

# РАЧУНАРСКИ УПРАВЉАЧКИ СИСТЕМИ

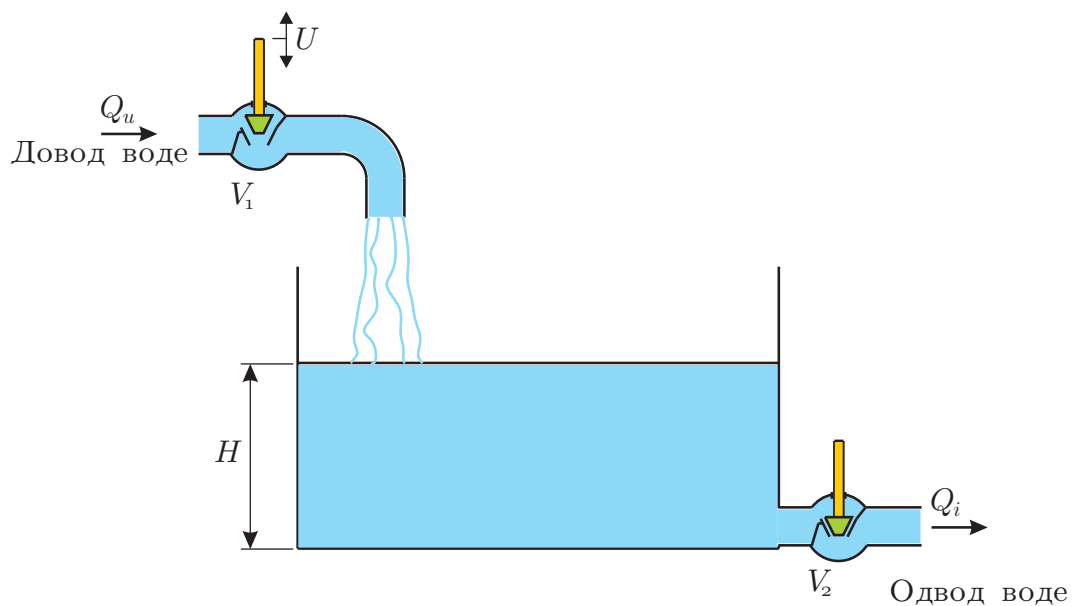
Зоран Б. Рибар

Октобер 28, 2013

# 1 Управљање техничких система

## 1.1 Ручно и аутоматско управљање

За правилан рад свих техничких система неопходно је да се њима управља. Шта је у ствари управљање? Свакоме је то јасно када се каже да возач управља аутомобилом или пилот управља авионом. Наравно да би се разумео рад управљачких система а самим тим и рачунарских управљачких система неопходно је да се на једном репрезентативном примеру објасни појам управљања. Јасан и једноставан пример је један проточни резервоар са водом.



Слика 1: Проточни резервоар као технички систем којим се управља.

Он се састоји из отвореног резервоара доводног вентила  $V_1$  и одводног вентила  $V_2$ . Претпоставимо да је успостављено стационарно стање па је улазни проток  $Q_u$  једнак излазном протоку  $Q_i$  при одређеној висини нивоа воде  $H$ . Сада може да се пише:

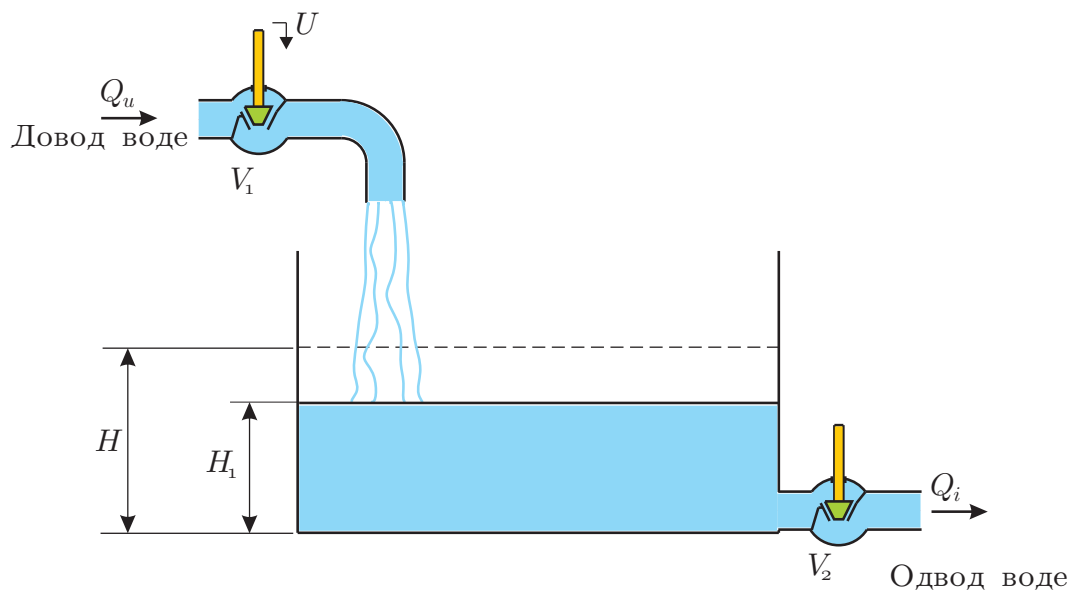
$$Q_u = Q_i$$

при,

$$H = const$$

Поставимо себи задатак да у резервоару подесимо нови ниво  $H_1$  који је нижи од нивоа  $H$ . Ово може да се постигне деловањем на вентил  $V_1$  тако што се он притвори за одређену вредност. Ново стање је представљено на слици 2.

Како се види ново стационарно стање је успостављено на новом нижем нивоу  $H_1$ . Ово је постигнуто притварањем вретена вентила  $V_1$ . Ово притварање вентила  $V_1$  називамо управљачком величином док је резервоар управ-



Слика 2: Проточни резервоар као технички систем којим се управља, ново стационарно стање

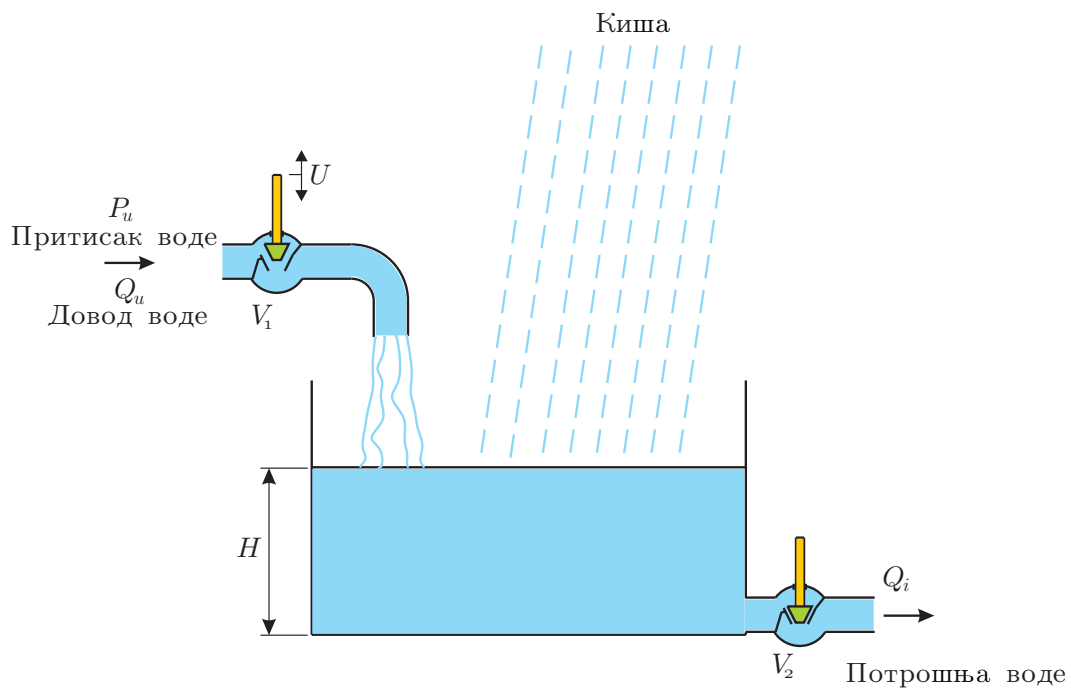
љани технички систем. Значи ако треба да се промени висина нивоа воде на неку унапред задату вредност то може да се постигне померањем вретена вентила  $V_1$  што се у начелу назива управљање (управљачка величина) а технички систем је управљан. Како се види у овоме случају се од техничког система не захтевају неке изузетне карактеристике. Међутим сам резервоар са водом нема тако једноставно понашање ако се узму у обзир мало реалнији услови рада. Поставља се следеће питање: ако имамо резервоар са слике 1 да ли ће то стационарно стање да остане за наредно довољно велико време? Наравно да то није случај. Оне величине које утичу да то тако не остане су дате на слици 3.

Прво ћемо да размотримо утицај промене притиска доводне воде на ниво воде  $H$ . Наиме овај притисак је означен са  $P_u$ . Он може да се мења у одређеним границама по случајном закону. Наиме ако притисак  $P_u$  порасте то повлачи да порасте улазни проток  $Q_u$  а самим тим и ниво  $H$ . Наравно ако притисак  $P_u$  опадне опашће и ниво  $H$ . Надаље ако је резервоар отворен појава кише може да утиче такође на повећање нивоа  $H$ . Коначно ако проток  $Q_i$  представља потрошњу воде од неког система који се снабдева водом из резервоара и он може да буде променљив. Наиме ако се проток  $Q_i$  повећа то ће за резултат имати смањење нивоа воде  $H$ . Како се види све ове величине имају тенденцију да промене висину нивоа воде  $H$  тј. тенденцију да поремете рад техничког система па се називају **поремећајне** величине. Све величине које су разматране напред се обележавају на посебан начин и то:

$P_u = Z_1$  -поремећајна величина промене улазног притиска

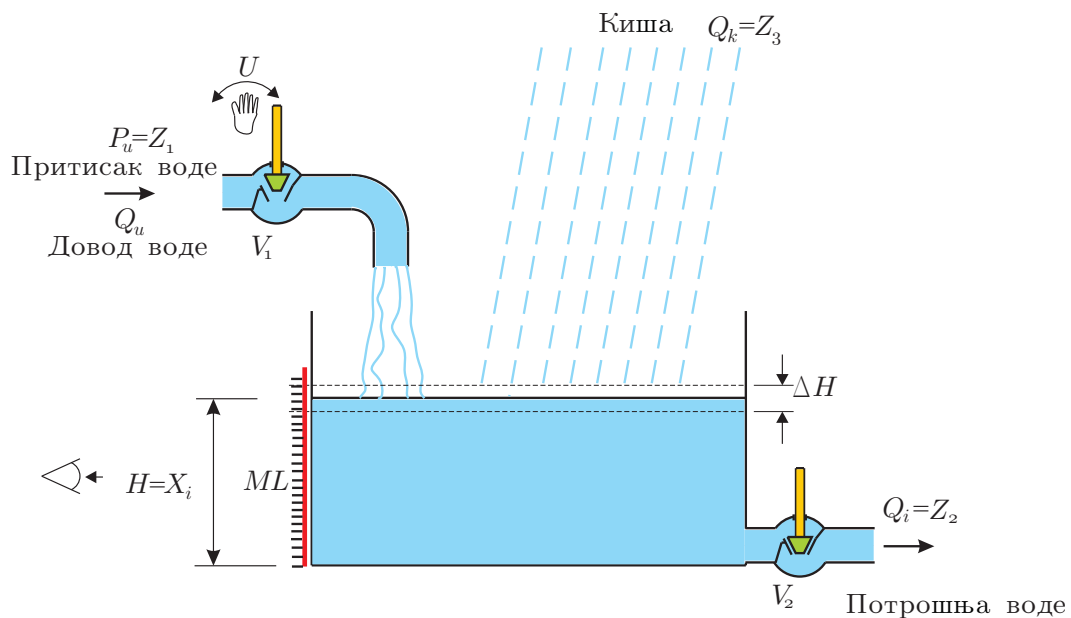
$Q_i = Z_2$ , поремећајна величина промене потрошње воде,

$Q_k = Z_3$ , поремећајна величина дотока воде услед кише.



Слика 3: Проточни резервоар као технички систем са поремећајима

Величина која нам је од интереса да се одржава на унапред задатој вредности се назива **излазна** величина  $X_i = H$ .



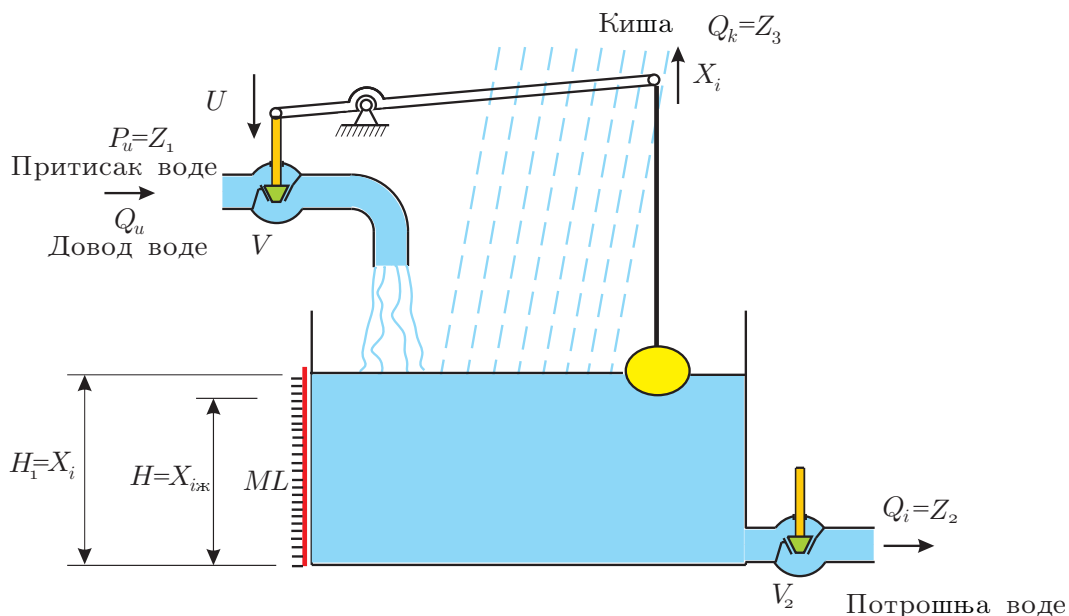
Слика 4: Проточни резервоар као технички систем са поремећајима и управљањем

Наравно пошто се поремећајне величине мењају по унапред непознатом закону тј. случајно а имају директног утицаја на висину нивоа то се поставља

питање како да одржавамо ниво у унапред задатим границама? Наравно то се чини померањем вретена вентила  $V_1$ . Померање вретена вентила и у овоме случају као и у првом случају се назива управљање или управљачка величина и обележава се са  $U$ . Променом управљања могу да се компензују дејства поремећајних величина. Резервоар са водом као технички систем има посебан назив у аутоматском управљању и назива се **објект**.

