

LABORATORIUM PODSTAW CZUJNIKÓW POMIAROWYCH

Instrukcja do ćwiczenia nr 1 i 2

Pomiary Przepływu

Ćwiczenie opracował:
Dr inż. Grzegorz Pankanin

Warszawa 2000

Spis treści

1. Cel ćwiczenia	3
2. Wprowadzenie	3
3. Pojęcia podstawowe	4
4. Dokładność przepływomierzy	7
5. Metoda wirowa pomiaru przepływu	8
5.1. Zasada działania	8
5.2. Budowa przepływomierza wirowego	9
5.3. Optymalizacja przepływomierza wirowego	10
5.4. Zakres zastosowań i parametry	10
6. Metody wzorcowania przepływomierzy	11
7. Badania laboratoryjne	11
7.1. Stanowisko badawcze	11
7.2. Obiekt badań	13
7.3. Program badań	13

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zaznajomienie studentów z podstawowymi metodami skalowania, problemami występującymi przy skalowaniu oraz metodami przetwarzania sygnału pomiarowego na przykładzie przepływomierza wirowego.

2. Wprowadzenie

Potrzeby przemysłu w dziedzinie automatyzacji i sterowania procesami technologicznymi są przyczyną rozwoju elektrycznych metod pomiaru wielkości nieelektrycznych. Spośród ogromnej liczby różnych wielkości fizycznych, które można mierzyć metodami elektronicznymi, szczególne znaczenie praktyczne posiada, obok takich wielkości jak temperatura i ciśnienie, również pomiar przepływu.

W dziedzinie pomiarów przepływu można mówić o pewnym granicznym celu, do którego należy dążyć przy konstruowaniu czujników. Czujniki do pomiaru przepływu powinny charakteryzować się:

- wysoką dokładnością
- liniową charakterystyką przetwarzania
- powtarzalnością wyników pomiarów
- szerokim zakresem pomiarowym
- niskim spadkiem ciśnienia
- nie zakłócaniem przepływu
- uniwersalnością – niezależnością wyniku pomiaru od właściwości fizyko-chemicznych medium
- wysoką niezawodnością
- wyjściem elektrycznym, najkorzystniej częstotliwościowym
- niską ceną

Jeśli wymienione cechy zrozumiemy jako cel, do którego należy zmierzać przy konstruowaniu czujników, to będziemy mogli z jednej strony porównywać stosowane czujniki, a z drugiej doskonalić je pod kątem przybliżania się do tych cech granicznych.

Należy sobie jednak zdawać sprawę, że poprawianie parametrów metrologicznych czy użytkowych czujnika wiąże się zazwyczaj ze wzrostem kosztów, przy czym rosną one tym szybciej im bardziej zbliżamy się do granicznych, możliwych do osiągnięcia wartości poszczególnych parametrów.

3. Pojęcia podstawowe

Przepływomierz jest urządzeniem służącym do pomiaru strumienia objętości bądź strumienia masy medium.

Strumień objętości jest zdefiniowany jako stosunek objętości medium do czasu, w jakim ta objętość przepłynęła przez przekrój poprzeczny rurociągu:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (1)$$

gdzie:

Q - strumień objętości
V - objętość medium
t - czas

Używa się też definicji całkowej, gdzie strumień objętości stanowi całkę po powierzchni przekroju rurociągu z prędkości płynu:

$$Q = \int \int_A v dA \quad (2)$$

gdzie:

v - prędkość medium
A - pole przekroju rurociągu

Strumień masy jest zdefiniowany jako stosunek masy płynu do czasu, w jakim ta masa przepłynęła przez przekrój poprzeczny rurociągu:

$$Q_m = \frac{m}{t} \quad (3)$$

gdzie:

Q_m - strumień masy
m - masa medium
t - czas

Używa się też definicji całkowej:

$$Q_m = \int \int_A \rho \cdot v \cdot dA \quad (4)$$

gdzie:

ρ - gęstość płynu
v - prędkość płynu
A - pole przekroju rurociągu

Licznik płynu jest to urządzenie służące do pomiaru objętości bądź masy medium.

