Energia systemy

WOJCIECH HALKIEWICZ

Jak oszczędzać energię w systemach sprężonego powietrza?

PEMP
NFOŚiGW

„Jak oszczędzać energię w systemach sprężonego powietrza”

PORTAL EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ W NAPĘDACH ELEKTRYCZNYCH

Publikację sfinansowano ze środków Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej.

O autorze:

Wojciech Halkiewicz – specjalista w dziedzinie techniki sprężonego powietrza. Absolwent Politechniki Poznańskiej specjalności Systemy i Urządzenia Energetyczne – Maszyny Przepływowe. Pracował w pierwszej w Polsce fabryce sprężarek śrubowych powietrza. Autor wielu publikacji technicznych dotyczących racjonalnej produkcji i wykorzystania sprężonego powietrza oraz popularyzujących tę dziedzinę.

Kontakt e-mail: wh@powietrze.com.pl

Wydawca:

Fundacja na rzecz Efektywnego Wykorzystania Energii
ul. Rymera 3/4, 40-048 Katowice,
www.fewe.pl

© Copyright by Fundacja na rzecz Efektywnego Wykorzystania Energii – FEWE

Wydanie I, Katowice 2009

Projekt graficzny: Joanna Mazurczyk

Spis treści

1 Zastosowanie sprężonego powietrza w procesach przemysłowych. 4
2 Istniejące rozwiązania techniczne systemów sprężonego powietrza. 6
2.1 Stosowane sprężarki 6
2.2 Idealny system produkcji i dystrybucji sprężonego powietrza 17
3 Zużycie energii i koszty wytwarzania sprężonego powietrza w zależności od zastosowanego układu, parametrów sprężonego powietrza. 33
4 Przykład modernizacji systemu sprężonego powietrza – opis stanu istniejącego, propozycje rozwiązań, określenie efektów wdrożenia 40
5 Możliwości zmian – jak poprawić efektywność energetyczną układów sprężonego powietrza? 44
6 Podstawowe wskazówki dla poprawnej eksploatacji układów sprężonego powietrza (konserwacje, monitoring). 57
7 Outsourcing sprężonego powietrza 61
8 Tablice 63
9 Wykaz wybranych norm dotyczących zagadnień z zakresu sprężarek 70
10 Słownik używanych w poradniku pojęć technicznych 72

1 Zastosowanie sprężonego powietrza w procesach przemysłowych.

Sprężone powietrze, to jeden z częściej stosowanych nośników energii w przemyśle. Jest medium stosunkowo bezpiecznym, czystym, dającym się magazynować, łatwo je uzyskać i wykorzystywać do napędu i zasilania różnych urządzeń i technologii. W ogólnym przekonaniu jest tanie i łatwo dostępne. W rzeczywistości tylko ostatnie zadnie z tych kliku powyższych jest nieprawdziwe. O rzeczywistych kosztach powietrza więcej w następnym rozdziale.

Jak jest ono istotne z punktu widzenia bilansu energetycznego gospodarki, czy też konkretnej fabryki, niech potwierdzą dane dotyczące krajów „starej 15" Unii Europejskiej, gdzie łączne zapotrzebowanie na energię w przemyśle zużywaną na produkcję sprężonego powietrza, szacuje się na około 10% łącznych potrzeb, a w skali indywidualnego odbiorcy stosującego sprężone powietrze energia zużywana na jego produkcję stanowi około 5% do 25% łącznych potrzeb przedsiębiorstwa. Ponieważ nie ma aktualnych publikacji dotyczących polskiej gospodarki na ten temat, posługując się szacunkami wynikającymi z osobistych obserwacji, można szacować, że na produkcję sprężonego powietrza w średnim polskim przedsiębiorstwie zużywa się około 10-20% łącznego poboru energii elektrycznej.

Dzięki powyższym cechom, jak i rzeczywiście łatwo dostępnemu „surowcowi", którym jest otaczające nas powietrze atmosferyczne, sprężone powietrze zajmuje dość ważną rolę w przemyśle.

Służy napędom i sterowaniu pneumatycznemu, układom ruchowym, obrotowym, posuwistym i posuwisto – zwrotnym, a także szeroko rozumianej automatyce. Dzięki łatwości przetworzenia sygnału sterującego na komendę otwierania i zamykania właściwych zaworów, w ruch można wprawiać przeróżne urządzenia i media, a manipulując przekrojami zaworów, energię ciśnienia sprężonego powietrza przetwarzać na precyzyjnie obliczone siły wymagane w urządzeniach.

Sprężone powietrze, to także transport pneumatyczny materiałów sypkich, to malowanie natryskowe suche lub mokre. To oczyszczanie strumieniowe poprzez śrutowanie, piaskowanie czy oczyszczanie suchym lodem. To produkcja, transport i przechowywanie powietrza oddechowego dla ludzi pracujących w trudnych warunkach. To roboty produkcyjne i centra obróbcze sterowane pneumatycznie. To układy hamulcowe w kolejnictwie, czy otwieranie i zamykanie drzwi np. na lotnisku oraz innych obiektach publicznych. To także proste procesy odmuchiwania, suszenia i chłodzenia za pomocą bardziej lub mniej specjalnych dysz lub zupełnie bez ich udziału. To dalej procesy formowania i rozdmuchu różnego rodzaju pojemników. To w końcu także generacja azotu i tlenu dzięki specjalnym urządzeniom separującym. Trudno dziś znaleźć zautomatyzowaną fabrykę produkującą masowo powtarzalny produkt bez wielu elementów automatyki pneumatycznej, trudno wyobrazić sobie narzędzia ręczne takie jak szlifierka, wiertarka i wkrętarka bardziej sprawne

i skuteczne niż pneumatyczne. Nowoczesny przemysł bez sprężonego powietrza nie może normalnie funkcjonować.

Jednocześnie należy zwrócić uwagę, że nie wszystkie technologie w sposób racjonalny wykorzystują sprężone powietrze, wiele z nich jest dedykowanych tylko specjalistycznym firmom, a jeszcze innych powinno się najzwyczajniej unikać. Do technologii, które wymagają instalowania dużych mocy, które często nie bywają wykorzystywane należy np. oczyszczanie strumieniowe i malowanie natryskowe. Tam trzeba mieć do dyspozycji duży strumień powietrza. Jeżeli ktoś nie jest w stanie takiego potencjału wykorzystywać, lepiej takie technologie zlecić firmom w tym się specjalizującym, bo one podczas pracy ciągłej nad wieloma różnymi produktami, dla wielu odbiorców mogą wykorzystywać bardzo duże sprężarki pracujące w sposób ciągły przy relatywnie równym i dużym obciążeniu. Inaczej koszt jednostkowej produkcji powietrza jest nieefektywny w przeliczeniu na jednostkową produkcję danego podmiotu. Takie sytuacje należy indywidualnie analizować i jeśli to możliwe eliminować. Z pewnością przeciwwagą będą procesy sterowania i napędu pneumatycznego, których wszechstronność i elastyczność dzięki wykorzystaniu sprężonego powietrza jest bardzo ceniona.

Natomiast należy zwrócić uwagę także na technologie, których w ogóle lepiej unikać. Przykładem może być prosty wydmuch do atmosfery w celu schłodzenia, oczyszczenia, czy odmuchania jakiegoś przedmiotu. Tutaj należy albo używać tylko specjalnych dysz, albo zamiast powietrza sprężonego klasycznie do 7 bar przy pomocy sprężarki, sprężać je przy pomocy dmuchawy do maksymalnie 1 bar – a wykorzystywać efekt prędkości wypływu, który nie wynika tylko z ciśnienia, ale także z ilości dostarczanego powietrza (przepływającego strumienia). W wielu przypadkach suszenie, zdmuchiwanie jest efektywne już przy ciśnieniu zaledwie 0,2 – 0,3 bar. Do takich technologii, do których powietrza sprężonego do 7 bar lepiej w ogóle nie używać należy napowietrzanie ścieków, wody czy kąpieli galwanicznych. Tam najczęściej wymagane ciśnienie wynika z wysokości lustra danej cieczy do pokonania przez powietrze. Dla napowietrzana ścieków rzadko przekracza ono 0,6 bar, a dla kąpieli galwanicznych 0,3 bar.

Piszę o tym, ponieważ jest to efekt moich wieloletnich obserwacji, podczas których wielokrotnie byłem świadkiem sytuacji, w której powietrze sprężano do 7 czy 8 bar, a następnie, na przykład do mieszania kąpieli galwanicznych, było rozprężane do 0,3 bara. Jeśli weźmie się pod uwagę, że po zastosowaniu pewnych uproszczeń na sprężanie 1 m^3 powietrza do 7 bar potrzeba dostarczyć 111 Wh energii elektrycznej, to wiele wątpliwości da się wyjaśnić stosując bardzo proste kryteria ekonomiczne.

2 Istniejące rozwiązania techniczne systemów sprężonego powietrza.

Jednym z kryteriów podziału urządzeń sprężających jest wielkość ich sprężu, czy ciśnienia roboczego. Wg nieocenionego prof. Edmunda Tuliszki, nauczyciela wielu specjalistów z Politechniki Poznańskiej, autora podręczników i wykładów z termodynamiki, mechaniki płynów oraz wielu publikacji na temat sprężarek, dmuchaw i wentylatorów, podział ten przebiega następująco:

„W maszynach sprężających ciśnienia początkowe i końcowe mogą mieć różne wartości. Utarło się kilka pojęć w zakresie maszyn sprężających, które charakteryzują dodatkowo dane urządzenia pod względem poziomów i wartości ciśnień, a mianowicie:

- Sprężarka jest to maszyna robocza, służąca do przetłaczania gazów. Uzyskane w niej spiętrzenie całkowite (przyrost ciśnienia) czynnika tłoczonego jest większe od 2 barów.
- Pompa próżniowa jest to maszyna robocza, służąca do usuwania gazów z jednego obszaru i wydalania ich do drugiego, przy czym ciśnienie na wylocie pompy jest równe lub mniejsze od ciśnienia atmosferycznego.
- Dmuchawa jest to maszyna robocza, podwyższająca ciśnienie przepływających gazów w granicach 0,1-2 barów.
- Wentylator jest maszyną roboczą, w której przyrost ciśnienia nie przekracza wartości 0,1 bar.”

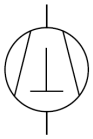
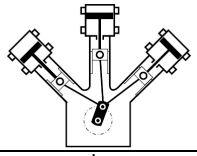
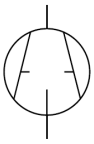
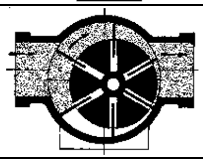
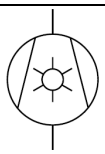
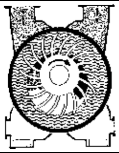
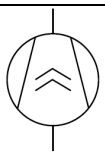
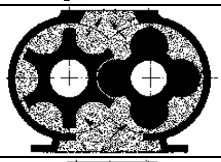
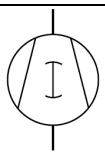
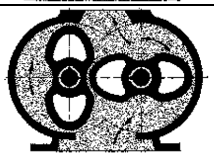
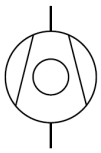
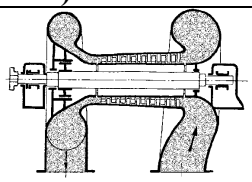
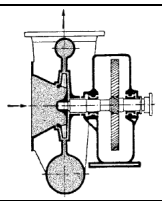
Powyższe określenia nie są tak precyzyjne i jednoznaczne, aby na ich podstawie daną maszynę można było zdecydowanie zaliczyć do jednej z wymienionych grup. Z wielkościami przyrostów ciśnień związane są także pewne cechy konstrukcyjne tych maszyn – dlatego również one mogą być podstawą do zaszeregowania danej maszyny do sprężarek, dmuchaw, wentylatorów lub pomp próżniowych”. Przyznam, że przez prawie 20 lat mojej praktyki zawodowej trzymam się tego podziału i według niego kwalifikuję urządzenia, nie popełniając w ten sposób, jak sądzę na podstawie doświadczenia, większego błędu.

2.1 Stosowane sprężarki

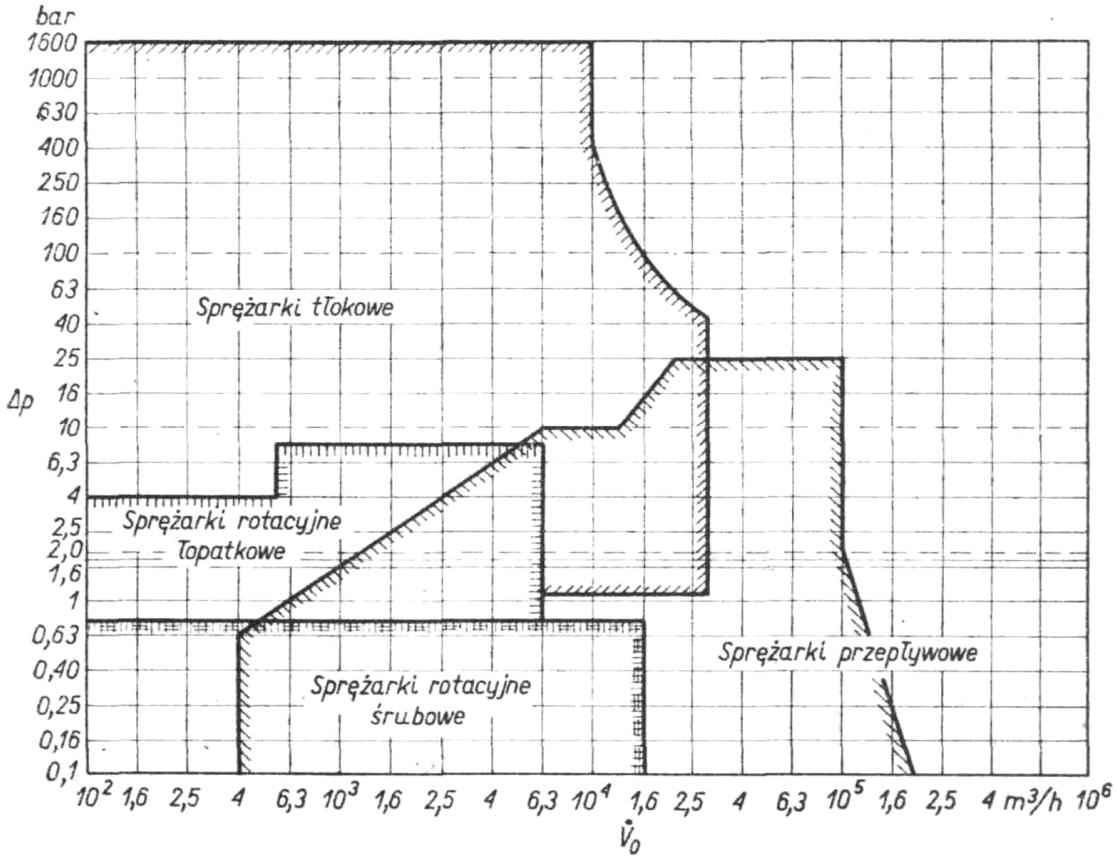
Podstawowy podział sprężarek wynika z metody sprężania, czy jak kto woli sposobu uzyskiwania ciśnienia kosztem pewnej pracy technicznej. Ten podstawowy podział w tym miejscu w sposób naturalny dzieli sprężarki na dynamiczne (przepływowe), tzn. takie, w których energia kinetyczna strumienia powietrza przepływającego przez sprężarkę uzyskuje odpowiednią wartość dzięki rozpędzeniu go do wysokiej prędkości, którą w takim agregacie zamienia się na ciśnienie tego strumienia, natomiast sprężarki wyporowe to urządzenia, w których ciśnienie uzyskuje się poprzez wykonywanie pracy mechanicznej mającej na celu zmniejszenie objętości powietrza w określonej zamkniętej komorze sprężania.

Podział sprężarek wg ich budowy, sposobu działania oraz uzyskiwanego spiętrzenia czynnika przedstawiono w tabeli 1 oraz na rysunku 1.

Tabela 1 Podział podstawowy sprężarek

Typ	Symbol wg niemieckich oznaczeń schematycznych	Przykładowy przekrój
SPRĘŻARKI WYPOROWE		
Sprężarki tłokowe		 
Sprężarki łopatkowe z wysuwanymi łopatkami		
Sprężarki łopatkowe z łopatkami stałymi		
Sprężarki śrubowe		
Sprężarki (dmuchawy) Roots'a – z obrotowymi tłokami		
SPRĘŻARKI PRZEPŁYWOWE (DYNAMICZNE)		
Sprężarki osiowe		
Sprężarki promieniowe		

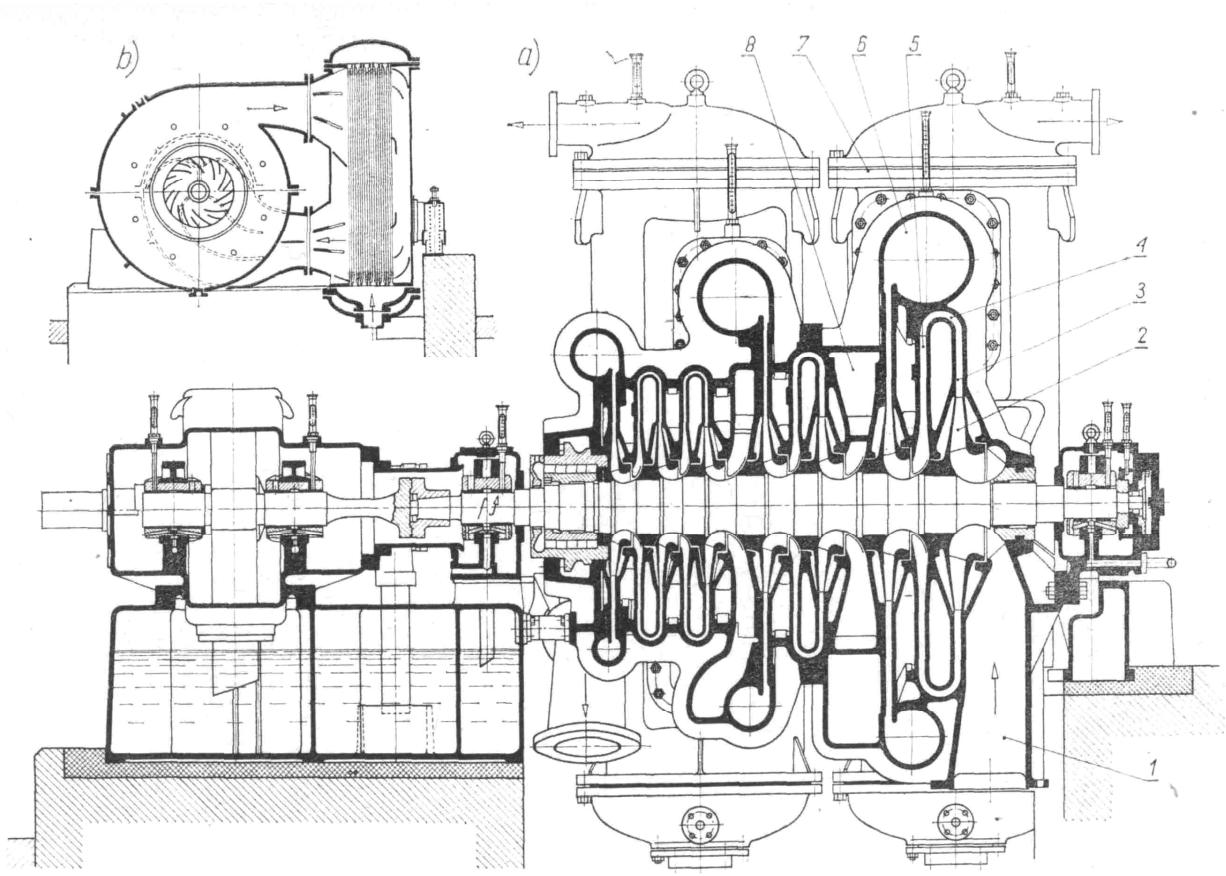
źródło: strona internetowa www.druckluftechnik.de



Rysunek 1 Podział sprężarek ze względu na zastosowanie wg parametrów

Edmund Tuliszka : Sprężarki, dmuchawy i wentylatory. WNT Warszawa 1976

Najbardziej znane sprężarki przepływowe, to ***sprężarki promieniowe*** często potocznie zwane ***turbosprężarkami***. Są to maszyny najczęściej 1-4 stopniowe z ciśnieniami roboczymi od 0,2 do 40 bar, bezolejowe, chłodzone cieczą. Zakres wydajności, to w zdecydowanej większości maszyny powyżej 2 000 m^3/h, do około 100 000 m^3/h. Sprężanie jest bezolejowe dzięki fizycznemu oddzieleniu układu smarowania przekładni przyspieszającej od obiegu sprężonego powietrza poprzez stosowanie osobnych korpusów oraz wielostopniowych uszczelnień typu pierścieniowego czy labiryntowego. Znajdują zastosowanie do sprężania powietrza, a także wielu gazów. Sprężanie polega na rozpędzeniu strumienia powietrza zassanego w osi pierwszego stopnia sprężarki poprzez odrzucenie go siłą odśrodkową w specjalnie zaprojektowanym w tym celu wirniku. Powietrze na wylocie z wirnika, rozpędzone trafia do tzw. dyfuzora bezłopatkowego, dalej łopatkowego, a następnie tzw. kanału (kolektora) przewałowego, gdzie na każdym etapie wyrównywany jest profil prędkości strumienia umożliwiający uzyskanie właściwego ciśnienia. Właśnie w całym układzie dyfuzorowym zachodzi właściwa zamiana energii kinetycznej strumienia na jego ciśnienie.

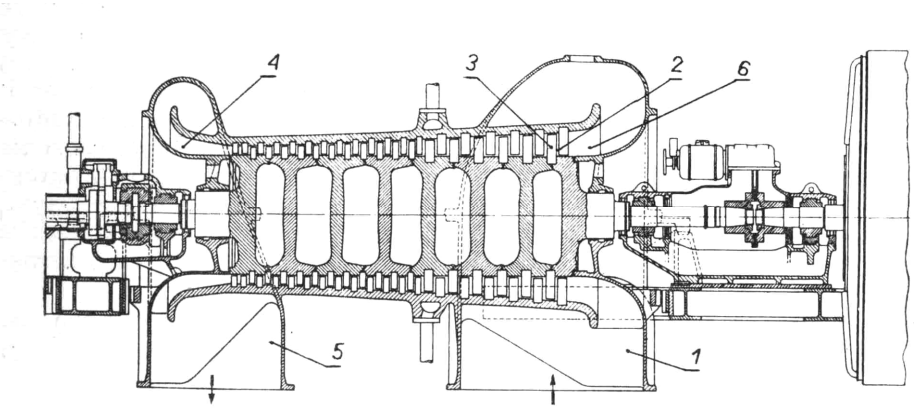


Rysunek 2 Wielostopniowa sprężarka promieniowa

Edmund Tuliszka : Sprężarki, dmuchawy i wentylatory. WNT Warszawa 1976

Oprócz stopni sprężających (układ wirnik – dyfuzory – kanał), sercem sprężarki jest przekładnia zębata przyspieszająca wirniki do prędkości rzędu kilkudziesięciu tysięcy obrotów na minutę. Wysokość ciśnienia uzależniona jest od ilości stopni sprężania. Najpopularniejsze ciśnienia przemysłowe około 7 bar uzyskuje się w 2 lub 3 stopniach z chłodzeniem międzystopniowym. Ciśnienia powyżej 15 bar wymagają 4 stopni sprężania z chłodzeniem międzystopniowym. Sprawności maszyn są tu wyższe w maksymalnym punkcie charakterystyki niż sprawność tak popularnych także w zakresie do 6 000 m^3/h sprężarek śrubowych. Regulacja wydajności odbywa się poprzez zmianę kąta ustawienia (otwarcia) kierowniczych łopatek wlotowych pierwszego stopnia sprężarki, poprzez zmianę kąta nastawy łopatek dyfuzora lub bezpośrednie dławienie na ssaniu i tłoczeniu, poprzez wydmuch oraz kombinacje powyższych metod. Możliwe także jest zastosowanie zmiany prędkości obrotowej oraz kombinowanie jej z powyższymi.

Kolejna grupa sprężarek przepływowych to ***sprężarki osiowe***. Sprężanie odbywa się tu podobnie jak powyżej poprzez rozpędzenie strumienia powietrza na wirniku sprężarki, natomiast funkcję układu dyfuzorowego pełni układ nieruchomych łopatek osadzonych w korpusie sprężarki (stojan).

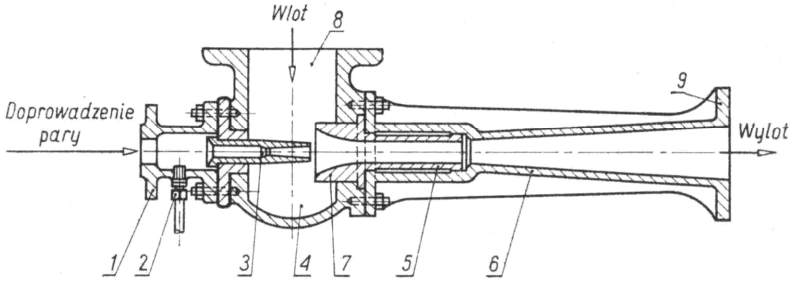


Rysunek 3 Wielostopniowa sprężarka osiowa

Edmund Tuliszka : Sprężarki, dmuchawy i wentylatory. WNT Warszawa 1976

Kinematyka i działanie obu sprężarek jest podobne, z tym, że w sprężarkach osiowych przepływ i wzrost prędkości strumienia odbywa się wzdłuż osi sprężarki. Sprężarki osiowe, to maszyny stosowane najczęściej jako maszyny procesowe do różnego typu gazów oraz przy bardzo dużej wydajności (nawet do 200.000 m^3/h) i ciśnieniach, rzadko stosowanych powszechnie w przemyśle.

Także rzadko jako maszyny sprężające powietrze do parametrów przemysłowych stosowane są ***eżektory***, gdzie strumień tłoczonego powietrza indukowany jest przez wprowadzenie w odpowiedniej geometrii innego strumienia powietrza lub pary o wysokiej prędkości.



Rysunek 4 Eżektor

Edmund Tuliszka .: Sprężarki, dmuchawy i wentylatory. WNT Warszawa 1976

Tę metodę często wykorzystuje się przy transporcie pneumatycznym materiałów sypkich. Maszyny z grupy przepływowych, to sprężarki bezolejowe, tzn. sprężające bez obecności oleju w komorze sprężania.

Następne sprężarki, ważne szczególnie ze względu na ich historyczną rolę w rozwoju przemysłu, to ***sprężarki tłokowe***. Są to sprężarki typu wyporowego, podobnie jak wszystkie dalej wymieniane. Dziś stosowane są już rzadziej, ze względu na fakt, że ich miejsce zajęły mniej kłopotliwe ruchowo sprężarki rotacyjne, śrubowe i łopatkowe. Pracują na ciśnienia od 1 do 1 600 bar, z różnymi gazami, jako jedno lub wielostopniowe, jednostronnego lub

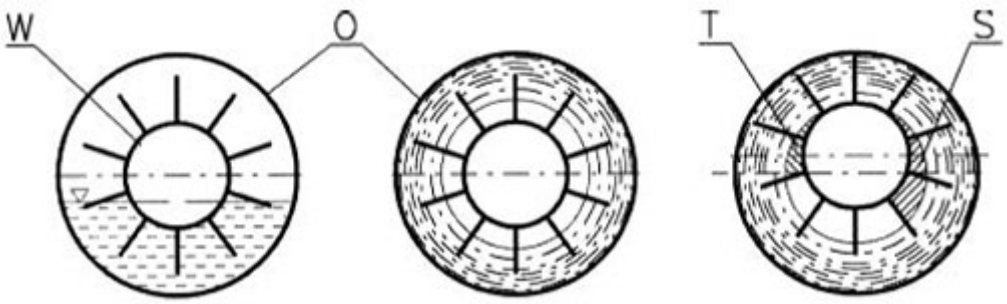
dwustronnego działania, z wieloma kombinacjami tłoków, układów cylindrowych czy korbowych.