Наравно да се померања вентила  $V_1$  не дешавају сама од себе. Наиме претпоставимо да човек-оператер делује својом руком директно на вретено вентила  $V_1$  у зависности колика је висина нивоа  $H$  која може да се очитава на мерној летви  $ML$ . Тада се управљање назива **ручно управљање**. Јасно је да овакво управљање изискује сталну пажњу руковооца тј. човека што може да буде заморно. При томе услед замора могуће су и појаве грешки.

Да би се ово избегло биће дат пример истог резервоара где се управљање реализује без непосредног учешћа човека. Ово је један једноставан систем представљен ради лакшег разумевања.

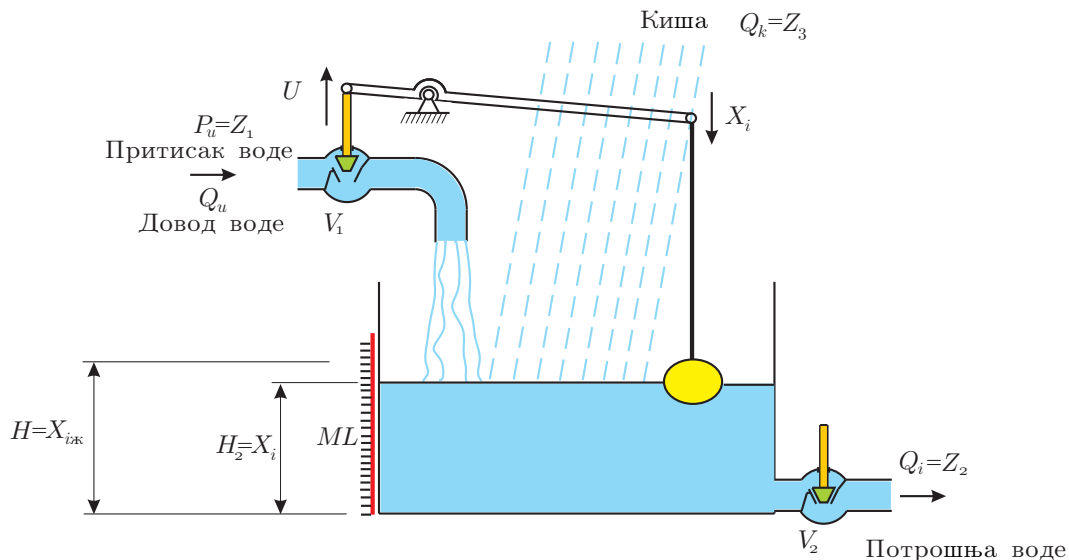


Слика 5: Проточни резервоар управљан уређајем без учешћа човека.

Претпоставимо да је стварни ниво порастао на вредност  $H_1 = X_i$  док је жељени ниво обележен са  $H = X_{iЖ}$ . Систем је тако конструисан да нема значаја зашто се променио стварни ниво да ли због пораста улазног притиска  $P_u = Z_1$  или због смањења потрошње воде  $Q_i = Z_2$  или због присуства кише  $Q_k = Z_3$ . Ниво воде се мери помоћу пловка (обележен жутом бојом). Пошто је ниво порастао и пловак се померио нависше. Како је пловак преко вертикалне полуге повезан са хоризонталном обртном полугом његово померање резултује притвртању вретена улазног вентила  $V_1$ . Ова акција смањује улазни проток воде  $Q_u$  што ће на крају да доведе ниво на унапред задату вредност. Наведена ситуација је представљена на слици 5.

Слична анализа може да се направи и када је стварни ниво  $H_2 = X_i$  нижи од жељеног унапред задатог нивоа  $H = X_{iЖ}$ . Ово је представљено на слици 6.

Сада пошто је стварни ниво нижи од жељеног пловак иде на доле па заокреће ротациону полуку у супротном смеру а она отвара вентил  $V_1$ . Отварањем вентила  $V_1$  повећава се и проток  $Q_u$  а самим тим ће се ниво вратити на жељену вредност. Јасно се види да овај систем ради без непосредног учешћа човека па се овакво управљање назива **аутоматским**.



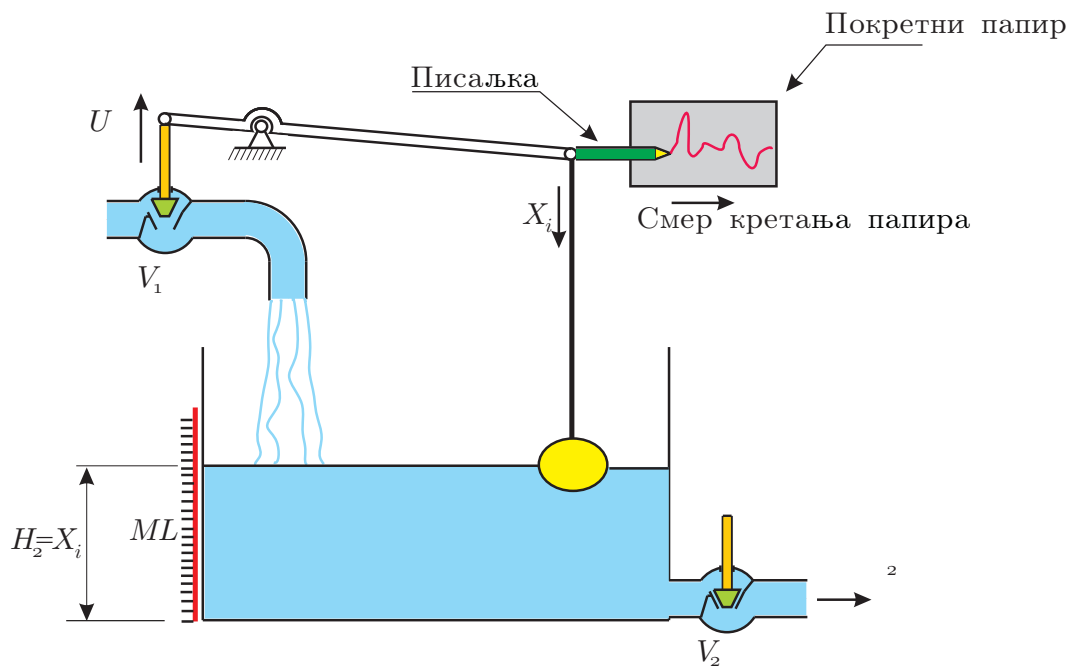
Слика 6: Проточни резервоар управљан уређајем без учешћа човека-стварни ниво нижи од жељеног.

У овоме случају пловак, вертикална полука и ротациона полука представљају **управљачки систем**.

## 1.2 Временски непрекидни и временски дискретни системи аналогни и дигитални системи

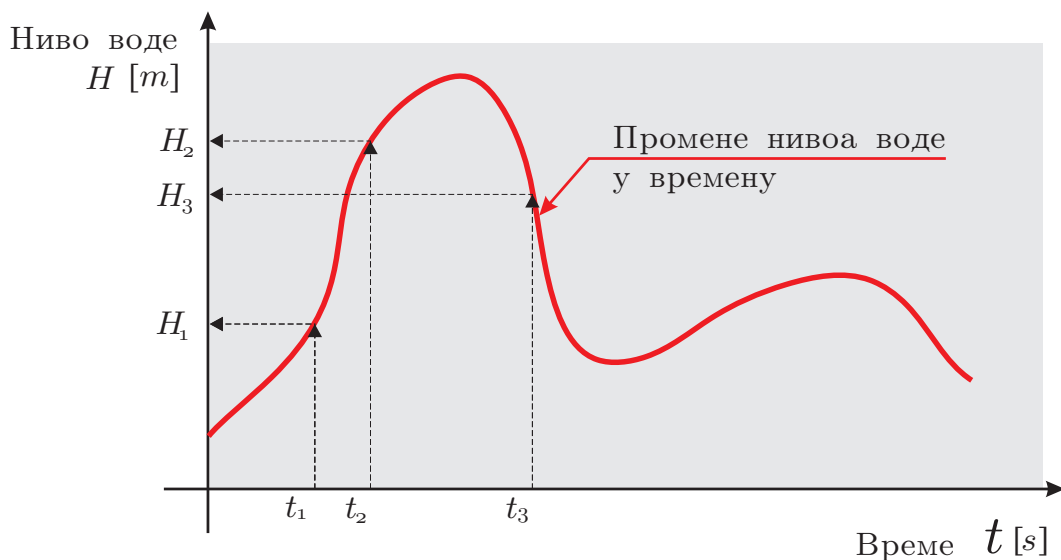
Претходни пример **система аутоматског управљања** нивоа воде у отвореном проточном резервоару може да буде од користи за објашњење рада временски континуалних система аутоматског управљања. На слици 7 је представљен једноставан начин како могу да се забележе промене нивоа воде у резервоару током времена.

За полуку која је спојена са пловком постављена је једна писаљка. Како пловак услед промене нивоа иде горе-доле тако се и писаљка помера горе-доле. Са друге стране писаљка је прислоњена на покретни папир. Он се креће једноликом брзином на десно. На тај начин на папиру остаје црвена крива линија која показује промене нивоа воде током времена. Овакав запис се назива и временски дијаграм нивоа воде у резервоару или временска промена излазне величине  $X_i$ . Она је корисна као запис за одређивање квалитета рада система аутоматског управљања о чему ће бити речи касније. Међутим нас ће сада интересовати график промене нивоа воде у резервоару из другог разлога. Да би јасно могле да се виде наведене промене онај папир је развијен и увеличан са обележеним осама што је представљено на слици 8. Види се да за сваки произвољни тренутак времена са апсцисне осе може да



Слика 7: Проточни резервоар и записивање промене нивоа воде.

се очита вредност нивоа воде на ординатној оси. На пример ако се уоче три произвољна тренутка времена  $t_1$ ,  $t_2$  и  $t_3$  за њих је могуће да се одреде припадајуће висине нивоа воде  $H_1$ ,  $H_2$  и  $H_3$ . Наравно да ово може да се понавља за било које тренутке са временске осе и припадајуће висине нивоа воде.



Слика 8: Промене нивоа воде у времену.

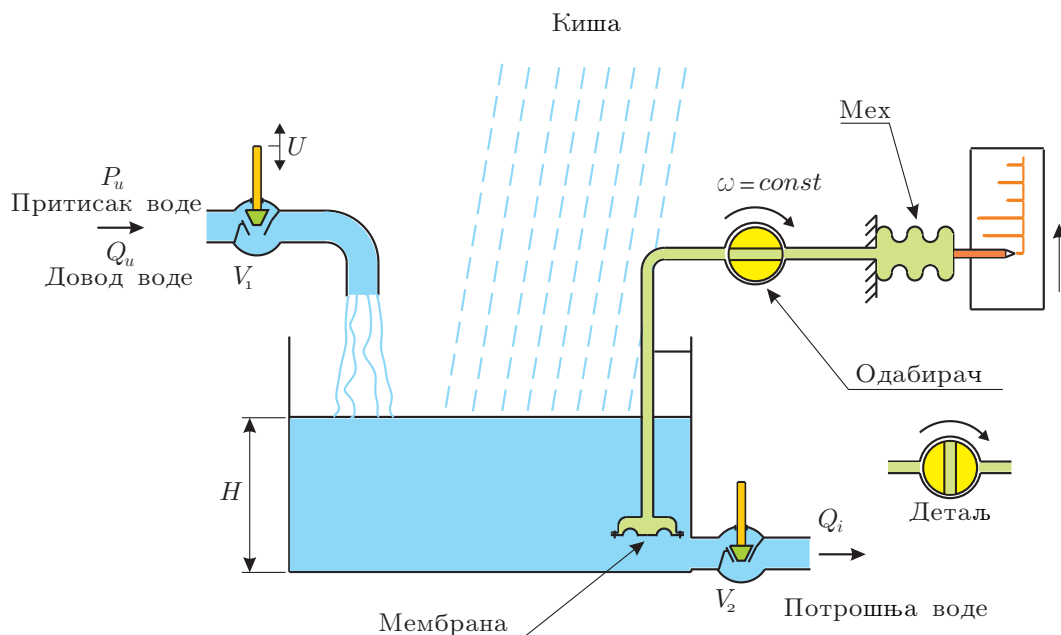
Свака физичка величина која се измери помоћу неког мерног уређаја се још назива и **сигнал**. У нашем случају то је сигнал о стварној вредности нивоа воде без обзира да ли се он мери помоћу летве или помоћу пловка.

За сигнал чија је временска промена представљена на слици 8 кажемо да је **временски непрекидан** сигнал. Технички системи као и системи аутоматског управљања који имају све временски непрекидне сигнале се називају **временски непрекидни системи**.

Још једна карактеристика сигнала са слике 8 нам је од интереса. Ако погледамо стварну промену висине нивоа воде на нашем проточном резервоару и црвену линију на графику онда можемо да кажемо да се забележене промене мењају **аналогно**. Значи карактер стварне промене висине нивоа је очуван на графику који репрезентује његову временску промену. Такви сигнали се називају **аналогни** сигнали. Системи који имају све аналогне сигнале називају се **аналогни системи**.

Коначно можемо да кажемо да је систем проточног резервоара један **временски непрекидан аналогни систем**.

Даља објашњења ћемо узети такође за проточни резервоар само што ћемо мерење нивоа воде мало да унапредимо.

