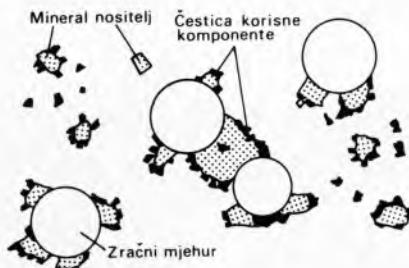


Kosovo, Zletovo (Probištip) i Sasa u Makedoniji, te Šuplja Stijena u Crnoj Gori. U rudnicima bakra postoje dvije flotacije (Bor i Majdanpek u istočnoj Srbiji), kao i u rudnicima antimona (Brasina i Stolice u zapadnoj Srbiji). Po jedna je flotacija u rudnicima kroma (Raduša u Makedoniji) i na kvarcnom pijesku (Pula). Kapaciteti su tih flotacija različiti. Daleko je najveća flotacija bakra u Majdanpeku, puštena u pogon 1961 (prva faza), s kapacitetom od 36 000 t/d, čime se uvrštava među pet najvećih flotacija bakra u svijetu; u Evropi je to najveća flotacija bakra. Na olovu i cinku najveća je naša flotacija ona u Zvečanu kod Kosovske Mitrovice, u okviru poduzeća »Trepča«, s kapacitetom od 3 500 t/d. Flotacija u Mežici ima kapacitet od 2000 t/d, a nova u Leposaviću, nedaleko od Zvečana, 1300 t/d. Druge su flotacije olova i cinka manje tako ona u Velikom Majdanu u zapadnoj Srbiji ima kapacitet od 100 t/d. Izgradene su i neke druge flotacije (na rudama olova i cinka, željeza i dr.) koje trenutno nisu u pogonu, a projektiraju se i neke nove, kao na primjer za bakar kod Bućima u istočnoj Makedoniji od 15 000 t/d, za fosfatne rude u Lisini kod Bosiljgrada, kao i neke druge.

Varijante flotacijskog postupka. Kao što je već spomenuto u uvodu, osim opisane konvencionalne pjenaste flotacije postoje još neki flotacijski postupci koji su u posljednje vrijeme razvijeni za rješavanje nekih specijalnih problema, u prvom redu za flotiranje zrna koja u normalnoj flotaciji flotiraju teško ili nikako. To su veoma fina ili pak krupna zrna.

Za preradu zrna mikronskih i submikronskih veličina predlaže se tzv. *ultraflotacija*. Primjenjena prvi put početkom šezdesetih godina, ona je do sada ostala ograničena na uklanjanje nečistoća s koncentrata (konkretno, titanovih minerala s kaolina). Princip postupka prikazan je na sl. 31. U pulpu se dodaju tzv.



Sl. 31. Princip ultraflotacije

minerali nositelji čime se povećava površina raspoloživa za prijanje čestica (korisnog) mulja. Mineralne nositelje (npr. vapnac, barit, fluorit, kalcit, pijesak) treba samljeti na $-0,044$ mm (325 meša), a korisni mineral na $100\% - 3 \mu\text{m}$, odn. $48\% - 0,5 \mu\text{m}$. Postupak je predložen, i u manjoj mjeri primjenjen, za dobivanje fosfata iz starog jalovišta, pa i za izdvajanje željeznog oksida iz boksita. Ukoliko bi se pokazalo da je princip šire primjenljiv, moglo bi se govoriti o početku rješenja problema inače krajnje štetnog prisustva mulja u flotacijskoj pulpi.

Za flotaciju mulja, dakle čestica $-0,1$ mm, razvija se posljednjih desetak godina u SSSR i tzv. *elektroflotacija*. Elektroflotacija se od konvencionalne flotacije načelno razlikuje po tome što se u njoj ne koriste zračni mjehuri već mjehuri vodika i/ili kisika dobiveni elektrolizom vode. U tu se svrhu ispod impela postavljaju elektrode, npr. od nerđajućeg čelika, s vodljivom membranom među njima. Plinski mjehuri što se tu razvijaju znatno su sitniji od mjehura zraka, prosječna im je veličina $8\cdots15 \mu\text{m}$, a izvanredno su fino dispergirani u pulpi, tako da se dobiva veoma velika površina za njihov kontakt sa česticama korisne komponente. Postupak se u SSSR već primjenjuje u industriji mesa, kože, maziva, a ispituje mu se i primjena u flotiranju minerala. Pokazalo se, npr., da se elektroflotacijom iz kimberlitske jalovine može dobiti dijamantska sitnica (klase $0,5/0,042$ mm) koja se inače nepovratno gubi. Isto tako, uspješno je preraden manganski mulj ($-10 \mu\text{m}$) koji se u konvencionalnoj flotaciji mora obradivati kao jalovina; u ovom slučaju dobiven je vrlo dobar koncentrat sa $36,0\%$ Mn.

Za preradu veoma sitnih zrna primjenjuje se i tzv. *aglomeracijska flotacija*. Od konvencionalne pjenaste flotacije razlikuje se

po tome što se materijalu prije samog flotiranja dodaju i prilične količine ($2\cdots80 \text{ kg/t}$) ulja (parafinska, aliciklična, olefinska, aromatska), obično u vidu emulzije koja sadrži i određenu količinu kolektora, pa se smjesa intenzivno promiješa. Dolazi do sudaranja finih kapljica ulja s hidrofobiranim mineralnim česticama, te do tvorbe aglomerata (približnog promjera od $0,1\cdots0,4$ mm) koji onda normalno flotiraju. Postupak je našao primjenu u flotiranju praškastih manganskih i finosraslih ilmenitskih (titano-željeznih) ruda, a ispituje se i u oplemenjivanju željeznih i kositrenih ruda.

I krupna se zrna ne mogu preraditi uobičajenim flotacijskim postupcima. Za rješenje tog problema predložena je i tzv. *gravitacijska flotacija* ili *photogravitacija*. Ona je donekle slična opisanoj aglomeracijskoj flotaciji po tome što i ovdje materijalu (granulacije $4/0,5$ mm) prije flotiranja treba dodati, uz redovne flotacijske reagente, još i ulja, pa smjesu dobro promiješati. Međutim, dobivena gusta pulpa ne vodi se u flotacijsku čeliju već na koncentracijski stol (v. *Gravitacijska koncentracija*). Tu će za naujene (hidrofobirane) čestice prionuti zračni mjehuri, a time će se specifična težina tih aglometara toliko sniziti da će se oni preliti preko stola na strani jalovine, odn. na »lakoj strani« stola. Tim se postupkom mogu oplemeniti i fosfati, a mogu se izdvojiti i sulfidi, bivena gusta pulpa ne vodi se u flotacijsku čeliju već na koncentracijski stol (v. *Gravitacijska koncentracija*). Tu će za naujene (hidrofobirane) čestice prionuti zračni mjehuri, a time će se specifična težina tih aglometara toliko sniziti da će se oni preliti preko stola na strani jalovine, odn. na »lakoj strani« stola. Tim se postupkom mogu oplemeniti i fosfati, a mogu se izdvojiti i sulfidi,

Ovdje treba spomenuti i tzv. *ionsku flotaciju* koja se s uspјehom primjenjuje u dobivanju korisnih komponenata iz razblaženih otopina, kao što su npr. jamske vode, morska voda i neke industrijske otpadne vode. Princip postupka sastoji se u vezivanju traženih iona za površinskoaktivne materije (tenzide) te njihovom iznošenju u pjenu na površini. Kao tenzidi upotrebljavaju se ionogeni kolektori s nabojima suprotnim nabojima traženih iona (kationski kolektori za anione i obratno); to su, npr.: alkilkarboksiati, alkiksantati, alkilsulfati, alkilfosfati. Ovim se postupkom mogu iz spomenutih tekućina dobiti deterenti, radioaktivni elementi, fosfati, fenoli.

LIT.: K. F. Белоглазов, Закономерности флотационного процесса, Москва 1947. — K. L. Sutherland, J. W. Wark, Principles of flotation, Melbourne 1955. — A. M. Gaudin, Flotation, New York-Toronto-London 1957. — B. И. Классен, В. А. Мокроусов, Введение в теорию флотации, Москва 1959. — D. W. Fuerstenau ed., Froth flotation. 50th anniversary volume, New York 1962. — F. Sebba, Ion flotation, Amsterdam-London-New York 1962. — B. И. Классен, Флотация углей, Москва 1963. — L. Usoni, Teoria della flottazione, Roma 1963. — M. A. Эйгелес, Основы флотации несульфидных минералов, Москва 1964. — В. А. Глембовский, Е. А. Амфимова, Флотация окисленных руд цветных металлов, Москва 1966. — С. И. Митрофанов, Селективная флотация, Москва 1968. — M. Manojlović-Gising, Теоретске основе флотације, Београд 1969. — С. Ф. Кузыкин, А. М. Гольман, Флотация ионов и молекул, Москва 1971. — В. А. Глембовский, Физикохимия флотационных процессов, Москва 1972. — В. А. Глембовский, В. И. Классен, Флотация, Москва 1973.

R. Marušić

FLUIDIKA, grana nauke i tehnike koja obuhvaća izučavanje i primjenu strujanja fluida za prenošenje i preradu informacija. U njezin djejakrug spada i razvoj fluidičkih elemenata (sastavnih dijelova), sklopova i uređaja koji služe toj svrsi. Kao radni fluid u tim uređajima služe plinovi — kao uzduh (zrak), ispušni plinovi, ugljični dioksid — i tekućine — kao voda, ulje i dr.

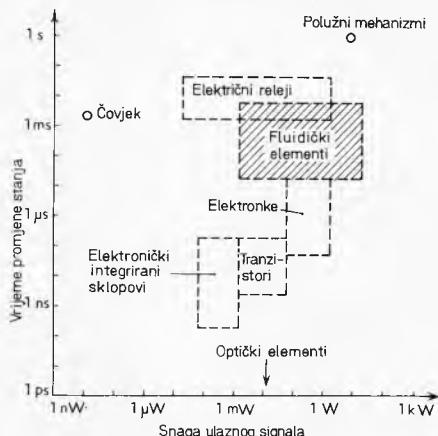
Termin fluidika pojavljuje se u literaturi tek 1965, ali istraživanja upravljačkih elemenata kojima se mogu ostvariti izlazne funkcije traženih karakteristika iskorištavanjem dinamike strujanja fluida počela su nešto ranije. Već 1957 i 1958 sovjetski profesor M. A. Ajzerman vrši takva istraživanja sa »strujnim relejama« u Institutu za automatiku i telemehaniku Akademije nauka SSSR. U USA 1958 Moor i Klein izrađuju difuzor sa dva stabilna stanja, a najintenzivnija razvojna istraživanja vršena su 1959 u Diamond Ordonance Fuse Laboratories (kasnije Harry Diamond Laboratories). Nakon toga u mnogim se laboratorijima i institutima počinje s proučavanjem fluidičkih elemenata.

Iako intenzivni pristup proučavanju upravljanja pomoću fluidičkih elemenata počinje početkom šezdesetih godina, prva su istraživanja vršena već početkom ovog stoljeća. Njemački aerodinamičar L. Prandtl 1904 razradio je difuzor s prianjanjem mlaza uz stijenu, a Nikola Tesla već 1916 patentira pneumatički diodu koja je radila na sličnom principu kao ona na sl. 22 d. Smatra se, međutim, da je začetnik fluidike rumunjski inženjer H. Coanda, koji u svojim radovima početkom tridesetih godina objašnjava pojavu lijepljenja mlaza uz stijenu. Taj tzv. Coanda-efekt jedan je od osnovnih principa rada fluidičkih elemenata bez pokretnih dijelova. Početak primjene fluidičkih elemenata vezan je za razvoj raketne tehnike. S električnim, električnim i drugim elementima, kojima se do tada raspolažalo, bilo je nemoguće riješiti niz problema zbog osjetljivosti tih elemenata prema kozmičkim i ionizirajućim zračenjima, prema temperaturnim promjenama, mehaničkim udarima, vibracijama i sl. Pomoći fluidičkim elemenata pošlo je za rukom mnoge od tih problema riješiti.

Fluidički elementi i sklopovi mogu normalno raditi i u uvjetima kao što su zagadena i agresivna okolina, eksplozivna atmosfera, ionizirajuća zračenja i magnetska polja, niske temperature do -50 i visoke temperature do $\sim +1000^{\circ}\text{C}$, vibracije, udari i sl.

Prema dijagramu J. Bahra (sl. 1) fluidički se elementi nalaze po vremenu potrebnom za promjenu stanja (preradu informacija)

negde između reljnih (mehaničkih) i elektroničkih elemenata, a ulazna snaga potrebna za aktiviranje te tri vrste elemenata kreće se u području istih redova veličine. Uzmu li se u obzir i



Sl. 1. Bahrov dijagram vremena promjene stanja i potrebne ulazne snage signala za različite vrste upravljačkih elemenata

ostale karakteristike fluidičkih elemenata, kao što su male dimenzije, jednostavno održavanje i velika pouzdanost, može se reći da fluidika ima sve kvalitete potrebne za uspješnu primjenu u sistemima upravljanja i regulacije, pogotovo pod specifičnim uvjetima rada. Zbog navedenih karakteristika i mogućnosti dobivanja jednakih izlaznih funkcija kao što ih daju reljni i elektronički sklopovi, fluidika je našla primjenu ne samo u raketnoj tehnici nego i u gotovo svim drugim područjima djelatnosti gdje se primjenjuje upravljačka tehnika: u industriji, avijaciji, pomorstvu, nuklearnoj tehnici, medicini i drugdje.

Analogija između fluidičkih i električnih veličina. Analogija je fizička srodnost među pojavama koja je izražena time što su analognе pojave matematički prikazane formalno identičnim jednadžbama. Za određena stanja strujanja fluida vrijede matematičke jednadžbe koje su formalno identične jednadžbama za električnu struju; u tim slučajevima, dakle, može se govoriti o

analogiji između fluidičkih i električnih pojava, te o analogiji između veličina koje ulaze u jednadžbe fluidike i veličina koje ulaze u formalno identične jednadžbe električne.

Točna analiza fluidičkih sklopova predstavlja kompleksniji problem od analize odgovarajućih električnih. U općem slučaju karakteristike fluidičkih elemenata nisu linearne; samo uz pretpostavku malih kvazistacionarnih promjena u određenom području može se provesti linearizacija. Samo pod relativno niskim tlakovima može se zanemariti kompresibilnost, te uzeti da je gustoća nepromjenjiva veličina. Na višim frekvencijama ($f > 20^{\circ} \cdot 10^3$ Hz) pojavljuju se i dodatni problemi zbog utjecaja topline, zbog raspodjele brzina, zbog ovisnosti fluidičkih otpora, induktivnosti i kapaciteta o frekvenciji, a eventualno i zbog pojave neželjenih smetnja (šumova) i rezonancije. Stoga je analogija između fluidičkih i električnih sklopova ograničena (strogoo uvezši) na slučajevu kad su ispunjene matematičke pretpostavke na kojima se ona zasniva. Međutim, za približnu analizu fluidičkih sklopova analogija se fluidičkih s električnim veličinama ipak može uspješno primijeniti i u mnogim slučajevima kad te pretpostavke nisu strogoo ispunjene. Npr., diferencijalna jednadžba za pneumatički vod slična je — ako se uvaže u nastavku navedene analogije između fluidičkih i električnih veličina — jednadžbi za električni vod.

Pode li se od postavke da je tlak analogon električnog napona i protok fluida analogon jakosti električne struje, može se uz pomoć tih analogija definirati i tzv. fluidička otpornost (R), induktivnost (L) i kapacitivnost (C). Međutim, poteškoću pri tom predstavlja činjenica da analogon električnoj struci može biti jedan od četiri različita protoka: maseni protok Q_m , težinski protok Q_g , volumenski protok Q_V ili reducirani protok Q_r (volumenski protok reduciran na standardne okolnosti). Prema tome koji se analogon upotrijebi, proizlaze različite jedinice i jednadžbe za fluidičke veličine Q , R , L i C . U tabl. 1 skupljene su jedinice za fluidičke veličine R , C , i L , a u tabl. 2 izrazi za izračunavanje tih veličina za slučajevu analogije električne struje s masenim, odn. volumenskim protokom. U tabl. 2 navedeni izrazi vrijede uz pretpostavku da su veličine R , L i C konstantne i o frekvenciji neovisne; stoga se mogu upotrijebiti samo za približnu analizu.

Otpornost u fluidici. Uz pretpostavku malih promjena signala može se i u fluidici otpornost definirati kao diferencijalni kvocijent promjene tlaka po protoku:

$$R = \frac{dp}{dQ_m}.$$

Na krivulji ovisnosti pada tlaka o masenom protoku, $p = f(Q_m)$, sl. 2, to je nagib tangente u radnoj točki A. Za male promjene signala može se, u blizini radne točke, provesti linearizacija, pa se otpornost može odrediti grafičkim putem prema relaciji:

$$R_A = \left(\frac{\Delta p}{\Delta Q_m} \right)_A.$$

Tablica 1
MJERNE JEDINICE FLUIDIČKIH VELIČINA

Analogon električnoj struci	Protok Q	Tlok p	Otpornost $R = \delta p/Q$	Kapacitivnost $C = \frac{Q}{dp/dt}$	Induktivnost $L = \frac{p}{dq/dt}$
Maseni protok $Q_m = \rho \cdot Q_V$	$g s^{-1}$ $kg s^{-1}$	bar $N m^{-2}$	$1 \Omega_f = \frac{\text{bar}}{g s^{-1}}$ $\frac{N m^{-2}}{kg s^{-1}} = m^{-1} s^{-1}$	$1 F_f = \frac{g s^{-1}}{\text{bar } s^{-1}}$ $\frac{kg s^{-1}}{N m^{-2} s^{-1}} = m^{\frac{1}{2}}$	$1 H_f = \frac{\text{bar}}{g s^{-2}}$ $\frac{N m^{-2}}{kg s^{-2}} = m^{-1}$
Volumenski protok $Q_V = Q_m/\rho$	$m^3 s^{-1}$	$kp m^{-2}$ $N m^{-2}$	$\frac{kp m^{-2}}{m^3 s^{-1}} = \frac{kp s}{m^5}$ $\frac{N m^{-2}}{m^3 s^{-1}} = \frac{N s}{m^5}$	$\frac{m^3 s^{-1}}{kp m^{-2} s^{-1}} = \frac{m^6}{kp}$ $\frac{m^3 s^{-1}}{N m^{-2} s^{-1}} = \frac{m^6}{N}$	$\frac{kp m^{-2}}{m^3 s^{-2}} = \frac{kp s^2}{m^6}$ $\frac{N m^{-2}}{m^3 s^{-2}} = \frac{N s^2}{m^5}$

Tablica 2
FORMULE ZA ODREĐIVANJE FLUIDIČKIH VELIČINA Q , R , L i C

Protok	Parametar cjevovoda			Kapacitet volumena	Snaga
	R	L	C		
Maseni protok $Q_m = \rho \cdot Q_V$	$\frac{8 \pi \eta}{A^2} l$	$\frac{l}{A}$	$\frac{A}{n R T} l$	$\frac{V}{n R T}$	$\frac{p}{\rho} Q_m$
Volumenski protok $Q_V = Q_m/\rho$	$\frac{8 \pi \eta}{A^2} l$	$\frac{\rho}{A} l$	$\frac{A}{n R T} l$	$\frac{V}{n R T} = \frac{V}{n p}$	$p Q_V$

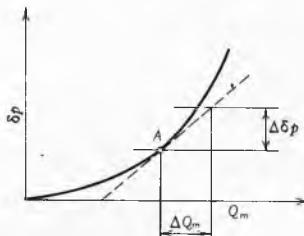
R plinska konstanta (za uzduh 287 J/kg K), n eksponent politrope (za uzduh 1...1,4), T apsolutna temperatura, l duljina cjevovoda, A presjek cjevovoda, V volumen, p tlak, ρ gustoća, η dinamički viskozitet

Analogno kao u elektrotehnici, i u fluidici vrijedi za serijski spoj više elemenata s različitim otpornostima relacija:

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_{i=1}^n R_i,$$

a za paralelni spoj:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}.$$



Sl. 2. Krivulja ovisnosti pada tlaka Δp o masenom protoku Q_m za nelinearni fluidički otpornik

Kapacitivnost u fluidici predstavlja sposobnost fluida da akumulira potencijalnu energiju. Ta osobina je u fluidičkim sklopovima vezana na određeni volumen, jer se s promjenom tlaka p mijenja i masa m fluida u tom volumenu. Kako su te promjene parcijalne, može se pisati:

$$dm = C dp, \quad \frac{dm}{dt} = Q_m = C \frac{dp}{dt},$$

a iz toga slijedi:

$$C = \frac{Q_m}{dp/dt}.$$

Uz pretpostavku konstantnih parametara, kapacitivnost cjevovoda duljine l i presjeka A iznosi

$$C = \frac{A l}{n R T}$$

(gdje je n eksponent u jednadžbi politrope, $p v^n = \text{konst.}$, R fluidička otpornost i T apsolutna temperatura), a kapacitivnost spremnika volumena V iznosi

$$C = \frac{V}{n R T}.$$

Induktivnost u fluidici posljedica je inercije fluida. U nestacionarnom stanju protok se mijenja uzduž cjevovoda, što znači da se masa fluida ubrzava ili usporava. Uz pretpostavku da je otpornost nekog fluidičkog elementa zanemarljiva, pad tlaka δp bit će proporcionalan masi koju treba ubrzavati:

$$\delta p = L \frac{dm}{dx^2} = L \frac{dQ_m}{dt}.$$

Iz toga proizlazi definicija za induktivnost:

$$L = \frac{\delta p}{dQ_m/dt}.$$

Primjeri električne analogije tipičnih fluidičkih krugova prikazani su u tabl. 3.

