

SISTEMI AUTOMATSKOG UPRAVLJANJA

Žarko Zečević
Elektrotehnički fakultet
Univerzitet Crne Gore

Predavanje 1

Uvod u sisteme automatskog upravljanja

Ishodi učenja:

Nakon savladavanja gradiva sa ovog predavanja studenti će moći da:

- Razumiju osnovne koncepte automatskog upravljanja i daju neke ilustrativne primjere SAU-a.
- Skiciraju strukturu osnovne regulacione petlje SAU-a i prepoznaju ulogu njegovih osnovnih komponenti.
- Naprave kratak pregled istorije sistema automatskog upravljanja, njihove primjene i uloge u društvu.

Osnovni pojmovi

Sistem je skup elemenata i uređaja međusobno povezanih u cilju obavljanja određene funkcije. Svaki fizički objekat je u stvari sistem. Primjeri sistema su učionica, lampa, satelit, automobil, nuklearna elektrana. Sistemi mogu biti i biološki, sociološki, ekonomski, itd.

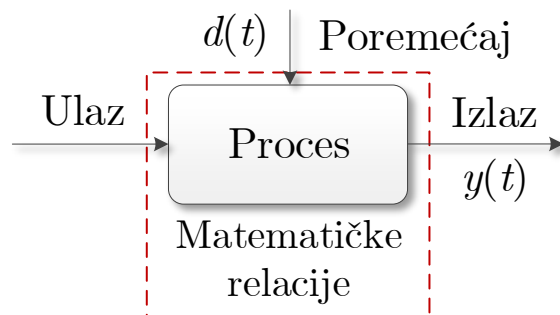
Upravljanje je proces podešavanja promjenljive sistema na željenu vrijednost. Upravljanje znači kontrolisati, regulisati ili davati komandu.

Sistem upravljanja je skup fizičkih komponenti povezanih na takav način da regulišu, kontrolišu, odnosno daju komandu sami sebi ili nekom drugom sistemu. Na primjer, učionica sa studentima i predavačem je jedna vrsta sistema u kojem predavač pokušava studentima da prenese određeni nivo znanja. Učionica sa klima uređajem je primjer sistema u kojem se upravlja temperaturom.

Proces (objekat upravljanja) je uređaj, objekat, odnosno onaj dio sistema kojim se upravlja. U prvom primjeru sistema upravljanja „objekat upravljanja“ predstavljaju studenti, a drugom primjeru je to učionica.

Osnovni pojmovi

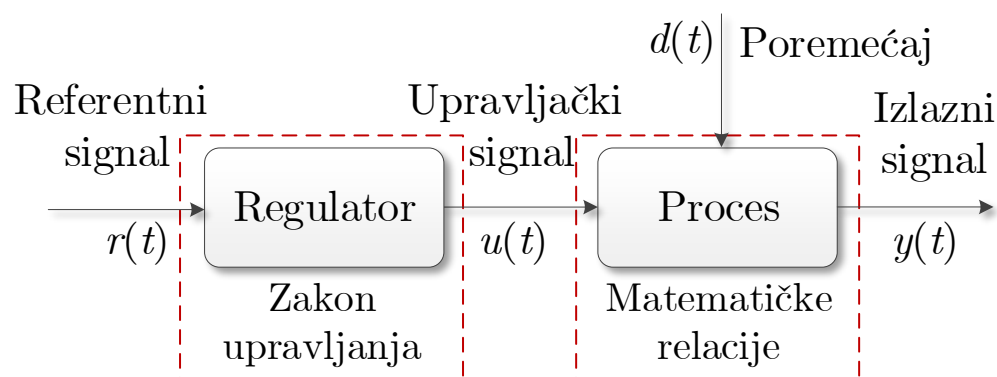
Da bi upravljali procesom, najprije treba definisati **izlaznu veličinu (signal)** koju želimo da održavamo na željenu vrijednost. Neophodno je prepoznati i **ulazne promjenljive (signale)** kojima se može uticati na izlaz procesa. Zavisnost izlaza od ulaza (dinamika, ponašanje procesa) se opisuje matematičkim, ulazno-izlaznim relacijama.



U terminologiji upravljanja, izlazni signal $y(t)$ se naziva **upravljana veličina**, dok se ulazni signal $u(t)$ zove **upravljački signal**. Upravljana veličina se održava na željenu vrijednost dovođenjem odgovarajućeg upravljačkog signala na ulaz procesa. Često, na izlaz sistema utiču i signali koji nijesu pod našom kontrolom. Sve signale koji utiču na izlaz sistema, a koje ne možemo neposredno da kontrolišemo, zovemo **poremećajima** ili **smetnjama**.

Osnovni pojmovi

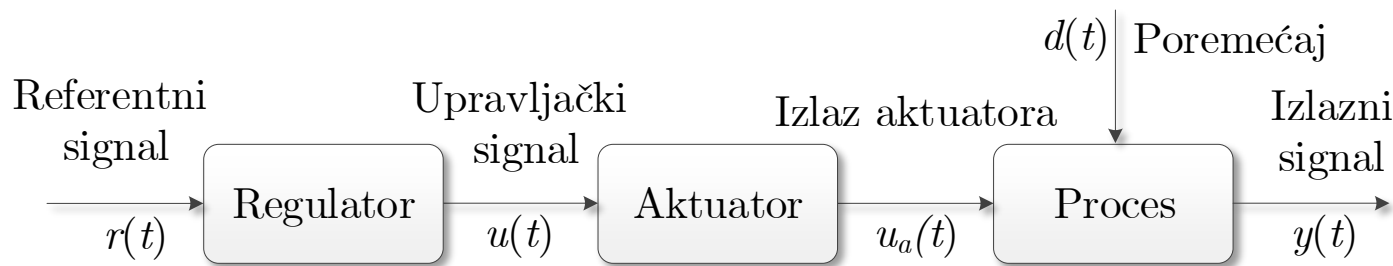
Pored objekta, u najjednostavnijem slučaju sistem upravljanja sadrži i regulator. Regulator, na osnovu zadatog **željenog (referentnog) signala**, generiše odgovarajući upravljački signal $u(t)$ na način koji obezbjeđuje da upravljana veličina $y(t)$ što vjernije prati referentni signal $r(t)$.



Najčešće se na regulatoru implementira samo upravljačka logika (**zakon upravljanja**), te on nije sposoban da direktno utiče na proces. Upravljački signal često treba pojačati ili mu promijeniti fizičku prirodu, prije nego što se njime djeluje na objekat upravljanja. Ovo se postiže komponentom koja se zove **aktuator** (izvršni organ).

Sistem upravljanja u otvorenoj sprezi

Sistem upravljanja koji koristi regulator i aktuator direktno za dobijanje željenog odziva procesa se naziva **sistem upravljanja u otvorenoj sprezi**.

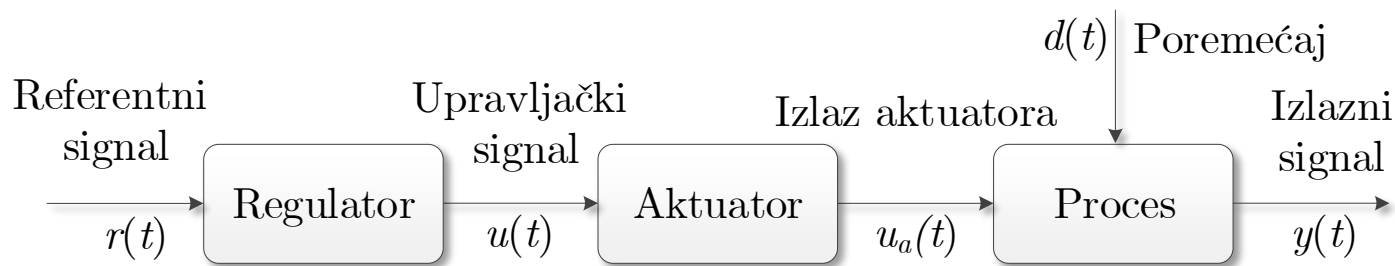


Sistemi upravljanja u otvorenoj sprezi nemaju informaciju o stanju na izlazu sistema, pa samim tim ne mogu automatski da izvrše korekciju upravljačkog signala, ukoliko izlaz odstupa od željene vrijednosti.

Primjeri sistema upravljanja u otvorenoj sprezi su električni toster, veš mašina, itd. Kod navednih uređaja ne postoji povratna informacija o tome da li tost dovoljno pečen i da li je veš čist, već oni rade predviđeno vrijeme.