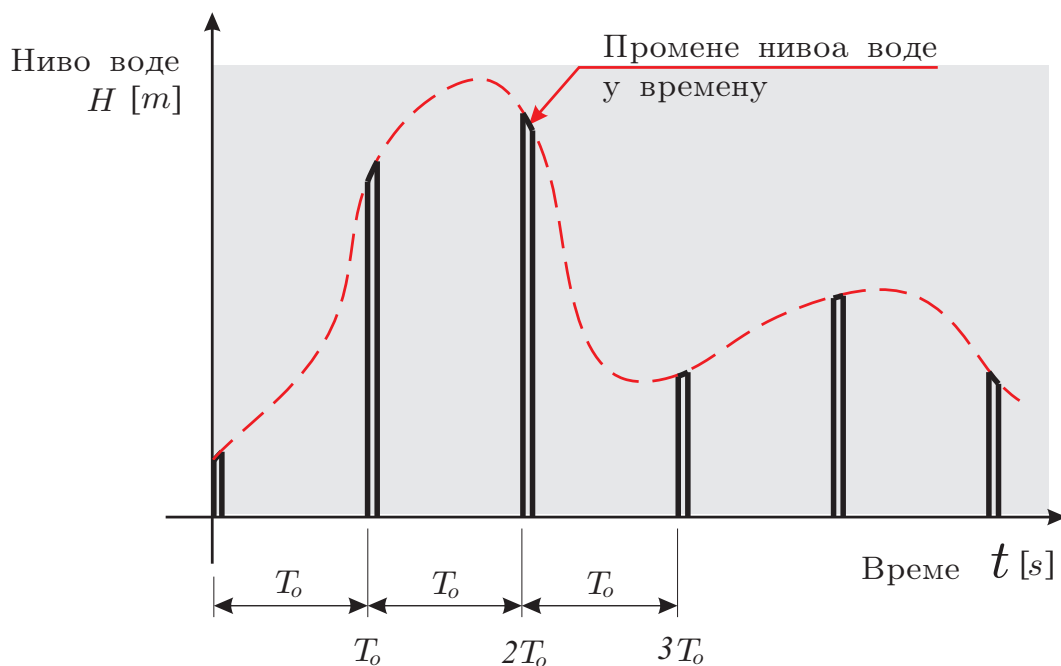


Слика 9: Пнеуматско мерење нивоа воде.

Строго механички управљачки системи су прилично нефлексибилни. Зато се уводе компоненте и управљачки системи који раде користећи гас под притиском. То су пнеуматски управљачки системи и припадајуће компоненте. На слици 9 је представљен један пнеуматски систем за мерење нивоа воде. Он се састоји из мембранског сензора, меха и уређаја за писање. Мембрански сензорски елемент је потопљен у воду па на мембрану која је са доње стране делује хидростатички притисак. Што је ниво воде виши то је и хидростатички притисак већи. Мембрански сензорски елемент је системом цеви повезан са мехом на другом крају. Цео овај склоп је напуњен гасом под притиском који је означен зеленом бојом. Када ниво воде порасте, порасте и хидростатички притисак. Он делује на мембрану и деформише је тако да њен центар иде навише. Самим тим и гас у систему повећава притисак. Овај повишени притисак



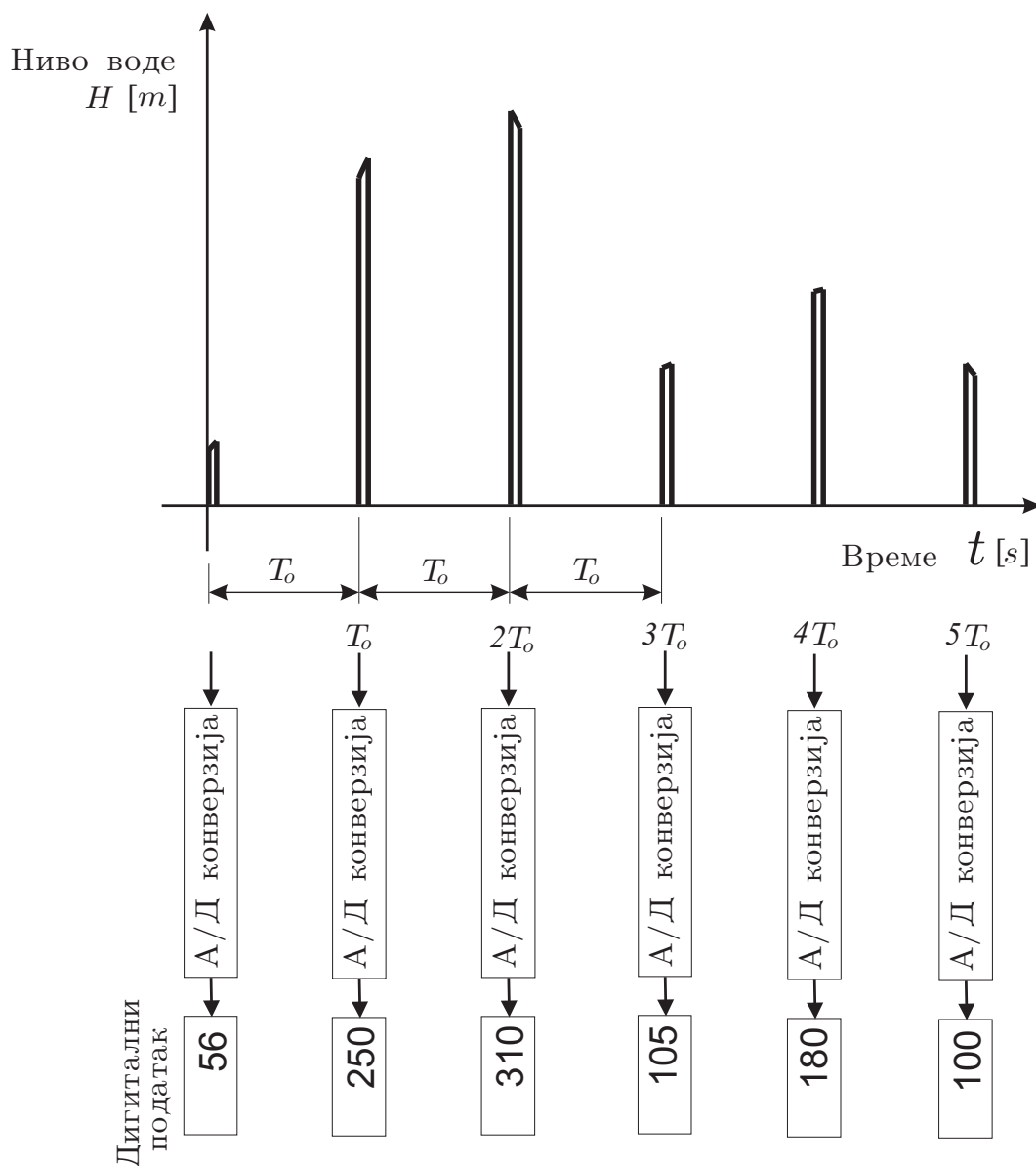
делује на мех који се истеже и помера писаљку у десно. На тај начин се на папиру добија крива зависности промене нивоа од времена иста као на слици 8. Међутим овде постоји још један елемент који је означен као одабирач. Жути кружни део у њему ротира константном угаоном брзином па се у једном моменту проводни канал нађе у хоризонталном положају (слика) а у следећем моменту се проводни канал нађе у вертикалном положају (види детаљ). Када је проводни канал у хоризонталном положају мембрански сензор и мех су повезани кратко. Међутим када је проводни канал постављен вертикално тада је веза између мембранског сензора и меха прекинута. Што значи да мех добија информацију о висини нивоа само у одређеним тренуцима. Како сада изгледа сигнал који исписује писач?



Слика 10: Промена нивоа воде-временски дискретни сигнал.

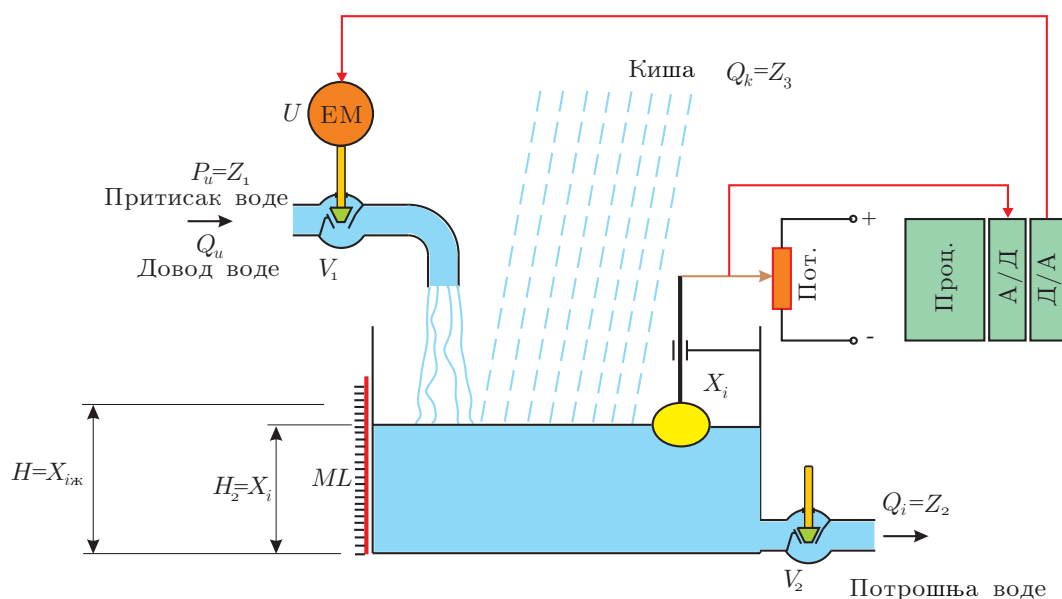
Јасно је да сигнал о стварној вредности нивоа може да се очита само у одређеним тренуцима времена и то  $T_0, 2T_0, 3T_0, \dots$ . Периода одабирања  $T_0 = \frac{2\pi}{\omega}$  зависи од угаоне брзине ротирања жутог диска. Пошто је  $\omega = const$  то је и  $T_0 = const$ . Значи да се очитавање висине нивоа врши у једнаким временским интервалима. Шта се дешава са сигналом између тренутака одабирања? За сада је вредност сигнала на тим местима једнака нули. Јасно је да овај сигнал носи мање информација о висини нивоа него временски континуални аналогни. Међутим касније ће бити објашњено које погодности имамо ако користимо временски дискретан сигнал. Међутим главна примена оваквих сигнала је везана за рачунарске системе аутоматског управљања. Познато је да рачунарске системи раде разлучујући само два стања и то стање логичке 1 (има сигнала) и стање логичке 0 (нема сигнала). Како онда рачунар може да добије информацију о стварној вредности нивоа?

Постоје посебни делови рачунара који врше претварање аналогних временски континуалних сигнала у дигиталне временски дискретне сигнале и они се



Слика 11: Дискретно дигитални сигнал нивоа воде у резервоару.

називају А/Д конвертери или претварачи. У нултом моменту се чита висина пулса (износи нпр 56  $cm$ ). Она долази до А/Д конвертера који ову вредност претвара у дигиталну вредност која се уписује у меморијску локацију као дигитални податак односно број 56. Затим до следећег читавања рачунар не узима податке. У првој периоди одабирања  $T_0$  чита се висина пулса (износи нпр. 250  $cm$ ). Сада ова вредност долази до А/Д конвертера који ову вредност претвара у дигиталну вредност која се уписује у меморијску локацију као дигитални податак односно број 250. Јасно је међутим да рачунар ради са електричним сигнаlima и у каснијем излагању ће бити речи о мерачима нивоа који имају електричне излазе. Сада је могуће направити и систем аутоматског управљања нивоа воде у отвореном проточном резервоару који користи рачунар.



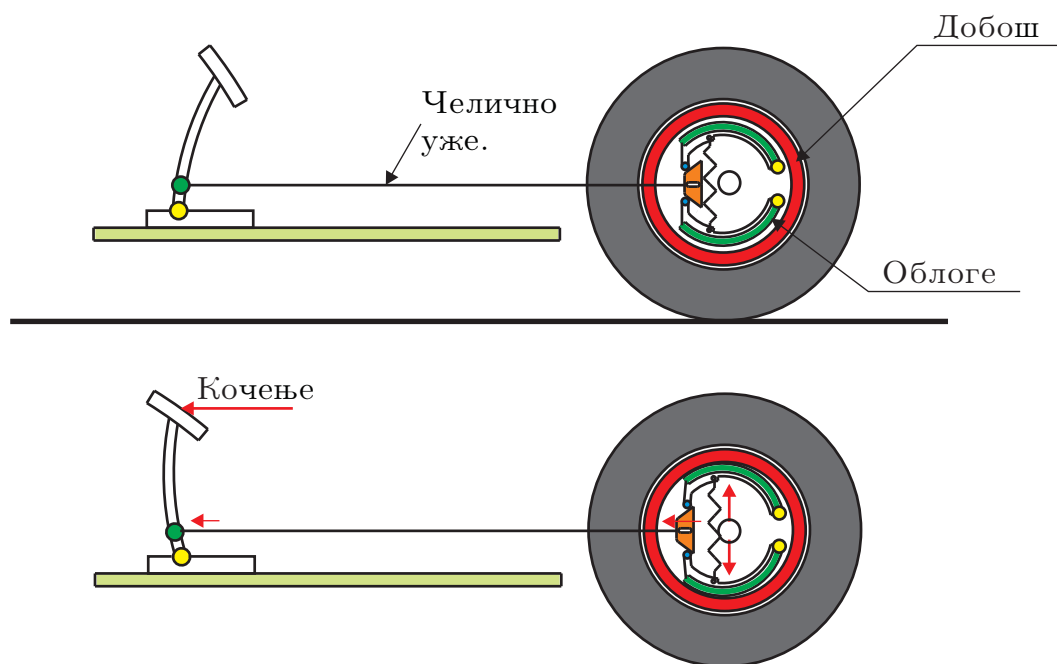
Слика 12: Рачунарски систем аутоматског управљања нивоа воде у проточном резервоару.

Мерење стварне вредности нивоа воде у отвореном резервоару се реализује помоћу пловка као у претходном примеру. Померање пловка се доводи до потенциометра (Пот.). Он промене померања клизача претвара у промену електричне величине (нпр. напона). Промене напона се воде до модула за А/Д конверзију где рачунар добија информацију као дискретно дигитални податак. На основу овога податка и уписане жељене вредности нивоа процесор (Проц.) израчунава вредност управљања као дискретно дигитални податак (бројчана вредност). Сада се тако добијени дискретно дигитални податак поново претвара у аналогни електрични напонски сигнал у Д/А конвертору. Овако добијени управљачки сигнал се води до електромоторног вентила  $V_1$ . Овај електромоторни вентил повећава или смањује проток воде и коригује висину нивоа воде. Наравно начин рада овако датог рачунарског система аутоматског управљања није очигледан као што је случај са механичким и пнеуматским.

