

# PNEUMATIKA I HIDRAULIKA



# SADRŽAJ

<b>PREDGOVOR</b> .....	<b>5</b>
<b>1 UVOD</b> .....	<b>6</b>
<b>PNEUMATIKA</b> .....	<b>9</b>
<b>2 UVOD U PNEUMATIKU</b> .....	<b>9</b>
2.1 KARAKTERISTIKE PNEUMATSKOG UPRAVLJANJA .....	9
2.2 FIZIKALNE OSNOVE .....	11
2.2.1 Termodinamičke osnove .....	11
2.2.2 Strujanje zraka .....	13
2.2.3 Vlažnost zraka .....	16
2.3 SIMBOLI I SHEME .....	18
<b>3 DOBIVANJE I PRIPREMA ZRAKA</b> .....	<b>20</b>
3.1 DOBIVANJE I RAZVOD ZRAKA .....	20
3.1.1 Kompresori .....	21
3.1.2 Sušenje / hlađenje .....	24
3.1.3 Tlačna posuda (spremnik) .....	24
3.1.4 Razvodna mreža .....	25
3.1.5 Odvajač kondenzata .....	26
3.2 PRIPREMA ZRAKA .....	27
3.2.1 Filtar .....	27
3.2.2 Regulator tlaka .....	27
3.2.3 Mazalica .....	28
<b>4 PNEUMATSKI ELEMENTI</b> .....	<b>30</b>
4.1 IZVRŠNI ELEMENTI .....	30
4.1.1 Cilindri .....	30
4.1.2 Primjer – Dimenzioniranje sustava dobave zraka .....	39
4.1.3 Pneumatski motori .....	42
4.1.4 Pneumo-hidraulički elementi .....	44
4.2 VENTILI .....	45
4.2.1 Razvodnik .....	46
4.2.2 Zaporni ventil .....	50
4.2.3 Tlačni ventil .....	55
4.2.4 Protočni ventili .....	56
4.2.5 Kombinirani ventili .....	57
4.2.6 Cijevni zatvarači .....	58
4.3 POMOĆNI ELEMENTI .....	59
<b>5 PNEUMATSKO UPRAVLJANJE (UPRAVLJAČKI DIO)</b> .....	<b>60</b>
5.1 VDMA METODA .....	63
5.2 KASKADNA METODA .....	65
5.3 TAKTNA METODA .....	68
5.4 KOMBINIRANA METODA .....	74
<b>HIDRAULIKA</b> .....	<b>75</b>
<b>6 UVOD U HIDRAULIKU</b> .....	<b>75</b>
<b>7 HIDROMEHANIČKE OSNOVE</b> .....	<b>78</b>
<b>8 RADNI FLUIDI</b> .....	<b>83</b>
<b>9 PUMPE</b> .....	<b>85</b>
9.1 ZUPČASTA PUMPA .....	88
9.2 VIČANA PUMPA .....	90

9.3	KRILNA PUMPA.....	91
9.4	KLIPNA PUMPA.....	91
9.5	REGULACIJA PUMPI.....	94
<b>10</b>	<b>HIDRAULIČKI MOTORI.....</b>	<b>95</b>
10.1	ROTACIJSKI MOTORI.....	95
10.1.1	<i>Zupčasti motor</i> .....	96
10.1.2	<i>Krilni motor</i> .....	97
10.1.3	<i>Klipni motor</i> .....	97
10.2	HIDRAULIČKI CILINDRI.....	98
10.3	ZAKRETNI MOTORI.....	101
<b>11</b>	<b>VENTILI.....</b>	<b>102</b>
11.1	RAZVODNICI.....	102
11.2	NEPOVRATNI VENTILI.....	105
11.3	TLAČNI VENTILI.....	106
11.4	PROTOČNI VENTILI.....	111
<b>12</b>	<b>AKUMULATORI.....</b>	<b>114</b>
<b>13</b>	<b>FILTRI.....</b>	<b>117</b>
<b>14</b>	<b>PRIMJERI FUNKCIJSKIH SHEMA.....</b>	<b>120</b>
14.1	HIDRAULIČKI POGONI.....	120
14.2	UPRAVLJANJE BRZINE IZVRŠNOG MOTORA.....	121
14.2.1	<i>Paralelni spoj pumpi</i> .....	121
14.2.2	<i>Upravljanje brzinom diferencijalnog cilindra</i> .....	122
14.2.3	<i>Upravljanje pomoću prigušnih ventila</i> .....	123
14.2.4	<i>Upravljanje pomoću regulatora protoka</i> .....	124
14.3	BLOKIRANJE CILINDRA.....	127
14.4	SINKRONIZACIJA GIBANJA IZVRŠNIH ELEMENATA.....	128
14.5	SKLOPOVI S HIDRAULIČKIM AKUMULATOROM.....	129
<b>15</b>	<b>PRIMJERI PRIMJENE.....</b>	<b>131</b>
15.1	SKLOP ZA POKRETANJE DIESEL-MOTORA.....	131
15.2	HIDRAULIČKA PREŠA.....	131
15.3	PLATFORMA ZA PODIZANJE.....	132
	<b>LITERATURA.....</b>	<b>134</b>

## **PREDGOVOR**

Izbor i sistematizacija obrađenih tema uglavnom se podudaraju s temeljnim tečajevima hidraulike i pneumatike. Međutim, program je morao biti prilagođen raspoloživom vremenu i adekvatno ograničen. Zato u skripta nisu uključena područja elektropneumatike, elektrohidraulike i proporcionalne tehnike, unatoč njihovoj aktualnosti i potrebama prakse. Također se sva šarolikost mogućih tehničkih rješenja ne tretira sveobuhvatno. Obradena su samo tehnička rješenja potrebna za razumijevanje suštinskih problema i principa. Izloženo gradivo predstavlja solidnu bazu za daljnji samostalni rad, usavršavanje i produbljivanje znanja iz pojedinih područja sukladno individualnim potrebama.

## 1 UVOD

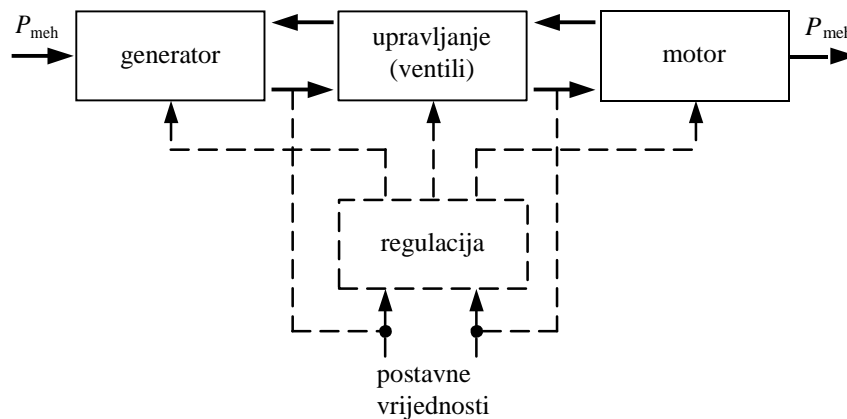
Pneumatika i hidraulika često se nazivaju zajedničkim imenom fluidika. Fluidika se bavi sustavima za prijenos energije i/ili signala putem radnog fluida. Zadaci pneumatskog ili hidrauličkog sustava mogu uključivati pretvorbu, prijenos i upravljanje energijom.

Pneumatika kao radni medij koristi stlačivi fluid – plin, najčešće zrak. Hidraulika kao radni fluid koristi nestlačivi fluid – kapljevina. Najčešće je to hidrauličko ulje, pa se zbog toga susreće i naziv uljna tehnika. Osim ulja koriste se i teško zapaljivi i specijalni fluidi.

Pneumatika i hidraulika imaju važnu ulogu u automatizaciji, posebno kada su u pitanju izvršni elementi. Pneumatski elementi prisutni su danas u velikom broju pogona, najviše se koriste unutar tzv. male automatizacije. Pneumatika je jednostavnija, a rješenja su u većoj mjeri univerzalna i koriste standardizirane elemente, dok su kod hidraulike rješenja u većoj mjeri specifična, pa zahtijevaju više iskustva i znanja. U širem smislu hidraulika ili tehnička hidromehanika bavi se tehničkom primjenom kapljevina, što uključuje i probleme navodnjavanja, opskrbu vodom, brane itd.

Hidraulički sustavi imaju najpovoljniji omjer snage po jedinici mase. Također su radni tlakovi visoki tako da se hidraulički sustavi tipično koriste u slučajevima kada je potrebna velika snaga i/ili velika sila. Nestlačivi medij hidrauličkih sustava omogućava precizno pozicioniranje izvršnih elemenata, dok kod pneumatskih sustava to nije slučaj. Velika prednost pneumatskih sustava je nezapaljivost radnog medija, pa se često koriste kada je potrebna visoka sigurnost pogona.

**Struktura i funkcija fluidičkih prijenosa.** U fluidičkim prijenosnim sustavima povezani su generatori (pumpe ili kompresori), fluidički motori i upravljački elementi u kružni tok u kojem radni fluid cirkulira prenoseći energiju (Sl. 1.1).



Sl. 1.1 Struktura fluidičkog prijenosa

Zbog visokih se tlakova kao generator koristi samo volumetrički tip pumpe odn. kompresora. Zbog toga i zbog nestlačivosti hidrauličkih fluida, prijenos hidrauličkog pogona približno je nezavisan o opterećenju (između pogonske jedinice – pumpe i pokretačke jedinice – motora postoji volumenska povezanost). Nasuprot tome, stlačivost plina kao radnog medija pneumatskih sustava je znatna, pa se pogonska i pokretačka jedinica ponašaju kao da su priključene na mrežu.

Transport radnog fluida odvija se putem vodova, što omogućava slobodu u razmještanju pogonske jedinice, upravljačkih sklopova i motora. Ekonomski su kod hidrauličkih sustava prihvatljive udaljenosti do 30 m, a kod pneumatskih do 150 m.

Cilj upravljanja je prekapčanje i prilagođavanje sukladno radnom procesu i uvjetima, kao i ograničenje opterećenja sustava. Upravljanje djeluje na tok fluida (prekapčanje putova fluida, promjena smjera strujanja, grananje – odvajanje dijela fluida) ili mijenja geometriju generatora ili motora. Djeluje uvjetovano (npr. upravljanje prema tlaku, položaju) ili bezuvjetno. Na isti način aktiviraju se i sami upravljački elementi. Aktiviranje upravljačkih elemenata vrši se neposredno ili posredno. To pruža veliku mogućnost daljinskog i/ili automatskog upravljanja, naročito u kombinaciji s elektroničkim upravljačkim elementima. Pneumatski sustavi često se kombiniraju s hidrauličkim (za velike sile) i/ili električnim (za prijenos i obradu signala).

Prijenos energije putem radnog fluida pruža gotovo neograničenu mogućnost pretvorbe faktora koji određuju snagu (sila i moment odn. brzina i kutna brzina). Zavisno od snage i vanjskih uvjeta postoji niz klasifikacija fluidičkih sustava.

Prema **razini snage** fluidički sustavi dijele se u dvije grupe

- Sustavi za prijenos snage  
Ulazna energija dovodi se na mjesto primjene i vrši se njena pretvorba kako bi se ostvarile željene sile/momenti uz potrebnu brzinu/kutnu brzinu. Zbog velike snage potreban je visok stupanj korisnog djelovanja.
- Izvršni (servo) prigoni  
Moraju na mjestu primjene precizno izvršiti upravljačke i regulacijske naredbe. Ovdje je bitna točnost prijenosa informacije (signala), a stupanj korisnog djelovanja može se zanemariti.

**Zadatak** fluidičkog sustava može biti

- Prijenos snage  
Zadatak je prijenos snage od mjesta proizvodnje do mjesta primjene, a važan je visok stupanj korisnog djelovanja u širokom područje pretvorbe energije. Primjer: pogon vožnje.
- Ostvarivanje sile  
Na mjesto primjene potrebno je dovesti velike sile/momente, a stupanj korisnog djelovanja je manje važan. Primjer: preša, škare.
- Ostvarivanje pomaka  
Zadatak je ostvariti pomak uz visoku točnost pozicije i brzine, često uz relativno malo opterećenje. Stupanj korisnog djelovanja uglavnom nema značaja. Primjer: alatni strojevi, kopirni strojevi.

**Način gibanja motora** fluidičkih sustava uključuje

- Kružno gibanje  
s beskonačnim kutom zakreta vratila motora
- Zakretno gibanje  
s ograničenim kutom zakreta vratila motora.
- Pravocrtno gibanje

Prema **načinu rada** postoje

- Sustavi s vlastitom energijom  
Njihov zadatak je prijenos sile do mjesta primjene, uz odgovarajuće pojačanje ili raspodjelu sile. Primjer: kočnica automobila.

- Sustavi s vanjskom energijom  
To su pravi fluidički sustavi. Mehanička energija dovodi se izvana i u odgovarajućoj formi prenosi na mjesto primjene. Zadatak posluživanja leži samo u prekapčanju.
- Sustavi s pomoćnom energijom  
Njihov zadatak je analogno pojačanje upravljačke sile korištenjem pomoćne energije. Primjer: regulator turbine, pneumatske kočnice kamiona.

Za prikazivanje fluidičkih sustava koriste se fluidičke sheme koje su normirane. Normiran je način prikazivanja fluidičkih elemenata (normirani simboli) i njihovog povezivanja.

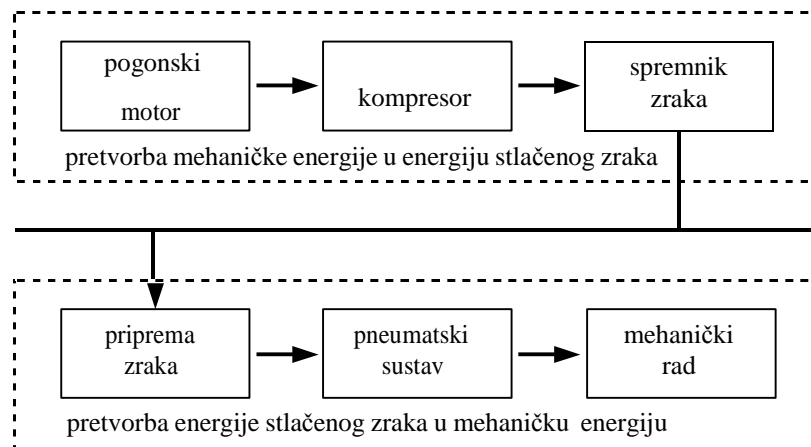


# PNEUMATIKA

## 2 UVOD U PNEUMATIKU

### 2.1 Karakteristike pneumatskog upravljanja

Zadaci pneumatskog sustava mogu uključivati pretvorbu, prijenos i upravljanje energijom. Sl. 2.1 shematski prikazuje princip rada pneumatskog sustava. U gornjem bloku prikazana je pretvorba mehaničke energije u energiju stlačenog zraka koji se pohranjuje u spremnik zraka. Kroz pneumatsku razvodnu mrežu taj zrak se dovodi u donji blok, u kojem se vrši obrnuta pretvorba energije. Nakon jedinice za pripremu zraka (čišćenje, sušenje, zauljivanje), u pneumatskom sustavu energija zraka pretvara se u koristan mehanički rad. Taj sustav obuhvaća komponente koje upravljaju smjerom strujanja, protokom i tlakom zraka, kao i komponente koje vrše pretvorbu energije. Osim pretvorbe u mehanički rad, pneumatski sustav često obavlja i ulogu upravljanja odn. regulacije.



Sl. 2.1 Princip rada pneumatskog sustava

Elementi pneumatskog sustava mogu se prema njihovoj funkciji u sustavu podijeliti na:

- elementi za proizvodnju i razvod zraka
- elementi za pripremu zraka
- izvršni elementi
- upravljački elementi
- upravljačko-signalni elementi
- pomoćni elementi

Elementi za **proizvodnju i razvod** zraka imaju zadatak potrošačima osigurati potrebne količine stlačenog zraka odgovarajućih parametara (*kompresor, spremnik, cjevovodne mreže* za razvod). Elementi za **pripremu** zraka obavljaju pripremu (kondicioniranje) zraka, što uključuje čišćenje, podmazivanje i regulaciju tlaka (*filter, mazalica, regulator tlaka*). **Izvršni** elementi su elementi koji obavljaju željene radnje odn. mehanički rad (*cilindri, motori*). **Upravljački** elementi (*ventili*) upravljaju tokovima energije i informacija (signala). Upravljanje može biti u potpunosti pneumatsko, a najčešće se izvodi u kombinaciji s drugim medijem i elementima (električno). **Upravljačko-signalni** elementi imaju zadatak dobavljati informacije o

stanju sustava (*senzori, indikatori*). **Pomoćni** elementi ispunjavaju različite dodatne funkcije (npr. priključne ploče, prigušivači buke, brojači itd.)

Kao radni medij stlačeni zrak donosi sljedeće prednosti:

- sirovina (okolni zrak) je uvijek i slobodno **na raspolaganju**,
- relativno jednostavno se **transportira** kroz cijevi,
- može se **skladištiti** i transportirati u spremnicima,
- gotovo je neosjetljiv na promjene **temperature** i ekstremne uvjete,
- neosjetljiv je na **radijaciju, magnetska i električka** polja,
- **sigurnost** jer nije eksplozivan niti zapaljiv,
- prilikom ispuštanja **ne zagađuje** okoliš,
- **nema povratnih vodova** (ispuštanje u atmosferu),
- neosjetljivost elemenata na **preopterećenje** (sve do zaustavljanja),
- neosjetljivost elemenata na **vibracije**,
- **trajnost i pouzdanost** robusnih elemenata,
- jednostavna **izvedba** elemenata,
- jednostavno **održavanje** uređaja,
- lako postići željenu i/ili visoku **brzinu** kretanja elemenata,
- brzine i hod mijenjaju se i **podešavaju kontinuirano**,
- promjenom tlaka lako se ostvaruje željena **sila**,
- visok **omjer snage i mase** elemenata,

i nedostatke uzrokovane svojstvima plinovitog medija (**stlačivost** itd.):

- ostvarive su relativno **male sile**,
- energija stlačenog zraka ima višu **cijenu** nego kod el. struje ili ulja,
- **buka** prilikom ekspanzije,
- teško ostvariti jednolične **male brzine** elemenata zbog stlačivosti,
- pneumatski **signali** prenose se samo na male udaljenosti zbog otpora.

Zbog ovih nedostataka pneumatski se sustavi često kombiniraju s hidrauličkim (za velike sile) i/ili električnim (za prijenos i obradu signala).

Karakteristike pneumatskih sustava [1]:

- tlak zraka za **napajanje** 1-15 bar (uobičajeno **7 bar**),
- pogonske **temperature** zraka **-10 do 60 °C** (maks. oko 200 °C)
- optimalna **brzina strujanja** zraka **40 m/s**,
- gibanje elemenata: **pravocrtno i rotacijsko**,
- **brzina cilindara** **1-2 m/s** (maks. oko 10 m/s),
- maks. ostvariva **sila** oko **40 kN**,
- maks. **snaga** oko **30 kW**,

U pneumatskim sustavima se kod temperatura stlačenog zraka manjim od -10 °C pojavljuju problemi sa zaleđivanjem, dok se kod temperatura većih od 60 °C pojavljuje problem brtvljenja.