Objętość medium stanowi całka ze strumienia objętości:

$$V = \int_{t_1}^{t_2} Q dt \quad (5)$$

natomiast masa medium:

$$m = \int_{t_1}^{t_2} Q_m dt \quad (6)$$

Niezwykle istotnym i przydatnym podczas wzorcowania przepływomierzy charakteryzujących się częstotliwościowym sygnałem pomiarowym parametrem jest **stała przepływomierza** wyrażona poprzez liczbę impulsów przypadających na jednostkę płynu:

$$k = \frac{N}{V} = \frac{f}{Q} \quad (7)$$

gdzie:

- k – stała przepływomierza
- N – liczba impulsów sygnału wyjściowego przepływomierza
- V – objętość medium, jaka przepłynęła przez czujnik przepływomierza podczas wygenerowania N impulsów
- f – częstotliwość sygnału wyjściowego przepływomierza
- Q – strumień objętości medium

Błąd nieliniowości jest miarą maksymalnego odchylenia wartości stałej przepływomierza od jej wartości średniej:

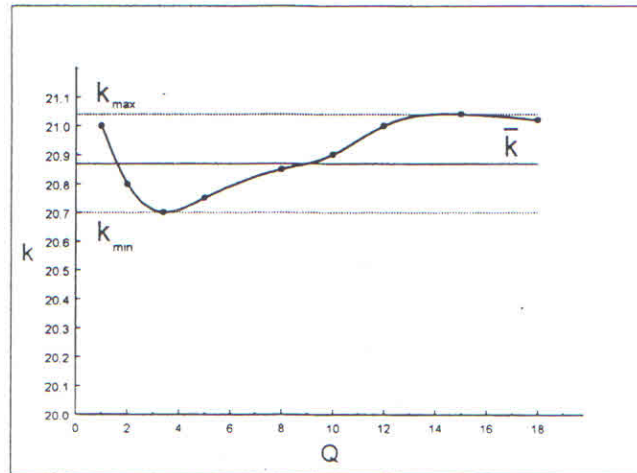
$$\delta_n k = \frac{k_{\max} - \bar{k}}{\bar{k}} \cdot 100\% \quad (8)$$

gdzie:

- k_{\max} - wartość maksymalna stałej w przebadanym zakresie strumienia objętości
- \bar{k} - wartość średnia stałej w przebadanym zakresie strumienia objętości obliczana zgodnie z zależnością:

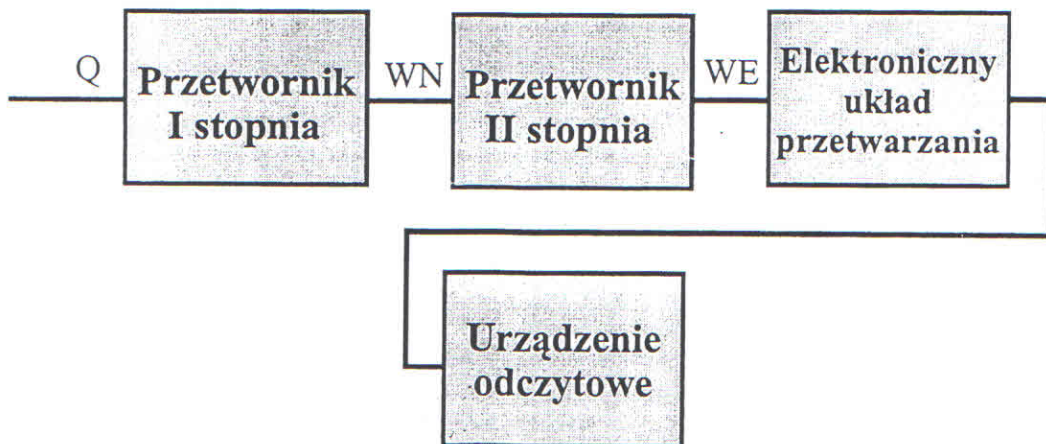
$$\bar{k} = \frac{k_{\max} + k_{\min}}{2} \quad (9)$$

Przykładową charakterystykę stałej przepływomierza przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Przykładowa charakterystyka stałej przepływomierza

Przepływomierze w swojej zdecydowanej większości realizują zasadę podwójnego przetwarzania (rys.2).