## 2 Врсте управљачких система према начину реализације

Управљачки системи су се мењали током времена у зависности од развоја технологије. Први управљачки системи који су били направљени су били израђени од механичких компоненти. Ту спадају разне полуге, точкови, зупчаници, ужад итд. Да би могли лакше да пратимо развој управљачких система и њихову реализацију узећемо један једноставан пример који се односи на систем за кочење код аутомобила. На следећој слици ће бити дат један механички систем за кочење.

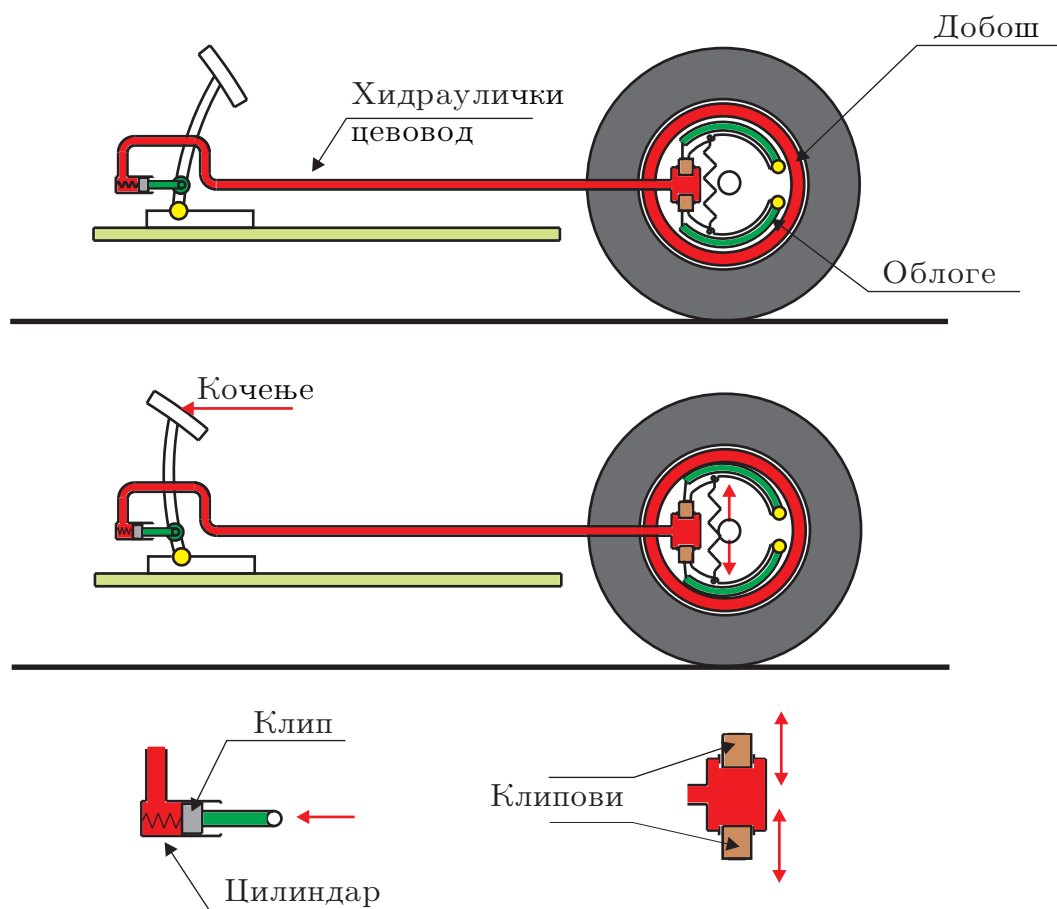
Кочиони добош је повезан са точком аутомобила и може да се окреће. Сви



Слика 13: Механички систем кочења код аутомобила.

остали делови на слици не ротирају са точком. Када хоћемо да закочимо аутомобил притискамо педалу кочнице. Пошто је за њу закачено челично уже и оно се покреће на лево. Сада погледајмо унутрашњост точка. Челично уже је повезано са закошеним делом који се такође помера на лево. Пошто он нема исту ширину на почетку ина крају то при свом померању на лево прибија облоге кочница ка добошу и тада аутомобил кочи. Како се види сви елементи управљачког система су механички елементи па га зато и зовемо **механички управљачки систем**. Недостатак овога система је тај да се синхронизује сила кочења тако да сва четири точка коче једнаком силом. Ово је тешко да се уради зато што се спојна челична ужад током времена неједнако истежу. Код механичких управљачких система све информације се преносе механичким елементима тако што се претварају у силу односно померање.

На слици 14 је представљен хидраулички систем за кочење код аутомобила. Он се састоји од главног цилиндра, са клипом и клипњачом која је повезана са педалом за кочење хидрауличког цевовода и двоструког кочног клипа са цилиндром који се налази у точку. Када се притисне педала за кочење клип сабија опругу која се налази у цилиндру и притиска уље које се налази у систему. Пошто се притисак у течностима преноси у свим правцима подједнако онда се мења притисак и у хидрауличком цевоводу па самим тим и у хидрауличном цилиндру који се налази у точку. Како расте притисак тако се клипови размичу горе и доле и прибијају облоге ка добошу. На тај начин се преноси сигнал од педале до кочионих облога и аутомобил кочи. Овај систем је далеко погоднији за рад зато што је сила кочења на свим точковима иста. Затим хидраулични цевовод не мора да иде правом линијом већ може да кривуда онако како је најпогодније на возилу. Међутим овде постоји и један

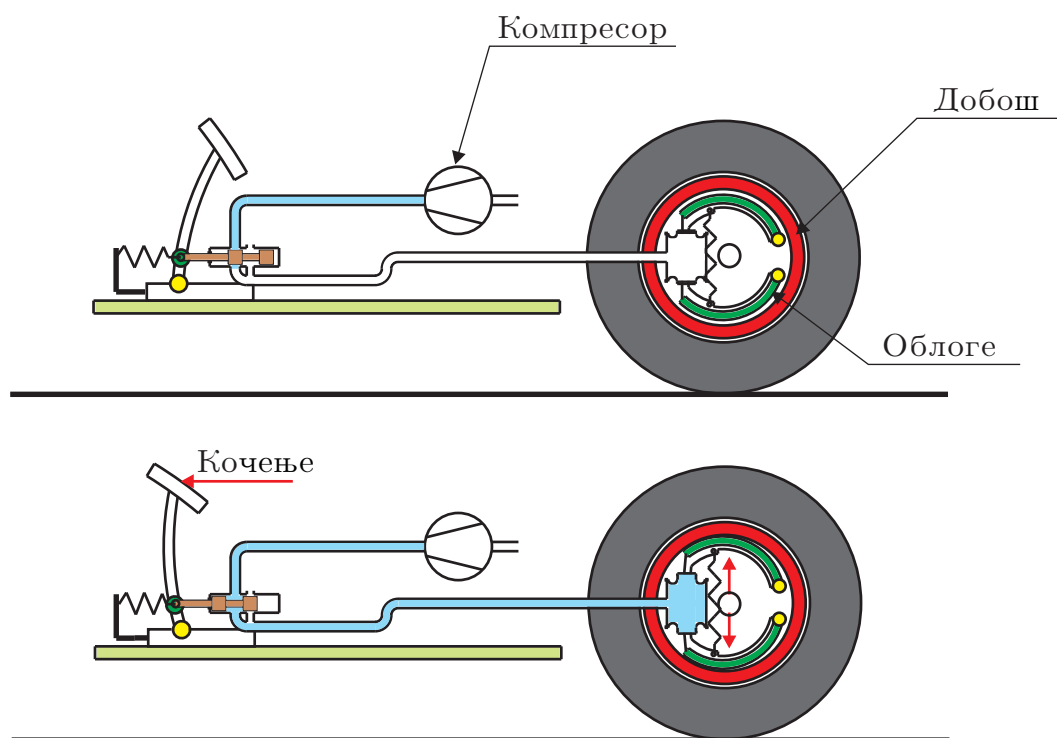


Слика 14: Хидраулички систем кочења код аутомобила.

проблем. Наиме ако уље из било кога разлога исцури из система (пуцање цеви) кочење је онемогућено. Сама конструкција хидрауличких компоненти је дата на увећаним сликама. Код овога система сигнали се преносе преко промене притиска и протока уља. Зато се ови системи називају хидраулички. Управљачки систем код кога су компоненте од којих је сачињен хидрауличке се назива **хидраулички управљачки систем**.

Следећи систем за кочење се примењује углавном на теретним возилима и аутобусима. Због упознавања са врстама управљачких система је као пример илустративан.

У овоме случају је неопходан извор енергије који ће да обезбеди рад система. Како се види са слике 15 на возилу постоји компресор ваздуха. Он снабдева ваздухом под притиском све потрошаче на возилу. Вредност притиска се креће од 5 до 7 bar. За педалу кочнице је повезан један пнеуматски разводник. Када педала није притиснута тада у цевоводу који води ка точковима влада атмосферски притисак. На точку се налази један мембрански пнеуматски мотор који може да притисне облоге ка добошу. Пошто је притисак у мотору атмосферски то опруга привлачи облоге ка средини и нема кочења (горња слика). Када се притисне педала кочнице пнеуматски разводник доводи ваздух под притиском до пнеуматског мембранског мотора који помера облоге ка добошу. Сада долази до кочења возила. Системи који користе ваздух

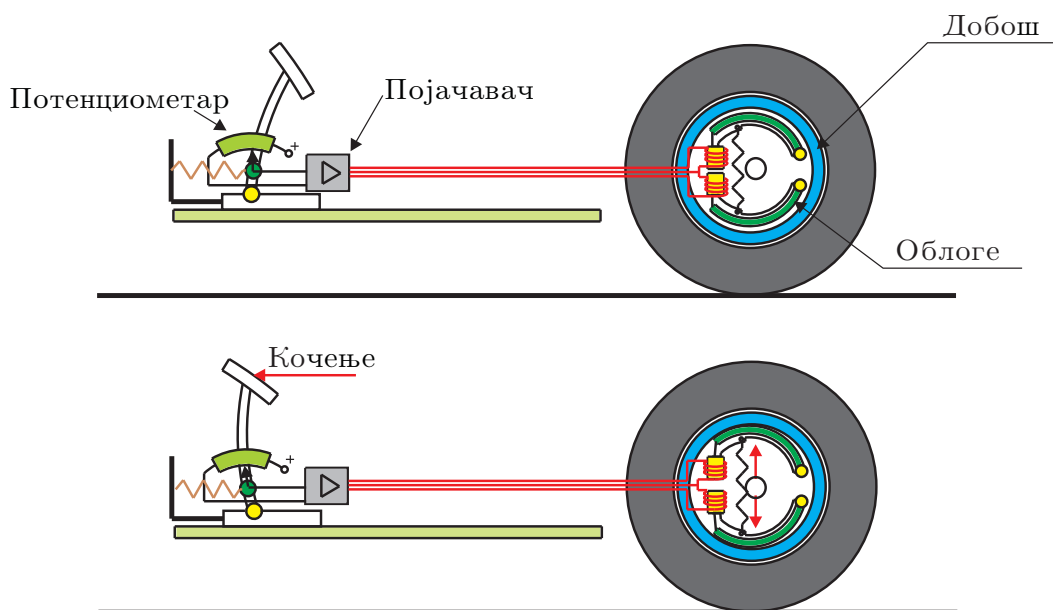


Слика 15: Пнеуматски систем кочења код возила.

под притиском да би пренели сигнал се називају **пнеуматски системи**. Ако је неки управљачки систем састављен од пнеуматских компоненти тада се он назива **пнеуматски управљачки систем**.

Као последњи систем ће бити показан један који још није нашао примену али који ће се сигурно ускоро појавити у широкој употреби. Он је представљен на слици 16.

Као извршни елемент који притиска облоге ка добошу је дат електромагнетни линеарни мотор. Он се састоји из два калема (црвено) и две котве (жуто) које се наслањају на облоге кочница. Калемови добијају струјни сигнал од електронског појачавача који је сиве боје. Померање педале за кочење се детектује помоћу електричног потенциометра (зелено). Што више притискамо педалу више се сабија опруга (браон) па се тако помера клизач по траси потенциометра. На овај начин се повећава електрични напон на улазу у појачавач. Као резултат тога он појачава струју у калемовима који се налазе на точку. Ово појачавање струје размиче котве које својим деловањем прибијају облоге ка добошу и возило кочи. Како је напред речено ови системи још нису нашли примену у масовној производњи због проблема поузданости. Наиме компоненте које се налазе у точку раде у врло тешким условима. Запрљаност је велика, када се вози по влажном путу вода прска по самим компонентама и коначно пошто се при процесу кочења расипа велика количина топлоте то поменуте компоненте раде и на високим и на ниским температурама. Међутим велика погодност је у томе да постоји извор енергије (свако возило има алтернатор) и што је цео систем флексибилан. Проводници који воде од појачавача до точкава могу да се воде по возилу најпогоднијим



Слика 16: Електрични систем кочења код возила.

путевима. Овај систем наравно садржи само неопходне компоненте да би се разумео његов рад. Код електричних компоненти сигнал се преноси помоћу електричне струје или напона. Системи који садрже електричне компоненте се називају **електрични системи**. Управљачки системи који садрже електричне компоненте су **електрични управљачки системи**.

Међутим у пракси су врло ретки случајеви употребе само једне врсте компоненти у системима управљања. Тако ако управљачки систем садржи хидрауличке и електричне компоненте он се назива **хидроелектрични** управљачки систем. Слично **пнеумоелектрични** управљачки системи садрже и електричне и пнеуматске компоненте. Наравно је да је могуће да управљачки системи имају и три и више врста компоненти али се тада не користи неки посебан назив за њих.