## 2.2 Fizikalne osnove

### 2.2.1 Termodinamičke osnove

Termodinamičke relacije za plinove:

$$u = c_v T, \quad (2.1)$$

$$h = u + \frac{p}{\rho} = c T, \quad (2.2)$$

$$p = Z\rho RT, \text{ jednadžba stanja} \quad (2.3)$$

$$\frac{p}{\rho^\kappa} = \text{const.}, \text{ izentropska promjena stanja} \quad (2.4)$$

$$\frac{p}{\rho^n} = \text{const.}, \text{ politropska promjena stanja} \quad (2.5)$$

pri čemu su

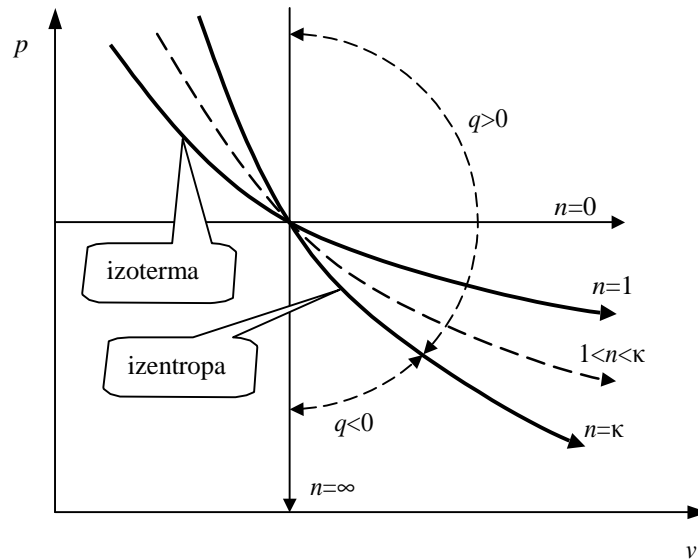
$R$	plinska konstanta
$\kappa$	eksponent izentropije,
$n$	eksponent politropije (izoterma: $n=1$ , izentropa: $n=\kappa$ ),
$c_v, c_p$	specifična toplina (pri konst. volumenu, pri konst. tlaku),
$Z$	faktor stlačivosti ( $Z=1$ za idealni plin),
$T$	apsolutna temperatura (st. Kelvina),
$p$	apsolutni tlak,
$\rho$	gustoća,
$u$	specifična unutrašnja energija,
$h$	specifična entalpija

*Normalno stanje plina* je stanje pri standardnoj temperaturi  $t = 0^\circ\text{C}$  i apsolutnom tlaku  $p = 1,01325$  bar (standardni atmosferski tlak). Pri normalnom stanju suhi zrak ima sljedeća svojstva:

$R = 287,1$ J/kgK	plinska konstanta,
$\kappa = 1,4$	eksponent izentropije,
$c_v = 722$ J/kgK	specifična toplina zraka (pri konst. volumenu),
$c_p = 1011$ J/kgK	specifična toplina zraka (pri konst. volumenu),
$\rho = 1,293$ kg/m <sup>3</sup>	gustoća,
$= 17,5 \cdot 10^{-6}$ kg/ms	dinamička viskoznost.

Sl. 2.2 prikazuje promjene stanja plina u  $p$ - $v$  dijagramu ( $v = 1/\rho$  specifični volumen). Eksponent politropije  $n=\infty$  odgovara promjeni stanja plina pri konstantnom tlaku (izobara), a  $n=0$  pri konstantnom volumenu (izohora). Ako se promjena stanja odvija u smjeru naznačenom strelicom, u području  $q>0$  toplina se plinu dovodi iz okoline, a u području  $q<0$  odvodi. Pri promjeni stanja u suprotnom smjeru mijenja se i smjer odvođenja/dovođenja topline. Granična promjena je adijabatska (bez izmjene topline s okolinom) koja se u principu poklapa s izentropskom promjenom.

**Apsolutni i manometarski tlak.** *Apsolutni tlak*  $p$  je normalno naprezanje kojem su podvrgnuta plinovita i kapljevita tijela (fluidi) uslijed mehaničkog djelovanja čestica tih tijela (sudaranje molekula). Ovom naprezanju podvrgnute su i sve čvrste površine uronjene u fluid:



Sl. 2.2 Prikaz promjene stanja plina u p-v dijagramu

$$p = F/S$$

$F$  – pritisak (sila kojom fluid djeluje na uronjenu površinu)

$S$  – površina

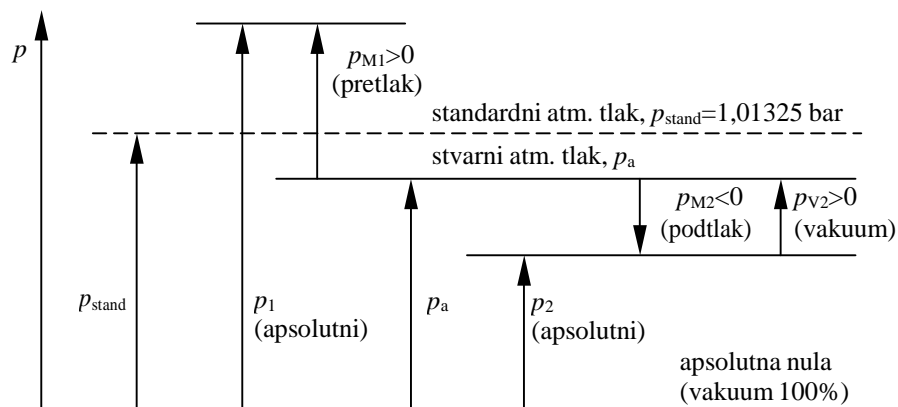
Atmosferski (barometarski) tlak  $p_a$  je apsolutni tlak okolnog atmosferskog zraka koji zavisi od geodetske visine i meteoroloških uvjeta.

Manometarski tlak  $p_M$  dobije se tako da se od vrijednosti apsolutnog tlaka  $p$  u nekom fluidu računski oduzme vrijednost atmosferskog tlaka  $p_a$

$$p_M = p - p_a$$

ili očitavanjem odgovarajućeg manometra. (Manometar je instrument za mjerenje tlaka koji u suštini mjeri razliku tlaka između dva fluida – u ovom slučaju između mjenjenog fluida i okolnog atmosferskog zraka).

U slučaju  $p > p_a$  dobiva se pozitivna vrijednost manometarskog tlaka ( $p_M > 0$ ) koji se tada naziva *pretlak* (Sl. 2.3). Ako je  $p < p_a$ , manometarski tlak poprima negativnu vrijednost ( $p_M < 0$ ) i tada se naziva *podtlak*. Apsolutna vrijednost podtlaka naziva se *vakuum*  $p_V$  ( $p_V = -p_M > 0$ ) i često se izražava u postocima atmosferskog tlaka ( $p_{V\%} = -p_M/p_a \cdot 100\%$ ).



Sl. 2.3, Objašnjenje pretlaka, podtlaka i vakuuma

Treba naročito naglasiti da je u pneumatici i hidraulici uobičajeno koristiti **naziv tlak i oznaku  $p$  za pretlak**, pa će se i ovdje u daljnjem tekstu tako postupati. Zato je pri računanju s tlakom uvijek potreban izvjestan oprez. U termodinamičkim relacijama pojavljuje se gotovo isključivo apsolutni tlak. Kod određivanja sile tlaka na površinu mjerodavna je razlika tlaka na obje strane te površine. Zato se može koristiti pretlak, a to je i pogodnije ako na jednoj strani površine djeluje atmosferski tlak. U Bernoullijevoj jednadžbi (v. kasnije) tlak se pojavljuje na obje strane jednadžbe, pa jednadžba u istom obliku vrijedi kako za apsolutni tlak, tako i za pretlak.

**Rad pneumatskog cilindra.** Za vrijeme kretanja klipa pneumatskog cilindra tlak je u cilindru približno konstantan (cilindar je cijelo vrijeme priključen na tlak). Potisna sila takvog klipa zato je također približno konstantna  $F = pS = const.$ , pri čemu je  $p$  tlak (tj. pretlak) napajanja, a  $S$  površina klipa. Rad koji klip obavi u jednom hodu dobiva se množenjem ove sile s duljinom hoda  $L$

$$W = pSL = pV, \quad (2.6)$$

pri čemu je  $V = SL$  radni volumen cilindra.

### 2.2.2 Strujanje zraka

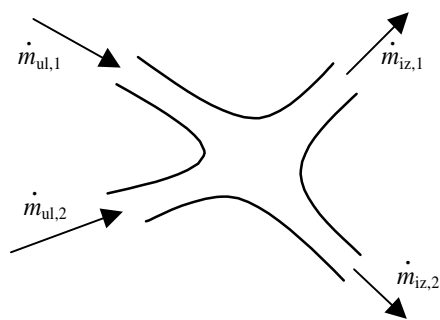
U slučaju kad se strujanje može smatrati stacionarnim, zakoni održanja mase i energije za strujanje zraka u cjevovodnim mrežama pneumatskih sustava poprimaju sljedeće oblike:

**Jednadžba kontinuiteta** (zakon održanja mase): Maseni protok zraka u cijevi je konstantan

$$\dot{m} = \rho Q = \rho v S = const., \quad (2.7)$$

pri čemu  $\rho$  označava gustoću zraka,  $v$  brzinu zraka, a  $S$  je poprečni presjek cijevi. U cjevovodnim mrežama mora suma svih masenih protoka koji ulaze u čvor cjevovoda (račvu - Sl. 2.4) biti jednaka sumi svih masenih protoka koji iz čvora izlaze:

$$\sum \dot{m}_{ul} = \sum \dot{m}_{iz}, \quad (2.8)$$

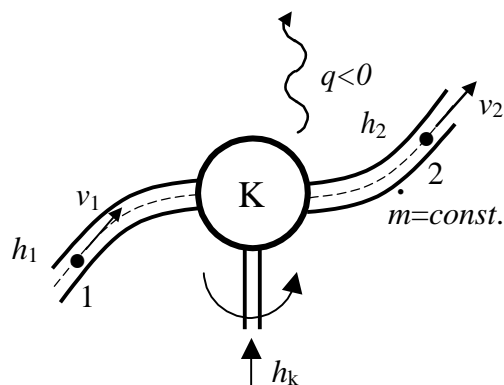


Sl. 2.4 Primjer čvora cjevovoda

**Zakon održanja energije** (I glavni stavak termodinamike): Zakon održanja energije za strujanje zraka kroz cjevovod odn. dionicu cjevovoda od odabranog ulaznog presjeka 1 do izlaznog presjeka 2 glasi

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2} + h_K + h_M - h_2 + q = h_2 + \frac{v_2^2}{2}, \quad (2.9)$$

pri čemu  $h$  označava specifičnu entalpiju zraka,  $v$  brzinu strujanja zraka,  $h_K$  je prirast entalpije u kompresoru,  $h_M$  toplinski pad u pneumatskom motoru, a  $q$  je dovedena toplina po kg zraka. Gubici trenja (viskoznosti) ne mijenjaju specifičnu entalpiju  $h$ , pa zato nisu eksplicitno vidljivi u ovoj jednadžbi (transformacija mehaničke u unutrašnju energiju).



Sl. 2.5 Primjer uz zakon održanja energije – dionica cjevovoda s kompresorom

**Strujanje u pneumatskim cjevovodima** često se može smatrati **izotermnim** ( $T = const.$ ). Za idealni ( $p = \rho RT$ ) plin tada vrijedi  $u_1 = u_2$ ,  $h_1 = h_2$ ,  $p/\rho = const.$ ). Iz relacije (2.9) tada je npr. očito da povećanje kinetičke energije pri strujanju u cijevi (bez stroja) mora biti jednako toplini dovedenoj izvana.

Obzirom na relativno niske brzine strujanja (niske vrijednosti Machovog broja), u proračunima gubitaka u cjevovodu redovito se zanemaruje promjena gustoće fluida ( $\rho = const.$ ), tj. koristi se bilanca mehaničke energije za nestlačivi fluid (modificirana Bernoullijeva jednadžba). Uz izvjesna pojednostavljenja, za dionicu cjevovoda u kojoj nije prisutan kompresor niti pneumatski motor ova jednadžba može se od odabranog ulaznog presjeka 1 do izlaznog presjeka 2 zapisati u jednostavnom obliku

$$p + \rho \frac{v_1^2}{2} = p + \rho \frac{v_2^2}{2} + \sum p_F \Delta p, \quad (2.10)$$

pri čemu  $p$  označava tlak (pretlak) zraka,  $\rho$  gustoću zraka, a  $\sum p_F$  je zbroj svih linijskih i lokalnih gubitaka tlaka od presjeka 1 do presjeka 2.

Za dionicu cjevovoda duljine  $L$  i konstantnog promjera  $D$  linijski gubitak tlaka iznosi

$$\Delta p_F = \lambda \frac{L}{D} \rho \frac{v^2}{2}, \quad (2.11)$$

gdje je  $\lambda$  koeficijent viskoznog trenja zraka, a  $v$  je brzina strujanja zraka kroz tu dionicu cjevovoda.

Lokalni gubici u nekom elementu armature cjevovoda (npr. ventil, koljeno, ili račva) mogu se procijeniti prema izrazu

$$\Delta p_F = K \rho \frac{v_2^2}{2} = \lambda \frac{L_e}{D} \rho \frac{v_2^2}{2}, \quad (2.12)$$

pri čemu je  $K$  koeficijent lokalnog gubitka u tom elementu armature. U priručnicima se koeficijent lokalnog gubitka često izražava pomoću ekvivalentne duljine cijevi

$$L_e = KD/\lambda.$$

Kao **idealni rad stroja** (kompresora, motora) uzima se rad pri idealnom izotermnom procesu (Sl. 2.6). Kompresor usisava zrak pri (apsolutnom) tlaku  $p_1$  i dobavlja ga pri tlaku  $p_2$ . Klip kreće iz donje mrtve točke (DMT) u kojoj volumen cilindra iznosi  $V_1$ , pa prelazi hod  $L$  do gornje mrtve točke (GMT) u kojoj je volumen u cilindru jednak nuli (štetni prostor  $V_0=0$ ,  $V_1=SL$ ,  $S$  je površina klipa). U fazi kompresije tlak (apsolutni) mijenja se po izotermi  $pV = p_1V_1 = const.$  (linija 1-2). U točki 2 postiže se dobavni tlak  $p_2$ , tlačni ventil se otvara, a tlak u cilindru tijekom daljnjeg tlačenja ostaje konstantan  $p=p_2$  (linija 2-3). Rad  $dW$  koji klip troši tijekom malog pomaka  $dx$  jednak je

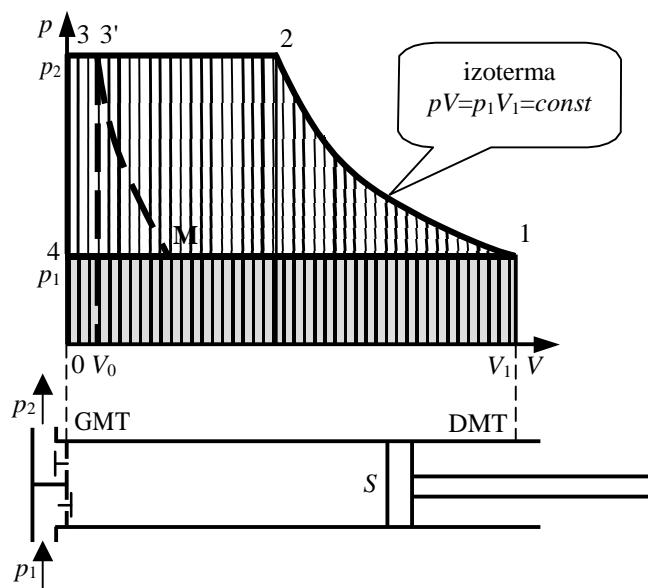
$$dW = pSdx = pdV, \quad (2.13)$$

tako da je ukupni rad tlačenja od točke 1 do 3 jednak površini ispod linije 1-2-3.

U fazi usisavanja zrak pod tlakom  $p_1$  gura klip u suprotnom smjeru. Time se obavlja rad koji je jednak površini ispod linije 4-1. Ovaj rad ima suprotan predznak (pozitivni rad), pa ga treba oduzeti od utrošenog rada.

Ukupni utrošeni rad za jedan ciklus i dobavu volumena  $V_1$  zraka (gledano na ulazu kompresora) jednak je dakle površini lika 1-2-3-4-1 i iznosi

$$W = \int_1^2 p dV + \int_2^3 p dV - \int_4^1 p dV = p_1 V_1 \ln \frac{p_2}{p_1} + p_2 (V_3 - V_2) - p_1 (V_1 - V_4) \quad (2.14)$$



Sl. 2.6 Izotermni rad idealnog kompresora

Volumen usisanog zraka može se zapisati kao  $V_1 = m_1/\rho_1$ , gdje je  $m_1$  masa zraka dobavljenog u jednom ciklusu. Ako se umjesto te mase uvrsti maseni protok zraka (masa zraka koju kompresor dobavlja u jedinici vremena), dobiva se izraz za teoretsku snagu kompresora

$$P_{KT} = \dot{m} h_{KT} = \dot{m} \frac{p_1}{\rho_1} \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (2.15)$$

**Stupnjem korisnog djelovanja stroja** uzimaju se u obzir gubici. Stvarni kompresor ima štetni prostor iznad GMT ( $V_0 > 0$ ), a dobavljeni volumen umanjuje se za iznos  $V_0$ .



Idealni izotermni rad koji se pri tome troši u jednom ciklusu odgovara površini lika 1-2-3'-M-1 (Sl. 2.6). Daljnji uzroci gubitaka leže u razlici tlaka potrebnoj za otvaranje ventila, izmjeni topline između plina i stjenki, propuštanju zraka kroz brtvene površine, te trenju mehaničkih dijelova (mehanički gubici).

Stupanj korisnog djelovanja  $\eta$  povezuje idealnu i efektivnu (na spojci) snagu kompresora i iznosi

$$\eta = \eta_m \eta_i, \quad (2.16)$$

pri čemu je s  $\eta_m$  označen mehanički (vanjski) stupanj korisnog djelovanja, a s  $\eta_i$  indicirani (unutrašnji) stupanj korisnog djelovanja. Stupanj korisnog djelovanja kompresora iznosi  $\eta = 20 \div 30\%$  [2], motora  $\eta = 60 \div 70\%$ , a mehanički stupanj djelovanja  $\eta_m = 88 \div 98\%$ . Ako se pretpostavi da energija mehaničkih (vanjskih) gubitaka ne ulazi u radni fluid, snaga kompresora (efektivna) može se zapisati kao

$$P_K = \frac{1}{\eta_m} \dot{m} g h_K = \frac{1}{\eta} \dot{m} g \frac{P_1}{\rho_1} \ln \frac{P_2}{P_1}, \quad (2.17)$$

a snaga motora:

$$P_M = \eta_m \dot{m} g h_M = \eta \dot{m} g \frac{P_1}{\rho_1} \ln \frac{P_2}{P_1} = \eta \dot{m} g \frac{P_1}{\rho_1} \ln \frac{P_1}{P_2}. \quad (2.18)$$

### 2.2.3 Vlažnost zraka

Mješavina suhog zraka i vode (pare i kapljevine) naziva se *vlažni zrak* (vlažni uzduh). Termodinamička svojstva suhog zraka uglavnom određuju plinovi dušik i kisik sadržani u zraku, dok se sadržaj i utjecaj preostalih suhih plinova u zraku najčešće može zanemariti. Vlažni zrak promatra se kao mješavina samo dviju *komponenti* – suhog zraka (z) i vodene pare (p).

Ako se zamisli da se odstrani suhi zrak iz nekog zatvorenog volumena ispunjenog vlažnim zrakom pod apsolutnim tlakom  $p$ , preostala para raširila bi se po cijelom volumenu i poprimila (manji) tlak koji se naziva *parcijalni tlak* pare  $p_p$ . Za apsolutni tlak vlažnog zraka (ukupni)  $p$  vrijedi

$$p = p_z + p_p, \quad (2.19)$$

pri čemu je s  $p_z$  označen parcijalni tlak suhog zraka.

Ako tlak vlažnog zraka iznosi oko 1 bar, za njegove komponente dovoljno točno vrijedi jednadžba stanja idealnog plina. Tako za suhi zrak vrijedi jednadžba

$$p_z V = m_z R_z T, \quad (2.20)$$

a za paru u zraku

$$p_p V = m_p R_p T, \quad (2.21)$$

pri čemu su

$V$  – volumen vlažnog zraka (ukupni),  $m^3/h$

$T$  – temperatura vlažnog zraka, K

$m_z, m_p$  – masa suhog zraka odn. pare, kg

$R_z, R_p$  – plinska konstanta za suhi zrak odn. paru, J/kgK

Najveća moguća vrijednost parcijalnog tlaka vodene pare jednaka je tlaku zasićenja (isparavanja) vodene pare  $p'$  ( $p_{p,\text{maks}} = p'$ ) koji zavisi samo od temperature (temperatura zasićenja tj. vrelište), v. tablicu.

