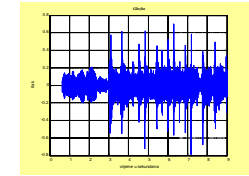


- uvod u predmet
- primjeri audio signala
- primjer glazbene vilice
- primjer tehničkog sustava
 - video prikaz, matematički model, simulacija (MATLAB / Simulink)
- prikaz i označavanje signala
 - kontinuirani signal, diskretni signal

Signali i sustavi

- danas ćemo:
 - pokazati načine definiranja funkcija (signala i sustava)
 - objasniti deklarativne i imperativne definicije
 - razmotriti nekoliko načina definiranja sustava

Kontinuirani signali



- funkciju koja definira signal *Glazba* nije moguće opisati matematičkim izrazom
- primjer kontinuiranog signala koji je moguće opisati matematičkim izrazom
 - primjer idealizirane glazbene vilice 440 Hz

Kontinuirani signali

- nazovimo ovaj signal *CistiTon* i definirajmo ga kao:

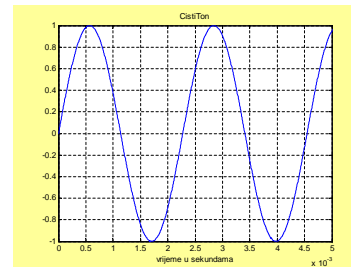
$$CistiTon : Realni \rightarrow Realni$$

gdje je:

$$\forall t \in Realni, CistiTon(t) = A \sin(2\pi \cdot 440 \cdot t) \quad A = 1$$

- ovaj sinusni signal frekvencije 440 Hz odgovara muzičkoj noti A

Kontinuirani signal



Kontinuirani signali

- interesantan je primjer zbroja dvaju signala oblika *CistiTon* koji će dati naslutiti da je i signal *Glazba* zapravo zbroj niza signala oblika *CistiTon* - dakle sinusoida - različitih frekvencija i amplituda
- *ZbrojTonova* je funkcija koja neka predstavlja zbroj dva sinusna signala frekvencija 440 Hz (nota A) i 523 Hz (nota C)

Kontinuirani signali

- funkcija *ZbrojTonova* definirana je tada kao:

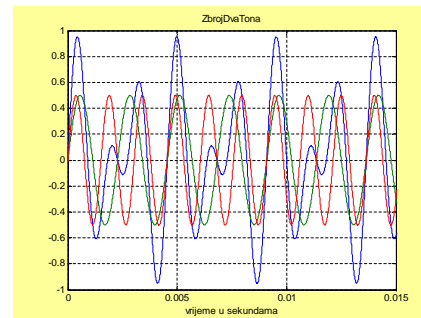
$$ZbrojTonova : Realni \rightarrow Realni$$

gdje je:

$$\forall t \in Realni \quad \wedge \quad A_1 = A_2 = 0.5$$

$$ZbrojTonova(t) = A_1 \sin(2\pi \cdot 440 \cdot t) + A_2 \sin(2\pi \cdot 523 \cdot t)$$

Zbroj dvaju kontinuiranih signala



nota A
440 Hz



nota C
523 Hz




note
A & C




Digital Sound Synthesis

- Four methods for the synthesis of musical sound:
 - **Wavetable Synthesis**
 - Spectral Synthesis
 - Nonlinear Synthesis
 - **Synthesis by Physical Modeling**


▪ **Wavetable Synthesis**

- Recorded or synthesized musical events stored in internal memory and played back on demand
- Playback tools consists of various techniques for sound variation during reproduction such as **pitch shifting**, **looping**, **enveloping** and **filtering**
- Example: Giga Sampler 




▪ **Spectral Synthesis**

- Produces sounds from frequency domain models
- Signal represented as a superposition of basis functions with time-varying amplitudes
- Practical implementation usually consist of a combination of **additive synthesis**, **subtractive synthesis** and **granular synthesis**
- Example: Kawai K500 Demo 

▪ **Nonlinear Synthesis**

- **Frequency modulation method:** Time-dependent phase terms in the sinusoidal basis functions
- An inexpensive method frequently used in synthesizers and in sound cards for PC
- Example: Variation modulation index complex algorithm (Pulsar) 

▪ **Physical Modeling**

- Models the sound production method
- Physical description of the main vibrating structures by partial differential equations
- Most methods based on wave equation describing the wave propagation in solids and in air
- Examples: (CCRMA, Stanford)
 - Guitar with nylon strings 
 - Marimba 
 - Tenor saxophone 

- jednodimenzionalni (1-D) signal je funkcija jedne nezavisne varijable.
- govorni signal je primjer 1-D signala gdje je nezavisna varijabla vrijeme.
- višedimenzionalni (M-D) signal je funkcija više od jedne nezavisne varijable.
- signal slike, kao što je crno-bijela fotografija, je primjer 2-D signala gdje su dvije nezavisne varijable dvije prostorne varijable.