Rys. 2. Realizacja zasady podwójnego przetwarzania w przepływomierzu (Q-strumień objętości, WN-wielkość nieelektryczna, WE-wielkość elektryczna)

Oznacza to, że przepływ (strumień objętości) jest przetwarzany w przetworniku pierwszego stopnia na inną wielkość nieelektryczną (najczęściej mechaniczną) dogodną do przetworzenia w przetworniku drugiego stopnia na sygnał elektryczny. Jako przykład można tu wymienić czujnik przepływomierza turbinkowego, w którym przepływ jest przetwarzany na prędkość obrotową wirnika, którą następnie detekuje się za pomocą przetworników magnetycznych, reluktancyjnych czy optoelektrycznych.

Należy podkreślić, że zdecydowana większość przepływomierzy jest przepływomierzami objętościowymi, tzn. reaguje na strumień objętości. Tylko nieliczne są ze względu na zasadę działania przepływomierzami masowymi.

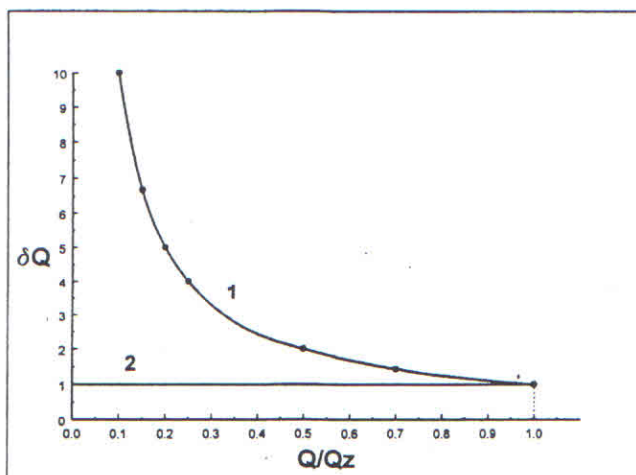
4. Dokładność przepływomierzy

Dokładność należy do podstawowych parametrów przepływomierza. Trzeba jednak zdawać sobie sprawę z faktu, że rzeczywisty - efektywny błąd pomiaru przepływu może w istotny sposób różnić się od parametru nazywanego "dokładność" lub "błąd pomiaru" podawanego przez producentów przepływomierzy.

Pierwsza przyczyna tej rozbieżności może zawierać się w samym zdefiniowaniu tego parametru. Spotykane jest tu dwojakié podejście:

- 1* błąd jest odniesiony do wartości mierzonej,
- 2* błąd jest odniesiony do wartości zakresowej - w tym przypadku mamy do czynienia z tzw. błędem klasy.

W drugim przypadku rzeczywisty błąd pomiaru dla wartości mierzonej mniejszej od wartości zakresowej jest zawsze większy od podanego przez producenta błędu klasy i np. dla przepływomierza o zakresowości 10:1 błąd ten może wzrosnąć 10-krotnie, a dla przepływomierza o zakresowości 50:1 - nawet 50-krotnie(!). Ilustruje to rys.3.



Rys. 3. Błąd graniczny pomiaru strumienia objętości przy obu sposobach zdefiniowania dokładności przepływomierza (1-błąd 1% odniesiony do wartości mierzonej, 2-błąd 1% odniesiony do wartości zakresowej)

Należy pamiętać, że parametr ten określa jedynie tzw. błąd podstawowy przyrządu, tzn. dokładność w warunkach nominalnych (medium o określonym składzie chemicznym, w danej temperaturze i przy danym ciśnieniu). W praktyce warunki rzeczywiste pomiaru zazwyczaj odbiegają od warunków nominalnych. Wynikający z tego błąd dodatkowy pomiaru zależy od wrażliwości danego typu przepływomierza na właściwości fizyko-chemiczne medium. Istnieje oczywiście teoretyczna możliwość korekcji wskazań przepływomierza np. korekcja temperaturowa, jednak wymaga ona stosowania dodatkowych czujników pomiarowych i rozbudowy systemów przetwarzania danych pomiarowych.

