Ciśnienie pod kontrolą: niewidzialny strażnik laboratoriów i pomieszczeń czystych



Mgr inż. Maciej Cierpikowski

TROX Polska Sp. z o.o.

Od nadciśnienia chroniącego proces po podciśnienie ograniczające ryzyko wydostania się zanieczyszczeń — o skuteczności systemu decyduje nie jeden element, lecz precyzyjnie zestrojony układ nawiewu, wywiewu, pomiaru i automatyki.

W pomieszczeniach, w których liczy się czystość, bezpieczeństwo procesu albo ochrona ludzi i otoczenia, przepływ powietrza nie może być pozostawiony przypadkowi. W nowoczesnych budynkach przemysłowych, farmaceutycznych, medycznych i badawczych coraz większe znaczenie ma precyzyjna regulacja ciśnienia powietrza, która decyduje o bezpieczeństwie procesów technologicznych, ochronie personelu oraz jakości wytwarzanych produktów. Odpowiednio zaprojektowany system wentylacji pozwala utrzymać wymaganą kaskadę ciśnienia pomiędzy pomieszczeniami i zapobiega niekontrolowanemu przepływowi zanieczyszczeń.

Dodatnie czy ujemne? Najpierw trzeba określić cel

Pomieszczenia czyste (Cleanrooms) projektowane są przede wszystkim w celu ochrony produktu przed zanieczyszczeniami pyłowymi, mikrobiologicznymi i chemicznymi. Dlatego stosuje się w nich dodatnie ciśnienie względem otoczenia. Powietrze przepływa z obszarów najczystszych do mniej wymagających stref, tworząc tzw. kaskadę ciśnienia.

Laboratoria mają natomiast chronić pracowników oraz środowisko przed substancjami niebezpiecznymi. Z tego

Tabela 1. Normy i wytyczne dotyczące pomieszczeń czystych i pomieszczeń laboratoryjnych. Źródło: materiały techniczne firmy TROX

Kategoria	Pomieszczenia czyste (Cleanrooms)	Laboratoria
Główne normy / przepisy	PN-ISO 14644 Wytyczne GMP (Dz.U. 2015 poz. 1979)	PN-EN 14175; DIN 1946 T7; CEN TS 17441 Laboratoria biologiczne (PN-EN 12128 + wytyczne WHO)
Główne normy odniesienia	PN-ISO 14644-1 – klasyfikacja czystości powietrza wg stężenia cząstek PN-ISO 14644-2 – monitorowanie parametrów pomieszczeń czystych PN-ISO 14644-3 – metody badań PN-ISO 14644-16 – efektywność energetyczna	PN-EN 14175-2, – dygestoria laboratoryjne Wymagania bezpieczeństwa i właściwości użytkowych PN-EN 14175-6, – Wyciągi laboratoryjne o zmiennej objętości powietrza
Główny cel	Ochrona produktu i kontrola zanieczyszczeń	Ochrona personelu oraz zabezpieczenie przed substancjami niebezpiecznymi
Czystość powietrza	Klasy ISO 5–9, określane na podstawie stężenia cząstek	Nie jest określana na podstawie cząstek; nacisk na ograniczenie emisji i ekspozycji
Strategia przepływu powietrza	Stały nawiew, wynikający z wymaganej krotności wymian powietrza, regulacja ciśnienia poprzez ograniczenie wywiewu	Szybkie dostosowanie do zmiennego zapotrzebowania na wyciąg, kontrola ciśnienia poprzez ograniczenie nawiewu
Filtracja	Końcowa filtracja HEPA / ULPA (H13–U15)	Filtracja zależna od poziomu ryzyka; często HEPA w laboratoriach biologicznych
Kontrola ciśnienia	Kaskada nadciśnienia chroniąca proces	Podciśnienie zapobiegające wydostawaniu się zanieczyszczeń
Dystrybucja powietrza	Ściśle kontrolowana; często przepływ laminarny lub silnie indukcyjny nad strefami krytycznymi	Lokalne systemy wyciągowe: dygestoria ze zmiennym przepływem i ramiona odciągowe
Kontrola środowiska	Stabilne warunki termiczno-wilgotnościowe: temperatura i wilgotność	Warunki dostosowane do procesów laboratoryjnych
Wymagania eksploatacyjne	Ciągłe monitorowanie stężenia cząstek i parametrów pracy	Szybka reakcja systemu na otwieranie szyby dygestorium lub zmiany wyciągu
Typowe sterowanie HVAC	Kontrola różnicy ciśnienia i kontrolowane krotności wymian powietrza	Kompensacja przepływu powietrza, zmienne poziomy przepływu, kontrola ciśnienia

powodu utrzymuje się w nich ujemne ciśnienie, które zapobiega wydostawaniu się zanieczyszczeń poza pomieszczenie.

Tabela 1 przedstawia przepisy i wymagania dla pomieszczeń czystych i laboratoriów odnośnie kontroli ciśnienia, filtracji i dystrybucji powietrza.

Regulacja ciśnienia w teorii

Regulacja ciśnienia sprowadza się do utrzymywania właściwej relacji między ilością powietrza doprowadzanego do pomieszczenia a ilością powietrza z niego usuwanego - przy uwzględnieniu nieszczelności przegród i innych dróg przepływu powietrza. Powietrze może przechodzić przez: szczeliny, drzwi, przepusty instalacyjne, nieszczelności przegród, inne elementy konstrukcyjne. Szczelność przegród i sufitów oraz możliwość dostosowania strumienia powietrza do rzeczywistej charakterystyki pomieszczenia, odgrywa znaczącą rolę przy regulacji ciśnienia w pomieszczeniu. Określenie na etapie projektowania przewidywanych przecieków powietrza w kaskadzie ciśnienia, pozwala na właściwe dopasowanie systemu regulacji do warunków panujących w poszczególnych pomieszczeniach. W praktyce na etapie projektu jesteśmy w stanie określić przede wszystkim nieszczelności występujące w obrębie drzwi łączących pomieszczenia o różnych wartościach ciśnienia. Pozostałe drogi przepływu powietrza, wynikające m.in. z nieszczelności przegród, sufitów czy przepustów instalacyjnych, wymagają przyjęcia odpowiednich założeń i marginesu bezpieczeństwa.