- slika (monokromatska) je dvodimenzionalna funkcija $f(x,y)$ (ili npr. $Leica(x,y)$) gdje su x i y prostorne koordinate a vrijednost funkcije predstavlja svjetlinu (nivo sivila, gray level) slike u toj točki
- slika se može zamisliti kao matrica čiji elementi predstavljaju svjetlinu slike u toj točki
- slikovni element (picture element, pixel, pel)

- ako je monokromatska slika - fotografija prikazana na papiru dimenzija 18 x 19,8 cm tada je ona prikazana kao funkcija:

$$Slika : [0,18] \times [0,19.8] \rightarrow [0, I_{max}]$$

- gdje je I_{max} maksimalna vrijednost sive slike (0 je crno a I_{max} je bijelo)
- skup $[0,18] \times [0,19.8]$ definira površinu papira

- generalno monokromatska slika je funkcija:

$$Slika : VertikalnaOs \times HorizontalnaOs \rightarrow Intenzitet$$

gdje je $Intenzitet = [crno, bijelo]$ mjereno u odgovarajućoj skali

Slika – monokromatska

- konačna memorija i konačna dužina riječi računala zahtijevaju diskretizaciju domene i područja vrijednosti tj. intenziteta
- računalna slika se može tada prikazati kao:

RacunalnaSlika : DiskretnaVertikalnaOs \times DiskretnaHorizontalnaOs \rightarrow Cjelobrojni_s

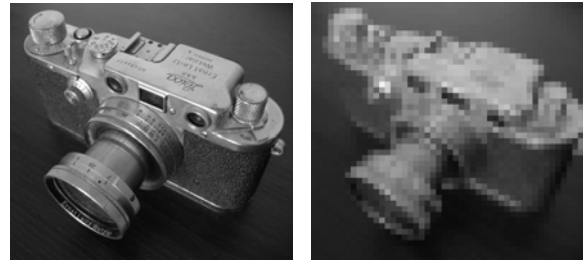
gdje su: DiskretnaVertikalnaOs = {1,2,...,450}
 DiskretnaHorizontalnaOs = {1,2,...,500}
 Cjelobrojni_s = {0,1,2,...,255}

19

Slika – monokromatska

DiskretnaVertikalnaOs={1,2,...,450}
 DiskretnaHorizontalnaOs={1,2,...,500}
 Cjelobrojni_s= {0,1,2,...,255}

DiskretnaVertikalnaOs={1,2,...,45}
 DiskretnaHorizontalnaOs={1,2,...,50}
 Cjelobrojni_s= {0,1,2,...,255}



21

Slika u boji

- reflektirano svjetlo se definira preko RGB (red, green, blue) vrijednosti pa je:

Slika_U_Boji : VertikalnaOs \times HorizontalnaOs \rightarrow Intenzitet³

- bilo kojoj točki (x,y) domene odgovara trojka $(r, g, b) \in$ Intenzitet³

pa su RGB vrijednosti pridružene signalu Slika_U_Boji

$$(r, g, b) = \text{Slika_U_Boji}(x, y)$$

21

Slika u boji

- dakle slika u boji je signal koji se sastoji od tri 2D signala koji predstavljaju tri osnovne boje: crveno (r), zeleno (g) i plavo (b).
- tri komponente slike u boji prikazane su ovim primjerom:



22

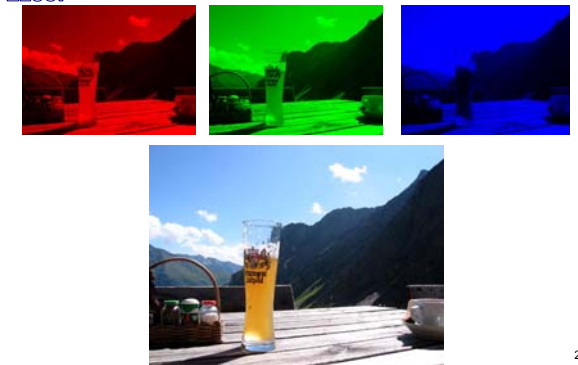
Slika u boji

- potpuna slika u boji dobiva se kombinacijom prethodne tri slike:



23

Slika u boji



24

Video

- Video signal (film) je niz slika koji možemo promatrati kao funkciju tri varijable, i to dvije prostorne i jedne



PAL 625 linija/okviru, 25okvira/s

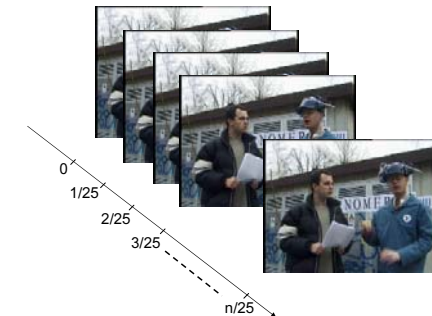
25

Video



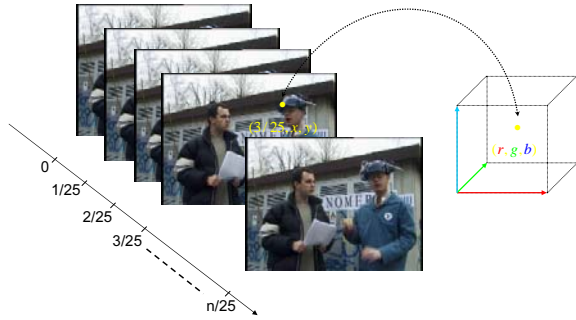
26

Video



27

Video



28

Video

- video signal možemo opisati funkcijom *Video*

$Video : VrijemeOkvira \times VertikalnaOs \times HorizontalnaOs \rightarrow Intenzitet^3$

- bilo kojoj točki (x, y) okvira u diskretnom trenutku t odgovara trojka

$$(r, g, b) \in Intenzitet^3$$

pa su RGB vrijednosti pridružene signalu *Video*

$$(r, g, b) = Video(t, x, y)$$

29

Signali u opisu fizikalnih objekata

- promjena atributa fizikalnih objekata ili uređaja mogu se prikazati funkcijama vremena ili prostora

- primjer trajektorije zrakoplova:

$$Pozicija : Vrijeme \rightarrow Realni^3$$

gdje je

$$\forall t \in Vrijeme, Pozicija(t) = (x(t), y(t), z(t))$$

pozicija zrakoplova u trodimenzionalnom prostoru u trenutku t .

30

Signali u opisu fizikalnih objekata

- pozicija i brzina zrakoplova može biti opisana funkcijom:

$$PozicijaBrzina : Vrijeme \rightarrow Realni^6$$

gdje je

$$\forall t \in Vrijeme, PozicijaBrzina(t) = (x(t), y(t), z(t), v_x(t), v_y(t), v_z(t))$$

31

Nizovi simbola

- često se informacija prikazuje kao niz simbola a ne kao funkcija vremena ili prostora

- nizovi simbola se pojavljuju kao

- podaci
- tok događaja

- nizovi simbola specijalna vrsta funkcija

32

Nizovi simbola – podaci

- primjer N -bitne binarne datoteke

$$b_1, b_2, b_3, \dots, b_N \quad b_i \in Binarni = \{0, 1\}$$

- ovu datoteku tj. niz simbola možemo promotriti kao funkciju

$$Datoteka : \{1, 2, \dots, N\} \rightarrow Binarni$$

s definiranim pridruživanjem

$$Datoteka(n) = b_n, \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, N\}$$

33

Nizovi simbola - podaci

- primjer teksta dužine N riječi
- neka je kodomena skup *HrvatskeRiječi* tada tekst dužine N riječi možemo prikazati kao funkciju

$$HrvatskiTekst : \{1, 2, \dots, N\} \rightarrow HrvatskeRiječi$$

34

Nizovi simbola - podaci

- općenito niz podataka može biti prikazan kao funkcija

$$Podaci : Indeksi \rightarrow Simboli$$

gdje su $Indeksi \subset Prirodni$

Indeksi su dakle skup odgovarajućih prirodnih brojeva a *Simboli* odgovarajući skup simbola kao što su to bili *Binarni* ili *HrvatskeRiječi*

35

Nizovi simbola – tok događaja

- primjer toka događaja prigodom telefonskog poziva

- uobičajeni niz događaja je

$$DigniSlusalicu, CujTonBiranje, BirajBroj, CujTelefonskoZvono, CujOdgovorNazvanog, \dots$$