Rysunek 5 Tłok dwustronnego działania oraz agregat bezolejowej sprężarki tłokowej Ateliers Francois (Belgia) na 40 bar

Maszyny sprężające powietrze tego typu, są w dniu dzisiejszym nie do zastąpienia w zakresie wydajności do 30 m^3/h, z ciśnieniami do 13 bar, dla małych użytkowników warsztatowych, czy hobbystów. Podobnie trudno je zastąpić przy sprężaniu do wyższych ciśnień od 25 bar w górę np. do rozdmuchu butelek PET przy ciśnieniu około 40 bar (wydajności nawet do 4 000 m^3/h) lub napełnianiu butli z powietrzem do 350 bar, czy też sprężaniu gazu ziemnego do około 300 bar.
W przypadku maszyn niskoobrotowych, o dużych gabarytach, wielostopniowych chłodzonych wodą uzyskiwać można bardzo wysokie sprawności porównywalne lub wyższe niż dla maszyn przepływowych. Niestety cechują się one relatywnie wysokim poziomem hałasu, szybkim zużyciem mechanicznym i dużymi wymaganiami instalacyjnymi. Regulacja wydajności może następować poprzez podwieszanie wszystkich lub części zaworów, co umożliwia uzyskiwanie bardzo dobrych charakterystyk obciążenia częściowego. Możliwe jest także regulacja poprzez zmianę prędkości obrotowej w zakresie 50 – 100 %. Dostępne są jako maszyny smarowane olejem (olej smaruje parę kinematyczną – tłok pierścieniowy – cylinder oraz łożyska i korbowód) lub bezolejowe – komora sprężania bez oleju pracująca na pierścieniach typu teflonowego lub grafitowego na sucho.

Sprężarki jednowałowe – łopatkowe z łopatkami stałymi z pierścieniem wodnym. Zasada działania sprężarki z wirującym pierścieniem cieczowym jest następująca: w cylindrycznej obudowie „O", częściowo wypełnionej cieczą znajduje się wirnik skrzydełkowy. Po uruchomieniu pompy, z powodu wirowania wirnika, ciecz zostanie wprowadzona w ruch okrężny i odrzucona na ściany obudowy tworząc pierścień cieczowy. Jeżeli wirnik zostanie

umieszczony mimośrodowo w stosunku do obudowy, to przy piaście powstanie wolna od cieczy przestrzeń sierpowa podzielona łopatkami wirnika na oddzielne komory. Objętość komór początkowo wzrasta a po minięciu dolnego położenia maleje. Jeżeli w bocznych ścianach (tarczach), stanowiących osiowe zamknięcie komór, wyciąć otwory na początku (okno ssące "S") i na końcu (okno tłoczne "T") przestrzeni sierpowej to na skutek powiększenia objętości komory gaz będzie do niej zasysany a następnie w skutek jej zmniejszania sprężany i wytłaczany na zewnątrz. Ponieważ razem ze sprężonym gazem przez okno tłoczne usuwana jest część cieczy z pierścienia musi być ona stale uzupełniana.



Rysunek 6 Zasada działania pompy z wirującymi pierścieniami cieczowymi

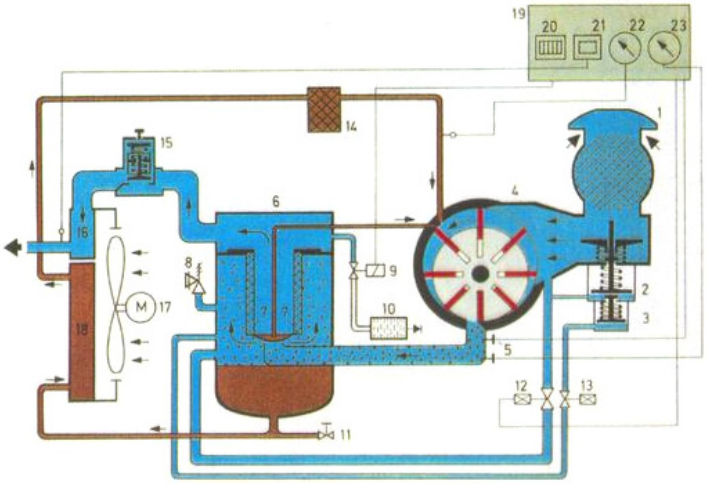
źródło: strona internetowa firmy Hydro-Vacuum Grudziądz

Sprężarki tego typu pracują w większości zastosowań jako pompy próżniowe, rzadziej jako dmuchawy (tzn. urządzenia podwyższające ciśnienie). Są proste i niezawodne, mogą pracować nawet w trudnych warunkach, w atmosferze agresywnych mediów. Zakres wydajności, jako pomp próżniowych, sięga nawet ponad 4 000 m^3/h, z próżnią do 97% (33 mbar).

Sprężarki jednowałowe – łopatkowe z łopatkami wysuwanymi. Elementem roboczym sprężarki łopatkowej z wysuwanymi łopatkami jest wał, mimośrodowo umieszczony w cylindrycznym otworze, nie stykający się z jego powierzchnią. W wycięciach wału – kanałach – umieszczone są suwliwie łopatki. Podczas wirowania, dociskane siłą odśrodkową do „zanikającego" korpusu, łopatki dzielą komorę roboczą na kilka mniejszych, zmieniających się objętości. W tych komorach, przy największej objętości zasysane jest gazowe medium. Następnie sprężane przy zmniejszającej się wraz z ruchem wirowym objętości pomiędzy korpusem, wirnikiem i sąsiednimi łopatkami. Wylot sprężonego gazu umieszczony jest w okolicy maksymalnego zbliżenia wirnika do korpusu.

W zastosowaniach przemysłowych spotykamy głównie sprężarki łopatkowe z wtryskiem oleju. Olej spełnia kilka istotnych funkcji. Powoduje intensywne schładzanie wewnętrzne sprężanego gazu, wytwarza film olejowy, po którym poruszają się łopatki, zmniejszając ich zużycie. Wirnik, to monolityczny stalowy walec ulepszony cieplnie. Ruchome łopatki wykonane są ze specjalnego stopu aluminium. Zakres parametrów to dla mniejszych modeli

do 200 m^3/h, z ciśnieniem do 12 bar, dla jednostek większych maksymalne ciśnienie wynosi 10 bar, a maksymalne wydajności do 6 000 m^3/h.
Znajdują zastosowanie do powietrza, azotu, ale także metanu czy biogazu. Regulacja wydajności odbywa się przez dławienie (modulacja - wydajności) lub otwieranie i zamykanie zaworu ssawnego (tłoczenie – bieg luzem) lub poprzez zmianę prędkości obrotowej w zakresie.

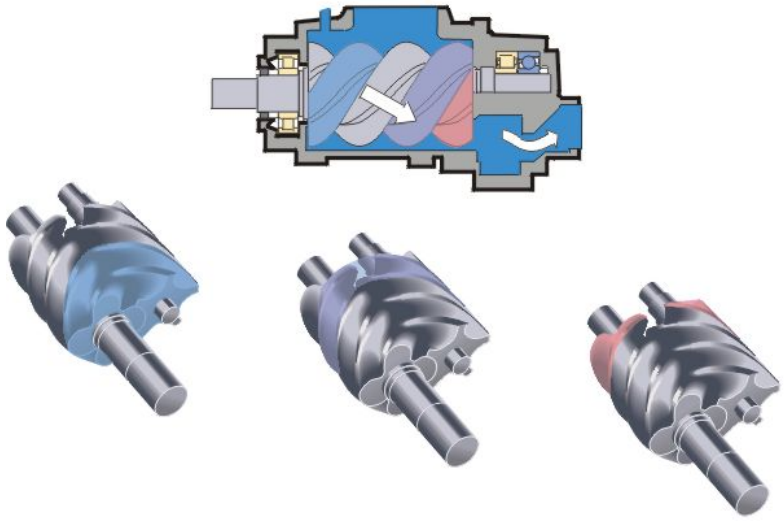


Rysunek 7 Obieg sprężarki łopatkowej Wittiga

źródło: strona internetowa firmy Intech Polska

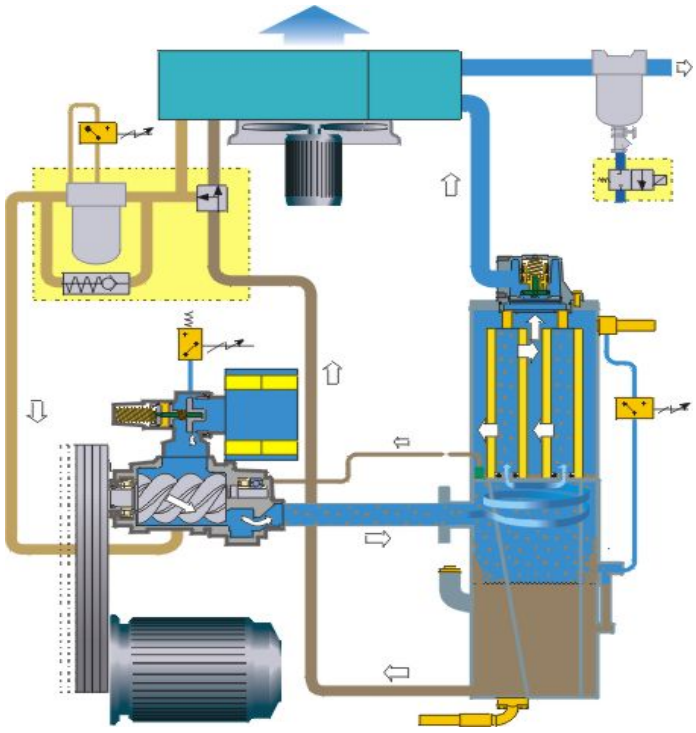
Natomiast największą liczebnie i najpopularniejszą grupą sprężarek są w tej chwili ***sprężarki śrubowe z wtryskiem oleju***. Sprężarki te pracują w zakresie ciśnień od 3 do 16 bar w jednym stopniu sprężania lub do 40 bar w 2 stopniach. Mogą pracować z różnymi gazami. Przede wszystkim z powietrzem i azotem, ale także gazem ziemnym, biogazem, czy gazem wysypiskowym. Szczególnie w zastosowaniu do sprężania mediów takich jak, zanieczyszczony biogaz, gaz wysypiskowy wyróżniają się znacznie większą niezawodnością i dłuższą trwałością niż inne rozwiązania.
Maszyny zbudowane są w oparciu o stopień sprężający z 2 wirnikami współpracującymi ze sobą bez metalicznego styku. Do króćca ssącego sprężarki zasysany jest poprzez zawór ssawny gaz, którego sprężanie polega na zmniejszaniu jego objętości poprzez przemieszczanie go od króćca ssania do komory sprężania (portu wylotowego), gdzie objętość gazu ostatecznie osiąga wielkość wynikającą z ciśnienia roboczego maszyny.
Takie sprężanie bez chłodzenia z łatwością może osiągać temperatury powyżej 200^oC, a bardzo wymagające tolerancje i konieczność minimalizowania szczelin pomiędzy wirnikami oraz pomiędzy wirnikami, a korpusem narzucają konieczność chłodzenia wewnętrznego sprężarek śrubowych. Inaczej mogłoby dojść do zatarcia się wirników o korpus lub ich wzajemnego metalicznego kontaktu, na skutek rozszerzalności termicznej. W związku z tym do komory sprężania wtryskiwany jest olej, którego porcja wędruje także na łożyska

sprężarki. Wtryskiwany olej chłodzi proces sprężania, uszczelnia i tak już małe szczeliny pomiędzy wirnikami oraz pomiędzy wirnikami a korpusem, a także smaruje i chłodzi łożyska.



Rysunek 8 Zasada sprężania w sprężarce śrubowej

źródło: Gardner Denver OY



Rysunek 9 Obieg powietrza i oleju w agregacie sprężarki śrubowej

źródło: Gardner Denver OY

Niestety olej potem pozostaje w sprężonym powietrzu, dlatego musi być on oddzielany w układzie agregatu sprężarkowego w tzw. zbiorniku separatora powietrza od oleju. Oczyszczone w tym separatorze sprężone powietrze następnie przepływa do chłodnicy, gdzie

jest schładzane do około 10^{o}C powyżej temperatury powietrza z otoczenia. Jak widać taka sprężarka nie może istnieć „samodzielnie". Musi być zabudowana w agregat, gdzie zamontowany jest oczywiście stopień sprężający napędzany silnikiem, ale także w/w zbiornik separatora, układ obiegu oleju smarująco – chłodzącego, układ chłodzenia sprężonego powietrza i urządzenia elektryczne (skrzynka rozruchowa z automatyką). Dopiero tak wyposażone agregaty sprężarkowe mogą pracować, jako chłodzone powietrzem, do wydajności około 2 500 m^3/h (do mocy 250 kW) lub wodą – z mocą do 750 kW (do około 6 000 m^3/h). Chłodzone wodą bywają także mniejsze jednostki, ale raczej powyżej mocy 30 kW.

Ze względu na sprawność zaleca się stosowanie sprężarek wyporowych (śrubowych, łopatkowych, czy tłokowych na 7 – 10 bar) powietrza do wydajności około od 2 000 do 2 500 m^3/h, tj. do miejsca, w którym ich relacja sprawność – koszt zakupu i eksploatacji jest lepsza niż sprężarek przepływowych. Powyżej tych wydajności maszyny wyporowe mogą prześcignąć sprężarki przepływowe tylko dzięki systemowi regulacji wydajności lub dzięki dyspozycyjności przy pracy układów kaskadowych. Natomiast w punkcie pracy sprawnościowo mogą być gorsze od kilku do kilkunastu punktów procentowych. Sprężarki śrubowe znajdują zastosowanie praktycznie w każdej dziedzinie przemysłu. Cechują się relatywnie niskim poziomem hałasu. Są trwałe mechanicznie (remont kapitalny polega na wymianie łożysk w stopniu śrubowym, co należy wykonać w zależności od obrotów roboczych co około 40 000 h) oraz nie mają dużych wymagań instalacyjnych.

Regulacja wydajności może następować poprzez dławienie zaworem ssącym dwupozycyjnie lub bezstopniowo. Regulacje można także prowadzić przy pomocy specjalnych zaworów montowanych w stopniu śrubowym, zmieniających geometrię stopnia w taki sposób, że zachowany jest stały spręż ,a powietrze z części wirnika wyłączonej ze sprężania zawracane jest na ssanie stopnia śrubowego.

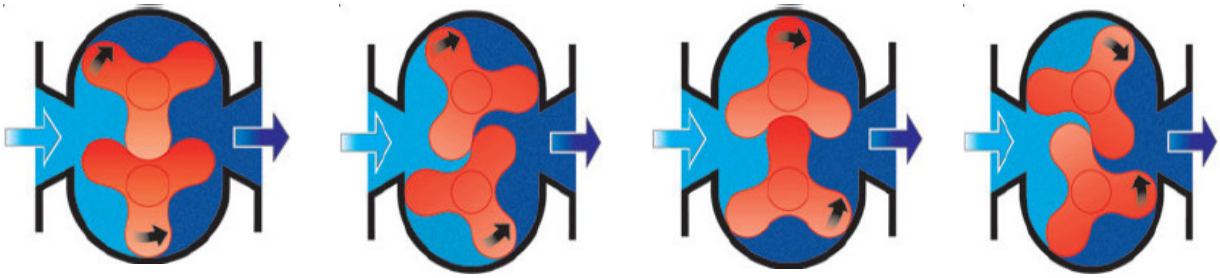
Skuteczny zakres tego typu regulacji tylko dla niewielu urządzeń możliwy jest już do 40% nominalnej wydajności. Zwykle jest to zakres 60 – 100 %. Możliwa jest także regulacja poprzez zmianę prędkości obrotowej w zakresie 20 – 100 %. Taka regulacja odbywa się dzięki stosowaniu przetwornic częstotliwości zwanych potocznie falownikami.

Sprężarki te dostępne są jako maszyny z wtryskiem oleju lub bezolejowe. Sprężarki śrubowe bezolejowe mogą mieć komorę sprężania pracującą na sucho lub z wtryskiem wody. W przypadku sprężania na sucho konieczne jest, ze względu na wysoką temperaturę pracy, sprężanie w 2 stopniach i zastosowanie pomiędzy nimi chłodnicy międzystopniowej, natomiast, aby zminimalizować przepływ powrotny, bo przecież w takiej sprężarce nie ma oleju uszczelniającego śruby miedzy sobą i korpusem, wirniki pracują w tych maszynach z bardzo wysoką prędkością obrotową, nawet rzędu 20 000 obr/min., co wpływa na obniżenie trwałości łożysk tocznych tu stosowanych.

Sprężarki śrubowe z wtryskiem wody, czy to klasyczne 2-wałowe, czy też 1-wałowe z tzw. satelitami, są sprężarkami, które dzięki chłodzeniu bezpośredniemu wodą, medium o tak

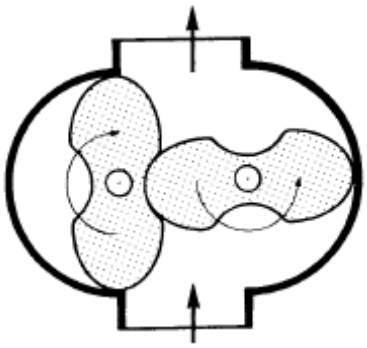
wysokich wskaźnikach przewodnictwa i przenikalności cieplnej, uzyskują bardzo wysoką sprawność izotermiczną.
Ich króciec tłoczny bez dodatkowego chłodzenia uzyskuje temperatury nie wiele wyższe od temperatury zassanego powietrza. Te sprężarki nie są jeszcze bardzo rozpowszechnione. Ich działanie i obieg jest podobny do maszyn z wtryskiem oleju. Rynek jednak nie dał im jeszcze szansy na jaką zasłużyły.

Sprężarki typu Roots'a, to w zasadzie dmuchawy, ponieważ ich maksymalne ciśnienie robocze, to 1 bar (g). Wydajność dmuchaw systemu Roots'a sięga maksymalnie do 20 000 m^3/h, ale racjonalność ich stosowania ze względu na sprawność kończy się na 6 000 m^3/h. W górnych zakresach wydajności argumentem przemawiającym za tymi dmuchawami jest raczej cena niż sprawność. W szczególności, w porównaniu do dmuchaw przepływowych, tę granicę wyznacza już wydajność 2 000 – 2 500 m^3/h. Zasada działania dmuchawy Roots'a opiera się na współpracy 2 wirników przypominających współpracę kół zębatych o 2 lub o 3 zębach. Przestrzeń pomiędzy wirnikami zasysa powietrze przez króciec wlotowy, a wirniki podczas obracania się względem siebie w przeciwnych kierunkach bez metalicznego styku dzięki przekładni synchronizującej ich pracę – zamykają tę porcję powietrza w coraz mniejszej przestrzeni powodując bezolejowe sprężanie zassanego gazu. Dmuchawy Roots'a przystosowują się zawsze do rzeczywistego przeciwciśnienia w sieci sprężonego powietrza, nawet jeśli są dobrane na wyższe ciśnienie. W takiej sytuacji, co najwyżej pobierają mniej energii elektrycznej przy tej samej wydajności, niż to było zakładane projektowo. Regulacja wydajności najefektywniejsza jest gdy stosuje się tu przetwornice częstotliwości.

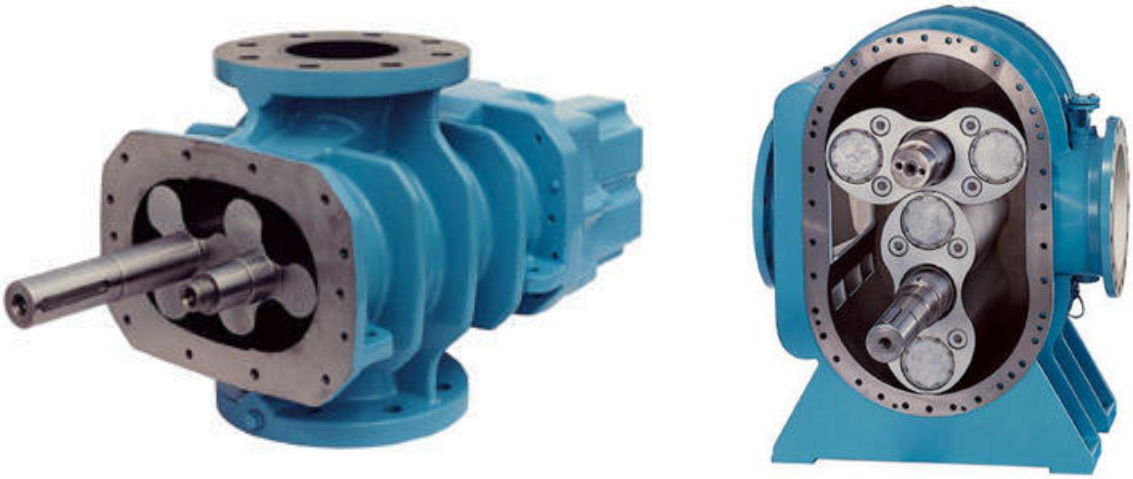


Rysunek 10 Zasada działania dmuchawy Roots'a

źródło: LUTOS



Rysunek 11 Dmuchawa Roots'a z wirnikiem „dwuzębnym"



Rysunek 12 Przykład stopni sprężających dmuchaw Roots'a z wirnikiem „trójzębnym" lub „dwuzębnym"

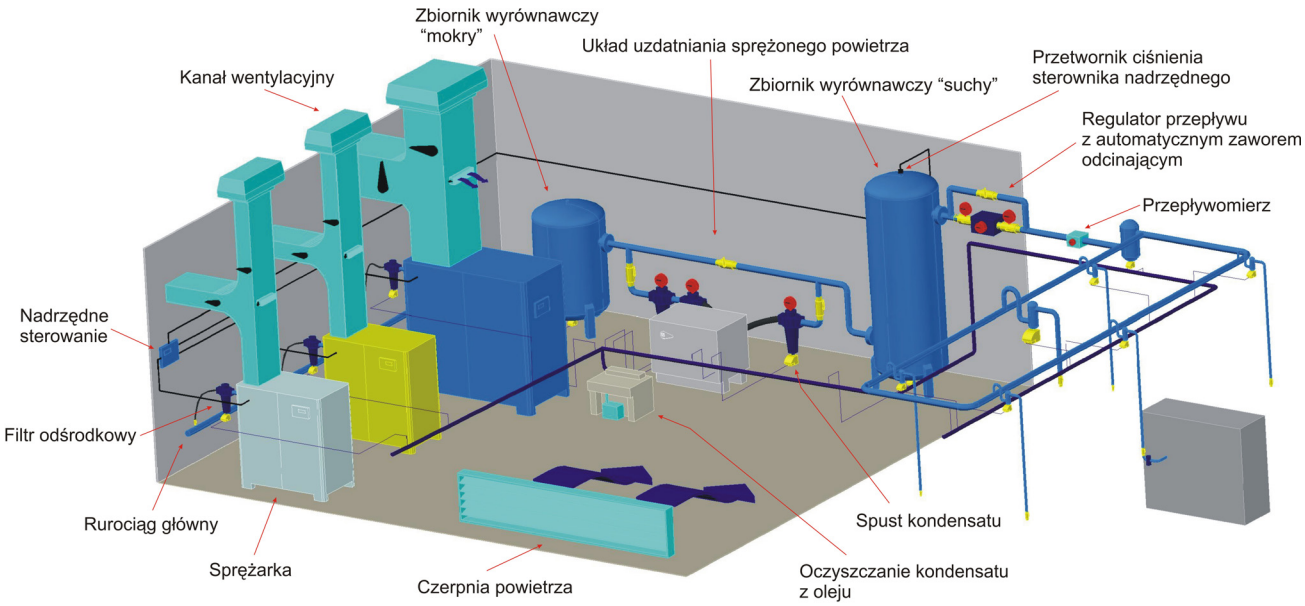
źródło: AERZENER MASCHINENFABRIK

2.2 Idealny system produkcji i dystrybucji sprężonego powietrza

Oczywiście to system, który trudno spotkać w rzeczywistych warunkach przemysłowych, ale zapewniam, że istnieją „prawie idealne" systemy i dobrze funkcjonują w praktyce. Ważnym jest uświadomienie sobie jego podziału na układ produkcji i przygotowania powietrza oraz na układ dystrybucji i odbioru. Równie ważne jest świadome połączenie tych obu układów. Układ dystrybucji musi wykonywać w ten sposób swoje zadanie skutecznego układu „krwionośnego" i stabilnie dostarczać właściwą ilość powietrza pod właściwym ciśnieniem, do oczekiwanych punktów jego poboru, a układ zasilania i uzdatniania powietrza musi na takie zapotrzebowanie zareagować w odpowiednim czasie produkując powietrze również możliwie w sposób ciągły, pobierając do tego celu możliwie najmniej energii elektrycznej. Zacznę więc od punktu zetknięcia się obu układów.

PRZEPŁYWOMIERZ. Idealnie jest, jeśli takim punktem styku obu układów jest przepływomierz sprężonego powietrza, informujący użytkownika o ilości powietrza pobieranego przez instalację odbiorczą. Dla przypadku idealnego, tzn. instalacji zamkniętej w pętlę, jeden przepływomierz będzie pokazywał całość pobieranego powietrza przez zakład . Jeśli użytkownik chce wiedzieć więcej o jakiś konkretnych urządzeniach czy technologiach, wtedy każdy rurociąg zasilający musi być osobno uzbrojony we własny przepływomierz. W przypadku instalacji, gdzie dystrybucja powietrza jest poprzez połączenia szeregowe, trzeba postępować podobnie. W przypadku połączenia otwartego, ale z rozdziałem powietrza w sprężarkowni zza kolektora, przepływomierze można montować na rurociągach zasilających poszczególne gniazda czy grupy odbiorników. Do dyspozycji użytkowników jest wiele rozwiązań pomiaru przepływu sprężonego powietrza.

W tej chwili najpopularniejsze i najkorzystniejsze cenowo są przepływomierze masowe korzystające z metody termicznej. Ich wadą jest wrażliwość na zanieczyszczenia i skropliny. Elementem pomiarowym są tam dwa czujniki temperatury, które mogą przekłamywać wynik pomiaru w sytuacji, gdy zostaną zanieczyszczone innym medium niż mierzony gaz (w szczególności jeżeli chodzi o własności cieplne zanieczyszczeń). Jeśli natomiast w punkcie pomiaru powietrze jest technicznie suche i czyste (np. w popularnej w warunkach przemysłowych klasie czystości 2.4.2 wg PN-ISO 8573-1), te popularne przepływomierze znakomicie się sprawdzają.



Rysunek 13 Przykładowy układ sprężarkowni prawidłowo skonfigurowanej

Przepływomierze dostępne są w wersjach do zabudowy wymagającej przecinania rurociągu lub wymagają nawiercania i wspawania gwintowanego króćca, którym potem precyzyjnie trzeba pozycjonować sondę albo montować je poprzez nawiercenie specjalnym przyrządem i mocowanie przy pomocy specjalnej klamry wprost na rurociągu. Dostępne są także przepływomierze innego typu np. wykorzystujące występujące w przepływie wiry Karmana, czy turbinowe, albo układy ze zwężkami lub kryzami, które obok rurek spiętrzających ciągle uznawane są jako jedyne metody normatywne.
W związku z wrażliwością wszystkich dostępnych metod na zaburzenia mierzonego strumienia powietrza dla każdego przepływomierza zalecane są odpowiednie długości tzw. odcinka pomiarowego (długości prostego rurociągu bez żadnych złączek, kolan, czy armatury przed przepływomierzem, a także za nim). Cofając się do sprężarkowi, ostatnim jej elementem przed układem odbioru powietrza powinien być centralny regulator przepływu.

CENTRALNY REGULATOR PRZEPŁYWU. Jest to urządzenie, które mierząc ciśnienie po stronie poboru powietrza, wykorzystując dostępną pojemność zbiorników i rurociągów w celu poprawy pozytywnej bezwładności układu (z angielska nazywanej „capacitance" – coś co chciałoby się niezdarnie przetłumaczyć na polski jako „pojemnościowość"), zmniejsza fluktuacje ciśnienia od strony sprężarkowni. Przez to sprężarki mogą pracować na węższy i stabilniejszy także co do jego zmienności w czasie zakres ciśnienia i w konsekwencji oszczędzać energię zużywaną do produkcji powietrza.
W zasadzie jego funkcja polega na utrzymywaniu technicznie możliwego do uzyskania stałego poziomu lub zakresu ciśnienia poprzez ograniczanie przepływu nie generujące większych strat, pulsacji czy też szoków. Dlatego w tym celu używa się układów składających się albo z kilku zaworów ze stopniowanym otarciem albo wykorzystuje się w nich układy zaworów z łopatkami kierowniczymi zamykającymi się podobnie jak przesłona w aparacie fotograficznym. Takie typy zaworów znane są bardziej jako zawory ssawne sprężarek przepływowych, gdzie gładkość otwarcia i zamykania ma zasadniczy wpływ na aerodynamikę i straty procesu. Te regulatory zwane są czasem regulatorami stałego ciśnienia („constant pressure controller") lub ekspanderami poboru powietrza („demand expanders"). Dobry sterownik nadrzędny mogący sterować sprężarkami o różnej wydajności, współpracujący z odpowiednio dużym zbiornikiem wyrównawczym stanowiącym element całkujący dla systemu, posiadający algorytm sterowania umożliwiający w kolejnych krokach zawężanie histerezy ciśnienia, może bez ingerencji w instalacje uzyskać bardzo podobny efekt do nadążnych układów regulatora przepływu.