Na błąd pomiaru, szczególnie w przypadku przepływomierzy zawierających części ruchome, istotny wpływ może mieć ich zużycie, czy generalnie ujmując: czas pracy. Mamy tu do

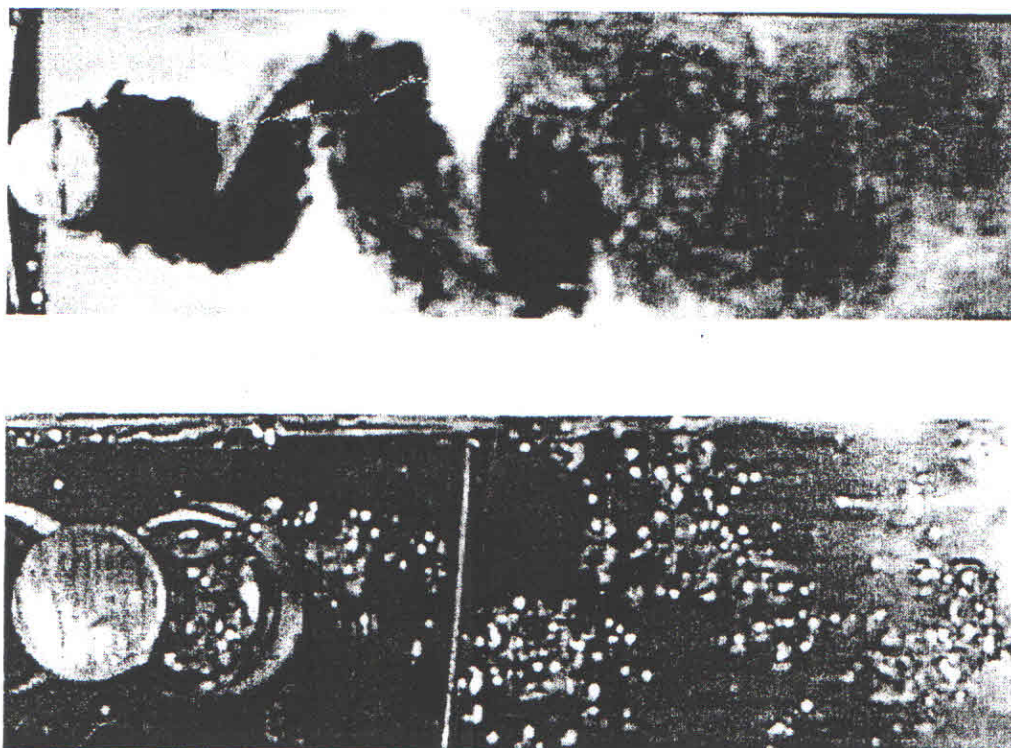
czynienia z tzw. uszkodzeniem parametrycznym polegającym na niekontrolowanej zmianie stałej przepływomierza w czasie jego normalnej pracy (bez objawów uszkodzenia). Najłatwiej to wytłumaczyć na przykładzie przepływomierza turbinkowego. Jak wiadomo, zanieczyszczenia chemiczne i mechaniczne medium powodują przyspieszone zużycie łożysk turbinki. W efekcie turbinka przy danym przepływie obraca się coraz wolniej, co oznacza, że liczba obrotów turbinki przypadająca na jednostkę objętości medium (stała przepływomierza) maleje. Ponieważ do wyznaczania wartości strumienia objętości czy też objętości medium wykorzystuje się nominalną wartość stałej przepływomierza, występuje tu dodatkowy błąd pomiaru. Może on osiągać nawet znaczne wartości, co jest tym groźniejsze, że wykrycie uszkodzenia parametrycznego zainstalowanego przepływomierza jest trudne.

5. Metoda wirowa pomiaru przepływu

Spośród przepływomierzy wykorzystujących powstawanie oscylacji hydrodynamicznych w przepływającym płynie najbardziej znanym i najpowszechniej stosowanym jest przepływomierz wirowy. Uzyskiwane parametry jak i cały szereg zalet przepływomierzy wirowych czynią je szczególnie atrakcyjnymi w zastosowaniach przemysłowych.

5.1. Zasada działania

Przepływomierz wirowy wykorzystuje zjawisko generacji ścieżki wirowej von Karmana na przeszkodzie umieszczonej w przepływającym płynie (fot.1.).



