

Zawory regulacyjne w aplikacjach przemysłowych

Wiele zakładów przemysłowych posiada mniej lub bardziej rozbudowaną sieć rurociągów transportujących rozmaite media potrzebne do prowadzenia działalności produkcyjnej. Proces wymaga często precyzyjnego sterowania, aby uzyskać odpowiedni przepływ, ciśnienie, temperaturę lub poziom produktu. Wszystkie te parametry możemy z dużą dokładnością zmieniać lub stabilizować przy pomocy zaworu regulacyjnego. Wśród zaworów regulacyjnych możemy wyróżnić zawory grzybkowe, przepustnice regulacyjne oraz zawory kulowe regulacyjne (w tym zawory segmentowe). Najbardziej rozpowszechnionym rodzajem zaworów regulacyjnych są zawory grzybkowe przelotowe. W niniejszym opracowaniu omówimy podstawowe kwestie związane z teorią, budową oraz zaznaczymy istotne parametry, jakie potrzebne są przy doborze zaworów regulacyjnych grzybkowych.

PAWEŁ MRÓWKA

Absolwent Politechniki Poznańskiej na kierunku Mechanika i Budowa Maszyn. W Introli pracuje od 2001 roku. Obecnie jako specjalista ds. armatury i zajmuje się doбором i sprzedażą armatury przemysłowej.

Tel: 601 589 925



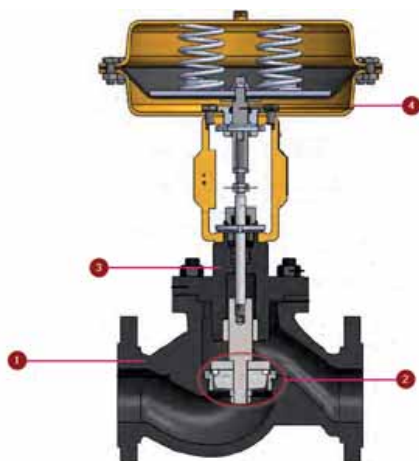
TYTUŁEM WSTĘPU

Zawór regulacyjny jest urządzeniem, które reguluje przepływ w rurociągu. Regulacja ta odbywa się przez zmianę oporu, który zawór wprowadza do instalacji przez częściowe otwieranie lub przemykanie zaworu, w zależności od sygnału otrzymanego ze sterownika (regulatora). Regulator generuje odpowiedni do wartości zadanej sygnał, w zależności od zmiennej, której wartość dostarczana jest przez czujniki (sondy pomiarowe). Zawór regulacyjny jest zatem końcowym urządzeniem sterującym, powodującym zmianę przepływu w rurociągu.



BUDOWA ZAWORÓW GRZYBKOWYCH

Wszystkie zawory regulacyjne grzybkowe zbudowane są z następujących podstawowych elementów: 1) korpusu, 2) zespołu grzyba/gniazda, 3) dławnicy, 4) siłownika (Rysunek 1).



Rysunek 1

Budowa zaworu regulacyjnego grzybkowego



Rysunek 2

Zawór regulacyjny Armstrong z siłownikiem pneumatycznym i pozycjonerem cyfrowym



- **Korpus** jest główną obudową ciśnieniową, przez którą przepływa medium, stanowi on również oparcie dla gniazda zaworowego. Najczęściej korpus jest odlewany (lub odkuwany) łącznie z przyłączami do rurociągu.
- Układ zaworowy (**zespół grzyba/gniazda**, w języku angielskim określany jednym słowem *trim*), jest podstawowym elementem zaworu modulującym przepływ medium.
- **Dławnica** stanowi obudowę, w której znajduje się pakunek lub mieszek (uszczelnienie trzpienia) oraz prowadnica trzpienia.
- **Siłownik** jest to natomiast urządzenie pneumatyczne, elektryczne lub elektrohydrauliczne, generujące siłę poruszającą trzpień po to, aby zamykać i otwierać zawór.

Te cztery wymienione elementy konstrukcyjne to podstawowe, choć nie jedyne części, które składają się na budowę zaworu regulacyjnego.