Wyobraźmy sobie balon, do którego dopływa powietrze i z którego jednocześnie powietrze odpływa. Jeżeli znamy wielkość przecieku, czyli ilość powietrza uciekającego przez nieszczelności, możemy tak dobrać strumienie powietrza nawiewanego i wywiewanego, aby objętość balonu pozostawała na stałym poziomie.

Jeśli dodatkowo podłączymy do balonu pompkę i w balonie pojawi się dodatkowa nieszczelność, będziemy mogli kompensować niewielkie zmiany przecieku, pomiędzy wnętrzem balonu a otoczeniem i utrzymywać jego napełnienie na stałym poziomie. Jest jednak jeden bardzo istotny warunek. Pompka musi być odpowiednio dobrana, tak aby nawet minimalny ruch tłoczka, nie powodował nadmiernych zmian ilości tłoczonego powietrza. Innymi słowy, im mniejszy jest przeciek, tym bardziej czuły i precyzyjny musi być układ regulacji ciśnienia.

Można to podsumować w prosty sposób: **mały przeciek oznacza niewielki margines błędu, dlatego skuteczne utrzymanie stabilnego ciśnienia wymaga bardzo dokładnego systemu regulacji**. Wartość oczekiwanego ciśnienia w pomieszczeniu może być wyliczona zgodnie ze wzorem (1).

$$\Delta p = \frac{1}{2}\rho\left(\frac{\dot{V}_{leak}}{\mu \times A_{leak}}\right)^2 \quad (1)$$

gdzie:

ρ – gęstość powietrza, kg/m^3;

$\dot{V}_{leak}$ – różnica wartości strumienia objętości powietrza, m^3/h;

μ – współczynnik wypływu (0,72 dla otworów o ostrych krawędziach – szczelina pod drzwiami);

A_{leak} – powierzchnia nieszczelności w pomieszczeniu, m^2.

Oszacowanie nieszczelności związanych z regulacją ciśnienia w pomieszczeniu

W przypadku regulacji ciśnienia oszacowanie niezbędnej różnicy pomiędzy strumieniem objętości powietrza nawiewanego i wywiewanego odgrywa kluczową rolę. Im mniejsza jest ta różnica tym trudniej uzyskać stabilną regulację ciśnienia. Dlatego w niektórych projektach przy tej samej wartości ciśnienia w pomieszczeniu eksploatacja przebiega bez problemów, a w innych na granicy wykonalności. Do oszacowania nieszczelności pomocny może być następujący wzór (2).

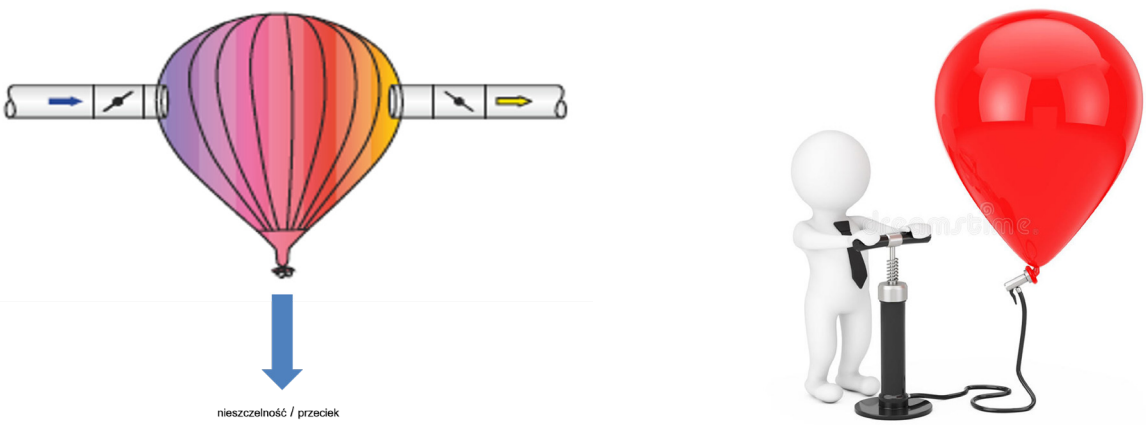
$$\dot{V}_{leak} = \sqrt{\frac{p_{set}}{\rho/2}} \times A_{leak} \times \mu \times 3600 \quad (2)$$

p_{set} – wartość nastawy ciśnienia w pomieszczeniu, Pa, [kg/m·s^2].

Przykładowe obliczenia dla szczelnego pomieszczenia, przy założeniu różnicy ciśnienia wynoszącej 10 Pa, powierzchni nieszczelności A równej 0,01 m^2 przedstawiono w równaniu (3).

$$\dot{V}_{leak} = \sqrt{\frac{10Pa}{0{,}6\ kg/m^3}} \times 0{,}01\ m^2 \times 0{,}72 \times 3600 \approx \approx 100\ m^3 \quad (3)$$

Wynik obliczeń (3) odpowiada powierzchni szczeliny ok. 10 mm, pod drzwiami o szerokości 1 m.



Rysunek 1. Idea regulacji ciśnienia w pomieszczeniu. Źródło: materiały techniczne firmy TROX

Przedstawiony przykład pokazuje, że już przy różnicy ciśnienia 10 Pa pomiędzy pomieszczeniami musimy założyć odpowiednią różnicę pomiędzy nawiewem i wywiewem powietrza. Widać również, że wartości przecieków nie zależą od wielkości pomieszczenia. Jeżeli pomieszczenie będzie bardzo szczelne to wszystkie elementy składowe i komponenty systemu wentylacyjnego muszą być doskonale dobrane i dopasowane. W złożonych układach pomieszczeń w kaskadzie ciśnienia ze wzajemną interakcją wielu regulatorów przepływu, zadanie staje się jeszcze bardziej złożone, ponieważ każdy proces regulacyjny wykonywany w systemie wentylacyjnym staje się dodatkową zmienną zakłócającą układ regulacji.