Fot.1. Wiry von Karmana generowane na przeszkodzie (zdjęcia wizualizacyjne uzyskane z wykorzystaniem dwóch różnych technik)

Częstotliwość generowanych naprzemiennie po obu stronach przeszkody wirów jest liniową funkcją prędkości przepływu zgodnie z zależnością:

$$f = S_T \frac{v}{d} \quad (10)$$

gdzie:

f - częstotliwość generowanych wirów

S_T - liczba Strouhala

v - prędkość liniowa medium

d - wymiar charakterystyczny przeszkody - generatora wirów

Częstotliwość generowanych wirów jest liniową funkcją prędkości medium w zakresie stałości liczby Strouhala S_T . Okazuje się, że zakres ten zależy od kształtu przeszkody i np. dla belki o przekroju prostokątnym obejmuje zakres liczb Reynoldsa od 10^3 do 10^5 . Stwarza to możliwość skonstruowania przepływomierza o zakresowości 100:1. W praktyce jednak zakresowość produkowanych przepływomierzy wirowych nie przekracza wartości 30:1.

Bardzo istotną zaletą przepływomierza wirowego jest niezależność wyniku pomiaru od właściwości fizycznych medium, takich jak lepkość, gęstość czy temperatura. Niektórzy autorzy podają nawet, że wynik pomiaru nie zależy od tego, czy medium stanowi ciecz czy gaz. Niewrażliwość przepływomierza wirowego na właściwości fizyczne medium ma w przypadku zastosowań przemysłowych niezwykle istotne znaczenie. Przyczynia się bowiem do istotnego zredukowania wartości błędu dodatkowego wynikającego ze zmiany składu chemicznego bądź temperatury medium. Brak części ruchomych w przepływomierzu wirowym w istotnym stopniu decyduje o dużej niezawodności urządzenia, a z drugiej strony eliminuje możliwość wystąpienia uszkodzenia parametrycznego i związanego z nim dodatkowego błędu pomiaru.

5.2. Budowa przepływomierza wirowego

Podstawowym elementem przepływomierza wirowego jest przeszkoda - generator wirów. Jego kształt i wymiary geometryczne decydują o mocy i regularności generowanych wirów. Spływające z przeszkody wiry są detekowane za pomocą przetwornika drugiego stopnia. Jak wiadomo, istnienie wiru jest związane z zaburzeniem lokalnych wartości ciśnienia i prędkości. Wiry mogą więc być detekowane za pomocą przetworników ciśnieniowych bądź prędkościowych. Stosowane są przetworniki termiczne, ultradźwiękowe, piezoelektryczne, tensometryczne itp. Istotnym wymaganiem stawianym przetwornikom stosowanym do detekcji wirów w przepływomierzu wirowym jest duża czułość w połączeniu z małą wrażliwością na zakłócenia zewnętrzne. Należy zauważyć, że detektor wirów ma reagować na zmiany prędkości lub ciśnienia a nie na ich wartość - ze względu na fakt, że informacja o mierzonym strumieniu objętości jest zawarta w częstotliwości generowanych wirów, a więc w częstotliwości lokalnych fluktuacji ciśnienia i prędkości. Posiada to istotne znaczenie praktyczne, gdyż w znaczącym stopniu obniża wymagania w stosunku do stabilności czasowej i temperaturowej zarówno przetwornika drugiego stopnia jak i współpracującego z nim elektronicznego układu przetwarzania sygnału.

5.3. Optymalizacja przepływomierza wirowego

W przypadku przepływomierza wirowego istotny problem stanowi generalnie słaba jakość zawirowań powstających na przeszkodzie zwanych ścieżką wirową von Karmana. Jak wiadomo, moc i regularność wirów zależą od kształtu i wymiarów geometrycznych przeszkody. Ze względu na brak użytecznego modelu matematycznego zjawiska wykorzystywanego w przepływomierzu - dobór geometrii przeszkody odbywa się metodą eksperymentalną. Okazuje się, że kształt i wymiary geometryczne przeszkody wpływają nie tylko na jakość generowanych wirów, ale także na liniowość charakterystyki przetwarzania. Sytuację dodatkowo utrudnia fakt, że drobne elementy konstrukcyjne czujnika przepływomierza, jak np. sposób połączenia przeszkody z rurociągiem mogą w istotny sposób wpływać na liniowość charakterystyki przetwarzania.

W przypadku przetwornika drugiego stopnia typu ingerencyjnego (jak np. przetwornik tensometryczny pletwowy) występuje interesujący problem wpływu usytuowania przetwornika drugiego stopnia na charakterystykę przetwarzania przepływomierza. Okazuje się, jak wynika z badań przeprowadzonych przez autora niniejszej pracy, że detektor wirów umieszczony w pewnej odległości za przeszkodą, na której powstają wiry, wpływa na proces ich generacji. W efekcie następuje modyfikacja kształtu charakterystyki przetwarzania i w niektórych przypadkach, nawet kilkuprocentowa zmiana stałej.