36

Nizovi simbola – tok događaja

- u slučaju zauzeće niz događaja je
DigniSlusalicu, CujTonBiranja, BirajBroj, CujTonZauzeća,...
- tok događaja može također biti prikazan funkcijom
TokDogadjaja : Indeksi → Simboli

37

Diskretni signali i otipkavanje (uzorkovanje)

- diskretni signali po definiciji
 - dnevni tečaj stranih valuta,
 - dnevne cijene dionica,
 - godišnji broj studenata na pojedinim studijima,
 - godišnji broj putnika na pojedinim letovima.
- diskretni signali nastali otipkavanjem vremenski kontinuiranih signala

38

Diskretni signali i otipkavanje (uzorkovanje)

- vremenski kontinuirani signal *Glazba* otipkan frekvencijom otipkavanja 10 kHz (interval otipkavanja 0.0001 sec) definiran je samo u diskretnim trenucima vremena
OtipkanaGlazba : {0, 0.0001, 0.0002, ..., 9.9999, 10} → Tlak s pridruživanjem
 $OtipkanaGlazba(t) = Glazba(t)$
 $\forall t \in \{0, 0.0001, 0.0002, \dots, 9.9999, 10\}$

39

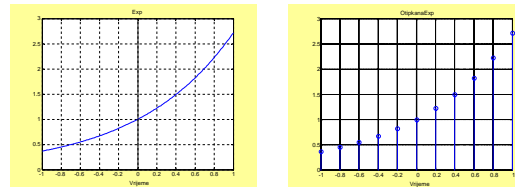
Diskretni signali i otipkavanje (uzorkovanje)

- vremenski kontinuirani signal opisan eksponencijalnom funkcijom *Exp* otipkavamo s intervalom otipkavanja 0.2 sec
- funkcija
 $Exp : [-1, 1] \rightarrow Realni$
definirana je pridruživanjem
 $Exp(t) = e^t, \forall t \in [-1, 1]$

40

Diskretni signali i otipkavanje (uzorkovanje)

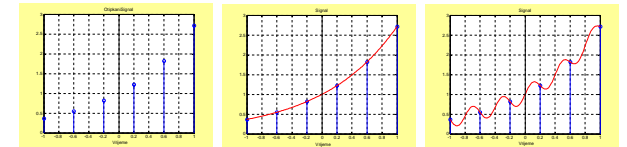
- diskretni signal *OtipkanaExp* dobiven otipkavanjem *Exp* je
 $OtipkanaExp : \{-1, -0.8, \dots, 0.8, 1\} \rightarrow Realni$



41

Otipkavanje i rekonstrukcija

- neka je diskretni signal *OtipkaniSignal* dobiven otipkavanjem kontinuiranog signala *Signal*
- je li moguća rekonstrukcija *OtipkaniSignal* → *Signal* ?

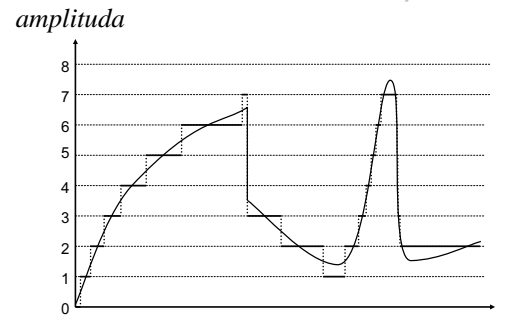


Kvantizacija područja vrijednosti

- prethodni primjeri signala *Glazba*, *Exp*, *OtipkanaGlazba* ili *OtipkanaExp* pretpostavljaju kodomenu iz kontinuiranog intervala $[a, b]$ što rezultira beskonačnim brojem mogućih vrijednosti
- kvantizacijom intervala područja vrijednost postizemo konačni broj mogućih vrijednosti signala