Jaki system do regulacji ciśnienia w zależności od współczynnika nieszczelności?

W zależności od współczynnika nieszczelności pomieszczenia, firma TROX oferuje różne rozwiązania do regulacji ciśnienia. Jednym z nich jest uniwersalny sterownik TUx, który może być skonfigurowany do pracy jako regulator przepływu, regulator utrzymujący stałe ciśnienie w kanale lub urządzenie odpowiedzialne za utrzymywanie zadanej wartości ciśnienia w pomieszczeniu. Dużą zaletą tego rozwiązania jest możliwość zastosowania różnych typów siłowników (analogowe standardowe i szybkie, cyfrowe), co pozwala optymalnie dopasować charakterystykę pracy urządzenia do wymagań konkretnej instalacji. Dzięki temu można zapewnić zarówno wysoką dokładność regulacji w bardzo szczelnych pomieszczeniach, jak i ekonomiczną pracę w obiektach o większej wartości przecieków powietrza.

Tabela 2. Rozwiązania do regulacji ciśnienia w zależności od współczynnika nieszczelności. Źródło: materiały techniczne firmy TROX

	TVR TROX sterownik uniwersalny		
	TVR TUN	**TVR TUS**	**TVR TUSD**
Współczynnik nieszczelności pomieszczenia	>250 m^3/h	>100 m^3/h	<100 m^3/h
Siłownik	Wolny analogowy (150 s / 0–90°)	Szybki analogowy (3 s / 0–90°)	Szybki cyfrowy (3 s / 0–90°)
Tylko regulacja ciśnienia	▪	▪	▪
Uruchomienie przez serwis TROX	▪	▪	▪

	TVR TROX system EASYLAB	
	TVR ELAB S	**TVR ELAB SD**
Współczynnik nieszczelności pomieszczenia	>100 m^3/h	<100 m^3/h
Siłownik	Szybki analogowy (3 s / 0–90°)	Szybki cyfrowy (3 s / 0–90°)
Regulacja ciśnienia i strumienia objętości powietrza	▪	▪
Uruchomienie przez serwis TROX	▪	▪

Bardziej zaawansowanym rozwiązaniem jest system EASYLAB, który umożliwia elastyczną konfigurację strategii regulacji w zależności od rzeczywistych warunków panujących w pomieszczeniu. System pozwala na precyzyjne dostosowanie sposobu sterowania do charakterystyki przepływów powietrza, wymaganej różnicy ciśnienia oraz stopnia szczelności pomieszczenia.

Dzięki rozproszonej architekturze sterowania EASYLAB integruje funkcje regulacji przepływu powietrza, kontroli ciśnienia, kompensacji procesowej oraz współpracy z urządzeniami wyciągowymi, takimi jak dygestoria, szafy wentylowane czy odciągi miejscowe. Umożliwia to utrzymanie stabilnych warunków pracy nawet przy dynamicznie zmieniających się obciążeniach instalacji.

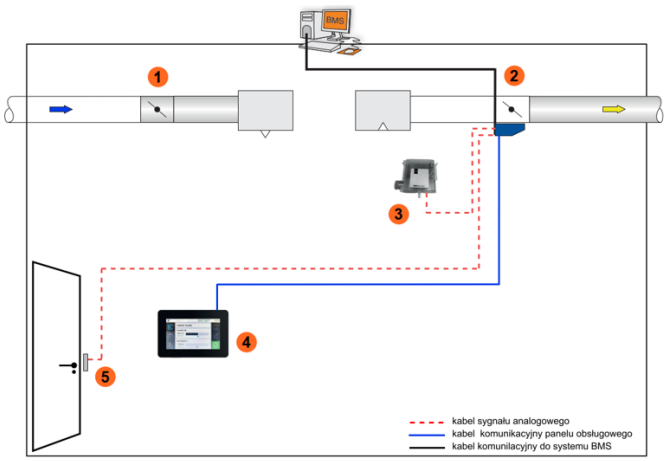
Dodatkową zaletą systemu jest możliwość zastosowania różnych typów siłowników, których charakterystyka może zostać dopasowana do wymagań konkretnej aplikacji. Pozwala to uzyskać optymalną dokładność regulacji zarówno w pomieszczeniach o dużych wartościach przecieków, jak i w bardzo szczelnych pomieszczeniach, gdzie nawet niewielka zmiana przepływu może powodować istotne zmiany ciśnienia. Dzięki temu EASYLAB zapewnia wysoką stabilność pracy, bezpieczeństwo użytkowników oraz efektywne wykorzystanie energii. Sugerowane rozwiązania w zależności od współczynnika nieszczelności pomieszczenia przedstawia Tabela 2.

Wytyczne:
- do regulacji ciśnienia zalecane jest stosowanie regulatorów okrągłych typu TVR
- maksymalna zalecana średnica regulatora 200 mm
- jeśli nieszczelność jest < 50 m^3/h, to dobór systemu wymaga szczególnej uwagi
- wartości podane w tabeli służą wyłączenie jako szybka pomoc przy wyborze rozwiązania
- szczegółowe dobory dla konkretnego projektu można wykonać za pomocą programu Easy Product Finder (EPF)

Regulacja ciśnienia w pomieszczeniach czystych (Cleanrooms)

