Podsjetimo se…

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

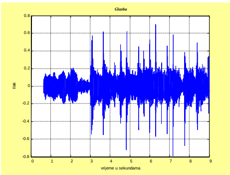
1

Signali i sustavi

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

2

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

3

Kontinuirani signali

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

$$CistiTon : Realni \rightarrow Realni$$

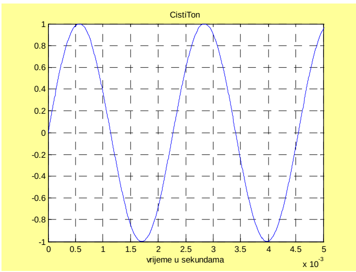
gdje je:

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

- ovaj sinusni signal frekvencije 440 Hz odgovara muzičkoj noti A

4

Kontinuirani signal



5

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)

6

Kontinuirani signali

- funkcija *ZbrojTonova* definirana je tada kao:

$$ZbrojTonova : Realni \rightarrow Realni$$

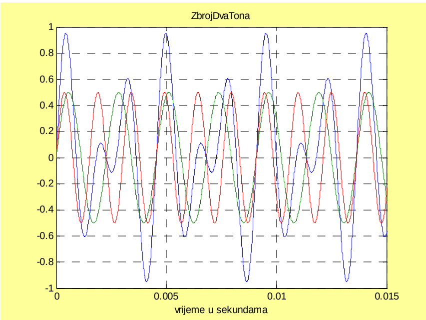
gdje je:

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

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

7

Zbroj dvaju kontinuiranih signala



nota A 440 Hz

nota C 523 Hz

note A & C

8

Digital Sound Synthesis

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

Dobrotom autora: Prof. dr. Sanjit Mitra, University of California, Santa Barbara

9

Digital Sound Synthesis

- 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

Dobrotom autora: Prof. dr. Sanjit Mitra, University of California, Santa Barbara 10

Digital Sound Synthesis

- 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: Kawaii K500 Demo

Dobrotom autora: Prof. dr. Sanjit Mitra University of California, Santa Barbara 11

Digital Sound Synthesis

- 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)

Dobrotom autora: Prof. dr. Sanjit Mitra, University of California, Santa Barbara 12

Digital Sound Synthesis

- 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

Dobrotom autora: Prof. dr. Sanjit Mitra, University of California, Santa Barbara

13

Višedimenzionalni signali

- 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.

14

Slika – monokromatska

15

Slika – monokromatska

- 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)

16

Slika – monokromatska

- 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 $[0,18]$x$[0,19.8]$ definira površinu papira

17

Slika – monokromatska

- generalno monokromatska slika je funkcija:

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

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

18

Slika – monokromatska

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

$$RacunalnaSlika : DiskretnaVertikalnaOs \times DiskretnaHorizontalnaOs \rightarrow Cjelobrojni_8$$

gdje su: $DiskretnaVertikalnaOs = \{1,2,\ldots,450\}$

$DiskretnaHorizontalnaOs = \{1,2,\ldots,500\}$

$Cjelobrojni_8 = \{0,1,2,\ldots,255\}$

19

Slika – monokromatska

DiskretnaVertikalnaOs={1,2,….,450}
DiskretnaHorizontalnaOs={1,2,…,500}
Cjelobrojni8={0,1,2,…..,255}

DiskretnaVertikalnaOs={1,2,….,45}
DiskretnaHorizontalnaOs={1,2,…,50}
Cjelobrojni8={0,1,2,…..,255}