AUTOMATYCZNY ZAWÓR ODCINAJĄCY. Kolejny element przed zasadniczym układem produkcji i przygotowania powietrza, to zawór, który dobrze jeśli ma własny napęd i układ sterowania zamykaniem i otwieraniem. Funkcja tego zaworu, to odcinanie układu produkcji powietrza od układu odbioru w czasie, gdy zakład produkcyjny nie pracuje. Dotyczy to

oczywiście zakładów, które pracują na przykład tylko na 1 lub 2 zmiany, czy też nie pracują w czasie weekendu. Wtedy nieuniknione starty czy wycieki po stronie dystrybucji powietrza, czy na urządzeniach zasilanych sprężonym powietrzem, nie będą „zmuszać" sprężarkowni do zużywania energii na potrzeby tych strat. Dodatkową zaletą takich zaworów jest fakt gotowości systemu produkcji z pełnymi zbiornikami pod ciśnieniem wymaganym przez produkcję po weekendzie lub przy rozpoczęciu pracy następnego dnia. Nie ma konieczności kosztownej pracy napełniania pustej sieci zakładowej, bo powietrze zgromadzone jest w zbiornikach wyrównawczych. To naprawdę duży komfort. Nie można tego zrobić na przykład z energią elektryczną, która nie da się w ten sposób „przechować" – także warto takie urządzenia wykorzystywać. Często dostępne są także opisane powyżej regulatory przepływu z funkcją automatycznego zaworu odcinającego sterowanego czasowo.
Powyższe elementy są niestety rzadko stosowane a dają użytkownikowi wymierne korzyści w postaci zmniejszenia zużycia energii i informacji na temat ilości pobieranego powietrza. Przepływ powietrza, to jeden z parametrów bezpośrednio mierzący skuteczność procesu sprężania powietrza i jego dystrybucji, także trudno mi pogodzić się z sytuacją, że zakłady produkcyjne, które mają wdrożony system jakości ISO 9001 lub środowiskowy ISO 14001 nie badają parametrów tego procesu. Przecież produkcja sprężonego powietrza pobiera średnio 10 – 20% a często i więcej z łącznego poboru energii przez zakład przemysłowy.

Skoro omówione zostały elementy styku obu układów, poboru powietrza oraz jego produkcji, poniżej omówię optymalne wyposażenie obu tych systemów.

Zacznę od produkcji sprężonego powietrza. Odruchowo chciałoby omawiać sprężarkownię jako obiekt, w którym produkuje się sprężone powietrze, ale współcześnie dostarczane sprężarki, ze względu na ich niski poziom hałasu, łatwość odzysku ciepłego powietrza do podgrzewania pomieszczeń zimą, czy też pełne ich wyposażenie w układy uzdatniania, umożliwią stawianie ich wprost na halach produkcyjnych, nawet w niedużej odległości od stanowisk pracy. Jest to kusząca propozycja w świecie, gdzie koszt m^2 powierzchni zabudowy jest coraz wyższy oraz wszędzie tam, gdzie miejsce da się wykorzystać. Z mojego doświadczenia wynika, że jest to sytuacja typowa dla wielu małych firm w naszym kraju. I byłoby to rozwiązanie optymalne, gdyby nie fakt, że sprężarkom trzeba zapewnić świeże powietrze do chłodzenia i zasysania w celu sprężania, że są to urządzenia, które wymagają obsługi, czy remontów, które chłodzone są olejem lub wodą, wyposażone są w wyrafinowaną elektronikę, w końcu wrażliwe na zapylenie występujące w wielu procesach produkcyjnych. Nawet w tak czystym teoretycznie zakładzie jak drukarnia książek czy gazet, występuje zjawisko powstawania praktycznie niewidocznego pyłu papierowego, tak uciążliwego dla sprężarek i osuszaczy chłodzonych powietrzem. Dodatkowo przepisy stanowią, że obsługę sprężarek może wykonywać osoba odpowiednio przeszkolona, z uprawnieniami energetycznymi, a w takich sytuacjach sprężarkownia wystawiona jest do dyspozycji wielu

choćby przechodzących obok ludzi. Co więcej, jeśli temat ustawienia sprężarki omówi się ze specjalistami ze straży pożarnej, to zapewniam, że będą serdecznie odradzać użytkownikom instalowania sprężarek przy innych maszynach produkcyjnych. Najzwyczajniej w świecie może dojść do zapalenia lub innego wypadku z urządzeniem znajdującym się przecież pod ciśnieniem. Wtedy oprócz ludzi narażone są także inne urządzenia bezpośrednio uczestniczące w produkcji. Dlatego omawiając produkcję sprężonego powietrza zalecam umieścić ją w całości w oddzielnym pomieszczeniu dedykowanym tylko tym celom, tzn. w sprężarkowni.

SPRĘŻARKA. Logicznie, pierwszym elementem sprężarkowni będzie sprężarka. Najczęściej dziś stosowane są sprężarki śrubowe z wtryskiem oleju, tłokowe smarowane olejem, łopatkowe z wtryskiem oleju, a następnie bezolejowe śrubowe, tłokowe i przepływowe promieniowe lub osiowe. Niezależnie od tego jakiego typu jest to urządzenie, a ta kwestia omawiana jest powyżej w tym paragrafie, to należy zadbać, aby była możliwie najbardziej niezawodna, energooszczędna, trwała, zapewniała minimalny negatywny wpływ na środowisko i aby łatwo dostępna dla niej była obsługa serwisowa i dostawy części zamiennych. Powinna mieć elastyczny system regulacji wydajności umożliwiający produkcję powietrza wg wymagań odbioru przy pomocy możliwie najmniejszej ilości zużywanej do tego celu energii elektrycznej. Ponadto musi mieć odpowiednie sterowanie umożliwiające także wykonywanie funkcji sterowania zdalnego i nadrzędnego (metody doboru sprężarki i sposoby regulacji wydajności omówione są w innych paragrafach). Taka sprężarka musi mieć również chłodnicę końcową powietrza, żeby temperatura nie przekraczała tu maksymalnie 35 – 45^{o}C.

Sprężarkę warto połączyć z rurociągiem głównego kolektora poprzez przewód elastyczny lub kompensator złączny, żeby naprężenia przy montażu lub z rurociągu nie obciążały aluminiowej chłodnicy sprężarki, z którą najczęściej instalacja jest łączona. Sprężarka powinna mieć własny zawór bezpieczeństwa zabudowany wewnątrz urządzenia oraz własny zawór odcinający. Musi mieć także montowany za chłodnicą końcową odśrodkowy filtr usuwający skropliny. Jest to poważne zjawisko dlatego, że za sprężarką mamy powietrze wraz z zassaną z nim parą wodną, która jest w 100 % nasycona i sprężona razem z powietrzem. Ich temperatura przed chłodnicą waha się od 65 do 100^{o}C. Jeśli sobie wyobrazimy, że taką mieszaninę schładzamy następnie o Δt = 40 do 60^{o}C, to musimy mieć świadomość, że wykropli się tam mnóstwo wody. Stąd konieczność stosowania filtra odśrodkowego zwanego czasem filtrem cyklonowym, cyklonem czy tez separatorem wody lub skroplin. Są także opinie zalecające stosowanie dwóch zaworów odcinających, a pomiędzy nimi trójdrogowego zaworu odpowietrzającego montowanego za filtrem odśrodkowym, umożliwiającego całkowite „uwolnienie" sprężarki od własnego ciśnienia i odizolowanie jej od ciśnienia instalacji. Pomaga to także usuwać kondensat w przypadku nieskuteczności działania zaworu spustowego kondensatu filtra odśrodkowego sprężarki. Taki

zawór odpowietrzający umożliwi także sprawdzenie pracy sprężarki, czy też jakości powietrza, które produkuje w stanie odciętym od instalacji zakładowej.

FILTR ODŚRODKOWY. Jak wyżej wykazano jest to niezbędny element każdej sprężarki z chłodnicą końcową. Ważne, żeby filtr ten wyposażyć w skuteczny zawór spustowy skroplin umożliwiający ich usuwanie. Dostępne są dziś takie zawory spustowe typu pojemnościowego bez strat ciśnienia, albo klasyczne zawory elektromagnetyczne z regulacją czasową. Natomiast najpopularniejsze spusty, to zawory typu pływakowego, gdzie podobnie do spłuczki, pływak podnosi iglicę zaworu gdy się wypełni odpowiednią ilością wody. Spusty te są tym skuteczniejsze im średnica odprowadzenia kondensatu jest większa. Odradzam stosowanie spustów ręcznych, ponieważ najczęściej nikt ich nie otwiera w obawie przed ochlapaniem i opryskaniem się wylatującą stamtąd wodą.

SPUSTY KONDENSATU. Powinny być stosowane przede wszystkim w powyżej opisanym przypadku, ale także pod zbiornikami wyrównawczymi, pod filtrami sprężonego powietrza, w osuszaczach chłodniczych i chłodnicach oraz przy sieciowych zbiorniczkach do separacji kondensatu.

ZBIORNIK WYRÓWNAWCZY „MOKRY”. To zbiornik zamontowany najbliżej sprężarek. Ma kilka ważnych funkcji. Oczywiście chodzi o unikanie częstych i krótkich cykli pracy tłoczenie / odciążenie, bo nie jest to zdrowe dla łożysk stopnia sprężającego oraz dla układów mechanicznych sprężarki, co więcej stanowi on kolejną przeszkodę dla skroplin wilgoci, które zawiera sprężone powietrze i przy zastosowaniu odpowiedniego zaworu spustowego dodatkowo zabezpiecza układ uzdatniania sprężonego powietrza oraz stabilizuje jego pracę. Sprężarki przepływowe mogą praktycznie pracować bez takich zbiorników, sprężarki śrubowe, tłokowe lub łopatkowe z wydajnością regulowaną przez przetwornicę częstotliwości mogą korzystać z bardzo małych zbiorników wyrównawczych, natomiast wszystkie sprężarki wyporowe bez „falownika” muszą mieć dobrze zwymiarowaną wielkość zbiornika wyrównawczego. Wielkość takich zbiorników uzależniona jest od wielkości i zmienności poboru sprężonego powietrza oraz od wydajności sprężarek. W praktyce dość dobrze dobór zbiornika opisuje następujący wzór:

$$V_{zb} = \frac{2 \cdot Q_z}{p_r \cdot \Delta p}$$

Gdzie:

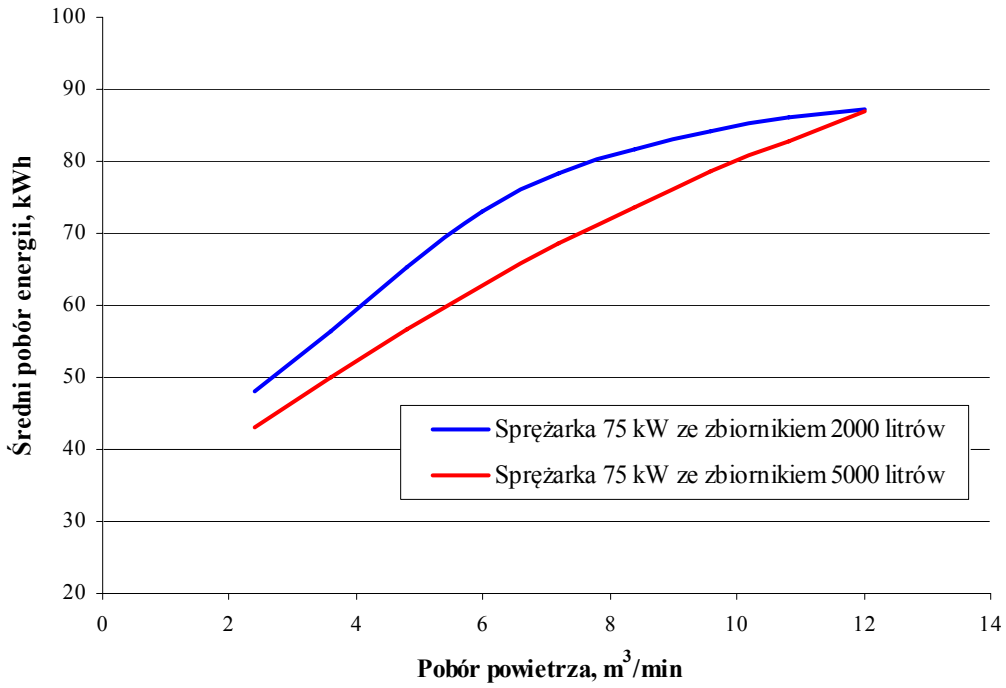
V_{zb} - pojemność zbiornika, (m^3)

Q_z - ilość powietrza zużywana przez odbiorniki, (m^3/min)

p_r - ciśnienie robocze, (bar)

Δp - zakres ciśnień roboczych (górne – dolne), (bar)

Natomiast najprostsza bezpieczna zasada mnemotechniczna doboru, to instalowanie zbiornika wyrównawczego o pojemności 1 m^3 na każde 100 m^3/h wydajności sprężarki. Zbiornik powinien być także wyposażony w zawór bezpieczeństwa o przepustowości większej niż łączna wydajność zainstalowanych sprężarek, powinien mieć manometr i jeśli to możliwe wyprowadzony sygnał ciśnienia, który może być wizualizowany w jakimś centralnym układzie synoptycznym. Taki zbiornik musi mieć znak CE i być dopuszczony do ruchu przez Urząd Dozoru Technicznego, wraz z zaworem bezpieczeństwa. Musi mieć stosowne paszporty zbiornika i zaworu bezpieczeństwa. Dobrze jest wyposażyć zbiornik w układ obejściowych zaworów umożliwiających jego obsługę bez przerywania dostaw sprężonego powietrza.



Rysunek 14 Pobór energii przez tę samą sprężarkę pracującą w instalacji ze zbiornikiem wyrównawczym o pojemności 2 i 5 m^3.

Jak widać, im większa pojemność zbiornika tym mniejszy pobór energii przy obciążeniach częściowych sprężarki.

UKŁAD UZDATNIANIA SPRĘŻONEGO POWIETRZA. To kombinacja filtrów i osuszaczy sprężonego powietrza właściwa dla wymagań zalecanej przez technologie produkcji jakości powietrza. Stosowane filtry sprężonego powietrza są najczęściej typu koalescencyjnego lub z wkładem z węgla aktywowanego. Ważne, aby filtry były wyposażone w skuteczne i trwałe wkłady filtracyjne, łatwe do wymiany, dostępne w sprzedaży oraz zawory spustu kondensatu i manometry czy czujniki różnicy ciśnień – tzn. spadku ciśnienia na wkładzie filtracyjnym.

Sygnał informujący o tym spadku powinien być monitorowany w sposób ciągły. Wkłady filtracyjne wykazują spadek ciśnienia rosnący powoli do wartości około 0,3 – 0,4 bar, natomiast powyżej tej wartości strata ta zaczyna rosnąc wręcz w logarytmicznym tempie i wkład należy szybko wymienić. Pozwolę sobie powtórzyć, że 1 bar straty cienienia odpowiada około 7% startcie energii, którą zużyliśmy na produkcję powietrza.

Klasy jakości sprężonego powietrza wg normy PN-ISO 8573-1. Przykładowo wspomniana już klasa jakości 2.4.2 oznacza, że powietrze powinno mieć klasę jakości 2 co do zawartości oleju, tzn. 0,1 mg/m^3 powietrza, suchość w klasie 4, określonej przez ciśnieniowy punkt rosy na poziomie +3^{o}C oraz klasę 2 co do zawartości cząstek stałych, tzn. o wielkości do 1 mikrona z zawartością do 1 mg/m^3 powietrza. Klasy sprężonego powietrza zgodnie z normą PN-ISO 8573.1 zestawiono poniżej.

Tabela 2 Klasa jakości sprężonego powietrza w zależności od zawartości oleju

Klasa jakości	***Maks. zawartość oleju, mg/m^3***
1	0,01
2	0,1
3	1
4	5
5	25

Tabela 3 Klasa jakości sprężonego powietrza w zależności od punktu rosy

Klasa jakości	***Maks. ciśnieniowy punkt rosy, ^{o}C***
1	-70
2	-40
3	-20
4	+3
5	+7
6	+10

Tabela 4 Klasa jakości sprężonego powietrza w zależności od zawartości i rozmiarów cząstek stałych

Klasa jakości	***Maks. wielkość cząstek w mikronach***	***Maks. Zawartość, mg/m^3***
1	0,1	0,1
2	1	1
3	5	5
4	15	8
5	40	10

Warto przy okazji wspomnieć, że niedawno wprowadzono tzw. klasę „0” dla zawartości oleju. Jest to innowacja dość zagmatwana, bo wprowadza klasę „0”, jako „…klasę lepszą niż 1 lub inaczej zdefiniowaną przez dostawcę i użytkownika…”. Efekt tego taki, że właściwie

pozostawia możliwość szerokiej interpretacji, ale za to dobrze wygląda w materiałach marketingowych dostawców sprężarek bezolejowych, którzy mogą w ten sposób bardziej lub mniej umyślnie wprowadzać w błąd użytkowników przedstawiając swoje sprężarki nie jako maszyny zapewniające dostawy powietrza zawierającego „0" oleju, ale powietrza w klasie czystości „0", a to jest zasadnicza różnica.

Kombinacja filtrów zależy od wymaganej jakości powietrza wg normy PN-ISO 8573-1, od typu zastosowanej sprężarki oraz od rodzaju stosowanego osuszacza.

W sytuacji, gdy stosowany jest osuszacz chłodniczy (klasa 4, punkt rosy $+3^{o}C$), to dla sprężarki śrubowej, bezolejowej czy olejowej lub łopatkowej olejowej wystarczy, gdy poprzedzony jest filtrem zapewniającym 3. lub 2. klasę zawartości oleju i cząstek stałych, gdy jednak instalacja zasilana jest sprężarką tłokową smarowaną olejem, wtedy przede wszystkim należy zadbać, aby miała ona chłodnicę obniżającą temperaturę sprężonego powietrza do 35 – $40^{o}C$ oraz zabezpieczyć układ zgrubnym filtrem o dokładności na poziomie klasy 4, a dopiero potem stosować filtr w klasie 3 lub 2. Za osuszaczem chłodniczym warto zastosować filtr dokładny np. w klasie 1, wtedy dość łatwo ze schłodzonego sprężonego powietrza usunąć drobiny oleju i cząstek stałych.
Jeżeli użyto osuszacza adsorpcyjnego lub membranowego, to koniecznie powietrze musi mieć temperaturę najlepiej do około $35^{o}C$ i oczyszczone powinno być do klasy 1, dlatego, że medium osuszającym w tym typie osuszacza nie jest układ wymienników ciepła jak w osuszaczu chłodniczym, ale granulat specjalnie preparowanej substancji aktywnej powierzchniowo, takiej jak tlenek glinu lub tlenek krzemu. Jeśli doszłoby do zapchania porów tej substancji, to jej oczyszczenie jest niemożliwe, a każdy zapchany por na powierzchni uniemożliwia pochłanianie i usuwanie z niej wody. A tak przecież odbywa się proces osuszania.
Nie należy zapominać, że adsorbent wypełniający osuszacz adsorpcyjny na skutek tarcia jego granulek o siebie w czasie przepływu powietrza generuje specyficzny, drobny pył. Aby nie dostawał się on do instalacji za osuszaczem montowany jest filtr, najczęściej bez automatycznego spustu kondensatu. Jest to filtr tzw. przeciwpyłowy. Aby dodatkowo poprawić jakość powietrza za tym osuszaczem montuje się filtry węglowe lub tam, gdzie nie ma za wysokiej temperatury pracy kolumny z węglem aktywnym. Często tam gdzie to konieczne stosuje się filtry sterylne, sterylizowane automatycznie parą wodną lub przez obsługę, co kilka godzin, w autoklawie lub sterylizatorze.
Wybór sposobu osuszania i filtracji należy skonsultować ze swoim działem technologicznym, który powinien zalecić metodę, czy też odpowiednią klasę jakości sprężonego powietrza wg powyższej normy, stosowną do wymagań, czy potrzeb znanej im technologii zużywającej powietrze.

Wybór dostawcy należy oprzeć o podobne argumenty jak powyżej dla filtrów. Warto także zwracać uwagę na pobór energii układu. Szczególnie dla osuszaczy adsorpcyjnych o wydajności powyżej 1 000 m^3/h. Klasyczna ich regeneracja „na zimno" wymaga poboru strumienia powietrza osuszonego w ilości aż 15 – 20 %. Ta metoda staje się bardzo droga energetycznie wraz ze wzrostem strumienia powietrza wymagającego osuszania. Wtedy (tzn. powyżej 1000 m^3/h) można, a w zasadzie zaleca się, zastosowanie osuszacza regenerowanego „na gorąco", gdzie do usuwania wilgoci zgromadzonej na powierzchni adsorbentu używa się gorącego powietrza z zewnętrznej dmuchawy lub grzałek i dmuchawy lub pompy próżniowej. Jeśli dodatkowo tak energochłonne urządzenia jak osuszacz adsorpcyjny wyposaży się w układ kontrolujący punkt rosy, który może powstrzymywać procesy regeneracji adsorbentu, jeśli to nie jest konieczne, bo jest mała wilgotność względna, albo mniejsze zapotrzebowanie na sprężone powietrze, to można zapewnić sobie duże oszczędności energetyczne. Ciekawa jest także nowa tendencja stosowania układów skojarzonych, czy hybrydowych, gdzie pracują ze sobą sprzężone osuszacz chłodniczy i adsorpcyjny. Natomiast w każdej takiej sytuacji, jeśli przed osuszaczem adsorpcyjnym zamontowany jest chłodniczy należy pamiętać, aby w osuszaczu adsorpcyjnym zastosować specjalny typ adsorbentu, bo osuszanie już osuszonego wstępnie powietrza nie powoduje tak masowego pochłaniania wilgoci w osuszaczu adsorpcyjnym (klasyczny adsorbent jakby „aktywizuje się" w większej obecności wilgoci).

Chciałbym również zasygnalizować potencjalne źródła start oraz na jakie elementy należy zwrócić uwagę przy doborze i eksploatacji urządzeń do uzdatniania sprężonego powietrza.
W przypadku szczególnym źródłem strat może być zanieczyszczony wkład lub źle dobrany filtr. Zakładając jednak poprawny jego dobór warto dopilnować, aby deklarowany przez dostawcę inicjalny spadek ciśnienia był niski, nie tylko dla tzw. wkładu nowego, suchego, ale także dla wkładu pracującego, na początku jego eksploatacji tzn. inicjalnego spadku ciśnienia dla czystego wkładu mokrego. Jeśli te parametry są optymalne i wkład wymieniany jest przynajmniej raz w roku lub wtedy gdy spadek ciśnienia na nim znacznie przekroczy 0,35 – 0,4 bar, to jedynym dodatkowym powodem strat, mógłby się stać źle funkcjonujący zawór spustowy, który np. zaciął się w pozycji otwartej. Typowe spadki ciśnienia dla nowych filtrów wahają się od około 0,1 do około 0,5 bar w specjalnych przypadkach.
Jeżeli chodzi o osuszacz chłodniczy, to warto wybrać taki, który ten spadek będzie miał możliwie mały. Zwykle te wartości znajdują się w zakresie około 0,15 – 0,4 bar. Osuszacze chłodnicze nie pobierają bardzo dużej ilości energii, ale już do dyspozycji użytkowników są osuszacze z tzw. masą termiczną, tzn. zasobnikiem chłodu umożliwiającym wyłączanie sprężarki chłodniczej i korzystanie ze specjalnie stworzonego w ten sposób buforu. Dostępne są także osuszacze ze sprężarką chłodniczą napędzaną silnikiem, którego obrotami steruje przetwornica częstotliwości. Osuszacz chłodniczy może generować straty przy niesprawnym

zaworze spustowym kondensatu (jak powyżej), ale także w sytuacji zablokowania części przekroju przepływu przez osuszacz zmrożoną w osuszaczu wodą.
Osuszacze adsorpcyjne generują najczęściej niewielkie spadki ciśnienia, bo rzędu 0,1 do 0,2 bar. Ważne jest, aby były jeśli to tylko możliwe, wyposażone w systemy kontroli punktu rosy umożliwiające powstrzymywanie tak drogiej energetycznie w tym przypadku regeneracji złoża.
Wracając na chwilę do instalacji układów uzdatniania warto zwrócić uwagę, aby użytkownicy stosowali układy obejściowe na każdym z elementów układu uzdatniania sprężonego powietrza. Wtedy gwarantujemy sobie możliwość obsługi osuszacza lub któregokolwiek z filtrów bez konieczności przerywania dostaw powietrza dla zakładu, który może go potrzebować w sposób ciągły.

ZBIORNIK WYRÓWNAWCZY „SUCHY”. To zbiornik zamontowany za układem uzdatniania (za osuszaczem). Jego funkcja, to gromadzenie powietrza o jakości wymaganej przez instalację w większej ilości, ale także stabilizacja zakresu ciśnienia instalacji i pracy sprężarek, jeżeli chodzi o regulację i pobór energii. Dodatkowo jest idealnym punktem do pomiaru ciśnienia sterującego dla nadrzędnego układu sterowania systemem wielosprężarkowym.
Zalety zbiornika „suchego” doceniane są szczególnie w systemach, które podczas swojej pracy w pewnych momentach nagle potrzebują dużej ilości uzdatnionego powietrza np. dla potrzeb transportu jakiegoś materiału sypkiego o własnościach higroskopijnych, albo chociażby do strząsania filtrów workowych. Dodatkową korzyścią z takiego zbiornika, może być monitorowany pomiar ciśnienia, który daje informacje na temat kondycji całego kompleksu urządzeń znajdujących się pomiędzy sprężarkami, a „suchym” zbiornikiem. Pod warunkiem oczywiście, że się to ciśnienie monitoruje. Podobnie jak zbiornik „mokry” - powinien być także wyposażony w zawór bezpieczeństwa o przepustowości większej niż łączna wydajność zainstalowanych sprężarek, powinien mieć manometr i jeśli to możliwe wyprowadzony sygnał ciśnienia, który może być wizualizowany w jakimś centralnym układzie synoptycznym. Taki zbiornik musi mieć znak CE i być dopuszczony do ruchu przez Urząd Dozoru Technicznego – wraz z zaworem bezpieczeństwa, musi mieć stosowne paszporty zbiornika i zaworu bezpieczeństwa. Dobrze jest wyposażyć zbiornik w układ obejściowych zaworów umożliwiających jego obsługę bez przerywania dostaw sprężonego powietrza. Dobrym zwyczajem jest, pomimo zakładanej „suchości” jego pracy, wyposażenie także tego zbiornika w automatyczny spust kondensatu. Bo przecież żaden osuszacz nie usuwa ze sprężonego powietrza 100% wilgoci.
Jeżeli chodzi o instalowanie zbiorników ogólnie – często pojawia się pytanie o to, czy lepiej, aby zbiornik stał na dworze, czy też wewnątrz budynku. Otóż nie ma przepisów, które by to regulowały, natomiast praktyka dnia codziennego, szczególnie w zakładach, gdzie praca jest przerywana na 1 zmianę lub weekend – odczują w okresie zimowym problemy z eksploatacją

zbiornika zainstalowanego na zewnątrz, ponieważ podczas postoju zdążyć się może w zbiorniku „mokrym" wytrącić i zamarznąć woda. Wtedy trudno jest w ogóle usuwać kondensat, a jeśli jest go w zbiorniku za dużo, to może także zblokować jeden z króćców wylotowych. Wtedy trzeba stosować izolację, grzałki zbiornika i spusty z grzałkami. Dlatego jeśli to tylko technicznie możliwe lepiej zbiorniki montować w pomieszczeniach, gdzie temperatura nie spada poniżej zera.

UKŁAD CHŁODZENIA. Należy pamiętać, że procesowi sprężania towarzyszy wydzielanie dużej ilości ciepła, które trzeba odprowadzić. Jeśli sprężarka, jej chłodnice czy osuszacze są chłodzone wodą, wtedy korzysta się z obiegów, najlepiej zamkniętych, z chłodnicą typu radiatorowego lub wieży chłodniczej. Tam gdzie to jest ekonomicznie uzasadnione można korzystać z istniejących zakładowych obiegów np. chłodzących wodę. Ważne, aby mieć świadomość jakie są zalecenia dostawcy urządzeń co do jakości wody chłodzącej. Takie układy często są zasilane mieszaniną wody z glikolem, szczególnie w okresie zimowym. Natomiast nie można zaniedbać czyszczenia i konserwacji chłodnic wodnych i wymienników układu, nawet, jeśli jest on typu zamkniętego. Sprawność takich układów nie poddawanych konserwacji spada często w niekontrolowany sposób. Dużą zaletą takich układów jest łatwość odzyskania tego ciepła odpadowego do celów dogrzewania wody w obiegu centralnego ogrzewania lub podgrzewania ciepłej wody użytkowej.
Dla sprężarek, osuszaczy czy chłodnic chłodzonych powietrzem należy zapewnić swobodny wpływ przez czerpnie do sprężarkowni właściwej ilości powietrza, większej od wydajności wszystkich wentylatorów chłodzących, sprężarek i osuszaczy oraz uzupełnić tę wielkość o 10-krotną wymianę kubatury sprężarkowni na godzinę. Powietrze powinno wpływać przez czerpnie do pomieszczenia z prędkością około 2,5 m/s. Urządzenia powinny swobodnie czerpać powietrze wewnątrz sprężarkowni. Ciepłe powietrze odpadowe zza chłodnic należy usunąć z pomieszczenia sprężarkowni i wykorzystać je w okresie zimowym do podgrzewania pomieszczeń znajdujących się blisko sprężarkowni. Natomiast latem tego ciepła należy za wszelką cenę z pomieszczenia sprężarkowni się pozbyć.
Na rynku dostępne są także na zamówienie sprężarki chłodzone powietrzem z tzw. modułami odzysku ciepła, mówiąc krótko są to chłodnice wodne połączone zaworami sterowanymi od temperatury z układami chłodzenia powietrznego. Działają w taki sposób, że sprężarka chłodzona jest wodą, która w tym procesie wykorzystywana jest w pierwotnym lub wtórnym obiegu c.o. lub c.w.u., gdy nie ma odbioru ciepła lub gdy jest on niewystarczający, to sprężarka automatycznie wraca do układu chłodzenia powietrzem.