Vlažnost zraka  $x$  (apsolutna vlažnost) definira sadržaj vode (pare i kapljevine) u vlažnom zraku, a predstavlja omjer mase vode i mase suhog zraka

$$x = m_v/m_z, \quad (2.22)$$

$m_z, m_v$  – masa suhog zraka odn. vode ( $m_v = m_p+m_k$ ), kg

Ukupna masa vlažnog zraka prema tome iznosi

$$m = m_v+m_z = m_z(1+x) \quad (2.23)$$

Granične slučajeve predstavljaju suhi zrak ( $m_v = 0, x = 0$ ) i čista voda ( $m_z = 0, x = \infty$ ). Zrak koji ne sadrži kapljevitu vodu ( $m_k = 0$ , sadrži vodu samo u formi pare  $m_v=m_p$ ) naziva se nezasićeni vlažni zrak ako je parcijalni tlak vodene pare manji od tlaka zasićenja pri danoj temperaturi ( $p_p < p'$ ), odn. zasićeni vlažni zrak kad vrijedi  $p_p = p_{p,\text{maks}} = p'$ . Za nezasićeni i za zasićeni zrak može se vlažnost  $x = x_p$  odrediti prema izrazu

$$x_p = \frac{m_p}{m_z} = \frac{R_z}{R_p} \cdot \frac{p_p}{p_z} = 0,622 \frac{p_p}{p_z} \quad (2.24)$$

Tablica 2.1 Tlak zasićenja  $p'$  vodene pare u zavisnosti od temperature  $t$

$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{bar}$	$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{bar}$	$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{bar}$	$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{bar}$
0	0,006108	30	0,04241	60	0,1992	155	5,433
2	0,007055	32	0,04753	70	0,3116	160	6,181
4	0,008129	34	0,05318	80	0,4736	165	7,008
6	0,009345	36	0,05940	90	0,7011	170	7,920
8	0,010720	38	0,06624	100	1,0133	180	10,027
10	0,012270	40	0,07375	105	1,2080	190	12,551
12	0,014014	42	0,08198	110	1,4327	200	15,549
14	0,015973	44	0,09100	115	1,6906	210	19,077
16	0,018168	46	0,10086	120	1,9854	220	23,198
18	0,02062	48	0,11162	125	2,3210	250	39,776
20	0,02337	50	0,12335	130	2,7013	300	85,927
22	0,02642	52	0,13613	135	3,131	325	120,560
24	0,02982	54	0,15002	140	3,614	350	165,350
26	0,03360	56	0,16511	145	4,155	374,15	221,200
28	0,03778	58	0,18147	150	4,760		

Zasićeni zrak sadrži najveću moguću masu vodene pare ( $m_p = m_{p,\text{maks}}$ ). Vlažnost zasićenog zraka označit će se oznakom  $x'$  ( $x = x_{p,\text{maks}} = x'$ ). Zrak koji sadrži kapljice i/ili kristale vode naziva se prezasićeni zrak (magla, susnježna magla i ledena magla). U tehničkim problemima plinoviti dio prezasićenog zraka (samo zrak i para) uvijek je zasićen ( $x = x_p+x_k > x_p = x'$ ,  $x_k = m_k/m_z$ ), tj. sadrži maksimalnu moguću količinu pare.

Relativna vlažnost zraka  $\varphi$  definirana je izrazom

$$\varphi = m_p/m_{p,\text{maks}} = p_p/p' \quad (2.25)$$

tako da  $\varphi$  može poprimiti vrijednosti od 0 do 1 (odn. 0-100%). Relativna vlažnost povećava se povećanjem tlaka ili smanjenjem temperature zraka. Smanjenjem temperature ili povećanjem tlaka pri  $\varphi=1$  (zasićeni vlažni zrak) dolazi do kondenzacije onog dijela vlage u zraku koji premašuje najveću moguću količinu, tako da se relativna vlažnost ne mijenja (ostaje  $\varphi=1$ ). Kondenzirana voda u obliku magle može se odgovarajućim postupcima izdvojiti. Očito, ovo izdvajanje vode (sušenje odn. smanjivanje vlažnosti  $x$  zraka) najuspješnije se može obaviti hlađenjem zraka (smanjenje temperature) neposredno iza kompresora (najviši tlak). Ovdje treba postići najnižu temperaturu zraka u cijelom pneumatskom sustavu, čime se osigurava da nigdje u sustavu neće doći do kondenzacije vode.

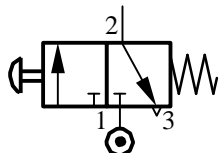
## 2.3 Simboli i sheme

Pneumatski sklopovi i sustavi grafički se predočuju pomoću pneumatskih shema. Način crtanja shema i simboli kojima se predočuju pojedini pneumatski elementi propisani su normom DIN/ISO 1219. Niže su dana neka opća objašnjenja i pravila za crtanje simbola i shema.

Osnovni detalji simbola:

————	vod (cijev za zrak)
—— ——	mimoilaženje vodova spoj
——●——	vodova (račva)
-----	regulacijski (signalni) vod
○	rotacijski stroj (kompresor, pumpa, motor)
====	vratilo, osovina dio mehanizma
□	ventil, izmjenjivač ili sl.
○	zglob na poluzi ili kotačić na ticalu
↗	mogućnost podešavanja
⋈	sklop od više elemenata

Detalji vezani uz simbol razvodnika (npr. razvodnik 3/2 – poput prekidača u elektrotehnici):



– priključci i razvod

⊙	napajanje (stlačeni zrak)
▽	odzračivanje (atmosfera)
↑	otvoren prolaz s naznačenim smjerom strujanja
⊥	zatvoren prolaz

Priključci se ucrtavaju na kvadrat koji prikazuje normalni (neaktivirani) položaj razvodnika (u ovom slučaju položaj pod djelovanjem opruge). Ostali kvadrati prikazuju aktivirane položaje razvodnika (u ovom slučaju položaj s pritisnutim tasterom).

– oznake priključaka:

Priključci se označavaju brojevima sukladno normi DIN/ISO 559. Ranija norma predviđala je označavanje slovima. Tablica donosi značenje oba ova načina označavanja.

Tablica 2.2 [3]

Usporedna tablica označavanja priključaka		
Priključak	Označavanje brojevima DIN/ISO 559	Označavanje slovima (staro)
napajanje	1	P
odzračivanje	3, 5, 7	R, S, T
izlazi (radni vodovi)	2, 4, 6	A, B, C
upravljajući priključci		X, Y, Z
- spoj 1 sa 2	12	
- spoj 1 sa 4	14	
zatvaranje dovoda zraka	10	
pomoćni upravljački zrak	81, 91	Pz

– razvodnike se može aktivirati

fizički – npr. simbol "tipkalo":



mehanički – npr. simbol "opruga": tlačno



– npr. simbol "izravno tlačno":



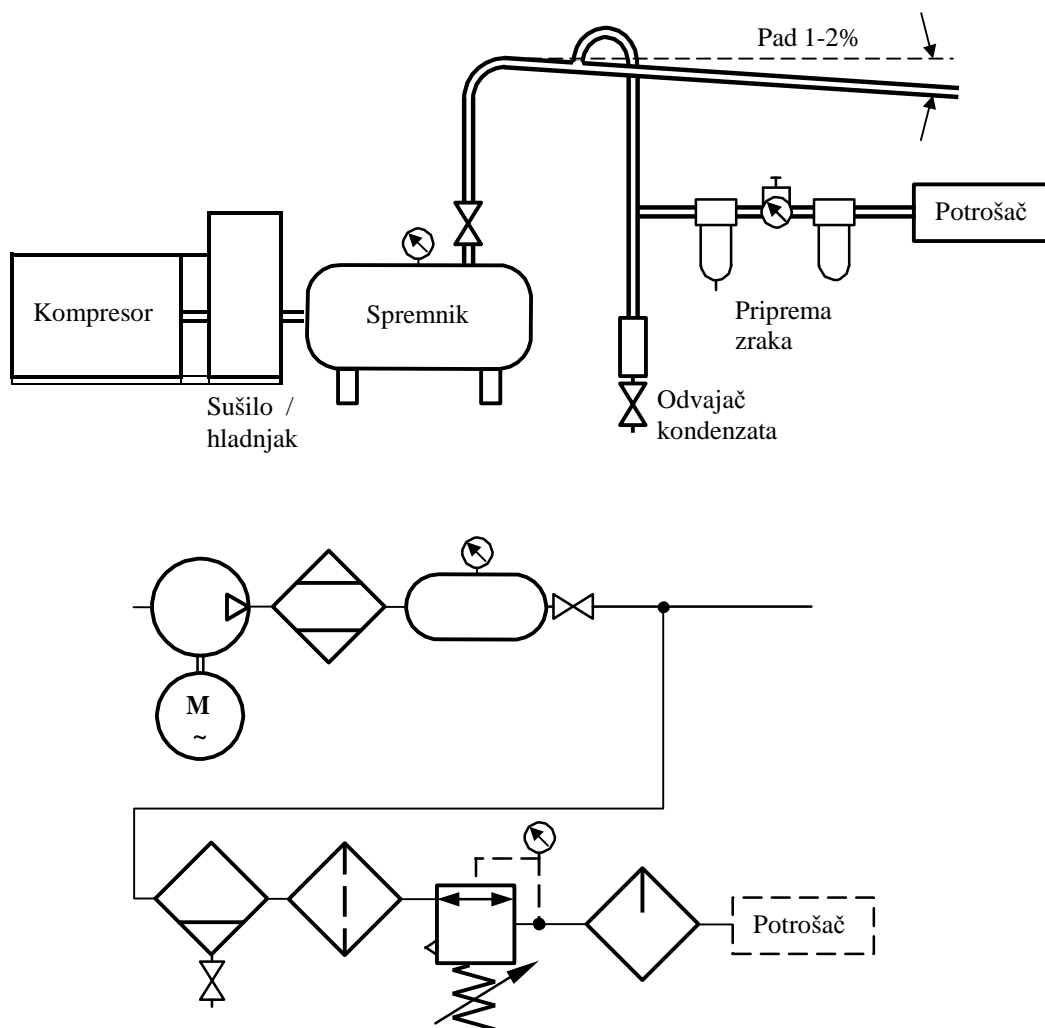
električki – npr. simbol "elektromagnet":



### 3 DOBIVANJE I PRIPREMA ZRAKA

#### 3.1 Dobivanje i razvod zraka

Sl. 3.1 prikazuje shemu napajanja i razvod pneumatskog sustava. Grupa za pripremu zraka sadrži filtar, regulacijski ventil i eventualno mazalicu. Glavni vod postavlja se s padom od 1-2% u smjeru strujanja zraka, kako bi se osiguralo otjecanje kondenzirane vode. Glavni vod treba osigurati ujednačeni tlak bez obzira na potrošnju zraka.



Sl. 3.1 Skica i shema napajanja i razvodne mreže [1]

**Potrošnja zraka,  $Q$**  – mjerodavna za dimenzioniranje sustava

$$Q = k_i \sum Q_i + Q_G \text{ najčešće u m}^3/\text{min}, \quad (3.1)$$

$Q_i$  – potrošnja zraka  $i$ -tog pneumatskog elementa u njegovom trajnom radu (iz kataloga)

$k_i$  – koeficijent istodobnosti – zavisi od vrste pneumatskog uređaja, komponenata itd. (iz dijagrama – teško ga je pouzdano odrediti)

$Q_G$  – gubici uslijed propusnosti (15-30%)

### 3.1.1 Kompresori

U *kompresorima* se vrši pretvorba mehaničke energije u energiju stlačenog zraka, dok se u *pneumatskim motorima* obavlja transformacija energije u suprotnom smjeru. Kompresori i pneumatski motori principijelno se bitno ne razlikuju a konstrukcijski se razlikuju samo u detaljima. Ako se npr. punjenje i pražnjenje cilindra klipnog motora ili kompresora vrši preko usisnih i ispušnih ventila, motor mora imati mehanizam za prisilno otvaranje/zatvaranje ventila (bregasto vratilo), dok je kod kompresora moguće samoradno pokretanje ventila (pomoću samog tlaka zraka u cilindru). Često isti stroj može raditi kao kompresor ili motor, zavisno od ugradnje odn. povezivanja u sustav.

Osnovna podjela kompresora je podjela na *volumetričke kompresore* i *turbokompresore*. U pneumatici se gotovo isključivo koriste volumetrički kompresori. Njihov princip rada bazira se na radnoj komori promjenljivog obujma (npr. cilindar s klipom). Smanjenjem obujma radne komore smanjuje se i volumen zraka u njoj, što uzrokuje odgovarajući prirast tlaka zraka.

*Podjela volumetričkih kompresora:*

- Klipni kompresori  
mehanizam: koljeničasti / radijalni / aksijalni / kulisni  
jednostupanjski / višestupanjski  
jednoradni / dvoradni  
vertikalni / horizontalni  
mobilni / stacionarni – za veće kapacitete
- Rotacijski kompresori  
krilni  
vijčani  
zupčasti
- Membranski kompresori

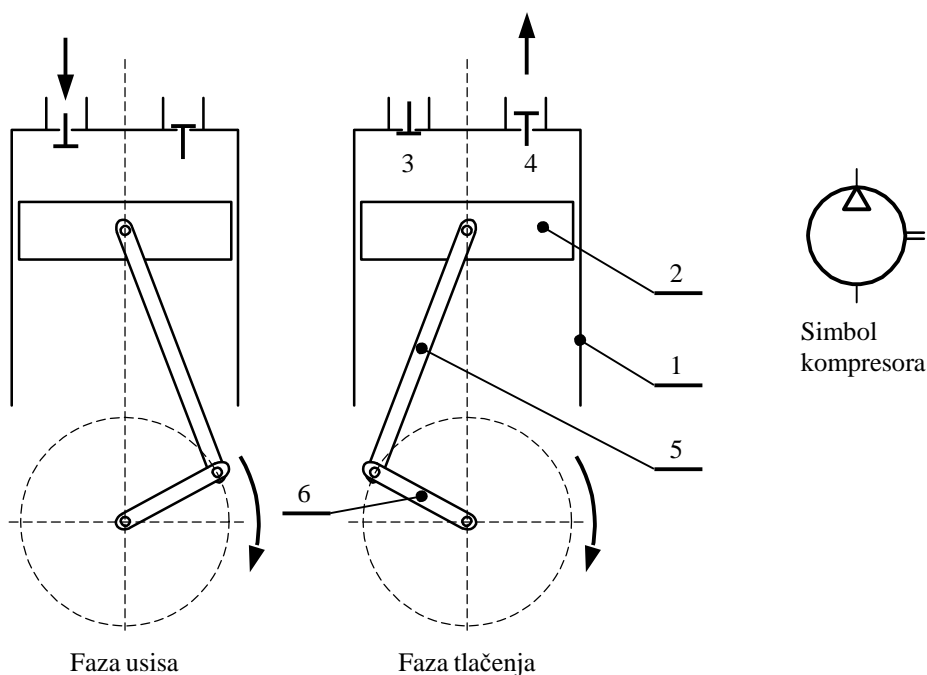
*Turbokompresori* se dijele na *radijalne* i *aksijalne* turbokompresore. Općenito radijalni turbokompresori postižu *veći tlak i manji protok* nego aksijalni.

Cilindar jednoradnog *klipnog kompresora* puni se i prazni samo s jedne strane klipa. Pri hodu klipa prema dolje (*Sl. 3.2*) cilindar se puni kroz usisni ventil (faza usisa), dok se pri kretanju u suprotnom smjeru zrak tlači kroz tlačni ventil (faza tlačenja). Na slici je prikazan kompresor kod kojeg se pretvaranje pravocrtnog gibanja klipa pretvara u kružno gibanje pomoću mehanizma s koljeničastim vratilom. Dvoradni cilindri usisavaju i tlače zrak s obje strane klipa.

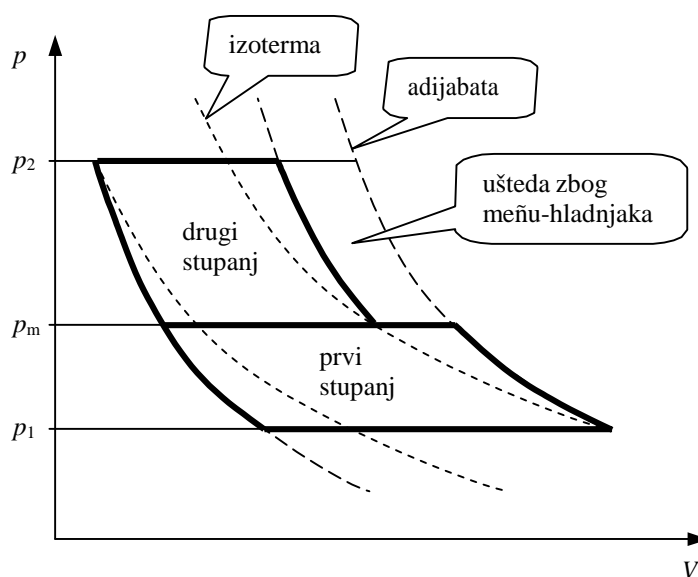
U višestupanjskim kompresorima zrak se uzastopno tlači u većem broju cilindara kroz koje prolazi (serijski spoj). Jednostupanjski kompresori koriste se za povećanje tlaka do 4 bar, dvostupanjski – do 15 bar [3], a višestupanjski za veće tlakove. Zbog mogućnosti zapaljenja kompresorskog ulja, izlazna temperatura zraka ne smije prelaziti 200 °C. Kao volumenski protok kompresora obično se uzima njegov ulazni protok ( $Q_K=Q_1, m'=\rho_1 Q_1=const.$ ).

*Sl. 3.3* prikazuje kružni proces idealnog dvostupanjskog kompresora s među-hladnjakom u *p-v* dijagramu. Rad jednog ciklusa (usisavanje i tlačenje) za prvi stupanj jednak je površini donjeg kružnog procesa. Promjena stanja zraka u kompresorskom stupnju obično je bliska adijabatskoj. Rad potreban za adijabatsku kompresiju veći je od rada izotermne kompresije. Ugradnjom među-hladnjaka između stupnjeva kompresora smanjuje se ukupni potrebni rad kompresora (ukupni proces približava se

izotermnom). Povoljno je i smanjenje temperature na izlazu kompresora (izlazu drugog stupnja).