DOBÓR ZAWORU

Aby nasz system działał prawidłowo, konieczny jest prawidłowy dobór zaworu w oparciu o dostarczone dane. Dla optymalnej selekcji potrzebne są między innymi następujące informacje: medium, temperatura, wymagany przepływ, ciśnienie przed zaworem, ciśnienie za zaworem, funkcja i usytuowanie zaworu w systemie. Odpowiedni dobór zaworu jest bardzo istotny dla prawidłowego działania instalacji. Błędy na tym

etapie mogą spowodować, że nasz system nigdy nie będzie działał na wydajnym poziomie. Gdy dobierzemy zawór o zbyt dużych rozmiarach w stosunku do potrzebnego przepływu, rezultatem może być słaba sterowność, która może spowodować, że zawór będzie cyklicznie otwierał się i przysykał „szukając” właściwej pozycji. Zbyt mały rozmiar zaworu będzie wymagał większego spadku ciśnienia w celu utrzymania odpowiedniej wydajności lub, co bardziej prawdopodobne, może w ogóle nie zapewnić wymaganego przepływu. Obciążenie wynikające z niedostatecznego wymiarowania może powodować niekorzystne zjawiska w pracy zaworu takie jak nadmierny hałas, flashing czy kawitacja. Może również powodować nadmierne obciążenie dla aparatury zewnętrznej np. pompy.



WSPÓŁCZYNNIK PRZEPŁYWU

Aby prawidłowo dobrać rozmiar zaworu pierwszym krokiem jest wyznaczenie współczynnika przepływu. Współczynnikiem przepływu **Kv** nazywamy strumień objętości wody o temperaturze 5 ... 30°C, która przepływa przez zawór przy danym stopniu jego otwarcia, przy różnicy ciśnień wynoszącej 1 bar. Współczynnik **Kv** wyrażamy w m³/h.

Producenci o amerykańskim lub brytyjskim rodowodzie (ale nie tylko) stosują często współczynnik przepływu **Cv** wyrażany w jednostkach imperialnych. **Cv** jest definiowany jako strumień objętości wody o temperaturze 60°F przepływający przez zawór, przy spadku ciśnienia 1 psi. Jednostką dla współczynnika **Cv** jest galon/min (gpm). Warto jest zapamiętać stosunek **Kv** do **Cv** i odwrotnie, ponieważ często w danym katalogu podany jest tylko jeden z nich, zatem:

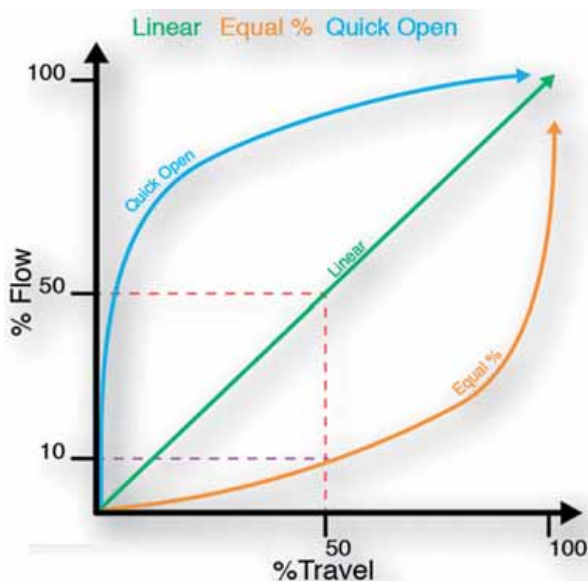
$$Kv = 0,86 Cv \text{ oraz } Cv = 1,17 Kv$$

Producenci w swoich katalogach określają nominalny współczynnik przepływu dla danego

DOBÓR CHARAKTERYSTYKI ZAWORU

Aplikacja	$\Delta p_{\max} / \Delta p_{\min}$ poniżej 2:1	$\Delta p_{\max} / \Delta p_{\min}$ powyżej 2:1, poniżej 5:1
Regulacja przepływu	liniowa	stałoprocentowa
Regulacja poziomu	liniowa	stałoprocentowa
Regulacja ciśnienia gazu	liniowa	stałoprocentowa
Kontrola ciśnienia cieczy	stałoprocentowa	stałoprocentowa