Sistem upravljanja u otvorenoj sprezi

Sistemi upravljanja u otvorenoj sprezi ne mogu reagovati ukoliko na proces djeluju poremećaji ili ukoliko dođe do promjena u parametrima sistema.

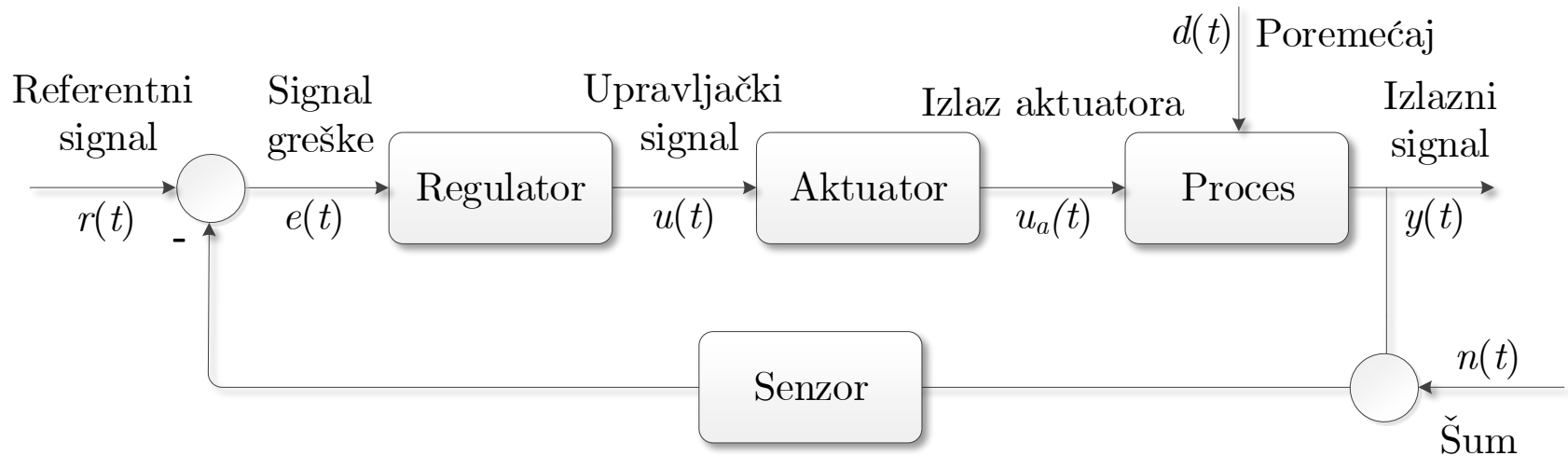


Na primjer, ukoliko podesite tajmer klima uređaja na 30 minuta, prostorija se neće zagrijati ukoliko su sve vrijeme vrata bila otvorena. U ovom primjeru spoljašni vazduh predstavlja poremećaj/smetnju na ulazu sistema.

Sistemi u otvorenoj sprezi su jeftini i relativno jednostavni za implementaciju. Idealni su za korišćenje u slučajevima kada je veza između izlaza i ulaza sistema (matematički model) jasno definisana i nezavisna od uticaja spoljnih poremećaja.

Sistem upravljanja za zatvorenom spregom

Sistem upravljanja sa povratnom spregom koristi mjerenja stvarne vrijednosti izlazne promjenljive i poredi ih sa željenom vrijednošću odziva.

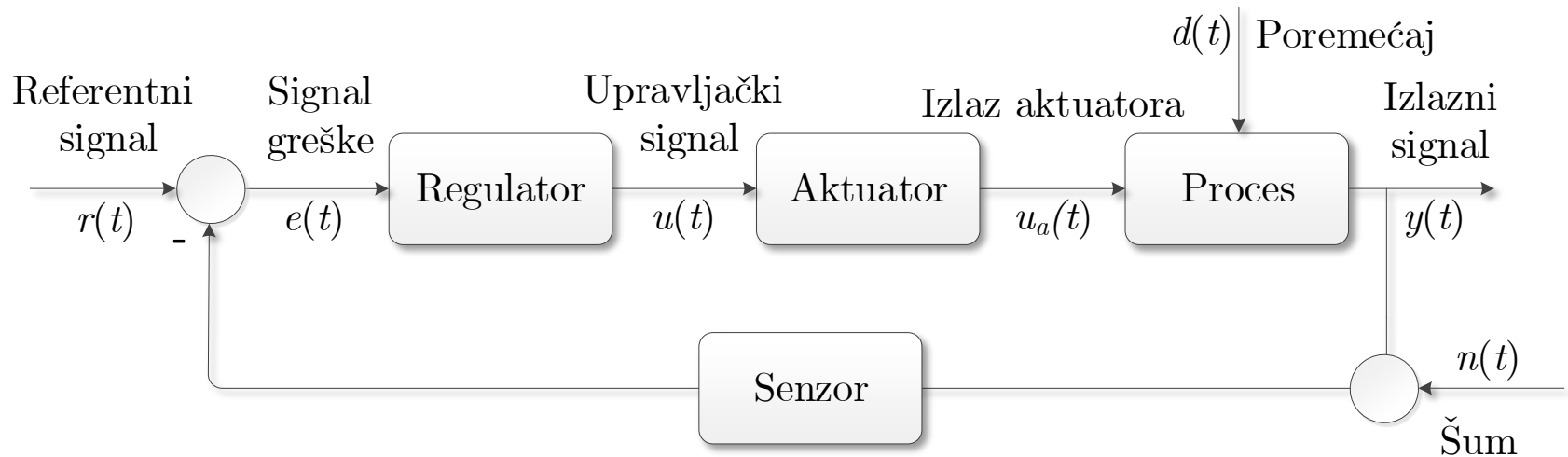


Povratna sprega omogućava upravljanje izlaznom promjenljivom i povećava tačnost, ali treba voditi računa o stabilnosti sistema.

Primjeri sistema upravljanja sa zatvorenom spregom su klima uređaj, automobil, pozicioni i brzinski servomehanizmi, itd..

Sistem upravljanja za zatvorenom spregom

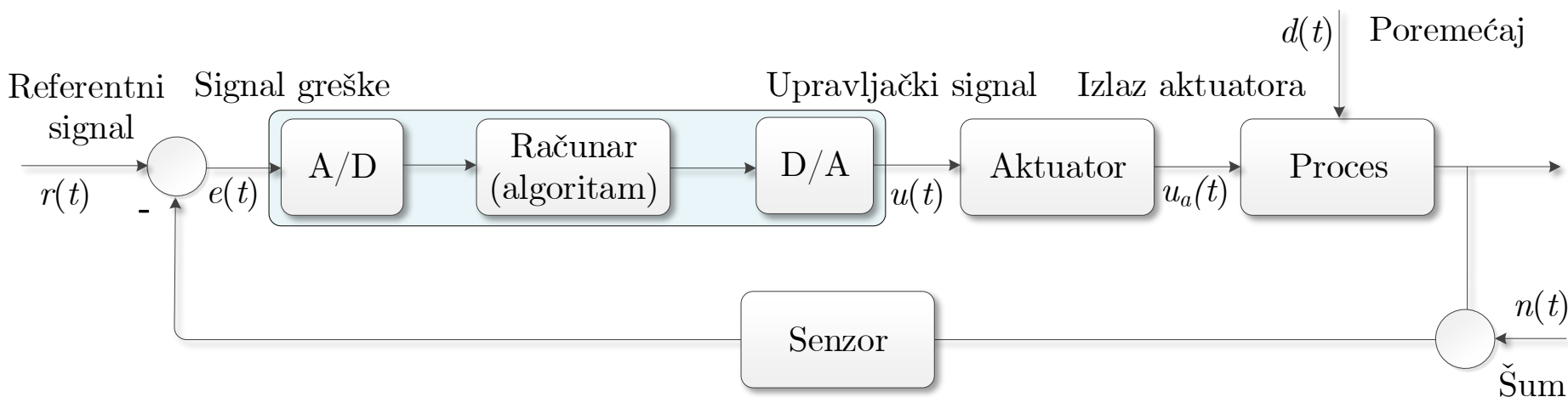
Sistem upravljanja treba da obezbijedi dobre performanse i u slučajevima pojave poremećaja i mjernih šumova.



Povratna sprega prirodno teži da smanji uticaj poremećaja koji djeluju na sistem. Međutim, ovakvi sistemi su skuplji za implementaciju, jer zahtijevaju ugradnju senzora. Pored toga, senzori su podložni mjernim šumovima, odnosno mjerenjima se uvijek unosi neka netačnost u sistem.