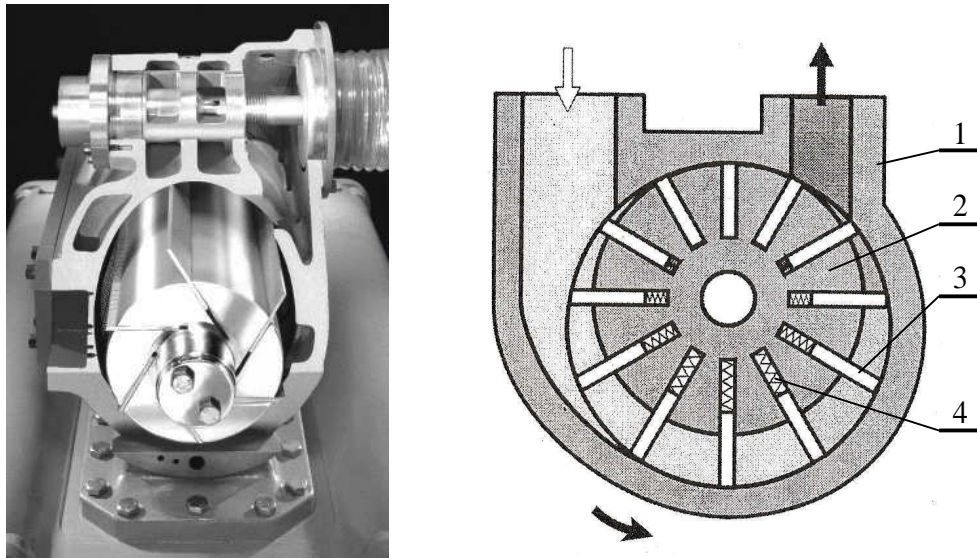


Sl. 3.2 Princip rada klipnog kompresora: 1 – cilindar, 2 – klip, 3 – usisni ventil, 4 – tlačni ventil, 5 – ojnica, 6 – koljeničasto vratilo



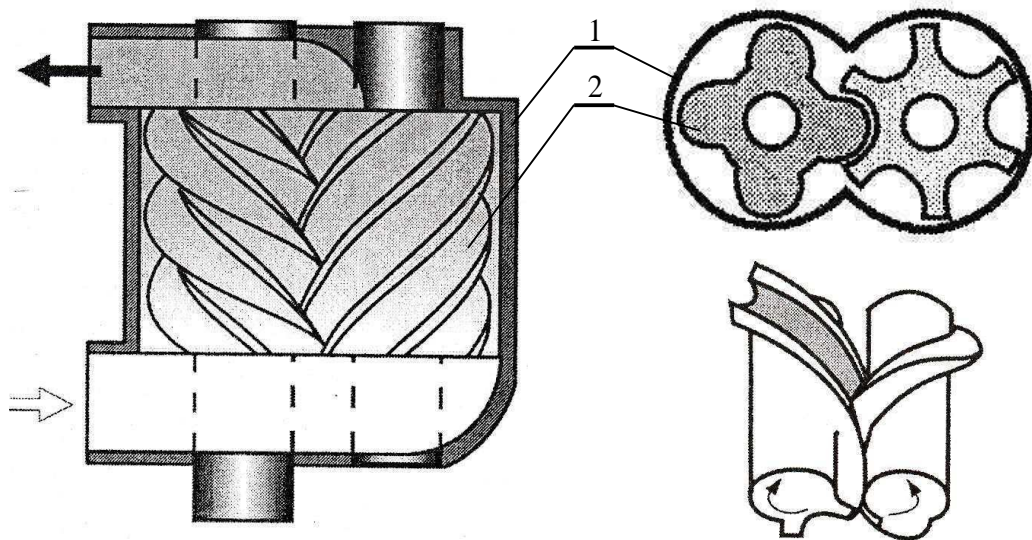
Sl. 3.3 Prikaz idealnog procesa dvostupanjskog kompresora s meñu-hladnjakom u p-V dijagramu

Kod *krilnih kompresora* (Sl. 3.4) zrak zarobljen u volumenu između krila, statora i rotora tlači se smanjenjem tog volumena prilikom rotacije rotora postavljenog ekscentrično u odnosu na os statora. Promjenom ekscentriciteta moguće je regulirati protok.



Sl. 3.4 Slika i skica krilnog kompresora - Pneumofore [4], [3]: 1 – stator, 2 – ekscentrično postavljen rotor, 3 – krilo (lamela), 4 - opruga

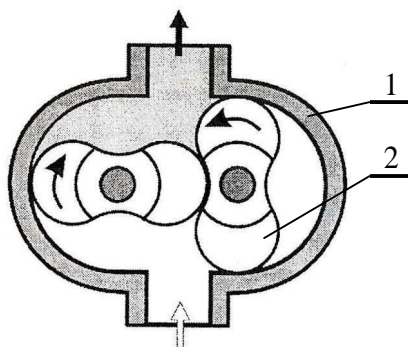
Vijčani kompresori (Sl. 3.5) nešto su skuplji i imaju lošiji stupanj korisnog djelovanja, a prednost im je dugi vijek trajanja i mali troškovi održavanja. Tlačni mehanizam je spregnuti vijčani par koji se okreće u međusobno suprotnim smjerovima. Radne komore stvaraju se između vijaka i statora. Zrak se kontinuirano usisava na jednoj strani vijka (komore se otvaraju) i tlači na suprotnoj strani (komore nestaju).



Sl. 3.5 Skica vijčanog kompresora [3]: 1 – stator, 2 – rotor (vijak)

Zupčasti kompresori (Sl. 3.6) imaju sličan princip rada kao i vijčani. Radni mehanizam je jedan par zupčanika koji su u zahvatu, pa se okreću u međusobno suprotnim smjerovima. I ovdje se radne komore stvaraju između rotora i statora, na strani na kojoj zubi izlaze iz zahvata otvara se i puni uvijek nova radna komora (usis), a na suprotnoj strani, ulaskom zuba u zahvat, komora nestaje.



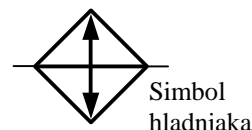
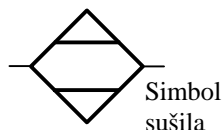


Sl. 3.6 Skica zupčastog (root) kompresora [3]: 1 – stator, 2 – rotor (zupčanik s 2 zuba)

### 3.1.2 Sušenje / hlađenje

U pneumatskim upravljačkim i izvršnim elementima ne smije se dopustiti kondenzacija vlage iz zraka. Zato se suvišna vlaga mora izdvojiti, a to se vrši na izlazu kompresora. Postupci sušenja su:

- kemijski ili apsorpcijski
- fizikalni ili adsorpcijski
- termički ili postupak pothlađivanja



U *kemijskom postupku* zrak se provodi kroz sloj higroskopne tvari (npr. magnezijev perklorat, litijev klorid, kalcijev klorid). Vlaga se zadržava u tom sloju, cijedi se, sakuplja i odvaja na dnu sloja. Kemikalija se pomalo troši, pa se mora nadoknađivati.

U *fizikalnom postupku* zrak se provodi kroz usitnjeni silicijev dioksid (silikagel) ili aluminijev oksid. Ova materija se zasićuje vodom, zato se apsorberi ugrađuju u paru. Dok je jedan od njih u funkciji, drugi se regenerira toplim zrakom.

*Termički postupak* ujedno smanjuje previsoku temperaturu zraka na izlazu iz kompresora (hlađenje). Ako se želi osigurati da se prilikom ekspanzije (smanjenje temperature) u pneumatskim uređajima neće kondenzirati voda, potrebno je izvršiti pothlađivanje zraka iz kompresora na temperaturu  $+1,5^{\circ}\text{C}$  (niža temperatura dovela bi do zaleđivanja vode). Zbog uštede energije, nakon izdvajanja kondenzirane vode, pothlađeni zrak koristi se u izmjenjivaču topline (pred-hladnjaku) za pred-hlađenje zraka iz kompresora. Time se pothlađeni zrak zagrijava na neku prihvatljivu temperaturu.

### 3.1.3 Tlačna posuda (spremnik)

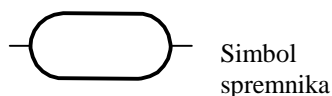
Svrha

- smirivanje tlačnih udara klipnog kompresora (ujednačavanje tlaka)
- kvalitetnija usklađivanje rada kompresora i potrošnje
- preuzimanje vršne potrošnje
- izdvajanje vode i kompresorskog ulja iz stlačenog zraka

Npr. u prehrambenoj industriji zahtijeva se čisti zrak (suhoradni kompresor – npr. membranski ili krilni s teflonskim lamelama).

Svaka tlačna posuda mora imati:

- priključak za dovod stlačenog zraka
- priključak za odvod stlačenog zraka
- priključak za regulator kompresora



- ventil za ograničenje tlaka (sigurnosni) koji se otvara pri tlaku 10% većem od radnog
- manometar
- slavinu za ispuštanje kondenzata ili automatski odvajač kondenzata
- otvor za ljude (za čišćenje)
- zaporni ventil prema mreži
- tlačni prekidač

Tlačne posude volumena većeg od 10 l podliježu propisima za posude pod tlakom i moraju imati atest.

Prema iskustvu, za ublažavanje tlačnih udara kompresora dovoljan je volumen posude koji je 20 do 50 puta veći od ukupnog radnog volumena posljednjeg stupnja kompresora. Redovito se odabire kompresor čiji kapacitet  $Q_K$  je veći od nominalnog protoka sustava  $Q$ . Kad takav kompresor spojen na spremnik uključuje intermitentno (on/off regulacija), najčešće se dozvoljava najviše 15 uključivanja i isključivanja kompresora na sat. Ako vrijeme jednog ciklusa uključivanja  $\tau$  obuhvaća jedan uzastopni period rada  $\tau_1$  i mirovanja  $\tau_2$  kompresora, tj.

$$\tau = \tau_1 + \tau_2, \quad (3.2)$$

za vrijeme  $\tau_1$  od uključivanja kompresora pri minimalnom tlaku  $p'$  do isključivanja pri maksimalnom tlaku  $p''$  u posudu uđe masa  $m$  zraka, sukladno jednadžbi kontinuiteta u obliku

$$\frac{\Delta m}{\tau_1} = \dot{m}_K - \dot{m}, \quad (3.3)$$

dok za vrijeme mirovanja kompresora  $\tau_2$  vrijedi

$$\frac{\Delta m}{\tau_2} = \dot{m}. \quad (3.4)$$

Kombinacijom ovih izraza dobiva se

$$\Delta m = \dot{m} \tau \left( 1 - \frac{\dot{m}}{\dot{m}_K} \right), \quad (3.5)$$

pa kad se još uzme u obzir relacija

$$\Delta m = m'' - m' = \frac{p'' V_s}{RT_s} - \frac{p' V_s}{RT_s} = \Delta p \frac{V_s}{RT_s}, \quad (3.6)$$

slijedi konačni izraz

$$V_s = \frac{\dot{m} RT_s}{\Delta p} \left( 1 - \frac{\dot{m}}{\dot{m}_K} \right) = Q \tau \frac{p_1 T_s}{\Delta p T_1} \left( 1 - \frac{Q}{Q_K} \right), \quad (3.7)$$

iskustvo pokazuje da će uvjet o maksimalnih 15 uključivanja kompresora na sat biti zadovoljen kad je volumen spremnika jednak minutnom protoku kompresora, što otprilike odgovara kolebanju radnog tlaka  $p$  od 1 bar. Ako se regulacijom kompresora omogući njegov neprekidan rad, može se uzeti  $V_s = 0,5 Q_K$  (po minuti).

### 3.1.4 Razvodna mreža

Optimalna brzina zraka u vodovima  $v=10-40$  m/s, brzine veće od ovih uzrokuju prevelike gubitke. Promjer cjevovoda odabire se tako da gubici tlaka ne prelaze

dopuštenu vrijednost (obično se uzima 5% od radnog tlaka ili 0,1 bar). Prilikom projektiranja potrebno je predvidjeti buduće povećanje potreba za stlačenim zrakom i sukladno tome predimenzionirati promjere cjevovoda. Time se izbjegavaju znatni troškovi za eventualnu ponovnu izradu cjevovoda.

Kako bi se izbjegao prodor kondenzata prema potrošačima:

- vodovi se postavljaju koso – s padom od 1-2%
- izlazi prema potrošačima izvode se na gornjoj strani cijevi
- na krajevima vodova, uvijek se na najnižem mjestu stavlja posuda za odvajanje kondenzata
- vodove treba toplinski izolirati pri prolasku kroz jače zagrijane prostore

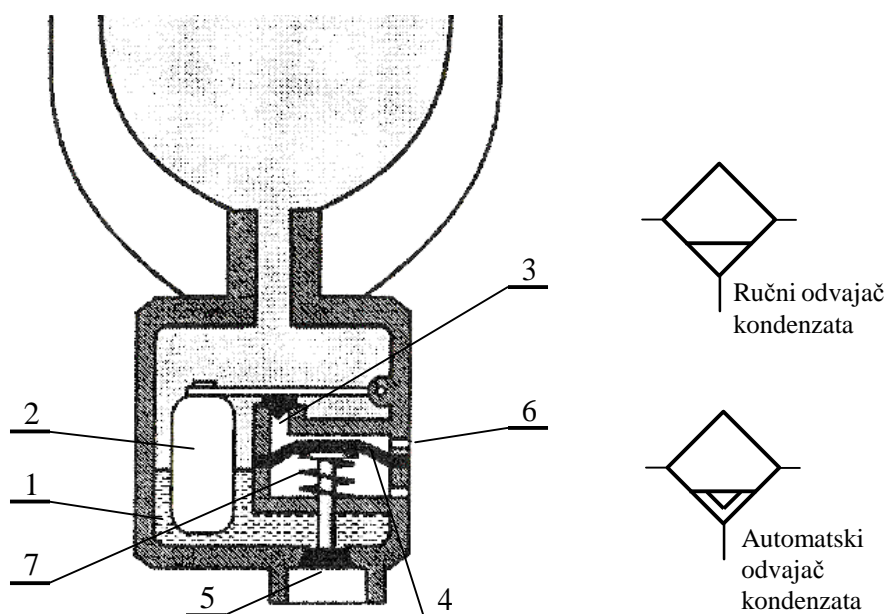
Vodovi moraju biti postavljeni pristupačno, radi održavanja.

Razvod u obliku petlje je razvodni cjevovod izveden u obliku petlje (kruga) na koji se priključuju potrošači. Takav razvod je povoljniji – smanjuju se oscilacije tlaka uzrokovane promjenama u potrošnji, omogućava se isključivanje dijela mreže radi popravaka bez isključivanja cijelog pneumatskog sustava.

Glavni vodovi izrađuju se od metalnih cijevi (čelik, bakar), a u sve većoj mjeri i od plastičnih materijala. Razvodni vodovi na strojevima se u pravilu izrađuju iz plastike.

### 3.1.5 Odvajač kondenzata

Odvajač kondenzata postavlja se na najnižim mjestima u cjevovodnoj mreži i ispred uzlaznih dionica. Nakupljeni kondenzat potrebno je redovito ispuštati prije nego se čašica za kondenzat napuni preko označene granice. Često se koriste automatski odvajači kondenzata. Sl. 3.7 prikazuje jedan od mogućih principa rada automatskih odvajača – odvajač s plovkom. Nakupljeni kondenzat (1) podiže plovak (2), čime se otvara prolaz stlačenom zraku (3) koji djelovanjem na membranu (4) otvara ventil za ispuštanje kondenzata (5). Ispuštanjem kondenzata plovak se spušta i zatvara dovod zraka, a prostor iznad membrane rasterećuje se prema atmosferi preko prigušnice (6). Tada opruga (7) zatvara ventil za ispuštanje kondenzata.



Sl. 3.7 Princip rada automatskog odvajača s plovkom [3]: 1 – kondenzat, 2 – plovak, 3 – pilot-ventil, 4 – membrana, 5 – ventil za ispuštanje, 6 – prigušnica, 7 – opruga

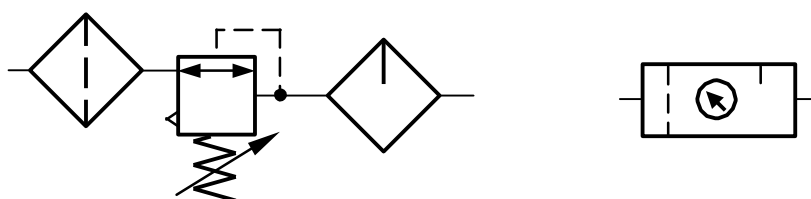
U filtrima koji se ugrađuju ispred izvršnih pneumatskih elemenata izdvaja se uz ostalu nečistoću i kondenzat. Uređaj za automatsko odvajanje kondenzata često se ugrađuje i na dno čašice filtra.

### 3.2 Priprema zraka

Prije ulaska u pneumatske uređaje, stlačeni zrak je potrebno pripremiti, tj. izvršiti:

- pročišćavanje zraka
- zauljivanje zraka
- regulaciju tlaka zraka.

**Jedinica za pripremu zraka** sastoji se od filtra, regulatora tlaka i mazalice (zauljivač, uljilo). Filtar i regulator tlaka često se isporučuju kao jedinstveni pneumatski element.



Simbol jedinice za pripremu zraka – detaljni i kratki

#### 3.2.1 Filtar

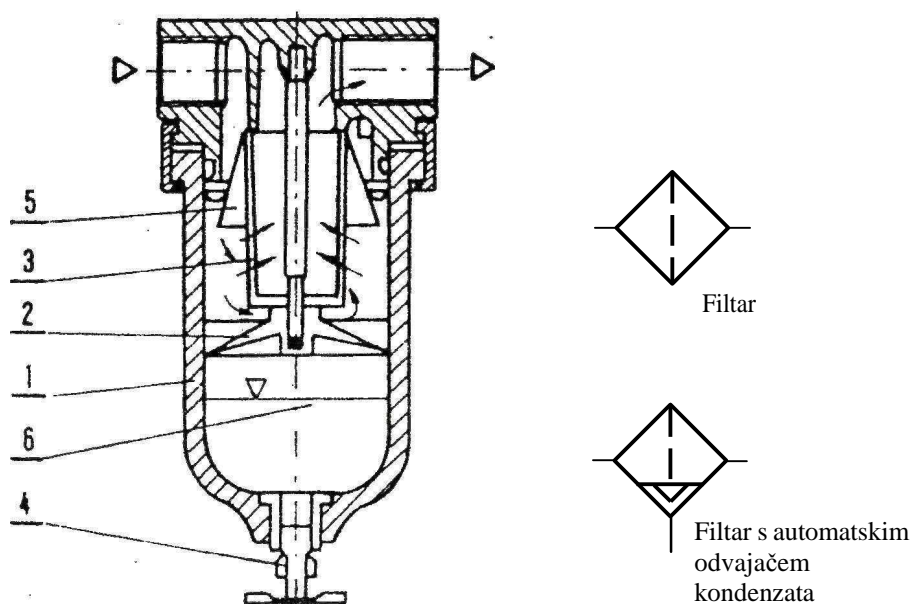
Prije ulaska u pneumatske uređaje potrebno je eliminirati nečistoće (vodu – kapljevinu i paru, kompresorsko ulje, prašinu, produkte korozije). Kompresorsko ulje izloženo je relativno visokim temperaturama u kompresoru (oksidacija) i nije pogodno za podmazivanje pneumatskih uređaja.

U filtrima se za izdvajanje nečistoće koristi nekoliko fizikalnih principa (Sl. 3.8). Krilca na ulazu (5) stvaraju vrtlog zraka (efekt ciklona). Zbog centrifugalne sile veće čestice se udaljavaju od osi vrtloga, pa niz stjenku (1) skliznu na tanjur (2). Osim toga, čestice ne mogu pratiti naglo skretanje zraka prema gore. Nakon toga zrak prolazi kroz filtarski uložak (3) od sinterizirane bronce, porozne keramike ili filca, u kojem se zadržavaju finije čestice. Čašica (1) za sakupljanje kondenzata i nečistoće je obično prozirna, kako bi se mogla nadzirati.

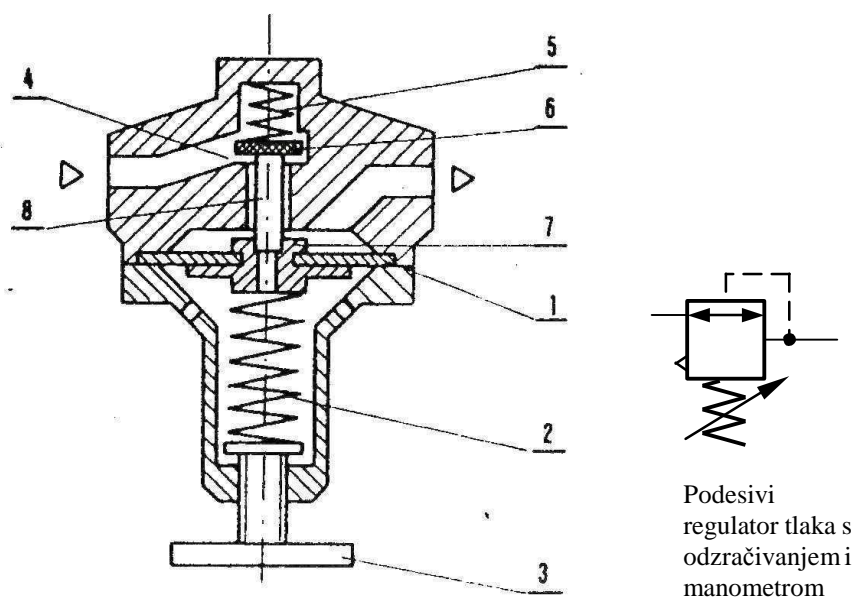
#### 3.2.2 Regulator tlaka

Regulator tlaka osigurava stabilan željeni (podešeni) radni tlak. S jedne strane, on neutralizira oscilacije tlaka zbog promjenljive potrošnje zraka (poremećaj na izlaznoj strani regulatora). S druge strane, u njemu se tlak iz glavnog voda (obično 8÷10 bar) reducira na potrebnu vrijednost radnog tlaka (obično 5÷6 bar).