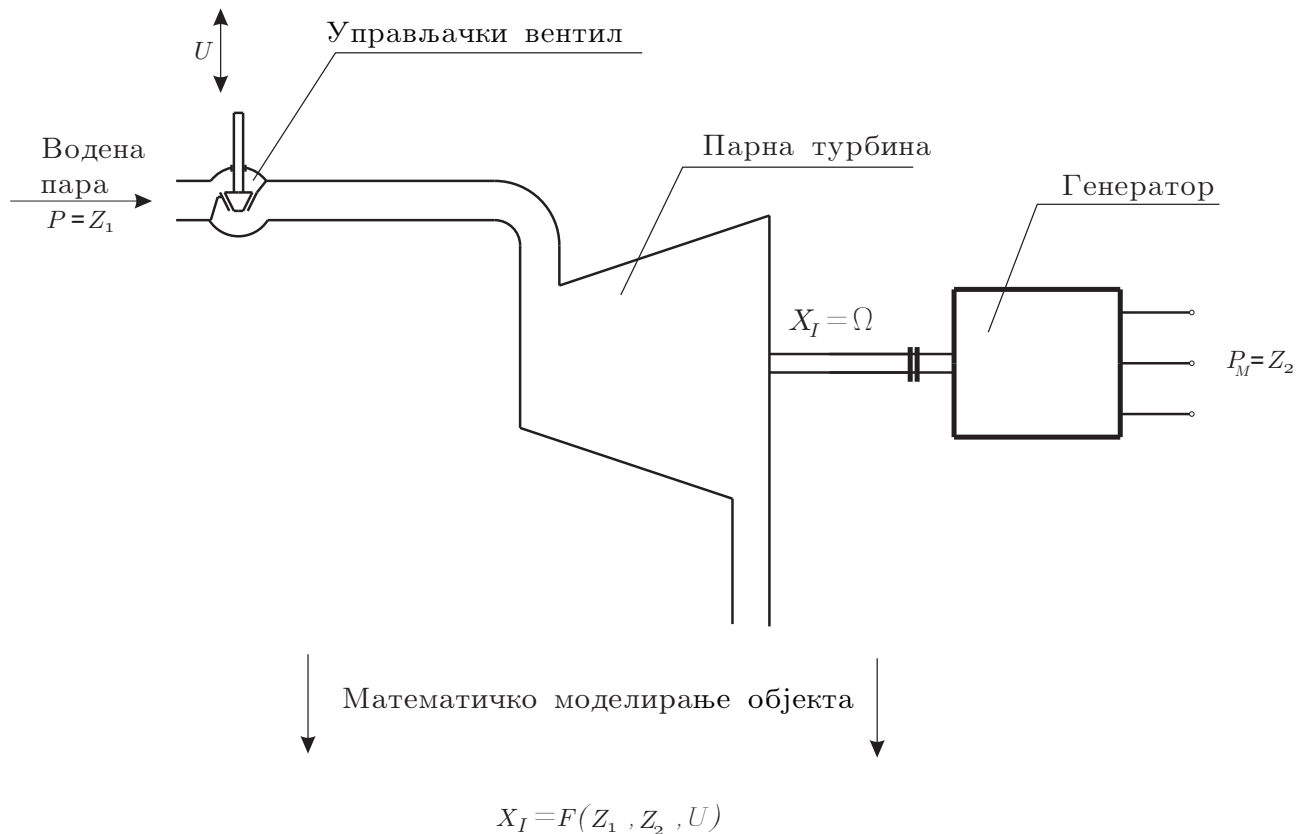
### 3 Дијаграм система, објект, управљачки систем

У овом предмету ће бити разматране могућности за реализацију управљачких система. Прво је неопходно да се размотре све фазе пројектовања система аутоматског управљања у целини. Цео поступак ће бити јаснији ако узмемо један пример са којим ћемо се моћи сусрести у пракси.

- 1. фаза: Дефинисање објекта аутоматског управљања.

На слици 1 је дата симболичко функционална шема парне турбине као објекта аутоматског управљања. Водена пара долази из котла и пролази кроз управљачки вентил. Притисак водене паре не мора да буде константан. Она затим иде ка парној турбини која се окреће и која је спојена са електричним генератором. Електрични генератор је повезан на електричну

мрежу. Оптерећење генератора дефинише потрошња струје у мрежи која је променљива.



Слика 17: Парна турбина као објект аутоматског управљања

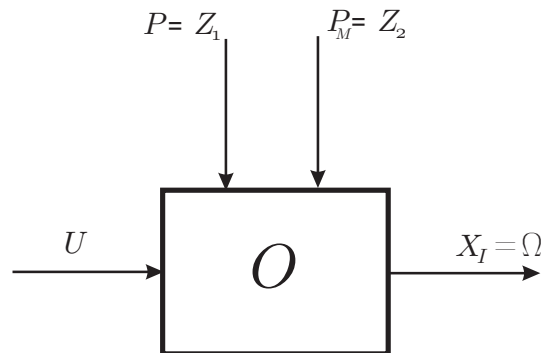
- 2. фаза: Одређивање пројектног задатка.

У овом случају пошто фреквенција у мрежи треба да буде константна и треба да износи  $50 \text{ Hz}$  то угаона брзина вратила турбине  $\Omega$  треба да буде константна. Међутим пошто је немогуће испунити да угаона брзина турбине у сваком моменту буде таква да је фреквенција струје  $50 \text{ Hz}$  то се дају неке границе у којима је прихватљиво да се крећ фреквенција. Нека то у овом случају буде  $\pm 0.25 \text{ Hz}$ . Постоје две величине које могу да утичу на угаону брзину турбине и то притисак паре  $P$  и оптерећење мреже  $U$ . Наиме пораст притиска паре повећава активни момент парне турбине те на тај начин убрзава турбину и обрнуто. Пошто се та величина мења мења на случајан начин и пошто те промене настају ван посматраног дела постројења то ће он за нас бити поремећајна величина коју обележавамо са  $Z_1$ . Друга величина је оптерећење мреже односно електрична снага  $P_M$  коју мрежа захтева. Ако се захтеви мреже повећају то неминовно доводи до повећања момента оптерећења и смањивања угаоне брзине. И ови захтеви настају ван посматраног дела система па ће се и ова величина сматрати за поремећајну величину и биће обележена са  $Z_2$ . Наравно да поремећајне величине не могу



да се мењају произвољно него треба да се дају опсежи за дозвољена одступања истих. На пример ако је номинална вредност притиска паре  $P = 175\text{bar}$  онда се дозвољава одступање од  $\pm 20\text{bar}$  а номинална вредност снаге  $P_M = 600\text{MW}$  са дозвољеним одступањем  $\pm 20\text{MW}$ .

Померањем управљачког вентила могу се компензовати сви поремећаји ако су у допустивим границама па ту величину сматрамо управљачком величином  $U$ . Сада је могуће направити дијаграм објекта како је то дато на слици 2.



Слика 18: Дијаграм парне турбине као објекта аутоматског управљања

- 3. фаза: Израда математичког модела објекта.

На основу знања стечених из механике, термодинамике и механике флуида прави се математички модел довољне тачности за каснији рад тако да га у овом случају представљамо једноставном општом једначином:

$$X_I = F(U, Z_1, Z_2)$$

Види се да је потребно наћи зависност између излазне величине  $X_I$  и управљачке  $U$  као и поремећајних величина  $Z_1$  и  $Z_2$ . Оваом фазом се бави део аутоматског управљања под називом Динамика објекта и процеса.

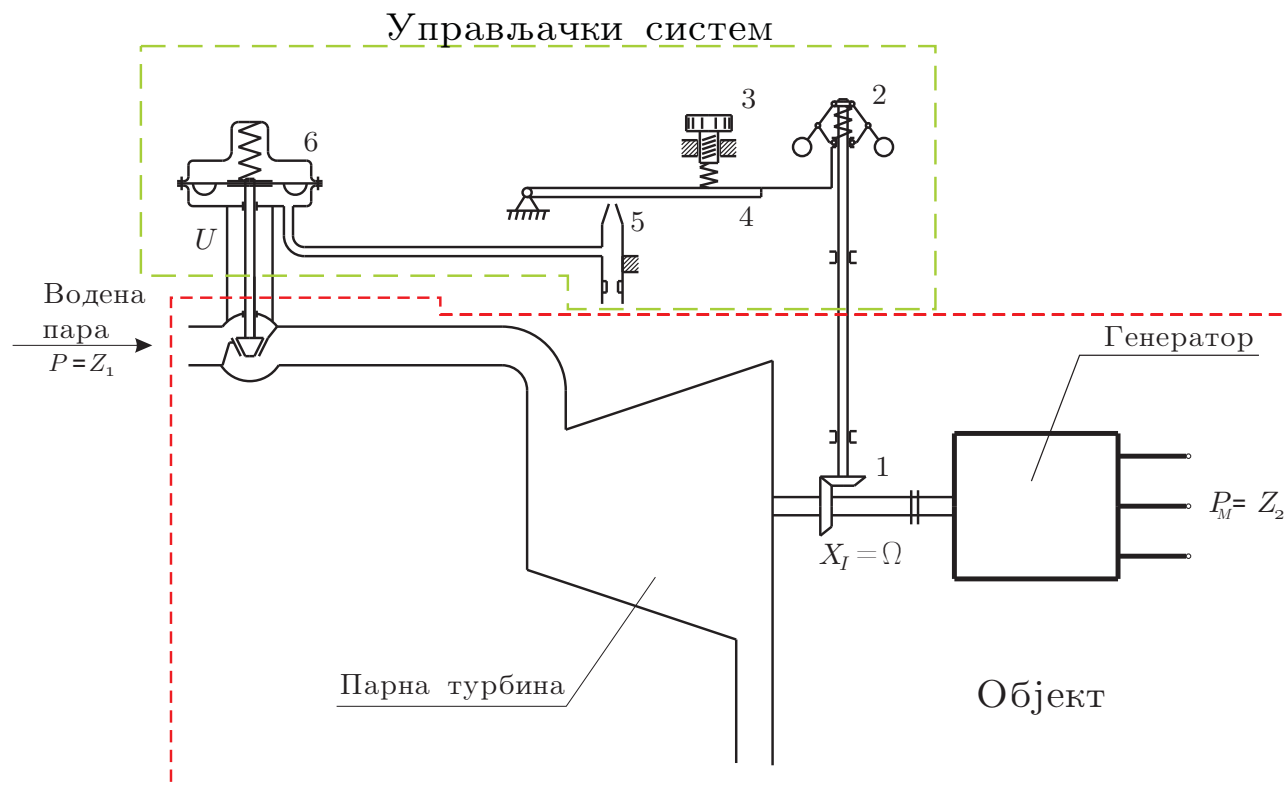
- 4. фаза: Израда закона управљања или управљачког алгорита.

На основу познавања математичког модела објекта, пројектног задатка и дефинисаних динамичких карактеристика система аутоматског управљања приступа се синтези управљања. као резултат добија се на пример једноставан закон управљања у форми:

$$U = G(X_I)$$

у случају да се усвоји концепт затвореног система са индиректном компензацијом поремећаја. Ова фаза се обрађује у делу аутоматског управљања под називом Синтеза управљачких система.

- 5. фаза: Избор компоненти и пројектовање управљачког система.



Слика 19: Функционална шема система аутоматског управљања угаоне брзине парне турбине.

На основу закона управљања добијеног у претходној фази врши се избор компоненти као начин њиховог повезивања тако да цео систем аутоматског управљања задовољава унапред задате карактеристике. Овај део ћемо обрадити у овом предмету тј. Управљачким системима.

- 6. фаза: Реализација система и пуштање у рад.

На основу претходних фаза бирају се физички све компоненте управљачког система, уграђују се а затим се цео систем пушта у рад.

## 4 Елементи управљачких компоненти

Како је већ речено подела управљачких компоненти се врши према радном медијуму, па се оне деле на:

- пнеуматске
- хидрауличке
- електричне

Пнеуматске компоненте за радни медијум имају најчешће ваздух под притиском. Пошто је ваздух стишљив флуид за моделирање компоненти се користе једначине из гасне динамике.

Хидрауличке компоненте за радни медијум имају најчешће уље под притиском. За њихово моделирање користе се једначине из механике флуида за динамику течности.

Електричне компоненте користе електричну струју за свој погон. за њихово моделирање користе се закони из електротехнике.

Свака од ових компоненти има своје предности и мане које ћемо упознати у овом курсу па ћемо моћи да извршимо правилан избор при пројектовању.

У циљу коришћења добрих особина сваке од њих реализују се и комбиноване компоненте па имамо:

- пнеумоелектричне или електропнеуматске ,
- хидроелектричне или електрохидрауличке и
- хидропнеуматске компоненте.

Као што им сам назив каже пнеумоелектричне компоненте су комбинација пнеуматских и електричних елемената док су хидроелектричне комбинација хидрауличних и електричних елемената. Хидропнеуматске компоненте су комбинација хидрауличних и пнеуматских компоненти.

Свака од управљачких компоненти је направљена од простијих делова који се називају елементи. У овоме курсу ћемо детаљно размотрити пнеуматске и хидрауличке елементе док се електрични детаљније обрађују у Електротехници па ће овде бити само поменути.

## 4.1 Пнеуматски елементи

Основна подела пнеуматских елемената је на:

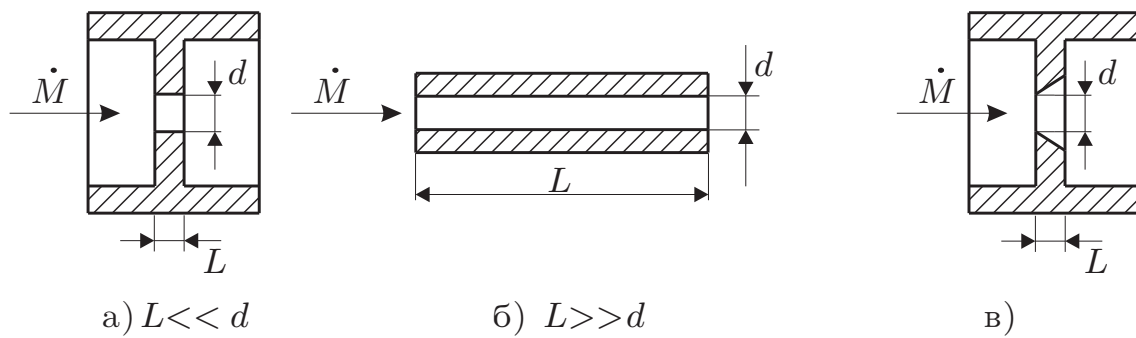
- пнеуматске отпоре и
- претвараче промене притиска гаса у силу.

