryczny CCC 2002 oraz pracą kalibratora;
- E) Sonda termooanemometru zamontowana w ruchomym statywie kalibratora; F) Przetwornik ciśnienia różnicowego

Algorytm ten zastosowano w opracowanym układzie sterownika kalibratora TSI Model 1129. Uzyskano stanowisko wzorcujące przedstawione na rysunku 12. Zaprojektowany układ sterowania pracą kalibratora umożliwia bezpośrednie zadawanie prędkości, czego nie umożliwiał oryginalny system IFA300. Stanowisko kontrolowane jest z poziomu komputera PC, na którym ustawia się zadaną prędkość oraz parametry regulatora. Stanowisko w tej formie umożliwia wzorcowanie sond termooanemometrycznych różnego typu oraz badań innych czujników do pomiaru prędkości przepływu.

Literatura

- [1] P. Ligęza, Constant-Temperature Anemometer Bandwidth Shape Determination for Energy Spectrum Study of Turbulent Flows July 2021 *Energies* 14 (15):4495
- [2] P. Ligęza, Static and dynamic parameters of hot-wire sensors in a wide range of filament diameters as a criterion for optimal sensor selection in measurement process October 2019 *Measurement* 151:107177
- [3] International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM) (3rd ed.). International Bureau of Weights and Measures. 2008.
- [4] P. Jamróz Interaction between the Standard and the Measurement Instrument during the Flow Velocity Sensor Calibration Process, October 2021, *Processes* 9(10):1792
- [5] D. Kęsek, J. Kielbasa, E. Poleszczyk, A. Rachalski. Anemometr z falą cieplną i anemometr TSI – porównanie. Instytut Mechaniki Górotworu PAN, 2013.
- [6] TSI Model 1129 Automated Air Velocity Calibrator – User’s Manual, 2015.
- [7] B. Lautrup *Physics of Continuous Matter : Exotic and Everyday Phenomena in the Macroscopic World*, Rozdział: 17 Compressible flow. 2009.
- [8] Z. Fortuna, M. Bohdan, J. Wąsowski *Metody numeryczne*. Wydawnictwo naukowe PWM, 2017
- [9] G. Sieklucki *Elementarz automatyka dla elektryków*. 2020.
- [10] T. Wiśniewski. *Zaawansowane metody syntezy układów regulacji bloku energetycznego*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2011.
- [11] P. Ligęza, *Aplikacja znaczników termicznych w pomiarach przepływu gazu*, 2019.

Algorithm for controlling the velocity in the hot-wire sensors calibrator

Abstract

This article presents the algorithm of air flow velocity regulator designed for air velocity calibrator TSI Model 1129. The algorithm involves cascade control with inner loop with PI. Introduce method of design digital controller based on discrete transfer function. Ziegler-Nichols method was using to pre-tuned the controller. Parameters of the controlled device ensuring correct operation of the calibrator in the full working range were proposed.

Keywords: Air flow velocity measurement, calibration, digital PI controller, cascade control, Ziegler-Nichols method