

Podjela adaptivnog upravljanja

http://www.fer.hr/predmet/aru_a

prof. dr. sc. Željko Ban

e-mail: zeljko.ban@fer.hr

1



Sadržaj predavanja

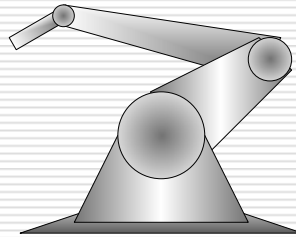


- ☐ Nastavak prikaza primjera sustava s promjenjivim parametrima ili radnom točkom
- ☐ Podjela adaptivnih regulatora
- ☐ Primjeri kad ne treba koristiti adaptivno upravljanje
- ☐ Adaptivni regulator s podesivim pojačanjem
- ☐ Ekstremalni adaptivni regulator

Sustavi nepogodni za klasične regulatore

Prim. 4. Robotska ruka

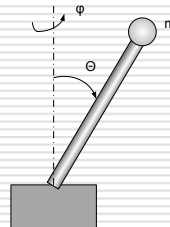
- Promjena momenta inercije robotske ruke
- Uzrok
 - Robot je nelinearan sustav
 - Moment inercije je ovisan o geometriji robota (*položaju ruke*)
- Primjer jednostavne robotske ruke s dva stupnja slobode



- Jednadžba dinamičke ravnoteže zakretnog momenta oko vertikalne osi

$$\frac{d}{dt} \left[J(\Theta) \frac{d\phi}{dt} \right] = J \frac{d^2\phi}{dt^2} + \frac{dJ}{d\Theta} \frac{d\Theta}{dt} \frac{d\phi}{dt} = M_t + M_e$$

- J – ukupni moment inercije motora i tereta
- M_e – moment motora
- M_t – moment trenja
- m_l – masa tereta



Adaptivno i robusno upravljanje

3

Sustavi nepogodni za klasične regulatore

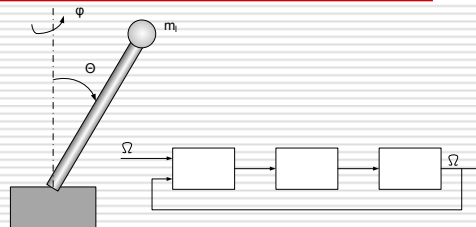
Prim. 4. Robotska ruka

- Moment inercije ovisi o kutu
 - (moment inercije motora «momenta inercije tereta»)
$$J(\Theta, m_l) = \alpha + \beta m_l + (\gamma + \delta m_l) \sin^2 \Theta$$
- Manji utjecaj tereta uz postojanje reduktora

$$J = J_m + \frac{1}{N^2} J_t$$
 - J_m – moment inercije motora
 - J_t – moment inercije tereta
- DC motor uz povratnu vezu struje armature
 - uz zanemarenje momenta trenja
 - uz konstantan kut Θ ($J(\Theta) = \text{const}$)

$$M_e = k I_a$$

$$J \frac{d\Omega}{dt} = M_e$$



- Regulator PI tipa

$$I_a = K \left[\alpha \Omega_{ref} - \Omega + \frac{1}{T_i} \int_0^t (\Omega_{ref} - \Omega) d\tau \right]$$

- Diferencijalna jednadžba

$$J \frac{d^2\Omega}{dt^2} + kK \frac{d\Omega}{dt} + \frac{kK}{T_i} \Omega = \alpha kK \frac{d\Omega_{ref}}{dt} + \frac{kK}{T_i} \Omega_{ref}$$

- Odabrani parametri regulatora

$$K = \frac{2c_0\omega_0 J}{k} \quad T_i = \frac{2c_0}{\omega_0}$$

Adaptivno i robusno upravljanje

4



Sustavi nepogodni za klasične regulatore

Prim. 4. Robotska ruka



- Prijenosna funkcija zatvorenog kruga Ω / Ω_{ref}

$$G(s) = \frac{2\alpha\zeta_0\omega_0 s + \omega_0^2}{s^2 + 2\zeta_0\omega_0 s + \omega_0^2}$$