Digitalni sistemi upravljanja

Moderni sistemi upravljanja su često digitalni. Kod digitalnih SAU-a upravljački zakon se implementira na računaru/mikrokontroleru.



Kako računar razumije samo digitalne vrijednosti, mjereni signal treba prvo diskretizovati pomoću A/D konvertora. Diskretni signal greške se obrađuje upravljačkim algoritmom i na izlazu daje diskretni upravljački signal. Na kraju, upravljački signal se pomoću D/A konvertora pretvara u kontinualni signal i dovodi na ulaz aktuatora.

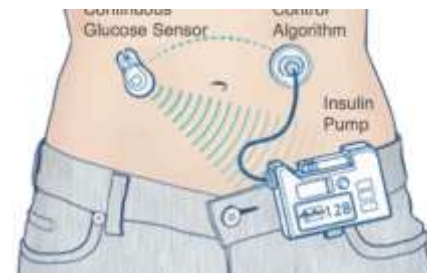
Proces (objekat upravljanja)

Inženjer automatike treba da bude familijaran sa „fizikom“ procesa kojim se upravlja. Da bi projektovali SAU, nije dovoljno da poznavanje teorije upravljanja, već se mora poznavati i objekat kojim treba upravljati. Prvi korak u projektovanju SAU-a je modelovanje procesa. Proces se može modelovati na više načina: fizičko modelovanje (primjenom fizičkih zakona koji važe za dati proces), identifikacija sistema, parametarska estimacija, itd.

Proces ili objekat upravljanja je uređaj ili sistem kojim se upravlja.

Primjeri

Pozicioni sistem **drona**, pozicioniranje **robotske ruke**, upravljanje brzinom **vjetrogeneratora**, regulacija nivoa šećera u krvi **čovjeka**.



Senzori

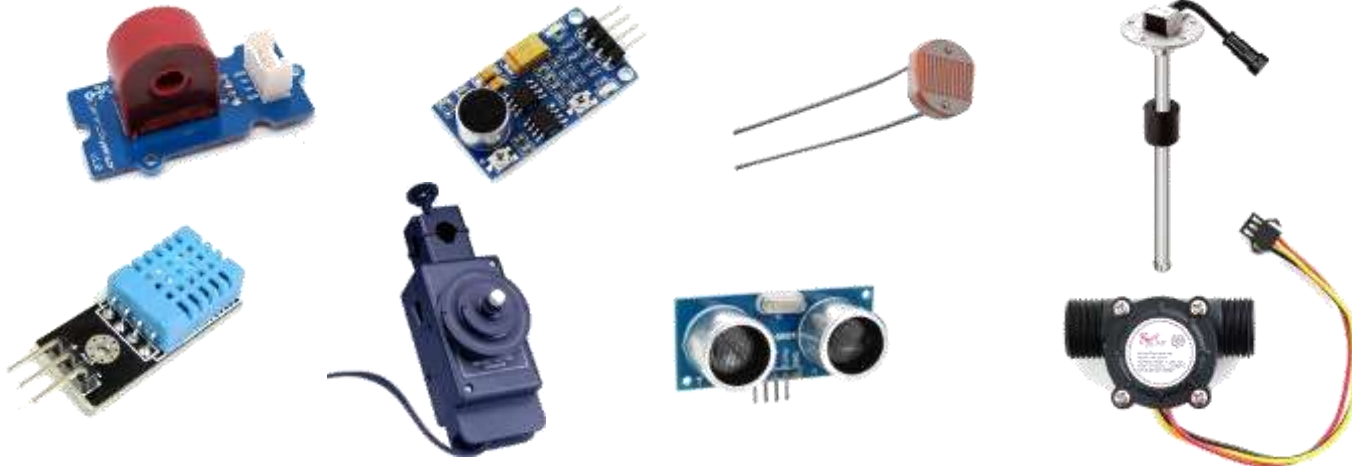
Senzori su *oči* SAU-a jer mu omogućavaju da *vidi* šta se dešava. Iz tog razloga u vezi sa upravljanjem se često kaže:

Sve što može da se izmjeri, može i da se kontroliše.

Senzor je element koji kvantitativno konvertuje energiju mjerene varijable (izlaznog signala) u formu podesnu za mjerenje.

Primjeri

Senzor struje, senzor zvuka, senzor nivoa fluida, senzor svjetlosti, temperaturni senzor, rotacioni senzor, ultrazvučni senzor, senzor protoka fluida.



Aktuatori

Nakon što identifikuju senzori koji mogu da izmjere izlaznu promjenljivu, potrebno je izabrati aktuator – komponentu koja može da djeluje, pokrene sistem iz tekućeg (izmjerenog) stanja ka željenom stanju.

Aktuator je uređaj koji ima sopstveni izvor energije i koji za odgovarajući upravljački signal na ulazu, na izlazu daje odgovarajući signal mehaničkog tipa.

Primjeri

Električni motori, hidraulični i pneumatski aktuatori, ventili, prekidači, grijači.



Regulatori/Kontroleri

Regulatori u SAU-u su uređaji koji koriste razliku između izmjerene i zadate vrijednosti u cilju generisanja upravljačkog signala koji se šalje aktuatoru. Regulatori mogu biti realizovani u analognoj i digitalnoj tehnici.

Cilj **regulatora** je generisanje upravljačkog signala implementacijom određenog zakona/algoritma upravljanja. Projektovanje odgovarajućeg zakona/algoritma je centralni problem teorije upravljanja.

Primjeri

PLC - Programmable Logic Controllers, PC, mikrokontroleri, PID regulator



Poremećaji i mjerni šumovi

U praksi sistemi upravljanja su često izloženi spoljnim poremećajima i šumovima. Ovi faktori imaju značajan uticaj na performanse sistema. Pod poremećajima podrazumijevamo sve signale koje utiču na objekat, a koje ne možemo direktno da kontrolišemo. Šumovi su najčešće neželjene smetnje uzrokovane samom fizičkom prirodom procesa koji mjerimo.

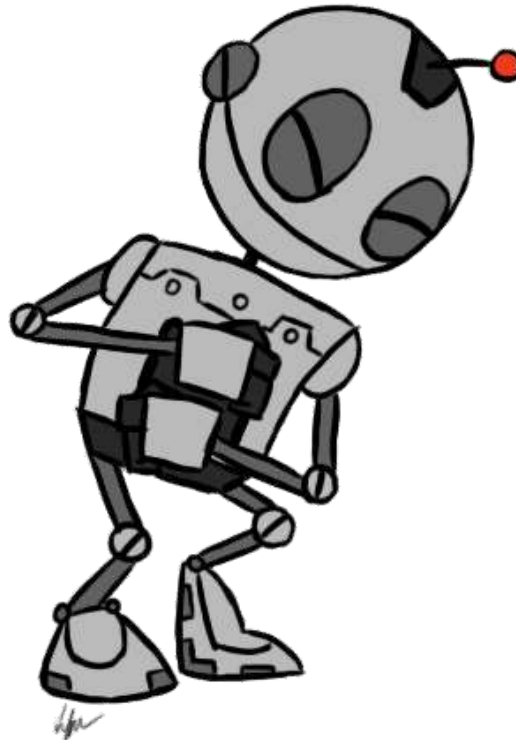
SAU treba projektovati tako da bude robustan na poremećaje i mjerne šumove, ali i na razne greške koji mogu nastati usljed nemogućnosti preciznog modelovanja sistema. Na kraju krajeva, ovo teoriju upravljanja čini komplikovanijom i zanimljivijom.

Primjeri

Neravnina na putu (automobil), varijacije spoljne temeprature (regulacija sobne temperture), talasi (upravljanje pravcem broda), magla (ocjena trenutnog pravca), termički šum, vibracije, kvantizacioni šum (posljedica digitalno - analogne konverzije).