Tabela 1



Rysunek 4
Rodzaje charakterystyk zaworu



Rysunek 5
Przykład zmodyfikowanej charakterystyki zaworu

zaworu czyli **Kvs** (lub **Cvs**). Kvs jest to współczynnik przepływu przez zawór całkowicie otwarty, a więc wtedy, gdy opór dla przepływającego medium jest najmniejszy. Dla danej średnicy nominalnej DN zaworu danego typoszeręgu określony jest **Kvs** podstawowy (tzn. największej wartości) i w praktyce taki zawór jest najczęściej wybierany. Zdarza się jednak, że użytkownik chcąc zachować określoną średnicę rurociągu, wybiera zawór o określonej średnicy, ale ze zredukowanych **Kvs** (tzn. ze zmniejszonym układem zaworowym). Redukcja **Kvs** wymuszona jest również w sytuacji, gdy obliczony przepływ przez zawór jest bardzo niski – wtedy stosuje się układy zaworowe tzw. microflow z grzybem iglicowym. Ponadto korpus o zwiększonej objętości w stosunku do układu zaworowego wpływa na zmniejszenie wlotowej i wylotowej prędkości medium np. obniżając hałas. Większy korpus dostosowany do bieżących parametrów może być wykorzystany w przyszłości, jeżeli przewidziane jest zwiększenie wartości przepływu. Wtedy wymieniając tylko układ zaworowy na większy zapewniamy większą przepustowość. Przykładowe, dostosowane wykonania grzyba i gniazda pokazane są na rysunku 3.

Wyliczony przez nas współczynnik przepływu **Kv/Cv** (lub współczynniki obliczone dla różnych warunków pracy zaworu) powinien, co do zasady, mieścić się w zakresie 15-85% **Kvs** lub **Cvs** zaworu.



CHARAKTERYSTYKA

Odpowiedni dobór zaworu to również dobór właściwej charakterystyki jego pracy. Charakterystyka zaworu jest to zależność pomiędzy stopniem jego otwarcia i osiąganym natężeniem przepływu (lub jak często bywa to ilustrowane, jako zależność otwarcia i współczynnika **Kv/Cv**). Jeżeli zmiana przepływu odbywa się przy stałym spadku ciśnienia, mówimy o charakterystyce wewnętrznej.

Trzy podstawowe charakterystyki zaworów to:

- 1) Charakterystyka liniowa (linear)
- 2) Charakterystyka stałoprocentowa (equal%)
- 3) Charakterystyka szybkozotwierająca (quick open)

Charakterystyka liniowa zaworu oznacza, że natężenie przepływu przez zawór jest wprost proporcjonalne do skoku grzyba w całym zakresie ruchu. Na przykład: przy 30% skoku znamionowego natężenie przepływu wynosi 30% przepływu maksymalnego; przy 70% skoku znamionowego natężenie przepływu wynosi 70% wartości maksymalnej, itp. Zmiana natężenia przepływu jest stała w stosunku do skoku grzyba zaworu. Zawory o charakterystyce liniowej są często stosowane do regulacji poziomu cieczy.

Charakterystyka stałoprocentowa powoduje taką samą procentową zmianę natężenia przepływu na określoną zmianę skoku zaworu. Na przykład, jeśli zmiana wynosi 60% na każde 10% zmiany ruchu zaworu, to przy wartości skoku trzpienia 30% i przepływ 10,0 l/min wzrost o 10% do 40% daje 16,0 l/min i kolejno przy zmianie do 50% generuje 25,6 l/min. Oznacza to, że w początkowej fazie ruchu trzpienia przyrosty przepływu są

niewielkie, natomiast w przy większym otwarciu zaworu nieznaczny ruch trzpienia powoduje duży przyrost wartości przepływu.

Dodatkowo, jeżeli z uwagi na warunki procesu, potrzebna jest duża zakresowość zaworu, istnieje możliwość wykonania specjalnego układu zaworowego ze zmodyfikowaną charakterystyką jak na rysunku 5. Zakresowość definiuje się jako stosunek między maksymalną i minimalną możliwą do regulacji przez zawór wartością przepływu. Pożądane są duże wartości zakresowości, ponieważ pozwalają one na skuteczne kontrolowanie większego zakresu skoku zaworu. Standardem dla zaworów z charakterystyką stałoprocentową jest zakresowość 50:1 podczas gdy specjalne wykonanie układu zaworowego pozwala na zwiększenie zakresowości do 150:1.