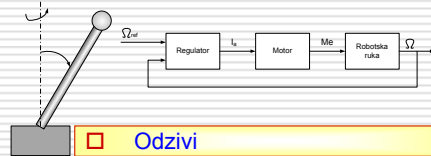
- Parametrom α podešava se nadvišenje odziva
- Pojačanje regulatora K treba biti proporcionalno ukupnom momentu inercije

- Uz regulator podešen prema nominalnom momentu inercije J_{nom}
- primijenjen na sustav s momentom inercije J
- Karakteristična jednačba

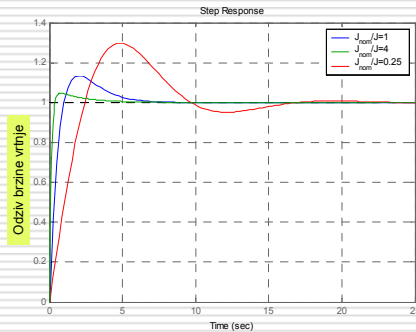
$$s^2 + 2\zeta_0 \frac{J_{nom}}{J} \omega_0 s + \frac{J_{nom}}{J} \omega_0^2 = 0$$

- Prigušenje

$$\zeta = \zeta_0 \sqrt{\frac{J_{nom}}{J}}$$



Odzivi



Adaptivno i robusno upravljanje

5



Sustavi nepogodni za klasične regulatore

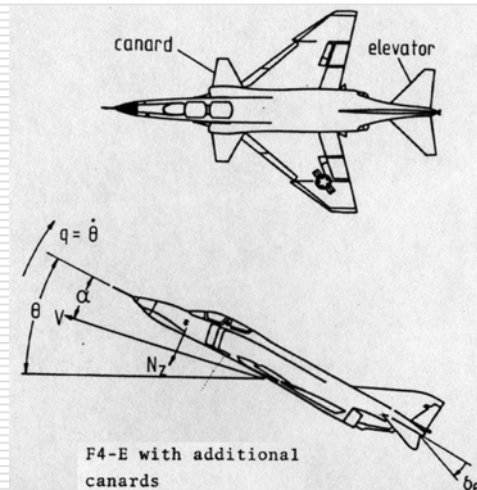
Prim. 5. Avion – F4-E



- Avion s dodatnim krilima (*canards*) za povećanje brzine reakcije
 - povećanje brzine manevriranja
 - smanjenje stabilnosti
- Dinamika aviona ovisi o
 - brzini (V [Mach = 334m/s])
 - visini
 - napadnom kutu (α) (kut između osi aviona i vektora brzine)
- Linearizacija oko stacionarnih uvjeta letenja
- Varijable stanja
 - $x_1 = N_z$
 - (normalno ubrzanje (okomito na os aviona))
 - $x_2 = q = d\theta/dt$
 - (brzina propinjanja (pitch rate))
 - $x_3 = \delta_e$
 - (kut elerona (elevatora))
- Dinamika servo pogona elerona i canardsa ima prijenosnu funkciju

$$\frac{\delta_e}{u} = \frac{a}{s+a}, \quad a = 14$$

$$\dot{\delta}_e = -a\delta_e + au$$



F4-E with additional canards

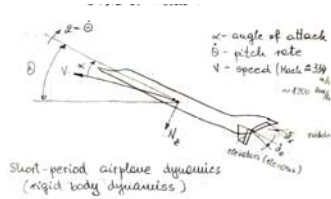
Adaptivno i robusno upravljanje

6

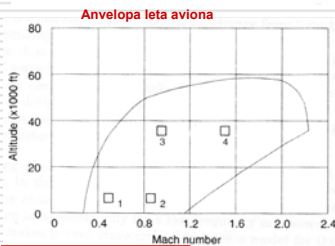


Sustavi nepogodni za klasične regulatore

Prim. 5. Avion



- Prema slici prikaza anvelope leta aviona
 - područje mogućih stanja dijeli se na 4 područja
 - identifikacija parametara aviona u svakom od 4 područja leta