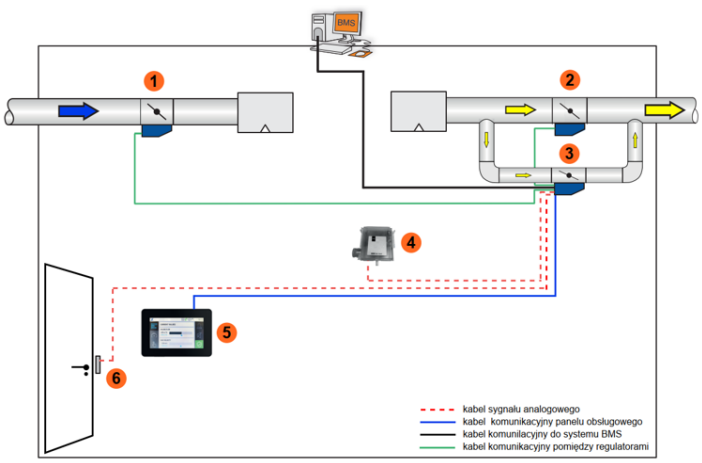
Jak wspomniano wcześniej, w pomieszczeniach czystych kluczowe znaczenie ma ochrona produktu przed zanieczyszczeniami pyłowymi, mikrobiologicznymi i chemicznymi. Z tego względu w pomieszczeniach tych stosuje się nadciśnienie względem otoczenia. Powietrze przepływa z obszarów o najwyższej klasie czystości do stref o niższych wymaganiach, tworząc tzw. kaskadę ciśnienia względem przyjętego punktu odniesienia. W układach kaskady ciśnienia pomieszczeń, optymalnym punktem odniesienia (0 Pa) jest ciśnienie atmosferyczne.

Jeżeli nie ma konieczności monitorowania ilości nawiewanego powietrza, na nawiewie można zastosować mechaniczny regulator stałego wydatku CAV. Alternatywnie można zastosować regulator zmiennego wydatku VAV, umożliwiający regulację ilości powietrza w zależności od aktualnych warunków pracy i odczyt ilości powietrza nawiewanego. Na wywiewie z pomieszczenia stosuje się natomiast regulator zmiennego przepływu wyposażony w uniwersalny sterownik TUS połączony z przetwornikiem różnicy ciśnienia, którego zadaniem jest utrzymywanie wymaganego nadciśnienia w pomieszczeniu. Przetwornik różnicy ciśnienia monitoruje ciśnienie



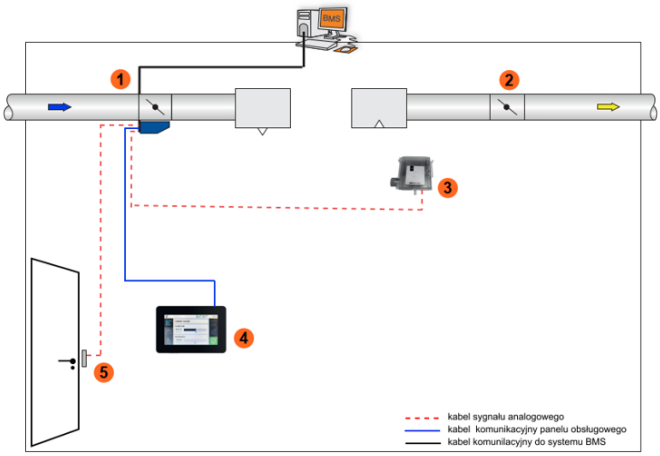
	Funkcja	Typ urządzenia
1	Nawiew do pomieszczenia CAV	RN
	Nawiew do pomieszczenia (opcja – 2 punkty pracy)	TVE/../XM0
2	Wywiew z pomieszczenia – regulacja ciśnienia	TVR/.../TUS/PRE/M...
3	Przetwornik różnicy ciśnienia	PEL-N
4	Panel obsługowy	CP-Touch
5	Kontrakton drzwi	

Rysunek 2. Układ do regulacji nadciśnienia w pomieszczeniu. Źródło: materiały techniczne firmy TROX



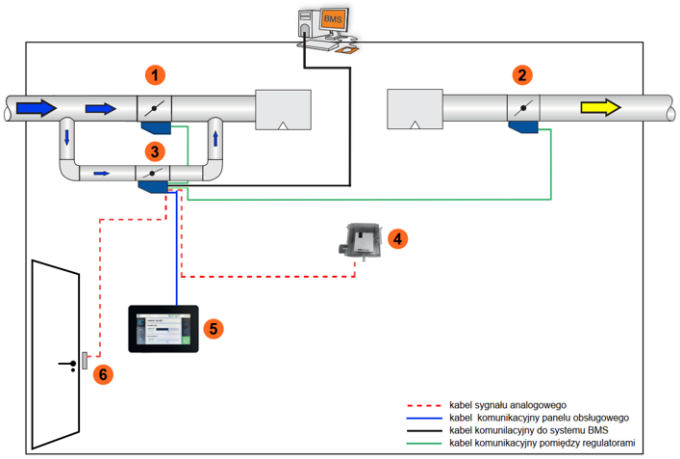
	Funkcja	Typ urządzenia
1	Nawiew do pomieszczenia – regulacja przepływu	TVR/.../TUS/ RS/S...
2	Wywiew z pomieszczenia – regulacja przepływu	TVR/.../TUS/ RE/S...
3	Wywiew z pomieszczenia – regulacja ciśnienia	TVR/.../TUS/ PRE/M...
4	Przetwornik różnicy ciśnienia	PEL-N
5	Panel obsługowy	CP-Touch
6	Kontrakton drzwi	

Rysunek 3. Układ do precyzyjnej regulacji nadciśnienia w pomieszczeniu. Źródło: materiały techniczne firmy TROX



	Funkcja	Typ urządzenia
1	Nawiew do pomieszczenia	TVR/.../TUS/PR-S/M...
2	Wywiew z pomieszczenia CAV	RN
	Wywiew z pomieszczenia (opcja – 2 punkty pracy),	TVE/../XS0
3	Przetwornik różnicy ciśnienia	PEL-N
4	Panel obsługowy	CP-Touch
5	Kontrakton drzwi	

Rysunek 4. Układ do regulacji podciśnienia w pomieszczeniu. Źródło: materiały techniczne firmy TROX



	Funkcja	Typ urządzenia
1	Nawiew do pomieszczenia – regulacja przepływu	TVR/.../TUS/ RS/S...
2	Wywiew z pomieszczenia – regulacja przepływu	TVR/.../TUS/ RE/S...
3	Nawiew do pomieszczenia – regulacja ciśnienia	TVR/.../TUS/PR-S/M...
4	Przetwornik różnicy ciśnienia	PEL-N
5	Panel obsługowy	CP-Touch
6	Kontrakton drzwi	

Rysunek 5. Układ do precyzyjnej regulacji podciśnienia w pomieszczeniu. Źródło: materiały techniczne firmy TROX

w pełnym zakresie +/– 50 Pa. Opcjonalnie możemy zastosować pomiar przepływ na regulatorze wywiewanym, co umożliwia nam podgląd ilości powietrza wywiewanego przy określonej różnicy ciśnienia w pomieszczeniu. Na Rysunku 2 przedstawiono przykład układu do regulacji nadciśnienia w pomieszczeniu.