Tlak na izlazu regulatora (Sl. 3.9) podešava se vijkom (3) kojim se mijenja sila u opruzi (2). Pod djelovanjem opruge otvara se ventil (6) i propušta zrak prema izlazu regulatora, povećavajući izlazni tlak. Kad tlak na izlazu poraste, on djeluje na membranu (1) tako da se ventil pritvara i smanjuje protok, čime se izlazni tlak smanjuje. Prilikom značajnijeg porasta izlaznog tlaka membrana se sve više savija, tako da se ventil najprije potpuno zatvori i prekine protok, a daljnjom deformacijom otvara se prolaz zraka (7) kroz membranu od izlaza regulatora prema atmosferi. Kao rezultat ostvaruje se konstantna razina tlaka zraka na izlazu regulatora.



Sl. 3.8 Filtar [5]: 1 – sabirna posuda, 2 – tanjurasti štitnik, 3 – uložak filtra, 4 – slavina, 5 – krilca, 6 – kondenzat



Sl. 3.9 Regulator tlaka [5]: 1 – membrana, 2 – opruga, 3 – vijak, 4 – ulazni tlak, 5 – opruga, 6 – pladanj ventila, 7 – otvor za atm. zrak, 8 – vreteno ventila

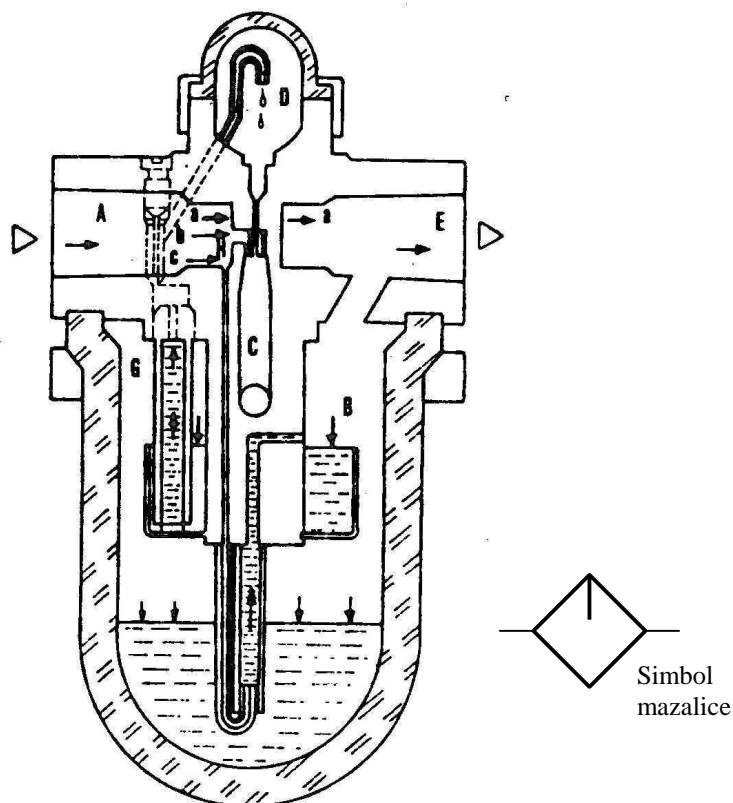
### 3.2.3 Mazalica

Mazalica (zauljivač) treba ulje raspršiti u finu maglu u struji zraka. Za ubrizgavanje ulja koristi se princip ejektora. Za postizanje fine magle (sitne kapi) potrebna je posebna konstrukcija (Sl. 3.10). Glavna struja zraka (a) prolazi kroz ejektor stvarajući podtlak kojim se ulje podiže kroz cjevčicu. Prigušnim vijkom podesi se da to ulje polagano kapa u gornju komoru (D). Slabija struja (b) prolazi kroz manji ejektor u prostor C, raspršujući i noseći ulje. Ova struja ulazi u prostor čašice (B) uz naglo skretanje, pa zato veće kapi padaju natrag u čašicu. Glavni ejektor (E) osigurava blagi podtlak u čašici (B), povlačeći iz nje zauljeni zrak. Najslabija struja (c), krećući se prema prostoru nižeg tlaka (B), uzgonom podiže ulje u rezervnu (gornju) čašicu.

Rezervna čašica osigurava konstantnu razinu ulja koje se usisava prema komori D, bez obzira na ukupnu količinu ulja u mazalici. Također onemogućen je ulazak taloga u rezervnu čašicu. Često se koriste i filtri za ulje.

Talog iz ulja ne smije doći u pripremljeni zrak (pročistač, rezervna kada).

Pneumatski elementi su tvornički podmazani (90% trajnosti u radu bez zauljivanja zraka). Ako se jednom započne sa zauljivanjem zraka, tvorničko podmazivanje se naruši (odnese), pa se zauljivanje više ne smije obustaviti. Zauljivanje zraka nužno je za motore velikog promjera ili velike brzine rada.



Sl. 3.10 Mazalica [5]

## 4 PNEUMATSKIELEMENTI

### 4.1 Izvršni elementi

Izvršni elementi (pogonski elementi ili aktuatori) pretvaraju energiju stlačenog zraka u mehanički rad. Prema načinu kretanja mogu se podijeliti na

- elementi s ograničenim (njihajućim) kretanjem
  - a) translacijski (cilindri)
  - b) rotacijski (zakretni cilindri, koračni motori)
- pneumatski motori (rotacijski, s kontinuiranim kretanjem)

U *pneumo-hidrauličkim elementima* vrši se promjena radnog medija, snaga se od zraka predaje na hidrauličko ulje koje se koristi za obavljanje rada.

#### 4.1.1 Cilindri

U pneumatskim sustavima cilindar je najčešći izvršni element. U principu gibanje cilindra je *translacijsko*, jedino je kod zakretnih cilindara *rotacijsko*.

#### Podjele cilindara

Prema načinu djelovanja:

- jednoradni
- dvoradni
- posebne izvedbe:
  - tandem
  - višepoložajni
  - teleskopski
  - bez klipnjače (najčešće magnetni)
  - udarni

Cilindri mogu biti *jednoradni i dvoradni*. Jednoradni cilindri vrše koristan rad samo u jednom smjeru, a dvoradni u oba smjera – guraju i vuku. Dvoradni cilindar ponekad ima *dvostranu klipnjaču* (prolaznu) i jednaku korisnu površinu obje strane klipa.

Prema izvedbi:

- klipni
- membranski

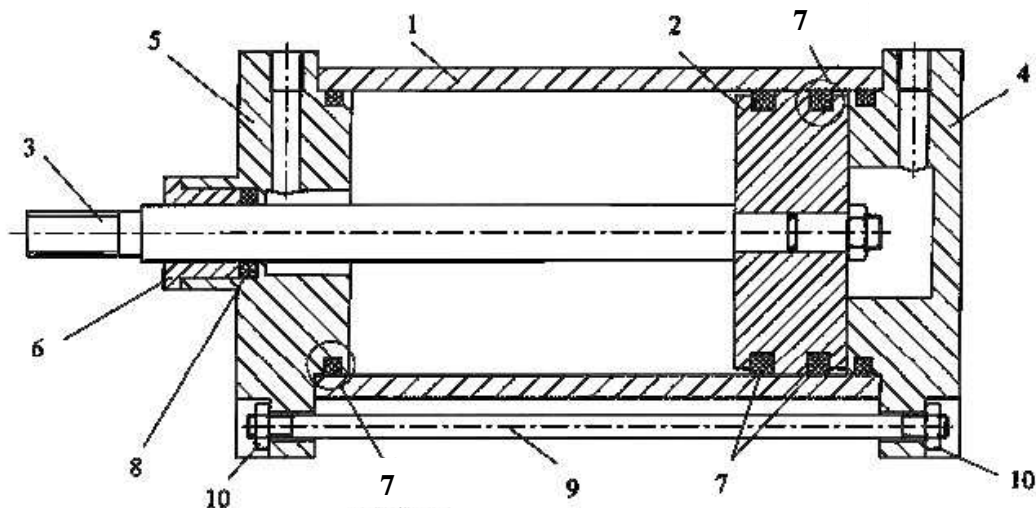
U shemama se za obje izvedbe koristi isti simbol.

Dijelovi cilindra (*Sl. 4.1*):

- 1) plašt cilindra (košuljica)
- 2) klip
- 3) klipnjača
- 4) stražnji poklopac
- 5) prednji poklopac (kroz koji prolazi klipnjača)
- 6) vodilica / stezni prsten
- 7) brtva
- 8) brtva O-prsten
- 9) šipka za spajanje
- 10) matice za spajanje

*Priključci za zrak* smješteni su u poklopcima cilindra.

Brzina klipa obično je 1-2 m/s (maksimalno do 10 m/s), hod: do 2,5 m (maksimalno do 12 m – za cilindre bez klipnjače [2]), promjer cilindra: do 500 mm, sila: do 30 kn [1]. Koeficijent korisnog djelovanja obično se kreće u granicama  $\eta=70-90\%$ . Brtve obično podnose temperaturu od  $-20$  do  $200$  °C. Klip klipnjača i košuljica su obično čelični, a za košuljicu se poneki puta koriste aluminij ili bronca.

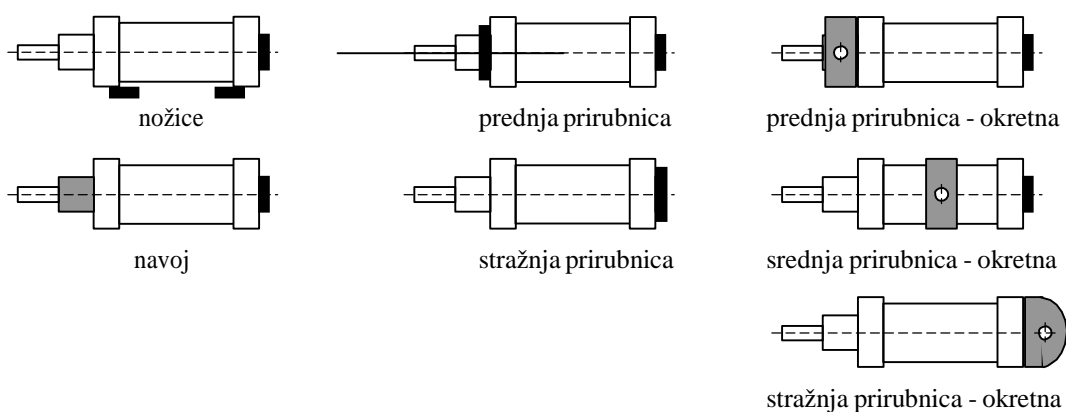


Sl. 4.1 Dvoradni klipni cilindar [6]: 1 – cilindar, 2 – klip, 3 – klipnjača, 4 – prednji poklopac, 5 – stražnji poklopac, 6 – očnica, 7-8 – brtve, 9 – šipka, 10 – matica

Načini pričvršćenja cilindra su (Sl. 4.2):

- s nogama
- s navojem
- s prirubnicom (sprijeda/straga, nepomična/okretna)

Postoji više standardnih povezivanja na klipnjaču, i odgovarajućih normiranih završetaka klipnjače.



Sl. 4.2 Načini pričvršćenja cilindra

#### 4.1.1.1 Jednoradni cilindri

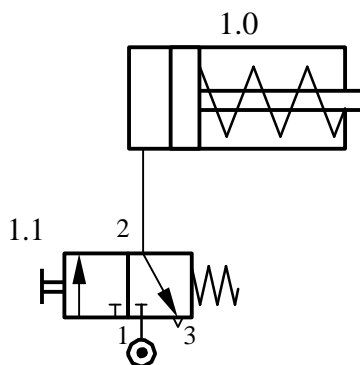
Vrše koristan rad samo u jednom smjeru, priključak zraka nalazi se samo na prednjoj strani, povratno kretanje najčešće se ostvaruje oprugom (ona ograničava maksimalni hod klipa otprilike na 100 mm) ili težinom tereta. Neki puta povratno kretanje



ostvaruje se stražnjim priključkom na reducirani tlak (regulacijski ventil) ili na spremnik zraka ("zračni jastuk"), a stražnja komora tada nema otvor prema atmosferskom tlaku.

Koriste se za pritezanje i izbacivanje izratka, utiskivanje (žig), dodavanje, pomicanje itd., kad nije bitna brzina povratnog kretanja klipa.

Za upravljanje jednoradnim cilindrom koriste se razvodnici 3/2 (3 priključka / 2 položaja, v. Razvodnici i Sl. 4.3).



Sl. 4.3 Shema upravljanja i simbol za jednoradni cilindar s oprugom

Statička sila  $F$  koju može ostvariti klip jednoradnog cilindra s oprugom u krajnjem položaju iznosi

$$F = pS_1 - F_{Omax}, \quad (4.1)$$

$p$  – tlak napajanja

$S_1$  – površina čela klipa (stražnja)

$F_{Omax}$  – sila u opruzi stlačenoj do kraja

Sila na klipnjači iznosi

$$F = pS_1 - p_2S_2 - F_t - F_O \approx kpS_1 - F_O, \quad (4.2)$$

pri čemu je  $p_2S_2$  sila tlaka u prostoru s oprugom, a  $F_t$  sila trenja. Koeficijent  $k$  za jednoradni cilindar obično iznosi  $k=0,8 \div 0,9$ .

Teoretski protok zraka kroz cilindar dobiva se prema izrazu

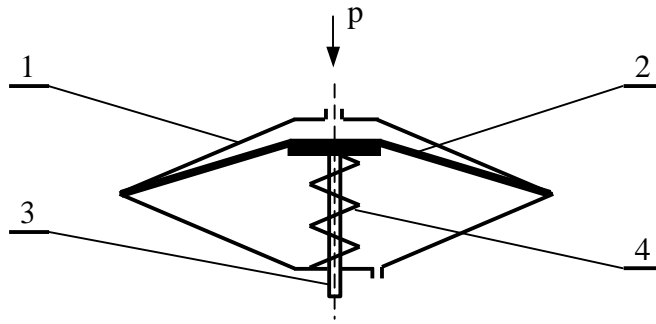
$$Q_{1T} = nLS \frac{P}{p_1}, \quad (4.3)$$

pri čemu  $n$  označava broj ciklusa u jedinici vremena,  $L$  je hod, a  $S$  aktivna površina klipa,  $p$  je apsolutni radni tlak, a  $p_1$  je tlak usisavanja (atmosferski).

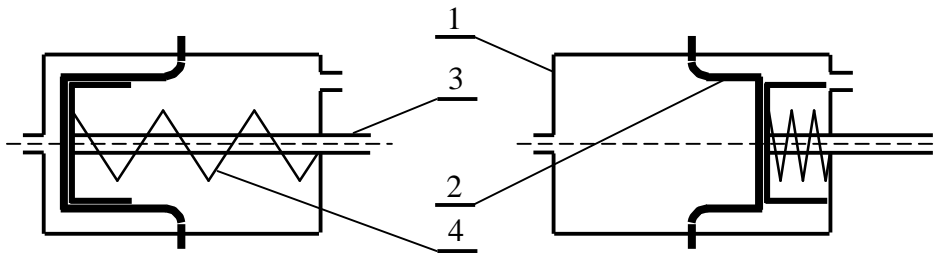
### Membranski cilindri

U odnosu na klipne, membranski cilindri omogućavaju veće sile uz kraće hodove i niže frekvencije rada. Postoje dvije izvedbe membrane, *tanjurasta* (Sl. 4.4) i *"putujuća"* (Sl. 4.5).

Pretežno se koriste jednoradni membranski cilindri i to s tanjurastom membranom. Takav cilindar izvodi se za sile do 400 kN (tandem-izvedba) uz hod od maks. 80 mm. Maks. hod cilindra s "putujućom" membranom iznosi oko 200 mm.



Sl. 4.4 Jednoradni cilindar s tanjurastom membranom: 1 – cilindar, 2 – membrana, 3 – šipka, 4 - opruga

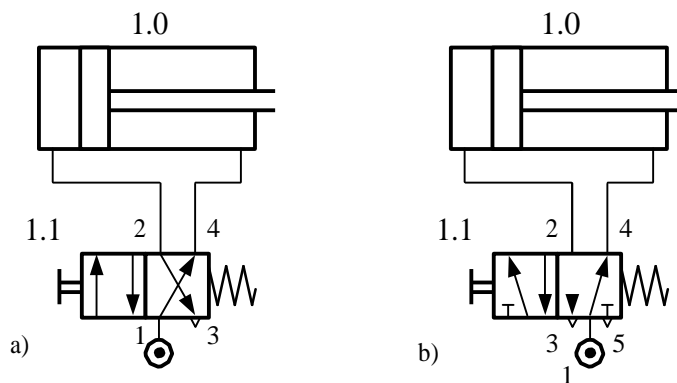


Sl. 4.5 Jednoradni cilindar s "putujućom" membranom: 1 – cilindar, 2 – membrana, 3 – šipka, 4 - opruga

#### 4.1.1.2 Dvoradni cilindri

Dvoradni cilindri vrše *koristan rad u oba smjera* (guraju i vuku), a priključci za zrak (prednji i stražnji) nalaze se s obje strane klipa. Za pokretanje klipa stlačeni zrak dovodi se u komoru s jedne strane klipa, a istovremeno se komora na suprotnoj strani mora rasteretiti (odzračiti odn. spojiti s atmosferom).

Za upravljanje dvoradnim cilindrom koriste se razvodnici 4/2 ili 5/2 ( v. Razvodnici i Sl. 4.6).



Sl. 4.6 Dvoradni cilindar – simbol i sheme upravljanja pomoću razvodnika a) 4/2, b) 5/2

Promjeri klipa kreću se otprilike u granicama 5-500 mm. Površina stražnje strane klipa veća je od površine prednje strane klipa za iznos površine presjeka klipnjače ( $S_1 > S_2$ ).

Zato je sila  $F = pS$  koju klip ostvaruje pri kretanju prema naprijed (udesno) veća od sile pri kretanju unazad (ulijevo) ( $F_1 > F_2$ ). Uz pretpostavku jednakog volumenskog protoka zraka za napajanje kroz stražnji (kretanje unaprijed) i prednji (kretanje unazad) priključak ( $Q_1 = Q_2 = Q$ ), bit će brzina kretanja klipa unazad veća nego unaprijed ( $v_1 = Q/S_1 < v_2 = Q/S_2$ ).

Zanemarivši razliku u površinama klipa, sila na klipnjači dvoradnog cilindra može se procijeniti prema izrazu

$$F = pS_1 - p_2S_2 - F_t \approx kpS_1, \quad (4.4)$$

pri čemu  $p_2S_2$  predstavlja silu tlaka uslijed ostatka zraka u komori s druge strane klipa, a  $F_t$  je sila trenja. Koeficijent  $k$  za dvoradni cilindar obično iznosi  $k=0,4 \div 0,6$ .

*Teoretski protok zraka* kroz cilindar (sveden na stanje na ulazu kompresora) dobiva se prema izrazu

$$Q_{IT} = nL \frac{p}{p_1} (S_1 + S_2), \quad (4.5)$$

pri čemu  $n$  označava broj ciklusa (pomaka u oba smjera) u jedinici vremena,  $L$  je hod,  $S_1$  i  $S_2$  aktivne površine klipa,  $p$  je apsolutni radni tlak, a  $p_1$  je tlak usisavanja (atmosferski).