60000 ft = 20 000m
1Mach= 334 m/s=1202 km/h

Varijable stanja

$$\begin{bmatrix} \dot{N}_z \\ \dot{q} \\ \dot{\delta}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\tau} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_z \\ q \\ \delta_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b \\ 0 \\ a \end{bmatrix} u$$

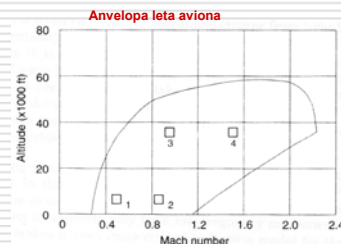
Adaptivno i robustno upravljanje

7



Sustavi nepogodni za klasične regulatore

Prim. 5. Avion



60000 ft = 20 000m
1Mach= 334 m/s=1202 km/h

Parametri prema područjima leta

Flight Condition	1	2	3	4
Mach (1Mach ≈ 334m/s)	0.5	0.85	0.9	1.5
Altitude [feet]	5000	5000	35000	35000
a_{11}	-0.9896	-1.702	-0.667	-0.5162
a_{12}	17.41	50.72	18.11	26.96
a_{13}	96.15	263.5	84.34	178.9
a_{21}	0.2648	0.2201	0.08201	-0.6896
a_{22}	-0.8512	-1.418	-0.6587	-1.225
a_{23}	-11.39	-31.99	-10.81	-30.38
b	-97.78	-272.2	-85.09	-175.6
λ_1 (short period dynamics)	-2.07	-4.90	-1.87	-0.87 + j4.3
λ_2 (short period dynamics)	1.23	1.78	0.56	-0.87 - j4.3

Karakteristične vrijednosti

Nestabilno
Podzvučna brzina
Slabo prigušeno
Nadzvučna brzina

Varijable stanja

$$\begin{bmatrix} \dot{N}_z \\ \dot{q} \\ \dot{\delta}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\tau} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_z \\ q \\ \delta_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b \\ 0 \\ a \end{bmatrix} u$$

- Parametri dinamike modela aviona ovise o režimu leta
 - Nestabilno ponašanje kod podzvučnog leta (pozitivni polovi sustava)
 - autopilot mora biti određen za različite uvjete leta
- Izvedba autopilota na osnovi programiranog pojačanja (gain scheduling)

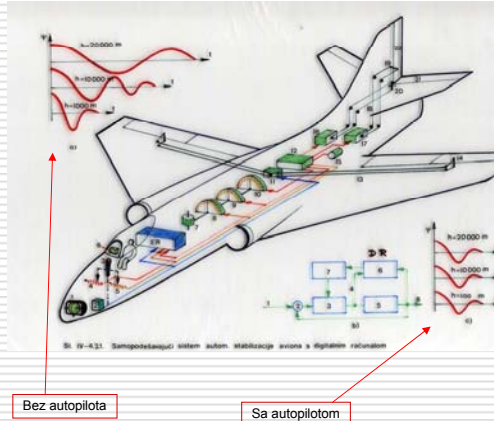
Adaptivno i robustno upravljanje

8

Sustavi nepogodni za klasične regulatore

Prim. 5. Avion

- Dinamika aviona mijenja se s režimom letenja
- Autopilot izveden kao regulator na osnovi programiranog pojačanja (*gain scheduling*)
- Parametri regulatora određuju se na osnovi mjerenja:
 - dinamičkog tlaka
 - Mahovog broja
- Prefilteri se koriste između komandnih signala pilota i izvršnih elemenata
 - Osiguravaju se ograničenja u kojima se avion ponaša kao kruto tijelo
 - ne pobuđuju se karakteristične frekvencije savijanja aviona