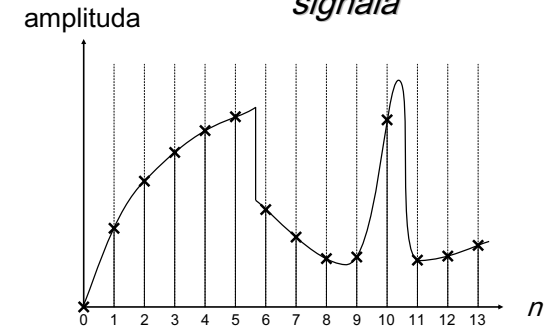
43

Primjer – kontinuirani signal s kvantiziranom amplitudom



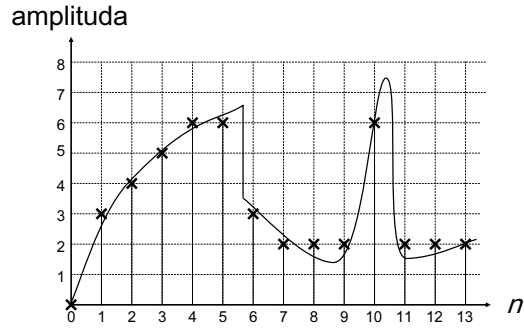
44

Primjer – otipkavanje vremenski kontinuiranog signala



45

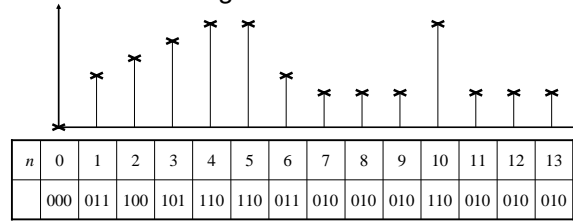
Primjer – kvantizacija po amplitudi i vremenu



46

Digitalni signali

- Vremenski diskretan signal s kvantiziranim amplitudama, prikazan uz pomoć konačnog broja znamenaka naziva se digitalnim



47

Funkcije

- funkcija definira odnos dvaju skupova: domene i kodomene (područja vrijednosti)
- ako svakom elementu iz domene odgovara jedan element iz kodomene tada je funkcija $f: X \rightarrow Y$ (**preslikavanje jedan - jedan**) dakle vrijedi $\forall x_1 \in X \wedge \forall x_2 \in X, x_1 \neq x_2 \Rightarrow f(x_1) \neq f(x_2)$
- više elemenata domene može biti pridruženo jednom elementu u kodomeni

48

Funkcije

- ako svi elementi kodomene imaju svoj par u domeni onda je funkcija $f: X \rightarrow Y$ (preslikavanje **na**) i vrijedi

$$\forall y \in Y \exists x \in X, f(x) = y$$

49

Funkcije – deklarativno pridruživanje

- neka je funkcija
 $Exp: Kompleksni \rightarrow Kompleksni$
definirana pridruživanjem

$$\forall z \in Kompleksni, Exp(z) = e^z = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n}{n!}$$

- definicija funkcije Exp deklarativna je jer ona deklarativno definira svojstva funkcije bez direktnog objašnjenja kako realizirati funkciju

50

Funkcije – deklarativno pridruživanje

- općenito, deklarativna definicija funkcije f je kako slijedi

$$f: X \rightarrow Y$$

uz

$$\forall x \in X, f(x) = \text{matematički izraz po } x$$

- ovdje definiramo svaki element kodomene za svaki element domene ali ne definirajući kako ga izračunati

51

Funkcije – procedure

- odnos između elemenata domene i kodomene može biti dan procedurom u nekom standardnom jeziku
- procedure se nazivaju **imperativnim** definicijama funkcija budući one daju metodu kako pridružiti elemente domene i kodomene
- slijedi primjer imperativne definicije funkcije Exp

52

Funkcije – imperativno pridruživanje

```
% Izracunaj exp(z).
pomocni_rezultat = 0;
pomocni_z = 1;
pomocni_i = 1;
for i = 1 : n
    pomocni_rezultat = pomocni_rezultat + pomocni_z / pomocni_i;
    pomocni_z = pomocni_z * z;
    pomocni_i = pomocni_i * i;
end
```

```
% Vрати dobiveni rezultat.
rezultat = pomocni_rezultat;
```

53

Funkcije – procedure

- deklarativna i imperativna definicija funkcije nisu nužno iste
- tako je npr. u slučaju funkcije $Exp(z)$ njezina imperativna definicija, uz pomoć prethodne procedure za izračunavanje, tek aproksimacija $Exp(z)$

54

Funkcije – tablice

- veza elemenata domene i kodomene može se dati eksplicitno putem tablica

- primjer:

| domena | kodomena |
|--------|----------|
| 1 | A |
| 2 | C |
| 3 | I |
| 4 | L |
| 6 | B |
| 6 | A |
| 7 | T |

tablica je imperativna definicija funkcije

55

Funkcije – grafovi

- veza elemenata domene i kodomene može se dati i pomoću grafa

- graf je podskup od $X \times Y$ i definiran je kao

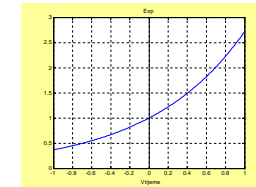
$$\begin{aligned} \text{graf}(f) &= \{(x, y) | x \in X \wedge y = f(x)\} \\ &= \{(x, f(x)) | x \in X\} \end{aligned}$$