ROROCIĄGI W SPRĘŻARKOWNI. Warto zwrócić uwagę na to czy sprężarki zasilają rurociąg kolektora głównego o właściwej średnicy. Czy przewidziano tam możliwość podłączania narzędzi pneumatycznych do obsługi sprężarkowni, czy przewidziano tam przyłącze dla sprężarki rezerwowej. Należy zwrócić uwagę czy przyłącza sprężarek do

kolektora prowadzone są łagodnym łukiem z możliwie najmniejszymi startami (pamiętając o tym, że starty ciśnienia rosną z kwadratem prędkości przepływu strumienia w rurociągu). Warto zadbać, żeby rurociągi nie przebiegały przez kanały wylotowe i żeby nie dochodziło do podgrzewania sprężonego powietrza, które dopiero co schłodzono w chłodnicy końcowej. Jeśli rurociągi są zbyt gorące należy je koniecznie zaizolować.
Więcej o rurociągach piszę poniżej poruszając temat odbioru sprężonego powietrza. Na końcu poradnika zamieszczam także tabele z typowymi rurociągami i dostępnymi w źródłach lub obliczonymi spadkami ciśnienia. Jeżeli rurociąg w sprężarkowni jest kolektorem rozprowadzającym, wtedy warto wszystkie odejścia dedykowane technologiom, wydziałom lub poszczególnym odbiorcom dobrze jest opomiarować, jeżeli chodzi o przepływ powietrza no i oczywiście ciśnienie.

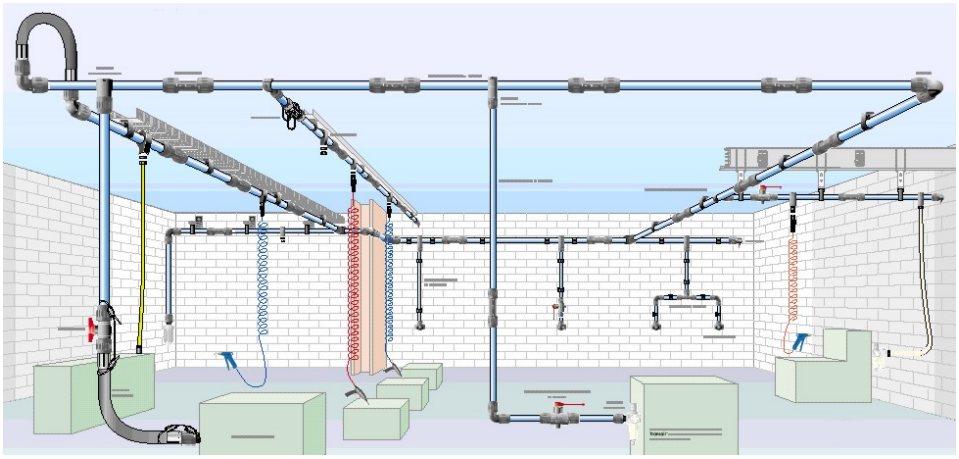
STEROWNIE NADRZĘDNE. W przypadku gdy, więcej niż jedna, czy dwie sprężarki zasilają zakład produkcyjny, wtedy jeśli nie ma adekwatnego dla potrzeb sieci odczytu ciśnienia, który byłby bazą do sterownia całością urządzeń trzeba ustawić na sprężarkach kaskadę ciśnień, co per saldo powoduje duże rozszerzenie histerezy regulacji i w konsekwencji zwiększa pobór energii.
Jeżeli natomiast wykorzysta się zbiornik wyrównawczy jako element całkujący zmiany w sieci sprężonego powietrza i zamontuje w nim przetwornik ciśnienia odczytujący właściwą jego wartość, to można w oparciu o to załączać sprężarki w sposób umożliwiający uzyskanie wąskiego zakresu ciśnienia wokół jednej poznanej w ten sposób wartości. Jeśli dodatkowo uda się „ubezwłasnowolnić" lokalne nastawy ciśnienia sprężarek i narzucić im pracę na jedną wąską histerezę, wtedy efekt oszczędności energetycznych będzie większy. Co więcej, jeśli do sprężarki wprowadzi się układ sterowania ciśnieniem poprzez zewnętrzny interfejs, to jednocześnie można prowadzić zbieranie danych na temat pracy sprężarki i jej parametrów. Wtedy nadrzędny sterownik staje się nie tylko sterownikiem, ale zbiera informacje o poszczególnych urządzeniach i można go użyć jako elementu pomocniczego do wizualizacji pracy całej sprężarkowni. W zależności od dostawcy dostępne są różne typy sterowników nadrzędnych, oferują kilka algorytmów pracy do wyboru, niektórzy dostawcy oferują do sterownika także oprogramowanie do wizualizacji i analiz energetycznych systemu. Ciekawe są także systemy nadrzędne mogące sterować kilkoma sprężarkowniami, wielosprężarkowymi, zasilającymi jedną zamkniętą sieć.

WIZUALIZACJA PROCESU. Ze względu na bezpieczeństwo procesów produkcyjnych oraz ich dużą zależność od dostaw sprężonego powietrza, w dzisiejszych czasach, kiedy dość łatwo można budować komputerowe układy synoptyczne (podglądu) urządzeń, jest to jak najbardziej pożądane rozwiązanie. W ten sposób można na przykład śledzić na bieżąco ilość pobieranego sprężonego powietrza oraz ilość energii elektrycznej pobieranej do tych celów. Stąd łatwo na bieżąco śledzić np. efektywność energetyczną procesu.

Jeżeli możliwy jest pomiar zużywanego strumienia sprężonego powietrza, ilość energii elektrycznej wydatkowanej na ten cel (pobór energii przez sprężarkownię), oraz jeśli te zmierzone dane wraz z kosztami serwisu i energii umieścimy w jednym programie do wizualizacji możemy uzyskać najważniejsze wskaźniki związane z procesem produkcji sprężonego powietrza (w kWh/m^3 i zł/m^3).
Oprócz bieżącego analizowania aktualnych kosztów sprężonego powietrza można także mierzyć jakie jest zużycie sprężonego powietrza, kosztów oraz energii przypadające na jednostkową produkcję danego zakładu (np. na tonę lub sztukę produktu).
Oczywiście ważne są także wskaźniki bezpieczeństwa, takie jak informacje o alarmach, wyłączeniach, komunikaty doradcze czy serwisowe, liczniki godzin. Te wszystkie dane są dostępne w sprężarkach. Jeśli tylko świadomość użytkownika jest wystarczająco duża, powinien z tego bezwzględnie skorzystać i monitorować bezpieczeństwo i skuteczność swojego systemu sprężonego powietrza.

INSTALACJA DYSTRYBUCJI I ODBIORU POWIETRZA. Tak jak powyżej w prosty sposób przedstawiłem wizję „idealnej" sprężarkowi, tak dla właściwego dopełnienia obrazu rozwiązań dotyczących sprężonego powietrza przedstawić chcę poprawną wizję instalacji sprężonego powietrza.
Powody, dla których warto tę cześć systemu budować i eksploatować zgodnie z regułami sztuki inżynierskiej dobrze obrazuje specjalny raport UE na ten temat przedstawiany w rozdziale 5 niniejszego Poradnika. Wskazane są tam także konkretne przykłady obrazujące jaki jest potencjał oszczędności energii tkwiący w systemie dystrybucji powietrza.
W tym punkcie chciałbym zwrócić uwagę użytkowników na praktyczne uwagi dotyczące budowania i użytkowania instalacji. Będąc użytkownikiem sprężonego powietrza warto pamiętać o tym, że:

- spadek ciśnienia między zbiornikiem wyrównawczym, a odbiornikami nie powinien przekraczać 10% wartości ciśnienia,
- 0,14 bar straty ciśnienia, to około 1 % kosztów energii zużywanej przez sprężarkę,
- na wyprodukowanie 1 m^3/h powietrza o ciśnieniu 7 bar potrzeba około 111 Wh energii elektrycznej,
- za małe przekroje rurociągów, to duże prędkości przepływu, a spadki ciśnienia rosną wraz z prędkością i są proporcjonalne do kwadratu prędkości przepływu powietrza w rurociągu!
- w celu uzyskania równego ciśnienia w wielu punktach obiektu, należy dążyć do zamykania instalacji w „pętlę", aby unikać spadków ciśnienia typowych dla szeregowych połączeń odbiorników,



Rysunek 15 Instalacja zamknięta w pętlę ze specjalnie dedykowanego dla sprężonego powietrza systemu rurociągów aluminiowych firmy LEGRIS – Parker

- aby wzmocnić punkty odbioru na końcu pętli lub linii, należy zainstalować dodatkowy zbiornik w ich najbardziej oddalonych od sprężarkowni punktach,
- największe odbiorniki należy instalować możliwie jak najbliżej źródła sprężonego powietrza, łącząc je jak najkrótszymi odcinkami rur,
- elementy instalacji wymagające obsługi powinny być montowane z obejściem (by-pass'em),
- w newralgicznych punktach zakładu oraz w sprężarkowni należy przewidywać miejsca na podłączenie sprężarki rezerwowej,
- instalacje powinny mieć minimalne pochylenia od sprężarek w kierunku separatorów wilgoci, spustów kondensatu itd.,
- rurociągi muszą być odpowiednio zamocowane. Są to rury, które mają najczęściej duży ciężar własny, zmieniają swoją długość zależnie od temperatury oraz znajdują się pod ciśnieniem, muszą mieć możliwość kompensacji odkształceń, inaczej będą się rozszczelniać, obwieszać itp.
- wyprowadzenia instalacji do odbiorników skierowane były najpierw w górę ponad główny rurociąg, a potem sprowadzane w dół do odbiornika przy pomocy tzw. „fajki" zwanej czasem „łabędzią szyją",
- niepotrzebne długości rurociągów, to straty przepływów oraz zbędna objętość do napełnienia drogim medium, dodatkowo często stają się miejscem, gdzie zbiera się wykroplona woda, która w niekontrolowany sposób może potem dostawać się do sieci zakładowej,
- zawory odcinające pomiędzy siecią a odbiornikami powinny być szczelne typu kulowego, podobnie rzecz ma się ze szybkozłączami, na których nie warto oszczędzać, bo tanie są szczelne krótko, a ich wymiana na pracującej instalacji jest często niewykonalna,
- połączenie między siecią , a odbiornikiem powinno być dokonane za pomocą połączenia elastycznego, aby uniknąć naprężeń, bo najczęściej odbiorniki powietrza zasilane są

poprzez aluminiowy blok sterujący urządzenia. Jeśli instalacja jest stalowa i wywołamy naprężenie z aluminiowym blokiem sterującym lub blokiem przygotowania powietrza, to pod wpływem naprężeń nie wytrzyma aluminiowy blok, co zaskutkuje kolejnym wyciekiem i niesprawnością systemu, być może także zasilanego urządzenia.

3 Zużycie energii i koszty wytwarzania sprężonego powietrza w zależności od zastosowanego układu, parametrów sprężonego powietrza.

Ponieważ dla większości instalacji przemysłowych właściwym i wystarczającym jest ciśnienie 7 bar (w krajach stosujących jednostki anglosaskie – to około 100 psi). Analizę tematu przedstawiam na przykładzie tego ciśnienia.

Stosowane często w przemyśle wyższe ciśnienia będą stanowiły, co najwyżej bardziej kontrastowy obraz podobnej sytuacji.

Należy zwrócić uwagę użytkowników na fakt, że często na etapie projektu technologii, dalej instalacji, infrastruktury a potem na etapie samego zakupu urządzeń, często zespoły odpowiedzialne za kolejne etapy negocjacji lub analiz, podnoszą wartość ciśnienia, żeby było pewne osiągalne ciśnienie docelowe w instalacji.

W ten sposób niestety tworzy się łańcuch niepotrzebnych działań asekuracyjnych, za który płaci użytkownik. Należy mieć świadomość, że wiele urządzeń odbiorczych potrzebuje ciśnienie niższe niż standardowe 7 bar i bardzo często wyposażane jest w stosowny reduktor ciśnienia umożliwiający jego obniżenie do rzeczywiście wymaganej wartości. Jest to ważne o tyle, że jednym z istotniejszych do zapamiętania wskaźników jest przybliżony wzrost poboru energii w związku z podniesieniem wartości ciśnienia. Okazuje się, że podniesienie ciśnienia o około 1 bar w sieci powoduje zwiększenie poboru energii w celu uzyskania wyższej wartości ciśnienia o około 7%.

Ważne jest, aby pamiętać także o tym, że każdy 1 bar spadku ciśnienia wywołanego stratami, to także 7% mocy pobieranej przez sprężarki, która jest nieodwracalnie tracona.

Żeby jednak poprawnie określić koszty produkcji sprężonego powietrza, warto znać jakie ważne parametry i wskaźniki determinują funkcjonowanie tego medium.

Wskaźnikiem ilościowym jest wydajność, jak kto woli przepływ lub strumień powietrza dostarczany przez sprężarkę. Podawany jest przy pomocy jednostki objętości w jednostce czasu. Standardem branży jest podawanie wydajności jako strumienia zasysanego przez sprężarkę, ponieważ ciśnienie, pod którym powietrze jest sprężane jest zawsze sprawą szczegółowego i indywidualnego zapotrzebowania użytkownika.

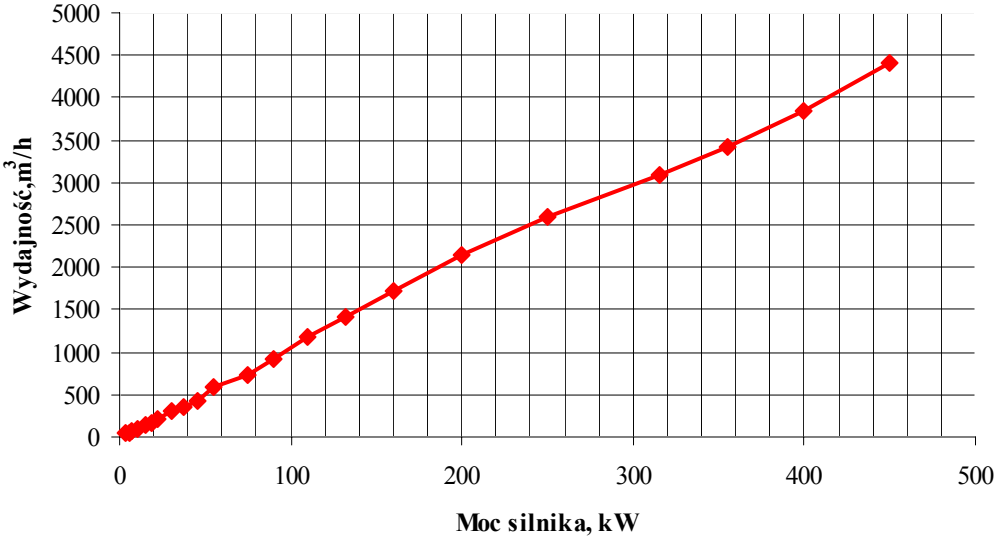
Najczęściej wydajność podawana jest w: (m^3/min – tj. metr sześcienny na minutę) czy (m^3/h tj. metr sześcienny na godzinę), rzadziej w (l/min – tj. litrach na minutę) lub (l/s – tj. litrach na sekundę), natomiast jednostką SI jest (m^3/s - tj. metr sześcienny na sekundę).

Ważne jest zwrócenie uwagi na warunki odniesienia podawanej wydajności. Najpopularniejszymi warunkami odniesienia są warunki tzw. swobodnego zasysania, za które w Europie uważa się temperaturę powietrza zasysanego +20^{o}C, ciśnienie otoczenia 1 bar i wilgotność względną 0% (z angielska zwane często „F.A.D.” – free air delivery).

Szczegóły odbiorczego pomiaru wydajności najpopularniejszych sprężarek, tzn. wyporowych (tłokowych, śrubowych i łopatkowych) reguluje norma PN – ISO 1217, ze szczególnym uwzględnieniem jej „Załącznika C”.

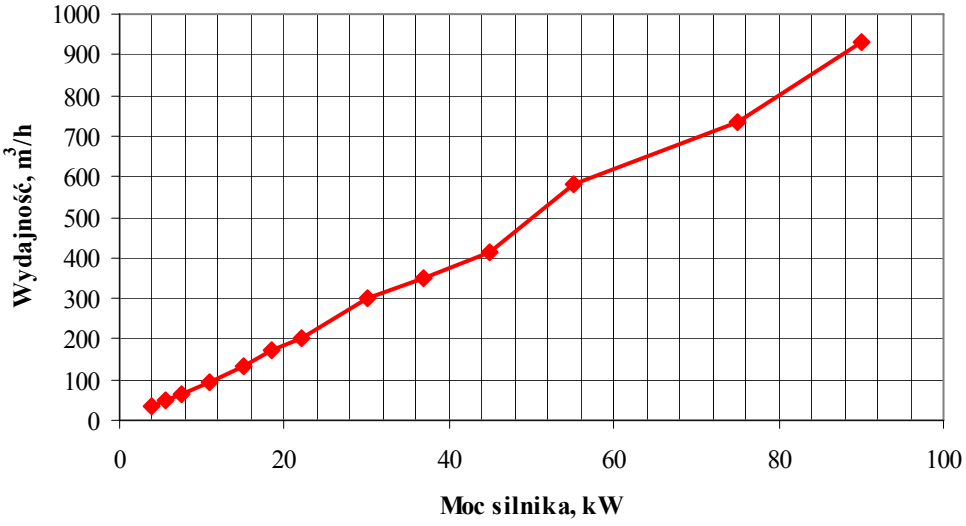
Załącznika najbardziej adekwatnego dla użytkownika, ze względu na podawane w nim rzeczywiste wartości użytkowe zmierzonych parametrów. W praktyce można spotkać się także z innymi warunkami odniesienia, które są łatwiejsze do przyjmowania przez projektantów lub technologów, ponieważ uwalniają ich często od „więzi" szczegółowych, jakże często zmieniających się warunków otoczenia. Są to tzw. warunki normalne. Za takie w Europie uznaję się temperaturę powietrza zasysanego 0^oC, ciśnienie otoczenia 1 bar i wilgotność względną 0 %.
Wtedy podawana wydajność urządzenia jest w: Nm^3/min – tj. normalny metr sześcienny na minutę czy Nm^3/h tj. normalny metr sześcienny na godzinę, rzadziej w Nl/min – tj. normalnych litrach na minutę lub Nl/s – tj. normalnych litrach na sekundę. Jednostką SI jest Nm^3/s - tj. normalny metr sześcienny na sekundę.
W warunkach innych niż normalne, wydajność również jest inna, co pokazano na przykładzie wartości 1 000 Nm^3/h.
Dla poprawnego przeliczenia trzeba uwzględnić ciśnienie atmosferyczne, wilgotność względną i temperaturę powietrza. Jeśli np. uwzględnimy temperaturę otoczenia 20^oC, wilgotność względną 70 % i wysokość nad poziomem morza 100 m, to wydajność swobodnie zassana dla sprężarki wyniesie 1 104 m^3/h. Gdy przy tej samej temperaturze i położeniu nad poziomem morza zwiększymy wilgotność do 85 %, to wydajność swobodnie zassana dla sprężarki wyniesie 1 108 m^3/h. Jeśli natomiast pozostawimy temperaturę otoczenia 20^oC, wilgotność względną 70%, a wysokość nad poziomem morza zwiększymy do 500 m, to wydajność swobodnie zassana dla sprężarki wyniesie 1 159 m^3/h (powietrze rozrzedza się wraz z wysokością). A gdy temperatura otoczenia wzrośnie do 35^oC, co nie jest niczym dziwnym w naszym klimacie, a wilgotność względna pozostanie na poziomie 70 %, podobnie wysokość nad poziomem morza pozostanie 100 m, to wydajność swobodnie zassana dla sprężarki wyniesie 1 188 m^3/h.

Proces sprężania to praca, która na swój efekt wymaga pewnego wkładu. Pracę tę np. w sprężarce wyporowej wykonuje wirnik lub zespół tłoka, który napędzany jest silnikiem. Wiąże się to z konkretną mocą, którą pobiera sprężarka. Tu także warto zwrócić uwagę na w/w normę, która w „Załączniku C" zaleca użytkownikom posługiwanie się mocą pobieraną nie tylko przez sama sprężarkę, czy jej serce – to znaczy wykonawczy element sprężający, ale moc pobieraną przez cały agregat sprężarkowy – wraz z układem chłodzenia, stratami przekładni mechanicznych, z uwzględnieniem sprawności silników, ich cos φ itp. Moc ta jest oczywiście mierzona w kilowatach (kW), rzadziej w koniach mechanicznych (KM).
Poniżej zamieszczam uśrednioną zależność wydajności sprężarek śrubowych z wtryskiem oleju, chłodzonych powietrzem od pobieranej przez nie mocy przy sprężaniu powietrza do 7 bar.



Rysunek 16 Średnia wydajność sprężarki śrubowej w zależności od jej mocy

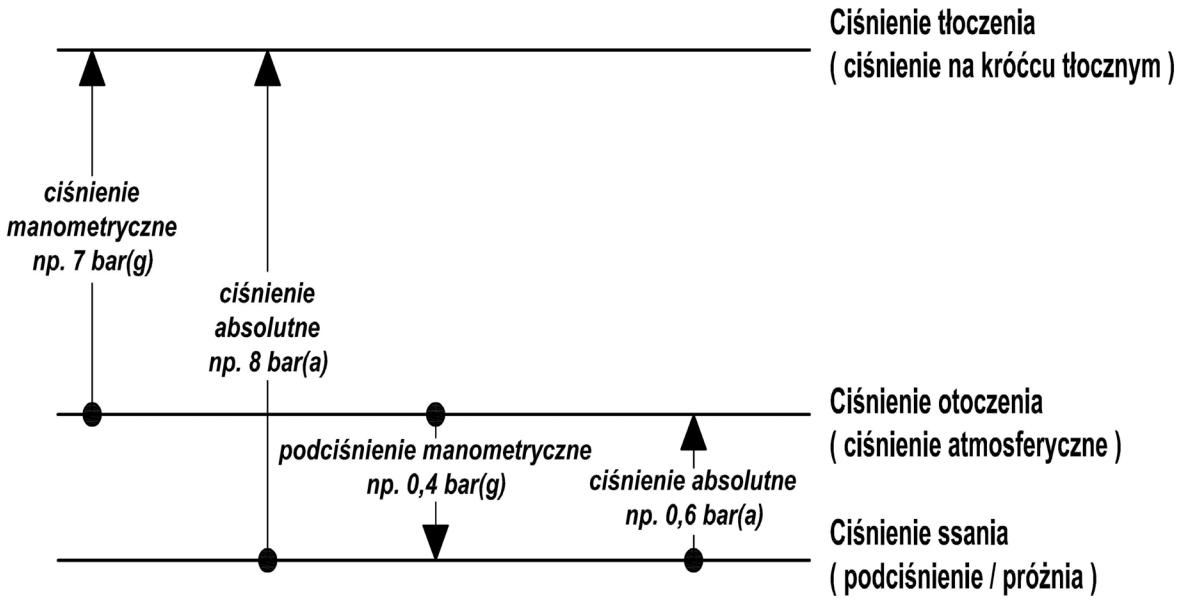
Ponieważ jednak ponad 80% sprężarek przemysłowych w Polsce, to sprężarki wyporowe o wydajności do 1 000 m^3/h, poniżej zamieszczam bardziej szczegółową zależność dla tej wielkości maszyn. Dotyczy to, tak jak powyżej sprężarek tłokowych, śrubowych i łopatkowych. Parametry podane także przy ciśnieniu roboczym 7 bar.



Rysunek 17 Średnia wydajność sprężarki śrubowej w zależności od jej mocy (sprężarki o mocy do 90 kW)

Powyżej wspomniałem, że dla podanych wykresów sprężarki sprężają powietrze do 7 bar. Proces sprężania w sprężarkach wyporowych, to zmniejszanie objętości gazu w celu uzyskania wymaganego ciśnienia.

Właściwe ciśnienie w sprężarkach przepływowych osiąga się poprzez zamianę energii kinetycznej rozpędzonego na wirniku strumienia powietrza na jego ciśnienie. To ciśenienie określa się najczęściej w barach lub rzadziej w jednostkach SI, tzn. mega Paskalach (MPa), czy też kilo Paskalach (kPa). Potocznie mówiąc o ciśnieniu 7 bar, w rzeczywistości mamy na myśli nadciśnienie 7 bar, zapisywane czasem z angielska, jako manometryczne czyli „g" jak „gauge", czyli manometr – wskaźnik. Wtedy taki zapis wygląda: 7 bar(g). Natomiast ciśnienie absolutne, to wartość ciśnienia uwzględniająca ciśnienie atmosferyczne. Dla powyższego przykłady 7 bar(g) = 8 bar abs. , co pokazano na poniższym schemacie.

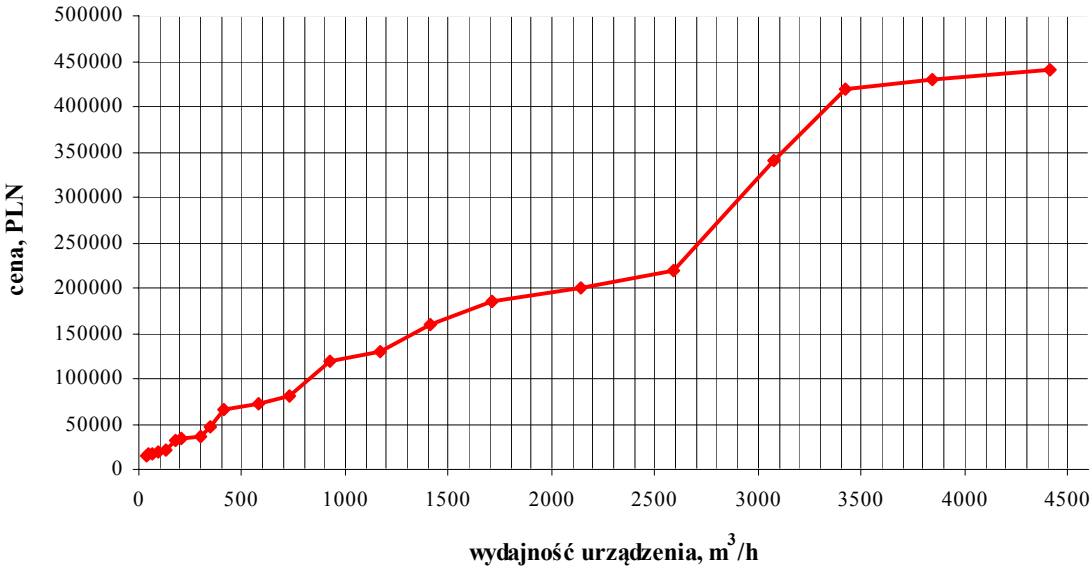


Parametry, takie jak, wydajność i ciśnienie jednoznacznie określają sprężarkę i jej możliwości, natomiast kryterium jej oceny jest charakterystyka mocy pobieranej od wydajności oraz parametr nazywany jednostkowym poborem energii, czyli rzeczywiście pobraną energią elektryczną z sieci przez cały agregat sprężarkowy do jego wydajności.

Ze względu na łatwość korzystania z tego wskaźnika na potrzeby dalszych obliczeń, najczęściej używa się wskaźnika w (kW/(m^3/h)) lub inaczej zapisanego w (kWh/m^3). Wskaźnik ten w zależności od typu i sprawności sprężarki, jej układu chłodzenia oraz warunków otoczenia waha się w zakresie 0,08 do nawet 0,15 (kWh/m^3) przy założeniu ciśnienia roboczego 7 bar. Dla uproszczenia wielu obliczeń – na przykład strat powietrza przyjmuje się często łatwy do zapamiętania wskaźnik tzn. 111 (Wh/m^3) = 0,111 (kWh/m^3). Szczegółowo wskaźnik ten jest również definiowany we wspominanej powyżej normie PN-ISO 1217.