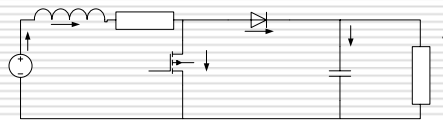
Adaptivno i robusno upravljanje

9

Sustavi nepogodni za klasične regulatore

Prim. 6. Uzlazni DC/DC pretvarač

- Nelinearni sustav kojem se mijenjaju pojačanja i vremenske konstante s promjenom radne točke
- Varijable i parametri pretvarača
 - C_1 - kapacitet kondenzatora, [F]
 - i_{L1} - struja induktiviteta, [A],
 - L_1 - induktivitet, [H],
 - R_1 - otpor tereta, [Ω],
 - R_{L1} - otpor zavojnice, [Ω],
 - v_{C1} - napon na kondenzatoru, [V],
 - v_{in} - ulazni napon, [V]
 - d - postotak vođenja sklopke (duty cycle)
- Model pretvarača ovisi o vođenju sklopke
- Kod vođenja sklopke T_1



Kod nevođenja sklopke

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{L1} \\ \dot{v}_{C1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{L1}}{L_1} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_1 C_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L1} \\ v_{C1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ 0 \end{bmatrix} v_{in}$$

$$v_{out} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L1} \\ v_{C1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} v_{in}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{L1} \\ \dot{v}_{C1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{L1}}{L_1} & -\frac{1}{L_1} \\ \frac{1}{C_1} & -\frac{1}{R_1 C_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L1} \\ v_{C1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ 0 \end{bmatrix} v_{in}$$

$$v_{out} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L1} \\ v_{C1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} v_{in}$$

Adaptivno i robusno upravljanje

10



Sustavi nepogodni za klasične regulatore

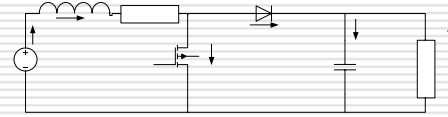
Prim. 6. Uzlazni DC/DC pretvarač



- Usrednjeni model pretvarača

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{L1} \\ \dot{v}_{C1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{L1}}{L_1} & -\frac{1-d}{L_1} \\ \frac{1-d}{C_1} & -\frac{1}{R_1 C_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L1} \\ v_{C1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ 0 \end{bmatrix} v_{in}$$

$$v_{out} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L1} \\ v_{C1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} v_{in}$$



$$G_{c1}(s) = \frac{v_{out}(s)}{d(s)} = \frac{K_1(1-T_b s)}{T_n^2 s^2 + 2T_n \zeta s + 1}$$

$$G_{c2}(s) = \frac{v_{out}(s)}{v_{in}(s)} = \frac{K_2}{T_n^2 s^2 + 2T_n \zeta s + 1}$$

- Prijenosne funkcije izlaznog napona pretvarača u odnosu na

- upravljачku veličinu d
- ulazni napon v_{in} (Poremećaj)

- Prijenosne funkcije s promjenjivim koeficijentima

- Koeficijenti ovisni o radnoj točki

- ulazni napon
- upravljачki signal d
- struja kroz induktivitet

$$K_1 = \frac{V_{C1}}{1-d} - \frac{I_{L1} \cdot R_{L1}}{(1-d)^2}$$

$$K_2 = \frac{1}{1-d}$$

$$T_b = \frac{I_{L1} \cdot L_1}{(1-d) \cdot V_{C1} - R_{L1} \cdot I_{L1}}$$

$$T_n = \frac{\sqrt{L_1 \cdot C_1}}{1-d}$$

$$\zeta = \frac{\sqrt{L_1 \cdot C_1} \left(\frac{R_{L1}}{L_1} + \frac{1}{R_1 \cdot C_1} \right)}{2(1-d)}$$