56

Funkcije – grafovi

- prikazan je graf funkcije Exp ,

$$\text{graf}(Exp) = \{(t, e^t) | t \in [-1, 1]\}$$



57

Funkcije – kompozicija

- nova funkcija može biti definirana (dobivena) kompozicijom prije definiranih funkcija

- neka su definirane dvije funkcije f_1 i f_2

$$f_1 : X \rightarrow Y$$

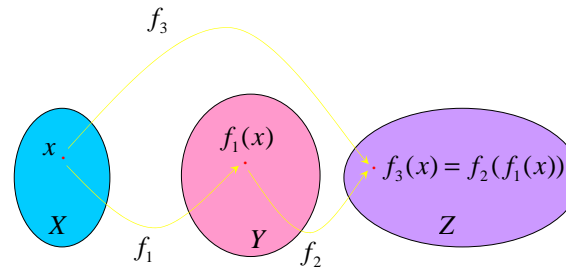
$$f_2 : Y \rightarrow Z$$

tada je $f_3 : X \rightarrow Z$ i vrijedi

$$\forall x \in X, \quad f_3(x) = (f_2 \circ f_1)(x) = f_2(f_1(x))$$

58

Funkcije – kompozicija



59

Funkcije – kompozicija

- ovako definirana funkcija naziva se kompozicija funkcija i označava se

$$f_3 = f_2 \circ f_1$$

60

Klasa signala, prostor signala, prostor funkcija

- neka je signal $u : D \rightarrow K$
- skup U svih signala u naziva se klasom ili prostorom signala ili prostorom funkcija

- pišemo:

$$U = [D \rightarrow K] = \{u | u : D \rightarrow K\}$$

čitamo “ U , što možemo i pisati kao $[D \rightarrow K]$, je skup svih u takovih da $u : D \rightarrow K$ ”

61

Klasa signala, prostor signala, prostor funkcija

- skup svih signala *Glazba* trajanja $[0, 1]$ i područja vrijednosti *Tlak* se tada može pisati

$$\text{GlazbaSignali} = [[0, 1] \rightarrow \text{Tlak}]$$

- skup svih binarnih datoteka duljine N je

$$\text{BinarneDatoteke} = [\text{Indeksi} \rightarrow \text{Binarni}]$$

gdje su $\text{Indeksi} = [1, 2, \dots, N]$

62

Sustavi kao funkcije

- sustav S je funkcija i transformira ulazni signal u u izlazni signal y pa je

$$y = S(u)$$

- sustav S je dakle funkcija koja preslikava prostor signala u prostor signala

$$S : [D_x \rightarrow R_x] \rightarrow [D_y \rightarrow R_y]$$

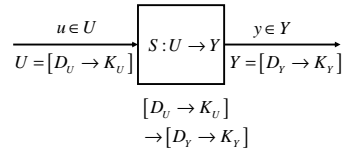
63

Sustavi kao funkcije

- sustav S je dakle sveukupnost ul./izl. parova (u, y)

$$S = \{(u, y) \mid u \in U, y \in Y\}$$

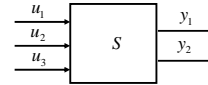
- sustav S se prikazuje blokom



64

Sustavi kao funkcije

- sustavi mogu imati više ulaza i više izlaza
- za ovakve sustave često se koristi engleska skraćenica MIMO (multiple-input multiple-output)



65

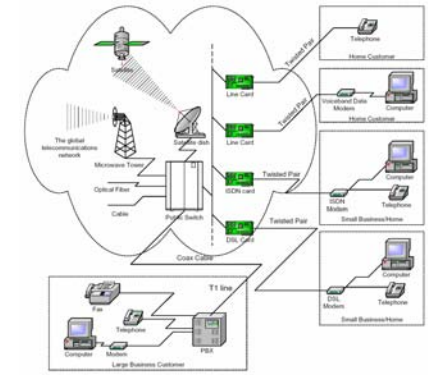


Figure 1.14: A portion of the global telecommunications network.

Source: Edward A. Lee and Pravin Varaiya: Structure and Interpretation of Signals and Systems, author permission

66

Primjeri sustava

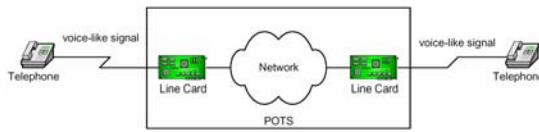


Figure 1.15: Abstraction of plain-old telephone service (POTS).