Osobny problem stanowi niestabilność okresu sygnału pomiarowego i jej związek z konfiguracją czujnika pomiarowego. I w tym przypadku istnieje zależność tego parametru od kształtu i wymiarów geometrycznych przeszkody, a także, w przypadku detektora wirów typu ingerencyjnego, od usytuowania przetwornika drugiego stopnia.

Jak z przytoczonego opisu widać, optymalizacja przepływomierza wirowego jest zagadnieniem złożonym i co gorsza - wielowymiarowym. Wielowymiarowość dotyczy zarówno kryteriów optymalizacji (jakość sygnału pomiarowego, stabilność okresu, liniowość charakterystyki przetwarzania), jak i przede wszystkim parametrów geometrycznych podlegających optymalizacji (parametry związane z geometrią przeszkody - jest ich zwykle kilka, usytuowanie przetwornika drugiego stopnia).

5.4. Zakres zastosowań i parametry

Przepływomierze wirowe stosuje się do pomiaru przepływu cieczy i gazów. Ze względu na niezależność wyniku pomiaru od właściwości fizycznych medium, ten sam egzemplarz przepływomierza potencjalnie może być wykorzystany do pomiaru cieczy i gazów. Stała przepływomierza w takim przypadku nie powinna ulec zmianie. W praktyce jednak bardzo rzadko spotyka się takie rozwiązania. Przepływomierze wirowe są stosowane również do cieczy żrących, wybuchowych, o właściwościach ściernych. Ograniczenie stanowi dolny zakres pomiarowy - przy pewnych liczbach Reynoldsa zjawisko staje się nieliniowe, a przy pewnych może w ogóle nie zachodzić. W celu zwiększenia zakresu temperatur mierzzonego medium, piezoelektryczne przetworniki drugiego stopnia są umieszczane na zewnątrz rurociągu.

Osiągana dokładność - nawet 0.5% przy zakresowości 30:1. Powtarzalność wskazań 0.2%. Średnica rurociągu od 20mm do 200 mm. Przy większych średnicach stosuje się czujniki typu "insertion".

6. Metody wzorcowania przepływomierzy

Przepływomierze wzorcuje się wykorzystując zazwyczaj jedną z dwóch następujących metod:

- metodę definicyjną
- metodę porównawczą

W **metodzie definicyjnej** określa się wartość strumienia objętości na podstawie pomiaru objętości medium i czasu, w jakim ona przepłynęła przez badany czujnik – zgodnie z zależnością (1). Należy podkreślić, że tak określona wartość strumienia objętości jest wartością średnią za czas pomiaru.

W **metodzie porównawczej** wykorzystuje się przepływomierz wzorcowy, który umożliwia odczytać bezpośrednio aktualną wartość strumienia objętości.

Trzeba stwierdzić, że metoda definicyjna, aczkolwiek znacznie bardziej pracochłonna od porównawczej, pozwala na uzyskanie znacznie lepszej dokładności wzorcowania i z tego względu w warunkach laboratoryjnych jest częściej stosowana.