20

Slika u boji

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

$$Slika\_U\_Boji : VertikalnaOs \times HorizontalnaOs \rightarrow Intenzitet^3$$

- bilo kojoj točki (x,y) domene odgovara trojka $(r,g,b) \in Intenzitet^3$

pa su RGB vrijednosti pridružene signalu *Slika_U_Boji*

$$(r,g,b) = Slika\_U\_Boji(x,y)$$

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

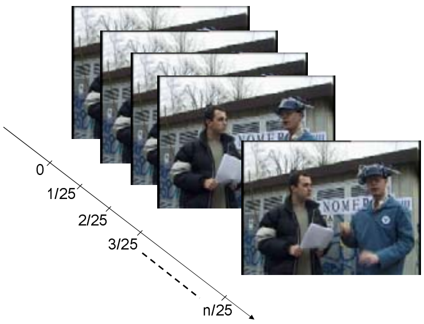
slika 1

slika 2

slika 3

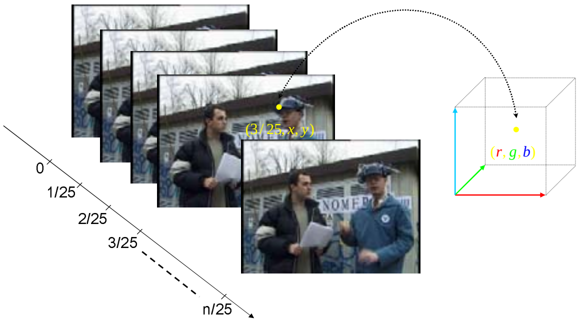
26

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

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

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

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

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

$$b_1, b_2, b_3, ..., b_N \qquad b_i \in Binarni = \{0,1\}$$

- ovu datoteku tj. niz simbola možemo promotriti kao funkciju

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

s definiranim pridruživanjem

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

33

Nizovi simbola - podaci

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

$$HrvatskiTekst : \{1, 2, ..., N\} \to HrvatskeRiječi$$

34

Nizovi simbola - podaci

- općenito niz podataka može biti prikazan kao funkcija

$$Podaci : Indeksi \to Simboli$$

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

$$DigniSlusalicu, CujTonBiranja, BirajBroj,$$
$$CujTelefonskoZvono, CujOdgovorNazvanog, ...$$

36

Nizovi simbola – tok događaja

- u slučaju zauzeće niz događaja je

$DigniSlusalicu, CujTonBiranja, BirajBroj,$
$CujTonZauzeca, \ldots$

- tok događaja može također biti prikazan funkcijom

$$TokDogadjaja : Indeksi \rightarrow Simboli$$

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

$$OtipkanaGlazba : \{0, 0.0001, 0.0002, \ldots., 9.9999, 10\} \rightarrow Tlak$$

s pridruživanjem

$$OtipkanaGlazba(t) = Glazba(t)$$
$$\forall t \in \{0, 0.0001, 0.0002, \ldots., 9.9999, 10\}$$

39

Diskretni signali i otipkavanje (*uzorkovanje*)

- vremenski kontinuirani signal opisan eksponencijalnom funkcijom Exp otipkavamo s intervalom otipkavanja 0.2 sec

- funkcija

$$Exp : [-1,1] \to Realni$$

definirana je pridruživanjem

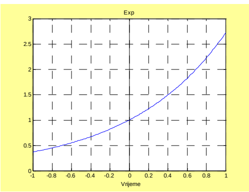
$$Exp(t) = e^{t}, \quad \forall t \in [-1,1]$$

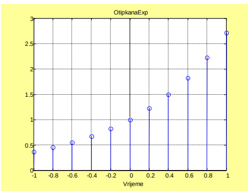
40

Diskretni signali i otipkavanje (*uzorkovanje*)

- diskretni signal $OtipkanaExp$ dobiven otipkavanjem Exp je

$$OtipkanaExp : \{-1, -0.8, ...0.8, 1\} \to Realni$$

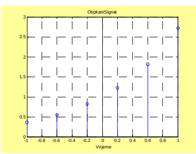


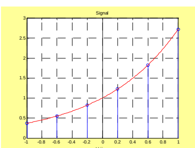


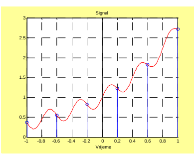
41

Otipkavanje i rekonstrukcija

- neka je diskretni signal $OtipkaniSignal$ dobiven otipkavanjem kontinuiranog signala $Signal$
- je li moguća rekonstrukcija $OtipkaniSignal \to Signal$?