Komponente SAU-a

*Senzori predstavljaju oči, a aktuatori mišići,
dok algoritmi upravljanja omogućavaju razne fineze.*



Komponente SAU-a

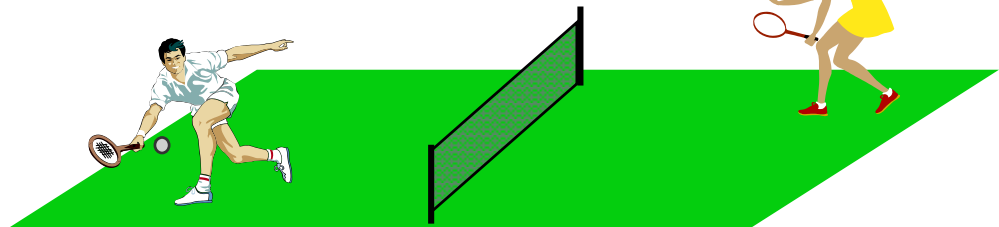
- **Bolji senzori**
obezbijeđuju bolju *viziju*



- **Bolji aktuatori**
obezbijeđuju više *mišića*



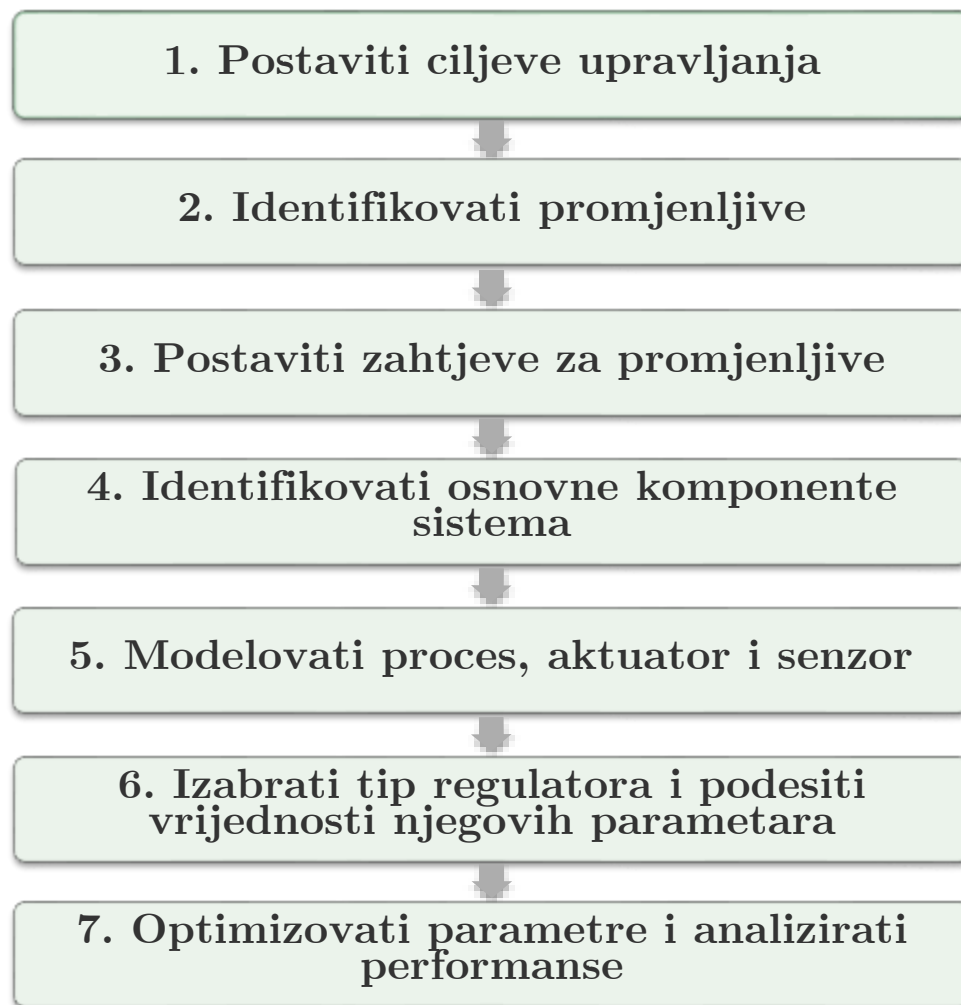
- **Bolji algoritam upravljanja**
obezbijeđuje više *finesa* kombinujući *senzore* i *aktuatore* na što inteligentnije načine



Dizajn SAU-a

Prije odabira senzora, aktuatora i upravljačkog algoritma važno je definisati ciljeve upravljanja, identifikovati promjenljive kojima treba upravljati da bi se postigli postavljeni ciljevi i definisati koliki nivo performansi je obavezan (tačnost, brzina, ...). Nakon toga treba odabrati komponente sistema i modelovati ih. Na kraju treba izabrati tip regulatora i podesiti njegove vrijednosti u cilju zadovoljenja zahtjevanih performansi.

Ako performanse ne zadovoljavaju specifikacije, vratiti se na korak 4.



Ako performanse zadovoljavaju specifikacije, finalizirati dizajn

Uspješno upravljanje

Performanse SAU-a zavise od:

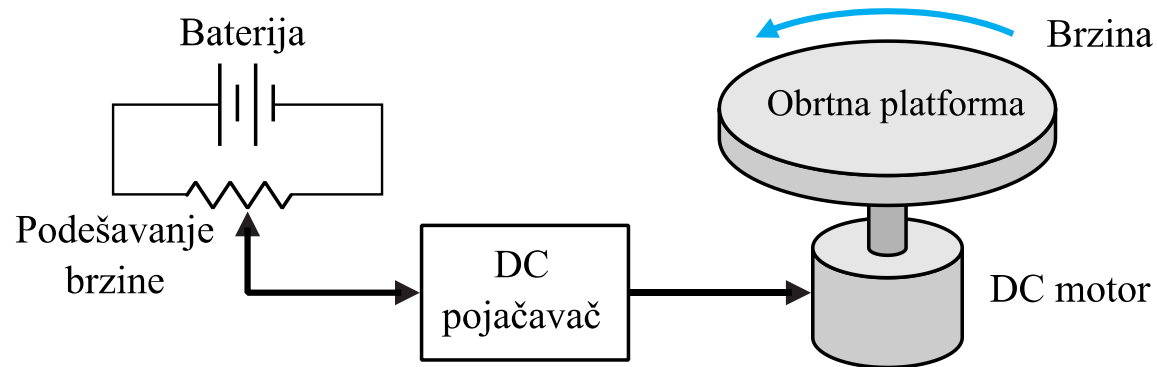
- objekta kojim se upravlja (procesa)
- postavljenih ciljeva
- senzora
- aktuatora
- regulatora (algoritma upravljanja)
- robusnosti na poremećaje i mjerne nesigurnosti

Upravljanje je ključna tehnologija za postizanje:

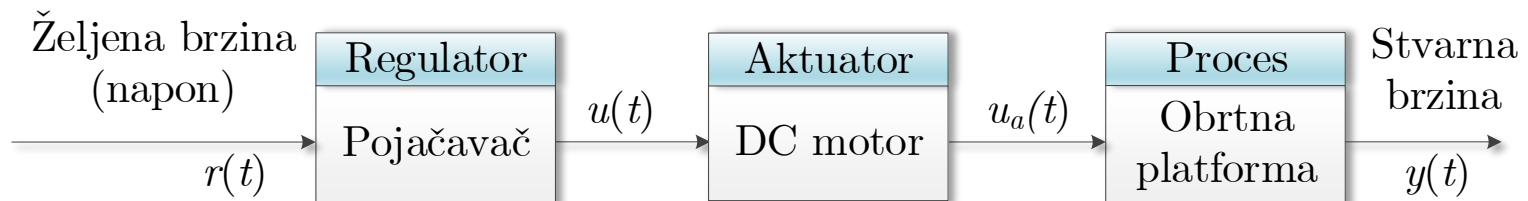
- boljeg kvaliteta proizvoda
- minimizacije otpada
- zaštite okoline
- veće produktivnosti
- veće sigurnosti