Dobór charakterystyki dla poszczególnych aplikacji pokazuje tabela 1.

Charakterystyka szybkozotwierająca, gdzie mały ruch trzpienia powoduje szybki przyrost przepływu przez zawór, ma mniejsze znaczenie dla zaworów regulacyjnych. Jest ona stosowana raczej w zaworach otwórz / zamknij.



SZCZELNOŚĆ

Chociaż w większości zawory regulacyjne pracują dławiąc przepływ (więc są one częściowo otwarte), w niektórych przypadkach ważne jest całkowite odcięcie strumienia medium. O ile w przypadku zaworów otwórz/zamknij całkowita szczelność wydaje się wymogiem naturalnym, o tyle w odniesieniu do zaworów regulacyjnych już niekoniecznie.

Klasa szczelności dla zaworów regulacyjnych grzybkowych jest parametrem opisanym w normie i obejmuje sześć klas, przy czym w praktyce mamy do czynienia z klasą IV, V i VI. Klasyfikacja opisuje jaki jest dopuszczalny przeciek przez zawór, gdy jest on całkowicie zamknięty. Im wyższe oznaczenie w ramach tej klasyfikacji, tym większa szczelność zaworu.

Z klasą IV mamy najczęściej do czynienia w zaworach z uszczelnieniem metal/metal, tzn. takim, w którym zarówno grzyb, jak i gniazdo wykonane są z metalu. Maksymalna nieszczelność w tej klasie określana jest na poziomie 10^{-4} **Kvs** (czyli 0,01% zaworu w pełni otwartego).

Klasa VI może być osiągnięta praktycznie tylko w zaworach z uszczelnieniem miękkim, tzn. takim, w którym do uszczelnienia zespołu grzyb-gniazdo został użyty jeden z elastomerów np. często używane w uszczelnieniach zaworów grzybkowych PTFE (teflon) lub PEEK (polieteroeteroketon). Norma opisuje ile pęcherzyków powietrza o ciśnieniu Δp_{maks} dla danego zaworu lub 50 psi (co jest niższe) może przedostać się przez układ zaworowy. Przykładowo dla zaworów DN50 są to trzy pęcherzyki na minutę.

Pojawia się pytanie gdzie jest klasa V? Jest ona rzadziej spotykana z uwagi na fakt, iż jest ona stosowana tam, gdzie wymagana jest szczelność wyższa niż dla klasy IV, ale z uwagi na parametry procesu nie jest możliwe zastosowanie miękkich uszczelnień. W praktyce metaliczny grzyb i gniazdo są często ręcznie obrabiane i dopasowywane

Charakterystyka zaworu jest to zależność pomiędzy stopniem jego otwarcia i osiąganym natężeniem przepływu.



Rysunek 3
Przykład gniazd i grzybów w zaworach regulacyjnych

tak, aby osiągnąć parametry wymagane przez normę, która określa maksymalną nieuszczelność dla wody wynoszącą 5×10^{-4} ml/min dla ciśnienia różnicowego określonego dla zaworu.



SIŁOWNIK

Urządzeniem, które dostarcza siły aby wprowadzić trzpień zaworu i połączony z nim grzyb w ruch jest siłownik. Ze względu na energię zasilania siłowniki zaworów regulacyjnych możemy podzielić na: pneumatyczne, elektryczne i elektrohydrauliczne.

W zakładach, w których dostępne jest sprężone powietrze powszechnie używane są siłowniki pneumatyczne. Z kolei wśród siłowników pneumatycznych najpopularniejsze są siłowniki membranowe jednostronnego działania. Taki siłownik, aby precyzyjnie dozować potrzebną siłę w trakcie pracy regulacyjnej, musi równoważyć siłę wynikającą z ciśnienia powietrza działającego na powierzchnię membrany i siłę pochodzącą od sprężyn. Jeśli weźmiemy pod uwagę zespół siłownika z zaworem, musi on również równoważyć siłę pochodzącą z oddziaływania ciśnienia różnicowego na powierzchnię grzyba oraz tarcie pary uszczelnienia/trzpień. Powyższe parametry stanowią o tym, jaka jest wymagana siła takiego siłownika, zwana siłą dyspozycyjną.