Układ z pojedynczym regulatorem do utrzymywania nadciśnienia w pomieszczeniu jest zalecany dla pomieszczeń o standardowej nieszczelności, generującej przeciek powietrza na poziomie 100–200 m^3/h, przy przepływie strumienia objętości przez regulator wywiewny wynoszącym max. około 750 m^3/h.

W przypadku pomieszczeń o wysokiej szczelności i dużej liczbie wymian powietrza, gdzie wartość przecieków wynosi < 50 m^3/h, układ regulacji nadciśnienia wymaga precyzyjnego doboru oraz możliwości dostrojenia parametrów pracy podczas uruchomienia instalacji. W tego typu zastosowaniach, znacznie lepsze efekty zapewnia układ oparty na trzech regulatorach VAV. Rozwiązanie takie obejmuje dwa regulatory odpowiedzialne za utrzymywanie zadanych strumieni objętości powietrza nawiewanego i wywiewanego, przy określonej różnicy przepływów oraz dodatkowy regulator o średnicy od 125 do 160 mm (dobór średnicy uzależniony od szczelności pomieszczenia), przeznaczony do bezpośredniego utrzymywania nadciśnienia.

Taka konfiguracja umożliwia precyzyjne ustawienie różnicy pomiędzy strumieniem powietrza nawiewanego i wywiewanego, przy określonym nadciśnieniu oraz dostrojenie optymalnych parametrów pracy regulatora ciśnienia. Dzięki temu możliwe jest uzyskanie bardzo małych odchyłek od zadanej wartości nadciśnienia w pomieszczeniach o wysokiej szczelności i zmiennych warunkach eksploatacyjnych. Rysunek 3 przedstawia przykład układu do precyzyjnej regulacji nadciśnienia w pomieszczaniu.

Jeżeli na regulatorach nawiewnym, wywiewnym oraz regulatorze do utrzymywania nadciśnienia zastosowane zostaną uniwersalne sterowniki, np. TUS, to po połączeniu ich za pomocą magistrali komunikacyjnej (kabel sieciowy zakończony wtykami RJ45), możliwe jest centralne zarządzanie pracą całego układu. W takim rozwiązaniu regulator odpowiedzialny za utrzymywanie nadciśnienia pełni funkcję nadrzędnego sterownika pomieszczenia (Master).

Z poziomu sterownika Master możliwa jest zmiana wartości strumienia powietrza nawiewanego i wywiewanego do pomieszczenia, a także bieżący odczyt i monitoring aktualnej wartości nadciśnienia. Rozwiązanie to upraszcza obsługę instalacji oraz umożliwia wygodne zarządzanie podstawowymi parametrami pracy systemu.

Regulacja ciśnienia w Laboratoriach

W laboratoriach nadrzędnym celem systemów wentylacji i regulacji ciśnienia jest ochrona personelu oraz środowiska przed oddziaływaniem substancji niebezpiecznych. Z tego względu w pomieszczeniach laboratoryjnych najczęściej utrzymywane jest podciśnienie, które zapobiega przedostawaniu się zanieczyszczeń do stref sąsiednich.

W tego typu obiektach kluczowe znaczenie ma zapewnienie skutecznego usuwania określonej ilości powietrza z pomieszczenia. Z tego powodu strumień powietrza wywiewanego jest zazwyczaj utrzymywany na stałym poziomie, natomiast wartość podciśnienia regulowana jest poprzez odpowiednie ograniczanie strumienia powietrza nawiewanego.

Na instalacji wywiewnej można zastosować mechaniczny regulator stałego przepływu CAV, utrzymujący zadaną wartość przepływu bez konieczności zasilania i sterowania, pod warunkiem, że nie jest wymagany pomiar ani monitoring ilości powietrza usuwanego z pomieszczenia. Alternatywnie stosowany jest regulator zmiennego przepływu VAV pracujący w trybie utrzymywania stałego wydatku, który umożliwia jednoczesny pomiar, monitoring oraz komunikację z systemem automatyki budynkowej.

Na instalacji nawiewnej stosowany jest regulator zmiennego przepływu VAV wyposażony w sterownik uniwersalny, np. TUS z przetwornikiem różnicy ciśnienia, odpowiedzialny za utrzymywanie zadanej wartości podciśnienia w pomieszczeniu z opcjonalnym pomiarem ilości nawiewanego powietrza. Sterownik na podstawie sygnału z przetwornika różnicy ciśnienia na bieżąco koryguje położenie przepustnicy regulatora, dostosowując ilość powietrza nawiewanego do aktualnych warunków pracy.

Takie rozwiązanie pozwala na precyzyjne utrzymywanie zadanej wartości podciśnienia wyrażonej w Pa, przy jednoczesnym zapewnieniu wymaganej skuteczności wentylacji oraz bezpieczeństwa użytkowników laboratorium. Rysunek 4 przedstawia przykład układu do regulacji podciśnienia w pomieszczeniu.

Układ z pojedynczym regulatorem do utrzymywania podciśnienia w pomieszczeniu jest zalecany dla pomieszczeń o standardowej nieszczelności, charakteryzujących się przeciekiem powietrza na poziomie 100–200 m^3/h, przy przepływie strumienia objętości przez regulator nawiewny wynoszącym max. około 750 m^3/h.