Primjer dizajna SAU-a

- Sistem upravljanja bez povratne spege

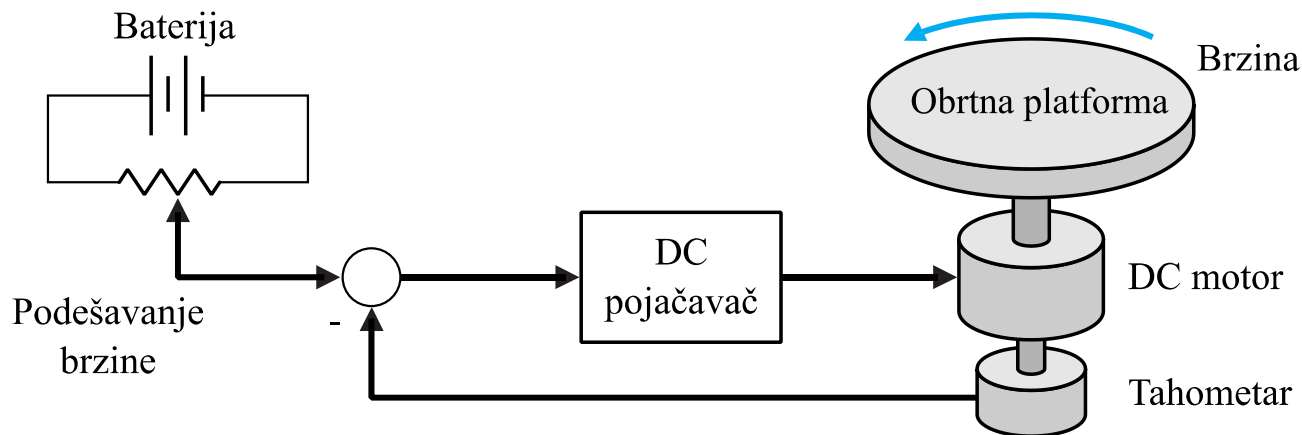


- Strukturni blok dijagram

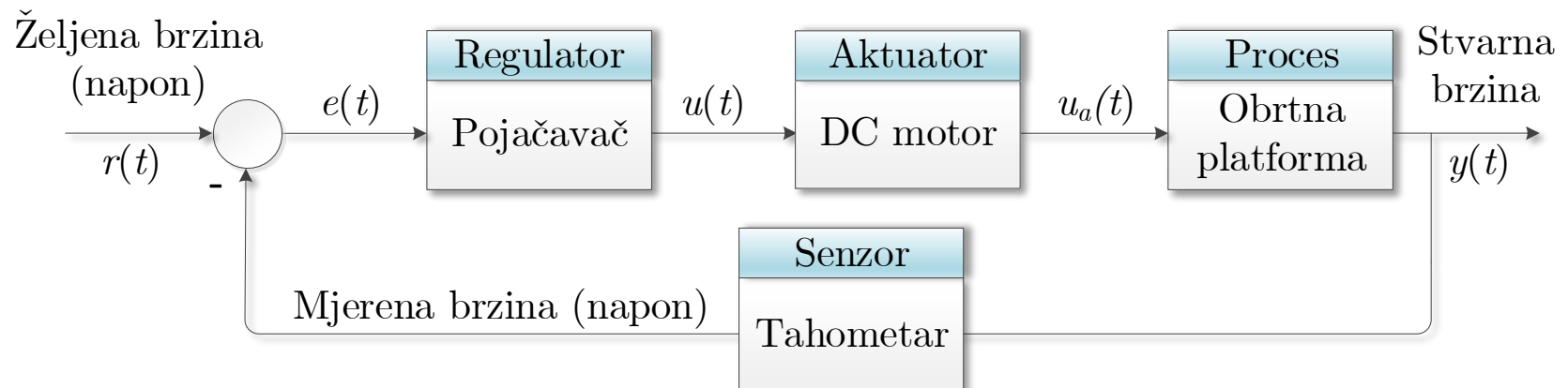


Primjer dizajna SAU-a

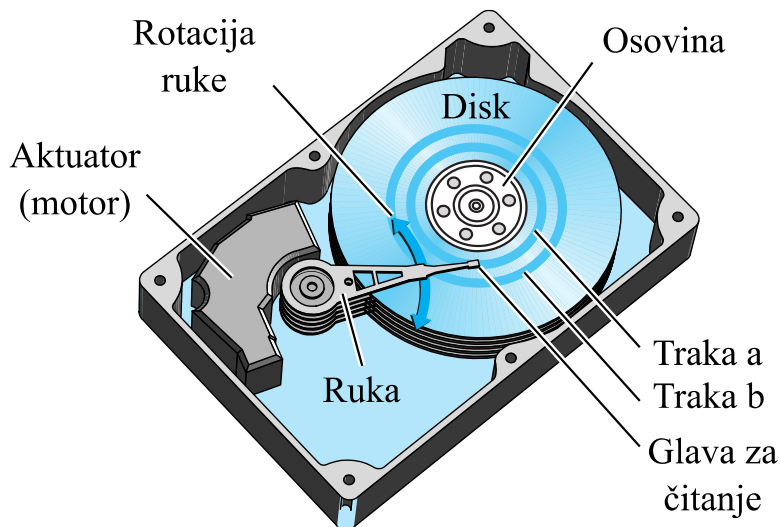
- Sistem upravljanja sa povratnom spegom



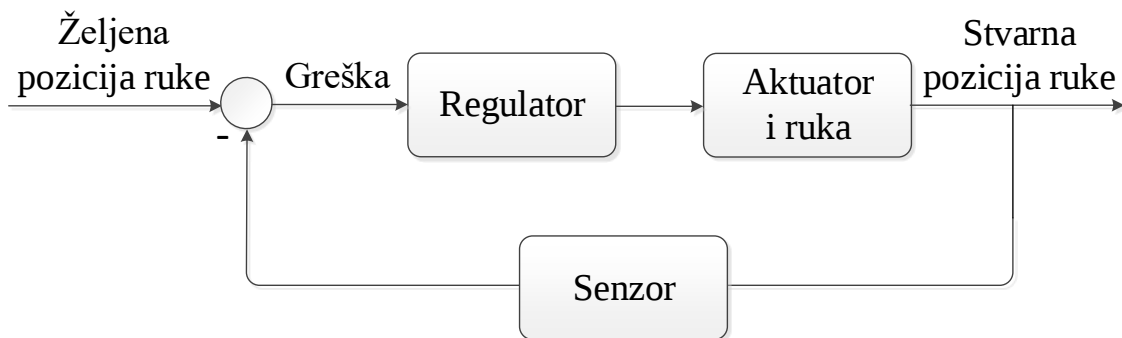
- Osnovna regulaciona kontura



Primjer – hard disk

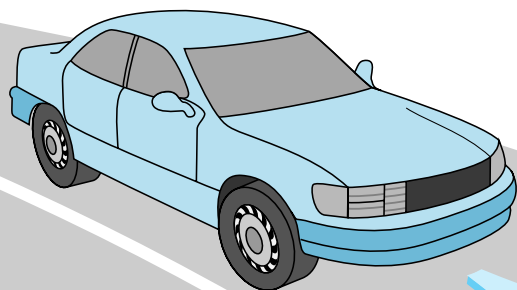


Na slikama je prikazana fizička izvedba hard diska i odgovarajući blok dijagram. Ruka treba precizno da se pozicionira iznad željene trake, kako bi se očitali traženi podaci. Informacija o trenutnoj poziciji se dobija pomoću enkodera (senzora pozicije). Signal greške se obrađuje u skladu sa definisanim zakonom upravljanja, koji se implementira pomoću elektronike (regulator). Na izlazu regulatora je napon, koji se dovodi na ulaz motora (aktuatora). Motor kontinualno pomjera poziciju ruke u željenom smjeru.



U okviru ovog kursa nećemo se baviti detaljima implementacije SAU-a (zbog raznovrsnosti primjene), već ćemo generalano pristupiti problemu upravljanja, tako što ćemo matematički posmatrati komponente SAU-a, na osnovu čega ćemo definisati odgovarajuće zakone upravljanja i analizirati performanse cjelokupnog sistema.