Sličnost u fluidici. Analiza pojava u elementima bez pokretnih dijelova i istraživanja za razvoj novih takvih elemenata vrše se često na modelima. Za preslikavanje stanja s realnog elementa na model upotrebljavaju se, već prema prirodi fizikalne pojave koja se ispituje, različiti kriteriji sličnosti. O tome v. članke *Dimenzijska analiza*, TE 3, str. 346, *Hydraulika, Modeliranje, Sličnost*.

Podjela fluidičkih elemenata. Fluidički elementi dijele se na *radne*, koji ostvaruju neku određenu izlaznu funkciju, i na *pomoćne*, koji se dodatno uvrštavaju u fluidičke strujne krugove da bi utjecali na tu izlaznu funkciju. Radni fluidički elementi svrstavaju se najčešće prema svojoj konstrukciji na *elemente bez pokretnih dijelova* i na *elemente s pokretnim dijelovima*. Radni i pomoćni elementi sačinjavaju zajedno *fluidičke sisteme*.

Da bi se fluidički sistemi mogli upotrijebiti također za prijenos i obradu informacija koje su izražene u nekim drugim fizikalnim veličinama (npr. put, napon, itd.), treba prethodno te veličine pretvoriti u fluidičke, a nakon obrade fluidičke veličine opet trans-

formirati u traženu fizikalnu veličinu. Tome služe *periferni fluidički elementi*.

Fluidički elementi bez pokretnih dijelova

Fluidički radni elementi bez pokretnih dijelova svoju izlaznu funkciju ostvaruju samo djelovanjem fluida koji struje. Oni se stoga često zovu u *strujni elementi* i prema svojim karakteristikama su dinamički.

Elementi bez pokretnih dijelova ostvaruju svoju izlaznu funkciju na jednom od dva principa: bilo sami slobodnim djelovanjem među mlazovima fluida bilo djelovanjem između mlazova i stijenki. U prvom slučaju struja fluida upravljačkog signala djeluje svojim impulsom ili tlakom na osnovnu struju napajanja ili na struju u nekom drugom upravljačkom vodu, time je skreće i na taj način ostvaruje različite izlazne funkcije. To se postiže sudarom mlazova ili mijenjanjem laminarnog strujanja mlaza u turbulentno. U drugom se slučaju osim djelovanja jednog mlaza fluida na drugi iskorištavaju i utjecaji stijenki, što se postiže upotrebom aerodinamičkih profila stijenki ili pak primjenom tzv. Coanda-efekta (v. dalje).

U elementima bez pokretnih dijelova mlazovi upravljačkog i upravljanog fluida sjedinjavaju se u zajednički mlaz, bilo za stalno bilo kratkotrajno, stvarajući tako izlazni signal. Područje tlaka kojim rade ti elementi kreće se od 0,001 do 1 bar (1 bar = 10^5 N/m² = 0,986 atm). Prema svom djelovanju fluidički elementi bez pokretnih dijelova jesu ili *analogni* ili *digitalni*, tj. izlazna funkcija im je ili kontinuirana ili diskretna. Simboli elemenata bez pokretnih dijelova prikazani su na sl. 3.

Fluidički pomoćni elementi namjerno se dodaju fluidičkim sklopovima radi ostvarivanja određenih funkcija. Oni učestvuju pasivno pri prijenosu signala i samo na pogodan način mijenjaju izlaznu funkciju. Oni ispoljavaju fluidičku otpornost, odn. kapacitivnost. U pomoćne fluidičke elemente ubrajaju se u prvom redu *prigušnice i spremnici*.

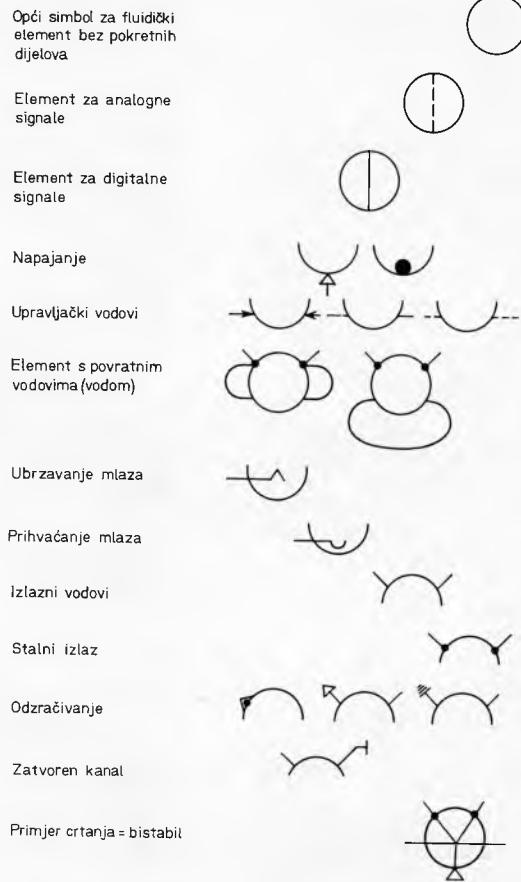
Prigušnice i njihovo prigušenje odgovaraju u fizikalnom smislu otpornicima i njihovom otporu u elektrotehnici. Postoje linearne i nelinearne prigušnice. U prvom tipu, čiji je osnovni oblik kapilaran, strujanje je unutar određenog radnog područja laminarno. U drugom tipu, koji se češće primjenjuje, strujanje je unutar radnog područja turbulentno. Osnovni oblici nelinearne prigušnice su Venturijeva mlaznica i oštrorubna prigušnica (blenda).

Tablica 3

ELEKTRIČNE ANALOGIJE TIPIČNIH FLUIDIČKIH SKLOPOVA

Naziv	Fluidički sklop	Električni sklop
Serijski spoj otpornika (prigušnica)		
Paralelni spoj otpornika		
Nisko-propusni filter		
Titrjni sklop u serijskom spoju		
Titrjni sklop u paralelnom spoju		

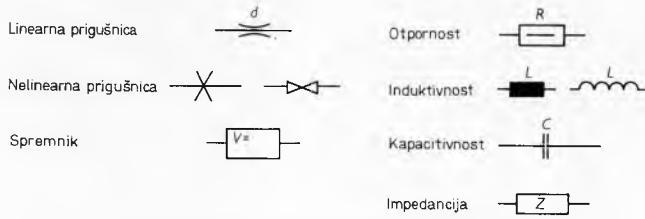
Spremnik i njegov određeni volumen u fluidici odgovaraju u fizikalnom smislu kondenzatoru i njegovoj kapacitivnosti u elektrotehnici.



Sl. 3. Grafički simboli za fluidičke radne elemente bez pokretnih dijelova

Nominalne se vrijednosti prigušenja, odn. volumena, na elementima označavaju, slično kao na električkim elementima, bojom ili brojkama.

Simboli i oznake pomoćnih fluidičkih elemenata prikazane su (uporedo s analognim elektrotehničkim) na sl. 4.



Sl. 4. Simboli i oznake pomoćnih elemenata u fluidici

Pri analizi fluidičkih sklopova treba prigušenja i volumene vodova i kanala radnih elemenata uzimati u obzir samo ako su vrijednosti tih veličina znatnije u odnosu prema vrijednostima za dodatne pomoćne elemente.

Karakteristike analognih radnih fluidičkih elemenata. Izlazna veličina analognih elemenata kontinuirano je promjenljiva funkcija upravljačkog signala. Kad su energetske razine ulaznog i izlaznog signala bitno različite (obično je izlazna veća), element se naziva *pojačalom*.

Karakteristike važne za izbor elemenata jesu pojačanje, linearost, frekvencijski odziv, vrijeme oporavka i odnos signal/šum.

Pojačanje analognog elementa odgovara nagibu pravca što spaja dvije točke na dijagramu pojačanja, kojim se prikazuje ovisnost izlaznog signala o iznosu upravljačkog signala (sl. 5). Pojačanja se odnose na tlak, protok i/ili snagu.

Pojačanje tlaka iznosi $A_p = p_1/p_u$, gdje je p_1 tlak na izlazu a p_u tlak upravljačkog signala. (Na sl. 5 prikazano je pojačanje između tri točke, pri čemu je pojačanje između točaka 3 i 2 veće nego između 3 i 1.) Pojačanje protoka je $A_Q = Q_1/Q_u$, gdje je Q_1 protok na izlazu a Q_u protok upravljačkog mlaza. Pojačanje snage je $A_P = P_1/P_u$, gdje je P_1 snaga izlaznog mlaza, a P_u snaga upravljačkog mlaza.

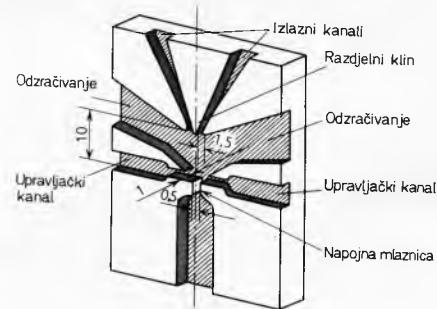
Linearost elemenata. Element se naziva linearnim ako je pojačanje između dviju odabralih radnih točaka na dijagramu pojačanja svadje jednak.

Frekvencijski odziv. Dinamička svojstva analognih pojačala grafički se prikazuju pomoću amplitudnih i faznih frekvencijskih karakteristika. Kao gornja granična frekvencija amplitudne karakteristike uzima se frekvencija pri kojoj izlazni signal kasni u fazi za ulaznim upravljačkim signalom za 45° . Fazni pomak ovisi o konstrukciji i dimenzijama pojačala, te početnim i radnim uvjetima pod kojima pojačalo radi (napajanje — opterećenje).

Vrijeme oporavka elementa ovisi o njegovom tipu.

Šumovi vanjski ili unutarnji remete korisni signal. Vanjski šumovi su slučajni i posljedica su mehaničkih vibracija, promjena okolišnjeg tlaka, zvučnih vibracija i obično su relativno niske frekvencije. Prikladnim smještajem sklopova ili zaštitom sistema može se otkloniti njihovo štetno djelovanje. Unutarnji šumovi nastaju kao posljedica vlastitih karakteristika fluidičkog pojačala i pojavljuju se na čitavom frekvencijskom opsegu pojačala. Odgovarajućim zahvatima u konstrukciju elemenata i sklopova mogu se i te smetnje smanjiti. Smanjivanjem šumova može se sniziti i razina vrijednosti upravljačkih signala, tj. povećati osjetljivost elemenata. Šum se izražava obično odnosom snage izlaznog signala i snage suma (tzv. odnosom signal/šum).

Opis nekih fluidičkih analognih radnih elemenata. **Pojačalo otklonom mlaza** (engl. beam deflection amplifier) prikazano je na sl. 6. Radni prostor pojačala proširen jeiza izlaza

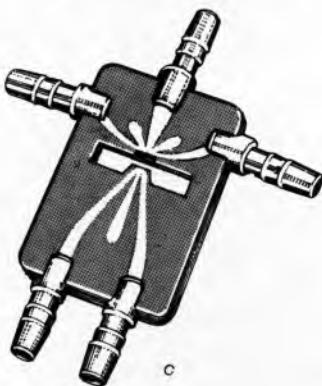
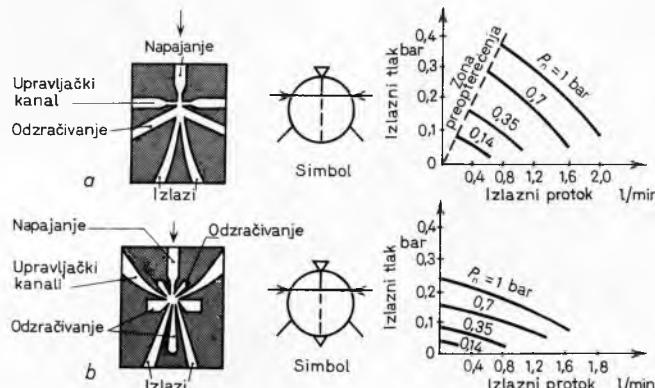


Sl. 6. Pojačalo otklonom mlaza (aksonometrijski prikaz kanala elementa; ucrtane dimenzije su orientacione)

napojne mlaznice i vezan je s atmosferom da se sprječi prijanjanje mlaza uz stijenu. Djelevanjem upravljačkog mlaza preko jedne od upravljačkih mlaznica, osnovni se mlaz skreće prema protutežećem izlaznom kanalu. Ovisno o jakostima upravljačkog (ulaznog) signala i osnovnog mlaza dolazi do manjeg ili većeg otklona. Kako se jakost osnovnog mlaza uglavnom ne mijenja, jakost izlaznog signala mijenja se ovisno o jakosti upravljačkog signala. Pošto je jakost upravljačkog signala manja od jakosti mlaza na izlazu, element ostvaruje pojačanje, tj. predstavlja fluidičko pojačalo.

Postoje dva osnovna tipa takvih elemenata: elementi osjetljivi prema preopterećenju i elementi neosjetljivi prema preopterećenju. U elementu osjetljivom prema preopterećenju (sl. 7a) kod pojave graničnih »nizvodnih« otpora, kad je protok malen, dolazi do pomaka radne točke u nedefinirano područje, tj. preoptere-

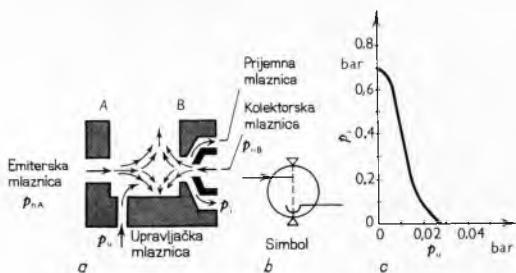
ćenje elementa. Uvođenjem srednjeg odzračnog kanala dobije se drugi tip elementa (sl. 7b) koji nema tog nedostatka, ali mu je ukupno pojačanje manje. Opisanim elementima ostvaruje se obično pojačanje tlaka $A_p = 4\ldots 8$, a iznimno i do 32.



Sl. 7. Pojačalo otklonom mlaza firme »Corning-Glass«. a Pojačalo osjetljivo na preopterećenje, njegov simbol i izlazna karakteristika, b pojačalo neosjetljivo na preopterećenje, njegov simbol i izlazna karakteristika, c vanjski izgled pojačala neosjetljivog na preopterećenje

Sudarna pojačala, koja se zovu i sudarni modulatori, ostvaruju izlazne funkcije sudaranjem mlazova iz dviju nasuprot postavljenih napojnih mlaznica (emiterске i kolektorske). Mjestom zone sudara i njegovim intenzitetom utječe se na vrijednost izlaznog signala. U ovu grupu spadaju: 3T-modulator (engl. Three Terminal Modulator), sumirajući sudarni modulator, SIM (engl. Summing Impact Modulator), poprečno sudarni modulator, TIM (engl. Transverse Impact Modulator) i direktno sudarni modulator, DIM (engl. Direct Impact Modulator). Od tih modulatora, koje je razvila firma »Jonson Service Co.«, u daljem izlaganju su opisana posljednja dva.

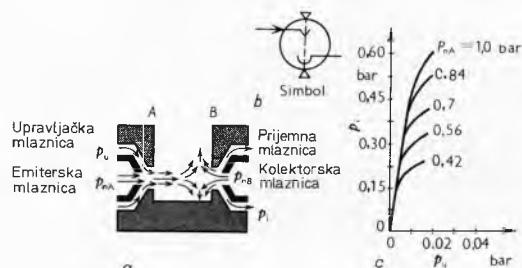
U modulatoru TIM (sl. 8) može se regulacijom tlakova p_{nA} i p_{nB} u emiterskoj i kolektorskoj mlaznici postaviti zona sudara na željeno mjesto, između točaka A i B. Povećanjem tlaka p_u upravljačkog mlaza odmiće se zona sudara i tako smanjuje tlak p_i na izlazu prijemne mlaznice, pa se time postiže inverzno pojačanje (pojačanje u negativnom smislu). Ovim se modulatorom



Sl. 8. TIM-modulator. a Shematski prikaz, b simbol, c karakteristika $p_i = f(p_u)$ uz $p_{nA} = p_{nB} = \text{konst.}$

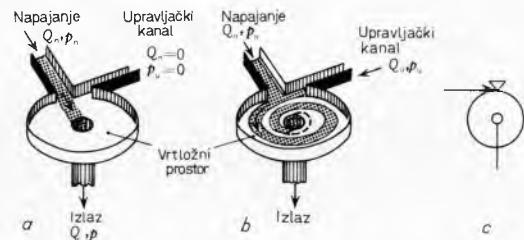
postižu visoka pojačanja tlakova $A_p = 5\ldots 60$, pa se stoga njima i koriste u operacionim pojačalima, gdje se spajanjem više takvih elemenata može, unutar određenog frekvencijskog područja, osigurati i pojačanje od $5 \cdot 10^2$ do $5 \cdot 10^7$.