W przypadku pomieszczeń o wysokiej szczelności oraz dużej liczbie wymian powietrza, gdzie wartość przecieków wynosi < 50 m^3/h, zaleca się stosowanie układu opartego na trzech regulatorach. Rozwiązanie takie obejmuje dwa regulatory przepływu powietrza odpowiedzialne za utrzymywanie zadanych strumieni nawiewu i wywiewu oraz dodatkowy regulator o mniejszej średnicy, dedykowany do bezpośredniego utrzymywania podciśnienia w pomieszczeniu.

Taka konfiguracja umożliwia niezależną regulację bilansu powietrza oraz precyzyjne utrzymywanie zadanej wartości podciśnienia, co przekłada się na wysoką stabilność pracy układu w bardzo szczelnych pomieszczeniach.

Zastosowanie regulatorów wyposażonych w sterowniki uniwersalne, np. TUS, umożliwia połączenie wszystkich urządzeń za pomocą magistrali komunikacyjnej w jeden system sterowania. Układ taki może komunikować się z systemem BMS, a funkcję nadrzędnego sterownika pomieszczenia (Master) pełni regulator odpowiedzialny za utrzymywanie podciśnienia. Dzięki temu z jednego punktu możliwy jest monitoring parametrów pracy układu oraz zarządzanie regulacją ciśnienia i przepływu powietrza w pomieszczeniu. Rysunek 5 przedstawia przykład układu do precyzyjnej regulacji podciśnienia w pomieszczeniu.

Przy omawianiu systemów regulacji ciśnienia warto zwrócić uwagę na wpływ otwierania drzwi na pracę układu. Otwarcie drzwi pomiędzy strefami o różnych wartościach ciśnienia, powoduje wystąpienie stanu nieustalonego, w którym następuje gwałtowne wyrównywanie ciśnienia oraz chwilowe zaburzenie bilansu przepływu

powietrza. W takich warunkach regulator ciśnienia traci możliwość prawidłowej oceny rzeczywistych warunków panujących w pomieszczeniu.

Z tego względu zaleca się stosowanie kontaktronów lub innych czujników sygnalizujących stan otwarcia drzwi. W momencie otwarcia drzwi regulatory odpowiedzialne za utrzymywanie różnicy ciśnienia w pomieszczeniach, pomiędzy, którymi otwierane są drzwi, powinny zostać czasowo przełączone w tryb wstrzymania regulacji ciśnienia lub zamrożenia aktualnych nastaw przepływu. Po zamknięciu drzwi układ automatycznie powraca do normalnego trybu regulacji i ponownie rozpoczyna utrzymywanie zadanej wartości ciśnienia. Funkcja ta jest standardowo dostępna w sterownikach uniwersalnych i stanowi istotny element poprawiający stabilność pracy układu regulacji.

Takie rozwiązanie pozwala uniknąć niepotrzebnych korekt przepływu wynikających z chwilowego zakłócenia pomiaru oraz ogranicza ryzyko dużego przeregulowania układu. Po zamknięciu drzwi regulator rozpoczyna regulację od stanu bezpośrednio przed wystąpieniem zakłócenia, dzięki czemu wymagana różnica ciśnienia jest odzyskiwana szybciej i z większą stabilnością.

Funkcja blokady regulacji podczas otwarcia drzwi jest szczególnie zalecana w pomieszczeniach o wysokiej szczelności, pomieszczeniach czystych, laboratoriach, oraz w obiektach objętych kaskadą ciśnienia, gdzie nawet krótkotrwałe zaburzenia mogą wpływać na stabilność pracy całego systemu. W praktyce rozwiązanie to znacząco poprawia dynamikę regulacji, ogranicza liczbę zbędnych ruchów regulatorów oraz zwiększa stabilność utrzymywania wymaganych parametrów środowiskowych.

Najbardziej zaawansowanym rozwiązaniem w zakresie regulacji ciśnienia w pomieszczeniach i bilansowania powietrza jest zastosowanie regulatorów pracujących w systemie EASYLAB (Rysunek 6). System ten zapewnia pełną kontrolę nad strumieniami powietrza nawiewanego i wywiewanego, umożliwia bieżącą analizę wielkości przecieków powietrza oraz automatyczne dostosowywanie parametrów regulacji do zmieniającego się bilansu powietrza i warunków eksploatacyjnych.

Szczególne zastosowanie znajduje on w laboratoriach i pomieszczeniach specjalnych wyposażonych w dygestoria, odciągi miejscowe, szafy bezpieczeństwa lub okapy laboratoryjne, których stan pracy może dynamicznie wpływać na bilans powietrza w pomieszczeniu. System EASYLAB monitoruje wszystkie istotne parametry instalacji i na bieżąco kompensuje zmiany przepływów, zapewniając stabilne utrzymywanie zadanej różnicy ciśnienia oraz wymaganych strumieni objętościowych powietrza.

Dodatkową zaletą systemu jest możliwość centralnego zarządzania wszystkimi elementami instalacji wentylacyjnej z poziomu jednego interfejsu (regulator z funkcją zarządzania pomieszczeniem – RMF) oraz pełna integracja z systemem BMS za pomocą opcjonalnych protokołów komunikacyjnych. Pozwala to na ciągły monitoring parametrów pracy, rejestrację zdarzeń oraz szybką diagnostykę systemu.

Ze względu na szeroki zakres funkcji, rozbudowane możliwości konfiguracyjne oraz specyfikę działania systemu EASYLAB, zagadnienia związane z jego projektowaniem i konfiguracją wykraczają poza zakres niniejszego artykułu i zasługują na odrębne opracowanie.



Rysunek 6. System EASYLAB, przestrzeń techniczna. Źródło: materiały techniczne firmy TROX

Siłownik cyfrowy w regulatorach VAV – przełom w dokładności regulacji

Rozpatrując układy przeznaczone do precyzyjnej regulacji ciśnienia w pomieszczeniach, warto zwrócić uwagę na rodzaj zastosowanego siłownika regulatora VAV. Firma TROX, jako jeden z pionierów tej technologii, wprowadziła na rynek siłownik cyfrowy (HPD), który w porównaniu z tradycyjnym siłownikiem analogowym charakteryzuje się znacznie wyższą rozdzielczością pozycjonowania przepustnicy (Rysunek 7).