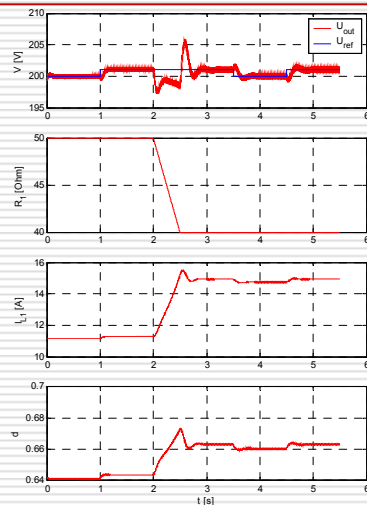
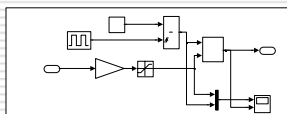
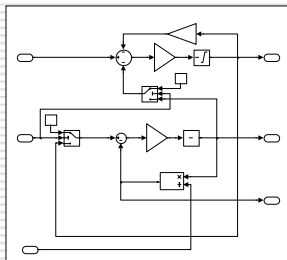
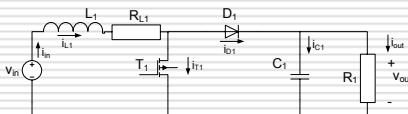
Adaptivno i robusno upravljanje

11



Sustavi nepogodni za klasične regulatore

Prim. 6. Uzlazni DC/DC pretvarač



Adaptivno i robusno upravljanje

12



Problem adaptivnog upravljanja



- Primjeri sustava pokazuju zašto je adaptivno upravljanje potrebno
- Industrijski procesi su kompleksni
 - varijacija parametara
- Prednost u upotrebi inteligentnog regulatora
- Adaptivna regulacija ne zamjenjuje znanje o procesu koje je potrebno za određivanje
 - specifikacije postrojenja
 - strukture regulatora
 - dizajna regulatora
- Adaptivni regulator sadrži
 - Upravljački zakon s podesivim
 - parametrima ili signalima
 - strukturom regulatora
 - Odziv sustava s zatvorenim petljom povratne veze određen je:
 - referentnim modelom
 - specifikacijama kod dizajniranja regulatora
 - Proceduru proračuna koja mora biti pogodna za on-line računanje
 - Osvježavanje parametara (signala) ili strukture zasnovano na mjerenjima
 - implementacija zakona upravljanja