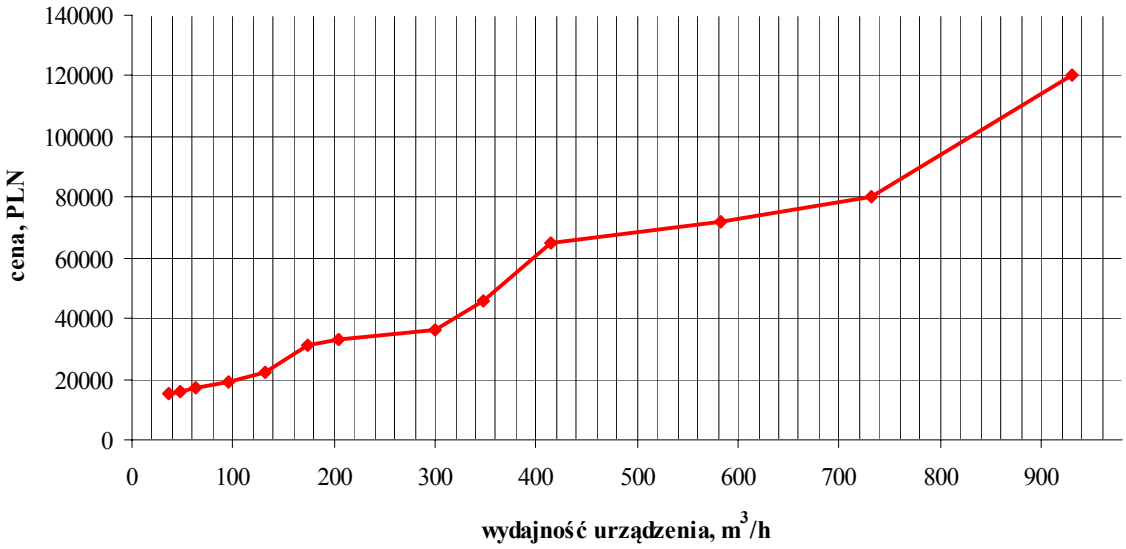
Warto byłoby także zwrócić uwagę na jeszcze jeden parametr, który ma duży wpływ na całkowity pobór energii przez sprężarkę, tzn. moc pobierana na biegu luzem, tzn. wtedy kiedy silnik pracuje napędzając sprężarkę, a jej zawory dolotowe są zamknięte. W tej sytuacji sprężarka pobiera energię, a nie produkuje powietrza. W klasycznych sprężarkach taka sytuacja jest koniecznością ze względu na ich regulację, nadążność i ilość dopuszczalnych

pełnych rozruchów silnika elektrycznego. Oczywiście energia ma znaczny wpływ na efektywność produkcji sprężonego powietrza, natomiast również sam zakup sprężarki stanowi znaczącą część tych kosztów. Poniżej zamieszczam pewne uśrednienie cen europejskich sprężarek śrubowych z wtryskiem oleju, przy założeniu kursu 1 Euro = 4,2 PLN. Ceny podane w PLN, są umieszczone w zależności od wydajności sprężarek w (m^3/h).



Rysunek 18 Średnia cena sprężarki śrubowej z wtryskiem oleju w zależności od jej wydajności

Ze względu na wyżej wskazywaną częstość występowania sprężarek o wydajności do 1 000 m^3/h. Poniżej wg podobnych założeń przedstawiam uśrednienie cen sprężarek śrubowych z wtryskiem oleju mniejszych wydajności. Oba wykresy przedstawiają stan wiedzy na jesień 2009 roku.



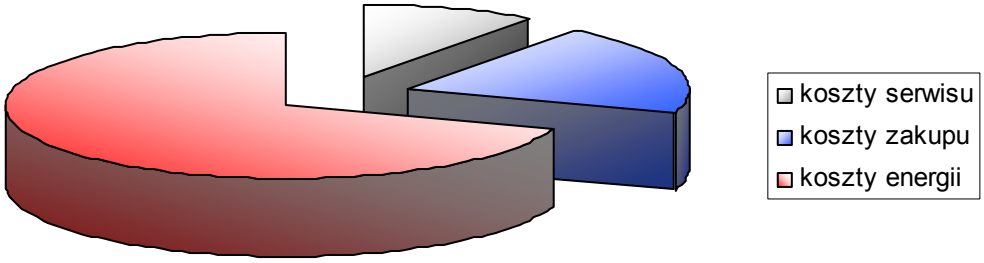
Rysunek 19 Średnia cena sprężarki śrubowej z wtryskiem oleju w zależności od jej wydajności (< 1000 m^3/h)

Z powyższych informacji można sobie stworzyć system wstępnej weryfikacji parametrów sprężarki oraz, jakie są w przybliżeniu koszty jej zakupu. Ale jakie są rzeczywiste koszty wytwarzania sprężonego powietrza?

Żeby odpowiedzieć na to pytanie należałoby łączne koszty zsumować i odnieść je do ilości wyprodukowanych m^3 powietrza w analizowanym okresie. Na te koszty składają się:

- koszty zakupu urządzenia – w ramach których należałoby wziąć pod uwagę koszt pieniądza pozyskanego na inwestycję,
- koszty instalacji, podłączenia i uruchomienia zakupionego urządzenia wg szczególnych – właściwych dla danego użytkownika warunków,
- koszty obsługi serwisowej – materiałów, robocizny na obsługi rutynowe i wymagane remonty,
- koszty energii elektrycznej zużytej na wyprodukowanej potrzebnej w danym okresie ilości sprężonego powietrza,
- koszty amortyzacji zakupionych urządzeń.

Jeśli pominiemy koszty instalacji, koszty pieniądza i koszty amortyzacji, które zwykle są sprawą indywidualną w zależności od użytkownika i jego specyficznej sytuacji, to przy założeniu pracy non – stop przez 5 lat i znacznie uśredniając wielkości sprężarek – struktura kosztów produkcji powietrza jest następująca:



Rysunek 20 Elementy średnich kosztów wytwarzania sprężonego powietrza w 5-letnim cyklu eksploatacji

Zwykle w praktyce koszty zakupu i serwisu zmieniają się łącznie w zakresie 15-35% łącznych kosztów, natomiast dominująca wartością w każdej konfiguracji są stanowiące 65-85% koszty energii. Widać stąd, że kupując urządzenie a ściślej dokonując wyboru i wydając niewielką część swoich łącznych kosztów produkcji powietrza, kształtuje się lwią część swoich przyszłych wydatków. Dlatego właściwy dobór urządzeń, analiza energooszczędności systemów produkcji i zużycia sprężonego powietrza ma kluczowe znaczenie w tej dziedzinie. Stosując dziś obowiązujące kursy walut i koszty energii – można przyjąć, że koszt jednostkowy produkcji powietrza o ciśnieniu 7 – 10 bar waha się od około 30 do około 80, a nawet 100 zł za 1000 m^3 powietrza. Zależy to oczywiście od doboru urządzeń, właściwego systemu ich regulacji i sterowania, właściwej konfiguracji sprężarkowni, właściwego przekroju, przebiegu i wykonania instalacji przesyłowej i odbiorczej oraz od świadomości użytkowników na temat wysokich kosztów produkcji sprężonego powietrza.

4 Przykład modernizacji systemu sprężonego powietrza – opis stanu istniejącego, propozycje rozwiązań, określenie efektów wdrożenia

Na początku, także dla pokazania możliwości wykonania pewnych działań samodzielnie, posłużę się przykładem, na podstawie którego, każdy może wykonać analizy swojego systemu sam. Przykład wzięty jest z życia, dotyczy zakładu produkcji spożywczej pracującego w systemie 2 i pół lub 3 – zmianowym, bez weekendów, z transportem pneumatycznym i dość zróżnicowanym poborem powietrza:

Użytkownik posiada w swoim systemie 3 sprężarki zasilające instalację sprężonego powietrza, w tym najstarszą z silnikiem 75 kW o maksymalnym ciśnieniu 10 bar (rok produkcji 1995 – oznaczana dalej jako „1"), sprężarkę z silnikiem 45 kW o maksymalnym ciśnieniu 10 bar (rok produkcji 2000 – oznaczaną dalej jako „2") oraz sprężarkę z silnikiem 45 kW o maksymalnym ciśnieniu 10 bar (rok produkcji 2004 – oznaczaną dalej jako „3").

W oparciu o dane sprężarek do obliczeń przyjęto założenie, że sprężarka „1" pobierała moc elektryczną z sieci po uwzględnieniu wszystkich strat na poziomie 83,72 kW pod obciążeniem oraz 16,28 kW na biegu jałowym oraz, że „2" i „3" – każda z nich pobierała moc elektryczną z sieci po uwzględnieniu wszystkich strat na poziomie 50,64 kW pod obciążeniem oraz 10,68 kW na biegu jałowym. Natomiast czas pracy sprężarek od momentu ich uruchomienia kształtował się następująco:

- sprężarka „1" (rocznik 1995) : 16 576 h pod obciążeniem i (43 176 – 16 576) = 26 600 h na biegu luzem,
- sprężarka „2" (rocznik 2000): 26 120 h pod obciążeniem i (33 390 – 26 120) = 7 270 h na biegu luzem,
- sprężarka „3" (rocznik 2004): 19 110 h pod obciążeniem i (23 200 – 19 110) = 4 090 h na biegu luzem,

możemy, podsumowując także inne dane, obliczyć poszczególne koszty produkcji powietrza.

Dla sprężarki „1":

Maszyna pobrała w czasie swojej pracy łącznie:

16 576 h x 83,72 kW + 26 600 h x 16,28 kW = 1 820 790,7 kWh.

Koszty użytkowania sprężarki są więc następujące:

Koszt zakupu, to około	80 000,00 zł,
Koszty serwisu, to około	40 000,00 zł,
Koszt energii (przy założeniu stawki za energię 0,36 zł/kWh)	655 484,66 zł.

Razem koszty produkcji powietrza z tej sprężarki, bez uwzględnienia kosztów pieniądza, amortyzacji itd., wynoszą więc 775 485 zł.

Ponieważ w czasie swojego życia ta sprężarka wyprodukowała:

600 m^3/h x 16 576 h = 9 945 600 m^3 powietrza,

to uśredniony koszt produkcji 1 m^3 sprężonego powietrza z tej maszyny wynosi 0,07797 zł, tj. 7,797 zł za 100 m^3.

Dla sprężarki „2":

Maszyna pobrała w czasie swojej pracy łącznie:

26 120 h x 50,64 kW + 7 270 h x 10,68 kW = 1 400 360 kWh

Koszty użytkowania sprężarki są więc następujące:

Koszt zakupu, to około	64 000,00 zł,
Koszty serwisu, to około	30 000,00 zł,
Koszt energii (przy założeniu stawki za energię 0,36 zł/kWh)	504 129,60 zł.

Razem koszty produkcji powietrza z tej sprężarki bez uwzględnienia kosztów pieniądza, amortyzacji itd., wynoszą przy założeniu stawki za energię 0,36 zł/ kWh, 598 129,60 zł

Ponieważ w czasie swojego życia ta sprężarka wyprodukowała:

388 m^3/h x 26 120 h = 10 134 560 m^3 powietrza,

to uśredniony koszt produkcji 1 m^3 sprężonego powietrza z tej maszyny wynosi 0,05902 zł, tj. 5,902 zł za 100 m^3.

Dla sprężarki „3":

Maszyna pobrała w czasie swojej pracy łącznie:

19 110 h x 50,64 kW + 4 090 h x 10,68 kW = 1 011 411,6 kWh.

Koszty użytkowania sprężarki są więc następujące:

Koszt zakupu, to około	64 000,00 zł
Koszty serwisu, to około	30 000,00 zł
Koszt energii (przy założeniu stawki za energię 0,36 zł/kWh)	364 108,18 zł

Razem koszty produkcji powietrza z tej sprężarki bez uwzględnienia kosztów pieniądza, amortyzacji itd., wynoszą, przy założeniu stawki za energię 0,36 zł/ kWh, 458 108,18 zł.

Ponieważ w czasie swojego życia ta sprężarka wyprodukowała:

388 m3/h x 19 110 h = 7 414 680 m^3 powietrza,

to uśredniony koszt produkcji 1 m^3 sprężonego powietrza z tej maszyny wynosi 0,061784 zł, tj. 6,18 zł za 100 m^3.

Średni koszt produkcji powietrza wynosi zatem:

(9 945 600 m^3 x 0,07797 zł + 10 134 560 m^3 x 0,05902 zł + 7 414 680 m^3 x 0,061784 zł) / 27 494 840 m^3 = (775 458,43 + 598 141,73 + 458 523,81) zł / 27.494.840 m^3 =
= 0,0666351 zł/ m^3 powietrza, tj. 6,664 zł za 100 m^3

Podsumowanie poboru energii i jednostkowy pobór energii:

- 16 576 h x 83,72 kW + 26 600 h x 16,28 kW = 1 820 790,7 kWh w czasie użytkowania sprężarki „1";
- 26 120 h x 50,64 kW + 7 270 h x 10,68 kW = 1 400 360 kWh w czasie użytkowania sprężarki „2"
- 19 110 h x 50,64 kW + 4 090 h x 10,68 kW = 1 011 411,6 kWh w czasie użytkowania sprężarki „3"

Razem zużycie energii: 4 232 562,3 kWh;
Razem produkcja powietrza: 27 494 840 m^3.

Wskaźnik jednostkowego poboru energii wynosi:

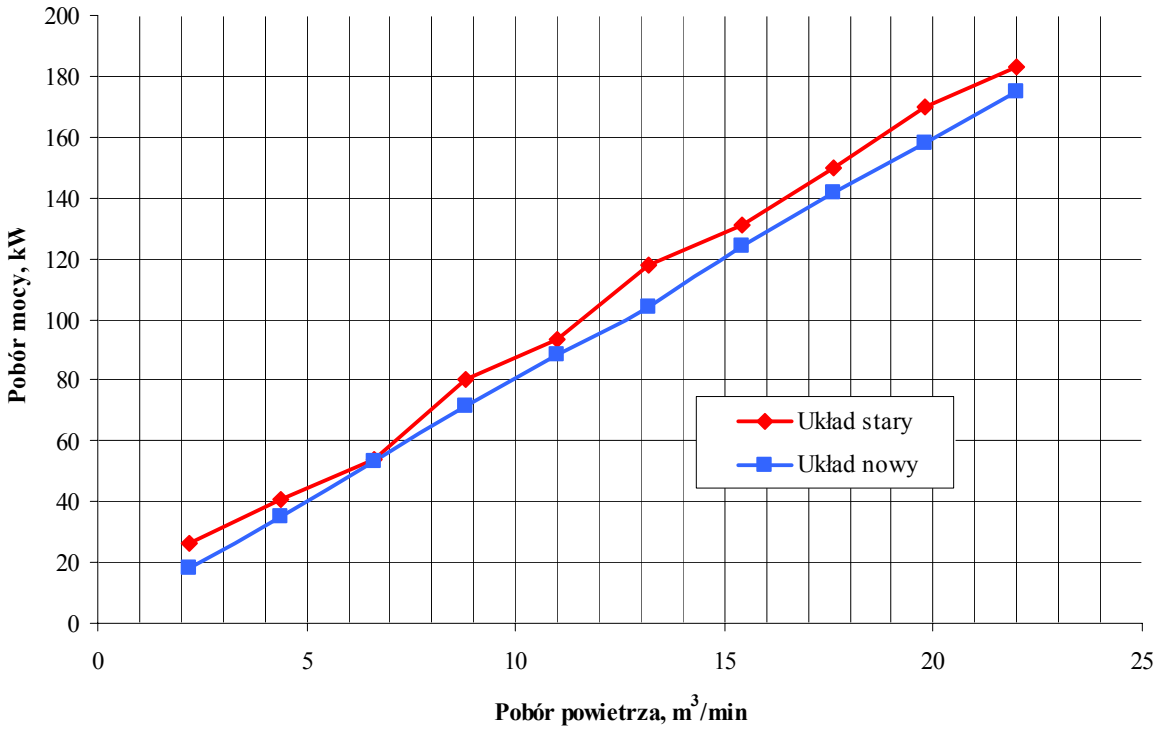
0,1539 kWh/m3 = 0,1539 kW / m3/h = 9,2364 kW / m^3/min powietrza.

Jeśli czytelnik zapoznał się już z rozdziałem 3 i 4 Poradnika, to łatwo może sobie obliczyć, że znając uśredniony „statystyczny" wskaźnik jednostkowego poboru energii dla 7 bar – tzn. 0,111 kW/m^3/h oraz mając świadomość, że każde 1 bar ciśnienia w górę wymaga około 7% więcej energii, wyraźnie widać, że wskaźniki różnią się od oczekiwań, które w przybliżeniu można by szacować na około 0,130 – 0,140 kW/m^3/h.
Temu użytkownikowi, który wdraża u siebie korporacyjny system oszczędzania energii zostało zaproponowane kilka kroków naprawczych. Między innymi:

- zamknięcie instalacji w pętlę w celu wyrównania ciśnień,
- obniżenie ciśnienia maksymalnego roboczego na sprężarkach oraz per saldo na sieci, bo pracowali na ciśnieniu około 9 bar, a na sieci wystarczało im w zupełności 7,5 – 8 bar,
- modernizacja parku sprężarek – z wymianą najstarszej sprężarki na nową sprężarkę zmienno obrotową.

W rezultacie z powodów technologicznych niemożliwe było przerwanie produkcji na taki okres czasu, aby można było zbudować nową instalacje oraz, aby można było przejść na niższe ciśnienia robocze na sprężarkach.

Decyzja użytkownika odwracała logikę wyżej przedstawionych kroków i modernizacja zaczęła się od wymiany sprężarki. Jakie oszczędności wynikają z tego tytułu, zacznijmy od wykresów regulacji obu układów sprężarek. Ważnym szczegółem była tu także instalacja nadrzędnego sterownika, który po modernizacji miał za zadanie sterować jedną histerezą ciśnienia i w związku z tak badanym zapotrzebowaniem załączać takie sprężarki, które to zadanie wykonają przy pomocy jak najmniejszej energii utrzymując jednocześnie możliwie równe obciążenie godzin pracy oraz minimalizując okres pracy na biegu jałowym sprężarek regulowanych tylko zaworem ssawnym.



Rysunek 21 Uśredniony pobór mocy przez system sprężonego powietrza w stanie istniejącym i po modernizacji

Jak wynika z powyżej zamieszczonej analizy obciążenie sprężarek w historii pracy sprężarek można ocenić na poziomie około 60 – 70 %, z czego z kolei dalej wynika oszczędność energii na poziomie 7 do 14 kW. Jeśli dla równego rachunku przyjmiemy oszczędność na poziomie 10 kW, to zakładając jak powyżej koszt energii na poziomie 0,36 zł za kWh oraz 5000 h na rok, to oszczędności wynikające z tej części modernizacji wynoszą 18.000,00 zł rocznie.
Jest to kwota porównywalna z kosztem remontu kapitalnego starej sprężarki 75 kW, którą użytkował ten zakład, a która została wymieniona na maszynę zmiennoobrotową. Można ją także odnieść do różnicy w cenie sprężarki regulowanej klasycznie przez zawór ssawny oraz ceny sprężarki z regulacją wydajności poprzez zmianę obrotów. Otóż ta różnica w cenie spłaca się temu użytkownikowi w okresie około 2 lat.

5 Możliwości zmian – jak poprawić efektywność energetyczną układów sprężonego powietrza?

Żeby ocenić potencjał możliwości poprawy efektywności energetycznej swojego systemu należy zacząć od dokładnego jego poznania. Większość niezbędnych danych posiada sam użytkownik. Naturalnie taką ocenę warto zlecić zewnętrznemu ekspertowi, wtedy z pewnością uzyskany obraz będzie pozbawiony subiektywizmu. Natomiast taki audyt, w zależności od jego zakresu i wielkości systemu, którego dotyczy kosztuje od około dwóch do około dwudziestu tysięcy złotych. Jeśli więc ta kwota bywa w niektórych budżetach zbyt duża oraz jeśli nie uznajemy subiektywizmu za przeszkodę we właściwej ocenie sytuacji, proponuje dokonać samooceny systemu.

Taką samoocenę należy zacząć od określenia kosztów produkcji sprężonego powietrza. Niezbędne dane do przeprowadzenia takiej analizy to:

- wydajność poszczególnych sprężarek,
- czas pracy sprężarek pod obciążeniem, ile na biegu luzem,
- pobór mocy pod obciążeniem i na biegu luzem; te wartości mogą nastręczyć najwięcej trudności ponieważ dostawcy publikują je niechętnie. Wtedy najprościej skorzystać z usług swojego elektryka i poprosić go o zmierzenie prądu i napięcia na zasilaniu każdej ze sprężarek w trybie pracy pod obciążeniem i na biegu luzem, sprawdzić na tabliczce znamionowej silnika jaka jest wartość cos φ, następnie obliczyć moc elektryczną pobieraną przez agregat sprężarkowy.

Jak, w związku z tak zebranymi danymi, uzyskać wiedzę o wskaźniku jednostkowego poboru energii oraz kosztu produkcji sprężonego powietrza? Aby przybliżyć metodykę samodzielnych obliczeń i postępowania, pozwolę sobie podeprzeć się wykonanymi już przez instytucje UE konkretnymi badaniami.

Zasadniczych oszczędności w systemach sprężonego powietrza trzeba szukać najpierw po stronie poboru i rozprowadzenia powietrza, a także odbiorników. Dopiero po określeniu stanu sieci warto analizować i szukać słabych punktów systemu wytwarzania sprężonego powietrza. Wg opracowania przygotowywanego dla potrzeb krajów „starej Unii" : „Systemy sprężonego powietrza w Unii Europejskiej, Raport końcowy", Październik 2000, potencjał oszczędności wg wskaźnika możliwości zastosowania podawanego w procentach jest wyraźnie określony. (*potencjał zastosowania wg cytowanego raportu oznacza udział procentowy działających instalacji sprężonego powietrza, w których dane przedsięwzięcie jest możliwe do zastosowania i efektywne ekonomicznie*).

Dla polskich warunków możemy uznać go za jak najbardziej obowiązujący, nawet przy zastosowaniu rankingu potencjału zastosowania procentach właściwego dla krajów „starej" Unii.

Ten potencjał oszczędności tkwi w następujących działaniach i zachowaniach:

1. Redukcja wycieków powietrza – 80% potencjału zastosowania.
2. Redukcja strat ciśnienia wynikających z tarcia – 50% potencjału zastosowania.
3. Prawidłowe projekty całych instalacji sprężonego powietrza – 50% potencjału zastosowania.
4. Częstsze wymiany wkładów filtrów – 40% potencjału zastosowania.
5. Unowocześnianie sprężarek – 30% potencjału zastosowania.
6. Napędy zmiennoobrotowe – 25% potencjału zastosowania.
7. Silniki elektryczne wysokiej sprawności – 25% potencjału zastosowania.
8. Stosowanie zaawansowanych systemów sterowania – 20% potencjału zastosowania.
9. Odzysk ciepła odpadowego – 20% potencjału zastosowania.
10. Poprawa systemów chłodzenia, osuszania i filtracji – 10% potencjału zastosowania.
11. Dopasowywanie właściwych urządzeń końcowych (odbiorczych) – 5% potencjału zastosowania.

Widać wyraźnie, że największy potencjał leży po stronie systemów dystrybucji i odbioru sprężonego powietrza (punkty 1 do 4). Pozostałe punkty od 5 do 10 dotyczą systemów produkcji i uzdatniania sprężonego powietrza, a punkt 11 jest na styku obu układów. Zacznijmy więc od pierwszych 4 punków:

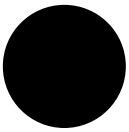
Redukcja wycieków powietrza – 80% potencjału zastosowania

Często odwiedzając, czy audytując zakłady produkcyjne spotykam się z sytuacją, w której użytkownicy powietrza wskazują na brak wiedzy na ten temat i z uwagi na to na związane z tym kłopoty czy straty. Gdy jednak pokazuję im wyniki powyższego raportu, tym chętniej czują się zmobilizowani do zmian, żeby swoje systemy sprężonego powietrza uczynić lepszymi niż te, które były badane w Europie Zachodniej. Najprościej zilustrować to danymi publikowanymi przez British Compressed Air Society na temat wycieków powietrza z otworów o różnej wielkości oraz ilością traconej w ten sposób energii (tabela 5).

Jeśli miałbym odnieść każdy z tych otworów do spotykanych w przemyśle wycieków, to zaczynając od najmniejszego, trzeba wspomnieć o wcześniej omawianych szybkozłączach i źle zamocowanych wężach, które bardzo często takie straty wywołują. Takie nieszczelności to także czasem wyrobione uszczelnienia w układach pneumatyki, zaworach itp. Otwór 3 mm, to np. niedomknięty pływakowy zawór spustu kondensatu. Otwór 5 mm, to typowa średnica dyszy pistoletu odmuchowego stosowanego do podstawowych czynności – np. sprzątania obrabiarek. Jak widać jego użycie jest bardzo kosztowne, nie sadzę, że właściciel zakładu przemysłowego pozwoliłby swoim pracownikom na np. zdmuchiwanie wiórów urządzeniem napędzanym silnikiem o mocy ponad 8 kW! Znam tez praktykę, że przy wysokich temperaturach pracownicy bez pytania kogokolwiek używają takich pistoletów do ochładzania się. Największy zaś tu zanotowany otwór spotykam czasem w okresach zimowych, w sytuacji niebezpieczeństwa zamarznięcia skroplin w zbiorniku wyrównawczym

użytkownicy nie licząc się ze stratami energii otwierają zawór ½” tak, żeby skropliny mogły ciągle swobodnie opuszczać układ.

Tabela 5 Straty energii powodowane nieszczelnością instalacji sprężonego powietrza

Średnica otworu		***Strata powietrza przy 6 bar***	***Moc potrzebna na pokrycie start***
Wymiar rzeczywisty	***(mm)***	***(l/s)***	***(kW)***
	1	1	0,3
	3	10	3,1
	5	27	8,3
	10	105	33

Ile to kosztuje – wystarczy przeliczyć wg stawki za energię i czasu otwarcia. Uzyska się wtedy często zatrważające wyniki. Z praktyki wiem, że jest to najczęściej występujący powód strat energii i niedoborów powietrza. Jak to jednak samodzielnie zdiagnozować. Otóż oczywiście najprostszym sposobem jest uwrażliwienie się na syczenie wyciekającego powietrza i oględziny całej instalacji. Efekt przynosi taka akcja podczas postoju zakładu, kiedy wszystko dobrze słychać i można na bieżąco nieszczelności usuwać. Jeśli nie ma takiej możliwości, wtedy należy zwrócić się do specjalistów, którzy mogą badania wycieków przeprowadzić stosując czujniki ultradźwiękowe lub kamery na podczerwień. Jak natomiast opanować to w 100 %? Obawiam się, że nie ma jednej dobrej recepty. Najlepiej stosować systemy rurociągów zapewniających możliwie najmniejsze przecieki oraz systematycznie prowadzić monitoring wycieków na instalacji i urządzeniach. Najprościej jest oczywiście, gdy zainstalowany jest układ pomiarowy, który mierzy pobierany strumień powietrza także w czasie, gdy zakład nie pracuje, wtedy najlepiej można stwierdzić jakie są straty. Gdy jednak takich pomiarów nie prowadzi się w sposób ciągły trzeba poradzić sobie samodzielnie, co więcej jest to możliwe i do takiej operacji potrzebny jest tylko stoper. Operacja polega na zmierzeniu czasu opróżniania zbiornika wyrównawczego napełnionego przez pracujące sprężarki do wartości górnego ciśnienia nastawionego na sprężarkach. Następnie zmierzone wartości trzeba podstawić do następującego wzoru:

$$V_{st} = \frac{\Delta p_{st} \cdot V_{zb}}{t_w}$$

gdzie :

V_{st} – strumień strat powietrza, (m^3/min)

Δp_{st} – spadek ciśnienia w sieci, (bar)

V_{zb} – pojemność zbiornika wyrównawczego, (m^3)

t_w – czas wycieku, (min)

Δp_{st} to spadek ciśnienia pomiędzy górnym ciśnieniem osiągniętym przez sprężarki a kolejnym niższym zanotowanym w określonym czasie pomiaru. Prościej jest gdy takie starty są notowane co 1 bar.

Żeby nie komplikować, najlepiej od razu zilustruję to przykładem: jeśli górne ciśnienie sprężarek wynosi na przykład 7,8 bar, zbiornik ma pojemność 6 m^3 i podczas gdy wyłączone są wszystkie odbiorniki produkcyjne, czyli gdy nie ma żadnego poboru powietrza, ciśnienie opada do wartości np. 6,8 bar w czasie np. 4 minut to oznacza, że straty wycieków przy ciśnieniu 7,8 bar wynoszą (1 x 6)/4 = 1,5 m^3/min.