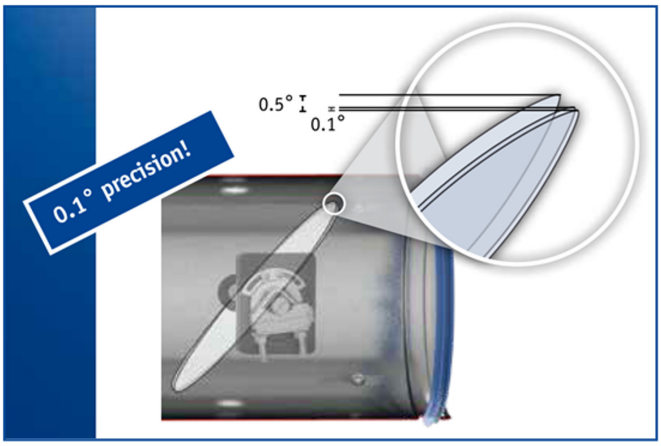
Zarówno stosowane siłowniki analogowe (S), jak i cyfrowe (HPD) należą do grupy siłowników szybkich i osiągają pełny zakres obrotu od 0° do 90° w czasie 3 sekund. Istotna różnica pomiędzy tymi rozwiązaniami dotyczy jednak dokładności pozycjonowania przepustnicy regulacyjnej.

W przypadku siłownika analogowego minimalny krok pozycjonowania wynosi około 0,5°. Oznacza to, że zmiana położenia przepustnicy realizowana jest skokowo, co 0,5° w całym zakresie obrotu od 0° do 90°. Natomiast siłownik cyfrowy charakteryzuje się rozdzielczością poniżej 0,1°, dzięki czemu liczba dostępnych punktów pośrednich jest wielokrotnie większa.

Wyższa rozdzielczość pozycjonowania przekłada się bezpośrednio na większą precyzję regulacji przepływu powietrza, a tym samym na dokładniejsze utrzymywanie zadanej różnicy ciśnienia w pomieszczeniu. Ma to szczególne znaczenie w pomieszczeniach o wysokiej szczelności, gdzie wartości przecieków powietrza są niewielkie i często nie przekraczają 50 m^3/h.

W takich warunkach nawet niewielka zmiana położenia przepustnicy może powodować istotną zmianę przepływu powietrza oraz wartości ciśnienia w pomieszczeniu. Zastosowanie siłownika cyfrowego umożliwia znacznie płynniejszą i dokładniejszą korekcję przepływu niż w przypadku siłownika analogowego, co przekłada się na większą stabilność regulacji oraz mniejsze odchyłki od zadanej wartości ciśnienia.

Korzyści wynikające z zastosowania siłownika cyfrowego są szczególnie widoczne w laboratoriach o wysokich standardach, pomieszczeniach czystych oraz innych obiektach wymagających precyzyjnej kontroli różnicy ciśnienia, gdzie utrzymanie stabilnych warunków środowiskowych ma kluczowe znaczenie dla bezpieczeństwa procesów technologicznych i użytkowników.



Rysunek 7. Rozdzielczość przepustnicy siłowników analogowego i cyfrowego. Źródło: materiały techniczne firmy TROX

Ciśnienie referencyjne – fundament precyzyjnej regulacji

Ostatnim, lecz niezwykle istotnym elementem systemu regulacji ciśnienia w pomieszczeniach jest zapewnienie stabilnego punktu odniesienia (0 Pa) dla wszystkich układów pomiarowych i regulacyjnych. Punkt odniesienia powinien być wspólny dla wszystkich regulatorów ciśnienia pracujących w danej kaskadzie oraz charakteryzować się możliwie wysoką stabilnością w czasie.

Za optymalny punkt odniesienia przyjmuje się ciśnienie atmosferyczne. W przeciwieństwie do ciśnienia panującego wewnątrz budynku, które może podlegać lokalnym wahaniom wywołanym pracą instalacji wentylacyjnej, otwieraniem drzwi czy przemieszczaniem się powietrza pomiędzy strefami, ciśnienie atmosferyczne stanowi stabilną bazę odniesienia dla precyzyjnej regulacji różnicy ciśnienia.

Punkt poboru ciśnienia odniesienia, powinien być zlokalizowany na zewnątrz budynku w sposób eliminujący wpływ wiatru, zjawisk konwekcyjnych oraz lokalnych zaburzeń przepływu powietrza. W tym celu stosuje się specjalne porty poboru ciśnienia statycznego wyposażone w elementy tłumiące, których zadaniem jest ograniczenie krótkotrwałych wahań ciśnienia. Rozwiązania tego typu umożliwiają wprowadzenie do budynku stabilnego sygnału referencyjnego (0 Pa). Przykładem takiego urządzenia jest port ciśnienia statycznego SPP firmy Produal.

W przypadku rozbudowanych instalacji obejmujących wiele pomieszczeń objętych regulacją ciśnienia, zaleca się wykonanie wspólnej magistrali ciśnienia odniesienia w postaci szczelnej rury referencyjnej o średnicy od 75 do 100 mm. Rura ta powinna być prowadzona w pobliżu regulowanych pomieszczeń i stanowić wspólny punkt odniesienia przetworników różnicy ciśnienia pracujących w kaskadzie. Ciśnienie atmosferyczne pobierane z zewnątrz budynku doprowadzane jest do rury referencyjnej. Do rury referencyjnej podłączane są następnie wszystkie punkty pomiarowe referencyjne. Takie rozwiązanie eliminuje różnice wynikające z lokalizacji czujników oraz zapewnia, że wszystkie regulatory wykorzystują identyczny punkt odniesienia. Ma to kluczowe znaczenie dla stabilności pracy układu, szczególnie w obiektach laboratoryjnych, pomieszczeniach czystych oraz instalacjach z rozbudowaną kaskadą ciśnienia, gdzie niewielkie błędy pomiarowe mogą prowadzić do zakłóceń regulacji i nieprawidłowego rozkładu różnic ciśnienia pomiędzy pomieszczeniami.