Primjer - automobil



Cilj: Upravljanje pozicijom i brzinom automobila

Izlazi: Trenutni pravac i brzina automobila

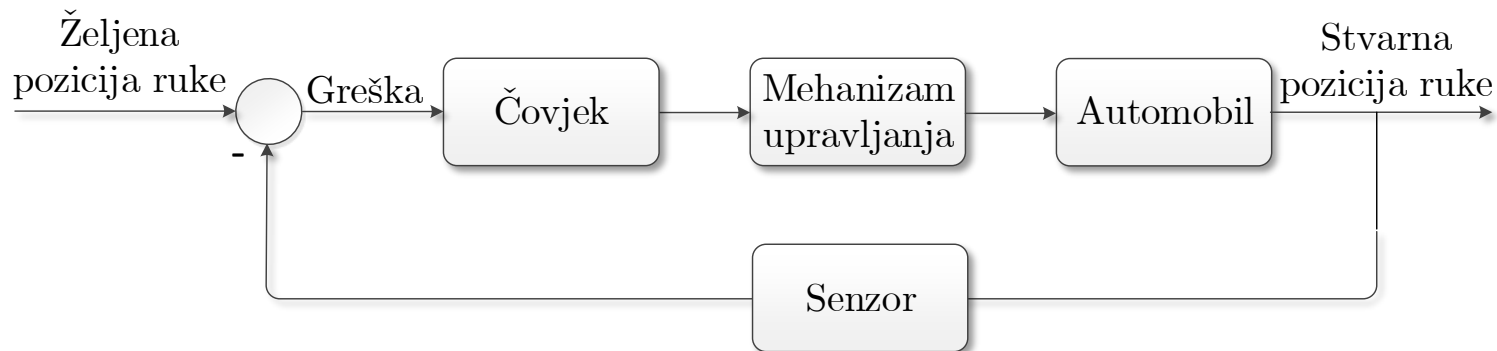
Ulazi: Oznake na putu i saobraćajni znakovi

Smetnje: Neravnine na putu, usponi, vjetar

Podsystemi: servo sistem, kočioni sistem

Željeni
pravac
kretanja

Stvarni
pravac
kretanja



Primjer - čovjek

- i. Pankreas
 - + Reguliše nivo šećera u krvi
- ii. Adrenalin
 - + Automatski povećava brzinu rada srca i kiseonik u toku letenja
- iii. Oko
 - + Prati predmete koji se kreću
- iv. Ruka
 - + Uzima predmet i postavlja ga na željenu poziciju
- v. Tijelo
 - + Reguliše temperaturu na 36°C - 37°C

Istorijski razvoj SAU-a

300 godina p.n.e: prva poznata primjena povratne sprege u vodenim časovnicima u staroj Grčkoj. Vodeni časovnik regulisan upravljanjem protoka fluida.

XVI vijek: Drebbel-ov temperaturni regulator. Prvi sistem upravljanja sa povratnom spregom u modernoj Evropi. Korišćen je za održavanje konstantne temperature u inkubatoru.

XVIII vijek: James Watt-ov centrifugalni regulator za upravljanje brzinom parne mašine. Centrifugalni regulator se smatra prvim sistemom **automatskog** upravljanja u modernoj Evropi. Watt-ov pristup je bio praktičan, bez teorijske analize o uticaju povratne sprege na stabilnost parne mašine.

XIX vijek: Maxwell modeluje centrifugalni regulator diferencijalnim jednačinama, koje linearizuje i pokazuje da stabilnost regulatora zavisi od korijena karakteristične jednačine (polinom). Međutim, Maxwell-ov metod se jedino mogao primijeniti na polinome drugog i trećeg reda. Kasnije, **Routh** i **Hurwitz** definišu metode za ispitivanje stabilnosti dinamičkih sistema višeg reda.

1920-ih: rad Minorsky-og na teorijskoj analizi automatskog upravljanja brodovima. Način na koji treba izvršiti upravljanje je prvi put jasno definisan (proporcionalno, integralno i diferencijalno djejtvo, PID). Ubrzo, potreba za SAU-om se javlja i drugim oblastima kao što su energetika (za regulaciju napona i frekvencije) i vojna industrija (pozicioniranje topova).

Istorijski razvoj SAU-a

1930-ih: **Nyquist** je razvio metod za analizu stabilnosti sistema automatskog upravljanja sa povratnom spregom posmatranjem sistema u otvorenoj sprezi. Primjena negativne povratne sprege u elektronici (Black-ov operacioni pojačavač sa negativnom povratnom spregom). **Bode** razvija metod za skiciranje asimptotskih frekvencijskih karakteristika i ispitivanje stabilnosti spregnutog sistema.

1940-ih: Ziegler i Nichols su predložili niz pravila za podešavanje PID regulatora, do kojih su došli eksperimentalnim putem. Hall je razvio metode za sintezu i analizu SAU-a sa povratnom spregom u frekvencijskom domenu, koje su tek poslije rata pojavljuju u javno dostupnoj literaturi. PID regulatori se sve više koriste za regulaciju industrijskih procesa, kao što su temperatura i pritisak.

Evans je razvio root-locus metod – postupak za skiciranje položaja polova spregnutog sistema. Evans-ov metod je pružao mogućnost sinteze regulatora i analize stabilnosti u kompleksnom domenu. Ovim je zaokružena klasična teorija upravljanja (u smislu koncepta, ali ne i daljih istraživanja i primjena). Klasična teorija upravljanja se i danas uspješno primjenjuje, ali je uglavnom ograničena na sisteme sa jednim ulazom i izlazom.

Istorijski razvoj SAU-a

1950-ih: Kalman uvodi koncept modelovanja dinamičkih sistema u prostoru stanja, kako i koncepte kontrolabilnosti i opservabilnosti. Pojavljuju se prvi digitalni računari koji su u to doba koristili za monitoring, ali ne i za upravljanje procesima.

1960-ih: Razvoj modernih grana upravljanja kao što su optimalno upravljanje (Pontryagin, Bellman), adaptivno upravljanje (Widrow, Tsypkin), itd.

1970-ih: Računari postaju sve jeftiniji, čime se omogućava novi pristup analizi i dizajnu sistema automatskog upravljanja, ali i implementacija naprednih tehnika upravljanja zasnovanih na modelu u prostoru stanja. Prvi digitalni sistemi upravljanja.

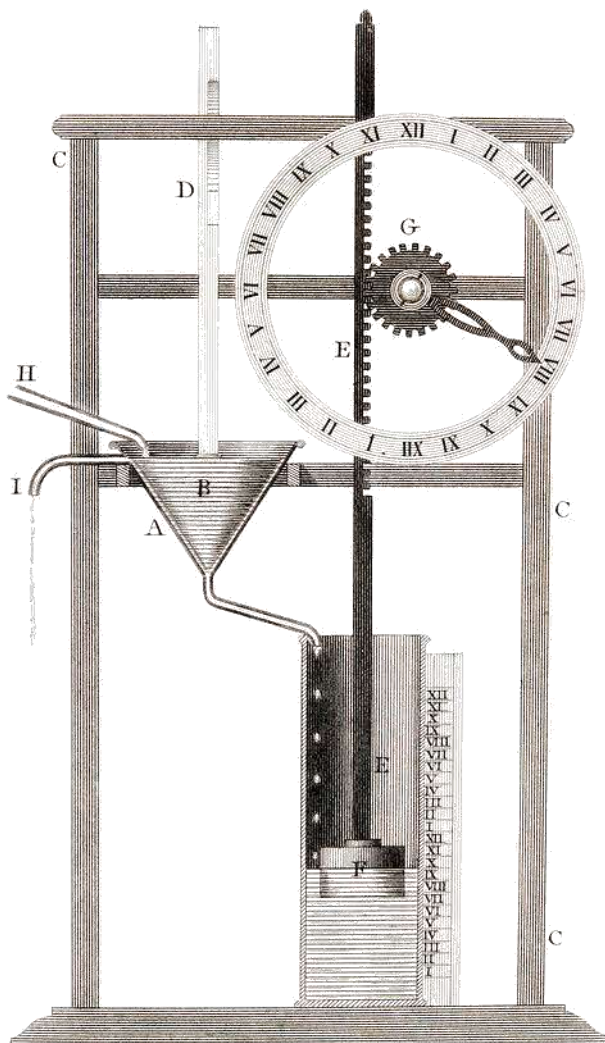
1980-ih: Počinje istraživanje i razvoj metoda upravljanja putem učenja. Razvijaju se inteligentne i robusne metode upravljanja.

1990-ih: Neuro-fuzzy kontroleri (kombinacija neuralnih mreža i fuzzy logike)

.....

Danas se teorija upravljanja primjenjuje u gotovo svim inženjerskim granama. Pored toga, postoje pokušaji primjene naprednih teorija u upravljanju biološkim, biomedicinskim, ekonomskim i sicio-ekonomskim sistemima.