Modulator DIM (sl. 9) najsloženiji je element iz porodice sudarnih modulatora. U njemu je upravljačka mlaznica smještena oko emiterске. Na taj se način postiže upravljačkim signalom tlaka p_u ubrzavanje mlaza emiterске mlaznice, uslijed čega dolazi do pomicanja zone sudara prema kolektorskoj mlaznici, a stoga i do povećanja tlaka p_i na izlazu. Pojačanje, koje u ovom slučaju nije inverzno, ovisno je o razini tlaka u emiterskoj mlaznici i iznosi pri najvišem tlaku u emiterskoj mlaznici i do $A_p = 200$.



Sl. 9. DIM-modulator. a Shematski prikaz, b simbol, c karakteristika $p_i = f(p_u)$ za različiti p_{nA} uz $p_{nB} = \text{konst.}$

Vrtložna pojačala zasnavaju se na promjeni otpora strujanja pri prisilnom vrtloženju koje stvara upravljački mlaz djelujući tangencijalno na osnovnu struju fluida (sl. 10). Otvor za napajanje znatno je veći od izlaznog otvora, pa je izlazni protok određen isključivo promjenama ulaznog protoka što ih izaziva vrtloženje.



Sl. 10. Vrtložno pojačalo. a Shematski prikaz pojačala s mlazom napajanja dok nema upravljačkog mlaza, b stvaranje vrtloga dok djeluje upravljački mlaz, c simbol

Aktiviranjem upravljačkog mlaza sjedinjavaju se upravljačke struje velike brzine s osnovnom strujom male brzine. Vrtlog stvara rezultirajući zakretni moment M :

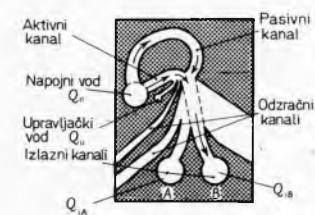
$$M = (Q_{mn} + Q_{mu}) v_{tp} \cdot r_p$$

(Q_{mu} je maseni protok upravljačkog mlaza, Q_{mn} maseni protok osnovnog mlaza, v_{tp} tangencijalna brzina na periferiji vrtloga i r_p radijus na periferiji vrtloga.) Uslijed porasta brzine vrtloženja, tlak na rubu vrtložne komore raste i djeluje u smislu »zatvaranja« dovodnog kanala, a time i smanjivanja protoka na izlazu.

Umjesto jedne upravljačke mlaznice može ih biti više u vijencu oko vrtložne komore. Postoji i varijanta izvedbe vrtložnog pojačala s odzračivanjem, koje osigurava oštiju granicu prelaza stanja pojačala. Djelovanje upravljačkog mlaza poboljšava se i smještanjem poroznog prstena unutar vrtložne komore.

Vrtložna su pojačala najpogodnija za upravljanje protokom; daju inverzno pojačanje, a upotrebljivo područje regulacije iznosi 6,5 : 1. Vrtložna pojačala s odzračivanjem mogu se upotrijebiti za upravljanje snagom, koja se može mijenjati u čitavom području od maksimuma do nule.

Dvokoljenasto pojačalo, DLEA (engl. Double Leg Elbow Amplifier) firme Giannini Controls Corp. (sl. 11) ima napojni vod koji se grana u pasivni i aktivni koljenasti kanal. Dok nema upravljačkog mlaza, osnovni je mlaz, zbog djelovanja mlaza iz pasivnog kanala, usmjeren u lijevi izlazni kanal A. Upravljački mlaz Q_u usmјeren je u aktivnom kanalu suprotno

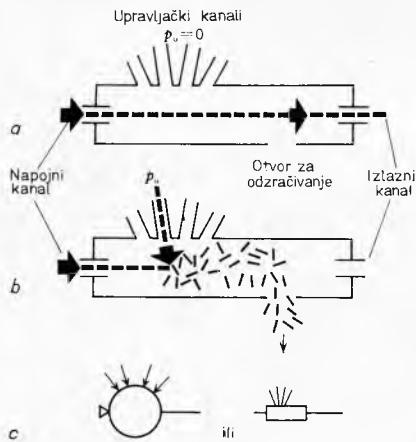


Sl. 11. DLEA-dvokoljenasto pojačalo

smjeru toka napojnog mlaza, pa stoga dolazi do smanjenja slobodnog presjeka i povećanja brzine osnovnog napojnog mlaza na izlazu iz aktivnog kanala. Usljed inercije i centrifugalne sile mlaz se otklanja prema izlaznom kanalu B. Pojačanje tlaka u tom elementu nije veliko: iznosi do 3 puta, ali pojačanje protoka i snage znatno je veće i iznosi od 300 do 500 puta.

Fluidički digitalni radni elementi bez pokretnih dijelova ponašaju se kao električni. Njihov izlaz može poprimati dvije različite razine koje predstavljaju stanje 0 i 1. Binarnost stanja izlaznih funkcija takvih elemenata omogućuje njihovu primjenu u fluidičkim logičkim sklopovima. Zbog te osobine ti se elementi često nazivaju i logičkim elementima. U fazi projektiranja sistema upravljanja, sve do izrade logičke sheme, primjenjuju se zakoni algebре lógike (v. *Elektronika, sklopori*, TE 4, str. 558), metode kombinatorne i sekvenčne logike te metode minimizacije, neovisno o tome hoće li se upravljački sklopovi realizirati električnim ili fluidičkim elementima. Tek pošto je odredena logička shema mogu se sklopovi realizirati bilo jednim bilo drugim elementima, uzimajući u obzir njihove karakteristike i specifičnosti uvjeta primjene.

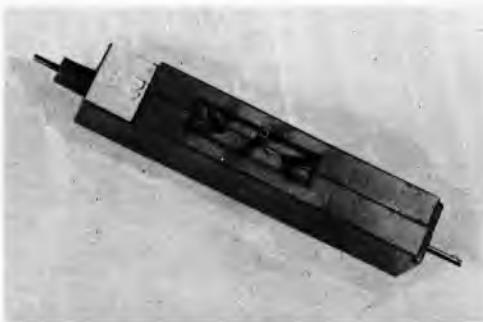
Turbulentno pojačalo (Augerov element) u osnovi se sastoji od komore povezane s atmosferom i od dva otvora smještena jedan nasuprot drugome (sl. 12). Laminarno strujanje između



Sl. 12. Turbulentno pojačalo firme »Maxam Power Ltd.«, aksijalni element. a Schematski prikaz sa strujanjem dok nema upravljačkog mlaza, b djelovanje upravljačkog mlaza, c simboli

napojnog i izlaznog kanala remeti se djelovanjem upravljačkog signala, koje pretvara laminarno strujanje u turbulentno.

Zbog velike osjetljivosti laminarnog strujanja moguće je upravljanje tlakom koji je znatno niži od tlaka napajanja osnovne struje. Na sl. 13 prikazano pojačalo radi s upravljačkim tlakom od $\sim 2,5 \text{ mbar}$ pri tlaku osnovne struje od $\sim 30 \text{ mbar}$. Uobičajena



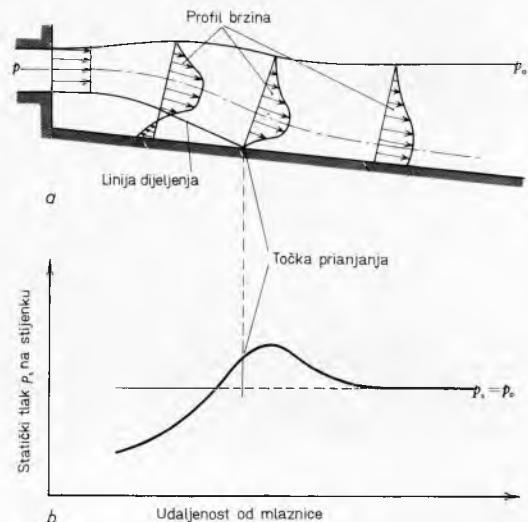
Sl. 13. Izgled turbulentnog pojačala

su pojačanja tlaka od 2 do 25 i protoka od 1 do 10. Vrijeme promjene stanja, tj. vrijeme potrebno za preradu informacije, iznosi $\leq 2 \text{ ms}$. Element ostvaruje logičku funkciju NILI:

$$y = \overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \cdot \overline{x_3} \cdot \dots \cdot \overline{x_n}$$

gdje je y izlazna funkcija, a $x_1 \dots x_n$ su upravljački signali.

Elementi s prijanjem mlaza uz stijenkou digitalni su elementi koji se zasivaju na tzv. Coanda-efektu, tj. pojavi da se mlaz fluida otklanja prema stijenki smještenoj u blizini izlaza iz mlaznice paralelno (ili približno paralelno) smjeru mlaza, i uz tu stijenku prijanja. Uzrok tom efektu je gradijent pritiska koji nastaje uslijed pada tlaka u turbulentnom vrtlogu uz stijenku. Vrtlog je intenzivniji, a time i podtlak veći, ako je stijenka odmaknuta od mlaznice, tako da čini malu stepenicu (sl. 14 a). Na donjem dijelu slike



Sl. 14. Tumačenje Coanda-efekta. a) Raspodjela brzina strujanja u mlazu, b) dijagram statičkog tlaka p_s koji postoji uz stijenku; p_0 statički tlak uz površinu mlaza

prikazan je tlak uz stijenku u ovisnosti o udaljenosti od mlaznice (sl. 14 b).

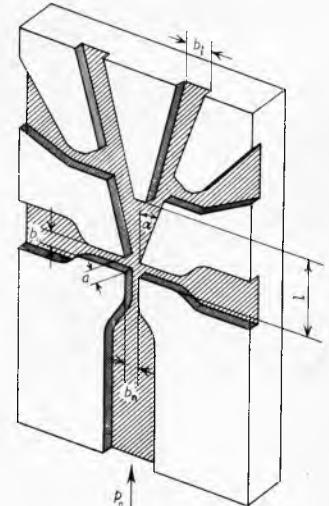
Na bazi Coanda-efekta razvijena su dva osnovna elementa: fluidički bistabil s po dva simetrična upravljačka i izlazna kanala, te fluidički monostabil sa dva asimetrična izlazna kanala i samo jednim upravljačkim.

Element sa dva stabilna položaja, *bistabil*, služi kao memorija. Njegova principijelna konstrukcija prikazana je na sl. 15. Na njegov rad i njegove karakteristike utječu pojedini konstruktivni detalji. Promjene karakteristika mogu se postići: promjenom zazora a , širine upravljačke mlaznice b_u , širine izlaznog otvora b_i , kuta α i razmaka l , ali i promjenom tlaka napajanja p_n . Pojedine konstruktivne parametre nužno je jedne s drugima uskladiti kako bi se postigle željene karakteristike elementa, tj. postigao optimalan odnos između vremena promjene stanja, strujanja, prigušenja, oscilacija itd. Traženje optimalnih rješenja dovelo je do razvoja različitih tipova bistabila, od kojih su neki prikazani na sl. 16.

Za većinu bistabila tlak napajanja iznosi između 70 i 100 mbar, a vrijeme promjene stanja od 0,5 do 1 ms. Potrebni nivo upravljačkog tlaka iznosi 20% vrijednosti tlaka napajanja.

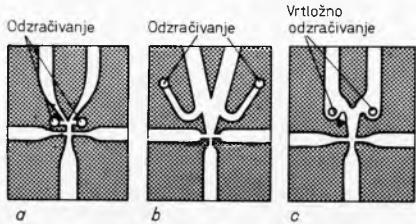
Karakteristična krivulja promjene stanja fluidičkog bistabila prikazana je na sl. 17. Na izlazima bistabila dobije se pojačanje tlaka između 1 i 15, a protoka od 1 do 8 puta.

Modifikacijom kanala bistabila dobiva se *fluidički monostabil*. Kad nema upravljačkog signala u njemu je izlaz stalан. To se

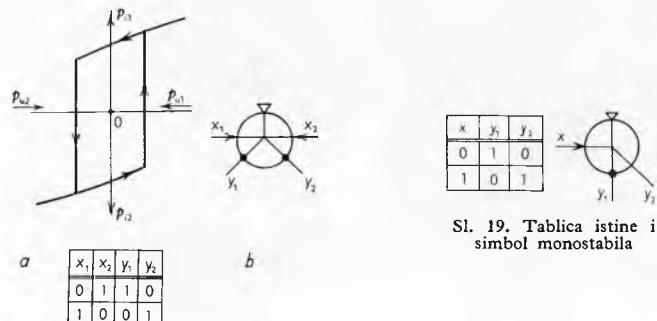


Sl. 15. Fluidički bistabil. Na slici su označeni konstruktivni parametri o kojima ovise karakteristike bistabila: a zazor, b_u širina upravljačke mlaznice, b_i širina napojne mlaznice, α kut izlaznog otvora, l razmak do razdjelnog klina, p_n tlak napajanja

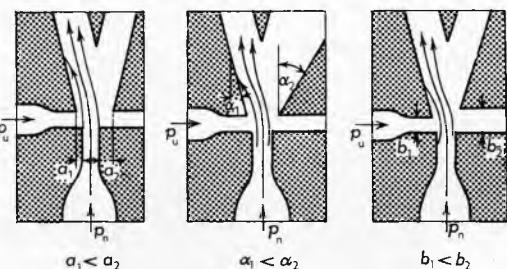
postiže premještanjem napojne mlaznice, različitim nagibima stijenki ili različitim presjecima upravljačkih dovoda (sl. 18). Simbol i tablica istine monostabila prikazani su na sl. 19.



Sl. 16. Različite izvedbe bistabila: a tvrtke Plessey Co. Ltd., b Corning Glass Co., c Aviation Electric Ltd.



Sl. 17. Bistabil. a Karakteristika i tablica istine, b simbol bistabila



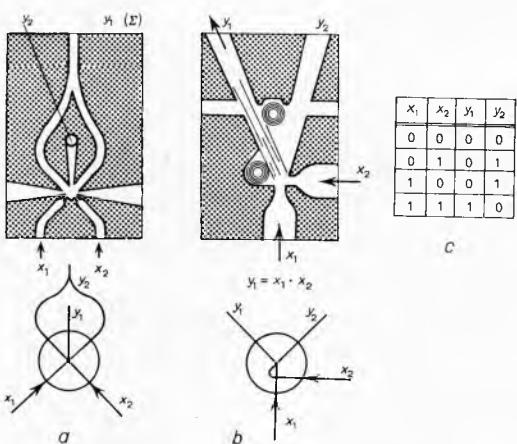
Sl. 18. Različita konstruktivna rješenja fluidičkog monostabila

Element ostvaruje logičku funkciju negacije i indikacije:

$y_1 = \bar{x}_1$, $y_2 = x_1$. Dodavanjem više ulaznih upravljačkih kanala ostvaruju se Pierceova funkcija NILI i disjunkcija ILI:

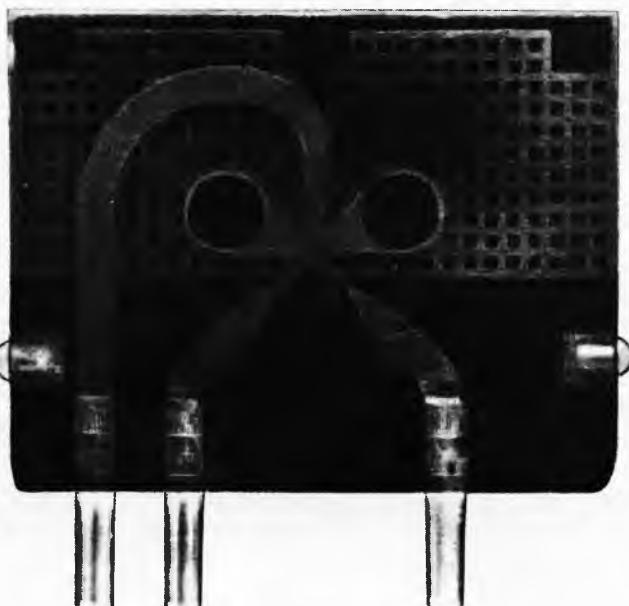
$$y_1 = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3, \quad y_2 = x_1 + x_2 + x_3.$$

Pomoću elementa koji daje funkciju NILI mogu se ostvariti i sve ostale logičke funkcije.



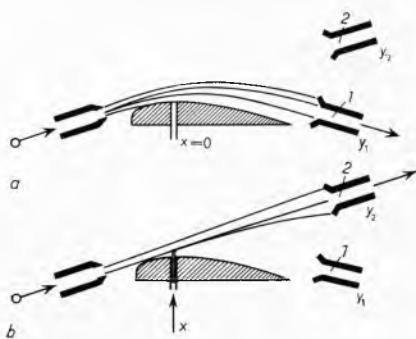
Sl. 20. Elementi I — ILI eks. a Polusumator ostvaren direktnim sudarom mlazeva i njegov simbol, b polusumator prema Parker-Jonsu i njegov simbol, c tablica istine

Pasivni elementi koji ostvaruju funkciju I — ILI eks., zvani i *polusumatorima*, kompletiraju ovu grupu elemenata (sl. 20). Ako se koristi izlaz y_2 , ovim se elementom ostvaruje i funkcija antivalencije (v. tabl. 4). I element firme »Imperial-RIV« prikazuje sl. 21.



Sl. 21. Snimak I elementa firme »Imperial-RIV«

Strujnim relajima nazivaju se elementi u kojima mlaz osnovne struje fluida prianja uz aerodinamički profil sličan avionskom krilu (sl. 22). Tangencijalno na silazni dio profila smještena je prijemna mlaznica 1, a koaksijalno s napojnom mlaznicom prijemna mlaznica 2. Pod djelovanjem upravljačkog signala dolazi do odlepljivanja osnovne struje te se pojavljuje izlazni signal u mlaznici 2. Element je razvijen u Institutu za automatiku i telemehaniku Akademije nauka SSSR. U izvedbi prikazanoj na sl. 22 ostvaruje

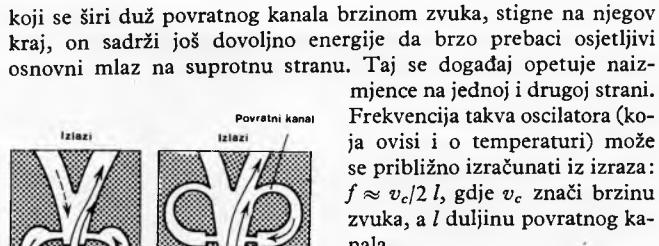


Sl. 22. Shematski prikaz rada strujnog relaja:
a dok nema upravljačkog mlaza ($x = 0$) mlaz prianja uz tijelo aerodinamičkog profila i ulazi u mlaznicu 1, b zbog djelovanja upravljačkog signala mlaz se odlepjuje i ulazi u prijemnu mlaznicu 2

se na mlaznici 1 logička funkcija negacije, a na mlaznici 2 logička funkcija indikacije.