Przeliczając ten przykład na konkretne liczby dotyczące konkretnych start finansowych mamy:

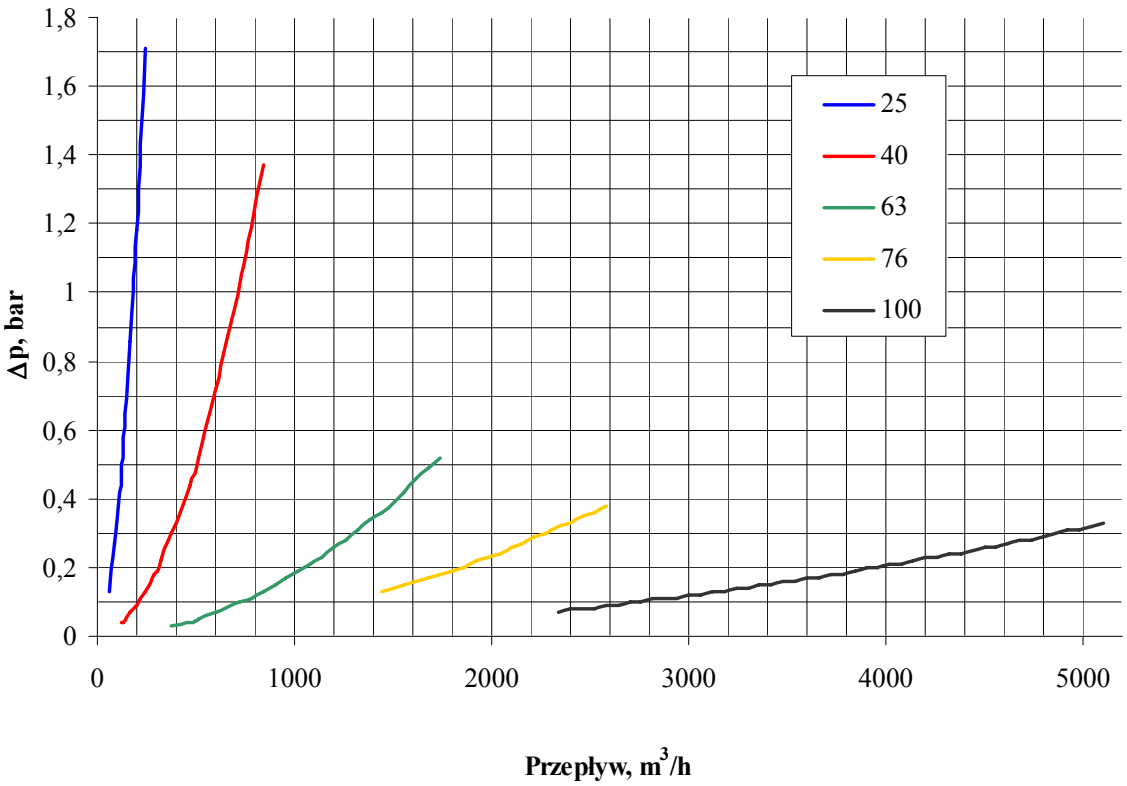
1,5 x 60 m^3/h x 111 W/m^3 = 9,99 kWh strat.

Jeśli sprężarki są załączone przez np. 24 h na dobę, przez 300 dni w roku, a cena energii to 0,36 zł/kWh, to łączne starty mogą wynieść 71 928 kWh rocznie, co przy powyższej cenie energii ponad 25 894 zł!

Warto dodać, że uszczelnienie sieci i urządzeń odbiorczych jest bardzo ważne, ale czasem nie ma praktycznych możliwości uzyskania oszczędności w ten sposób. Przyjmuje się, że wycieki rzędu do 10% nominalnego poboru powietrza są złem koniecznym (przyjmowanym do obliczeń doboru odpowiedniej sprężarki), ale 5% uznaje się za granicę tolerancji. Co nie znaczy, że wycieki należy tolerować i usprawiedliwiać je tą granicą. Zagadnienie to trzeba za każdym razem rozpatrywać indywidualnie, a wyliczone z tego tytułu straty odnosić do kosztów modernizacji i uszczelnienia, żeby mieć pewność, że akceptacja takiego stanu ma uzasadnienie ekonomiczne. Jakkolwiek wycieków powyżej tych 5% nie powinno się tolerować. Oczywiście trzeba się kierować proporcjami, bo np. 10% strat w instalacji zasilanej przez sprężarkę o wydajności 60 m^3/h, odpowiadać będzie stratom energii na poziomie 0,75 kW, a w instalacji zasilanej przez sprężarki o wydajności 1000 m^3/h, straty energii wyniosą około 9-10 kW. Także 10% strat w każdej instalacji oznacza coś zupełnie innego. Odnosząc to jednak do powyżej przeliczonego przykładu można wyobrazić sobie, że są to poważne pieniądze.

Redukcja strat ciśnienia wynikających z tarcia – 50% potencjału zastosowania

Straty ciśnienia są także efektem złych przekrojów instalacji. Bardzo częste w praktyce są sytuacje, gdy zakład produkcyjny rozwijał się w tym samym obiekcie od bardzo małej skali aż do wielokrotności swojego początkowego potencjału. Jego użytkownik kupował sprężarkę na potrzeby pierwotne, a gdy potrzeby poboru powietrza się zwiększały, to dokupował nowe sprężarki lub zamieniał je na większe. Nagle w pewnym momencie okazywało się, że ma za niskie ciśnienie w sieci, aż w końcu dochodzi do stanu, w którym za małe są sprężarki i za niskie ciśnienie. To bardzo typowa sytuacja. Wtedy pojawia się żal do dostawcy, że dostarcza złe maszyny, albo nie dał znać użytkownikowi co powinien zrobić. Co się w takiej sytuacji dzieje – wtedy prędkość w rurociągu rośnie proporcjonalnie do coraz większego strumienia powietrza w jednostce czasu, którą próbujemy przepuścić przez ciągle ten sam jego przekrój, a jak wcześniej wspominałem straty ciśnienia w rurociągu rosną wraz z kwadratem prędkości w rurociągu. Jako wynik sytuacji mamy cos w rodzaju niedokrwienia arterii sprężonego powietrza z powodu przewężenia przekroju rurociągów.



Rysunek 22 Spadek ciśnienia na długości 100 m w rurociągach o różnych średnicach w zależności od wielkości przepływu (dla ciśnienia 7 bar, rurociąg aluminiowy Legris - Parker)

Przykładem może być konkretna sytuacja z przemysłu, z którą spotkałem się w swoim codziennym życiu zawodowym. Użytkownik ma zainstalowane sprężarki o wydajności

łącznej nie wiele ponad 19 m^3/min (1140 m^3/h). W sprężarkowni ciśnienie uzyskiwane przez maszyny wynosi 8,2 bar, a rurociągi o średnicy DN50 mają długość ponad 150 m. W tym przypadku spadek ciśnienia wynosi 1,2 bar. Jeśli odnieść to do zainstalowanej tam mocy łącznej około 130 kW, to zakładając wyżej wskazywane 7% strat energii na 1 bar i koszt energii 0,36 zł/kWh, mamy straty na poziomie 10,92 kW x 0,36 zł/kWh = 3,93 zł na każdą godzinę pracy. Jeśli założymy, że czas pracy układu to 250 dni w roku przez 20 h na dobę, to takie straty sięgną 3,93 zł x 250 x 20 h = 19650 zł na rok.

Najtrudniejszym zagadnieniem w tym konkretnym przypadku jest często spotykane w naszym przemyśle przekonanie o własnej nieomylności i ignorowanie wiedzy fachowców. Bo skoro jestem właścicielem i sam wszystkiego się dorobiłem i to wielkim wysiłkiem, to co mi tu ktoś będzie mówił. Dodam, że pomysł właściciela tego zakładu polega na zwiększeniu wydajności w sprężarkowni do 27 m^3/min i ciśnienia do 9 bar, bez wymiany rurociągów na właściwe, o odpowiednim przekroju. Wtedy spadek ciśnienia wyniesie 1,95 bar, a starty stąd wynikające 25,935 kW x 250 dni x 20 h x 0,36 zł/kWh = 46 700 zł/rok. Co więcej w punktach odległych od sprężarkowni nie będzie uzyskiwać właściwego ciśnienia sprężonego powietrza. Myślę, że ten przykład może być przestrogą.

Prawidłowe projekty całych instalacji sprężonego powietrza – 50% potencjału zastosowania

Straty ciśnienia, to nie tylko za małe przekroje rurociągów. Bardzo częstym błędem jest budowanie sieci sprężonego powietrza szeregowo. To znaczy podłączania do głównej arterii kolejnych odbiorników. Często długość i przekrój tej arterii na początku jej istnienia odpowiadały jakimś standardom, ale poprzez ciągłe dołączanie do niej kolejnych odbiorników pobierających sprężone powietrze powodujemy, że przy tej samej sprężarce trudno jest zapewnić ostatnio dołączonym odbiornikom właściwe, wymagane ciśnienie. Podczas projektowania instalacji należy koniecznie brać pod uwagę straty ciśnienia na przepływie w rurociągu o określonej jego długości. Najbezpieczniej jest, gdy instalacja ma jednocześnie znany bezpiecznie duży przekrój i znaną długość, wtedy najprościej znaleźć kompromis dotyczący minimalizacji strat przesyłu powietrza. Efektywnie najlepiej, jeśli instalacja zamknięta jest w pierścień zwany czasem pętlą, wtedy ciśnienie w każdym punkcie rurociągu jest prawie jednakowe. Co więcej z racji „dwustronnego" zasilania punktu poprzez pętlę, w praktyce można to porównać z rurociągiem o takiej długości, ale o dwukrotnie większym przekroju.

Częstsze wymiany wkładów filtrów – 40% potencjału zastosowania

Jak się okazuje bardzo typowym błędem użytkownika jest uznanie, że raz zainstalowany filtr sprężonego powietrza będzie na zawsze oczyszczał powietrze z zanieczyszczeń stałych i olejowych. Rzeczywistość jest zupełnie inna. Otóż wkłady filtracyjne przeznaczone są do ich wymiany. Ten truizm może być obraźliwy dla użytkownika, ale w tak wielu przypadkach spotkałem się z kompletnym ignorowaniem wymiany wkładów, że poczuwam się do

przypomnienia tego użytkownikom sprężonego powietrza. Jak działa wkład? Jego filtracja jest na tyle skuteczna, na ile włókna materiału filtracyjnego zachowują wymagane rozstawy i odległości w celu przepuszczania cząstek tylko od określonej wielkości oraz tak długo jak zbierające się krople oleju na tymże materiale będą przenikając poprzez te włókna agregować się w większe krople aż do momentu gdy będą mogły być oddzielone i usunięte razem z kondensatem. Jeżeli włókna zabrudzą się zbytnio i skleją, to dojdzie w pewnym momencie do rozerwania wkładu na skutek zbyt dużej różnicy ciśnień działających na wkład przed i za filtrem. Wtedy na manometrze różnicowym filtra widać, że nie stawia on żadnego oporu. Może to bardzo zmylić użytkownika, bo ten filtr już niczego nie oczyszcza, a najczęściej użytkownikowi wydaje się, że wkład jest po prostu czysty i dopóki zanieczyszczenia nie pojawią się wyraźnie w urządzeniach odbiorczych są rozprowadzane w rurociągach. Może także dojść do rozepchnięcia włókien filtracyjnych na skutek ich mechanicznego zużycia i efekt będzie bardzo podobny. Ważne, aby znać ten mechanizm i utrzymywać podstawowe standardy. Mechanizm zanieczyszczania się klasycznego filtra koalescencyjnego jest taki, że spadek ciśnienia rośnie na nim powoli do wartości 0,3 – 0,5 bar, a po jej osiągnięciu zaczyna rosnąć nieomalże w wykładniczym tempie. Jeśli osiąga 1 bar spadku, to z wyżej opisanych zależności już wiemy, że powoduje to straty około 7% pobieranej do produkcji powietrza energii. Gorsze, że w chwilę po osiągnięciu trudnej do określenia dla każdego filtra wartości spadku ciśnienia, te wkłady najczęściej się po prostu rozrywają. Dlatego warto utrzymywać standard polegający na wymianie wkładów w filtrach przynajmniej raz w roku lub gdy spadek ciśnienia osiągnie około 0,4 bar. Z łatwością można tę stratę na filtrze poprzeć przykładem pochodzącym od użytkownika, który był powyżej opisany. U niego był także nie wymieniony wkład ze spadkiem ciśnienia 0,4 bar, jeśli pod uwagę weźmiemy 130 kW mocy zainstalowanej, 250 dni, dalej zakładając wyżej wskazywane 7% strat energii na 1 bar i koszt energii 0,36 zł/kW – mamy straty na poziomie 3,64 kW x 0,36 zł/kWh = 1,3104 zł na każdą godzinę pracy. Jeśli założymy, że pracują tylko 250 dni w roku przez 20 h na dobę, to takie straty sięgną 1,3104 zł x 250 x 20 h = 6 552 zł na rok. Jeżeli wkład kosztuje 1 300 zł, to oszczędzanie na jego wymianie nie wydaje się rozsądne.

Kolejne kroki dotyczą już obszaru produkcji powietrza:

Unowocześnianie sprężarek – 30% potencjału zastosowania

Unowocześnianie może z pozoru wyglądać na pojęcie zbyt szerokie, a nie konkretne. Jednak w praktyce oczywiście kryją się za tym konkretne posunięcia. Unowocześnianie ma nie tylko polegać na zamianie sprężarek starszych na nowsze, ale na tym, aby ta wymiana poprzedzona dobrym audytem dała efekt energetyczny i poprawę niezawodności. Chodzi o to, żeby po modernizacji stosować sprężarki dobrane jak najlepiej do profilu poboru sprężonego powietrza oraz żeby były to sprężarki, które są nie tylko elastycznie regulowane, ale także sterowane. Jeżeli chodzi o dobór sprężarek, to zakładając, że użytkownik kieruje się

wnioskami z audytu i że, doboru urządzeń dokonuje przy pomocy eksperta, to poza tym dobrze jest kierować się kryteriami opisanymi poniżej, to znaczy, aby sprężarki miały najelastyczniejszy do danego zastosowania system regulacji wydajności, np. poprzez stosowanie napędów zmiennoobrotowych, układów z przełączanymi biegunami (silniki 2-biegowe) lub systemów regulacji wydajności poprzez aktywną zmianę objętości komory sprężania. Ważnym kryterium jest także stosowanie silników elektrycznych o wysokiej sprawności. Mówiąc natomiast o sterowaniu, myślę o nadrzędnych układach załączania i wyłączania sprężarek w zależności od mierzonych w sposób ciągły rzeczywistych potrzeb sieci oraz o monitoringu urządzeń, co umożliwia także ciągłe śledzenie stanu urządzeń, uzyskiwanie informacji o nadchodzącym czasie obsługi oraz informacje o awariach.

Napędy zmiennoobrotowe – 25% potencjału zastosowania

To bardzo „modne" obecnie sprężarki. Czasem niestety stosowane bez dobrej wcześniejszej analizy. Warto więc poświęcić im troszkę więcej miejsca. W związku ze znacznym rozpowszechnieniem technologii przetwornic częstotliwości, czyli tyrystorowych układów zmiany prędkości obrotowej silników elektrycznych umożliwiających dopasowywanie prędkości silnika napędowego do warunków wynikających z danych o układzie sterowanym, Od ponad 10 lat możliwe jest także wykorzystanie tej technologii w sterowaniu wydajnością sprężarek śrubowych. Jest to układ rzeczywiście rewolucyjny, bo umożliwia praktycznie proporcjonalną regulację wydajności sprężarki śrubowej, w szerokim jej zakresie.
Jak to działa? Poprzez interfejs systemu sterowania zadajemy wymagane w sieci ciśnienie lub wąski jego zakres, silnik sprężarki pracuje na pełnych obrotach aż nie osiągnie wartości próbkowania – możliwie blisko zadanego ciśnienia. Od tego momentu zaczyna się analiza jak bardzo można zmniejszyć wydajność (czytaj – dla przetwornicy – obroty silnika), żeby pozostać w pewnym zakresie lub przy stałej wartości. Sterownik sprężarki analizuje możliwe najniższe obroty zapewniające wymagane ciśnienie a następnie obniża obroty i prawie proporcjonalnie pobieraną moc sprężarki. Wtedy wydajność i moc są dopasowane do rzeczywistych potrzeb sieci sprężonego powietrza. W tej sytuacji można w praktyce wyeliminować tzw. bieg luzem, na który sprężarka stało-obrotowa przechodzi po osiągnięciu górnej wartości nastawionego ciśnienia. Taki bieg luzem po zsumowaniu dłuższego okresu pracy sprężarki często stanowi 30 %, a nawet 60 % czasu łącznego jej pracy. Należy przy tym pamiętać, że podczas pracy na biegu luzem, dając 0% wydajności sprężarki śrubowe w zależności od typu zastosowanego zaworu ssawnego i kompensacji próżni powstałej w jego czasie, pobierają około 18 % do 40 % mocy znamionowej agregatu sprężarkowego. Spotkałem się w bardzo tanich sprężarkach z sytuacją, że pobierały one na biegu luzem nawet do 50% mocy nominalnej. Tolerancja normy PN - ISO 1217 (zał. C), dopuszcza podawanie wartości poboru mocy na biegu luzem w zakresie +/-30% ! Warto więc robić co tylko możliwe, żeby sprężarki pracowały na luzie jak najmniej. Zaletą napędów zmiennoobrotowych jest możliwość zapewnienia sprężarce szerokiego zakresu regulacji

wydajności, nawet 20 – 100%. Ważne jest z drugiej strony, aby w całym zakresie tej regulacji wskaźnik jednostkowego poboru energii dla jednej sprężarki nie zmieniał się bardzo, bo efekt energetyczny nie koniecznie może w ten sposób być zgodny z oczekiwanym.

Wadą sprężarek zmiennoobrotowych jest specyficzne zachowanie układów olejowych podczas ich pracy. Otóż jeśli zdarzają się okresy w których sprężarka zmienno-obrotowa pracuje przy minimalnej wydajności, np. przez weekend, a w poniedziałek rano musi nagle zacząć dostarczać 100% wydajności, czasem dochodzi do nadmiernej emisji oleju. Dlaczego? Otóż nie jest to nadmierne zużycie oleju przez sprężarkę, czy też gwałtowny wyciek oleju pod ciśnieniem. Jest to zjawisko będące konsekwencją odkładania się, najczęściej w chłodnicy końcowej sprężonego powietrza, oleju, którego ilość jest taka sama jak podczas pracy przy pełnej wydajności. Procentowo jest go jednak więcej w stosunku do zmniejszonego strumienia, ale co ważne powietrze nie porywa go w sposób ciągły dalej za sprężarkę, tylko pod wpływem działającego ciągle przy swoich nominalnych obrotach wentylatora olej osadza się, w wewnętrznych kanałach lameli chłodnicy, a w niższych temperaturach olej ten w chłodnicy może zastygać. Natomiast jeśli w przysłowiowy poniedziałkowy ranek instalacja zażąda od sprężarki pracy ze 100% wydajnością – bardzo często wtedy właśnie „wypluwa" zgromadzony przez weekend olej. Bywa to odbierane przez użytkowników jako awaria sprężarki. Nie jest to awaria, natomiast jest to konsekwencja dodatkowych wymogów, które trzeba stawiać sprężarce zmiennoobrotowej, tzn. albo elastycznego systemu obiegu oleju, czy układu chłodzenia, ale z pewnością stosowania dobrze zwymiarowanych filtrów odolejających za takimi sprężarkami.

Zaletą tych sprężarek jest także sposób dokonywania rozruchu silnika sprężarki. Ze względu na układ tyrystorowy rozruch odbywa się „miękko" bez uderzeń prądowych, co ułatwia pracę instalacji zasilającej i jej zabezpieczeń. Wadą takich sprężarek jest ciągle cena, której wartość 25 – 50 % wyższa od sprężarki klasycznej, co często stanowi o konieczności wykonywania dokładnych obliczeń czasu zwrotu inwestycji poprzez zwrot zaoszczędzonych w ten sposób wydatków na energię.

Silniki elektryczne wysokiej sprawności – 25% potencjału zastosowania

Coraz więcej firm, zakładów produkcyjnych zwraca uwagę na to jakiego typu silniki elektryczne są stosowane w użytkowanych przez nie maszynach.

Instytucjami, które wspierały konkretne działania w tym względzie są miedzy innymi Fundacja Efektywnego Wykorzystania Energii, europejskie czy amerykańskie programy typu Motor Challenge. W ramach tych działań można było uzyskać dotacje na zakup nowych silników z wyższą sprawnością. Jeżeli silniki stosowane powszechnie mają średnio sprawność 89 – 91 %, a te nowszej generacji rzędu 93 – 96 %, to mówimy o oszczędnościach rzędu 4 do 5 %. Jeśli znów odniesiemy to do sprężarek o mocy około 130 kW (jak powyżej), to mówimy o oszczędnościach o ponad 5 kW. Jeśli założymy, ze taki silnik pracuje np. 6000 h na rok, to

przy cenie energii 0,36 zł/kWh możemy zaoszczędzić, stosując taki silnik, ponad 10 000 zł rocznie.

Stosowanie zaawansowanych systemów sterowania – 20% potencjału zastosowania

Zaawansowane systemy sterowania sprężarkownią opierają swoje działanie na dokładnym pomiarze zmiany ciśnienia w sieci, z możliwością zadania możliwie najwęższego zakresu jego regulacji oraz w związku z tym załączanie takiej ilości i wielkości sprężarek, która umożliwi utrzymanie tego ciśnienia przy pomocy jak najmniejszej ilości energii. Dobrze, jeśli można jednocześnie np. wyrównywać liczbę godzin pracy sprężarek. Równie ważną funkcją nadrzędnych sterowników jest dbałość o unikanie pracy sprężarek na biegu jałowym. Raczej wyłączanie większej sprężarki na korzyść mniejszej, aby tylko nie pracować na biegu luzem. Dodatkową zaletą nadrzędnych systemów sterowania jest możliwość transferu danych ze sterowanych w ten sposób sprężarek do synoptycznego programu śledzącego ważne bieżące parametry sprężarek, takie jak ciśnienie, temperatura, pobierany prąd, liczniki godzin, informacje obsługowe, informacje o alarmach i wyłączeniach. Taki system może także śledzić ciśnienie w sieci, wyliczać na podstawie podanych przez nas poszczególnych wydajności, łączną ilość powietrza produkowanego. Sterownik można też skorelować z przepływomierzem powietrza i rejestrować rzeczywiste zużycie powietrza notowane za zbiornikiem wyrównawczym sprężarkowni.

Odzysk ciepła odpadowego – 20% potencjału zastosowania

W związku z tym, że w procesie sprężania wydziela się bardzo dużo ciepła, każda sprężarka musi mieć układ chłodzenia. Ilość energii możliwej do odzyskania, to licząc metodami warsztatowymi około 2/3 mocy silnika zainstalowanego. Dokładniej, dla sprężarek chłodzonych powietrzem, do odzyskania jest z chłodnicy oleju 65 – 74 % ciepła w odniesieniu do mocy pobieranej przez sprężarkę na wale, a z chłodnicy końcowej sprężonego powietrza do 18% energii. W przypadku sprężarek chłodzonych cieczą, z chłodnicy oleju do dyspozycji jest do 77% ciepła, a z chłodnicy końcowej sprężonego powietrza do 20% mocy na wale. Wg specjalistów obliczających opłacalność stosowania takich systemów ich granica stosowalności, ze względu na koszty instalacji, zaczyna się mniej więcej od mocy zainstalowanej silnika sprężarki o wielkości 30 – 37 kW. Do dyspozycji mamy systemy odzysku ciepła z powietrza odbieranego za chłodnicą sprężarki lub ciepło z cieczy chłodzącej zza jej chłodnicy. Możliwe jest jeszcze rozwiązanie pośrednie, tzn. sprężarka chłodzona powietrzem z dodatkowym wymiennikiem ciepła chłodzonym cieczą w celu sezonowego lub okresowego odbioru i rekuperacji ciepła. W przypadku chłodzenia powietrznego najlepiej dobrze pokierować ciepłym powietrzem zza chłodnicy sprężarki tak, aby podgrzać położone blisko pomieszczenie lub technologię np. kanał ciepłego powietrza dla potrzeb suszarni lub lakierni. Należy jednak pamiętać o konieczności usunięcia ciepłego powietrza ze sprężarkowni w okresie letnim, bo większość sprężarek chłodzonych

powietrzem może normalnie pracować do temperatury 40^{o}C, dużo rzadziej do 45^{o}C. Transport ciepłego powietrza mający na celu podgrzewanie innych pomieszczeń czy też po prostu usunięcie go ze sprężarkowni musi uwzględniać dostępne za chłodnicą resztkowe spiętrzenie tego powietrza wynoszące zaledwie kilka do kilkudziesięciu mm słupa wody. Jeśli odcinek kanału transportującego jest zbyt długi w poziomie należy transport powietrza wspomóc wentylatorem odpornym na temperatury pracy do 50 – 60^{o}C montowanym w kanale.

W przypadku przebiegów pionowych transport wspomaga konwekcja ciepła i ciąg kominowy. Natomiast zlekceważenie zapewnienia skutecznego transportu tego powietrza powoduje tzw. „korki cieplne". Ciepłe powietrze przestaje się przemieszczać i zaczyna ogrzewać kanał wstecznie aż do chłodnicy, gdzie w końcu może dojść do takiego jego podgrzania, że temperatura wewnątrz sprężarki przekracza wartość zabezpieczeń automatyki, która ostatecznie doprowadzić może do wyłączenia awaryjnego sprężarki. Podobna sytuacja dzieje się gdy kanały są tak połączone, że wypływ z jednej sprężarki do kolektora głównego kanału blokuje dopływ z innej sprężarki. Wtedy będzie dochodzić jak powyżej do korków cieplnych. Dlatego najskuteczniejszym sposobem odprowadzenia ciepła są indywidualne kanały lub kanał kolektora z przepływem wspomaganym przez wentylator. W przypadku maszyn chłodzonych wodą czy np. mieszaniną wody z glikolem, skuteczność odzysku ciepła może być dużo większa. Dotyczy to nie tylko maszyn chłodzonych ogólnie cieczą, ale także tych z dobudowanym modułem odzysku ciepła do pracy okresowej. Taki wymiennik sprawdza się znakomicie w układach centralnego ogrzewania zimą, a latem sprężarka może być chłodzona powietrzem, jeśli natomiast potrzebna jest także ciepła woda użytkowa, to chłodnica powietrza pracuje tylko wtedy, gdy nie ma poboru ciepłej wody. Ważne jest zwrócenie uwagi użytkownika, że oba systemy muszą działać w automatyce, tak, aby zachować bezpieczeństwo pracy sprężarki, nawet kosztem braku odzysku ciepła, bo celem pracy sprężarki jest przecież dostarczanie sprężonego powietrza, a nie ciepłej wody.

Poprawa systemów chłodzenia, osuszania i filtracji – 10% potencjału zastosowania

Należy pamiętać, że większość sprężarek o mocy do 250 kW (do około 2 500 m^3/h), to maszyny chłodzone powietrzem. Należy im zapewnić ilość powietrza chłodzącego o temperaturze odpowiednio niższej niż temperatura w sprężarkowni w ilości większej od wydajności wentylatorów chłodzących sprężarek tam zainstalowanych. Układ czerpni powietrza umożliwiającej swobodne zasysanie sprężarek wewnątrz sprężarkowni musi zapewnić wlot powietrza do tego pomieszczenia w taki sposób, aby prędkość wlotu do czerpni wynosiła poniżej 2,5 m/s. To powietrze wentylacyjne powinno być czyste, możliwie wolne od zanieczyszczeń, a czerpnia winna być odpowiednio zabezpieczona przed zapyleniem. Dobrze, jeśli czerpnia ma żaluzje regulowane w zależności od temperatury panującej wewnątrz sprężarkowni. Jak wyżej wskazywałem ciepłe powietrze należy z pomieszczenia usunąć latem na zewnątrz a zimą do układu odzysku lub wprost do

podgrzewania innych pomieszczeń z uwzględnieniem recyrkulacji w sprężarkowni. W bilansie powietrza chłodzącego sprężarkowni należy uwzględnić także osuszacze chłodnicze, najczęściej przecież także chłodzone powietrzem.