### 4.1.1 Пнеуматски отпори

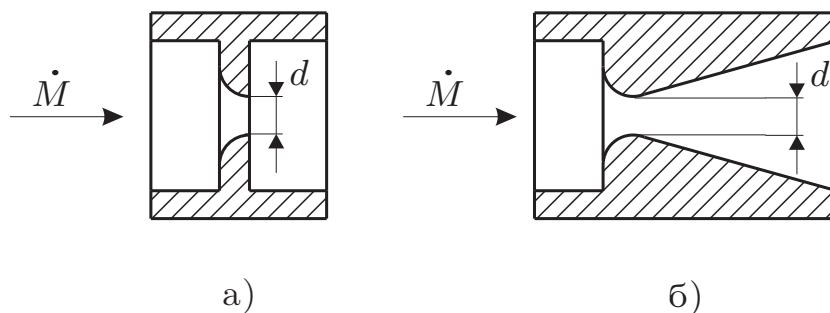
Пнеуматски отпори су елементи који служе за ограничавање протока гаса.

Неки од пнеуматских отпора представљени су на слици 4. Код отпора под а) и в) струјање се одвија у турбулентном режиму док се код отпора под б) струјање одвија у ламинарном режиму. Обично код отпора који имају  $L \ll d$  струјање се одвија у ламинарном режиму а код оних код којих је  $L \gg d$  струјање се одвија у ламинарном режиму.

Специјална врста турбулентних отпора је и млазница која је представљена на слици 5. Њене ивице су заобљеније па уноси мање поремећаја када се постави у струју ваздуха. На слици 5 б) је такође представљена и вентуријева млазница. Леви део је исти као и млазница осим што на десној страни има благо проширење које се назива дифузор. Вентуријева млазница има



Слика 20: Пнеуматски отпори



Слика 21: Млазница и вентуријева млазница

веома мали утицај на струју флуида па се користи у осетљивим мерним инструментима.

Сви ови пнеуматски отпори имају заједничко то да им је проточна површина константна и одређена величином пречника отпора  $d$ .

Постоји и група отпора који имају променљиву проточну површину и они су представљени на слици 6.

Ови пнеумацки отпори се називају и вентилима. Могу бити сферични (слика 6 а)) и типа млазнице са заслоном (слика 6 б)). Значи код ових отпора у току рада може да се мења проточна површина а самим тим и масени проток  $\dot{M}$  кроз њих.

#### 4.1.2 Масени проток кроз пнеуматске отпоре

Прорачун масеног протока кроз пнеуматске отпоре даје основну карактеристику истог. Сам прорачун користи једначине и основна знања из гасне динамике. Овде ће бити дата само коначна једначина са свим величинама које улазе у њен састав.

На слици 7 је дат један пролаз који карактерише величина проточне површине  $A_{12}$  и где је брзина струјања флуида  $U_{12}$ . Струјање у пролазу је турбулентно. Коришћењем метода из гасне динамике може да се добије израз за израчунавање масеног протока као:



ГАС	$\kappa$ [-]	$\mathcal{R}$ $\left[ \frac{J}{Kg \cdot K} \right]$	$K$ $\left[ \frac{\sqrt{K \cdot s}}{m} \right]$	$\left( \frac{P_2}{P_1} \right)_{kr}$ [-]
ВАЗДУХ	1,4	287	0,0404	0,5283
АЗОТ	1,4	297	0,0397	0,5283
ВОДНИК	1,4	4157	0,0106	0,5283
КИСЕОНИК	1,4	260	0,0424	0,5283
ХЕЛИЈУМ	1,66	2087	0,0159	0,4841
МЕТАН	1,3	520	0,0292	0,5458
АРГОН	1,66	208	0,0502	0,4841

Табела 1:

$$\left( \frac{P_2}{P_1} \right)_{kr} = \left( \frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}, \quad (2)$$

$$\dot{M}_{12kr} = \alpha A_{12} P_1 \sqrt{\frac{\kappa}{\mathcal{R} T_1} \left( \frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa + 1}{\kappa - 1}}}. \quad (3)$$

Познато је да се при критичном односу притисака флуид креће локалном брзином звука:

$$U_{2kr} = \sqrt{\kappa \mathcal{R} T_2}, \quad (4)$$

где је:  $T_2$ - струјна температура у пресеку  $A_{12}$  у [K].

Једначина (1) је нелинеарна и доста сложена за коришћење па се за инжежерске прорачуне користе таблице. У том смислу морају да се изврше неке измене у облику саме једначине. Зато се уводе следеће величине:

$$N_{12} = \frac{\dot{M}_{12}}{\dot{M}_{12kr}} = \sqrt{\frac{\left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa + 1}{\kappa}}}{\frac{\kappa - 1}{2} \left( \frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa + 1}{\kappa - 1}}}}, \quad (5)$$

$$K = \sqrt{\frac{\kappa}{\mathcal{R}} \left( \frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa + 1}{\kappa - 1}}}. \quad (6)$$

Корисне константе за разне врсте гасова могу да се нађу у слрдећој табели:

Користећи величине  $N_{12}$  и  $K$  једначина 1 се може довести на облик:

$$\dot{M}_{12} = \frac{\alpha K A_{12} P_1 N_{12}}{\sqrt{T_1}}. \quad (7)$$

Величина  $N_{12}$  зависи од врсте гаса и од односа притисака и дата је у табели (вежбе). Јасно је да је за однос  $(P_2/P_1)_{kr}$  вредност величине  $N_{12} = 1$ . Значи за струјања која се одвијају брзином звука и већом, једначина за израчунавање протока масе гаса добија облик:

$$\dot{M}_{12kr} = \frac{\alpha K A_{12} P_1}{\sqrt{T_1}}. \quad (8)$$

Величина  $K$  зависи од врсте гаса и дата је у табели 1.

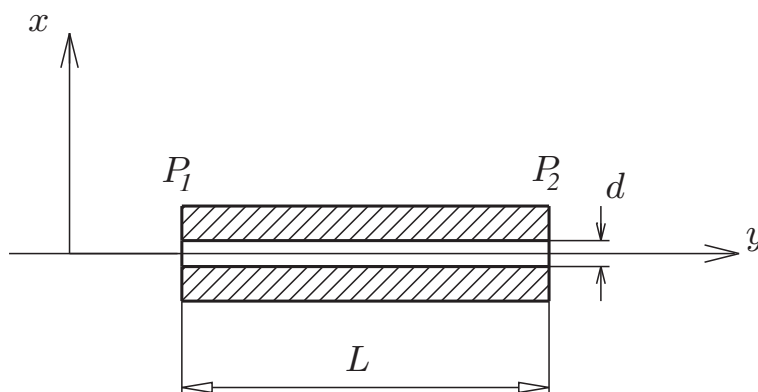
При прорачуну брзине струјања потребно је увести и Махов број. Он је по дефиницији дат са:

$$Ma_{12} = \sqrt{\frac{T_2}{T_1} \left( \frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa-1}}} \cdot C_{12}, \quad (9)$$

где је:  $C_{12} = (P_2/P_1)N_{12}$  коефицијент дат у табели (вежбе).

Наравно превазилажење потешкоћа око израчунавања појединих величина из ових релативно компликованих једначина је могуће и применом цифарских рачунара што у многеме може да олакша рад на пројектовању пнеумоелектричних управљачких система. Међутим коришћење табеле у великој мери је од помоћи када се врше прелиминарни прорачуни као и прорачуни једноставнијих компоненти.

Када се посматрају ламинарни отпори добијају се другачије једначине зато што феномени који доводе до ограничења протока нису исти. Ламинарни отпори се још називају капиларе. Она је представљена на слици 8.



Слика 24: Капилара.

За кружни попречни пресек једначина за израчунавање масеног протока изгледа:

$$\dot{M}_{12} = C_2 \cdot \frac{\mu_0 T_0}{\mu_1 T_1} \cdot \frac{(10d)^4}{L} (P_1^2 - P_2^2). \quad (10)$$

$$C_2 = \frac{\pi}{256 \cdot 10^4 \mathcal{R} \mu_0 T_0}$$

где су:

$\dot{M}_{12}$  - проток масе гаса -  $[kg/s]$

$T_0$  - стандардна температура (288 K) -  $[K]$

$T_1$  - локална температура -  $[K]$

$\mu_1$  - коефицијент динамичке вискозности -  $[Pa \cdot s]$

$\mu_0$  - коефицијент динамичке вискозности на стандардној температури -  $[Pa \cdot s]$

$P_1$  - притисак на улазу у капилару -  $[Pa]$

$P_2$  - притисак на излазу из капиларе -  $[Pa]$

$L$  - дужина капиларе -  $[m]$

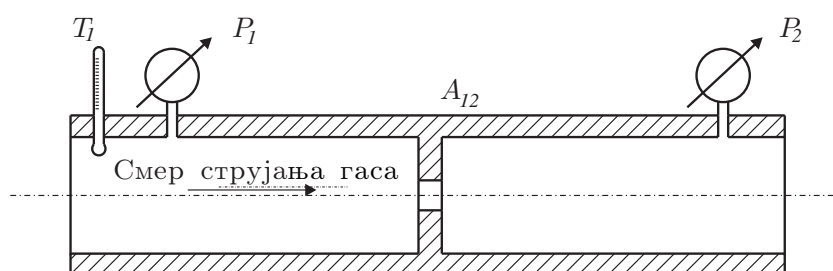
Пошто се коефицијент динамичке вискозности доста мења са температуром то ова зависност може да се представи као:

$$\frac{\mu_0 T_0}{\mu_1 T_1} = \left( \frac{T_1 + C_1}{T_0 + C_1} \right) \left( \frac{T_0}{T_1} \right)^{\frac{5}{2}}. \quad (11)$$

и лако се замењује у једначину (10). Константа  $C_1$  зависи од врсте гаса и биће дата на вежбама.

#### 4.1.3 Мерење величина које улазе у састав једначина протока

Сваки инжењерски прорачун је неопходно да може да се провери експериментално. Поставља се питање како може да се одреди проток на основу мерења величина које улазе у састав једначине за масени проток. Ако се стриктно држимо ознака из једначине (1) то неби било једноставно. Међутим уз одређена упрашћења то је практично изводљиво.



Слика 25: Мерење пада притиска на отпору.

Како се то види са слике 9 од опреме су потребна два манометра и евентуално један термометар. Наиме помоћу манометара се мере струјни притисци испред отпора  $P_1$  и иза отпора  $P_2$ . За тачније прорачуне треба да се мери и струјна температура испред отпора  $T_1$ .

#### 4.1.4 Линеаризоване једначине масеног протока

И једначина (7) за израчунавање масеног протока за отпоре који раде у турбулентном режиму и једначина (11) за израчунавање масеног протока у ламинарном режиму су нелинеарне. За обављање динамичких прорачуна је корисно имати њихове линеаризоване једначине. Линеаризација се обавља применом Тејлоровог реда око неке номиналне тачке. Наравно ове једначине су приближне и најбоље апроксимирају оне нелинеарне у близини номиналне тачке.

После линеаризације једначина (7) изгледа:

$$\frac{\dot{m}_{12}}{\dot{M}_{12N}} = (1 + K_{12}) \frac{p_1}{P_{1N}} - K_{12} \frac{p_2}{P_{2N}} + \frac{a_{12}}{A_{12N}} - \frac{1}{2} \frac{t_1}{T_{1N}}. \quad (12)$$

Одступања свих величина се могу дефинисати као:  $\dot{m}_{12} = \dot{M}_{12} - \dot{M}_{12N}$ ,  $a_{12} = A_{12} - A_{12N}$ ,  $p_1 = P_1 - P_{1N}$ ,  $p_2 = P_2 - P_{2N}$  и  $t_1 = T_1 - T_{1N}$ , где су:



$\dot{M}_{12N}$  - номинални проток масе гаса кроз отпор -  $[\frac{kg}{s}]$   
 $A_{12N}$  - номинална геометријска површина отпора -  $[m^2]$   
 $P_{1N}$  - номинални притисак испред отпора -  $[Pa]$   
 $P_{2N}$  - номинални притисак иза отпора -  $[Pa]$   
 $T_{1N}$  - номинална температура флуида -  $[K]$   
 $\dot{M}_{12}$  - одступање протока масе гаса кроз отпор -  $[\frac{kg}{s}]$   
 $a_{12}$  - одступање геометријске површине отпора -  $[m^2]$   
 $p_1$  - одступање притиска испред отпора -  $[Pa]$   
 $p_2$  - одступање притиска иза отпора -  $[Pa]$   
 $t_1$  - одступање температуре флуида -  $[K]$

После линеаризације једначина (11) изгледа:

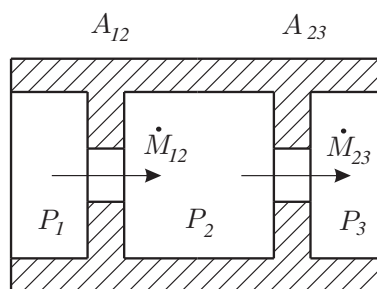
$$\dot{m}_{12} \approx 2J_{12}P_{1N} \frac{T_{1N} + C_1}{T_{1N}^{\frac{5}{2}}} p_1 - 2J_{12}P_{2N} \frac{T_{1N} + C_1}{T_{1N}^{\frac{5}{2}}} p_2 - \left( \frac{3}{2} + \frac{1}{1 + \frac{T_{1N}}{C_1}} \right) \frac{\dot{M}_{12N}}{T_{1N}} t_1. \quad (13)$$

где је константа:

$$J_{12} = \frac{(10d)^4}{L} \frac{T_0^{\frac{5}{2}}}{T_0 + C_1} C_2. \quad (14)$$

#### 4.1.5 Редна веза пнеуматских отпора

Редна веза пнеуматских отпора је најчешће примењивана веза у пнеуматским копонентама. На слици 10 је представљена та веза са свим величинама потребним за прорачун.



Слика 26: Редна веза два отпора.