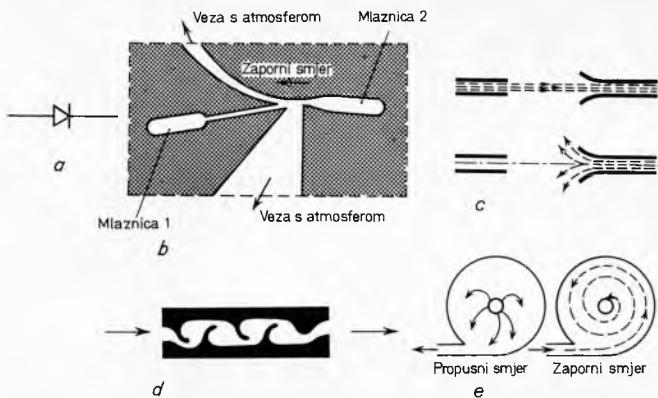
Fluidički oscilatori su elementi koji na svojim izlazima daju pulsirajuće signale. Oni se izvode na različitim principima sa jednim ili više elemenata. Najčešće se za tu svrhu primjenjuju bistabili i monostabili s povratnom vezom, koja se ostvaruje kroz povratni kanal. Impulsna frekvencija i trajanje impulsa ovisi o karakteristikama prigušnika i spremnika, tj. o njihovoj fluidičkoj otpornosti i kapacitivnosti.

Oscilator na principu zvučnog udarnog vala prikazan je na sl. 23 a. Pri naglom prebacivanju mlaza s lijeve na desnu stranu (u trenutku prikazanom na slici) okolišni uzduh nagrne u povratni kanal (crtkana strelica) uz zvučni udar. Kad udarni val,



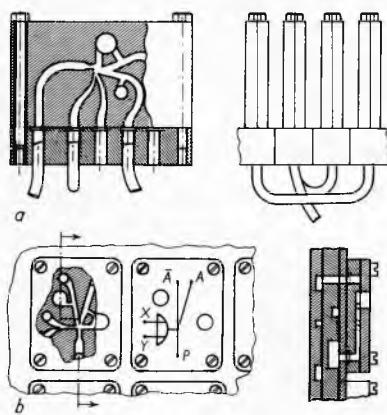
Sl. 23. Fluidički oscilatori i njihovi simboli: a s djelovanjem povratnog udarnog vala, b s djelovanjem počasta tlaka u izlaznim kanalima

Fluidičkim diodama ostvaruje se u jednom smjeru, a otpor nepropuštanju, u suprotnom smjeru. Na sl. 24 a prikazan je simbol za fluidičke diode, a na sl. 24 b...e prikazana su različita konstruktivna rješenja tog elementa. Odnos protoka u zapornom i propusnom smjeru dostiže kod fluidičkih dioda vrijednost i do 1 : 200, što predstavlja vrlo visoki funkcionalni kvalitet elemenata.



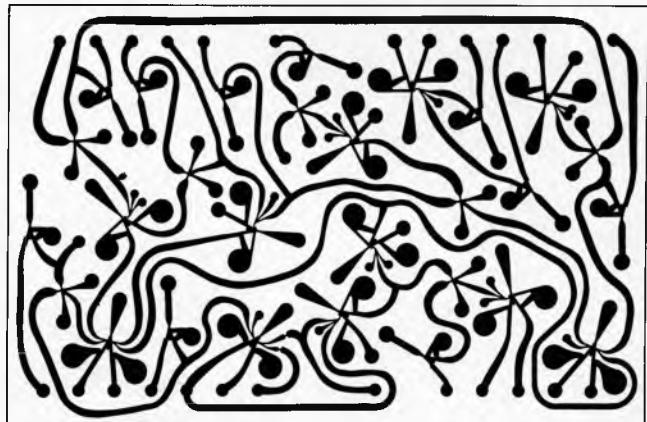
Sl. 24. Fluidičke diode. a Simbol, b dioda s korištenjem Coanda-efekta, c turbulentna dioda, d dioda s branama, e vrtložno pojačalo kao dioda

Realizacija logičkih funkcija s fluidičkim elementima bez pokretnih dijelova prikazana je u tabl. 4. Radi uporedbе dana su i odgovarajuća rješenja s električnim elementima.



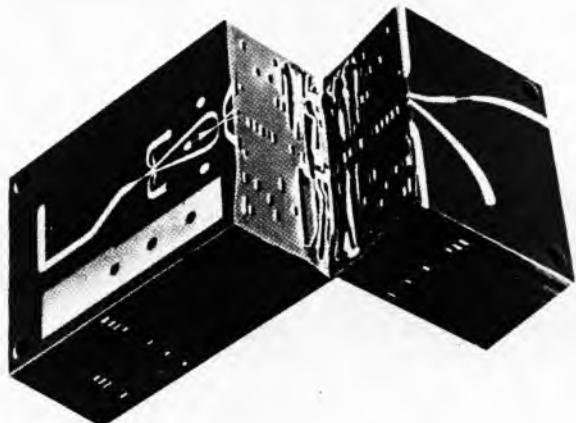
Sl. 25. Montaža pojedinačnih elemenata. a Međusobno povezivanje sa cijevima, b spojni kanali izrađeni u veznoj ploči

Fluidički sklopovi sastoje se od više radnih i pomoćnih elemenata. Kad se ti elementi izrađuju pojedinačno, oni se montiraju na montažne ploče i među sobom povezuju plastičnim cijevima (sl. 25 a) ili kanalima izrađenim u montažnoj veznoj ploči (sl. 25 b). Sklopovi čija se izlazna funkcija često primjenjuje i sklopovi koji se masovno proizvode izrađuju se u integriranom obliku. U tom se slučaju svi radni elementi, pomoćni elementi te napojni i upravljački kanali izrađuju na istoj ploči, u toku istog



Sl. 26. Integrirani fluidički sklop

tehnološkog postupka (sl. 26). Na taj se način postiže miniaturizacija sklopova kao što se ona u elektronici postiže primjenom tiskanih krugova ili integriranih sklopova. Niz takvih ploča s integriranim sklopovima može se spojiti, njihovi kanali povezati i tako obrazovati blok, koji se naziva i »sendvič-izvedbom« (sl. 27). Takvim se rješenjima postiže maksimalna ušteda prostora, otpada mnoštvo spojnih vodova, brzina rada sklopa se povećava, a održavanje se do maksimuma pojednostavljuje jer se svodi na zamjenu neispravne ploče, odn. bloka.



Sl. 27. Niz ploča složenih i međusobno povezanih u tzv. »sendvič-blok«. Izvedba firme »Corning Glass«

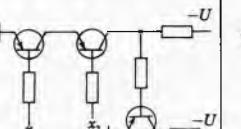
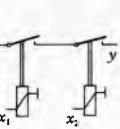
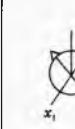
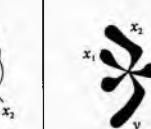
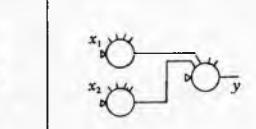
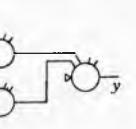
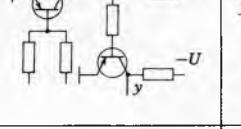
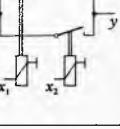
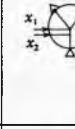
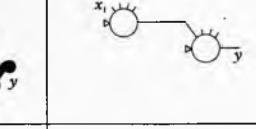
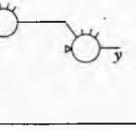
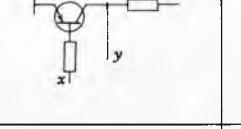
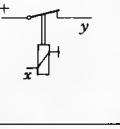
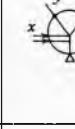
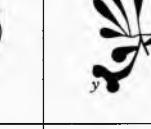
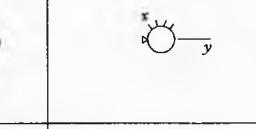
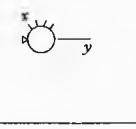
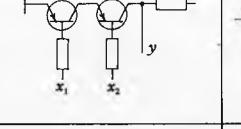
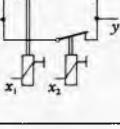
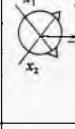
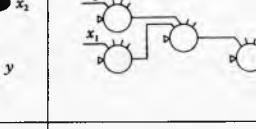
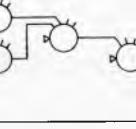
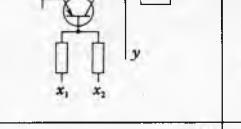
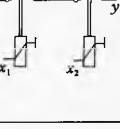
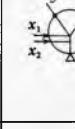
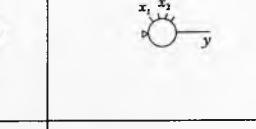
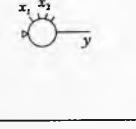
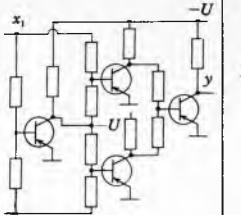
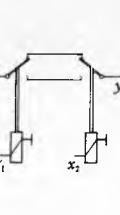
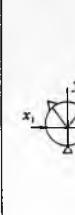
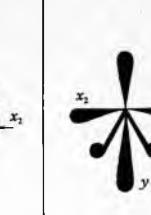
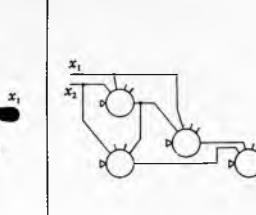
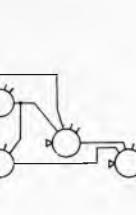
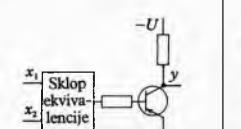
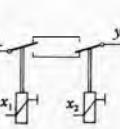
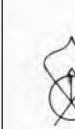
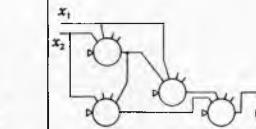
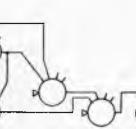
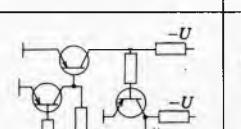
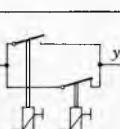
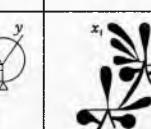
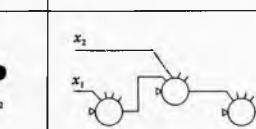
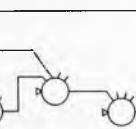
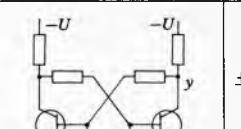
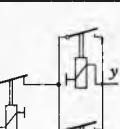
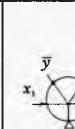
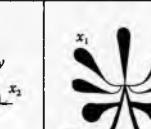
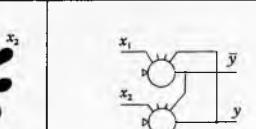
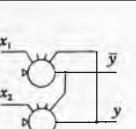
Regulacijski sistemi projektiraju se uz primjenu analognih fluidičkih elemenata na isti način i s pomoću istih metoda kao uz primjenu električnih sklopova. Pri tome treba, dakako, voditi računa o specifičnostima fluidike. U kompleksnijim sistemima upravljanja i automatske regulacije često se upotrebljavaju i kombinacije analognih i digitalnih elemenata.

Elementi s pokretnim dijelovima

U radnim elementima s pokretnim dijelovima pomiču se djelovanjem upravljačkog signala pokretni dijelovi i time se mijenja izlazna funkcija signala. Takvi se elementi zovu i pneumomehanički ako im kao radni medij služi neki plin. Prema svojim funkcionalnim karakteristikama elementi s pokretnim dijelovima mogu biti statički ili kvazistatički.

Tablica 4

REALIZACIJA LOGIČKIH FUNKCIJA ELEKTRIČNIM ELEMENTIMA
I FLUIDIČKIM ELEMENTIMA BEZ POKRETNIH DIJELOVA

Naziv funkcije	Logička jednadžba	Tablica istine	Rješenje logičke funkcije električnim elementima		Rješenje logičkih jednadžbi fluidičkim elementima bez pokretnih dijelova		
			električkim	relejskim	Elementi s prianjanjem mlaza uz stijenku		Turbulentno pojačalo
					Fluidički simbol	Konfiguracija elemenata	
Konjunkcija, funkcija »I«	$y = x_1 \cdot x_2$ 	$x_1 \ x_2 \ y$ 0 0 0 0 1 0 1 0 0 1 1 1	 				
Dizjunkcija, funkcija »ILI«	$y = x_1 + x_2$ 	$x_1 \ x_2 \ y$ 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1	 				
Negacija	$y = \bar{x}$ 	$x \ y$ 0 1 1 0	 				
Schefflerova funkcija »NI«	$y = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 = \bar{x}_1 + \bar{x}_2$ 	$x_1 \ x_2 \ y$ 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0	 				
Peirceova funkcija »NILI«	$y = \bar{x}_1 + \bar{x}_2 = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2$ 	$x_1 \ x_2 \ y$ 0 0 1 0 1 0 1 0 0 1 1 0	 				
Ekvivalencija	$y = x_1 \Leftrightarrow x_2 = x_1 \cdot x_2 + \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2$ 	$x_1 \ x_2 \ y$ 0 0 1 0 1 0 1 0 0 1 1 1	 				
Ekskluzivna disjunkcija Antivalencija	$y = x_1 \oplus x_2 = \bar{x}_1 \cdot x_2 + x_1 \cdot \bar{x}_2$ 	$x_1 \ x_2 \ y$ 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 0	 				
Implikacija	$y = x_1 \Rightarrow x_2 = \bar{x}_1 + x_2$ 	$x_1 \ x_2 \ y$ 0 0 1 0 1 1 1 0 0 1 1 1	 				
Memorija RS	$y^{t+1} = (x_1 + \bar{x}_2 y)^t$ 	$x'_1 \ x'_2 \ y^{t+1}$ 0 0 y' 0 1 1 1 0 0 1 1 —	 				

FLUIDIKA

U statičkim elementima s pokretnim dijelovima primjenjuje se za ostvarenje izlazne funkcije određena razina tlaka upravljačkog signala, bez gibanja fluida. U tim se elementima struja upravljačkog signala ne miješa s izlaznom strujom fluida. Kvazi-statički elementi imaju statičke i dinamičke karakteristike. Mlaz fluida upravljačkog signala pomiciće razvodni dio unutar elementa i time vrši osnovnu funkciju upravljačkog signala kao u statičkim elementima, ali zatim se mlaz fluida upravljačkog signala, u većini slučajeva, miješa s osnovnom strujom, što je karakteristika dinamičkih elemenata.

Elementi s pokretnim dijelovima po svojoj su funkciji digitalni. Oni se najčešće primjenjuju u upravljačkim sklopovima industrijske opreme. Njihova izlazna funkcija ovisi o položaju pokretnog dijela unutar elementa. U odnosu prema elementima bez pokretnih dijelova, osnovna im je prednost što su manje osjetljivi prema nekim od vanjskih smetnji (uzdušnim oscilacijama, nečistoći radnog fluida i dr.), što im je funkciranje lakše razumljivo osoblju koje ih poslužuje i što se lakše održavaju. Osnovni nedostaci su im, međutim, skuplja izrada, veće dimenzije, manja trajnost i nepogodnost za izgradnju kompleksnijih integriranih sklopova. Područje radnih tlakova im je široko i kreće se, ovisno o tipu elementa, od 0,1 do 10 bar, s tim da većina elemenata radi s tlakom većim od 1 bar. Vrijeme promjene stanja kreće se između 0,5 i 10 ms.

Prema tipu pokretnog dijela, ti se elementi dijele na elemente s klipom, elemente s kuglicom, elemente s folijom, membranske elemente i elemente s nekim drugim pokretnim dijelom.

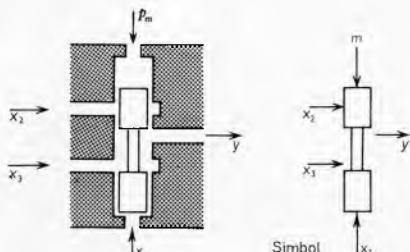
Razvoj tih elemenata kreće se u dva pravca. Prema prvoj konceptiji teži se razvoju elemenata koji u jednom sklopu ostvaruju što više logičkih funkcija čime se dimenzije i težina upravljačkih sklopova smanjuju. Druga konceptija daje prednost elementima koji ostvaruju samo jednu logičku funkciju (Pierceovu funkciju NIL), kojom se može izraziti i bilo koja druga logička funkcija. Time se troškovi proizvodnje doduše smanjuju, ali se istovremeno povećava broj elemenata potreban za realizaciju određene upravljačke funkcije, povećava prostor za njihov smještaj, produžuje vrijeme prerade informacija, a smanjuje ukupnu pouzdanost sklopa.

Elementi s klipom crtaju se prema simbolima za hidrauličke i pneumatske uređaje (ISO ITC-10/SC-2, DIN 24300, JUS L.N. 1.001...L.N. 1.008), a ostali tipovi elemenata imaju svaki svoj funkcionalni simbol.

Opis nekih elemenata s pokretnim dijelovima. Elementi s klipom su minijsurni elementi koji se najčešće izvode u obliku trosmjernih (oznaka 3/2) i petrosmjernih (oznaka 5/2) dvo-položajnih razvodnika; zovu se dvoklipni i troklipni elementi. Tlak p_m , koji je obično polovica tlaka napajanja p_n , djeluje kao opruga i vraća klip u prvobitni položaj nakon prestanka djelovanja upravljačkog signala x_1 . Dvoklipni element prema sl. 28 ostvara logičku funkciju

$$y = (\bar{x}_1 \cdot x_3) + (x_1 \cdot x_2)$$

a kombinacijom različitih ulaza može se njime ostvariti šest logičkih funkcija (tabl. 5).



Sl. 28. Shematski prikaz i simbol dvoklipnog elementa. x_1, x_2, x_3 ulazni (upravljački) signali, y izlazni signal, p_m pomoći tlak

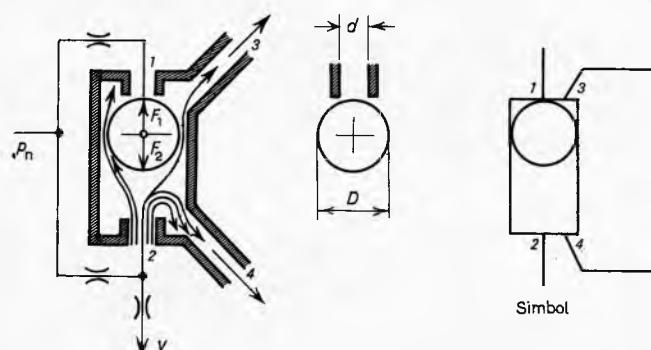
Elementi s kuglicom idu među najmanje elemente s pokretnim dijelovima. Njihov najizrazitiji predstavnik, element američke tvrtke Kefratt (sl. 29), ima, npr., ove dimenzije: promjer kuglice $0,483 \pm 0,005$ mm, promjer cilindra $0,508 \pm 0,001$ mm, promjer vodova $0,2$ mm. Kuglica se pod djelovanjem mlaza uzduha giba u cilindru zatvarajući otvor 1 ili 2. Sila koja djeluje na kuglicu kad zatvara otvor 1 jest:

$$F_1 = A_D (p_n - \Delta p_n),$$

gdje je Δp_n pad tlaka uzduha zbog izlaza kroz otvor 4, p_n tlak napajanja, a A_D površina presjeka kuglice. Sila kojom uzduh djeluje s druge strane kuglice jest:

$$F_2 = D_d \cdot p_k + (A_D - A_d) p_k,$$

gdje je p_k tlak u komori iznad kuglice, koji nastaje zbog neznatnog strujanja oko kuglice i mnogo je manji od p_n ili Δp_n , a A_d presjek otvora 1.