7. Badania laboratoryjne

7.1. Stanowisko badawcze

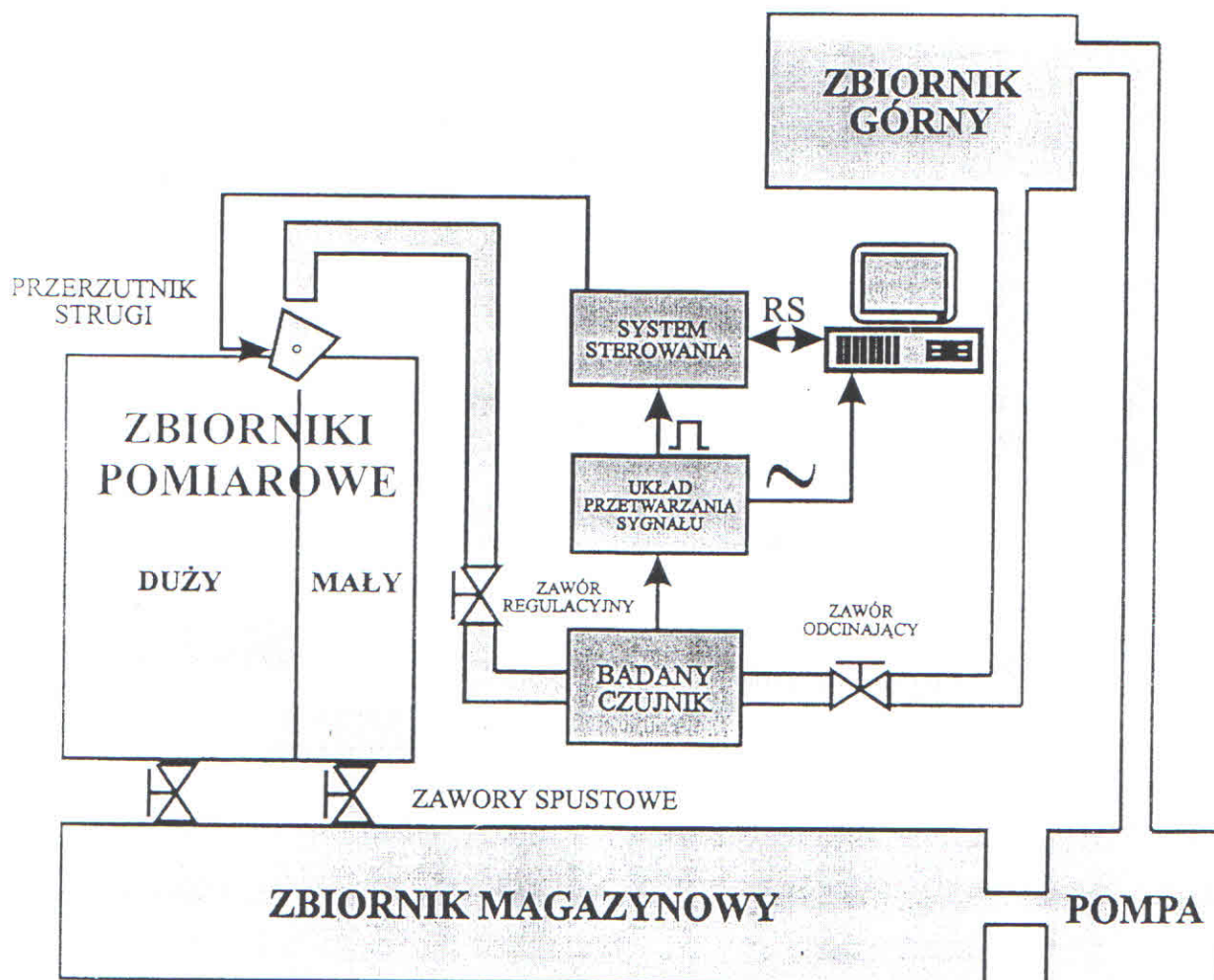
Stanowisko badawcze do wzorcowania przepływomierzy cieczy umożliwia określenie wartości strumienia objętości metodą definicyjną. W trakcie pomiaru określa się objętość cieczy V , która przepłynęła przez badany czujnik w czasie t oraz zliczana jest liczba impulsów N uzyskanych z wyjścia układu elektronicznego przepływomierza.

Uproszczony schemat funkcjonalny stanowiska jest przedstawiony na rys.4.

Stanowisko jest zasilane grawitacyjnie. Uzyskuje się dzięki temu stały, pozbawiony pulsacji przepływ. Medium (woda) zgromadzone w zbiorniku magazynowym jest pompowane do zbiornika górnego umieszczonego ok. 12 m powyżej sekcji pomiarowej. Podczas pomiaru woda spływa grawitacyjnie ze zbiornika górnego przez zawór odcinający, badany czujnik i zawór regulacyjny (służący do ustawiania strumienia objętości) do jednego ze zbiorników pomiarowych gdzie jest gromadzona.

Przed rozpoczęciem pomiaru ustawia się - za pomocą zaworu regulacyjnego - żadaną wartość strumienia objętości. Rozpoczęcie pomiaru polega na skierowaniu wylotu strumienia cieczy do opróżnionego wcześniej zbiornika pomiarowego i jednoczesnym uruchomieniu zegara i licznika impulsów. Zakończenie pomiaru polega na skierowaniu wylotu strumienia cieczy do zbiornika pomocniczego, zatrzymaniu zegara i licznika impulsów. Realizowane jest to poprzez wykorzystanie przerzutnika strugi cieczy pomiarowej - sterowanego elektrycznie - z równoczesnym sterowaniem licznikiem impulsów i zegarem systemu.