Пошто се посматра понашање везе отпора у стационарном стању тада су протоци масе  $\dot{M}_{12}$  и  $\dot{M}_{23}$  једнаки тојест:

$$\dot{M}_{12} = \dot{M}_{23}. \quad (15)$$

1.Претпоставка: Струјање гаса кроз оба отпора одвија се у турбулентном режиму. Узимајући у обзир 1.Претпоставку а с обзиром на једначину 8 следи:

$$\frac{\alpha_1 K P_1 A_{12} N_{12}}{\sqrt{T_1}} = \frac{\alpha_2 K P_2 A_{23} N_{23}}{\sqrt{T_2}}. \quad (16)$$

2.Претпоставка: Температуре  $T_1$  и  $T_2$  су приближно једнаке тј  $T_1 \approx T_2$ . Узимајући у обзир 2.Претпоставку једначина 16 може да се упрости:

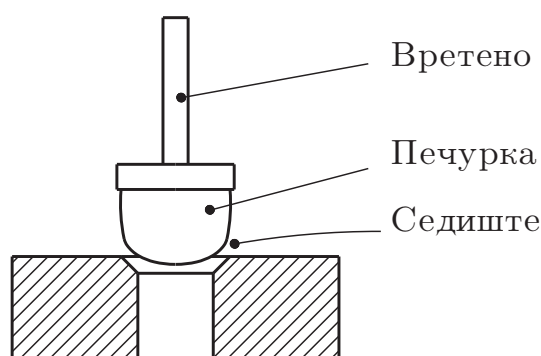
$$\frac{P_1}{P_2} N_{12} = C_{12} = \frac{\alpha_2 A_{23}}{\alpha_1 A_{12}} N_{23}. \quad (17)$$

Јасно је да је једначина (17) нелинеарна па њено решење у затвореној форми није увек могуће. Решавање ове једначине ће бити обрађено на вежбама.

#### 4.1.6 Променљиви пнеуматски отпори - вентили

Вентили су пнеуматски отпори код којих је могуће мењати проточну површину у току рада система. Постоји велики број различитих конструкција вентила а овде ће бити поменути само они који се највише примењују. Код вентила је могуће разликовати следеће основне елементе, слика 11:

1. вретено,
2. печурку и
3. седиште.



Слика 27: Вентил.

Почеће се са анализом геометријски правилних печурки вентила па ће се ићи ка компликованијим облицима.

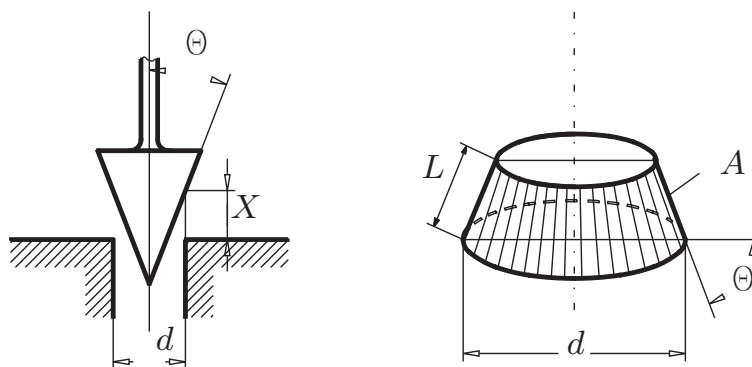
Конични вентил је такав вентил који има печурку у облику конуса слика 12. Угао конуса је означен са  $2\theta$ , ход печурке је означен са  $X$  а пречник седишта је означен са  $d$ .

Потребно је одредити закон промене проточне површине  $A$  од промене померања вретена вентила  $X$ . Геометријски проточна површина је омотач зарубљене купе како је представљено на слици 28. На основу геометријских релација једноставно се добија закон промене проточне површине:

$$A = \pi X \sin(\theta)(d - X \sin(\theta) \cos(\theta)), \quad (18)$$

где су:

- $A$  - проточна површина -  $[m^2]$
- $X$  - ход печурке вентила -  $[m]$
- $d$  - пречник седишта вентила -  $[m]$
- $\theta$  - половина угла конуса -  $[-]$



Слика 28: Конични вентил.

Линеаризована једначина промене проточне површине изгледа:

$$a = \left. \frac{\partial A}{\partial X} \right|_N x, \quad (19)$$

где су:

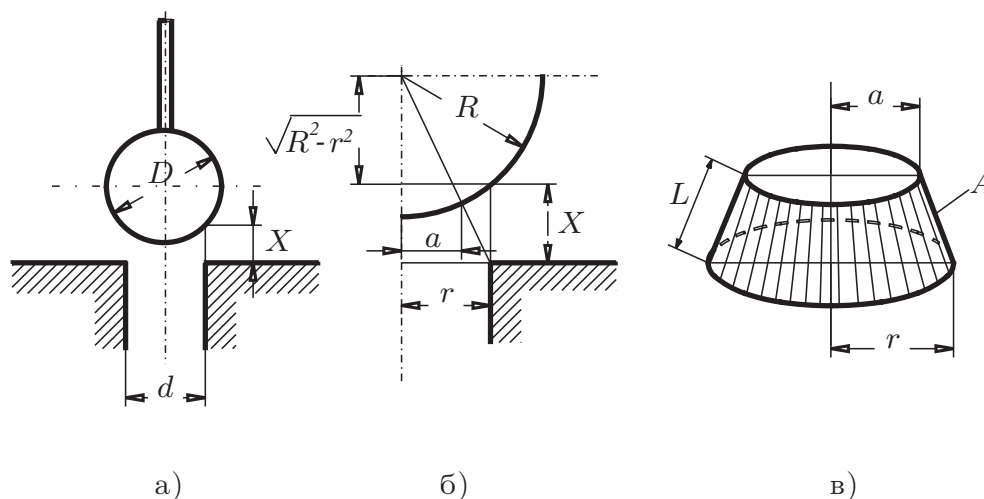
$a = A - A_N$  - одступање проточне површине -  $[m^2]$

$x = X - X_N$  - одступање хода печурке -  $[m]$

Члан  $\left. \frac{\partial A}{\partial X} \right|_N$  се назива градијент површине и једнак је:

$$\left. \frac{\partial A}{\partial X} \right|_N = \pi d \sin(\theta) \left(1 - \frac{X_N}{d} \sin(2\theta)\right). \quad (20)$$

Сферични вентил је вентил чија је печурка сфера (види слику 13 (а)).



Слика 29: Сферични вентил.

Слично као код коничног вентила и овде је проточна површина омотач зарубљене купе слика 29 (в). Из геометријских релација може се доћи до израза за закон промене проточне површине:

$$A = \pi r \frac{(R+L)^2 - R^2}{R+L} \begin{cases} R+L = \sqrt{(X + \sqrt{R^2 - r^2})^2 + r^2} & R > r \\ R+L = \sqrt{X^2 + r^2} & R < r \end{cases} \quad (21)$$

Када се једначина 21 преуреди добијају се доста компликовани изрази за закон промене проточне површине:

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \frac{\left[ 2\frac{X}{d} + \sqrt{\frac{D^2}{d^2} - 1} \right]^2 + 1 - \frac{D^2}{d^2}}{4 \sqrt{\left( 2\frac{X}{d} + \sqrt{\frac{D^2}{d^2} - 1} \right)^2 + 1}} \quad D \geq d \quad (22)$$

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \frac{\left( 2\frac{X}{d} \right)^2 + 1 - \frac{D^2}{d^2}}{\sqrt{\left( 2\frac{X}{d} \right)^2 + 1}} \quad D \leq d$$

Линеаризована једначина има исти облик као и једначина коничног вен-тила (19) само што је градијент површине:

$$\frac{\partial A}{\partial X} \Big|_N = \frac{\pi d \zeta \left[ \zeta^2 + 1 + \left( \frac{D}{d} \right)^2 \right]}{2 (\zeta^2 + 1)^{\frac{3}{2}}} \begin{cases} \zeta = \frac{2X}{d} + \left( \frac{D^2}{d^2} - 1 \right)^{\frac{1}{2}} & D \geq d \\ \zeta = \frac{2X}{d} & D \leq d \end{cases} \quad (23)$$

#### 4.1.7 Претварачи промене притиска у силу

Овде ће бити обрађени следећи претварачи промене притиска у силу:

- мехови,
- мембране и
- цилиндри.

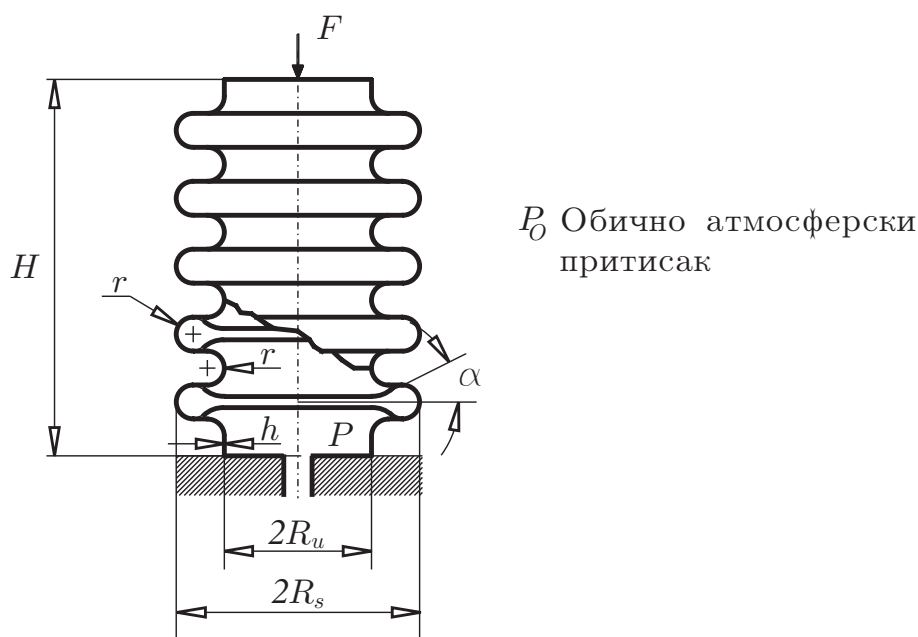
Мехови су елементи који се углавном примењују у мерним уређајима. Израђују се од нерђајућег челика, бронзе и алуминијума. Има их различитих пречника од 8 *mm* до 100 *mm*. Дебљина зида материјала од којих су мехови израђени се креће од 0,1 *mm* до 0,3 *mm*. На слици 30 је представљен један мех са свим важнијим геометријским карактеристикама.

Мехови се понашају слично опругама па се стога дефинише њихова крутост :

$$K_M = \frac{1 - \mu_p^2}{Eh} \cdot \frac{n}{A_0 - \alpha A_1 + \alpha^2 A_2 + \frac{B_0 h}{R_u^2}}$$

где су:

$K_M$  - крутост меха -  $[N/m]$



Слика 30: Мех.

$\mu_p$  - Поасонов број

$E$  - модул еластичности материјала

$h$  - дебелина зида материјала -  $[m]$

$n$  - број радних набора меха

Коефицијенти  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$  и  $B_0$  зависе од односа  $R_s/R_u$  и  $r/R_u$ .

Ефективна површина  $A_{ef}$  је површина на основу које се израчунава активна сила меха и може да се израчуна према,

$$A_{ef} = 2n\pi(R_s^2 - R_u^2) + R_u^2\pi.$$

Сада је могуће написати једначину равнотеже сила у стационарном стању као:

$$A_{ef}(P_1 - P_0) - K_M(H - H_0) - F_0 = 0.$$

где су:

$P_1$  - притисак унутра меха -  $[Pa]$

$P_0$  - притисак изван меха -  $[Pa]$

$H$  - позиција горње базе меха -  $[m]$

$H_0$  - позиција горње базе меха у ненапрегнутом положају -  $[m]$

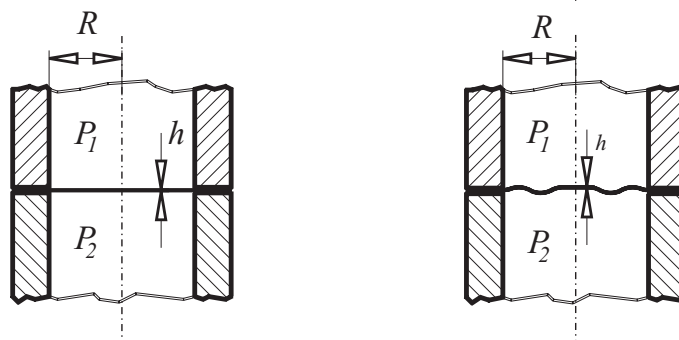
$F_0$  - спољашња сила -  $[N]$ .

Коришћењем мехова се избегавају проблеми са заптивањем па су у широкој употреби у ПНЕУМОАУТОМАТИЦИ. Важно је напоменути да имају изузетно линеарну статичку карактеристику посебно у поређењу са мембранама.

Мембране су такође елементи који су врло широко примењени код мерних уређаја и то не само код пнеуматских компоненти. Према врсти материјала од којих су израђене деле се на две основне групе:

- металне мембране и
- еластичне мембране.

Металне мембране се израђују углавном од нерђајућих челика и бронзе. На слици 31 (а) је представљена равна мембрана док је на слици 31 (б) представљена таласаста мембрана с циљем повећања ефективне површине.



Слика 31: Равне и таласасте металне мембране.

Померање центра равне мембране за мале вредности могуће је одредити :

$$\delta = \frac{3(1 - \mu_p)}{16} \frac{R^4}{Eh^3} (P_1 - P_2),$$

где су  $\mu_p$  и  $E$  Поасонов број и модул еластичности материјала од кога су израђене мембране. За таласасте мембране померање центра се одређује из нелинеарне једначине:

$$\frac{\delta}{h} + b \frac{\delta^3}{h^3} = \frac{R^4}{Eh^4} (P_1 - P_2).$$

Металне мембране имају велику крутост па је код њих нето активна сила веома мала.

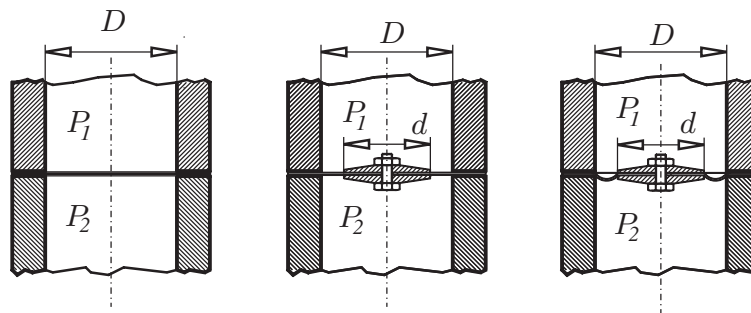
Еластичне мембране се израђују од гуме са платненом арматуром, од тефлона, од неопрена и других вештачких материјала. Ове мембране се одликују добром еластичношћу и одсуством хистерезиса у оквиру температурског опсега од  $-50^\circ C$  до  $+50^\circ C$ .