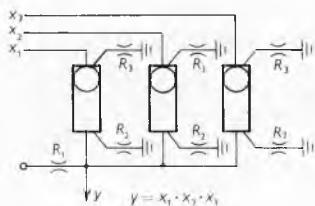
Sl. 29. Shematski prikaz i simbol elemenata s kuglicom firme Kefratt. 1...4 Otvori na elementu, D promjer kuglice, d promjer otvora 1 i 2

Kako je $F_1 > F_2$, kuglica se priljubljuje uz otvor 1, a uzduh slobodnoj struju kroz otvor 2 u izlaz 4, i time zbog velikog prigušenja u vodu smanjuje tlak na njegovom izlazu. Vrijednost tog izlaznog signala y predstavlja stanje »0«, a stanje »1« nastupa pojmom signala u vodu x (3).

Tablica 5
LOGIČKE FUNKCIJE KOJE SE MOGU OSTVARITI DVOKLIPNIM ELEMENTOM

Logička funkcija	Dvoklipni element	Simbol prema ISO ITC-10/SC-2
Identitet $y = x_1$		
Negacija $y = \bar{x}_1$		
Konjunkcija $y = x_1 \cdot x_2$		
Disjunkcija $y = x_1 + x_2$		
Implikacija $y = \bar{x}_2 + x_1$		
Inhibicija $y = \bar{x}_1 \cdot x_3$		

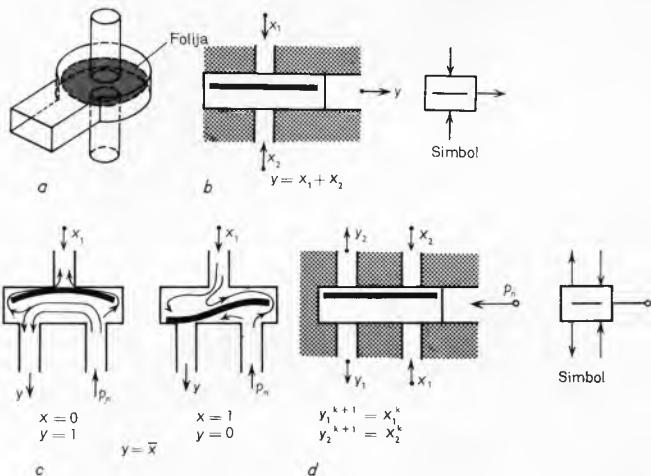
S jednim elementom mogu se ostvariti tri osnovne logičke funkcije, a kombinacijom više elemenata i prigušnica i sve ostale. Na sl. 30 prikazana je realizacija funkcije konjunkcije trima elementima s kuglicom. Iako ovi elementi zbog malih dimenzija, jednostavne konstrukcije i relativno visokog tlaka s kojim rade (6 bar), imaju određene prednosti, postoje i značajni nedostaci koji stoje na putu njihovoj široj primjeni: skupa izrada zbog potrebne velike točnosti i vrlo velika ovisnost funkcioniranja o relativno osjetljivim prigušnicama (vrlo malih promjera) što otežava projektiranje i uvjetuje upotrebu samo sasvim pročišćenog i suhog uzduha. Firma Kefarott razvila je i modifikaciju tog elementa sa pet izlaza, kojom se jednostavnije ostvaruju kompleksniji logički sklopovi.



Sl. 30. Primjer ostvarivanja logične funkcije konjunkcije pomoću elemenata s kuglicom firme Kefarott

U grupu ovih elemenata spadaju i izvedbe drugih firmi među kojima je značajniji element s kuglicom i klipom Transiflux firme CPOAC (Compagnie Parisienne d'Outillage à Air Comprimé), prikazan na sl. 31.

Elementi s folijom sadrže pokretljivu foliju debeljine $\sim 0,1$ mm koja je slobodno postavljena, s vrlo malim hodom, u komori s više izlaza i ulaza. Osnovna izvedba elementa razvijena je u laboratorijima firme IBM (sl. 32). Struja upravljačkog signala pomicje foliju na suprotnu stranu, zatvarajući pri tome prolaz kanalu



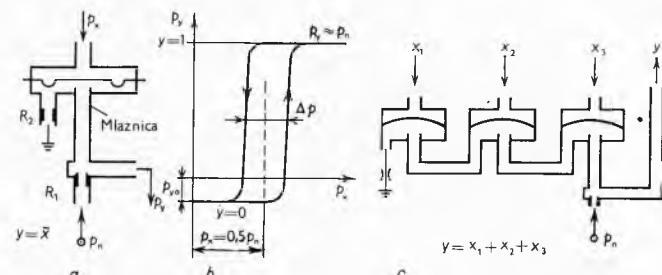
Sl. 32. Element s folijom. a Shematski prikaz, b-d nekoliko primjera ostvarivanja različitih logičkih funkcija s takvima elementima i njihovi simboli

koji je povezan s napajanjem, odnosno otvarajući prolaz signalu do izlaznog kanala. Vrijeme promjene stanja na izlazu ovisno je o promjeru vodova d i tlaku napajanja p_n ; iznosi $t \approx d/Vp_n$.

Membranski elementi sadrže kao pokretni dio jednu ili više membrane. Pomicanjem membrane vrše se promjene izlaznog stanja i time ostvaruju različite logičke funkcije. Zbog svojih dobrih karakteristika, prikladnosti oblike i do detaljnâ razrađenih perifernih elemenata, ova se grupa od svih elemenata s pokretnim dijelovima najčešće primjenjuje u praksi.

Element Pneulog firme ZPA iz Praga, koji se izrađuje u dvije osnovne izvedbe, ostvaruje svoju funkciju pomoću jedne mem-

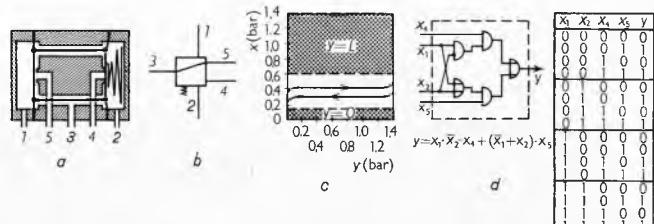
brane koja se pod djelovanjem upravljačkog mlaza tlaka p_x pomiče i time otvara ili zatvara prolaz drugom signalu. Spoj tog elementa s prigušnicom na izlazu y (sl. 33 a) ostvaruje funkciju negacije, a kombinacijom više elemenata mogu se dobiti i druge logičke funkcije, npr. disjunkcija (sl. 33 c).



Sl. 33. Membranski element Pneulog firme ZPA iz Praga. a Shematski prikaz elementa, b njegova krivulja histerezе, c sklop za ostvarivanje funkcije disjunkcije

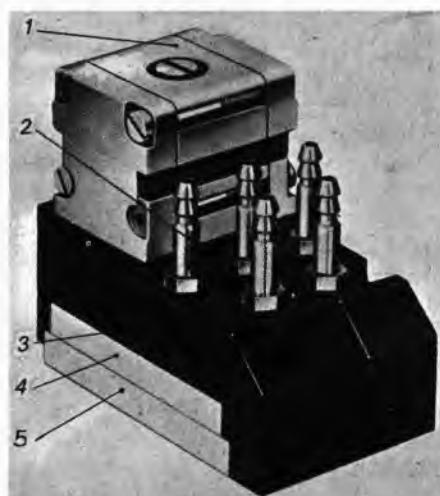
Element se izrađuje i u kombinaciji s elementom ILI. Tlak napajanja je $0,5\cdots 0,6$ bar. Signal $0\llcorner$ odgovara tlaku od 0 do $0,25 p_n$, a signal $1\llcorner$ tlaku od $0,75 p_n$ do p_n .

Element sistema 950 tvrtke »Samsomatic« sadrži kao osnovni pokretljivi dio dvije, među sobom spojene, membrane i oprugu, pa se često i spominje kao element membrana + opruga (sl. 34).



Sl. 34. Element sistema 950 firme »Samsomatics«. a Shematsirani prikaz elementa, b njegov simbol, c histereză za spoj indikacije i područje rada, d logička shema, jednadžba i tablica istine

Jedna membrana uvijek je priljubljena na mlaznicu 4, čime je spriječen prolaz signalu iz 4 na izlaz 3. Djelovanjem upravljačkog signala preko voda 1 pomicje še membrana i time otvara mlaznicu 4 i zatvara mlaznicu 5. Primjenom različitih ulaza u kombinaciji s ovim osnovnim pokretom, element može ostvariti se-

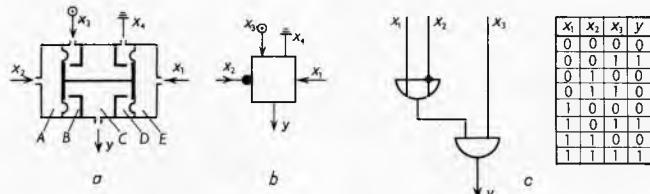


Sl. 35. Izgled elementa »Samsomatic« na podnožju. 1 Element, 2 priključci za cijevi, 3 ploča sa spojnim kanalima, 4 međuploča, 5 osnovna ploča kojom su svi dijelovi podnožja međusobno spojeni

dam različitih logičkih funkcija (tabl. 6). Element »Samsomatic« na podnožju prikazuje sl. 35.

U sistemu 950 razrađeni su svi osnovni periferni elementi, pa zato, zahvaljujući svojim karakteristikama, spada u grupu logičkih elemenata koji nalaze široku primjenu u praksi.

Dvomembranski element sistema DRELOBA sastavljen je od pet komora i dvije membrane koje su jedna s drugom povezane polugom (sl. 36). Sistem je konstruktivno razrađen u Institutu za

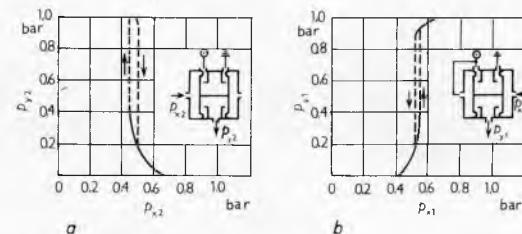


Sl. 36. Dvomembranski element sistema DRELOBA: a) Pojednostavljeni prikaz, b) funkcionalni simbol, c) logička shema i tablica istine. A...E komore

regulacionu i upravljačku tehniku Akademije znanosti DDR u Berlinu. Budući da elemente sistema DRELOBA proizvode firma VEB Regelwerk iz Drezdena i firma Sunvic Regler GmbH iz Solingena, ti se elementi nazivaju još i elementima Sunvic-Dreloba.

Odnos aktivnih površina membrane na strani komora B i D prema površini na strani komora A i E je 1 : 2. Iz toga slijedi da signali \$x_1\$ i \$x_2\$ moraju imati tlak veći od 0,5 \$p_n\$.

Elementom je moguće ostvariti šest različitih logičkih funkcija (v. tabl. 6). Krivulje histereze tog elementa za spoj negacije i indikacije prikazane su na sl. 37 a i b.



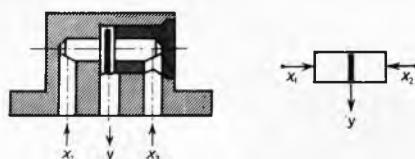
Sl. 37. Krivulja histereze dvomembranskog elementa DRELOBA: a) za spoj negacije, b) za spoj indikacije

Osnovne su karakteristike tog elementa: dimenzije \$16 \times 18 \times 18\$ mm, tlak napajanja \$p_n = 1,4\$ bar \$\pm 10\%\$, najviši dozvoljeni tlak napajanja 2,5 bar, protok zraka (reduciran na standardne

Tablica 6
OSTVARIVANJE LOGIČKIH JEDNADŽBI FLUIDIČKIM MEMBRANSKIM ELEMENTIMA

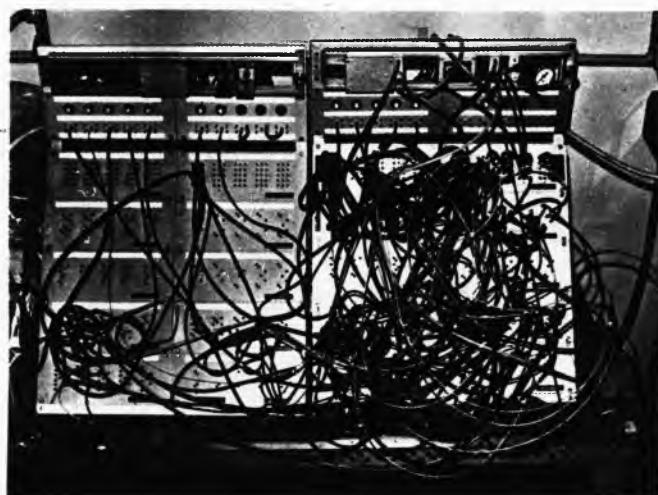
Logička funkcija	Najčešće primjenjivani sistemi		
	DRELOBA	SAMSOMATIC sistem 950	USEPPA
Indikacija $y = x$			
Negacija $y = \bar{x}$			
Konjunkcija $y = x_1 \cdot x_2$			
Disjunkcija $y = x_1 + x_2$			
Implikacija $y = \bar{x}_1 + x_2$			
Inhibicija $y = x_1 \cdot \bar{x}_2$			
Memorija RS $y_1^{t+1} = (\bar{x}_1 + \bar{x}_2 \cdot y_1)^t$ $y_2^{t+1} = (\bar{x}_2 + \bar{x}_1 \cdot y_2)^t$			

okolnosti) kod razlike tlaka od jednog bara $\geq 1 \text{ m}^3/\text{h}$, vrijeme promjene stanja 1 ms, signal »0« 0...0,2 p_n i signal »1« 0,8 p_n ... p_n . Drugi osnovni element sistema DRELOBA, pomakom pločice, ostvaruje samo funkciju disjunkcije (sl. 38). Obično se ta dva



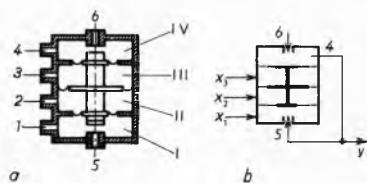
Sl. 38. Shematski prikaz i simbol elementa sistema DRELOBA kojim se ostvaruje funkcija ILI

osnovna elementa ne upotrebljavaju u sklopovima pojedinačno, već u obliku blokova. Postoji pet osnovnih blokova elemenata i to: blok I, sa tri elementa, koji ostvaruje funkciju konjunkcije; blok ILI, sa pet elemenata ILI, koji može ostvariti funkciju disjunkcije na tri različita načina; univerzalni blok I, sa tri neovisna dvomembranska elementa; univerzalni blok II, s dva dvomembranska elementa i dva elementa ILI, i blok memorije, bistabil, sastavljen od dva elementa ILI i dva dvomembranska elementa. Zahvaljujući činjenici da je u okviru sistema razrađen velik broj raznolikih perifernih elemenata (opisanih kasnije) i jednostavan sistem povezivanja u blokove, kao i zbog velike pouzdanosti i trajnosti elemenata (više od 10^9 preklapanja), sistem DRELOBA je našao vjerojatno najširu primjenu u sistemima automatskog upravljanja evropske metaloprerađivačke i procesne industrije. Ispitna ploča za elemente i sklopove sistema DRELOBA prikazana je na sl. 39.



Sl. 39. Ispitne ploče sistema DRELOBA s postavljenim cijevima prema upravljačkoj shemi za ispitivanje

Element USEPPA (Универсальная система элементов промышленной пневмоавтоматики) ima tri među sobom spojene membrane od kojih su dvije istih površina, a treća, srednja, je veća (sl. 40). Razvijen je u Moskovskom institutu za automatizaciju Akademije nauka SSSR.

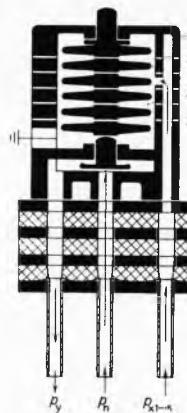


Sl. 40. Tromembranski element USEPPA.
a Shematski prikaz, b simbol; I i IV prolazne komore, II i III upravljačke komore; 1...6 otvor

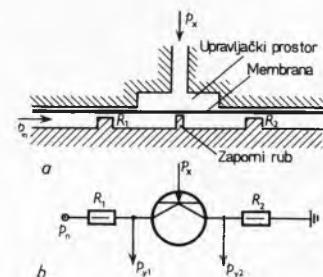
Osim normalne veze komora sa signalnim ili napojnim vodovima, komore I i IV imaju i dodatne mlaznice 5 i 6, preko kojih se zatvara odn. odzračuje vod y. Komora II ili III se stalno napaja,

čime se osigurava da je sapnica 5, odn. 6, stalno otvorena. Kad tlak signala dođe u susjednu komoru III, odn. II, membrane se pomiču u suprotnom smjeru. Tlak napajanja p_n kreće se od 1 do 1,4 bara, a tlak p_{n2} odnosno p_{n3} u komorama II i III iznosi 0,7 p_n , odn. 0,3 p_n . Tlak upravljanja p_u mora uvijek biti veći od 0,7 p_n . Pomoću elemenata USEPPA može se također ostvariti šest logičkih funkcija (v. tabl. 6).

Element s više membrana Sempress firme N. V. Maschinenfabrik, ostvaruje logičku funkciju NILI (sl. 41). Osnov elementa čini ventil sa sjedištem, a zatvaranje tog ventila ostvaruje se preko pet membrana, na koje se dovode upravljački signali preko pet od-



Sl. 41. Element Sempress. 1 Kućište, 2 meduploče, 3 membrane, 4 ventil

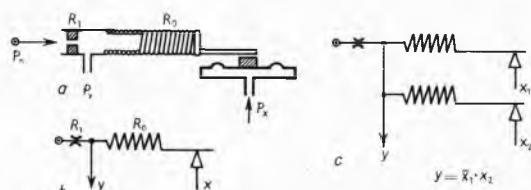


Sl. 42. Planarni membranski element IBM. a Shematski prikaz, b prikaz simbolima

vojenih kanala. Tlak napajanja može biti 0,3...10 bar, a vrijeme promjene stanja 5 ms.

Firma IBM je osim već spomenutih elemenata s folijom razvila i verziju membranskog elementa koji je poput elemenata bez pokretnih dijelova pogodan za izradu integriranih sklopova (sl. 42). Tlak napajanja iznosi ~ 70 mbar, a vrijeme promjene stanja $\sim 0,6$ ms. Sistem je zbog malih zračnosti i niskog radnog tlaka vrlo osjetljiv.