Dopasowywanie właściwych urządzeń końcowych (odbiorczych) – 5% potencjału zastosowania

Za sprężone powietrze przemysłowe uznawane jest powszechnie powietrze o ciśnieniu 7 bar. Okazuje się jednak, że wiele urządzeń odbiorczych potrzebuje tego ciśnienia na poziomie 3 do 5 bar, rzadziej 6 bar. Dlatego wszystkie odbiorniki powinny być zasilane z sieci poprzez właściwe reduktory ciśnienia umożliwiające właściwą nastawę wymaganą przez odbiornik. Jeśli nie zachowa się tej zasady, wtedy niepotrzebnie zużywa się energię na sprężanie powietrza do zbyt wysokiego ciśnienia, co przecież kosztuje 7% energii za każdy 1 bar, a w ten sposób nie osiąga się nic więcej. Bo co można na przykład osiągnąć, jeśli docisk siłownika podczas operacji zgrzewania opakowania zwiększymy z zakładanych przez dostawcę maszyny 0,4 kN (przy 4 bar) do 0,7 kN (przy 7 bar)? Zgrzewanie i tak związane jest z ciepłem, a nie siłą docisku. Albo piaskując przy 8 – 9 bar zamiast zakładanych 7 bar – przy pozornej poprawie efektu, tracimy dużo więcej powietrza, materiału ściernego, ponadto rozkalibrowuje się dysza pistoletu do piaskowania. Takie powiększanie dyszy i tak spowoduje zmniejszenie prędkości przepływu, co u operatora wywoła potrzebę dodatkowego podniesienia ciśnienia i tak w kółko. Każda technologia realizuje swoje optymalne funkcje w warunkach zakładanych przez jej dostawcę. Najczęściej sprecyzowane są tam także parametry sprężonego powietrza, które czasem trzeba „podbić" doprężaczem, a czasem obniżyć reduktorem. Trzymając się tych reguł łatwiej oszczędzać energię.

Podsumowując potencjał możliwości oszczędzania w systemach sprężonego powietrza, należy skupić się najpierw na usunięciu wycieków, zadbać o poprawność przekroju i projektu instalacji sprężonego powietrza i zamknięcie jej w pętlę, dopilnowywać wymian filtrów i konserwacji urządzeń do uzdatniania sprężonego powietrza. Dopiero wtedy warto brać się za sprężarkownie i sprężarki. Uwrażliwić się na zbyt długie czasy pracy na biegu jałowym (powyżej 15-20% łącznego czasu pracy), bo wtedy przy zerowej wydajności sprężarki ciągle pobierają one energię. Należy poprawnie ustalić wartość ciśnienia, żeby ciśnienie robocze nastawione na sprężarkach nie było za wysokie w stosunku do potrzeb sieci, należy stosować dobre nadrzędne systemy regulacji układów wielosprężarkowych, dopilnować, aby zbiornik wyrównawczy nie był za mały.

Wszystko to dotyczyłoby samooceny jednorazowej, natomiast proces można ocenić jako efektywny podczas powtarzanych audytów. Jak to zrobić? Przede wszystkim monitorować swoje systemy. To znaczy mierzyć pobory sprężonego powietrza (przepływomierze) oraz mierzyć pobieraną przez sprężarki do tych celów zużytą energię elektryczną. Jeśli oba

parametry się rejestruje na tej samej osi czasu wtedy łatwo kontrolować bieżące nakłady na powietrze.

Warto także zadać sobie pytanie - czy osoby odpowiedzialne za sprężone powietrze w zakładzie wiedzą ile powietrza jest używane w poszczególnych technologiach, wydziałach, czy też częściach zakładu?

Jeśli nie wiedzą, to znaczy, że nie mają zbyt poważnych intencji dokonywać poprawy swoich systemów gospodarki energetycznej sprężonym powietrzem. Korzystając z materiałów komercyjnych jednej z firm oferujących przepływomierze można zacytować, że: „… jeśli 1 m^3/h sprężonego powietrza kosztuje w tym zakładzie rocznie około 360 zł przy stawce za energię elektryczną 0,35 zł/ kWh, to rurociąg o średnicy 2" przepuszcza (przy optymalnym spadku ciśnienia 0,1 bar na 100 m długości rurociągu) około 200 m^3/h powietrza, a taki przepływ wart jest około 72 000 zł rocznie!

Miernik dla średnicy rurociągu 2" kosztuje około 1 900 zł + VAT. Jeśli jeszcze odniesie się to kosztów wycieków, które tu wykrył, tzn. 10 000 zł rocznie, to łatwo dojść do wniosku, że warto mierzyć sprężone powietrze…".

Częstą praktyką w przemyśle jest przesyłanie przez rurociąg 2" nie 200, ale 400 m^3/h powietrza! W związku z tym ważność opomiarowania jeszcze raz chciałbym podkreślić.

6 Podstawowe wskazówki dla poprawnej eksploatacji układów sprężonego powietrza (konserwacje, monitoring).

Pierwszą wskazówką dla użytkownika powinna być konieczność przejścia właściwego przeszkolenia, zarówno tego wymaganego przepisami dotyczącego użytkowania sprężarek, ale i szkolenia prowadzonego przez dostawcę urządzenia umożliwiającego wyrobienie poprawnych zachowań rutynowych i awaryjnych w związku z eksploatacją sprężarki. Takie szkolenie większość dostawców zapewnia nieodpłatnie. Należy także zadbać, aby zabudowa sprężarkowni odbyła się także pod opieką specjalistów dostawcy w sposób umożliwiający odpowiednią wentylację pomieszczenia i chłodzenie urządzeń, a także wystarczającą ilość miejsca na wykonywanie czynności obsługowych lub remontowych. Zakładając, że ustawienie sprężarek, zbiornika, osuszaczy, filtrów, aparatury regulacyjnej i sterującej, a także urządzeń do zrzutu i uzdatniania kondensatu jest poprawna oraz, że instalacje sprężonego powietrza, wentylacji i chłodzenia, zasilania elektrycznego i kondensatu wykonane są prawidłowo, to po dokonaniu przez uprawnione osoby pierwszego rozruchu wg procedury zalecanej przez dostawcę, można rozpocząć normalną eksploatację urządzeń.

Na co należy zwrócić uwagę? Przede wszystkim na jakość powietrza wlatującego do sprężarkowni oraz tego, które zasysa sprężarka. Nie chodzi tylko o oczywiste wymagania związane z jego czystością i odpowiednia temperaturą, ale także o to, czy do sprężarkowni nie jest zasysane powietrze zawierające jakieś substancje zawierające związki chemiczne zmieniające własności oleju smarującego. Grozi to jego spienieniem i zatarciem sprężarki lub przekształceniem się oleju w rodzaj lakieru, który zapycha separator i układ olejowy, co także może doprowadzić do poważnej awarii. Zakładając jednak, że powyższe działania zapewniają normalną pracę sprężarki, należy zwracać uwagę na jej najważniejsze parametry takie jak temperatura i ciśnienie sprężania, licznik godzin oraz informacje obsługowe. Zanim opiszę szczegółowo zalecenia co do rutynowych czynności serwisowych, chciałbym uczulić użytkowników na kilka dodatkowych szczegółów. Mianowicie, większość sprężarek i osuszaczy chłodzona jest powietrzem. Tak jak bardzo słusznie przejmujemy się wymianami wkładów filtracyjnych obiegu powietrza i oleju sprężarki, tak w związku z powyższym chciałbym uczulić ich użytkowników na konieczność systematycznego czyszczenia chłodnic, skraplaczy i innych wymienników przez które przepływa powietrze. W takich zakładach jak np. drukarnia, zakłady drzewne i stolarskie, pomimo czystości hal produkcyjnych i dbałości o czystość w sprężarkowni, bardzo często spotykam się z tym, że sprężarka czy osuszacz ma problemy z uzyskiwaniem poprawnych parametrów, czy wręcz z alarmowymi wyłączeniami tylko dlatego, że nie czyści się w tych urządzeniach wymienników ciepła chłodzonych powietrzem. Dobrym przykładem mogą być drukarnie, które z racji na naturę swej produkcji są zakładami bardzo czystymi, ale niewidoczne zapylenie pyłem papierowym, które wentylator sprężarki „zaciąga” wręcz jak odkurzacz osadza się właśnie na chłodnicy. W zakładach gdzie wykonywane są operacje oczyszczania strumieniowego (piaskowanie,

śrutowanie itp.), czy też np. produkcji cementu, wapna i zapraw budowlanych zapylenie jest jeszcze bardziej szkodliwe. Warto także dbać o to, aby na zimę nie dostawało się do sprężarkowni zbyt wiele zimnego powietrza (w tym celu najlepiej recyrkulować do sprężarkowni część ciepłego powietrza zza chłodnic, aby temperatura powietrza zewnętrznego i recyrkulowanego zrównoważyły się), latem możliwie chłodnego powietrza musi być w sprężarkowni z pewnością dostatek. Warto także przed każdą z tych pór sprawdzić urządzenia, aby mogły pracować we właściwych w naszym klimacie warunkach. Znam z doświadczenia np. sytuacje, gdzie użytkownik wzywał serwis firmowy do swoich urządzeń tylko dlatego, że obsługa sprężarkowni nie usunęła zimowych zabezpieczeń, a w maju rozpoczęły się pierwsze upały. Użytkownik musiał zapłacić rachunek za własne niedopatrzenie czy niedbałość. W sprężarkowni warto zawsze dbać o skuteczność działania filtrów i spustów kondensatu. O filtry należy dbać dlatego, że bardzo często generują kosztowne starty ciśnienia łatwe i tanie do usunięcia, a przyjęcie rutyny systematycznej corocznej wymiany wkładów w zasadzie eliminuje ten problem. Spusty kondensatu czasem wymagają otwarcia i oczyszczenia z zastygłego, czasem wychłodzonego starego oleju, który ma tendencję do przekształcanie się w mazistą substancję blokującą swobodny przepływ oraz skutecznie zamykającą zawory. Spust kondensatu, który się nie otwiera, może doprowadzić np. do napełniania się zbiornika wyrównawczego wodą do takiego poziomu, że woda porywana jest do sieci odbiorczej przechodząc przez wszystkie filtry i osuszacze, bo one są przystosowane przecież do usuwania cząstek stałych, oparów i drobin oleju, a nie wprost fazy ciekłej. Żeby te urządzenia czyścić warto przewidzieć w sprężarkowni zawór ze szybkozłączką umożliwiający podłączenie pistoletu na sprężone powietrze do oczyszczania i odmuchiwania. W tabeli 6 zamieszczam zalecenia dotyczące obsługi serwisowej sprężarek.

Kontrola systemu odbywa się najskuteczniej jeśli wszystkie newralgiczne urządzenia pozwalają się monitorować, a wszystkie informacje z tym związane dadzą się „wyeksportować do jednego systemu synoptycznego pokazującego skuteczne funkcjonowanie sprężarkowni oraz sygnalizującego konieczność wykonywania serwisu urządzeń tam zainstalowanych. Jakie parametry warto monitorować? Jeżeli chodzi o sprężarki, warto monitorować temperaturę sprężania, ciśnienie robocze, prąd znamionowy pobierany przez urządzenie oraz informacje o statusie pracy, tzn. czy sprężarka pracuje pod obciążeniem czy na biegu luzem, czy jest wyłączona, wyłączona awaryjnie. Dobrze jest „wyciągnąć" ze sprężarki także informacje serwisowe, kiedy następny przegląd i kiedy był poprzedni oraz jakie są łączne stany licznika godzin pod obciążeniem i łącznie.

Idealnie, jeśli możemy monitorować i rejestrować ilość produkowanego powietrza i pobór energii przez sprężarkę. Wtedy możemy łatwo uzyskiwać bieżące wartości współczynnika jednostkowego poboru energii w (kWh/m^3).

W filtrach sprężonego powietrza urządzeniem monitorującym jest manometr lub czujnik różnicy ciśnień, dobrze ten sygnał monitorować, a jeśli przekroczy 0,35 bar powinien

załączyć się w związku z tym jakiś sygnał ostrzegawczy, a jeśli 0,4 bar, powinno to generować alarm sugerujący wymianę wkładu.
Z osuszacza, jeśli to tylko możliwe należy pobierać informację o punkcie rosy. Dla pracy każdego osuszacza ważna jest temperatura sprężonego powietrza na wlocie oraz temperatura otoczenia.

Tabela 6 Zalecenia eksploatacyjne dla sprężarek

Czynności	1	2	3	4	5	6	7	8
Sprawdzić alarmy, sygnalizację sterowania i podstawowe parametry w sterowniku	*							
Sprawdzić wycieki oleju i powietrza	*		*			*		
Sprawdzić mocowanie i dokręcenie przewodów zasilających silnika i połączeń elektrycznych w sprężarce		*	*					
Sprawdzić poziom oleju	*					*		
Sprawdzić funkcjonowanie spustu kondensatu filtra odśrodkowego i oczyścić filtra siatkowy go zabezpieczający	*		*			*		
Wyczyścić chłodnicę			*			*		
Wyczyścić wnętrze agregatu sprężarkowego			*		*	*		
Zmienić olej			*					
Sprawdzić działanie zaworu bezpieczeństwa					*			
Wymienić filtr wlotu i wylotu powietrza skrzynki elektrycznej			*		*	*		
Wymienić filtr ssawny			*					
Wymienić filtr oleju		*	*			*		
Sprawdzić wkład sprzęgła			*		*	*		
Sprawdzić napięcie i stan pasków klinowych								
Wymienić paski klinowe	Co 15 000 h							
Wymienić separator powietrza / oleju				*		*		
Wyczyścić przewód odsysający z separatora				*		*		
Nasmarować łożyska silnika***				*				
Wymienić uszczelnienia zaworu ssawnego i minimalnego ciśnienia - zwrotnego					*			
Wymienić elastyczne przewody oleju i powietrza						*	*	
Wymienić wkład sprzęgła							*	
Wymienić łożyska silnika**							*	
Wymienić uszczelnienia wału stopnia sprężającego							*	
Wymienić silnik i/ lub wentylator								*
Wykonać remont przetwornicy częstotliwości								*

1) Codziennie
2) Po pierwszych 100 h
3) Co 2 000-3 000 h
4) Co 3 000 do 6 000 h (w zależności od dostawcy i typu separatora)
5) Raz w roku
6) Gdy to konieczne
7) Co 20 000 h
8) Co 40 000 h

** żywotność łożysk silnika – około 20 000 h dla silników na 3 000 obr./min
żywotność łożysk silnika – około 40 000 h dla silników na 1 500 obr./min

*** łożyska typu zamkniętego w silniku zaleca się wymieniać co 8 000 – 10 000 h pracy przy ciągłym obciążeniu

Bardzo ważne jest także ciśnienie w centralnym punkcie sprężarkowi, czyli w zbiorniku. Jeśli jest możliwe monitorowanie ciśnienia w zbiorniku suchym i mokrym łatwo ustalić wielkość spadku ciśnienia wymagającą wymianę wkładów filtracyjnych. Dobrze jest także monitorować przepływ i ciśnienie w newralgicznych punktach, gniazdach, czy liniach produkcyjnych zakładu. Wtedy oprócz rutynowej kontroli procesów mamy także możliwość obserwacji wycieków, czy niekontrolowanego poboru, który można ustalić jako alarm w systemie synoptycznym. Ważne jest także, aby nie przesadzić z ilością monitorowanych sygnałów, ponieważ spowoduje to szum informacyjny oraz uniemożliwi użytkownikowi śledzenie naprawdę najważniejszych parametrów.

Uwagi dotyczące serwisu układów sprężonego powietrza

W pierwszej kolejności należy wskazać ważność monitoringu przepływu i ciśnienia sprężonego powietrza w układzie, bo to najszybciej pokazuje zachodzące niekorzystne zjawiska wycieków, awarii czy tez niekontrolowanego, niepożądanego zużycia. Jeśli takich punktów pomiarowych jest kilka i można w ten sposób zakład podzielić na strefy dające obraz sytuacji dla osoby go znającej, to można powiedzieć, że ma się pełną wiedzę o możliwościach i ograniczeniach swojej instalacji sprężonego powietrza.
Monitorując te parametry nie dość, że na bieżąco znamy swoje koszty, ale potrafimy określić, w którym miejscu w zakładzie dochodzi do nieoczekiwanych i niepożądanych sytuacji oraz w sposób ciągły dokonywać oceny efektywności swojego systemu sprężonego powietrza.
Przy samych odbiornikach należy dbać, aby powietrze przed nimi miało właściwą, wymaganą przez ich dostawcę jakość (suchość i zawartość oleju). Takie powietrze należy także przed niektórymi urządzeniami smarować specjalnym dla danego urządzenia olejem, przy pomocy specjalnych pneumatycznych naolejaczy. Do serwisu systemów należy także kontrola i wymiana uszczelnień maszyn pobierających powietrze. Do wykrywania źródeł wycieków najskuteczniejsze są czujniki ultradźwiękowe lub kamery na podczerwień.
Serwis urządzeń do produkcji i przygotowania powietrza, to zagadnienie szersze, w ramach, którego dużo czasu należałoby poświecić osobno sprężarkom, filtrom i osuszaczom. W takiej sytuacji – najlepiej kierować się instrukcjami i zaleceniami dostawców urządzeń. Natomiast w celu zasygnalizowania ważnych problemów chciałbym uczulić użytkowników na rzeczy najważniejsze. Szczegóły obsługi należy doprecyzować z dostawcami urządzeń.

7 Outsourcing sprężonego powietrza

Outsourcing jest obecnie uznawany w wielu firmach za korzystne narzędzie rozwiązywania problemów przedsiębiorstwa, czy jego infrastruktury. Oczywiście głównym argumentem, którym należy się przy tym kierować jest właśnie wymieniona wcześniej korzyść. Korzyść ta wynika często ze struktury własności danego podmiotu, sposobów i systemów opodatkowania, struktury kosztów czy też łącznego rachunku zakupu, utrzymania i amortyzacji środków trwałych.

W przypadku urządzeń do produkcji i przygotowania sprężonego powietrza outsourcing polega najczęściej na dzierżawie urządzeń na dłuższy lub krótszy okres czasu, albo na dostawach sprężonego powietrza produkowanego w zakładzie użytkownika. Czasem outsourcingiem określa się także leasing urządzeń, ale w świetle naszej rzeczywistości leasing jest raczej narzędziem pozyskiwania środków na inwestycje w środki trwałe.

Korzyści są oczywiście względne, bo właściciel zakupionych „normalnie" urządzeń nie może umniejszyć swojej podstawy opodatkowania o ich koszty zakupu, ale może amortyzować je wg ustalonego, przyjętego planu. Natomiast w przypadku outsourcingu nie musi ponosić kosztów inwestycji, z czym związane jest pozyskiwanie środków ze źródeł zewnętrznych lub wewnętrznych, nie musi ponosić kosztów pieniędzy pozyskanych na ten zakup, nie musi martwic się amortyzacją czy kosztami utrzymania urządzeń. Wszystkie koszty ma wliczone w kwotę dzierżawy czy opłaty. W konsekwencji taka opłata może być uznana za koszty uzyskania przychodu i obniżyć podstawę opodatkowania. W tym momencie inwestorowi, czy użytkownikowi pozostaje jeszcze dobre zdefiniowanie doboru urządzeń i w konsekwencji wielkość pobieranej przez nie energii, z czym wiążą się koszty energii zużywanej na pracę sprężarek z osprzętem. Jak wcześniej wskazywałem jest to najważniejszy element kosztowy i to właśnie ta sprawa powinna być głównym zmartwieniem firmy korzystającej z outsourcingu, dlatego, że około 2/3 kosztów produkcji sprężonego powietrza stanowi pobierana do tego celu energia.

Wracając więc do wymienionych 2 typów outsourcingu, w przypadku wynajmu urządzeń, comiesięczna opłata za dzierżawę oczywiście powinna zawierać wszystkie koszty eksploatacji i serwisu. Natomiast, aby koszty energii były pod kontrolą, należy bardzo precyzyjnie dokonać doboru sprężarek i dobrze jest, jeśli dostawca gwarantuje np. wskaźnik jednostkowego poboru energii, tzn. kWh energii zużywane jest na wyprodukowanie 1 m^3 sprężonego powietrza o wymaganym ciśnieniu i jakości.

Tak więc dzierżawa, to sytuacja, w której sami płacimy za energię i dobrze mieć wiedzę o relacji wielkości jej poboru w odniesieniu do ilości pobieranego powietrza. Dobrze jest mieć tę kwestię poprawnie zdefiniowaną. Podkreślam jeszcze raz chodzi o to ile kWh energii zużyjemy na pobranie danej ilości m^3 powietrza w danym okresie czasu zapotrzebowania. Nie chodzi tylko o energię potrzebną do wyprodukowania tego powietrza, ale energię przeliczaną

na zużycie powietrza, dlatego powyżej tak akcentowałem kwestię poprawnego doboru sprężarek.
Jeżeli chodzi natomiast o sprzedaż sprężonego powietrza produkowanego przez jego dostawcę w zakładzie jego odbiorcy, do rozważenia są 2 możliwości: jedna to opłata tylko za pobraną ilość m^3 powietrza i w tej kwocie rozliczenie także wszystkich kosztów serwisu, a druga, gdy użytkownik uiszczając opłatę za m^3 powietrza płaci także dodatkowo za energię do tych celów zużytą.
Podobnie jak z dzierżawą, dla obu przypadków sprzedaży sprężonego powietrza, należy precyzyjnie określić wskaźnik w kWh/m^3 przez strony umowy. Oczywiście najważniejszym tematem do zdefiniowania, jeśli powyższe dotyczące kwestii warunków brzegowych ilościowych i jakościowych są dobrze określone, jest rozliczenie ilości pobranych m^3 powietrza.
Najczęstszą metodą przyjętą do rozliczeń, to uznanie wyników fabrycznego testu wydajności sprężarki lub jej deklaracji zgodności za dokumenty gwarantujące jej wydajność, a następnie mnożenie określonej w ten sposób wydajności sprężarki wyrażonej w (m^3/h) przez ilość godzin pracy sprężarki pomiędzy okresami rozliczeniowymi.
Sprężarka śrubowa nie traci wydajności w czasie jej eksploatacji, w związku z tym do remontu modułu śrubowego lub wymiany go na inny można taką metodę uznawać za skuteczną. Inną metodą, bardziej bezstronną, jest oczywiście stosowanie przepływomierzy sprężonego powietrza opisanych w rozdziale 2 niniejszego Poradnika.

Wiele firm decyduje się na outsourcing. Ich system rachunku kosztów widocznie uznaje to za efektywne. Ważne jest też założenie pewnej świadomości rynkowej. Tak jak trudno określić jakie są wartości rynkowe średniego czynszu za wynajem sprężarki o jakiejś wydajności, tak rynek sprzedaży powietrza funkcjonuje dość otwarcie. W zależności od okresu zawieranej umowy na dostawy powietrza, wymagań jakościowych, ilości tego medium i innych czynników wskazywanych przez dostawców, wartości rynkowe dla zakupu powietrza bez energii wahają się na poziomie 10 – 30 zł za 1000 m^3 powietrza sprężonego do 7 bar w klasie 2.4.2, natomiast ceny wraz z energią dla tych warunków wynoszą 40 – 80 zł za 1000 m^3 sprężonego powietrza. Podane tu dane zakładają cenę energii na uśrednionym poziomie 0,3 zł/kWh energii elektrycznej.
Te wskaźniki warto weryfikować rzeczywistym kosztem produkcji sprężonego powietrza, który można sobie wyliczyć uzyskując od dostawcy informacje o koszcie zakupu, serwisu i danych o poborze energii. Na rynku dziś można taki koszt określić przy powyższych założeniach na poziomie łącznych kosztów 33 – 70 zł za 1000 m^3 powietrza sprężonego do ciśnienia 7 bar. Dlatego opłacalność czy korzyści wynikające z outsourcingu należy zawsze oceniać indywidualnie, za każdym razem podchodząc uważnie do analizy systemu produkcji, ale także poboru sprężonego powietrza.

8 Tablice

Tablica 1 Spadki ciśnienia na 100 m długości rurociągu przeliczone na jednostki metryczne wg danych publikowanych przez The Engineering Tool Box na stronie internetowej firmy Hitachi.

Średnica rurociągu	*Przepływ w (m^3/min)*	*Δp w (bar) na 100 m dł. rury przy 6,9 bar*	*Δp w (bar) na 100 m dł. rury przy 8,6 bar*
½"	0,28	0,090	0,068
	0,57	0,362	0,294
	0,85	0,769	0,633
	1,13	1,312	1,086
	1,42	2,036	1,674
	1,70	2,918	2,398
¾"	0,57	0,090	0,068
	1,42	0,475	0,407
	2,27	1,176	0,995
	2,83	1,878	1,583
	3,54	2,918	2,420
	4,25		3,144
1"	0,57	0,023	0,000
	1,42	0,136	0,113
	2,12	0,294	0,249
	2,83	0,520	0,430
	3,54	0,792	0,656
	4,25	1,154	0,950
	5,66	2,013	1,651
	7,08		2,556
1 ½"	2,12	0,034	0,023
	2,83	0,068	0,045
	3,54	0,090	0,045
	4,25	0,136	0,113
	5,66	0,226	0,181
	7,08	0,362	0,294
	8,50	0,520	0,430
	11,33	0,905	0,724
	14,16	1,402	11,537
	16,99	1,991	1,629
	19,82	2,692	2,217
	22,65		2,895

Średnica rurociągu	*Przepływ w (m^3/min)*	*Δp w (bar) na 100 m dł. rury przy 6,9 bar*	*Δp w (bar) na 100 m dł. rury przy 8,6 bar*
2”	2,83		
	4,25	0,045	0,023
	5,66	0,068	0,045
	7,08	0,090	0,090
	8,50	0,136	0,113
	11,33	0,249	0,204
	14,16	0,385	0,317
	16,99	0,543	0,452
	22,65	0,950	0,769
	28,32	1,470	1,199
	35,40	2,262	1,878
	42,48		2,692
2 ½”	4,25		
	5,66	0,023	
	7,08	0,045	0,023
	8,50	0,068	0,045
	11,33	0,113	0,090
	14,16	0,090	0,136
	16,99	0,226	0,181
	22,65	0,385	0,317
	28,32	0,611	0,430
	35,40	0,950	0,792
	42,48	1,335	1,086
	56,63	2,330	1,923
	70,79		3,009
3’’	8,50		
	14,16	0,045	0,045
	21,24	0,113	0,090
	28,32	0,181	0,158
	42,48	0,430	0,339
	56,63	0,746	0,611
	70,79	1,154	0,950
	84,95	1,674	1,154
	99,11	2,285	1,878
	113,27	2,963	2,443
	127,43		3,076

Średnica rurociągu	***Przepływ w (m^3/min)***	***Δp w (bar) na 100 m dł. rury przy 6,9 bar***	***Δp w (bar) na 100 m dł. rury przy 8,6 bar***
4"	21,24	0,023	
	28,32	0,045	0,045
	42,48	0,113	0,090
	56,63	0,181	0,158
	70,79	0,294	0,249
	84,95	0,407	0,339
	113,27	0,724	0,588
	141,58	1,131	0,927
	169,90	1,606	1,538
	198,22	2,194	1,787
	226,53	2,873	2,330

Tablica 2 Spadki ciśnienia na 100 m długości rurociągu obliczone wg program „Flow calculator” firmy Parker Legris

Wydajność (m^3/min)	Wydajność (Nm^3/min)*	Wydajność (m^3/h)	Wydajność (Nm^3/h)*	ø25		ø40		ø63		ø76		ø100	
				Spadek ciśnienia (bar)	Prędkość przepływu (m/s)	Spadek ciśnienia (bar)	Prędkość przepływu (m/s)	Spadek ciśnienia (bar)	Prędkość przepływu (m/s)	Spadek ciśnienia (bar)	Prędkość przepływu (m/s)	Spadek ciśnienia (bar)	Prędkość przepływu (m/s)
1	0,926314	60	55,57882	0,13	5,17								
1,5	1,38947	90	83,36822	0,27	7,75								
2	1,852627	120	111,1576	0,46	10,33	0,04	3,65						
2,2	2,03789	132	122,2734	0,55	11,36	0,04	4,02						
2,8	2,593678	168	155,6207	0,86	14,46	0,07	5,11						
3,3	3,056835	198	183,4101	1,18	17,05	0,09	6,03						
4	3,705254	240	222,3153	1,71	20,66	0,13	7,3						
4,8	4,446305	288	266,7783			0,18	8,77						
5	4,631568	300	277,8941			0,19	9,13						
5,4	5,002093	324	300,1256			0,22	9,86						
6,3	5,835776	378	350,1465			0,3	11,51	0,03	4,52				
7,8	7,225246	468	433,5148			0,44	14,24	0,04	5,6				
8,5	7,873666	510	472,4199			0,52	15,52	0,05	6,1				
10	9,263136	600	555,7882			0,72	18,26	0,07	7,18				
12	11,11576	720	666,9458			1,02	21,91	0,1	8,62				
13	12,04208	780	722,5246			1,19	23,74	0,11	9,36				
14	12,96839	840	778,1034			1,37	25,57	0,13	10,06				
15	13,8947	900	833,6822					0,15	10,77				
16	14,82102	960	889,2611					0,17	11,49				
17	15,74733	1020	944,8399					0,19	12,21				
18	16,67364	1080	1000,419					0,21	12,93				
19	17,59996	1140	1055,998					0,23	13,65				
20	18,52627	1200	1111,576					0,26	14,36				
21	19,45259	1260	1167,155					0,28	15,08				
22	20,3789	1320	1222,734					0,31	15,8				
23	21,30521	1380	1278,313					0,34	16,52				
24	22,23153	1440	1333,892					0,36	17,24	0,13	11,26		