Source: Edward A. Lee and Pravin Varaiya: Structure and Interpretation of Signals and Systems, author permission

67

Primjeri sustava

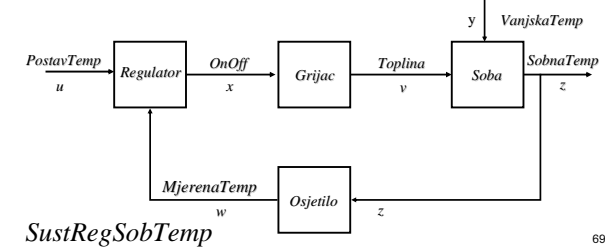


The 2003 S430 Sedan

68

Sustav regulacije sobne temperature

- sustav grijanja putem toplog zraka za zagrijavanje sobe na zadanu temperaturu



SustRegSobTemp

69

Sustav s povratnom vezom

- prva zadaća je specificirati domenu i kodomenu za ulaze i izlaze svih komponenti sustava
- za međusobno povezane komponente treba osigurati podudarnost izlaza jedne s ulazom druge povezane komponente

70

Sustav s povratnom vezom



- grijač – generira topli zrak kada je uključen tj. *On*
- OnOff*, ulazni signal u grijač, je funkcija vremena koja poprima jednu od dvije vrijednosti *On* ili *Off*

$$OnOff : Vrijeme \rightarrow \{On, Off\}$$

71

Sustav s povratnom vezom

- promatramo realni grijač pa je

$$Vrijeme = Realni_+$$

- prostor ulaznih signala u grijač definiran je tada klasom

$$OnOffKlasa = [Realni_+ \rightarrow \{On, Off\}]$$

72

Sustav s povratnom vezom

- kada je grijač On generira iznos topline koja ovisi o njegovoj ugrađenoj snazi grijanja (kW ili BTU/h)
- izlazni signal iz grijača - $Toplina$ - je funkcija:

$$Toplina : Realn_+ \rightarrow \{O, B_c\}$$

- prostor izlaznih signala iz grijača označimo klasom

$$ToplinaKlasa = [Realn_+ \rightarrow \{O, B_c\}]$$

73

Sustav s povratnom vezom

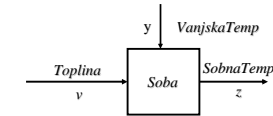


- sustav $Grijac$ opisujemo tada funkcijom

$$Grijac : OnOffKlasa \rightarrow ToplinaKlasa$$

74

Sustav s povratnom vezom



- temperatura sobe ovisi o toplini koju generira grijač i o vanjskoj temperaturi pa je ulazni signal par ($Toplina$, $VanjskaTemp$)

75

Sustav s povratnom vezom

- vanjska temperatura označena kao signal $VanjskaTemp$ je funkcija

$$VanjskaTemp : Realn_+ \rightarrow [min, max]$$

gdje je $[min, max]$ područje mogućih vanjskih temperatura mjerenih u stupnjevima Celzija

- slično se opisuje izlazni signal sustava $Soba$

$$SobnaTemp : Realn_+ \rightarrow [min, max]$$

76

Sustav s povratnom vezom

- prostori ulaznih i izlaznih signala sustava $Soba$ su

$$ToplinaKlasa = [Realn_+ \rightarrow \{O, B_c\}]$$

$$VanjskaTempKlasa = [Realn_+ \rightarrow [min, max]]$$

$$SobnaTempKlasa = [Realn_+ \rightarrow [min, max]]$$

- ponašanje sustava $Soba$ može se opisati funkcijom

$$Soba : ToplinaKlasa \times VanjskaTempKlasa \rightarrow SobnaTempKlasa$$

77

Sustav s povratnom vezom

- prostori ulaznih i izlaznih signala sustava $Osjetilo$ su
- $$SobnaTempKlasa = [Realn_+ \rightarrow [min, max]]$$
- $$MjerenaTempKlasa = [Realn_+ \rightarrow [min, max]]$$
- ponašanje sustava $Osjetilo$ opisuje se tada funkcijom