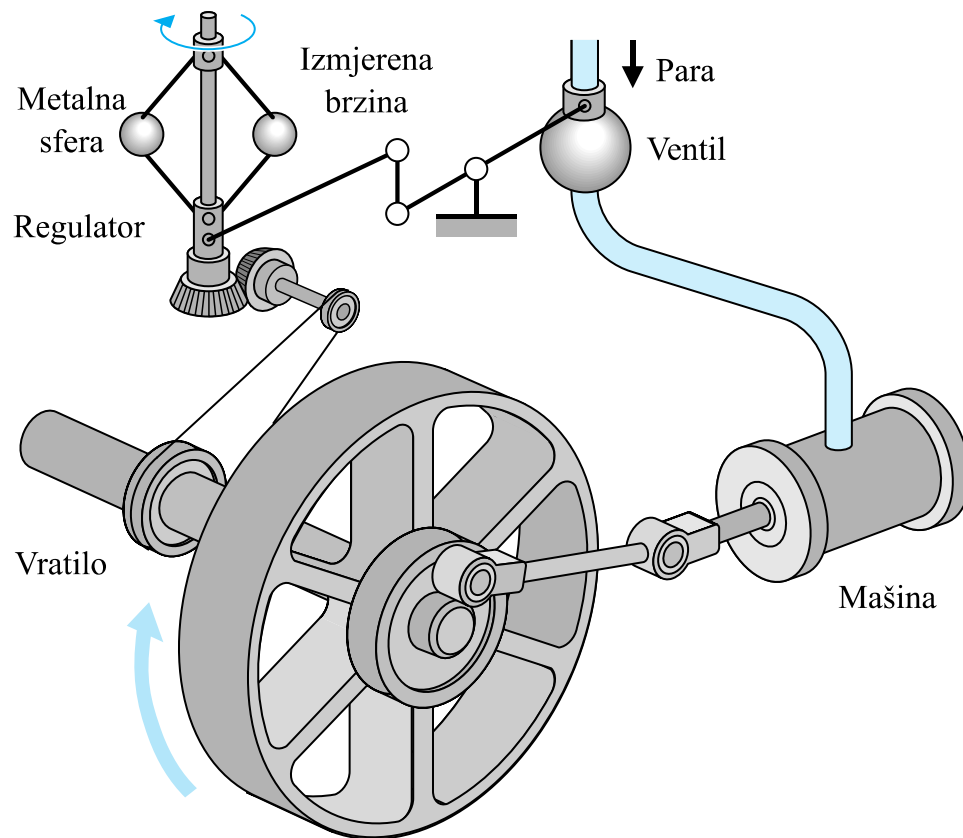
Vodeni časovnik (Klepsidra)



Ktesibije, 300 p.n.e.

Vodeni časovnik ili Klepsidra se smatra prvim poznatim uređajem u kom se primjenjivao princip povratne sprege. Cilj upravljanja je održavanje konstantnog protoka tečnosti iz suda A u sud E. Na ovaj način plovak F se podiže konstantom brzinom i pokazuje vrijeme na ugraviranoj vremenskoj skali. Istovremeno, plovak F pokreće mehanizam sa zupčanicima pomoću kojeg se dodatno vizuelizuje vrijeme. Da bi se sud E punio konstantnim brzinom, potrebno je održavati konstantu visinu tečnosti u sudu A (Toričelijev zakon). Ovo se postiže pomoću plovka B koji spriječava dovod tečnosti iz cijevi H kad visina fluida dosegne referentnu vrijednost. Ova vrsta časovnika se koristila sve do XVII vijeka.

Watt-ova parna mašina

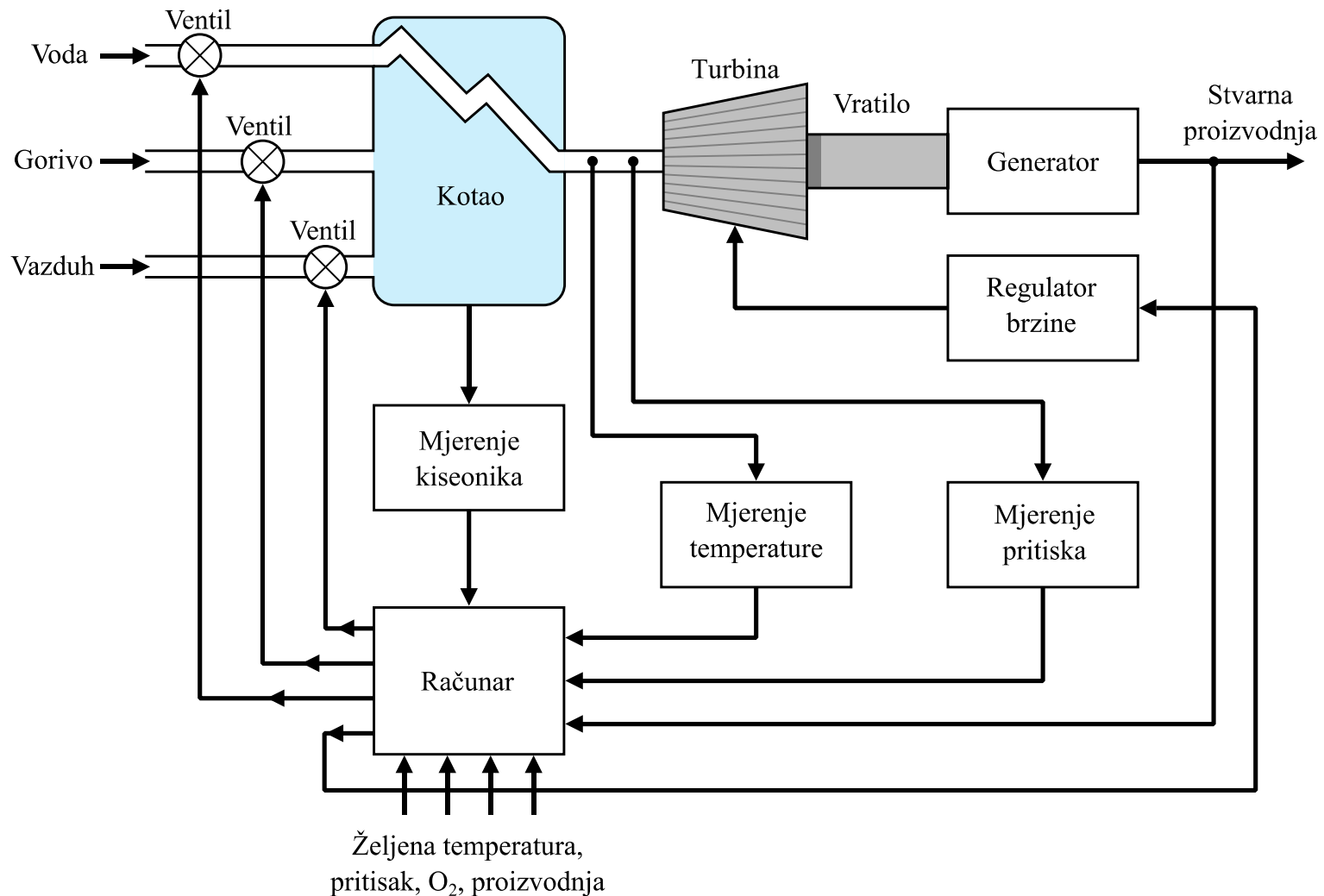


James Watt, XVII vijek

Centrifugalni regulator služi za regulaciju snage parne mašine. Smatra se prvim SAU-om koji je korišćen u industrijske svrhe. Sastoji se od dvije kugle na jednoj vertikalnoj osovini koju pokreće sama parna mašina preko zupčanika. Kada je mašina manje opterećena, kugle se brže vrte, te se usljed djelovanja centrifugalne sile podižu i zatvaraju dovod vodene pare. Ukoliko se mašina više optereti, kugle će se sporije vrtjeti i spuštati i na taj način omogućiti veći dovod pare. Na ovaj način se dovod vodene pare u parni cilindar automatski reguliše.

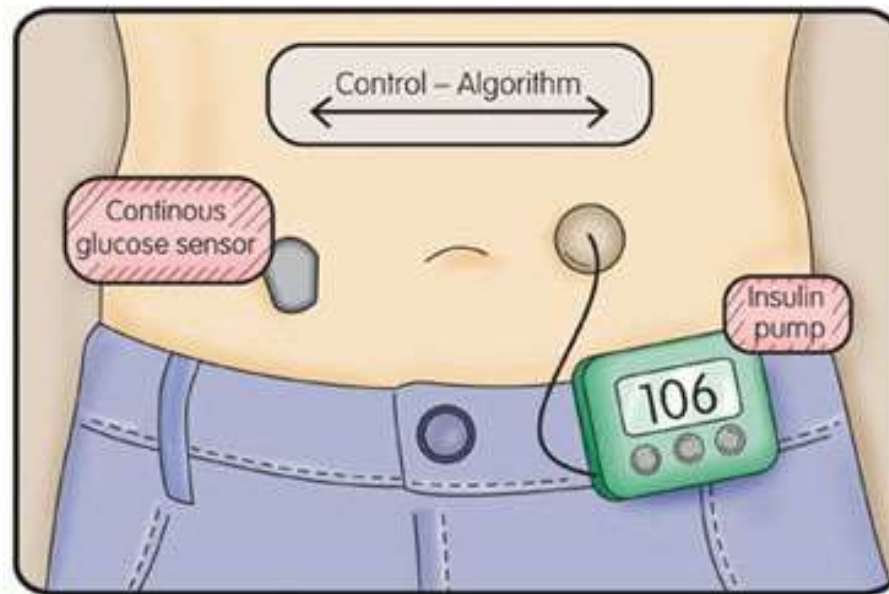
Sistem upravljanja parnim generatorom

Na slici je prikazan primjer multivarijabilnog SAU-a, kod kog se mjeri i reguliše veći broj promjenljivih. Na računaru (regulatoru) su implementirani upravljački algoritmi za proračun upravljačkih signala, a sve u cilju optimalne proizvodnje energije.