Primjer sustava s varijabilnim parametrima

Ne treba adaptivno upravljanje

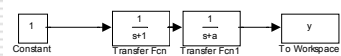


- Sustav s prijenosnom funkcijom otvorenog kruga

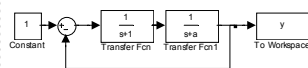
$$G_0(s) = \frac{1}{(s+1)(s+a)}$$

- Parametar a :
 - $a = -0.01$
 - $a = 0$
 - $a = 0.01$

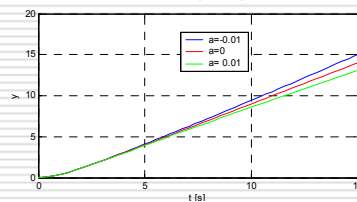
- Blok shema otvorenog kruga



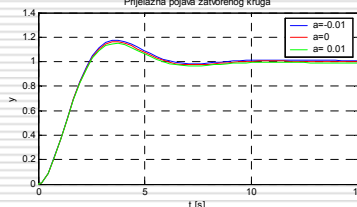
- Blok shema zatvorenog kruga



Odziv otvorenog kruga



Prijelazna pojava zatvorenog kruga





Primjer sustava s varijabilnim parametrima

Ne treba adaptivno upravljanje



- Sustav s prijenosnom funkcijom otvorenog kruga

$$G_0(s) = \frac{1}{(s+1)(s+a)}$$

- Parametar a:
 - a = -0.01
 - a = 0
 - a = 0.01

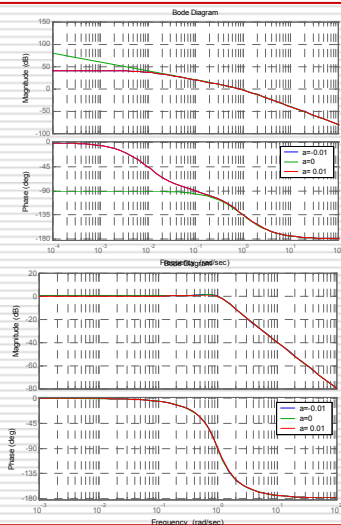
- Prijenosna funkcija zatvorenog kruga

$$G_z(s) = \frac{G_0(s)}{1 + G_0(s)} = \frac{1}{s^2 + (1+a)s + 1+a}$$

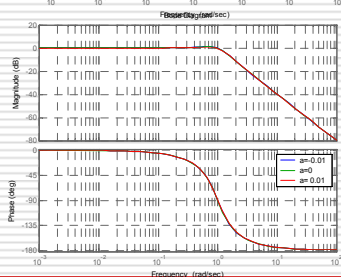
$$= \frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

$$\omega_n = \sqrt{1+a}$$

$$\zeta = \frac{\sqrt{1+a}}{2}$$



Frekvencijska karakteristika otvorenog kruga



Frekvencijska karakteristika zatvorenog kruga

Adaptivno i robustno upravljanje

15



Primjer sustava s varijabilnim parametrima

Treba adaptivno upravljanje

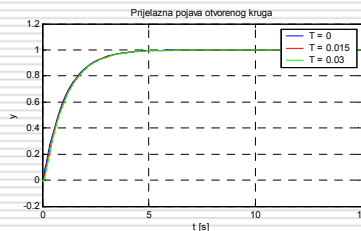
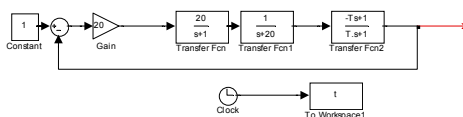


- Sustav s prijenosnom funkcijom otvorenog kruga

$$G_0(s) = \frac{20(1-sT)}{(s+1)(s+20)(1+Ts)}$$

- Parametar a:
 - T = 0
 - T = 0.015
 - T = 0.03

- Blok shema zatvorenog kruga



Adaptivno i robustno upravljanje

16



Primjer sustava s varijabilnim parametrima

Treba adaptivno upravljanje



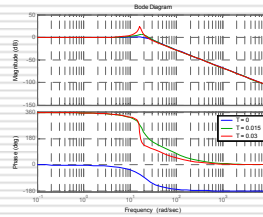
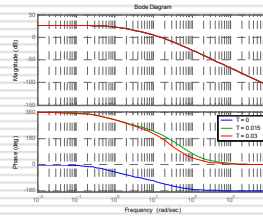
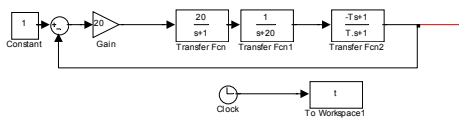
- Sustav s prijenosnom funkcijom otvorenog kruga