*Brzina kretanja klipa* može se odrediti iz zakona količine gibanja zapisanog za klipnjaču

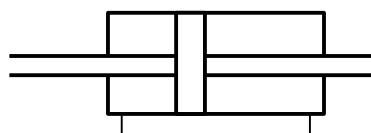
$$(m_K + m_T)a = F + F_T, \quad (4.6)$$

gdje  $m_K$  označava masu klipa i klipnjače,  $m_T$  masu svih opterećenja,  $F_T$  su sva vanjska opterećenja na klipnjaču, a  $F$  je korisna sila kojom cilindar djeluje na klipnjaču i koja zavisi od položaja i brzine kretanja klipa. Masa  $m_K$  često se smije zanemariti. Obično se kretanje klipa može podijeliti u tri faze – ubrzavanje, jednoliko gibanje i usporavanje.

Za relativno duge cilindre potrebno je izvršiti *proračun* klipnjače *na izvijanje*.

### Cilindar s dvostranom (prolaznom) klipnjačom

Klipnjača se nalazi s obje strane cilindra, jednake su površine ( $S_1=S_2$ ) na prednjoj i stražnjoj strani, a isto tako i sile ( $F_1=F_2$ ) i brzine kretanja klipa ( $v_1=v_2$ ) u oba smjera.

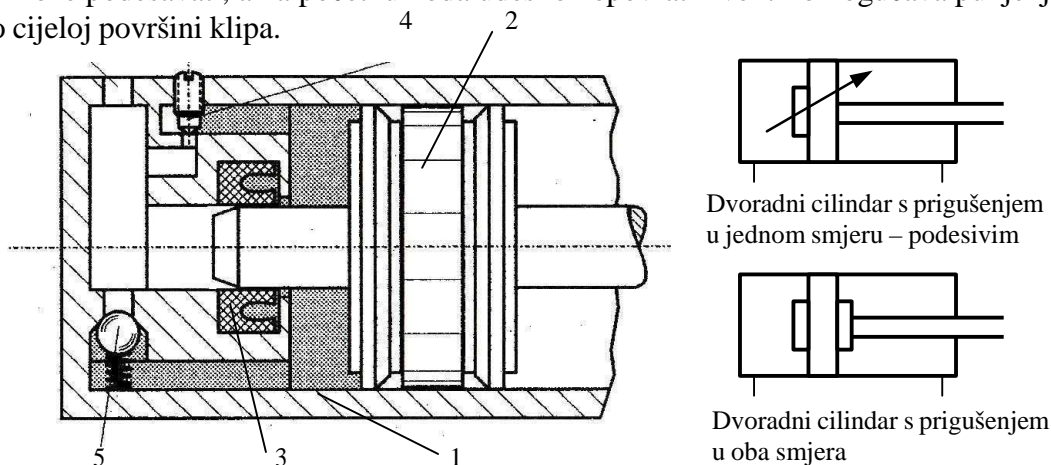


Dvoradni cilindar s dvostranom klipnjačom

### Cilindar s ublaživačima udara

Cilindar s ublaživačem udara (s odbojnikom, s prigušenjem u krajnjem položaju) prigušuje strujanje zraka pri kraju kretanja klipa, kako bi se u krajnjem položaju izbjegli udari klipnjače. Klip nosi manji klip, koji pri kraju hoda zatvara odvod zraka, pa se do kraja hoda zrak odvodi užim kanalom, preko prigušnice (zračni amortizer).

Sl. 4.7 prikazuje cilindar s prigušenjem samo u lijevom krajnjem položaju, prigušenje se može podešavati, a na početku hoda udesno nepovratni ventil omogućava punjenje po cijeloj površini klipa.



Sl. 4.7 Cilindar s podešivim prigušenjem u krajnjem lijevom položaju [2]: 1 – cilindar, 2 – klip, 3 – brtva, 4 – prigušnica, 5 – nepovratni ventil

## Odabir cilindra

Kriteriji za odabir cilindra

- potrebna sila
- potreban hod
- potrebna brzina
- konstrukcija cilindra (učvršćenje cilindra, spoj klipnjače, priključci)

Moguć je niz standardnih i specijalnih izvedbi, a za izbor se koriste dijagrami.

*Primjer odabira cilindra*

Odaberite promjer dvoradnog cilindra ako je potrebna sila na klipnjači  $F = 350 \text{ N}$ , a nazivni tlak iznosi  $p_n = 6,5 \text{ bar}$ .

Ako se za dvoradni cilindar odabere koeficijent  $k = 0,5$ , dobije se promjer cilindra

$$D = \sqrt{\frac{4 F}{\pi k p_n}} = 37 \text{ mm}$$

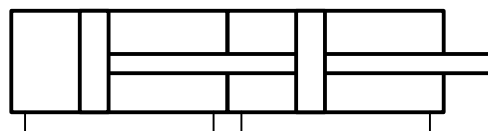
Odabire se standardni cilindar promjera  $D = 40 \text{ mm}$ . Kako bi se tim cilindrom ostvarila željena sila, tlak napajanja treba podešiti na vrijednost

$$p = \frac{F}{k \pi D^2} = 5,57 \text{ bar}.$$

### 4.1.1.3 Posebne izvedbe cilindara

#### Tandem cilindar

Dva cilindra (i dva klipa) koriste istu klipnjaču. Uz isti hod i promjer, povećava se sila. Pri tome i klipnjača mora biti šira (čvršća).

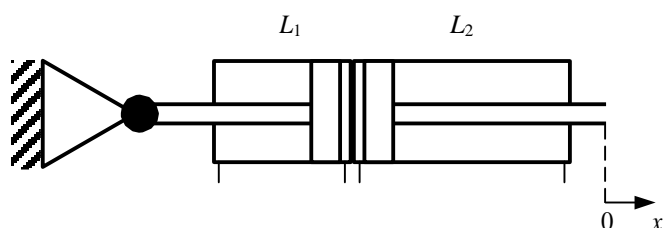


Tandem-cilindar

## Cilindri s više položaja

To je serijski spoj dva cilindra koji se dodiruju stražnjom stranom. U slučaju jednakog hoda moguća su 3 različita položaja, inače 4. Ako se hod prvog klipa označi s  $L_1$ , a drugog s  $L_2$  (Sl. 4.8), moguća su sljedeća 4 položaja vrha klipnjače ( $x$ ):

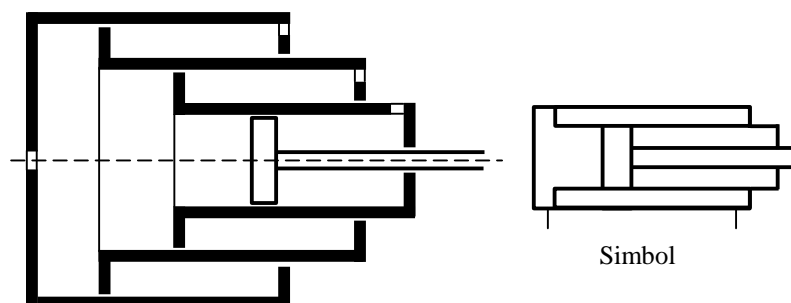
- 1)  $x = 0$
- 2)  $x = L_1$
- 3)  $x = L_2$
- 4)  $x = L_1 + L_2$



Sl. 4.8 Princip rada cilindra s više (4) položaja

## Teleskopski cilindar

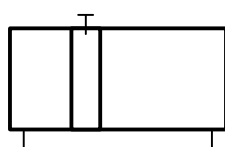
Teleskopski cilindri koriste se kad je potreban dugi hod klipnjače. Oni se sastoje od više cilindra koji su smješteni jedan unutar drugog, pa se izvlače ključući jedan po drugome (Sl. 4.9).



Sl. 4.9 Princip rada i simbol teleskopskog cilindra

## Cilindar bez klipnjače

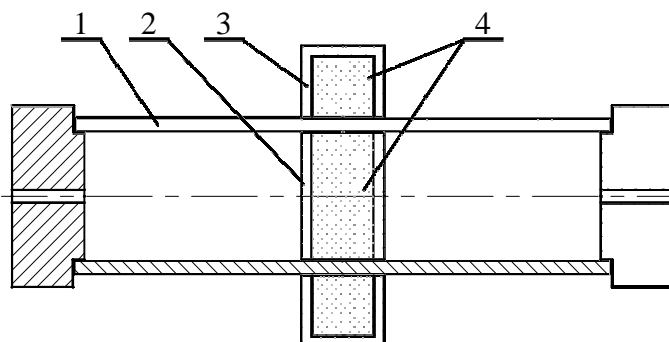
Cilindri s klipnjačom zahtijevaju povećanu duljinu za ugradnju radi izvlačenja klipnjače. Kod cilindara bez klipnjače ta povećana duljina nije potrebna, zato se oni sve češće koriste. Za pomicanje tereta imaju vanjski klizač, a često i vodilice za njega. Omogućavaju posebno duge hodove klipa odn. pomake, do 12 m [2].



Simbol cilindra bez klipnjače

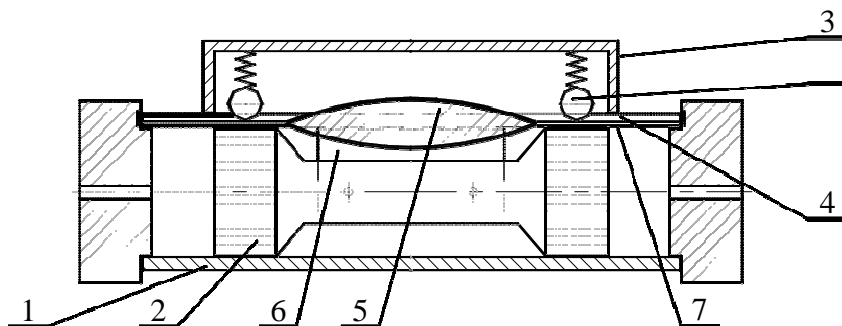
*Magnetski cilindar* (Sl. 4.10) silu klipa prenosi na vanjski klizač putem trajnih magneta. Pneumatski sustav je zatvoren i neosjetljiv na nečistoće. Opterećenje je

ograničeno maksimalnom silom magneta. Prekoračenjem te sile klizač sklizne, pa preopterećenje nije dopušteno.



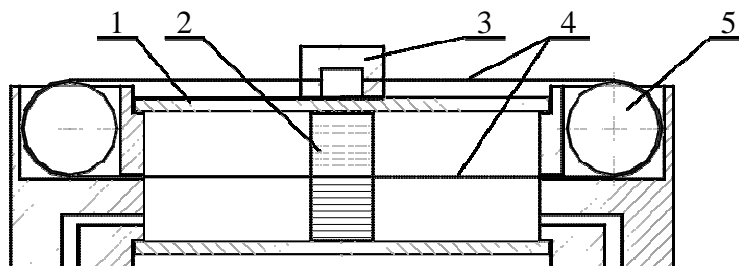
Sl. 4.10 Princip magnetskog cilindra: 1 – cilindar, 2 – klip, 3 – klizač, 4 – magneti

Cilindar s uzdužnim prorezom (Sl. 4.11) ima klip znatne duljine koji u izvjesnoj mjeri može preuzeti poprečna opterećenja i momente. Za prijenos sile cilindar ima uzdužni prorez kroz koji se kreće odgovarajući zub klizača. Zub je s vanjske strane pomoću ploče čvrsto vezan za šipku klipa. S vanjske i unutrašnje strane zuba prolazi po jedna čelična traka za brtvljenje proreza cilindra. Elastičnim brtvenim elementom ove se dvije trake pritišću jedna uz drugu na prednjem i stražnjem kraju klipa. Zbog brtvljenja javljaju se pri pomicanju klipa znatne sile trenja.



Sl. 4.11 Princip cilindra s uzdužnim prorezom: 1 – cilindar, 2 – klip, 3 – klizač, 4 – prorez, 5 – zub, 6 – ploča, 7 – traka, 8 – brtveni element

Cilindar s trakom ili užetom (Sl. 4.12) ima klip vezan na čeličnu traku ili uže umjesto klipnjače. Sila se na klizač prenosi pomoću trake (užeta) preko odgovarajućih kolotura. Gubici propuštanja kroz brtve za traku (uže) relativno su veliki.

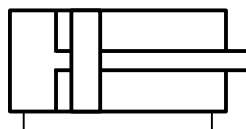


Sl. 4.12 Princip cilindra s trakom ili užetom: 1 – cilindar, 2 – klip, 3 – klizač, 4 – traka ili uže, 5 – kolotura

## Udarni cilindar

Udarni cilindar koristi se kad je potrebno ostvariti udarno djelovanje (kovanje, zakivanje, utiskivanje i sl.).

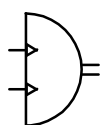
Karakteristika ovih cilindara je masivni klip bez klipnjače koji na jednom kraju hoda udara u alat. Svojem kretanjem naprijed-nazad klip naizmjenično otvara i zatvara dva aksijalna provrta u cilindru. Time se kroz provrte naizmjenično odzračuje prednja i stražnja komora cilindra. To dovodi do naizmjeničnih promjena tlaka koje prebacuju položaj ventila za napajanje (bistabil). Tako se kroz taj ventil tlak napajanja naizmjenično dovodi u prednju i stražnju komoru, što dovodi do oscilatornog kretanja klipa naprijed-nazad.



Simbol udarnog cilindra

### 4.1.1.4 Zakretni cilindri

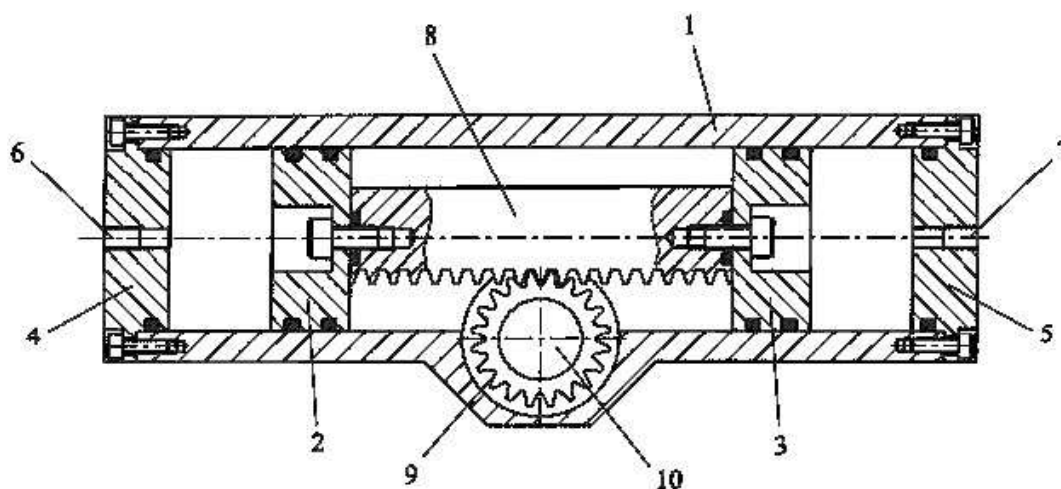
Zakretni cilindri ili cilindri za kružno gibanje ostvaruju ograničeno (njihajuće) kružno gibanje (okretanje, uvrtnje i sl.). Simbol zakretnog cilindra je polukrug, čime se simbolizira ograničeno kružno gibanje.



Simbol zakretnog cilindra

### Cilindar sa zubnom letvom

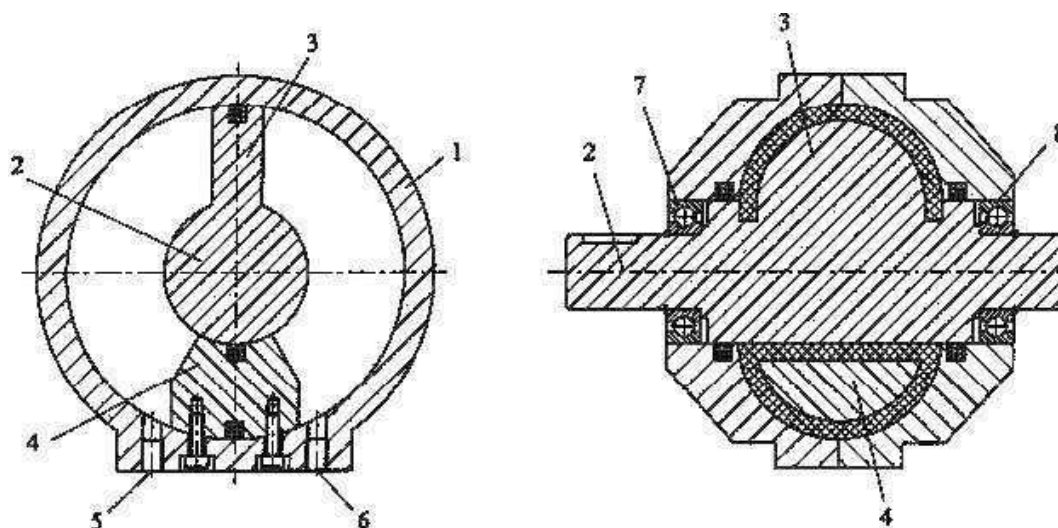
Dio klipnjače dvoradnog cilindra izveden je kao zubna letva (Sl. 4.13), pomoću koje se pomak klipa pretvara u kružno gibanje zupčanika i izlaznog vratila. Cilindri sa zubnom letvom izvode se za maksimalno dva zakreta vratila.



Sl. 4.13 Cilindar sa zubnom letvom [6]: 1 – cilindar, 2-3 – klip, 4-5 – poklopci, 6-7 – priključci, 8 – zubna letva, 9 – zupčanik, 10 - vratilo

## Cilindar sa zakretnom pločom

Ovaj cilindar izgleda poput lamelnog pneumatskog motora s jednom lamelom (zakretnom pločom, krilom - Sl. 4.14). Zakretna ploča ima brtvu prema cilindru, a vezana je na vratilo. Zakretanje se ostvaruje dovođenjem stlačenog zraka s jedne ili druge strane ploče. Mogući kut zakreta vratila redovito je manji od  $360^\circ$ .



Sl. 4.14 Cilindar sa zakretnom pločom [6]: 1 – cilindar, 2 – vratilo, 3 – zakretna ploča, 4 – razdjelna ploča, 5-6 – priključci, 7-8 – ležajevi

Za ograničeno kružno gibanje koriste se još cilindar s vratilom sa zakrivljenim utorom, izvršni element sa zupčastim remenom i koračni motori.

### 4.1.2 Primjer – Dimenzioniranje sustava dobave zraka

Ovaj primjer maksimalno je pojednostavljen obzirom na prisutne pneumatske elemente i metode proračuna. Njime se jedino nastoji pružiti što jasniji uvid u zavisnosti među pneumatskim elementima i odnose među bitnim parametrima sustava. Zadatak je dimenzionirati sustav za dobivanje stlačenog zraka za trivijalni pneumatski sustav. Napomena: u formulama su sve veličine izražene u koherentnom sustavu jedinica (sve veličine treba izraziti u osnovnim jedinicama SI sustava).

#### Odabir cilindra

Potrebno je odabrati  $n_C=10$  istovjetnih dvoradnih cilindara s prolaznom klipnjačom za neki proces u kojem cilindar mora ostvarivati silu  $F = 1,6$  kN na klipnjači u oba smjera uz hod  $h = 6$  cm. Hod cilindra traje  $\tau_C = 2$  s, a broj ciklusa cilindra (uvlačenje i izvlačenje klipnjače) u minuti iznosi  $n=5$  uz koeficijent istodobnosti  $k_i = 60\%$ . U praksi, ovakvi podaci izračunaju se iz uvjeta konkretnog radnog procesa.