На слици 32 (а) је представљена равна еластична мембрана. Код наведене мембране се приближно  $2/3$  активне силе троши на савладавање еластичних сила а само  $1/3$  може да покреће неко спољашње оптерећење . Стога се за мала померања центра може писати израз за нето активну силу:

$$F_A = \pi \frac{D^2}{12} (P_1 - P_2).$$

За случај мембране са укрупњеним центром слика 32 (б) активна сила се рачуна према [?],

$$F_A = \frac{1 + \Theta + \Theta^2}{3} \frac{\pi D^2}{4} (P_1 - P_2),$$



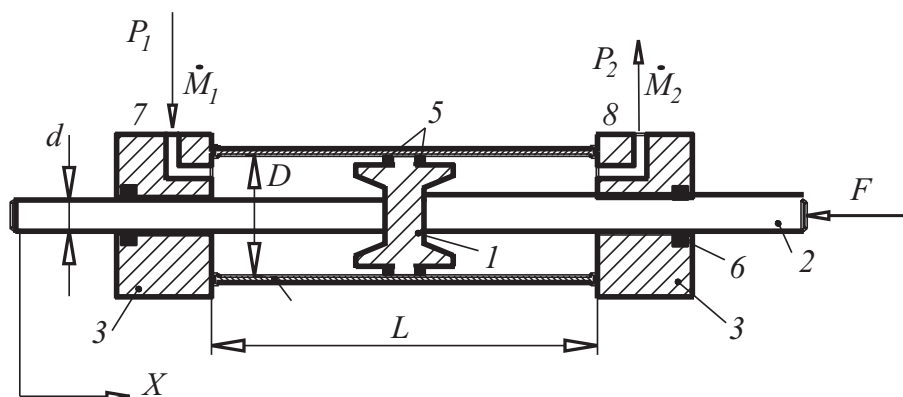
Слика 32: Еластичне мембране.

где је  $\Theta = d/D$ .

За већа померања претходне једначине не важе па се зато мора увести поправни фактор. Наиме статичка карактеристика за овакве мембране је изразито нелинеарна.

На слици 32 (в) је приказана мембрана са укрупњеним центром и једним жлебом што јој омогућује веће ходове. Код оваквих мембрана геометријска површина се значајно мења са ходом, па се зато у израз за активну силу додају и различити поправни фактори.

Пнеуматски цилиндри представљају још једну групу елемената за претварање промене вредности притиска гаса у промену вредности силе или померања. Пошто се радни притисци ваздуха у индустрији крећу око 10 bar из безбедносних разлога (опасност од експлозије) то ови цилиндри нису много масивни, али зато остварују и мање силе у поређењу са хидрауличким. Материјали од којих се они израђују су обично челик и алуминијум. Шематски приказ са свим важнијим деловима дат је на слици 33. Пнеуматски цилиндар се састоји из клипа 1 са заптивкама 5 и клипњаче 2 са заптивкама 6, поклопаца 3, цилиндричне цеви 4 и прикључака 7 и 8.



Слика 33: Пнеуматски цилиндар.

У случају цилиндра са слике 33 активна површина је  $A = \frac{\pi}{4}(D_2 - d_2)$  тако да се лако добија активна сила како следи:

$$F_a = \frac{\pi}{4}(D_2 - d_2)(P_1 - P_2).$$

Пошто се у овом поглављу проучавају статичке карактеристике биће дата једначина равнотеже сила у стационарном стању:

$$\frac{\pi}{4}(D_2 - d_2)(P_1 - P_2) = F_{zap} + F,$$

где су:

$F_{zap}$  - статичка сила сувог трења у заптивкама -  $[N]$

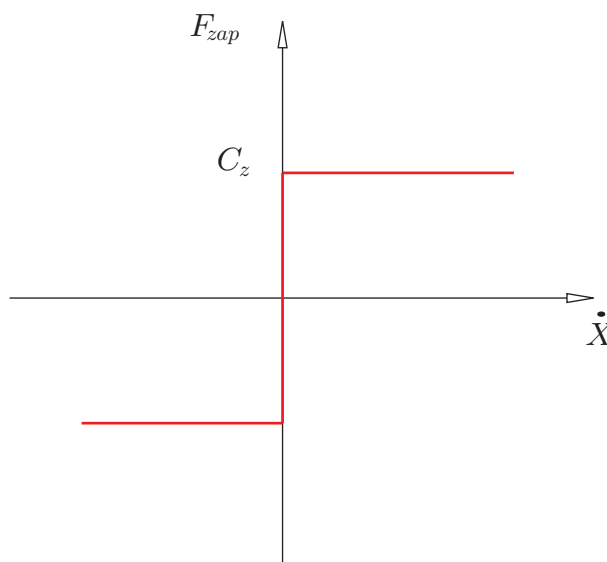
$F$  - сила оптерећења клипњаче -  $[N]$

$P_1$  - улазни притисак гаса -  $[Pa]$

$P_2$  - излазни притисак гаса -  $[Pa]$

$D$  - пречник клипа -  $[m]$

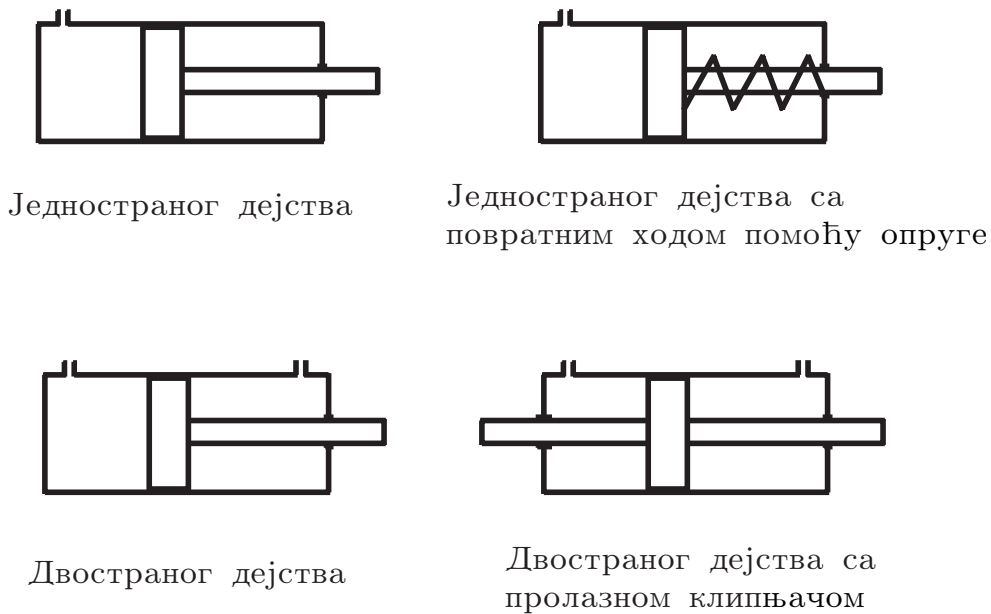
$d$  - пречник клипњаче -  $[m]$  Статичка сила сувог трења зависи од тога колико су заптивке прибијене уз цилиндар као и од тога да ли се подмазују површине у релативном кретању.



Слика 34: Карактеристика силу сувог трења.

Пнеуматски цилиндри се производе у пуно различитих димензија као стандардни елементи. Њихови пречници се крећу од 10 до 100  $mm$  а ходови до 1000  $mm$ . Ови елементи имају доста површина које захтевају веома фину машинску обраду (унутрашњост цилиндричне цеви и клипњача) па им је цена знатно виша од досад наведених претварача промене вредности притиска у промену вредности силе или померања. Такође се појављује проблем цурења гаса када се истроше заптивке. Међутим без премца су у остваривању великих транслаторних померања без икаквог механичког претварача. На слици 35 су дате симболичке шеме различитих типова цилиндара.





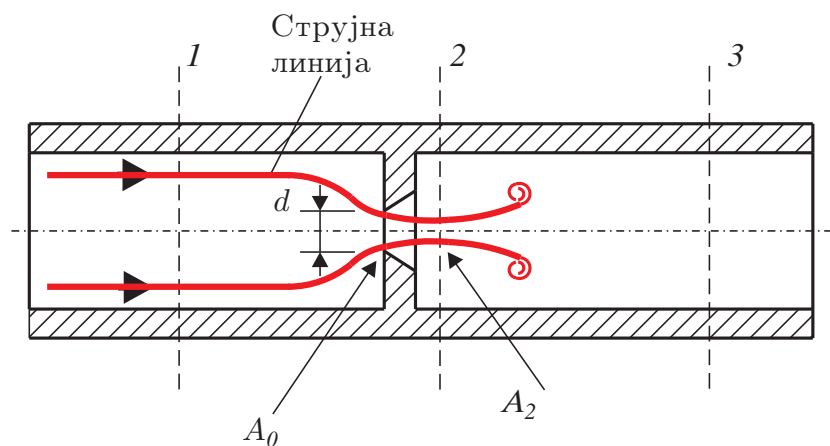
Слика 35: Типови пнеуматских цилиндара.

## 4.2 Хидраулички елементи

Хидраулички елементи као радни медијум имају хидраулично уље које се сматра практично нестишљивом материјом па су и једначине које их описују доста једноставније. Основни хидраулички елемент је хидраулички отпор или хидрауличка пригушница.

### 4.2.1 Хидраулички отпори

Хидраулички отпори се представљају веома слично пнеуматским отпорима како је то представљено на слици 36.



Слика 36: Хидрауличка пригушница.

Струјне линије флуида који протиче кроз пригушницу су приказане пр-

веним линијама. Оне се пре уласка у најужи геометријски део полако повијају. Површина попречног пресека је ту геометријска површина:

$$A_0 = \frac{d^2\pi}{4} \quad (24)$$

Међутим ако се надаље прати облик струјне линије низ струју види се да он и даље повија ка оси цевовода тако да су две струјне линије међусобно најближе у пресеку 2 – 2. Ова појава се назива контракција млаза. Наиме величина попречног пресека млаза у најужем пресеку може да се представи као:

$$A_2 = C_c \cdot A_0 \quad (25)$$

Користећи бернулијеву једначину за пресеке 1–1 и 2–2 добија се једначина за израчунавање запреминског протока флуида кроз пригушницу:

$$Q = \frac{C_v A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (P_1 - P_2)} \quad (26)$$

где су:

$Q$  - запремински проток течности кроз пригушницу -  $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

$P_1$  - струјни притисак у пресеку 1 – 1 -  $[Pa]$

$P_2$  - струјни притисак у пресеку 2 – 2 -  $[Pa]$

$A_1$  - површина попречног пресека цевовода у пресеку 1 – 1 -  $[m^2]$

$A_2$  - површина попречног пресека млаза у најужем пресеку 2 – 2 -  $[m^2]$

$\rho$  - густина флуида -  $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

$C_v$  - коефицијент брзине -  $[-]$

У прорачун нисмо узели силе трења па се кроз коефицијент  $C_v$  то чини. Наиме брзина струјања у цевоводу је нешто мања од прорачунске па се преко коефицијента брзине то узима у обзир. Он се добија експерименталним путем. Комбинујући једначине (25) и (26) добија се:

$$Q = \frac{C_v C_c A_0}{\sqrt{1 - C_c^2 \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (P_1 - P_2)} \quad (27)$$

Једначина (27) може компактније да се напише у облику:

$$Q = C_d A_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (P_1 - P_2)} \quad (28)$$

са коефицијентом пражњења:

$$C_d = \frac{C_v C_c}{\sqrt{1 - C_c^2 \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \quad (29)$$

У пракси је обично попречни пресек  $A_1$  доста већи од попречног пресека  $A_2$  па може да се пише:

$$\left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2 \approx 0 \quad (30)$$

па следи:

$$C_d = C_v C_c \quad (31)$$

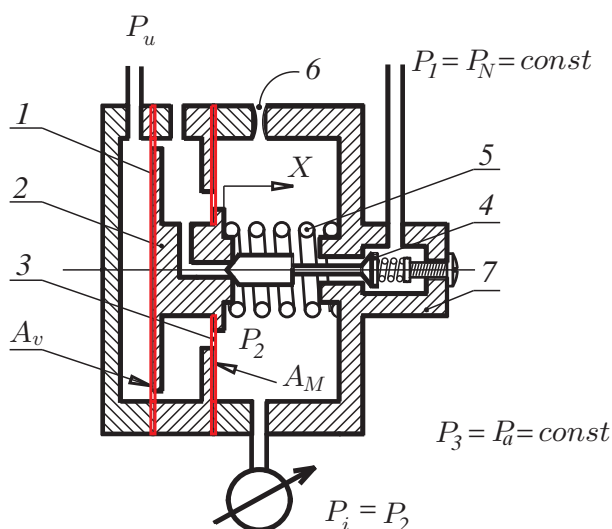
## 5 Појачавачи

Појачавачи улазе у састав сваке управљачке компоненте било да је електрична, хидрауличка, пнеуматска или комбинована. Стога ћемо овде представити по један од сваке врсте.

### 5.1 Пнеуматски појачавачи

Пнеуматски појачавачи су уређаји који улазе у састав готово сваке пнеумоелектричне компоненте, па морају детаљно да се проуче да би се сагледао њихов принцип рада као и математчки модел.

Мембрански пнеуматски појачавач је најшире у примени у пнеумоелектричним компонентама. На слици 37 представљен је један мембрански појачавач фирме Taylor.



Слика 37: Пнеуматски појачавач.

Појачавач се састоји из две мембране, веће површине  $A_v$  која је обележена бројем 1 и мање површине  $A_m$  која је обележена бројем 3. Укрупњење обе мембране је обележено бројем 2 и оно може да се помера улево и удесно. Печурка вентила је обележена бројем 4 док је константна пригушница обележена бројем 6 а опруга бројем 5. Кућиште појачавача је обележено бројем 7. Ово би били сви елементи битни за функционалност компоненте. Следеће физичке величине са слике 37 су,

$P_u$  - улазни притисак у појачавач -  $[Pa]$ ,

$P_i = P_2$  - излазни притисак из појачавача -  $[Pa]$ ,

$P_1 = P_N$  - напојни притисак -  $[Pa]$ ,

$P_3 = P_a$  - атмосферски притисак -  $[Pa]$ ,