W siłowniku musimy dobrać zatem zarówno jego wielkość i ciśnienie powietrza, jak również siłę sprężyn. Najczęściej producenci oprócz wyżej wymienionych wartości podają w katalogach wartość ciśnienia różnicowego, które może pokonać siłownik współpracując z danym typem i średnicą zaworu.

Siłowniki membranowe nie wymagają żadnej regulacji, natomiast z praktycznego punktu widzenia warto wspomnieć o tym, aby po dokonaniu demontażu siłownika zwrócić uwagę na precyzyjne ustawienie pozycji trzpienia zaworu względem trzpienia siłownika. Robi się to po to, aby zawór całkowicie otwierał się i zamykał oraz żeby nie powstały kolizje w zaworze lub siłowniku.

Ważną kwestią dla osób projektujących instalacje z zaworami regulacyjnymi jest określenie jaka ma być pozycja zaworu w przypadku awarii. Świadomość i kalkulacja ryzyka zachowania zaworu w takim przypadku może mieć daleko idące konsekwencje,

w tym dla bezpieczeństwa instalacji i personelu. W przypadku siłowników membranowych jednostronnego działania są dwie możliwości:

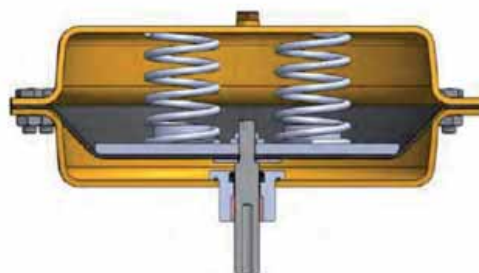
- 1) siłownik, w którym sprężyny wysuwają trzpień natomiast powietrze cofa go, zwany jest siłownikiem odwrotnego działania – w kombinacji z najczęściej stosowanym układem zaworowym w zaworach przelotowych, w którym grzyb jest prowadzony od góry, sprężyny będą zamykały zawór, a powietrze będzie go otwierać – zawór bez zasilania pozostaje zamknięty,
- 2) siłownik, w którym sprężyny cofają trzpień, a powietrze wysuwa go, zwany jest siłownikiem bezpośredniego działania. W kombinacji z najczęściej stosowanym układem zaworowym w zaworach przelotowych, w którym grzyb jest prowadzony od góry, sprężyny będą otwierały zawór, a powietrze będzie go zamykać – w przypadku awarii zasilania zawór pozostaje otwarty (Rysunek 6).

Urządzeniem, które steruje ruchem siłownika jest ustawnik pozycyjny (pozycjoner). Pozycjoner aktywnie porównuje położenia trzpienia z sygnałem sterującym, dostosowując ciśnienie powietrza dopływające do membrany lub tłoka siłownika, aż do osiągnięcia prawidłowego położenia trzpienia. Dobór pozycjonera zależy od wymagań użytkownika w zakresie sygnałów sterujących i diagnostycznych pracy zaworu, klasy szczelności obudowy oraz odpowiedniego wykonania przeciwwybuchowego, jeżeli jest wymagane.

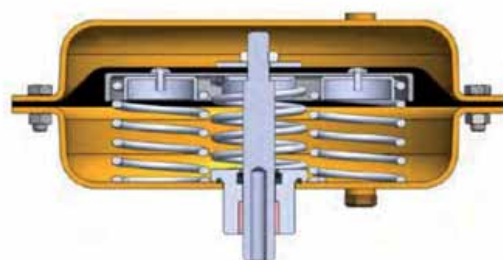


ZJAWISKA NIEPOŻĄDANE W PRACY ZAWORÓW REGULACYJNYCH PRZEPŁYW ZDŁAWIONY / PRZEPŁYW KRYTYCZNY

Natężenie przepływu w zaworze jest wprost proporcjonalne do pierwiastka różnicy ciśnień. To stwierdzenie jest prawdziwe do momentu, w którym pewna wartość różnicy ciśnień zostaje przekroczona. W tym miejscu Δp_{maks} przepływu zaczyna być przepływem zdławionym. Wartość ciśnienia różnicowego, przy której to zjawisko następuje, nazywamy krytycznym spadkiem ciśnienia. Również przepływ zdławiony jest nazywany przepływem krytycznym i występuje, gdy wzrost spadku ciśnienia na zaworze nie powoduje już