Element sa zavojnicom (Techne-Fluid Division Ltd.) prikazan je na sl. 43. Jedan dio plašta cilindrične komore u koju ulazi osnovna struja obrazovan je žičanom zavojnicom tako čvrsto namotanom da se, kad nema upravljačkog signala, izlaženju fluida između namotajā suprostavlja velik otpor, te je izlazni tlak p_y praktički jednak ulaznom tlaku p_n . Upravljački signal pomiče membranu, pa se zbog deformacije zavojnice razdvajaju namotaji, otpor izlaženju fluida između njih se smanjuje, te uslijed



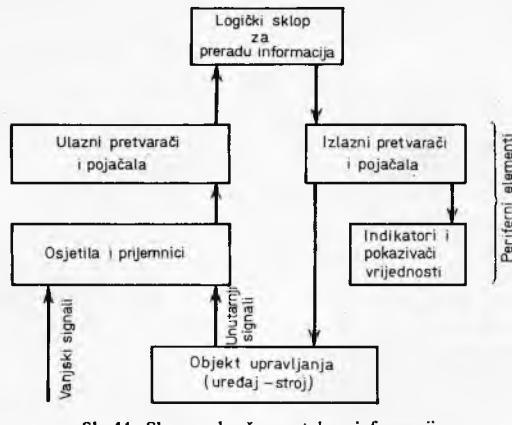
Sl. 43. Element sa zavojnicom firme Techne.
a Shematski prikaz elementa, b simbol, c element NILI

toga opada tlak p_y . Osnovnim elementom koji se sastoji od dvije zavojnice ostvaruje se logička funkcija NILI. Tlak napajanja iznosi $\sim 0,35$ mbar.

Periferni elementi i uređaji

Osnovna je funkcija perifernih elemenata i uređaja pretvaranje ulaznih informacija u signale pogodne za obradu u fluidičkim sklopovima i pretvaranje obrađenih izlaznih signala u pogodan oblik za upravljanje određenim uređajem ili strojem (sl. 44). Periferni elementi odgovarajućih karakteristika tek omogućuju primjenu određenih grupa i sistema fluidičkih elemenata i sklopova, jer bez razrađenih perifernih elemenata nema ni šire primjene sistema. Prema osnovnoj funkciji periferni elementi se dijele na tri grupe: osjetila i prijemnike, pretvarače i pojačala, indikatore i registratore.

Osjetila i prijemnici imaju zadataću da primaju vanjske ili unutrašnje signale i da ih pretvaraju u signal pogodan za prijenos i obradu u fluidičkom upravljačkom sklopu. U ovu grupu idu, npr., mjerači različitih fizikalnih veličina (sile, brzine, temperature, nivoa itd.), impulsni davači (ručni-mehanički, pneumatski i električni prekidači i sklopke), čitači bušenih kartica ili perforiranih traka, itd.

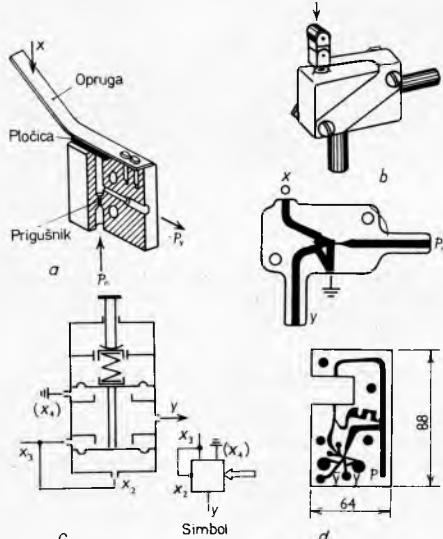


Ulazni pretvarači i pojačala imaju funkciju da pojačavaju mehaničke, električne, pneumatičke i hidrauličke signale, i/ili da ih pretvaraju u signale pogodne za obradu u fluidičkom upravljačkom sklopu; *izlazni pretvarači* prenose signal iz fluidičkih sklopova izvršnim organima i motorima. U ovu se grupu ubrajaju prije svega različiti elektro-pneumatički (E/P) pretvarači i pneumatičko-električni (P/E) pretvarači, nadalje pneumatički i hidraulički razvodnici i ventili upravljeni fluidičkim signalom, analogno-digitalni pretvarači, itd.

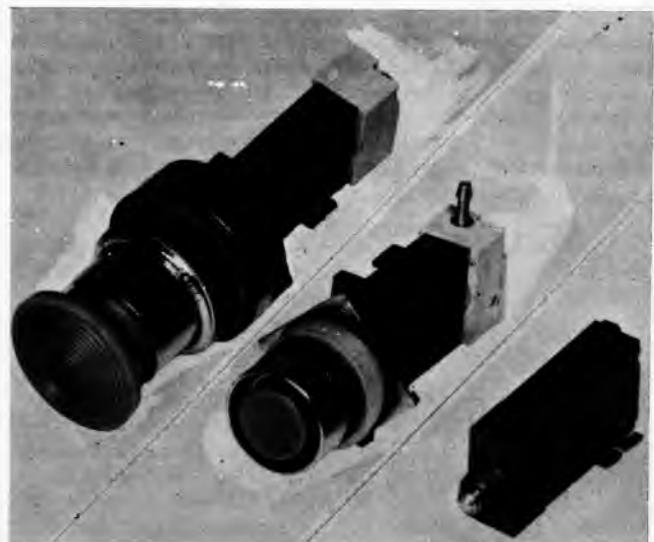
Indikatori i registratori služe za indikaciju, odn. registraciju različitih veličina ili funkcija. Ovamo idu, npr.: binarni pokazivači, zvučni signalni uređaji, digitalni indikatori, digitalni brojači, i sl.

Za razvoj i izradu perifernih elemenata iskorištavaju se iskustva i konstruktivska rješenja hidraulike, pneumatike i elektromehanike, ali se primjenjuju također spoznaje i iskustva stekena pri razvoju elemenata fluidike. To se posebno odnosi na periferne elemente bez pokretnih dijelova.

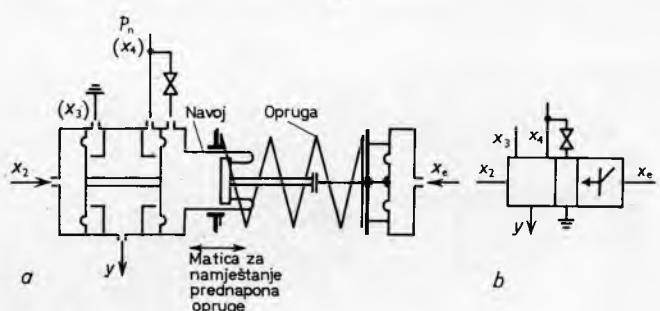
Prikaz različitih perifernih elemenata. Na sl. 45 vide se *impulsni davači* različite konstrukcije i izrade, od kojih neki ostvaruju funkcije indikacije, a drugi negacije. Ručne prekidače tvornice ISKRA-TIO prikazuje sl. 46.



Sl. 45. Impulsni davači. a) Granični prekidač firme 'Maxam-Power', b) granični prekidač firme 'De Limon-Norgren', c) shematski prikaz i simbol ručnog prekidača sistema DRELOBA, d) silhueta bezkontaktnog prekidača firme 'De Limon-Norgren'.



Prekidač s namještenim vrijednostima (sl. 47) proradi kad se razina signala x_e podigne na vrijednost pri kojoj pritisak na membranu savladava namješteni prednapon opruge: time odzračuje desnu komoru i povezuje ulazni vod x_4 s izlazom y .



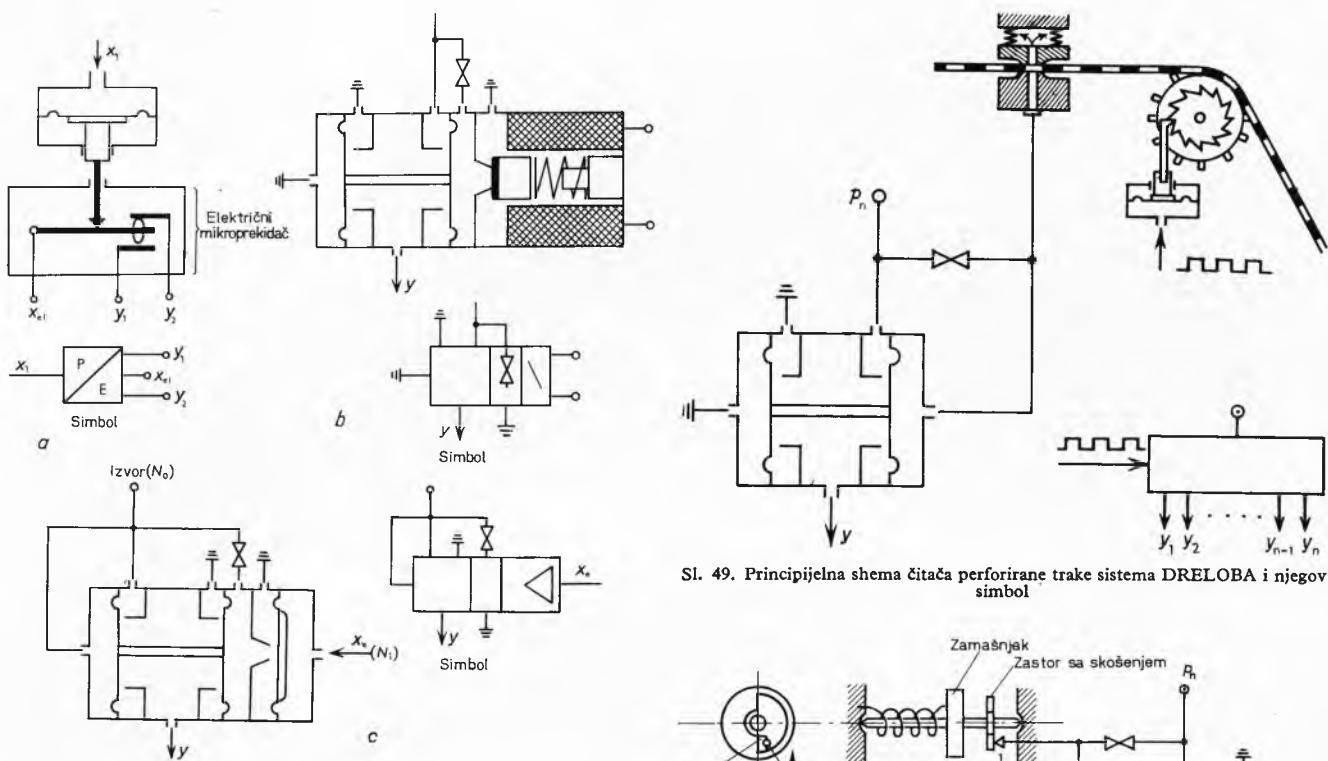
Pretvarači signala pretvaraju signale jedne fizikalne veličine u signale druge fizikalne veličine. U pretvaraču P/E (pneumatičko-električnom, sl. 48 a) tlak upravljačkog signala pomiciće membranu koja uključuje mikroprekidač. U pretvaraču E/P (električno-pneumatičkom sl. 48 b) električnim impulsom pobudeni elektromagnet uvuče kotvu, uslijed čega se odzračuje krajnja komora i pojavljuje se pneumatički signal na izlazu.

Pojačalo (transformator) Ni/No I (niski-normalni tlak) omogućuje da se signali niže razine tlaka podignu na višu razinu, kako bi se mogli koristiti u sistemu koji radi s višom razinom tlaka (sl. 48 c). Niskotlačni signal x_e djelovanjem na membranu odzračuje krajnju komoru, pa uslijed toga dolazi na izlazu y do pojave pneumatičkog signala višeg tlaka.

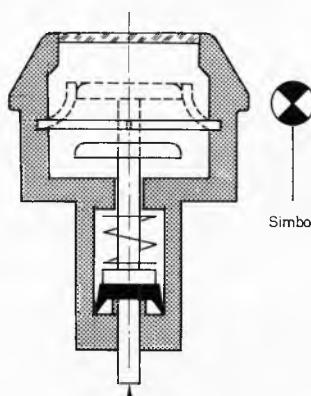
Čitač perforirane trake čita zapis programa s perforirane papirnate ili celuloidne trake sa 5, 8 ili 12 redova rupica. Propuštanjem uzduha kroz probušene rupice, odn. blokiranjem njegovog izlaza, dolazi do porasta odn. pada tlaka u upravljačkom vodu i do pomicanja membrane. Uslijed toga se na izlazu pojavljuje ili nestaje signal (sl. 49). Na slici 50 prikazan je čitač perforirane trake sistema 1000 firme Festo-Pneumatic.

Generatori impulsa osim što se mogu izvesti primjenom niza elemenata, spremnikā i prigušnika izrađuju se i kao posebni uređaji (sl. 51). Njišući zastor zatvara i otvara mlažnicu I i time pridonosi stvaranju impulsa na izlazu y . Radi održavanja njihanja mehaničkog sistema zastor je skošen, pa zbog pritiska mlaža dobi u svakoj periodi tangencijalni impuls.

Za obilježavanje i signiranje postojanja tlaka u nekom vodu, a time i za ostvarivanje odredene logičke funkcije, upotrebljavaju se *binarni pokazivači*. Jedan od načina na koji rade binarni pokazi-



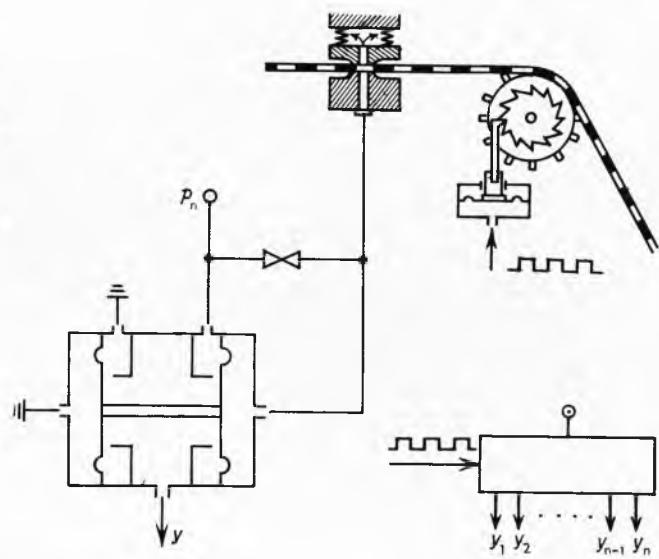
Sl. 50. Citač perforirane trake sistema 1000 firme »Festo Pneumatic«



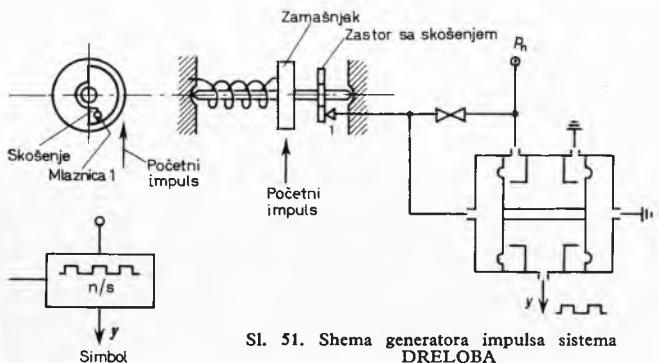
Sl. 52. Binarni pokazivač sistema DRELOBA

vači prikazan je na sl. 52. Uslijed pomaka klipa odmiče se crna gumena zavjesa, te se s prednje strane vidi svijetla pločica.

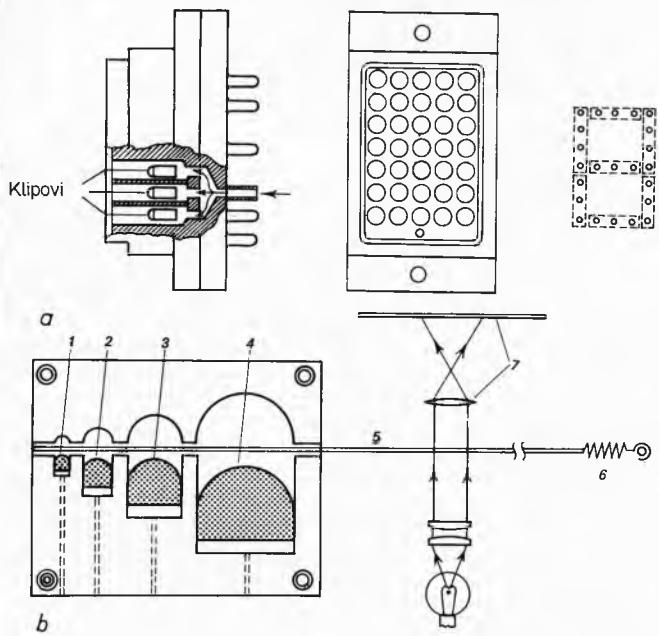
Numerički pokazivači daju sliku arapskih brojki kad se, npr. aktiviranjem minijaturnih cilindara koji ispisuju brojku, ostvaruje određena binomna kombinacija (sl. 53 a). Drugi tip numeričkog pokazivanja ostvaruje se pomoću četiri cilindra različitih promjera, koji natežu providnu traku s upisanim brojkama (sl. 53 b). Kombinacijom binarnih brojeva 1, 2, 4 i 8 mogu se izraziti sve brojke od 0 do 9.



Sl. 49. Principijelna shema čitača perforirane trake sistema DRELOBA i njegov simbol



Sl. 51. Shema generatora impulsa sistema DRELOBA



Sl. 53. Numerički pokazivači, a) Pitney-Bowesov fluidički numerički pokazivač, b) princip rada numeričkog pokazivača sa četiri klipa (Deason); 1...4 cilindri sa klipovima, 5 providna traka s upisanim brojevima, 6 opruga, 7 projekcijski sistem s ekranom

Izrada fluidičkih elemenata

Također sa stajališta upotrijebljenih materijala i tehnoloških postupaka postoje znatne razlike između fluidičkih elemenata s pokretnim dijelovima i fluidičkih elemenata bez pokretnih dije-

lova. Fluidički elementi s pokretnim dijelovima načelno su slični drugim elementima koji se u strojarstvu upotrebljavaju za pneumatičko upravljanje i regulaciju, pa se proizvode od istih materijala i uglavnom istim postupcima kao ovi. Od njih se mogu razlikovati po tome što se u pojedinim fluidičkim sistemima ostvaruju logičke funkcije s pomoću svega jednog ili dva osnovna elementa (I, NE, ILI, NILI) te se ovi zbog toga mogu proizvoditi od metala (po pravilu aluminijskih legura) ili plastama u vrlo velikim serijama postupcima koji su za to naročito pogodni (npr. injekciono prešanje i lijevanje). Za izradu fluidičkih elemenata bez pokretnih dijelova upotrebljavaju se također i keramički materijali i staklo i primjenjuju se, pored postupaka obrade i inače uobičajenih u tehnicu, i novi, specijalno za te svrhe razviti postupci.