$$G_0(s) = \frac{20(1-sT)}{(s+1)(s+20)(1+Ts)}$$

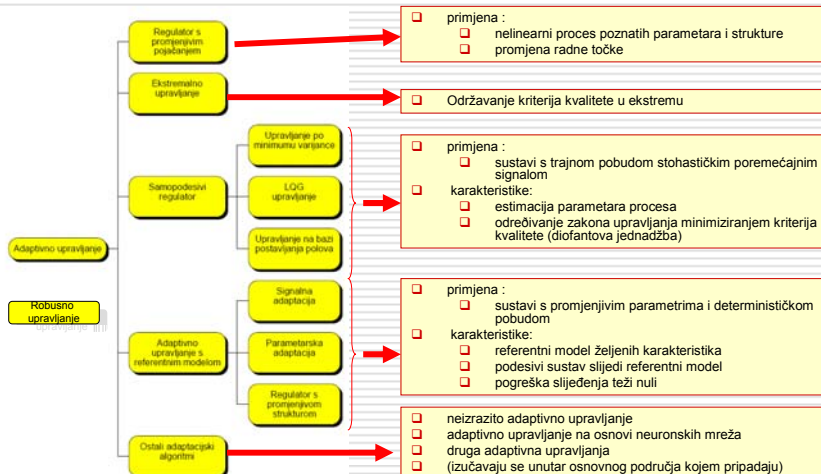
- Parametar a:

- $T=0$
- $T=0.015$
- $T=0.03$

- Blok shema zatvorenog kruga



Podjela adaptivnog upravljanja





Regulator s promjenjivim pojačanjem

Gain scheduling



- Primjena za regulaciju:
 - nelinearnih procesa
 - poznatih parametara i strukture
 - promjena radne točke
- Karakteristike:
 - opis područja radnih točaka parametarskom funkcijom (parametar)
 - linearizacija procesa u cijelom radnom području ili za konačan broj radnih točaka
- Rad regulatora
 - mjerenje parametra prema kojem se podešava regulator
 - određivanje radne točke i računanje
 - upravljačke varijable
 - izlaza iz regulatora
 - izlazne veličine
 - određivanje pojačanja regulatora



Regulator s promjenjivim pojačanjem

Opis



- Promjena radne točke – promjena dinamičkih karakteristika sustava
 - promjena pojačanja regulatora – održanje istih karakteristika u cijelom području upravljanja
- Ideja
 - Linearizacija procesa u više radnih ročaka
 - Određivanje pojačanja za svaku radnu točku
- Opis nelinearnog sustava

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u_s(t)),$$

$$y(t) = g(x(t))$$

- gdje su
 - f - nelinearna vektorska jednadžba varijabli stanja,
 - g - nelinearna izlazna funkcija,
 - t - vrijeme,
 - u_s - upravljački signal,
 - x - vektor varijabli stanja nelinearnog sustava,
 - y - izlazna varijabla.

- Područje radnih točaka (x_r, u_r)
 - opis parametarskom jednadžbom

$$f_1(x_r(\lambda), u_r(\lambda)) = 0$$

- f_1 – parametarska funkcija kojom su određene radne točke s obzirom na parametar λ
- x_r, u_r – varijable stanja i upravljačka varijabla u radnoj točki
- λ – parametar za određivanje radne točke



Regulator s promjenjivim pojačanjem

Opis



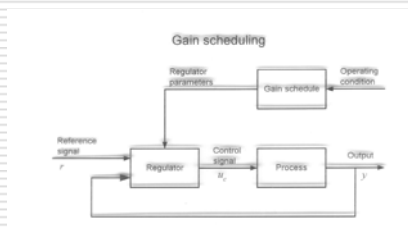
□ Prednosti

- brza adaptacija
- jednostavna implementacija

□ Mane

- neočekivana promjena u procesu *(promjena koja nije uzeta u obzir kod dizajna regulatora)*
 - uzrokuje neželjeno ponašanje

Češći oblik regulatora s promjenjivim pojačanjem



Regulator s promjenjivim pojačanjem

Primjer



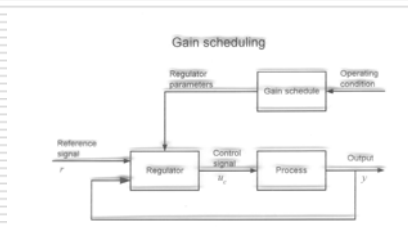
□ Prednosti

- brza adaptacija
- jednostavna implementacija

□ Mane

- neočekivana promjena u procesu *(promjena koja nije uzeta u obzir kod dizajna regulatora)*
 - uzrokuje neželjeno ponašanje