Ako se pretpostavi radni tlak  $p_{pr} = 7$  bar i promjer klipnjače  $d_K = 20$  mm, uz uobičajeni koeficijent  $k=0,5$  (zbog trenja i ostatka tlaka) dobiva se potrebni promjer klipa dvoradnog cilindra

$$D = \sqrt{\frac{4 F}{\pi k p_{pr}} + d_K^2} = 78,87 \text{ mm}$$

Odabire se standardni cilindar promjera  $D = 80$  mm, tako da potrebni radni tlak iznosi



$$p = \frac{F}{k \pi (D^2 - d_k^2)} = 6,79 \text{ bar} .$$

### Protok

Ako se pretpostavi da gubici zraka u cjevovodu iznose uobičajenih  $k_{GV} = 20\%$ , ukupni srednji potrebni protok zraka sveden na ulaz kompresora (tj. pri atmosferskom tlaku  $p_a = 1,01325 \text{ bar}$ ,  $\rho_a = 1,29 \text{ kg/m}^3$ ) za dvoradne cilindre (dvostruki broj ciklusa) iznosi

$$Q_1 = (1 + k_{GV}) \frac{p + p_a}{p_a} \frac{2nn}{c} \frac{\pi (D^2 - d_k^2)}{4} h = 4,355 \frac{l}{s}$$

Očekuje se da maksimalni protok kroz cjevovod neće premašivati vrijednost

$$Q = (1 + k_{GV}) \frac{k n}{\tau_c} \frac{\pi (D^2 - d_k^2)}{4} h = 1,018 \frac{l}{s}$$

### Cjevovod

Kako bi se u najvećoj mjeri pojednostavio proračun cjevovoda, ne proračunava se razvodna mreža, nego se pretpostavlja da su svi cilindri smješteni vrlo blizu završetka cjevovoda za dobavu zraka. Duljina cjevovoda iznosi  $L = 60 \text{ m}$ , a odabire se promjer cijevi  $d = 15 \text{ mm}$ . Prema jednadžbi stanja idealnog plina gustoća zraka u cijevi iznosi

$$\rho = \rho_a \frac{p + p_a}{p_a} = 9,935 \frac{kg}{m^3}$$

Koristeći odgovarajuće metode i priručnike određuju se koeficijent trenja za odabranu cijev, npr.  $\lambda = 0,04$ , i ukupni lokalni gubici za projektiranu armaturu, npr. ukupna ekvivalentna duljina  $L_e = 15 \text{ m}$  (zbroy ekvivalentnih duljina cjevovoda svih lokalnih gubitaka). Uz te vrijednosti pad tlaka uslijed gubitaka u cjevovodu iznosi

$$\Delta p_F = \lambda \frac{L + L_e}{d} \rho \frac{8Q^2}{\pi^2 d^4} = 0,3296 \text{ bar}$$

Ova vrijednost ne premašuje 5% (0,35 bar) radnog tlaka, pa se prihvaća promjer  $d = 15 \text{ mm}$ . U suprotnom slučaju, treba odabrati novi promjer i ponoviti proračun cjevovoda.

### Kompresor

Odabire se kapacitet kompresora dvostruko veći od potrebnog, tj.  $Q_K = 2Q_1 = 8,7 \text{ l/s}$ , tako da će kompresor biti uključen 50% ukupnog radnog vremena. Pretpostavlja se stupanj korisnog djelovanja kompresora  $\eta_K = 60\%$ , a potrebni tlak je

$$p_2 = p + p_F = 7,12 \text{ bar}$$

tako da potrebna snaga kompresora iznosi

$$P_K = \frac{p_a Q_K}{\eta_K} \ln \frac{p_2 + p_a}{p_a} = 3,06 \text{ kW}$$

### Spremnik

Dozvoljeno je 15 uključivanja kompresora na sat, što znači da minimalno dozvoljeno vrijeme ciklusa uključivanja i isključivanja iznosi  $\tau = 4 \text{ min}$ . Ako se odabere razlika tlaka uključivanja i isključivanja (on/off regulacija)  $p = 0,5 \text{ bar}$ , volumen spremnika treba iznositi

$$V_s = \frac{Q_1 \tau p_a}{\Delta p} \left( 1 - \frac{Q_1}{Q_k} \right) = 1,058 \text{ m}^3$$

Volumen spremnika  $V_s$  bio bi otprilike dvostruko manji, a razlika tlaka  $p$  dvostruko veća, kad bi se na uobičajeni način uzeo volumen spremnika jednak minutnom protoku kompresora  $Q_k$ .

### Hladnjak

Zbog sušenja zraka, hladnjak se postavlja neposredno iza kompresora. Radi jednostavnosti pretpostavlja se da je sav utrošeni rad kompresora predan stlačenom zraku (termički izolirani kompresor bez među-hladnjaka). Ako se pretpostavi da entalpija zavisi samo od temperature zraka (idealni plin,  $c_p=1001 \text{ J/kgK}$ ), te ukoliko su temperature na ulazu u kompresor i na izlazu iz hladnjaka jednake, jednadžba održanja energije zahtijeva da odvedena osjetna toplota (snaga) bude jednaka snazi kompresora. Ovdje se pretpostavlja da temperatura zraka na ulazu u kompresor iznosi  $t_a = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , uz relativnu vlažnost zraka  $\varphi_a=95\%$  (tlak isparavanja vode pri  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  iznosi  $p_{p1}' = 2337 \text{ Pa}$ , a entalpija zasićene pare ), dok se kao izlazna temperatura iz hladnjaka odabire  $t_3 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  (tlak isparavanja vode pri  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  iznosi  $p_{p3}' = 3169 \text{ Pa}$ ).

Tada snaga odvedene osjetne topline iznosi

$$P_{Qo} = P_k - c_p \rho_a Q_k (t_3 - t_a) = 3,003 \text{ kW}$$

Hladnjak mora odvesti i latentnu toplinu koja se oslobađa ukapljivanjem viška vlage. Ta kondenzirana voda odvaja se i uklanja u samom hladnjaku ili neposredno iza njega. U ulaznom zraku parcijalni tlak pare iznosi

$$p_{p1} = \varphi_a p_{p1}' = 2220 \text{ Pa}$$

a vlažnost je

$$x_a = 0,6222 \frac{p_{p1}}{p_a - p_{p1}} = 1,394\%$$

Iz hladnjaka, pri apsolutnom radnom tlaku  $p_2 + p_a$ , izlazi zasićeni zrak (tj. zrak koji zadržava najveću moguću količinu vlage  $\varphi_3 = 100\%$ ,  $p_{p3} = p_3'$ ) s vlažnošću

$$x_3 = 0,6222 \frac{p_3'}{p_2 + p_a - p_3'} = 0,243\%$$

tako da maseni protok kapljevite vode koja se izdvaja iznosi

$$\dot{m}_k = \rho_a Q_k \left( \frac{x_a}{1 + x_a} - \frac{x_3}{1 + x_3} \right) = 0,457 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Ako se parcijalni tlakovi u kompresoru približno povećavaju u jednakim omjerima, parcijalni tlak pare na izlazu iz kompresora može se procijeniti prema

$$p_{p2} = p_{p1} \frac{p_2 + p_a}{p_a} = 17820 \text{ Pa}$$

Entalpija zasićene pare pri tlaku  $p_{p2}$  iznosi  $h_2'' = 2605 \text{ kJ/kg}$ , a entalpija zasićene kapljevite vode pri temperaturi  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  iznosi  $h_3' = 104,9 \text{ kJ/kg}$ , pa se snaga odvedene latentne topline može procijeniti kao

$$P_{Ql} = \dot{m}_k (h_2'' - h_3') = 318 \text{ W}$$

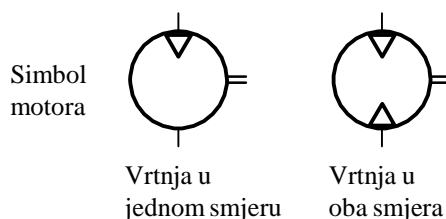
tako da potrebna ukupna toplinska snaga hladnjaka iznosi

$$P_Q = P_{Qo} + P_{Ql} = 3,321 \text{ kW}$$

### 4.1.3 Pneumatski motori

Pneumatski motori su rotacijski izvršni elementi kojima se ostvaruje kontinuirano kružno gibanje vratila. U odnosu na kompresore u motorima se vrši suprotna pretvorba energije (pretvorba energije tlaka zraka u mehanički rad). Konstrukcija motora i kompresora je slična, a ponekad identična, tada se isti stroj može koristiti kao motor i kompresor. Kod nekih konstrukcija motora je smjer vrtnje proizvoljan, a promjena smjera se postiže promjenom priključka za stlačeni zrak. U pneumatske pogonske strojeve ubrajaju se:

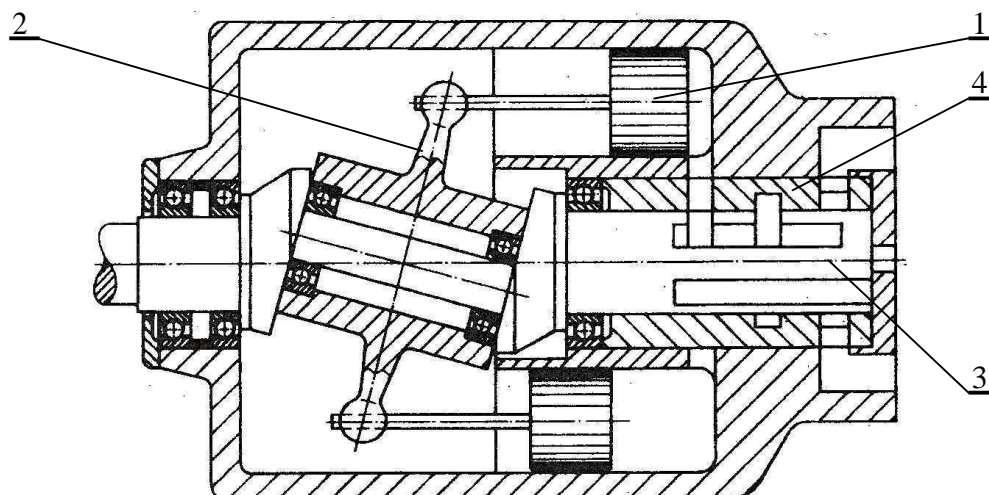
- klipni motori
  - aksijalni
  - radijalni
- lamelni motori
- zupčasti motori
- vijčani motori
- zračne turbine
- koračni motori (ponekad mogu ostvariti kontinuiranu vrtnju)



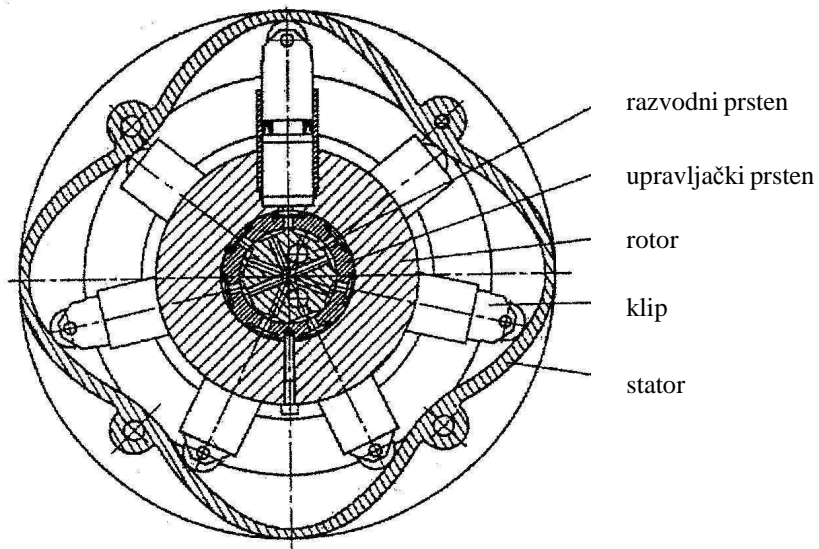
### Klipni motori

Kod klipnih motora često se ne koriste ventili, nego se raspodjela zraka ostvaruje putem *upravljачke ploče* (obično ima raspор u obliku polumjeseca). Moguća je vrtnja u oba smjera. Omjer mase i snage ovih motora je relativno nepovoljan odn. mali, a volumetrički gubici su mali. Postižu snagu 1÷20 kW uz brzinu vrtnje od 500÷5000 okr/min [3].

Kod *aksijalnih klipnih motora* (Sl. 4.15) pretvaranje pravocrtnog gibanja klipa u kružno gibanje vratila ostvaruje se nagibnom ili oscilirajućom pločom (aksijalni ekscentar).



Sl. 4.15 Aksijalni motor – izvedba s oscilirajućom pločom [2]: 1 – klip, 2 – oscilirajuća ploča, 3 – razvodni prsten, 4 – upravljачki prsten

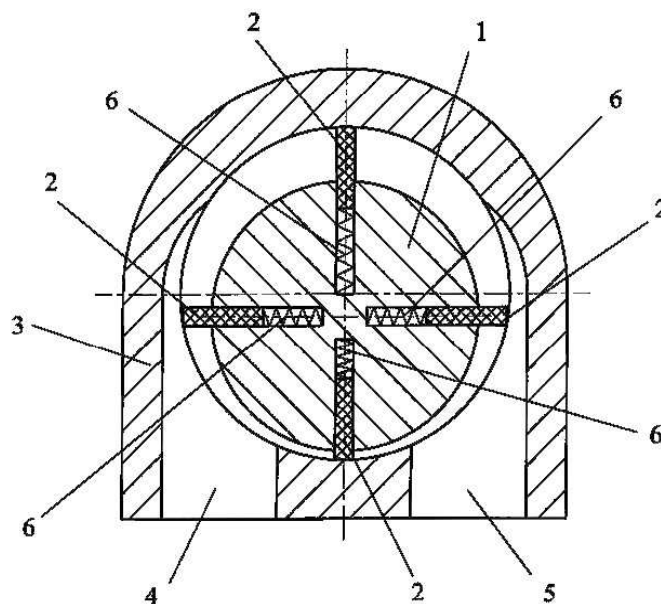


Sl. 4.16 Radijalni motor [2]

Radijalni klipni motori imaju vanjski mirujućí ekscentar po kojem se klížu klipovi koji rotiraju zajedno s blokom motora. Sl. 4.16 prikazuje višestupanjski motor s više 'ekscentara', tako da klip obavlja 4 ciklusa u jednom okretu. Rotor se tada postavlja u centralni položaj.

### Lamelni motor

Kod lamelnog motora rotor se postavlja ekscentrično u odnosu na stator (Sl. 4.17). Zrak je zarobljen u prostoru između lamela, površine rotora i površina statora (cilindar i 2 bočne površine). Ponekad se i kod lamelnih motora koriste dvije radne komore i centralni položaj rotora. Neke izvedbe imaju na sredini hoda dodatni otvor za odzračivanje. Uobičajene brzine vrtnje su  $6000 \div 30000$  okr/min. Omjer snage i mase ovih motora je relativno velik.



Sl. 4.17 Princip rada lamelnog motora [6]: 1 – rotor, 2 – lamela, 3 – stator, 4-5 – priključci, 6 – opruga

#### 4.1.4 Pneumo-hidraulički elementi

U pneumo-hidrauličkim elementima vrši se promjena radnog medija, snaga se od zraka predaje na hidrauličko ulje koje se koristi za obavljanje rada. Korištenje hidrauličkog ulja omogućuje da se postignu *male i jednolične brzine kretanja* i/ili *velike sile*. Osnovne grupe pneumo-hidrauličkih elemenata su:

- pretvarač tlačnog medija
- uljni kočioni cilindar
- pojačalo tlaka

##### Pretvarač tlačnog medija

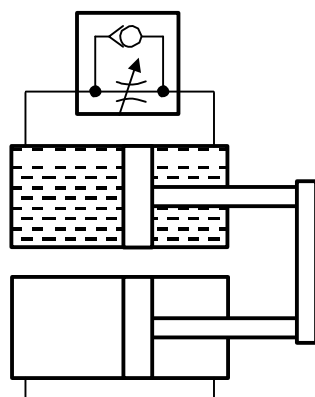
Zamjena radnog medija obavlja se u dvoradnom cilindru s klipom bez klipnjače. S jedne strane klipa dovodi se stlačeni zrak, a s druge se odvodi ulje pod tlakom.



Simbol pretvarača tlačnog medija

##### Uljni kočioni cilindar

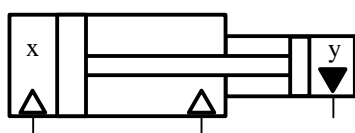
Uljni kočioni cilindar izvodi se mehaničkom vezom (poluga) dva cilindra od kojih je jedan priključen na zrak, a drugi na ulje. Polugom se cilindri mogu vezati paralelno (Sl. 4.18) i serijski (tandem-cilindar). Priključci uljnog cilindra povezuju se preko podesive prigušnice (v. Protočni ventili) – na taj način podešava se brzina kretanja klipa. Podesiva prigušnica na slici usporava klip samo pri gibanju udesno. Pri gibanju ulijevo otvara se prikazani nepovratni ventil.



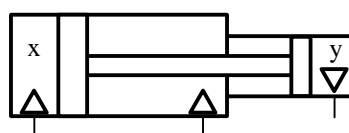
Sl. 4.18 Kočioni cilindar u paralelnoj vezi

##### Pojačalo tlaka

Pojačalo tlaka pretvara niži tlak zraka u viši tlak ulja (ili zraka). Sukladno omjeru površina klipova, pojačanje obično iznosi od 1:4 do 1:80.

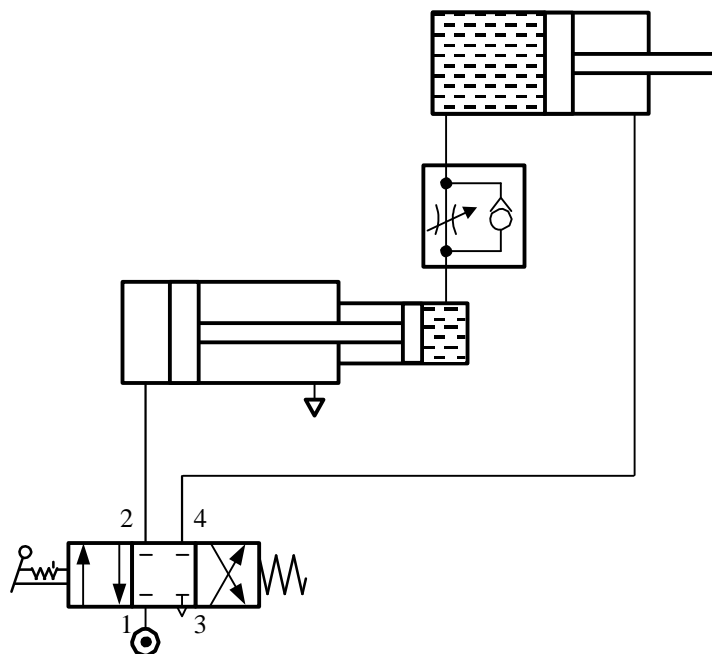


Simbol pojačala tlaka ulja



Simbol pojačala tlaka zraka

Na donjem primjeru (Sl. 4.19) prikazano je pojačanje uz zamjenu radnog medija zraka uljem, i to samo za gibanje klipa udesno. Lako je složiti razne druge kombinacije – za vježbu nacrtajte shemu za obostranu promjenu medija bez pojačanja. Upravljanje klipa vrši se pomoću 4/3 razvodnika (4 priključka, 3 položaja – v. Razvodnici). Razvodnik se pokreće ručicom s uskočnikom koji osigurava da sva 3 položaja razvodnika budu stabilna.



Sl. 4.19 Primjer promjene medija uz pojačanje

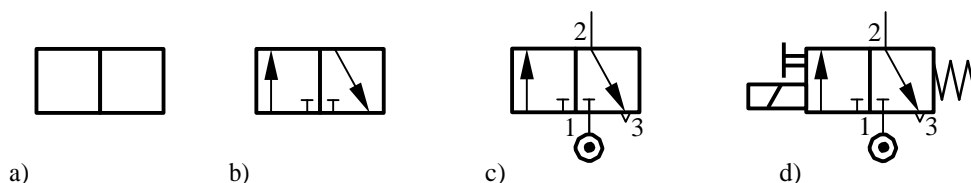
## 4.2 Ventili

Ventili – pneumatski upravljački elementi – su uređaji za regulaciju i usmjeravanje radnog medija. Moguće funkcije ventila uključuju: propuštanje, zaustavljanje i promjenu smjera medija; regulaciju protoka i tlaka. U pneumatskom upravljanju ventili prenose energiju i/ili informaciju.