Siłownik odwrotnego działania, najczęściej w zaworach NC



Siłownik bezpośredniego działania, najczęściej w zaworach NO

Rysunek 6

” W siłowniku musimy dobrać zatem zarówno jego wielkość i ciśnienie powietrza, jak również siłę sprężyn.

wzrostu przepływu. W przypadku cieczy zdławienie przepływu zaczyna się pojawiać, gdy wystąpi flashing lub kawitacja (o tych zjawiskach piszę poniżej), natomiast w przypadku gazów, wtedy kiedy osiągnięta zostanie prędkość 1 Mach. Przejście w stan przepływu krytycznego może być zjawiskiem stopniowym lub nagłym w zależności od konstrukcji zaworu.



KAWITACJA

Kawitacja w zaworze regulacyjnym, przez który przepływa ciecz, może wystąpić, jeśli ciśnienie statyczne przepływającej cieczy spadnie do wartości mniejszej niż ciśnienie pary płynu p_v . W takim przypadku przepływ zostaje zahamowany przez tworzenie się pęcherzyków pary (ciecz zaczyna wrzeć). Dzieje się to w momencie, kiedy ciecz znajduje się w miejscu największego przewężenia w zaworze (tzw. *vena contracta*), gdzie ciśnienie najniższe, a prędkość medium najwyższa. W dalszej części zaworu ciśnienie i objętość wzrasta, a prędkość maleje. Powoduje to, że powstałe pęcherzyki implodują. Zjawisko to ma bardzo gwałtowny przebieg, energia kinetyczna implodujących pęcherzyków jest bardzo wysoka, ciśnienia wywierane na bardzo małej powierzchni zaworu sięgają **1,5 GPa!** Powoduje to hałas oraz destrukcyjne działanie na powierzchnie układu zaworowego i korpusu.



FLASHING

W przypadku, gdy ciśnienie w obszarze *vena contracta* spadnie poniżej ciśnienia parowania

cieczy, ale nie wzrośnie ponownie powyżej p_v , w dalszej części zaworu, mamy do czynienia ze zjawiskiem opisywanym jako flashing. W tym przypadku dwufazowy płyn działa erozyjnie na konstrukcję zaworu oraz powoduje zdławienie przepływu jak wspominałem wcześniej. Hałas jaki towarzyszy temu zjawisku przypomina „syczenie” jakby przez zawór przepływał piasek.

Zarówno w przypadku niebezpieczeństwa wystąpienia kawitacji, jak i flashingu, zalecane jest stosowanie grzybów z perforacjami. Takie rozwiązanie jest również wskazane w przypadku nadmiernego hałasu. W przypadku nadmiernego hałasu gazów, w tym pary wodnej, zaleca się również rozwiązania polegające na montażu dyfuzorów oraz płyt perforowanych, mających na celu zmniejszenie prędkości medium (Rysunki 7 i 8).

Ponadto dobrą praktyką w przypadku zaworów na instalacjach pary wodnej jest montowanie przed zaworem regulacyjnym kieszeni odwadniającej, aby zapobiec erozyjnemu działaniu kondensatu.



NIE TAKI DOBÓR PROSTU JAKBY SIĘ WYDAWAŁ

Jak widać z przytoczonych przeze mnie argumentów, dobór zaworu regulacyjnego dla danej instalacji nie jest tak oczywisty jakby mogło się wydawać. Powinien on uwzględniać szereg kluczowych parametrów, a tylko niektóre z nich zostały tutaj opisane. Warto zatem konsultować te kwestie ze specjalistami, którzy wraz ze wsparciem producenta, mogą zaproponować odpowiednie do potrzeb rozwiązanie techniczne.



Rysunek 7
Grzyb perforowany EQP



Rysunek 8
Instalacja zaworu z płytą dławiącą (wyciszającą)

„Energia kinetyczna implodujących pęcherzyków jest bardzo wysoka, ciśnienia wywierane na bardzo małej powierzchni zaworu sięgają 1,5 GPa!