Materijali za izradu fluidičkih elemenata. Plastične mase imaju prednost da im je prerada jednostavna i jeftina. Elementi izrađeni od plastičnih masa kemijski su postojani, ali imaju manju stabilnost dimenzija i ne podnose trajnja i veća mehanička opterećenja ni visoke temperature. Plastične mase na bazi termoplasta (v. Elektrotehnički materijali, str. 86), posebno na bazi celuloznih acetata, poliamidu, polikarbonata i polimeru ABS (akrilnitril-butadien-stiren) dobro se preraduju injekcionim postupcima i zadovoljavaju u pogledu dimensijske stabilnosti i otpornosti prema kemijskim učincima i temperaturi. Duroplasti su otporniji prema povиšenim temperaturama i dimensijski stabilniji, ali su lomljivi i teže se preraduju, pa im lakše konkuriraju drugi materijali.

Metali koji se upotrebljavaju za izradu fluidičkih elemenata (aluminijum i njegove legure, legirani čelici, bakar i njegove legure, nikal, magnezijum i magnezijumske legure) imaju dobra mehanička, kemijska i termička svojstva. U pogledu obradljivosti, tvrdoće i dimensijske stabilnosti (postojanosti mjerâ) nalaze se između plastičnih masa i keramičkih materijala; u pogledu otpornosti prema koroziji zaostaju i za jednima i za drugima. Primjenjuju se kad se od fluidičkih elemenata, osim dimensijske stabilnosti i toplinske postojanosti, zahtijeva i vrlo dobra mehanička otpornost.

Staklo i keramički materijali imaju vrlo dobru dimensijsku stabilnost, veliku otpornost prema vlazi i koroziji, široko područje radnih temperatura i iz njih se fluidički elementi mogu izraditi s velikom točnošću; velik im je nedostatak, međutim, što su lomljivi. Keramički materijali ojačani staklenim nitima imaju taj nedostatak u manjoj mjeri.

Posebni postupci za izradu fluidičkih elemenata bez pokretnih dijelova. Američka firma Du Pont razvila je fotoosjetljivu plastičnu masu nazvana »Templex« i postupak za njezinu obradu. Pri izradi fluidičkih elemenata tim postupkom, najprije se na ploču od Templexa položi pogodno izrađen fotografski negativ i osvijeti ultravioletnim zrakama. Dijelovi površine ploče koji su ispod prozirnih područja negativa postaju pod djelovanjem svjetla netopljivi, dok dijelovi ispod neprozirnih područja negativa (koja predstavljaju siluetu kanala unutar elementa) ostaju topljivi, te se uklanjuju jetkanjem u natrijskoj lužini. Na kraju se izjektana ploča pokrije pokrovnom pločom i time završi izrada elementa.

Američka firma Corning Glass u suradnji sa Harry Diamond Laboratories izradila je sličan postupak uz upotrebu silikatnog stakla koje sadrži litij i učinjeno je osjetljivim prema ultravioletnim zrakama dodatkom izotopa cera Ce^{3+} . Na osvijetljenim dijelovima staklene površine katalizira se pri zagrijavanju na $650^{\circ}C$ nuklearacija, te nastaje kristalni litij-metasilikat, koji se u fluorovodičnoj kiselini otapa 20 do 30 puta brže nego neosvijetljeno staklo. Nakon jetkanja fluorovodičnom kiselinom izradak se zagrije na $800^{\circ}C$, čime iz stakla djelomično kristaliziraju litijum-disilikat i kvarc, te nastaje materijal velike čvrstoće, nazvan Fotoceram. Kad se tako izrađuju elementi i sistemi u više slojeva, pojedine se ploče pri tome čvrsto spajaju u monolitni »sendvič«. Takvi su elementi potpuno neosjetljivi prema vlazi, dimensijski vrlo stabilni i upotrebljivi na temperaturi do $540^{\circ}C$.

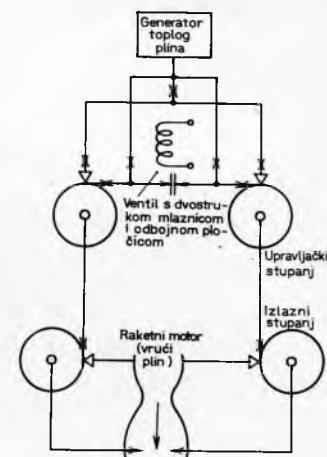
Primjena fluidike

Uredaji i sistemi izrađeni od fluidičkih elemenata služe prije svega za preradu informacija i za formiranje upravljačkih signala. U sistemima automatske regulacije fluidika se primjenjuje u mernim sklopovima, računskim sklopovima i sklopovima za pojačava-

nje. U primjenama kao što su rukovanje materijalom, upravljanje brodom ili različnim primjenama u medicini, kad fluidički elementi djeluju neposredno s osnovnim radnim medijem (uljem, vodom, ljudskom krvlju itd.), često se oni upotrebljavaju i kao izvršni organi (o tome v. u člancima *Hidraulika*, *Pneumatika*). Područja primjene fluidike proširuju se paralelno s razvojem i povećanjem opsega proizvodnje fluidičkih elemenata, tako da ona već danas nalazi primjenu u mnogim oblastima industrijske proizvodnje, vojne tehnike i medicine. Primjeri navedeni u nastavku pokazuju samo neke od mogućnosti primjene fluidike.

Zrakoplovstvo i raketna tehnika. Svojom neosjetljivošću prema visokim temperaturama i mogućnošću da se kao radnim fluidom koristi raspoloživim vrćim ispušnim plinovima plinske turbine ili raketnog motora, fluidika je velik skok u svom razvoju napravila baš na tom području tehnike. Dodatak se k tome još velika neosjetljivost fluidičkih elemenata prema kozmičkom zračenju i naglim promjenama okoline, njihova velika pouzdanost i male dimenzije, kao i nemogućnost ometanja njihova rada pomoću elektromagnetskih valova, postaje jasno zašto je fluidika pogodno rješenje za sisteme automatske regulacije i upravljanja na avionima, raketama, projektilima i svemirskim letjelicama.

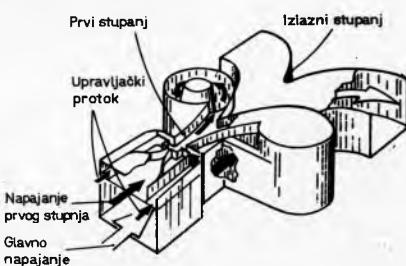
Sistem upravljanja porinim mlažom raketnog motora. Prikazan je na sl. 54. Upravljanje raketnim projektilom vrši se promjenama nagiba vektora ravnice u odnosu prema uzdužnoj osi projektila. Postoje različite metode takva upravljanja, ali za primjenu fluidike najpođudobnija je metoda sekundarnog uštrcvanja goriva. Tekuće ili plinovito gorivo uštrcava se u glavni mlaž raketnog motora na obodu proširenog dijela mlažnika. Dodatni plinovi koji se u tom slučaju pojavljuju u mlažniku prouzrokuju odvajanje grančnog sloja glavnog mlaža i stvaranje poprečne komponente porivnog vektora. Na slici prikazano je rješenje sistema upravljanja s vrtložnim pojačalima koji se u prvom upravljačkom stupnju koriste toplim, a u drugom, izlaznom stupnju, vrćim plinom iz raketnog motora. Bitne prednosti vrtložnih pojačala je njihova neosjetljivost prema promjenama temperature, koja kod rješenja sistema s klasičnim elementima prouzrokuje velike poteškoće. Sistem radi u diferencijalnoj sprezi, tj. kad nema potrebe za kormilarenjem, lijevi i desni ventili su u ravnotežnom položaju, ali je ova ravnoteža narušena čim nastaje potreba za ispravkom kursa. Upravljački signal se iz odgovarajućeg sistema za vođenje ili samonavodenje dovodi, električkim putem, pomoću elektromehaničkog pretvarača i ventila s dvostrukom mlažnicom i obojnom pločicom.



Sl. 54. Sistem upravljanja mlažom raketnog motora

Brodogradnja. Sve veća primjena potpuno automatiziranih brodova i izgradnja posebnih vrsta brodova kao što su podmornice, hidrokrilni brodovi, brodovi na zračnom jastuku (lebdjelice) itd., uvjetuje i sve veću primjenu fluidike u brodogradnji. Jednostavnost, pouzdanost i druge prednosti fluidike i ovdje dolaze sve više do izražaja. To posebno važi za rješenja sistema u kojima se osim upravljačkih funkcija fluidički elementi upotrebljavaju i za prijenos snage. To je npr. kormilarenje pomoću podvodnih krila ili bočnim potiskivanjem.

Primjer izvedbe dodatnog pramčanog kormilarskog uređaja za velike površinske brodove prikazan je na sl. 55. Naprava je u principu veliko dvostepeno

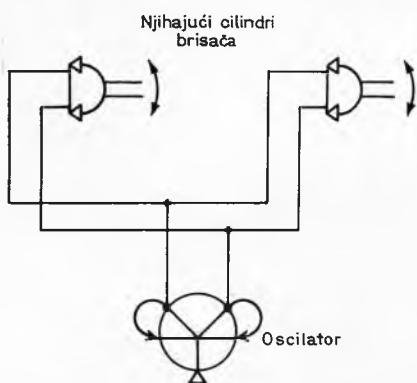


Sl. 55. Fluidička izvedba pramčanog brodskog kormila

analognog pojačalo ugrađeno na pramcu broda, kroz koje se jakim pumpama potiskuje voda u more okomito na lijevi, odnosno desni bok broda. U nulltom položaju protok se dijeli na dva jednakia simetrična mlaža ispod vodene linije. Servoupravljeni upravljački otvori omogućuju puni otokom kompletog mlaža

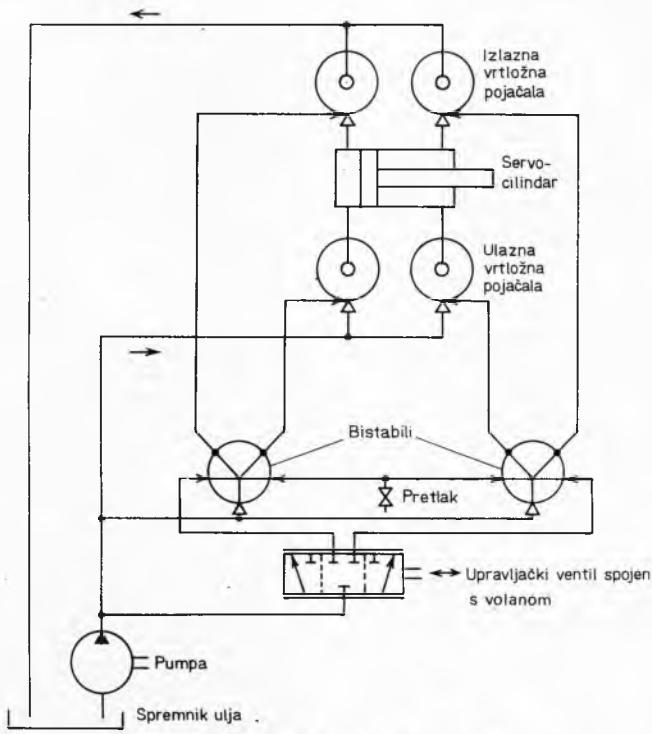
na jednu ili drugu stranu broda, te se na taj način može ostvariti dodatno kormilarenje brodom u vožnji i njegovo skretanje na jednu ili drugu stranu dok stoji ili manevrira.

Transportna sredstva i građevinski strojevi. Fluidički elementi i sistemi imaju velike potencijalne mogućnosti primjene u svim cestovnim, željezničkim i drugim specijalnim vozilima i građevinskim strojevima. Područja primjene su u sferi regulacije protoka fluida i u sferi upravljanja različitim funkcijama koje koristi fluidički pogon. Servo-upravljanje, servo-kočnice, automatizirano rasplinjavanje i regulacija motorâ, parnih i plinskih turbina samo su neka od područja primjene fluidike na vozilima. Ovdje fluidika, korištenjem stlačenog uzduha ili ulja pod tlakom, svojom jeftinocom, pouzdanošću i malim dimenzijama, ima velike prednosti u poređenju s klasičnim rješenjima, koja se uglavnom koriste mehaničkim ili elektromehaničkim komponentama za regulaciju i upravljanje u kombinaciji s hidrauličkim ili pneumatičkim pogonima. Primjena fluidike dolazi u obzir i za druge funkcije, kao što su: provjetravanje vozila i kondicioniranje uzduha, brisači stakla, regulacija brzine vožnje, upravljanje



Sl. 56. Fluidički pogon brisača stakla na vozilima prikazan simbolima

logičkim operacijama i programsko kretanje kod specijalnih strojeva, automatsko upravljanje kočenjem s osiguranjem protiv blokiranja kotača, automatsko nивелиranje građevinskih strojeva itd. Kao tipična za ovo područje tehnike prikazana su dva primjera.

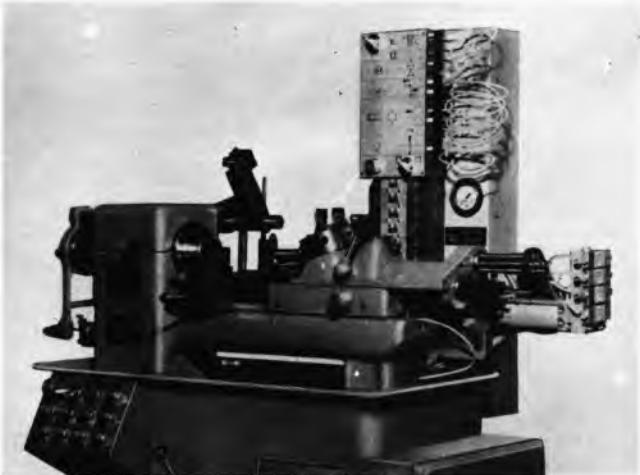


Sl. 57. Fluidički uređaj za upravljanje vozilima

Sistem za pogon brisača stakla sadrži impulsni oscilator koji svojim impulsima posredstvom njišućih cilindara zakreće brisače (sl. 56).

Upravljački dio sistema za servoupravljanje vozilima (sl. 57) sastoji se od četiri jednaka vrtložna pojačala (koja predstavljaju četiri promjenjiva otpora) dva bistabila i upravljačkog ventila koji je spojen s volanom. Jedan od upravljačkih kanala svakog bistabila spojen je na stalni pretlak, a drugi je spojen na upravljački ventil. Energijski za pokretanje klipa servocilindra daje pumpa koja tlači ulje preko ulaznih vrtložnih pojačala u servocilindar. Iz servocilindra ulje se vraća preko izlaznih vrtložnih pojačala u spremnik ulja. Četiri vrtložna pojačala predstavljaju dakle neke vrste mosta sa četiri otporske grane. Pri stacionarnom stanju otpori ulaznih pojačala jednaki su, a jednaki su i otpori izlaznih pojačala, pa stoga klip servocilindra miruje. Djeđovanjem na upravljački točak pomicće se ventil koji preko jednog od bistabila djeluje na jedno ulazno i izlazno pojačalo i time pomjereti ravnotežu u mostu, što izaziva pomicanje klipa. Čim klip zauzme naredeni položaj, mehaničkom se povratnom spregom čahura upravljačkog ventila opet doveđe u ravnotežni položaj i klip servocilindra stane.

Industrijska primjena. Primjena je fluidike zbog svojih performansi vrlo atraktivna i za primjenu u sistemima automatske regulacije, upravljanja i kontrolu procesâ. Neosjetljivost prema promjenama okoline i relativna jednostavnost održavanja pogoduju primjeni fluidike u sistemima za rukovanje i transport materijalom i na alatnim strojevima. Fluidika postaje posebno interesantna u sistemima jeftine automatizacije („male automatizacije“) za obavljanje najrazličitijih logičkih funkcija, gdje se obično ne traže velike brzine obrade signala ni velike točnosti i osjetljivosti. U kompleksnijim sistemima upravljanja alatnim strojevima, kao što su numeričko upravljanje, adaptivna regulacija i druge logičke operacije s velikom brzinom obrade podataka, prednost je očito na strani elektronike, pa će tu fluidika i dalje zadržati primjenu samo u sekundarnom i pomoćnom upravljanju. Kod upravljačkih uređaja kakvi se često nalaze u metaloperadivačkoj industriji i elektroindustriji, kad su nešto složeniji i kompleksniji, postoji već i ekonomsko opravданje uvođenja fluidike umjesto klasičnih pneumatskih elemenata. Zasad se u tu svrhu najšire primjenjuju fluidički elementi s pokretnim dijelovima.



Sl. 58. Tokarski stroj Krušik UDS 3 HP s upravljačkim sklopom izvedenim s pneumatskim logičkim elementima tvornice ISKRA-TIO

Na sl. 58 prikazan je automatizirani tokarski stroj tvornice Krušik UDS-3HP. Upravljački sklop izveden je s minijaturnim klipnim logičkim elementima, a izvršni dio uređaja sa standardnim hidropneumatskim radnim elementima tvornice ISKRA-TIO. I jedni i drugi rade s normalnim tlakom od 5 bar. Upravljanje strojem može biti poluautomatsko ili automatsko. Stroj se primjenjuje za obradu pojedinačnih izrada od štakastog materijala. Programiranje omogućuje izbor proizvoljnog redoslijeda i primjenu samo nekih ili svih raspoloživih operacija.

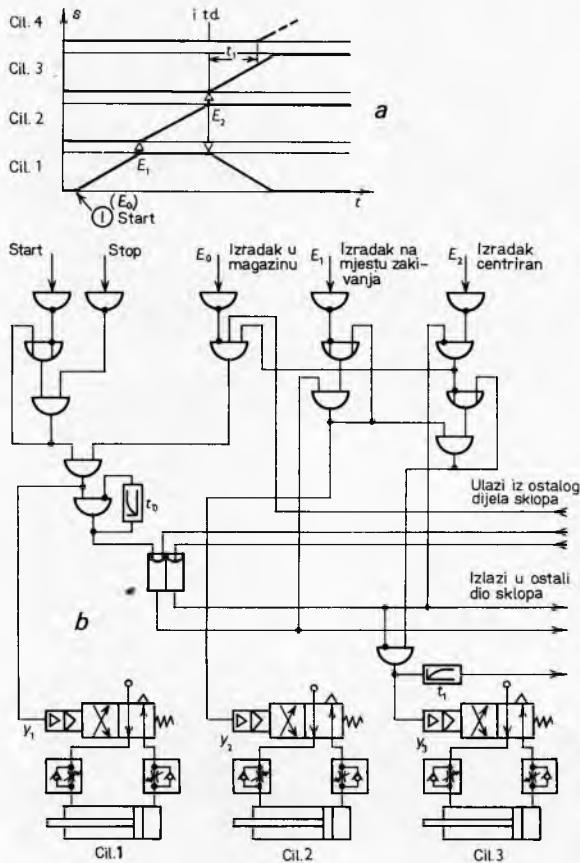
Na sl. 59 prikazan je primjer rješavanja jednog dijela upravljačkog sklopa specijalnog stroja kojim se žicom učvršćuje tzv. rastojni listić na kotvu okruglog releja, dijela telekomunikacijskog uređaja.