Podjela:

- razvodnici
- zaporni ventili
- tlačni ventili
- protočni ventili
- kombinirani ventili
- cijevni zatvarači

U pneumatskim shemama koriste se *simboli ventila* koji prikazuju njihovu funkciju (ne konstrukciju). Ventil se prikazuje kvadratnim simbolima – broj kvadrata odgovara broju mogućih razvodnih položaja danog ventila (Sl. 4.20 a). Strelice ucrtane u polja (kvadrati) prikazuju razvodne putove i smjer protoka medija (b). Zatvoren put označava se poprečnom crtom unutar polja. Dovodni i odvodni priključci ucrtavaju se na polju nultog (mirnog) položaja (položaj koji ventil zauzima kad na njega ne djeluje upravljački signal) ili na polju polaznog položaja, ako ventil nema nultog položaja (c). Način aktiviranja označava se sa strane (d) – u ovom slučaju oprugom i kombinirano: elektromagnetom ili ručno.



Sl. 4.20 Značenje simbola ventila

Priključci ventila označavaju se brojevima, i to:

- radni priključci: 2, 4, 6...(A, B, C...)
- napajanje 1 (P)
- odzračivanje 3, 5 (R, S, T)
- priključak na upravljačke vodove 12, 14 (X, Y, Z)

#### 4.2.1 Razvodnik

Razvodnici usmjeravaju tok radnog medija – propuštanjem, zatvaranjem, promjenom smjera toka. Razvodnici se razlikuju po sljedećim karakteristikama:

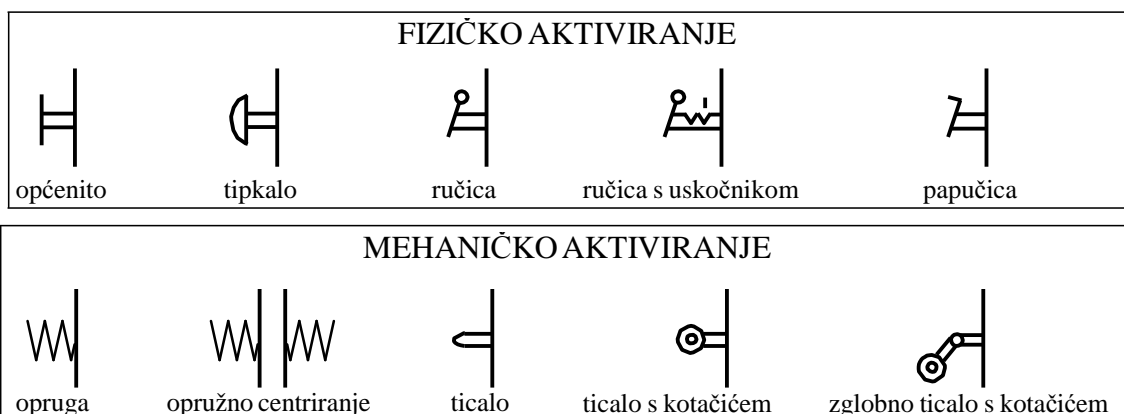
- tip
- veličina
- način aktiviranja
- duljina trajanja signala
- konstrukcija

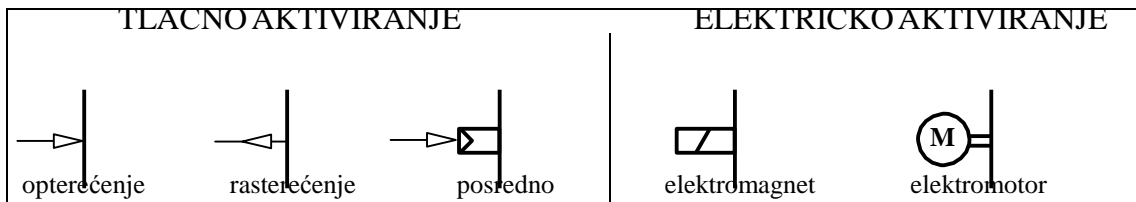
*Tip* razvodnika određen je brojem priključaka i razvodnih položaja (polja u simbolu). Oznaka tipa razvodnika stavlja se ispred naziva, npr. “3/2 razvodnik” (čita se tri kroz dva) označava razvodnik s 3 priključka i dva razvodna položaja.

*Veličina* razvodnika opisana je priključnom mjerom odnosno nazivnim promjerom (npr. ¼”) koja se odabire prema protoku medija.

Aktiviranje može biti neposredno i posredno (neposredni i posredni razvodnici). Mogući *načini* (neposrednog) *aktiviranja* razvodnika su:

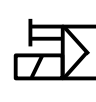
- fizičko
- mehaničko
- tlačno
- električko
- kombinirano





#### PRIMJER KOMBINIRANOG AKTIVIRANJA

elektromagnet i pomoćno fizičko aktiviranje  
preko posrednog (pilot) ventila



Prema *duljini trajanja signala* potrebnog za aktiviranje razvodnika, razvodnici se dijele na:

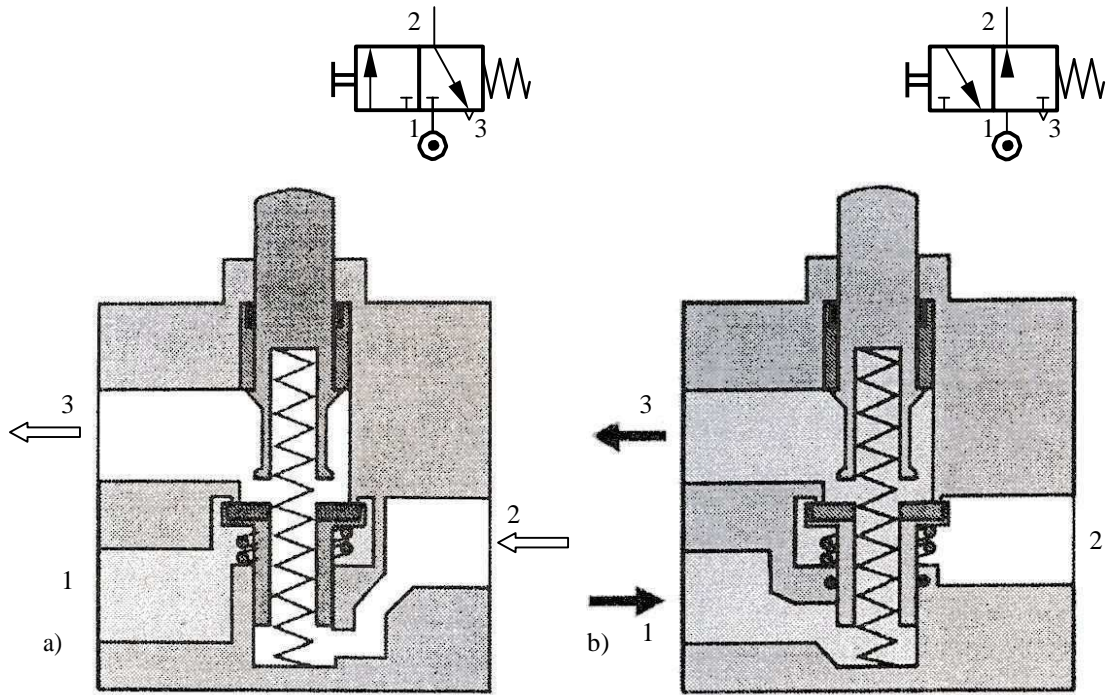
- razvodnike s *trajnim aktiviranjem* (monostabilne) koji su aktivirani u vremenu dok traje signal
- razvodnike s *trenutnim aktiviranjem* (bistabilne) koji su trajno aktivirani kratkim signalom (funkcija pneumatske memorije).

*Konstrukcija* je bitna u pogledu **trajnosti**, **sile** potrebne za aktiviranje, **veličine**, **načina aktiviranja**, **održavanja**, **pouzdanosti** rada razvodnika itd. Prema konstrukciji razvodnici se dijele na:

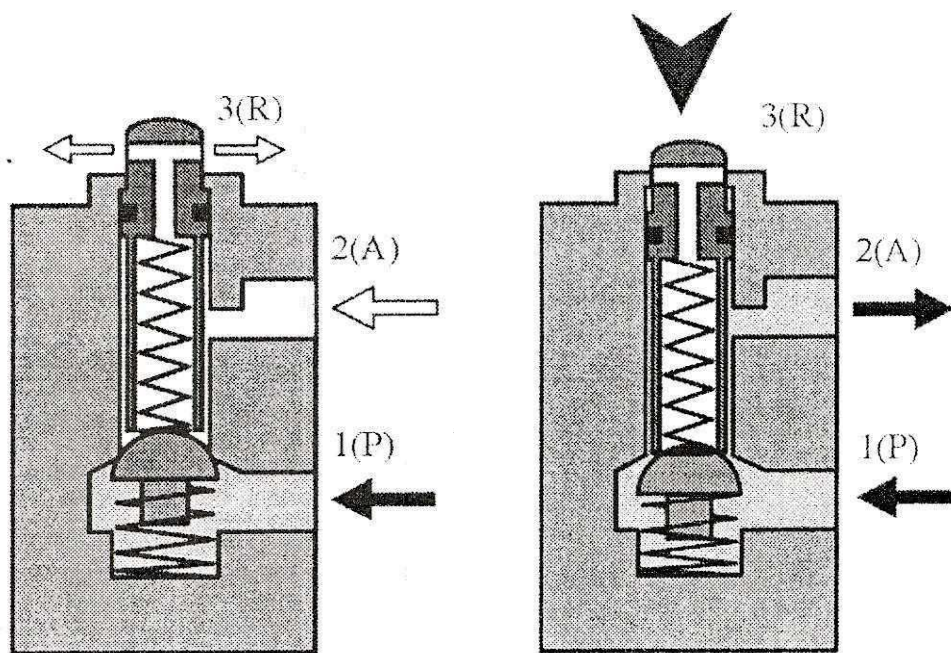
- Razvodnike sa *sjedištem*:
  - ravni (tanjurasti)
  - konusni
  - kuglasti
- Razvodnike s *kliznim prekrivanjem*:
  - klipni
  - pločasti
  - kulisni

Otvaranje / zatvaranje *ventila sa sjedištem* vrši se pomoću pladnja (oblik tanjura, ploče, stošca ili kugle) koji može otkriti / prekriti i pritiskanjem zatvoriti otvor koji se naziva sjedište. Sjedište je najčešće obloženo gumenom brtvom. Potreban je relativno mali pomak pladnja za otvaranje znatne protočne površine. Sila ovakvog aktiviranja je relativno velika, a vrijeme kratko. Ventili nisu naročito osjetljivi na nečistoće, jer struja zraka odnosi nečistoću i čisti sjedište. Tip razvodnika sa sjedištem obično je 2/2 ili 3/2 (*Sl. 4.21, Sl. 4.22*), a složeniji tipovi izvode se kombinacijom većeg broja razvodnika.



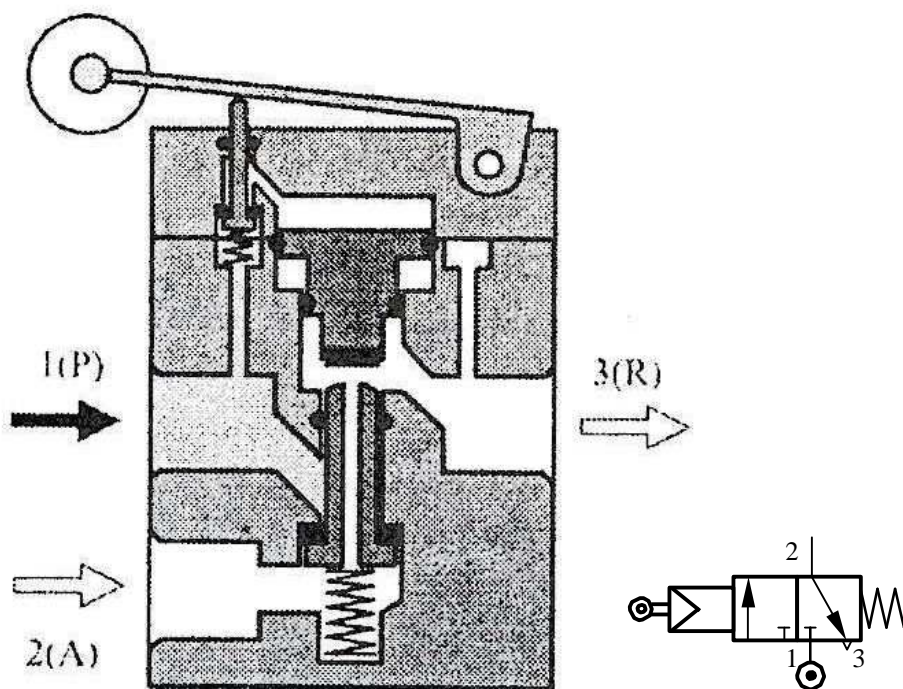


Sl. 4.21 Tanjurasti 3/2 razvodnik – u nultom položaju a) zatvoren b) otvoren [3]



Sl. 4.22 3/2 razvodnik s polukuglom – prije i nakon aktiviranja [3]

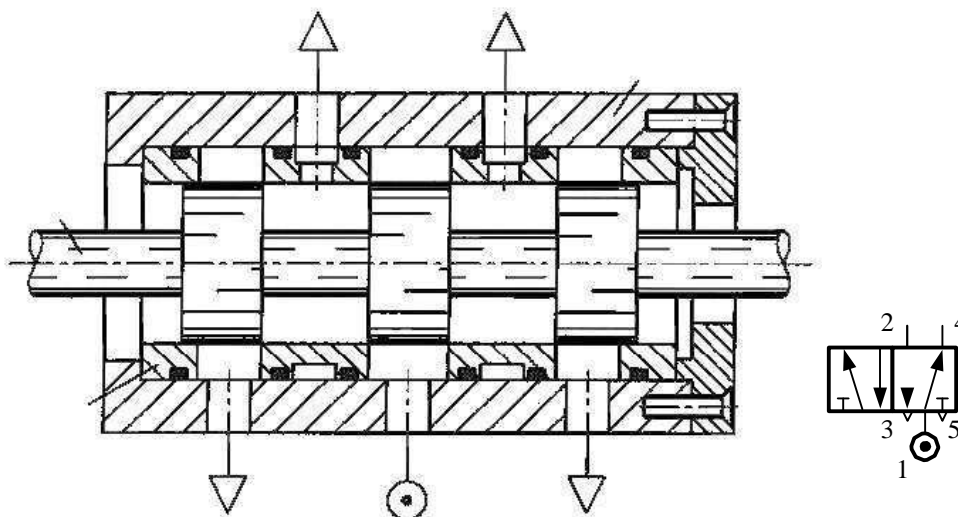
Zbog relativno velike sile aktiviranja, veći ventili često se izvedu kao posredni (predupravljani - Sl. 4.23). Vanjskom silom aktivira se manji posredni (predupravljajući odn. pilot) ventil koji propušta stlačen zrak na klip glavnog razvodnika, kojeg prema tome pokreće sila stlačenog zraka.



Sl. 4.23 Tanjurasti 3/2 razvodnik s kotačićem – posredni [3]

Otvaranje / zatvaranje razvodnika s kliznim prekrivanjem ostvaruje se pomoću površine (klip, ploča ili klizač – kulisa) koja klizanjem prelazi preko strujnog otvora i tako ga postupno otkriva / prekriva.

Prednosti razvodnika s klipom (Sl. 4.24) su manja sila aktiviranja, jednostavnije funkcioniranje i mogućnost promjene načina aktiviranja. Mane su mu veća duljina hoda, manja frekvencija prebacivanja i poteškoće s brtvljenjem. Brtvene površine osjetljive su na nečistoće (habanje). Izrađuju se kao 3/2 i 5/2 razvodnici.

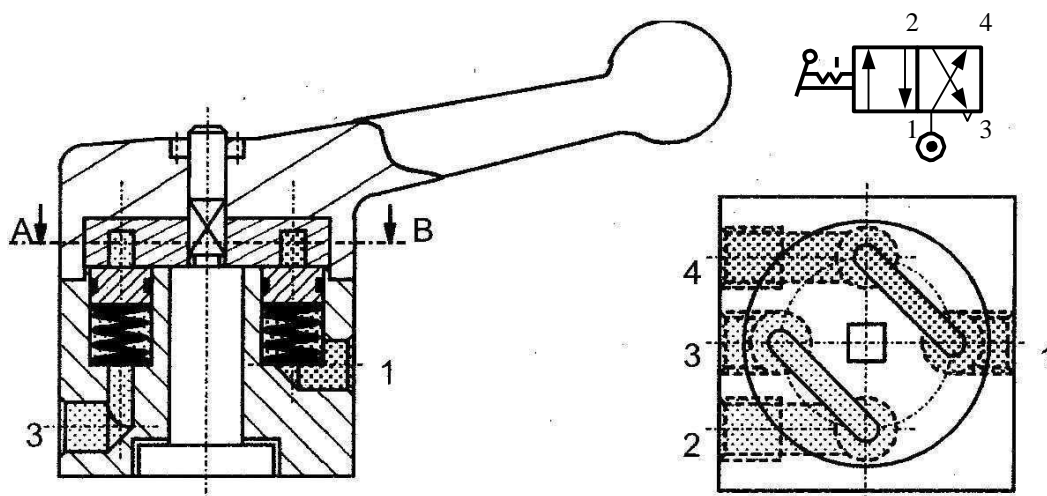


Sl. 4.24 Klipni 5/2 razvodnik [6]

Pločasti razvodnik (Sl. 4.25) ima kružnu razvodnu ploču, koja zakretanjem spaja odgovarajuće priključke. Aktiviranje je najčešće ručno. Može se iskoristiti i srednji

položaj, u kojem su svi priključci zatvoreni. Zato se izrađuje kao 4/2 i 4/3 razvodnik. Točno pozicioniranje ploče obično se osigurava uskočnikom (v. simbol aktiviranja).

*Razvodnik s kulisom* slični klipnom razvodniku, ali umjesto središnjeg klipa klipnjača tangencijalno pomiče plosnatu razvodnu ploču (kulisu) koja klizanjem prekriva / otkriva otvore priključaka.



Sl. 4.25 Pločasti 4/2 razvodnik. Simbol: aktiviranje ručicom s uskočnikom [2]

#### Odabir razvodnika

Za odabir su bitne sljedeće tri, međusobno povezane, karakteristike cilindra (aktuatora):

- promjer klipa cilindra (radni volumen motora)
- opterećenje klipa
- potrebna brzina klipa (brzina vrtnje motora)

Odabir se vrši prema iskustvenim podacima – pomoću dijagrama.

Razvodnici trebaju imati jednoznačne oznake radi održavanja i dokumentacije.

#### 4.2.2 Zaporni ventil

Zaporni ventili ne dopuštaju protok u jednom smjeru (zatvaraju), a propuštaju u suprotnom smjeru (kao dioda). Povećanje tlaka na izlaznoj strani potpomaže zapornu funkciju (brtvljenje).

Podjela:

- nepovratni
- uvjetno zaporni (logički I)
- naizmjenično zaporni (logički ILI)
- brzoispusni

#### Nepovratni ventil

Potpuno zatvaraju protok u jednom smjeru, a u suprotnom propuštaju medij (Sl. 4.26) uz minimalno mogući pad tlaka (mali otpor). Taj pad tlaka je kriterij kvalitete ventila. Zatvaranje se postiže pomoću zapornih elemenata: ploča (tanjur), stožac, kugla. Nepovratni ventili često se kombiniraju s prigušnim ventilima.