Wartości liczby impulsów N i czasu pomiaru t są odczytywane z wyświetlacza urządzenia sterującego przerzutnikiem strugi, a objętość cieczy, jaka przepłynęła przez czujnik w czasie pomiaru jest określana na podstawie odczytu z poziomowskazu umieszczonego na zbiorniku pomiarowym, a następnie wykorzystaniu tabeli skalowania.

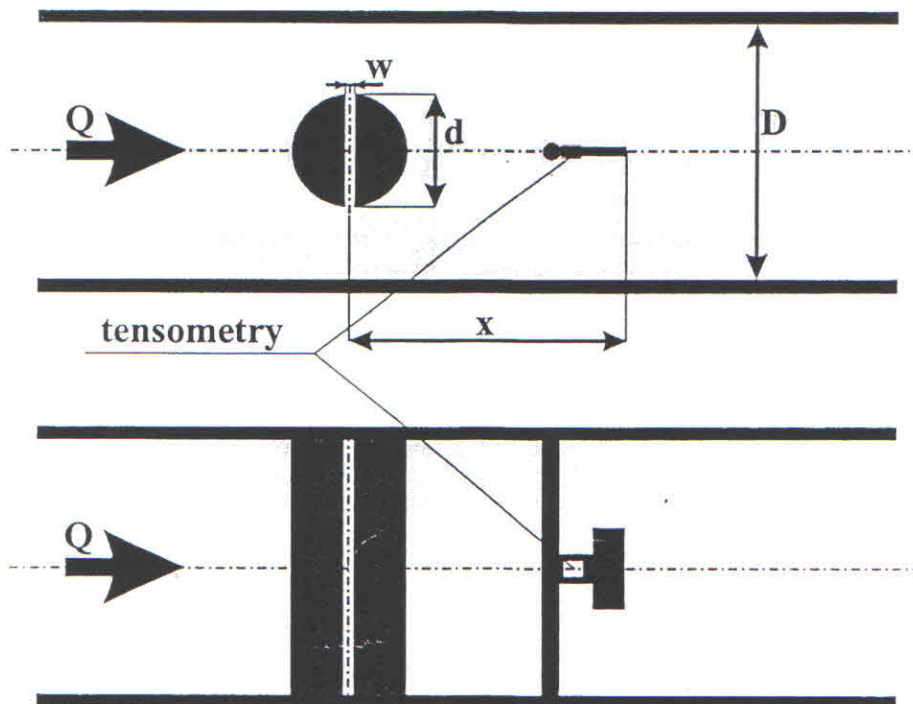


Rys.4. Schemat stanowiska badawczego

Z uzyskanych w trakcie pomiaru wartości N , t i V wyznacza się: strumień objętości (średnią wartość za czas pomiaru), częstotliwość sygnału pomiarowego i stałą przepływomierza.

7.2. Obiekt badań

Obiektem badań jest model czujnika przepływomierza wirowego w konfiguracji przedstawionej na rys.5.



Rys. 5. Konfiguracja badanego czujnika przepływomierza wirowego

W badanym modelu przeszkodą - generatorem wirów jest belka w kształcie walca ze szczeliną usytuowaną prostopadle do kierunku przepływu medium. Generowane na przeszkodzie wiry są detekowane z wykorzystaniem przetwornika tensometrycznego płetwowego. Okresowo zmieniająca się rezystancja tensometrów umożliwia uzyskanie napięcia zmiennego (sygnału pomiarowego) zawierającego składową odpowiadającą częstotliwości generowanych wirów. Po przetworzeniu uzyskuje się sygnał w postaci fali prostokątnej o częstotliwości będącej miarą strumienia objętości.

7.3. Program badań

Należy przeprowadzić wzorcowanie czujnika przepływomierza wirowego poprzez:

- wyznaczenie charakterystyki przetwarzania $f=f(Q)$
- wyznaczenie charakterystyki stałej przepływomierza $k=f(Q)$

Należy określić średnią wartość stałej przepływomierza oraz błąd nieliniowości.