Na bazi dijagrama put-vrijeme (sl. 59a), kojim su definirana kretanja samo prvih triju cilindara upravljačkog sklopa i njihov slijed, nacrtana je — primjenjujući logičke simbole — logička shema prikazana na sl. 59b.

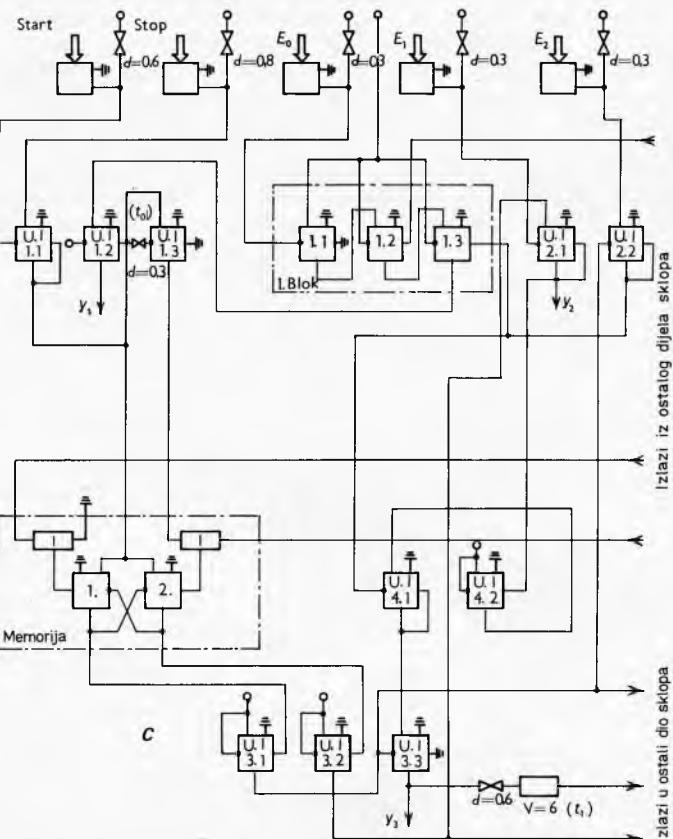
Cilindar 1 donosi izradak (kotvu) na radno mjesto i time aktivira kretanje cilindra 2, koji vrši centriranje izraka. Nakon izvršenog centriranja cilindar 2 daje signal za pokretanje cilindra 3, koji prihvata „rastojni listić“ i ujedno daje signal za vraćanje cilindra 1 u polazni položaj. Od tog trenutka počinje i teći vrijeme nakon čijeg isteka se daje signal za kretanje cilindra 4, koji donosi rastojni listić na radno mjesto, itd.

FLUIDIKA

Logička shema upravljanja ne prejudicira odluku o tome kakvim će se elementima realizirati upravljački sklop: ona je jednaka bilo da se primijene elektronički ili fluidički elementi. Sl. 59c prikazuje funkcionalnu shemu rješenja s fluidičkim elementima sistema DRELOBA.

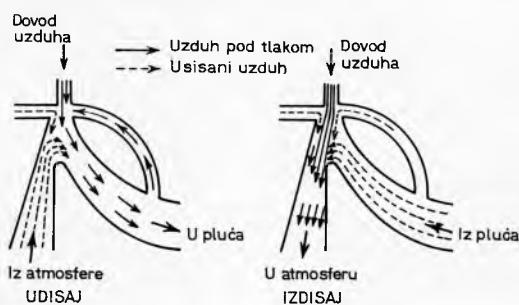


Na sl. 60 prikazana skica predstavlja osnovni princip djelovanja *aparata za umjetno disanje*. Zasnova se na asimetrično oblikovanom elementu s prijanjenim mlazima uz stijenkiju. Njemu se pod tlakom $\sim 20\text{--}30$ mbar stalno dovodi uzduh. Kod uključivanja se, zbog asimetrije kanala, uzduh najprije vodi u pluća. Pošto se u plućima formira dovoljno visok tlak, on preko kanala povratne veze prebacuje element u položaj izdisaja te tako počinje isisavanje uzuđa iz pluća.



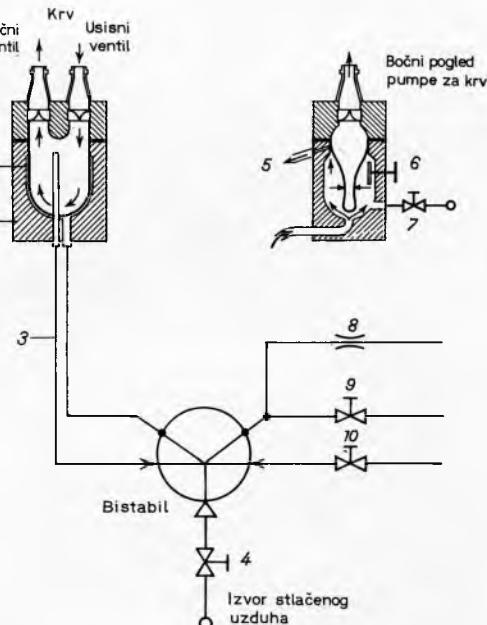
Sl. 59. Upravljanje strojem za učvršćenje rastojnog listića na kotvu okruglog releja. a) Dijagram put-vrijeme, b) logička shemę upravljanja strojem, c) shemę upravljanja realizirana sa logičkim elementima sistema DRELOBA

Medicina. Brz razvoj medicinske nauke doveo je do razvoja širokog spektra različite medicinske opreme i umjetnih organa. Fluidika je svojom velikom pouzdanosti, sigurnošću i relativnom jeftinicom veoma pogodna za rješavanje čitavog niza problemâ i na ovom području ljudskog tijela bazira na principima mehanike fluida predstavlja poseban izazov bioinženjerima za razvoj umjetnih organa uz primjenu elemenata i sistemâ fluidike. Fluidički sistemi sa strujnim elementima postaju posebno atraktivni i zato što se elementi mogu izradivati od materijala koji su potpuno kompatibilni sa živim organizmom, koji se jednostavnim i poznatim postupcima mogu sterilizirati i koji se kao radnim medijem mogu koristiti uzuđuhom i tekućinama koje organizam sam proizvodi, kao što su krv i urin.



Sl. 60. Aparat za umjetno disanje

Od niza različitih naprava i umjetnih organa koje primjenjuju fluidiku navode se dva: umjetna pluća i umjetno srce.



Sl. 61. Umjetno srce. 1 Komora, 2 kućište, 3 vod za signal deformacije mijeha, 4 ventil za podešavanje tlaka, 5 otvor za davanje signala deformacije mijeha, 6 regulator za podešavanje protoka pumpe, 7 ventil za podešavanje usisa, 8 fiksna prigušnica, 9 ventil za regulaciju pulsa i 10 ventil za podešavanje duljine trajanja pulsa

Kada tlak u plućima padne na neku donju graničnu vrijednost, uredaj se opet automatski prebacuje u položaj udisaja i ciklus se ponavlja.

Jedno od mogućih rješenja *umjetnog srca* predstavlja sistem prikazan na sl. 61. Puma, „umjetno srce“, djeluje na ovaj način: kada se otvor ventil za podešavanje tlaka (4), stlačeni uzduh teče u lijevi kanal specijalnog bistabila čiji su otvori za odzračivanje izvedeni tako da je osjetljiv prema promjeni protoka, a zatim u komoru pumpe (1) istiskujući krv iz miješa kroz izlazni (tlačni) ventil pumpe. Zbog toga dolazi do otvaranja otvora za upravljanje deformacijom miješa (5), te signal deformacije miješa djeluje kroz lijevi upravljački vod (3) bistabila, tako da se mlaz prebacuje u desni izlazni kanal. Usljed toga dolazi do odzračivanja lijevog upravljačkog kanala i komore pumpe. Tlak u komori pumpe se smanjuje i omogućava ponovno punjenje miješa krvilju kroz usisni ventil pumpe. Istovremeno se usisava uzduh i kroz desni upravljački vod, u kojem je ugrađena prigušnica za podešavanje trajanja pulsa. Kada se otvor za upravljanje otklopi, mješa ponovo zatvori, tlak u desnom upravljačkom kanalu poraste tako da se formira upravljački signal koji mlaz ponovo prebacuje u lijevi izlazni kanal, i time počinje novi ciklus. Praktična izvedba umjetnog srca prema ovoj shemi omogućuje podešavanje tlaka krvi od 0 do 650 mbar, protoka od 0,5 do 10 l/min i puls-a od 30 do 180 udaraca na minutu.

LIT.: V. Ferner, Anschauliche Regelungstechnik, Berlin 1960. — R. Hahn, Digitale Steuerungstechnik, Stuttgart 1961. — J. F. Blackburn, G. Reethof, S. L. Shearer, Fluid power control (njemačko izdanje), Mainz 1962. — H. Zoebel, Pneumatikafibel, Mainz 1964. — V. Weyh, Elemente der Schaltalgebra, München 1964. — Пневмо- и гидравтоматика (Сборник), Москва 1964. — F. E. Humphrey, H. D. Tarumoto (eds.), Fluidics, Boston (Mass.) 1965. — S. M. Kirshner, Fluid amplifiers, New York 1966. — Пневматика (Сборник), Москва 1966. — L. A. Zalmanzon, Components for pneumatic control systems, New York 1967. — D. Grosser, Arbeitsbuch der Drucklufttechnik, Mainz 1968. — K. Ziesling, Kombinationsbuch für pneumatische Steuerungen, Mainz 1968. — L. A. Залманзон, Теория элементов пневматики, Москва 1969. — K. Foster, G. A. Parker, Fluidics - Components and circuits, New York 1970. — V. Multrus, Fluidik, Pneumatische Logikelemente und Steuerungssysteme (prijevod s češkoga), Mainz 1970. — L. Helm, J. Marton, Pneumatikus logikai elemek, Budapest 1971 (njem. prijevod: Einführung in die Fluidik-Pneumatische logische Elemente und Systeme, München-Wien 1971). — Fluidomics Division of the Imperial-Eastman Corp., Fluidika - elementi, sistemi, projektiranje, Zagreb, 1975.

G. Nikolić A. Stušek

FLUIDIZACIJA, operacija kojom se sloj čvrstih čestica, kontaktom s plinom ili tekućinom dovodi u stanje slično tekućini koja vrije. Pri tome dolazi do međusobnog miješanja kako samih čestica čvrste tvari tako i tih čestica i sredstva za fluidizaciju (plina ili tekućine). Ovakvo ponašanje fluidiziranih slojeva čvrste tvari ispoljava neke karakteristike homogenih sistema, pa se fluidizirani sloj često naziva pseudohomogenim sistemom.

U procesnoj tehnici fluidizacija se upotrebljava kako kod dvofaznih sistema (sistema od jedne čvrste i jedne tekuće, odnosno jedne plinovite faze), tako i kod višefaznih sistema (npr. sistema od jedne čvrste, jedne tekuće i jedne plinovite faze, sistema od više čvrstih faza i jedne tekuće, odnosno jedne plinovite faze). Tako se fluidizacija danas primjenjuje npr. kao metoda miješanja prašaka dviju ili više čvrstih komponenata, gdje se drugim metodama miješanja narušava željena granulacija (veličina zrna) i nasipna težina materijala (težina materijala sadržanog u jedinici volumena); ona nalazi danas najširi primjenu u katalitičkim procesima (v. dalje); također je značajna njena primjena u sušenju sirkulirajućim (pastastim) materijala.

Kod fluidizacije višefaznih sistema pogotovo u području reaktorske tehnike, gdje se u fluidiziranom sloju istodobno javlja prijenos količine gibanja, energije i tvari na površinu čvrste tvari (čestice sloja) bilo uz heterogenu kemijsku reakciju (uz sudjelovanje više faza) bilo uz homogenu kemijsku reakciju (reakciju unutar jedne faze), opis sistema postaje veoma složen i specifičan. Zbog toga se razmatranje teoretskih osnova fluidizacije u ovom članku nužno ograničava na analizu osnovnih fizikalno-hidrodinamičkih karakteristika fluidiziranog sloja manje složenih sistema, kao što su dvofazni sistemi čvrsto-plinovito ili čvrsto-tekuće, bez odvijanja kemijske reakcije.

Početak primjene fluidizacije nije sa sigurnošću utvrđen. Prema zapisima G. Agricole (1494—1555) primjenjena je fluidizacija već u XVI st. za pročišćavanje ruda u prostorijnom toku tekućine. Bolja tehnička rješenja namijenjena sličnoj svrsi javljaju se u prošlom stoljeću. Prva ozbiljnija industrijska primjena fluidizacije javlja se 1910. godine, kada su W. A. Phillips i J. A. Buleel dobili patent za katalitički reaktor sa fluidiziranim slojem katalizatora, gdje je plinska faza (fluidizator) korištena ujedno i za recirkulaciju finopraškastog katalizatora.

Vjerojatno prvi ovakav uredaj komercijalnog značaja bio je Winklerov plinski generator, koji je razvila tvrtka BASF (Badische Anilin und Soda Fabrik) 1921. u Njemačkoj. Ovaj je uredaj upotrijebljen za proizvodnju generatorskog plina iz ugljene prašine i smjese zraka i vodenе pare u fluidiziranom sloju. Ti se sljedećih godina bili su konstruirani brojni aparati slične izvedbe, a korišteni su prvenstveno u Njemačkoj i Japanu, gdje je bila velika potražnja sировог plina za kemijske sinteze.

Prva veća primjena fluidizacije u USA javlja se 1940., a odnosi se na kontinuirani postupak katalitičkog krekinga naftnih para. Za vrijeme drugog svjetskog rata pojavila se velika potražnja visokoontropskih goriva, što je dovelo do razvoja novih katalitičkih procesa prerade nafti i pojedinih njenih frakcija. U tim postupcima fluidizacija je našla značajno mjesto. Uspješnost primjene fluidizacije u tim tehnološkim postupcima uvjetuje njen intenzivni razvoj u nizu industrijskih razvijenih zemalja (USA, Francuska, Engleska i dr.); pedesetih godina javljaju se veće grupe istraživača koji razvijaju nove tehnološke primjene bazirane na teoretskim studijama ove operacije.

Osnovne karakteristike fluidiziranog sloja

Fluidizirani sloj čvrstih čestica pojavljuje se u više vidova, što je uglavnom uvjetovano karakteristikama sistema čvrsto-fluid, geometrijom prostora u kojem se fluidizirani sloj nalazi, brzinom strujanja fluida kojim se sloj fluidizira (fluidizatora) kroz sloj i o tipu (vrsti) nosača sloja, tzv. razdjelne rešetke odnosno distributora, kroz koji se fluidizator raspodjeljuje u donjoj, gustoj zoni fluidiziranog sloja:

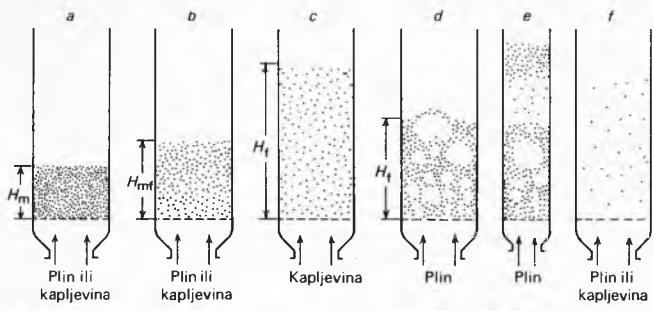
Nastajanje fluidiziranog sloja čestica čvrstog materijala pro-laskom struje fluidizatora kroz razdjelnu rešetku kojom je pre-graden donji dio kolone za fluidizaciju shematski je prikazano na sl. 1. Razdjelna rešetka ima ovde dvojaku funkciju: sprečava propadanje materijala u niže zone uredaja, te oblikom i brojem otvora ostvara željenu raspodjelu fluida, koji se u uredaj za fluidizaciju uvodi odozdo. Pri razmjerno malim brzinama strujanja fluidizatora (sl. 1 a), sloj čvrstih čestica mirno leži na razdjelnoj rešetki, pri čemu se ostvaruje njegovo najtešnje pakovanje. (Za razlikovanje od fluidiziranog sloja ovaj sloj naziva se mirujućim, a visina mu se označava s H_m .) Pri tome su karakteristike strujanja fluidizatora jednake kao kod strujanja fluida kroz potroznu sredinu (v. *Hidromehanika*).

Ovisnost pada tlaka Δp fluidizatora o brzini v_m njegovog strujanja kroz mirujući sloj izražena je pri malim brzinama linear-nom, a pri velikim brzinama paraboličnom funkcijom. Linearna ovisnost Δp o v_m karakteristična je za protočne sisteme u kojima prevladavaju sile viskoziteta, dok je paraboličan oblik te funkcije karakteristika protočnog sistema s vrtložnim, turbulentnim tokom fluida u kojem prevladavaju sile inercije.

Povećanjem brzine strujanja fluidizatora pad tlaka u sloju raste samo do neke granice, a onda, unatoč daljem povećavanju brzine, zadržava približno konstantnu vrijednost. Ovakav tok funkcije Δp , v posljedica je bitnih promjena koje se javljaju u do tada mirnom sloju čvrstih čestica. Naime, kad je brzina strujanja fluidizatora nešto manja od brzine kod koje nastupa karakteristična promjena ovisnosti Δp , v , pojavljuje se gibanje čestica čvrste tvari na gornjoj površini sloja, praćeno povećanjem visine sloja, odnosno njegovog volumena (poznato pod nazivom ekspanzija sloja).

Brzina strujanja fluidizatora kod koje dolazi do promjene toka funkcije Δp , v naziva se minimalnom brzinom fluidizacije (v_{mf}). Minimalnoj brzini fluidizacije odgovara i minimalna visina H_{mf} fluidiziranog sloja (sl. 1 b). Minimalna brzina fluidizacije predstavlja prvi granični uvjet za provedbu fluidizacije, pa se stoga naziva također donjom kritičnom brzinom fluidizacije i označuje simbolom v_{k1} .

Daljim povećanjem brzine strujanja fluidizatora dolazi do primjetne ekspanzije sloja (povećavanja visine H_f fluidiziranog sloja, sl. 1 c) praćene sve intenzivnijim kretanjem čestica sloja.



Sl. 1. Tipovi kontakta čvrste tvari i fluidizatora. a) Mirujući sloj, b) minimalna fluidizacija, c) partikularna fluidizacija; d, e) agregativna fluidizacija (pojavom mješura, odnosno mješura i čepova); f) fluidizacija u "rijetku" fazu s transportom čestica

Raspodjela čvrste tvari po visini sloja postaje sve ravnomjernija, a koncentracija čvrste tvari u sloju sve manja. U tom području brzina strujanja fluidizatora, koja se nalazi između v_{mf} pa do brzina koje su nekoliko puta veće od v_{mf} , odvija se tipična fluidizacija. Čestice čvrste tvari suspendirane su u uzlaznoj struci fluidizatora, što znači da se kod tih okolnosti sile trenja između čestica i fluidizatora izjednačavaju sa silom teže koja djeluje na svaku česticu