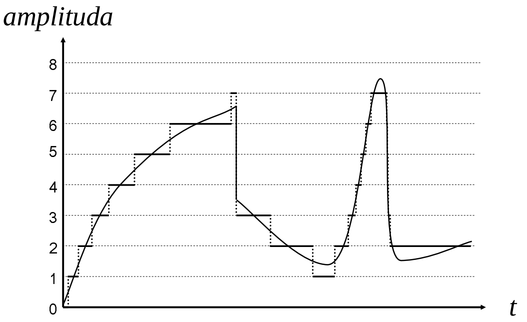


Kvantizacija područja vrijednosti

- 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 postižemo konačni broj mogućih vrijednosti signala

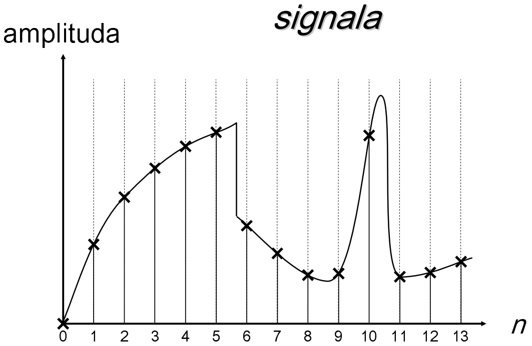
43

Primjer – kontinuirani signal s kvantiziranom amplitudom



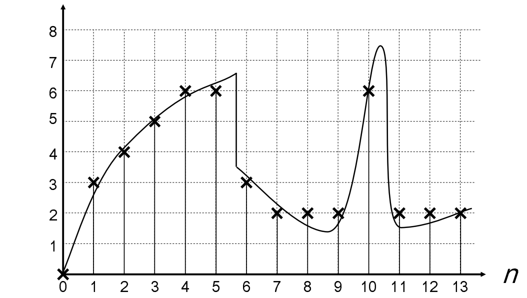
44

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

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	000	011	100	101	110	110	011	010	010	010	110	010	010	010

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

$$\forall x_1 \in X \wedge \forall x_2 \in X, \quad x_1 \neq x_2 \Rightarrow f(x_1) \neq f(x_2)$$

- više elemenata domene može biti pridruženo jednom elementu u kodomeni

48

Funkcije

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

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

49

Funkcije – deklarativno pridruživanje

- neka je funkcija

$$Exp : Kompleksni \to Kompleksni$$

definirana pridruživanjem

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

- 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

$$f : X \to Y$$

uz

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

- 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

% Vrati 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

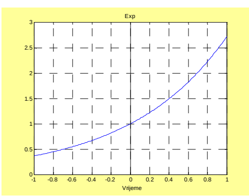
$$graf(f) = \{(x, y) | x \in X \wedge y = f(x)\}$$
$$= \{(x, f(x)) | x \in X\}$$

56

Funkcije – grafovi

- prikazan je graf funkcije Exp,

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



57

Funkcije – kompozicija

- nova funkcija može biti definirana (dobivena) kompozicijom prije definiranih funkcija
- neka su definirane dvije funkcije f_1 i f_2

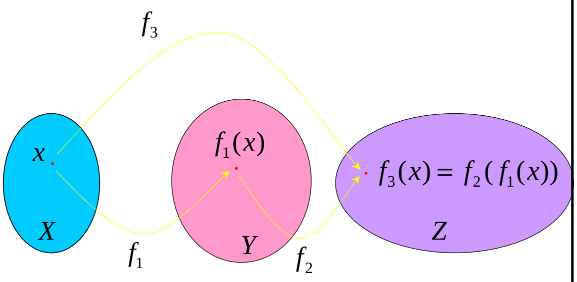
$$f_1 : X \to Y$$
$$f_2 : Y \to Z$$

tada je $f_3 : X \to Z$ 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 $u: D \to K$
- skup U svih signala u naziva se klasom ili prostorom signala ili prostorom funkcija
- pišemo: $$U = [D \to K] = \{u | u : D \to K\}$$