Wydajność (m^3/min)	Wydajność (Nm^3/min)*	Wydajność (m^3/h)	Wydajność (Nm^3/h)*	ø25		ø40		ø63		ø76		ø100	
				Spadek ciśnienia (bar)	Prędkość przepływu (m/s)	Spadek ciśnienia (bar)	Prędkość przepływu (m/s)	Spadek ciśnienia (bar)	Prędkość przepływu (m/s)	Spadek ciśnienia (bar)	Prędkość przepływu (m/s)	Spadek ciśnienia (bar)	Prędkość przepływu (m/s)
25	23,15784	1500	1389,47					0,39	17,96	0,14	11,73		
26	24,08415	1560	1445,049					0,42	18,67	0,15	12,2		
27	25,01047	1620	1500,628					0,46	19,39	0,16	12,67		
28	25,93678	1680	1556,207					0,49	20,11	0,17	13,41		
29	26,86309	1740	1611,786					0,52	20,83	0,18	13,61		
30	27,78941	1800	1667,364							0,19	14,07		
31	28,71572	1860	1722,943							0,2	14,54		
32	29,64204	1920	1778,522							0,22	15,01		
33	30,56835	1980	1834,101							0,23	15,43		
34	31,49466	2040	1889,68							0,24	15,95		
35	32,42098	2100	1945,259							0,26	16,42		
36	33,34729	2160	2000,837							0,27	16,89		
37	34,2736	2220	2056,416							0,29	17,36		
38	35,19992	2280	2111,995							0,3	17,83		
39	36,12623	2340	2167,574							0,32	18,3	0,07	10,24
40	37,05254	2400	2223,153							0,33	18,77	0,08	10,5
41	37,97886	2460	2278,731							0,35	19,24	0,08	10,76
42	38,90517	2520	2334,31							0,36	19,7	0,08	11,02
43	39,83149	2580	2389,889							0,38	20,17	0,09	11,29
44	40,7578	2640	2445,468									0,09	11,55
45	41,68411	2700	2501,047									0,1	11,81
46	42,61043	2760	2556,626									0,1	12,07
47	43,53674	2820	2612,204									0,11	12,34
48	44,46305	2880	2667,783									0,11	12,6
49	45,38937	2940	2723,362									0,11	12,86
50	46,31568	3000	2778,941									0,12	13,12

Wydajność (m^3/min)	Wydajność (Nm^3/min)*	Wydajność (m^3/h)	Wydajność (Nm^3/h)*	ø25		ø40		ø63		ø76		ø100	
				Spadek ciśnienia (bar)	Prędkość przepływu (m/s)	Spadek ciśnienia (bar)	Prędkość przepływu (m/s)	Spadek ciśnienia (bar)	Prędkość przepływu (m/s)	Spadek ciśnienia (bar)	Prędkość przepływu (m/s)	Spadek ciśnienia (bar)	Prędkość przepływu (m/s)
51	47,24199	3060	2834,52									0,12	13,39
52	48,16831	3120	2890,098									0,13	13,65
53	49,09462	3180	2945,677									0,13	13,91
54	50,02093	3240	3001,256									0,14	14,17
55	50,94725	3300	3056,835									0,14	14,44
56	51,87356	3360	3112,414									0,15	14,7
57	52,79988	3420	3167,993									0,15	14,96
58	53,72619	3480	3223,571									0,16	15,22
59	54,6525	3540	3279,15									0,16	15,49
60	55,57882	3600	3334,729									0,17	15,75
61	56,50513	3660	3390,308									0,17	16,01
62	57,43144	3720	3445,887									0,18	16,27
63	58,35776	3780	3501,465									0,18	16,53
64	59,28407	3840	3557,044									0,19	16,8
65	60,21038	3900	3612,623									0,2	17,06
66	61,1367	3960	3668,202									0,2	17,32
67	62,06301	4020	3723,781									0,21	17,58
68	62,98933	4080	3779,36									0,21	17,85
69	63,91564	4140	3834,938									0,22	18,11
70	64,84195	4200	3890,517									0,23	18,37
71	65,76827	4260	3946,096									0,23	18,63
72	66,69458	4320	4001,675									0,24	18,9
73	67,62089	4380	4057,254									0,24	19,16
74	68,54721	4440	4112,832									0,25	19,42
75	69,47352	4500	4168,411									0,26	19,68

Wydajność (m^3/min)	Wydajność (Nm^3/min)*	Wydajność (m^3/h)	Wydajność (Nm^3/h)*	ø25		ø40		ø63		ø76		ø100	
				Spadek ciśnienia (bar)	Prędkość przepływu (m/s)	Spadek ciśnienia (bar)	Prędkość przepływu (m/s)	Spadek ciśnienia (bar)	Prędkość przepływu (m/s)	Spadek ciśnienia (bar)	Prędkość przepływu (m/s)	Spadek ciśnienia (bar)	Prędkość przepływu (m/s)
76	70,39983	4560	4223,99									0,26	19,95
77	71,32615	4620	4279,569									0,27	20,21
78	72,25246	4680	4335,148									0,28	20,47
79	73,17877	4740	4390,726									0,28	20,73
80	74,10509	4800	4446,305									0,29	21
81	75,0314	4860	4501,884									0,3	21,26
82	75,95772	4920	4557,463									0,31	21,52
83	76,88403	4980	4613,042									0,31	21,78
84	77,81034	5040	4668,621									0,32	22,05
85	78,73666	5100	4724,199									0,33	22,31

* Wydajność z FAD przeliczona przy uwzględnieniu temperatury otoczenia 20^{o}C, 1 bar, 0% na Nm^3 (0^{o}C, 1 bar)

9 Wykaz wybranych norm dotyczących zagadnień z zakresu sprężarek

PN-ISO 1217:1999 Sprężarki wyporowe. Próby odbiorcze
PN-ISO 3857-1:2001 Sprężarki, narzędzia i maszyny z napędem pneumatycznym Terminologia. Część 1: Terminologia ogólna.
PN-ISO 3857-2:2001 Sprężarki, narzędzia i maszyny z napędem pneumatycznym. Terminologia. Część 2: Sprężarki
PN-ISO 3857-3:1996 Sprężarki, narzędzia i maszyny z napędem pneumatycznym. Terminologia. Narzędzia i maszyny z napędem pneumatycznym
PN-ISO 6743-3:2009 Środki smarowe, oleje przemysłowe i produkty podobne (klasa L). Klasyfikacja. Część 3: Grupa D (Sprężarki).
PN-ISO 7183-2:1998 Osuszacze sprężonego powietrza. Eksploatacyjne dane znamionowe.
PN-ISO 8573-1:1995 Sprężone powietrze ogólnego stosowania - Zanieczyszczenia i klasy czystości
PN-ISO 8573-2:2000 Sprężone powietrze ogólnego stosowania - Metody badań stosowane do określania zawartości oleju w postaci aerozolu
PN-ISO 8573-3:2001 Sprężone powietrze - Część 3: Metody badań stosowane do pomiaru wilgotności
PN-EN 1012-1:1999/Ap1:2002 Sprężarki i pompy próżniowe. Wymagania bezpieczeństwa. Sprężarki.
PN-M-04600:1972 Przemysłowe sprężarkowe urządzenia chłodnicze. Metody badań
PN-M-43100:1989 Sprężarki. Podział
PN-M-43108:1996 Sprężarki tłokowe. Zawory samoczynne indywidualne płytkowe. Wymagania i badania
PN-M-43109:1996 Sprężarki tłokowe. Cylindry z żeliwa i staliwa. Wymagania i badania
PN-M-43111:1983 Sprężarki. Wartości ciśnień nominalnych
PN-M-43200:1989 Osuszacze sprężonego powietrza. Wymagania i badania
PN-M-46595-01:1973 Przenośniki pneumatyczne. Urządzenia do oczyszczania sprężonego powietrza - Podział i określenia
PN-M-46595-02:1973 Przenośniki pneumatyczne. Urządzenia do oczyszczania sprężonego powietrza. Parametry podstawowe
PN-EN ISO 13631:2009 Przemysł naftowy i gazowniczy. Zespolone tłokowe sprężarki gazowe.
PN-EN ISO 10440-2:2005 Przemysł naftowy i gazowniczy. Sprężarki wyporowe typu obrotowego. Część 2: Sprężarki powietrza o zwartej budowie (bezolejowe).
PN-EN ISO 10440-1:2008 Przemysł naftowy, petrochemiczny i gazowniczy. Sprężarki wyporowe obrotowe. Część 1: Sprężarki stosowane w procesach technologicznych (bezolejowe) (oryg.).

PN-EN ISO 10439:2003 Przemysł naftowy, chemiczny i gazowniczy. Sprężarki wirowe (oryg.).

PN-EN 14511-1:2009 Klimatyzatory, ziębiarki cieczy i pompy ciepła ze sprężarkami o napędzie elektrycznym, do grzania i ziębienia. Część 1: Terminy i definicje

PN-EN 14511-2:2009 Klimatyzatory, ziębiarki cieczy i pompy ciepła ze sprężarkami o napędzie elektrycznym, do grzania i ziębienia. Część 2: Warunki badań

PN-EN 14511-3:2008/AC:2008 Klimatyzatory, ziębiarki cieczy i pompy ciepła, ze sprężarkami o napędzie elektrycznym, do grzania i ziębienia. Część 3: Metody badań (oryg.)

PN-EN 14511-4:2008 Klimatyzatory, ziębiarki cieczy i pompy ciepła, ze sprężarkami o napędzie elektrycznym, do grzania i ziębienia. Część 4: Wymagania (oryg.)

10 Słownik używanych w poradniku pojęć technicznych

Adsorbent – materiał wkładu osuszacza adsorpcyjnego zwany czasem desykantem składający się z granulek substancji aktywnej powierzchniowo, która pochłania wilgoć do swoich porów często generując podczas tego procesu ciepło odpadowe. Np. granulat tlenku glinu lub tlenku krzemu

Automatyczny spust kondensatu – zawór umożliwiający automatyczną czynność otwierania go w celu usunięcia skroplin wody z filtra, osuszacza, separatora czy zbiornika sprężonego powietrza

Biogaz – mieszanina gazów będąca efektem rozkładu substancji organicznych typu odpady rolnicze czy ścieki. Zawiera najczęściej dużą ilość metanu i gazów palnych umożliwiających spalanie w specjalnych kotłach, wykorzystanie jako paliwo w silnikuspalinowym lub doprężenie w celu zasilenia turbiny gazowej

Butle z powietrzem – specjalne pojemniki ciśnieniowe umożliwiające napełnianie ich powietrzem sprężonym nawet do 350 bar w celu zmagazynowania jego dużej ilości w małej objętości, aby użyć go do celów oddechowych dla płetwonurków czy w szpitalach. Butle napełniane są powietrzem ze specjalnych bezolejowych sprężarek wysokociśnieniowych zwanych „oddechowymi" lub też tzw. powietrzem syntetycznym będącym mieszaniną tlenu i azotu

Chłodnica międzystopniowa - wymiennik ciepła, stosowany do schładzania sprężonego powietrza opuszczającego stopień sprężający w celu przesłania go na kolejny stopień sprężania z niższą temperaturą, aby podnieść sprawność ogólną procesu. Temu procesowi chłodzenia zwykle towarzyszy wydzielanie skroplin wilgoci, dlatego za każdą chłodnicą sprężonego powietrza powinno stosować się oddzielacze skroplin (zwane drenami lub spustami kondensatu)

Chłodnica końcowa – wymiennik ciepła, stosowany do schładzania sprężonego powietrza opuszczającego sprężarkę. Temu procesowi chłodzenia także towarzyszy wydzielanie skroplin wilgoci, dlatego za chłodnicą końcową powinno stosować się oddzielacze skroplin.

Ciśnienie atmosferyczne – wartość ciśnienia otoczenia zmierzona w określonych warunkach miejsca i jego położenia i wysokości nad poziomem morza

Ciśnieniowy punkt rosy – wartość temperatury sprężonego powietrza odpowiadająca dla danego ciśnienia zawartej w nim wilgoci – w zależności od warunków zasysania strumienia powietrza

Dławienie na ssaniu – jedna z metod regulacji wydajności poprzez zmniejszanie wielkości króćca ssawnego sprężarki poprzez różnego rodzaju zawory, klapy, zasuwy czy łopatki kierownicze

Dobór sprężarki – porównanie wydajności i charakterystyk regulacyjnych dostępnych modeli sprężarek z przebiegiem zmienności poboru sprężonego powietrza w czasie umożliwiające wybranie właściwej 1 lub kilku sprężarek najlepiej dopasowanych do optymalnego poboru co do jego wartości maksymalnej oraz wartości pośrednich. W ten sposób działając należy dążyć do zapewnienia niezawodnego dostarczania sprężonego powietrza o wymaganych parametrach przy minimalnym poborze energii na to zużywanym.

Film olejowy - ultra cienka warstwa oleju zapewniająca podczas pracy brak kontaktu metalicznego pomiędzy powierzchniami smarowanymi w ten sposób olejem

Generacja azotu i tlenu – separacja sprężonego powietrza na jego 2 główne składniki przy pomocy generatorów typu membranowego lub z zastosowaniem metody adsorpcyjnej ze zmiennym ciśnieniem, czy też kriogenicznie

Inicjalny spadek ciśnienia dla czystego wkładu suchego – deklarowana przez producenta wartość spadku ciśnienia na nowym, nie używanym wkładzie filtra sprężonego powietrza. Z racji krótkotrwałości takiego stanu pracy filtra, jest to wartość bardzo mało przydatna do obliczeń czy projektowania sieci lub doboru urządzeń, gdzie w grę wchodzi ocena wartości końcowej ciśnienia roboczego

Inicjalny spadek ciśnienia dla czystego wkładu mokrego – rzadko deklarowana przez producentów wartość spadku ciśnienia na nowym wkładzie filtra sprężonego powietrza na początku jego pracy. Jest to wartość bardzo przydatna do obliczeń czy projektowania sieci lub doboru urządzeń, gdzie w grę wchodzi ocena wartości końcowej ciśnienia roboczego

Kąpiel galwaniczna – technologia galwaniczna umożliwiająca trawienie, płukanie czy też nakładanie różnych substancji na elementy metaliczne poprzez zanurzenie ich we właściwym roztworze wzruszanym przy pomocy drobno-pęcherzykowego sprężonego powietrza o niewielkim ciśnieniu – podobnie jak w napowietrzaniu ścieków

Kolektor główny – rurociąg przesyłający całość sprężonego powietrza w lub ze sprężarkowni w celu jego rozdziału na poszczególne odnogi lub rozprowadzenia w pierścień zamknięty. Często także jest to rurociąg dostarczający sprężone powietrza do całości zakładu biegnący wzdłuż obiektów wymagających zasilania sprężonym powietrzem.

Komora sprężania – przestrzeń, w której w sprężarkach wyporowych zmniejszana jest objętość sprężanego powietrza – tzn. np. przestrzeń cylindra zamykana tłokiem (objętość skokowa), część korpusu sprężarki śrubowej kończąca się portem wylotowym, pozycja rotora sprężarki łopatkowej z najmniejszą objętością zamkniętą pomiędzy łopatkami, rotorem i korpusem itp.

Koszt jednostkowej produkcji powietrza – koszt produkcji 1 m^3 sprężonego powietrza uwzględniający łącznie koszty zakupu i inwestycji sprężarki, jej koszty instalacji, eksploatacji oraz pobieranej energii w czasie jej pracy odniesione do ilości m^3 wyprodukowanych w tym czasie.

Króciec ssawny – wlot powietrza do sprężarki – miejsce rozpoczęcia procesu sprężania

Malowanie natryskowe mokre – sposób nakładania powłok lakierniczych przy pomocy energii odpowiednio uzdatnionego sprężonego powietrza

Malowanie natryskowe suche - sposób nakładania powłok lakierniczych przy pomocy energii odpowiednio uzdatnionego sprężonego powietrza oraz wytworzenia odpowiedniego pola elektrostatycznego umożliwiającego właściwe przyleganie powłoki do pokrywanej powierzchni

Manometr – mechaniczne urządzenie do pomiaru ciśnienia, najczęściej typu zegarowego

Maszyny procesowe – tak zwane są często sprężarki znajdujące się w ciągu technologicznym produkcji chemicznej, najczęściej sprężające rzadko stosowane gazy wymagane dla danego procesu chemicznego

Metody normatywne pomiaru – czy dotyczy to pomiaru przepływu czy pomiarów odbiorczych sprężarek, jako metody normatywne uznaje się metody zalecane przez właściwe normy, np. pomiarem przepływu normatywnym jest pomiar wykorzystujący metody kryzowe, zwężkowe czy rurek spiętrzających.

Napowietrzanie ścieków – technologia wykorzystująca aeratory generujące w ściekach drobne pęcherzyki powietrza po zasileniu ich sprężonym powietrzem o właściwym ciśnieniu powyżej wartości wysokości lustra ścieków. Umożliwia to intensywna natlenianie substancji zawartych w ściekach i przyspieszanie ich oczyszczania poprzez intensyfikację działania bakterii tlenowych.

Oczyszczanie strumieniowe – usuwanie zanieczyszczeń, korozji lub niechcianych powłok lakierniczych przy pomocy substancji o wysokim współczynniku tarcia powodującym takie oczyszczanie przy dużej prędkości styku jej strumienia z oczyszczaną powierzchnią. Substancje oczyszczające typu specjalnych piasków, korundów czy suchego lodu rozpędzane są w specjalnych urządzeniach zasilanych energia sprężonego powietrza.

Odśrodkowy filtr usuwający skropliny – filtr oddzielający skropliny wody ze sprężonego powietrza montowany zwykle za chłodnicami i osuszaczami sprężonego powietrza. Oddzielenie skroplin następuje przez wprowadzenie strumienia zawilgoconego sprężonego powietrza w zawirowanie dzięki specjalnej kierownicy, co powoduje odrzucenie siłą odśrodkową skroplin na ścianki filtra oraz dalej spłynięcie wody na dno filtra, gdzie usuwa ją automatyczny zawór spustowy

Odzysk ciepła ze sprężarek – polega na transporcie ciepłego powietrza zza chłodnicy powietrza w celu podgrzewania pomieszczeń nieodległych od sprężarek lub odzysk ciepła z cieczy chłodzącej sprężarkę – np. wody do celów podgrzewania ciepłej wody sanitarnej lub centralnego ogrzewania

Paszport zbiornika i zaworu bezpieczeństwa – dokumenty urządzeń ciśnieniowych wystawiane przez producenta na podstawie dokumentacji projektowej i obliczeniowej – potwierdzana przez deklarację zgodności CE lub przez Urząd Dozoru Technicznego

Pistolet odmuchowy – ręczne narzędzie pneumatyczne zapewniające prędkość wypływu sprężonego powietrza właściwą do podstawowych czynności zdmuchiwania i oczyszczania powierzchni. Zaleca się, aby pistolety takie wyposażone były w specjalne dysze wylotowe zapewniające minimalne straty energii, a właściwą prędkość wypływu powietrza.

Powietrze atmosferyczne – mieszanina gazów składająca się z azotu, tlenu, wodoru, i wielu innych gazów, zawierająca parę wodną o ciśnieniu i temperaturze zależnej od położenia geograficznego oraz wysokości nad poziomem morza

Powietrze oddechowe – sprężone powietrze uzdatnione co do zawartości cząstek stałych, oleju i wilgoci wg wymagań jakie stawia Farmakopea Europejska.

Praca techniczna – praca przekazywana układowi otwartemu poprzez wał maszyny – nazywamy pracą techniczną

Profil poboru sprężonego powietrza – wartości ilości pobieranego sprężonego powietrza w funkcji czasu przedstawione tabelarycznie lub wykresu przebiegu zmienności poboru w czasie.

Przepływ powrotny – przeciek sprężonego powietrza ze strony tłocznej sprężarki na jej stronę ssącą poprzez np. szczeliny pomiędzy wirnikiem a korpusem sprężarki. Przepływ ten zmniejsza sprawność wolumetryczną sprężarki. Wielkość tego przecieku jest szczególnie istotna dla sprawności sprężarek wyporowych.

Przetwornica częstotliwości – aparat tyrystorowy umożliwiający taką przemianę charakterystyki częstotliwości prądu zmiennego, aby umożliwić bezstopniową proporcjonalną regulację obrotów i mocy silnika elektrycznego prądu zmiennego.

Punkt pracy sprężarki – wartość wydajności sprężarki osiągana przy konkretnych warunkach roboczych – m.in. temperaturze otoczenia, temperaturze czynnika chłodzącego, ciśnieniu otoczenia i roboczym, pobierając w tym celu odpowiednią ilość energii. Punkt pracy najczęściej różni się od punktu nominalnego, który odpowiada maksymalnym parametrom wydajności i mocy osiąganym w warunkach referencyjnych np. w warunkach normalnych lub wg normy odbiorczej dla sprężarek, których dotyczy.

Punkt rosy – wartość temperatury sprężonego powietrza odpowiadająca dla danego ciśnienia początkowi wykraplania się zawartej w nim wilgoci

Punkt poboru powietrza – rurociąg lub przewód łączący główną magistralę dostarczającą sprężone powietrze z pojedynczym odbiornikiem sprężonego powietrza

Regeneracja osuszacza – dotyczy osuszaczy adsorpcyjnych – operacja polegająca na przywróceniu osuszającej substancji aktywnie pochłaniającej wilgoć w osuszaczu ponownego potencjału pochłaniania wody. W osuszaczach adsorpcyjnych dzieje się to przy pomocy osuszonego sprężonego powietrza lub grzałek podnoszących temperaturę złoża i dmuchaw lub pomp próżniowych

Rozdmuch pojemników – technologia przetwórstwa tworzyw sztucznych polegająca na nadaniu opakowaniu kształtu formy przy pomocy energii sprężonego powietrza, które wdmuchiwane jest do formy. Rozdmuch wymaga wstępnego ukształtowania opakowania do tzw. preformy

Rozdmuchu butelek PET – jednostopniowy lub 2-stopniowy rozdmuch butelki z tworzywa PET w specjalnych formach przy pomocy sprężonego powietrza o ciśnieniu najczęściej powyżej 30-35 bar. W celu uzyskania odpowiednich parametrów butelka najpierw kształtowana jest w tzw. preformę, dopiero potem rozdmuchiwana jest do docelowych rozmiarów. Jest to proces, z którego można odzyskiwać sprężone powietrze ciągle sprężone jeszcze do około 5 – 7 bar.

Schładzanie wewnętrzne sprężanego gazu – schładzanie gazu podczas sprężania go poprzez wprowadzenie do komory sprężania substancji chłodzącej – np. wtryskiwanego oleju lub wody.

Skrzynka rozruchowa z automatyką – układ aparatury elektrycznej umożliwiający rozruch napędowego silnika elektrycznego metodą gwiazda – trójkąt lub poprzez tzw. soft-start, czy też z rozruch bezpośredni.

Sprężarki bezolejowe – urządzenia sprężające gazy bez bezpośredniej obecności oleju w komorze sprężania w celu chłodzenia lub smarowania. Olej w nich najczęściej znajduje się w przekładni lub łożyskach oddzielonych od komory sprężania uszczelnieniami lub wręcz fizycznie w oddzielnej obudowie. Sprężarki takie pracują na sucho – bez chłodzenia wewnętrznego – i wtedy w celu uzyskania średniego ciśnienia przemysłowego potrzebują 2 lub 3 stopni sprężania, a w przypadku sprężania z chłodzeniem wewnętrznym – np. poprzez wtrysk wody – mogą to zadanie wykonać przy pomocy 1 stopnia sprężania.

Sprężarkownia – pomieszczenie maszynowni zaprojektowane do zainstalowania i poprawnego eksploatowania w nim jednej lub więcej sprężarek wraz z układami uzdatniania sprężonego powietrza, zbiornikiem wyrównawczy, układem spustu i uzdatniani kondensatu, odpowiednio chłodzone, zasilone elektrycznie i umożliwiające lokalny lub zdalny nadzór nad urządzeniami tam zainstalowanymi

Sprężone powietrze – powietrze, którego ciśnienie zostało zwiększone przez maszynę sprężającą

Stały spręż – spręż, czyli stosunek ciśnienia tłoczenia do ciśnienia ssania, który nie zmienia się podczas procesu sprężania.

Stopień sprężania – jeden z etapów sprężania często rozumiany jako element sprężający agregatu sprężarkowego – na przykład wirnik i obudowa sprężarki odśrodkowej, czy wirniki i obudowa sprężarki śrubowej. W zależności od możliwości technicznych oraz wymagań co do ciśnienia roboczego wobec maszyny – jest tych stopni mniej lub więcej. W celu poprawienia sprawności sprężania – pomiędzy kolejnymi stopniami sprężania stosuje się tzw. chłodnice międzystopniowe

Substancji aktywnej powierzchniowo – patrz adsorbent

Systemy kontroli pracy osuszacza poprzez pomiar punktu rosy – systemy, które potocznie można by nazwać „punkt – roso – statami", ponieważ ich rola polega na powstrzymywaniu drogich procesów regeneracji złoża osuszacza adsorpcyjnego do momentu dopóki nie będzie to konieczne. Konieczność rozpoczęcia regeneracji lub jej zakończenia wynika z ciągłego pomiaru w czasie wilgotności powietrza przy pomocy higrometru za osuszaczem. Jeśli jego wilgotność jest w zakresie nominalnym pracy osuszacza, wtedy regeneracja nie musi być inicjowana.

Transport pneumatyczny – sposób przemieszczania materiałów sypkich poprzez rurociągi z wykorzystaniem energii sprężonego powietrza. Efektywność procesu wzrasta o ile zapewni się materiałowi sypkiemu pozostawanie w stanie tzw. fluidyzacji

Układ obejściowych zaworów – układ zaworów tak podłączonych do urządzenia przez które przepływa sprężone powietrze, aby umożliwić przy zamkniętym zaworze obejściowym i otwartych wlotowym i wylotowym, przepływ powietrza przez urządzenie, a przy otwartym zaworze obejściowym i zamkniętych zaworach wlotowym i wylotowym, przepływ powietrza przez rurociąg i zawór obejściowy tak, aby w tym czasie prowadzić np. obsługę urządzenia zasilanego sprężonym powietrzem bez konieczności jego odinstalowania z sieci sprężonego powietrza

Urząd Dozoru Technicznego – urząd państwowy odpowiedzialny za poprawne użytkowanie urządzeń pracujących w warunkach specjalnych wymagań bezpieczeństwa, tzw. urządzeń poddozorowych tzn. np. urządzeń ciśnieniowych, dźwigów, kotłów, wind itp.

Uzdatnianie sprężonego powietrza – procesy oczyszczania sprężonego z cząstek stałych, oleju i wilgoci przy pomocy separatorów, filtrów i osuszaczy

Wkład filtra – wymienny element filtrów sprężonego powietrza lub filtra ssawnego sprężarki

Wskaźnik jednostkowego poboru energii – parametr sprężarki zalecany do weryfikacji przez normę odbiorczą sprężarek wyporowych PN-ISO 1217 aneks C, zdefiniowany jako stosunek pobieranej mocy przez sprężarkę do zmierzonej wydajności sprężarki. Podawany albo w (kW)/(m^3/min), lub (kW)/(m^3/h) = (kWh)/(m^3)

Wydmuch do atmosfery – jedna z metod regulacji wydajności polegająca na upuście sprężonego powietrza do atmosfery w celu dostarczenia jego mniejszej ilości do odbiorników

Wysokość lustra danej cieczy – nic innego jak wysokość słupa cieczy oznaczająca ciśnienie hydrostatyczne. W przypadku napowietrzania i mieszania cieczy lustro wody oznacza wysokość słupa wody – jako ciśnienie do pokonania dla strumienia powietrza, np. 5 m – jako głębokość zbiornika do napowietrzania – oznacza dla powietrza dostającego się do ścieków z dna zbiornika poprzez dyfuzor drobno-pęcherzykowy pokonanie ciśnienia około 500 mbar

Zawór bezpieczeństwa – urządzenie zabezpieczające zbiornik ciśnieniowy przed wzrostem ciśnienia ponad dozwoloną jego wartość. Jego działanie polega na automatycznym otwarciu przy nastawionej wartości ciśnienia w sposób umożliwiający upuszczenie całego doprowadzonego do zbiornika strumienia sprężonego powietrza i rozprężenie go do atmosfery. Nastawa ciśnienia otwarcia odbywa się przez zastosowanie i właściwe naprężenie odpowiedniej sprężyny skrętnej.

Zawór odcinający – zawór sterowny ręcznie lub automatycznie umożliwiający odcięcie urządzenia zasilanego lub zasilającego sprężonym powietrzem od sieci sprężonego powietrza

Zawór ssawny – urządzenie umożliwiające niezawodne i możliwie bezstopniowe i proporcjonalne dławienie (ograniczanie) strumienia powietrza zasysanego przez sprężarkę.

Więcej publikacji na:
www.pemp.pl