$$Osjetilo : SobnaTempKlasa \rightarrow MjerenaTempKlasa$$

78

Sustav s povratnom vezom

- prostori ulaznih i izlaznih signala sustava $Regulator$ su

$$PostavTempKlasa = [Realn_+ \rightarrow [min, max]]$$

$$MjerenaTempKlasa = [Realn_+ \rightarrow [min, max]]$$

$$OnOffKlasa = [Realn_+ \rightarrow \{On, Off\}]$$

- ponašanje sustava $Regulator$ opisuje se tada funkcijom

$$Regulator : PostavTempKlasa \times MjerenaTempKlasa \rightarrow OnOffKlasa$$

79

Sustav s povratnom vezom

- finalno moguće je uz definirane prostore ulaznih i izlaznih signala cjelokupnog sustava regulacije sobne temperature

$$PostavTempKlasa = [Realn_+ \rightarrow [min, max]]$$

$$VanjskaTempKlasa = [Realn_+ \rightarrow [min, max]]$$

$$SobnaTempKlasa = [Realn_+ \rightarrow [min, max]]$$

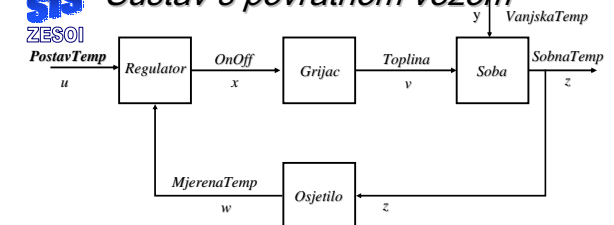
definirati funkciju koja ga opisuje

$$SustRegSobTemp : PostavTempKlasa \times$$

$$VanjskaTempKlasa \rightarrow SobnaTempKlasa$$

80

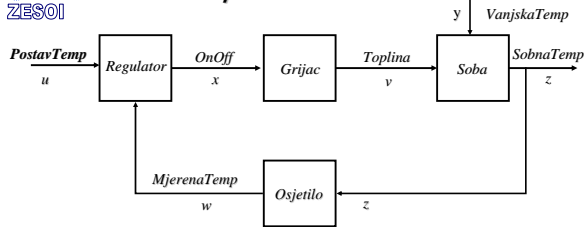
Sustav s povratnom vezom



- za zadani ulazni signal u postavljene temperature i uz dane vrijednosti y vanjske temperature možemo izračunati $z = SustRegSobTemp(u, y)$ rješavanjem četiri simultanih jednažbi

81

Sustav s povratnom vezom



$$x = \text{Regulator}(u, w)$$

$$v = \text{Grijac}(x)$$

$$z = \text{Soba}(y, v)$$

$$w = \text{Osjetilo}(z)$$

82

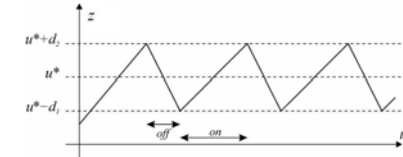
Sustav s povratnom vezom

- da bi se riješile ove jednačbe potrebno je specificirati ponašanje svakog od sustava *Osjetilo*, *Regulator*, *Grijac*, *Soba*,
- postavljena temperatura neka je konstanta u^* tada je za svaki t iz skupa $Realni_+$, $u(t) = u^*$
- očekuje se da temperatura sobe fluktuirá oko postavljene temperature u^*

83

Sustav s povratnom vezom

- za potrebe ovog primjera pretpostavimo da se u sustavu *Soba* temperatura linearno mijenja



84

Sustav s povratnom vezom

- uloga komponente *Osjetilo* je mjerenje temperature sobe pa je stoga

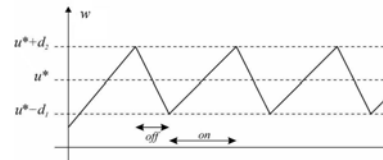
$$w(t) = \text{Osjetilo}(z)(t) = z(t)$$

$$\text{za } \forall z \wedge \forall t \in Realni_+$$

85

Sustav s povratnom vezom

- komponentu *Regulator* se, za sve u, w , te za svaki t iz skupa $Realni_+$, opisuje na slijedeći način
- $$x(t) = \text{Regulator}(u, w)(t) = \begin{cases} \text{On}, & \text{ako } w(t) - u(t) \leq -d_1 \\ \text{Off}, & \text{ako } w(t) - u(t) \geq d_2 \end{cases}$$



86

Sustav s povratnom vezom



- komponentu *Grijac* se, za svaki x te za svaki t iz skupa $Realni_+$, opisuje na slijedeći način

$$v(t) = \text{Grijac}(x)(t) = \begin{cases} 0, & \text{ako } x(t) = \text{Off} \\ B_c, & \text{ako } x(t) = \text{On} \end{cases}$$

87