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

61

Klasa signala, prostor signala, prostor funkcija

- skup svih signala *Glazba* trajanja $[0,1]$ i područja vrijednosti *Tlak* se tada može pisati
$$GlazbaSignali = [[0,1] \to Tlak]$$
- skup svih binarnih datoteka duljine N je
$$BinarneDatoteke = [Indeksi \to Binarni]$$

gdje su $Indeksi = [1,2,\ldots,N]$

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
$$S : [D_X \to R_X] \to [D_Y \to R_Y]$$

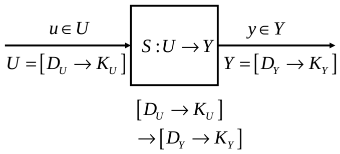
63

Sustavi kao funkcije

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

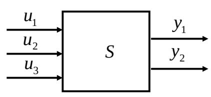
$$S = \{(u, y) | u \in U, y \in Y\}$$

- sustav S se prikazuje blokom



Sustavi kao funkcije

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



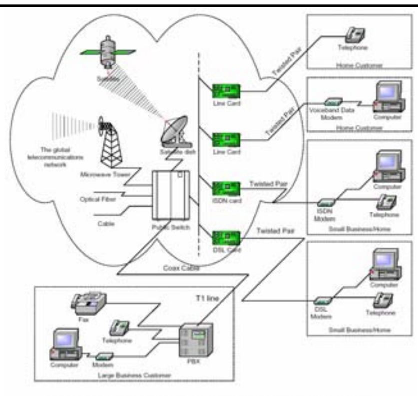


Figure 1.14: A portion of the global telecommunications network.

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

Primjeri sustava

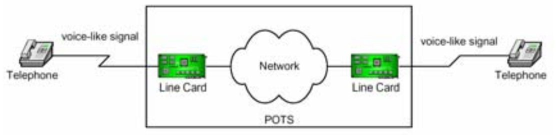


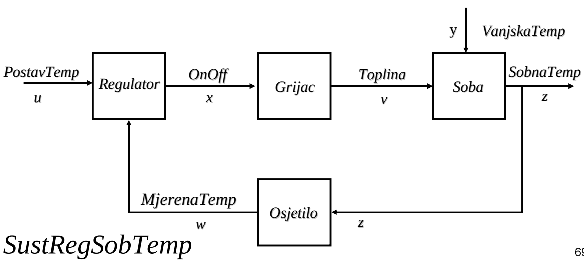
Figure 1.15: Abstraction of plain-old telephone service (POTS).

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

Primjeri sustava

Sustav regulacije sobne temperature

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



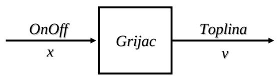
SustRegSobTemp

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

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

71

Sustav s povratnom vezom

- promatramo realni grijač pa je

$$Vrijeme = Realni_+$$

- prostor ulaznih signala u grijač definiran je tada klasom

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

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:

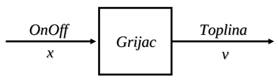
$$Toplina : Realni_{+} \to \{O, B_c\}$$

- prostor izlaznih signala iz grijača označimo klasom

$$ToplinaKlasa = [Realni_{+} \to \{O, B_c\}]$$

73

Sustav s povratnom vezom

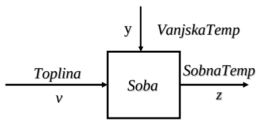


- sustav *Grijac* opisujemo tada funkcijom

$$Grijac : OnOffKlasa \to ToplinaKlasa$$

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

$$VanjskaTemp : Realni_{+} \to [min, max]$$

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

- slično se opisuje izlazni signal sustava $Soba$

$$SobnaTemp : Realni_{+} \to [min, max]$$

76

Sustav s povratnom vezom

- prostori ulaznih i izlaznih signala sustava $Soba$ su

$$ToplinaKlasa = \left[Realni_{+} \to \{O, B_c\} \right]$$

$$VanjskaTempKlasa = \left[Realni_{+} \to [min, max] \right]$$

$$SobnaTempKlasa = \left[Realni_{+} \to [min, max] \right]$$

- ponašanje sustava $Soba$ može se opisati funkcijom

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

77

Sustav s povratnom vezom

- prostori ulaznih i izlaznih signala sustava $Osjetilo$ su

$$SobnaTempKlasa = \left[Realni_{+} \to [min, max] \right]$$

$$MjerenaTempKlasa = \left[Realni_{+} \to [min, max] \right]$$

- ponašanje sustava $Osjetilo$ opisuje se tada funkcijom

$$Osjetilo : SobnaTempKlasa \to MjerenaTempKlasa$$

78

Sustav s povratnom vezom

- prostori ulaznih i izlaznih signala sustava *Regulator* su

$$PostavTempKlasa = [Realni_+ \to [min, max]]$$

$$MjerenaTempKlasa = [Realni_+ \to [min, max]]$$

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

- ponašanje sustava *Regulator* opisuje se tada funkcijom

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

Sustav s povratnom vezom

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

$$PostavTempKlasa = [Realni_+ \to [min, max]]$$

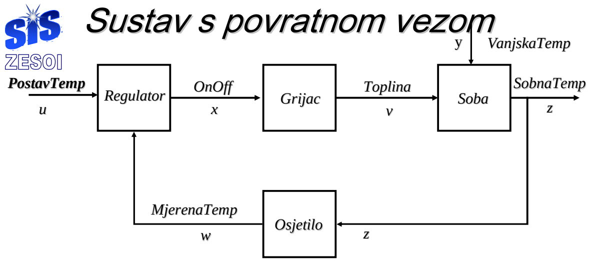
$$VanjskaTempKlasa = [Realni_+ \to [min, max]]$$

$$SobnaTempKlasa = [Realni_+ \to [min, max]]$$

definirati funkciju koja ga opisuje

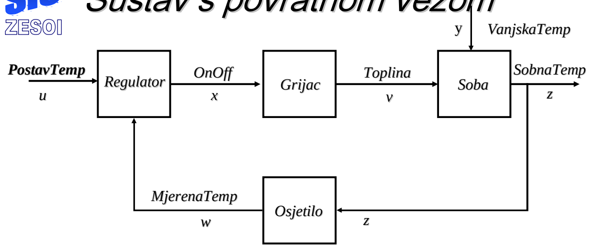
$$SustRegSobTemp : PostavTempKlasa \times VanjskaTempKlasa \to SobnaTempKlasa$$

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 jednadžbi

Sustav s povratnom vezom



$$x = Regulator(u, w)$$
$$v = Grijac(x)$$
$$z = Soba(y, v)$$
$$w = Osjetilo(z)$$

82

Sustav s povratnom vezom

- da bi se riješile ove jednadžbe potrebno je specificirati ponašanje svakog od sustava *Osjetilo*, *Regulator*, *Grijac*, *Soba*,
- postavljena temperatura neka je konstanta u^* tada je za svaki t iz skupa $Realni_+$,

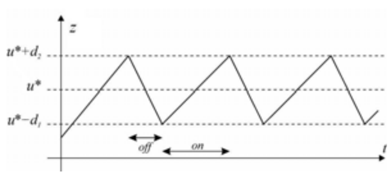
$$u(t) = u^*$$

- očekuje se da temperatura sobe fluktuira 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

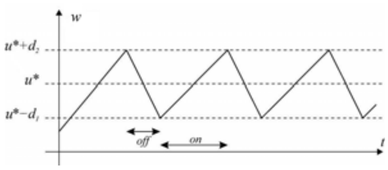
$$w(t) = Osjetilo(z)(t) = z(t)$$

za $\forall z \quad \wedge \quad \forall t \in Realni_+$

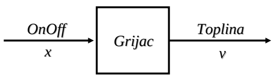
Sustav s povratnom vezom

- komponentu *Regulator* se, za sve u, w, te za svaki t iz skupa $Realni_+$, opisuje na slijedeći način

$$x(t) = Regulator(u,w)(t) = \begin{cases} On, \text{ako } w(t) - u(t) \le -d_1 \\ Off, \text{ako } w(t) - u(t) \ge d_2 \end{cases}$$



Sustav s povratnom vezom



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

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