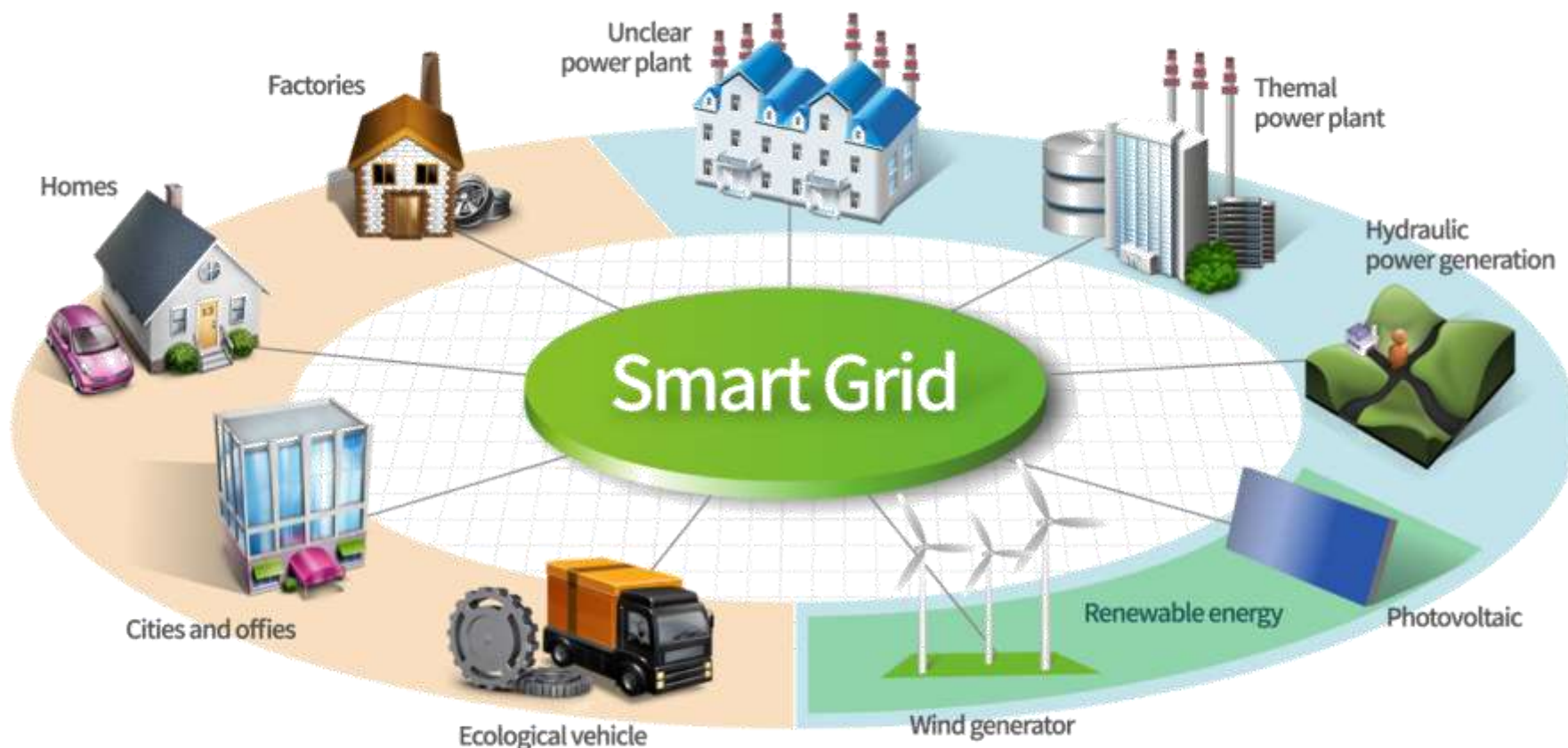
Vještački pankreas

Na slici ispod je prikazan primjer primjene teorije upravljanja u medicini - takozvani vještački pankreas. Osobe koje boluju od dijabetesa tipa 1 moraju svakodnevno sebi da ubrizgavaju insulin. Prevelike količine insulina mogu da uzokuju hiperglikemiju, dok male količine insulina dovode do hipoglikemije. Vještački pankreas automatski reguliše nivo šećera u krvi. Sastoji se od senzora koji mjeri nivo koncentracije glukoze u krvi i kontrolera koji na osnovu razlike između izmjerene i željene vrijednosti koncentracije upravlja pumpom koja ubrizgava insulin u venu.



Smart Grid

Smart Grid je mreža koja koristi informaciono – telekomunikacionu tehnologiju za prikupljanje podataka, monitoring i upravljanje energetsom mrežom sa ciljem povećanja efikasnosti, pouzdanosti i održivosti proizvodnje električne energije. Upravljanje je jedan od ključnih elemenata u realizaciji Smart Grida.



Multi-agent sistemi

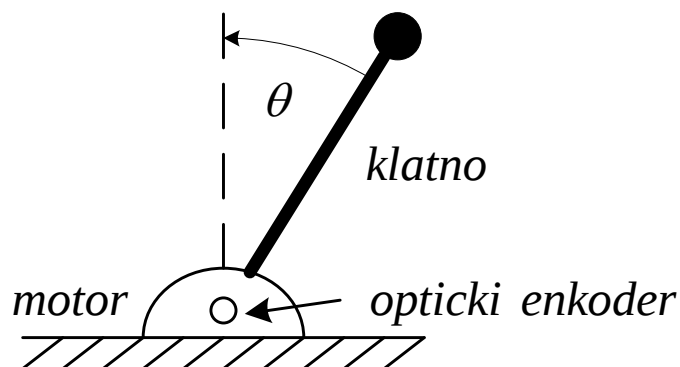
Multi-agent sistemi su moderni sistemi upravljanja u kojima više autonomnih inteligentnih „agenata“ komunicira i dijeli informacije preko mrežne infrastrukture, a sve u svrhu ostvarivanja pojedinačnog ili zajedničkog cilja.



Moderna automatika predstavlja sinergiju teorije upravljanja, računara, komunikacija i elektronike.

Primjeri za vježbu

- a) Autofokusirajuća kamera podešava sočiva objektiva korišćenjem snopa infracrvenih ili ultrazvučnih signala za određivanje udaljenosti od objekta. Skicirajte blok dijagram ovog sistema.
- b) Proces učenja učenik-nastavnik je sam po sebi sistem sa povratnom spregom. Skicirajte model sa povratnom spregom i identifikujte svaki blok u sistemu.
- c) Bepilotne letilice (UAV) su razvijene tako da mogu autonomno da lete duži vremenski period. Nacrtati blok dijagram UAV-a čiji je zadatak monitoring usjeva po zadatoj trajektoriji.
- d) Nacrtajte blok dijagram sistema sa inverznim klatnom, prikazanog na slici.



Mapa kursa

Modelovanje

Klasifikacija sistema

Diferencijalne jednačine

Funkcija prenosa

- Polovi, nule, pojačanje
- Strukturni blok dijagrami

• Graf toka signala

Model u prostoru stanja

- Kanonične forme
- Linearizacija
- Rješavanje jednačina stanja

Analiza

Kontrolabilnost i

opservabilnost

Stabilnost sistema

- Raus
- Nikvist

Performanse SAU-a

- Stacionarno stanje
- Prelazni proces
- Kompleksni domen

Frekvencijske

karakteristike

- Bodeovi dijagrami

Dizajn

Specifikacije sistema

Kompenzatori

- Pojačavač
- Integralni kompenzator
- Diferencijalni kompenzator
- Diferencijalno - integralni kompenzator

PID regulator

Fizičke realizacije

Diskretizacija kontinualnih regulatora