Prawidłowo zaprojektowany i wykonany układ ciśnienia odniesienia jest jednym z podstawowych warunków uzyskania stabilnej oraz precyzyjnej regulacji kaskady ciśnienia w całym obiekcie. Często to właśnie jakość punktu odniesienia decyduje o końcowej skuteczności działania systemu regulacji w kaskadzie ciśnienia.

Nie ma jednego uniwersalnego rozwiązania

Dobór rozwiązania do regulacji ciśnienia powinien być każdorazowo uzależniony od charakterystyki pomieszczenia, jego szczelności, wymaganych strumieni powietrza oraz sposobu eksploatacji. W niniejszym artykule przedstawiono przykładowe rozwiązania w zależności od poziomu nieszczelności pomieszczenia. Należy jednak pamiętać, że podane wartości mają charakter orientacyjny i powinny być traktowane jako wskazówka ułatwiająca wybór koncepcji regulacji. Ostateczny dobór systemu wymaga każdorazowo analizy konkretnego przypadku.

Prawidłowo działająca regulacja ciśnienia jest systemem naczyń połączonych, w którym każdy element wpływa na końcową stabilność pracy układu. Centrala wentylacyjna musi zapewniać stabilne strumienie objętości powietrza nawiewanego i wywiewanego, regulatory powinny dokładnie mierzyć oraz regulować strumienie objętości powietrza, a układ pomiaru ciśnienia dostarczać wiarygodnych danych w odniesieniu do stabilnego punktu referencyjnego. Równie istotną rolę odgrywają sterownik i siłownik, które muszą odpowiednio szybko reagować na zmiany warunków pracy. Dopiero współdziałanie wszystkich tych elementów pozwala na utrzymanie wymaganej różnicy ciśnienia.

W pomieszczeniach o kontrolowanych parametrach środowiskowych nie wystarczy jednorazowe osiągnięcie zadanej wartości ciśnienia. Kluczowe jest zapewnienie stabilnej regulacji również w sytuacji zmieniających się warunków eksploatacyjnych, takich jak zmiany obciążenia instalacji, otwieranie drzwi, praca dygestoriów czy odciągów miejscowych. To właśnie ciągła kontrola przepływu powietrza oraz skuteczna kompensacja zakłóceń decydują o bezpieczeństwie użytkowników, ochronie procesów technologicznych oraz utrzymaniu wymaganych parametrów środowiska.

W celu zapewnienia stabilnej, dokładnej i bezawaryjnej regulacji ciśnienia, należy zwrócić szczególną uwagę na następujące aspekty:

- stabilną i płynną regulację wydajności central wentylacyjnych (AHU), przy czym utrzymywanie różnicy ciśnienia powinno być realizowane przez regulatory VAV, natomiast regulacja wydajności centrali powinna obejmować odpowiednio dobraną strefę nieczułości, ograniczającą wzajemne oddziaływanie obu układów regulacji,
- prawidłowy dobór, montaż i konfigurację regulatorów przepływu oraz regulatorów ciśnienia,
- dokładność działania pozostałych urządzeń wpływających na bilans powietrza,
- szczelność pomieszczenia oraz jakość wykonania przegród budowlanych i sufitów,
- możliwość regulacji kontrolowanych przecieków, np. za pomocą uszczelek opadających w drzwiach,
- właściwe uruchomienie, dostrojenie oraz weryfikację działania całego układu regulacji kaskady ciśnienia.

Podsumowując, nawet najbardziej zaawansowany sterownik, regulator czy system automatyki nie są w stanie skompensować błędów projektowych, wykonawczych lub niewłaściwie dobranych urządzeń. Skuteczna regulacja ciśnienia jest rezultatem poprawnego projektu, wysokiej jakości wykonania instalacji oraz właściwie przeprowadzonego uruchomienia. Dopiero połączenie tych elementów pozwala uzyskać stabilną, precyzyjną i niezawodną regulację ciśnienia w pomieszczeniach o podwyższonych wymaganiach.

W opracowaniu wykorzystano informacje zawarte w materiałach technicznych firm TROX i PRODUAL, wytycznych WHO, poradniku projektowym LABCONTROL–EASYLAB oraz wytycznych GMP. Uwzględniono również wymagania określone w normach DIN 1946-7, CEN/TS 17441:2020, PN-EN ISO 14644-1, PN-EN ISO 14644-2, PN-EN ISO 14644-3, PN-EN ISO 14644-16, PN-EN 14175-2, PN-EN 14175-6 oraz PN-EN 12128:2000, dotyczących projektowania, wykonania, eksploatacji i monitorowania systemów wentylacji w laboratoriach, klasyfikacji i badania pomieszczeń czystych, ich efektywności energetycznej, bezpieczeństwa wyciągów laboratoryjnych oraz wymagań dla laboratoriów badawczych, rozwojowych i analitycznych.

WYŚCIG TALENTÓW
BUDOWNICTWO I INSTALACJE
WEŹ UDZIAŁ
W KONKURSIE 100% ONLINE
PRZEJDŹ NA STRONĘ KONKURSU
NAGRODY GŁÓWNE:
I MIEJSCE: 10 000 ZŁ
II MIEJSCE: 5 000 ZŁ
III MIEJSCE: 2 500 ZŁ
+ NAGRODY RZECZOWE
ELIMINACJE ONLINE
DOŁĄCZ DO RYWALIZACJI KIEDY CHCESZ...
NAGRODY CO MIESIĄC
DLA UCZNIÓW I ICH NAUCZYCIELI
PARTNERZY STRATEGICZNI
DEWALT MAPEI STRABAG PROPERTY AND FACILITY SERVICES
PARTNERZY GŁÓWNI
aeroVent AFRISO H+H Haier joule K-FLEX LFP NORGIPS Panasonic Pekabex SALUS SANHA TUBĄDZIN VERNO walraven
PARTNERZY WSPIERAJĄCY
abatos almeva Beretta LAHTI PRO magnaplast PROFIX PROLINE Schwank VESBO POLAND WESEM
ORGANIZATOR: XPERTIS