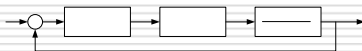
Češći oblik regulatora s promjenjivim pojačanjem



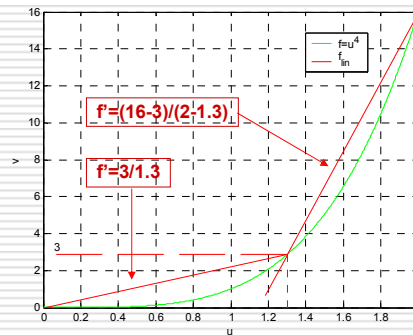
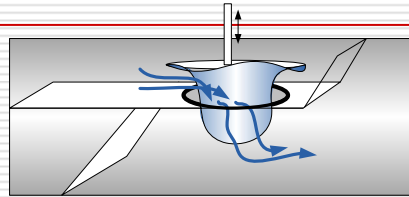
Regulator s promjenjivim pojačanjem

Primjer - ventil

- Ventil s nelinearnom statičkom karakteristikom kao dio procesa
- Linearizacija sustava oko dvije radne točke na karakteristici ventila
 - pojačanja petlje povratne veze proporcionalno $f'(u)$
- poboljšanje ponašanja



$$v = f(u) = u^4; \quad u \geq 0$$



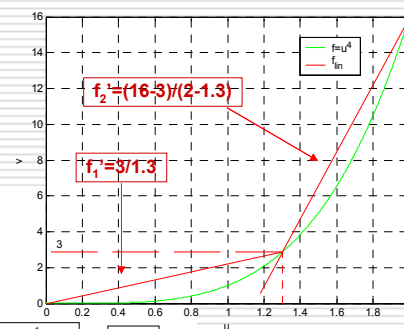
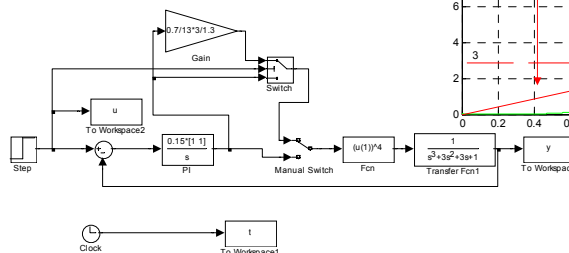
Adaptivno i robusno upravljanje

25

Regulator s promjenjivim pojačanjem

Primjer - ventil

- Varijabla uza određivanje radne točke je u_r
- Regulator projektiran za protok manji od 3
- Korekcija pojačanja
 - Za referencu manju od 3 se ne korigira pojačanje
 - Za referencu veću od 3 pojačanje se svodi na iznos 3/13
 - množenje s recipročnom vrijednošću nagiba karakteristike f'_2
 - korekcija na pojačanje početne krivulje (množenje s 3/1.3)



Adaptivno i robusno upravljanje

26

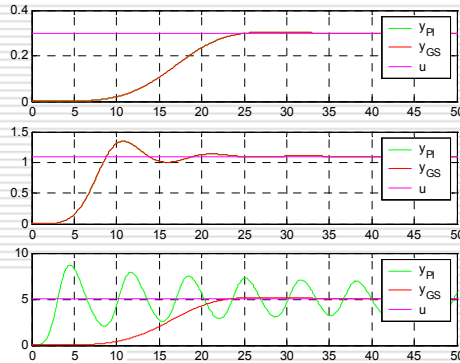
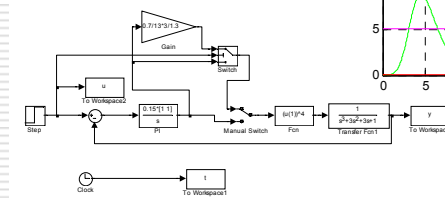


Regulator s promjenjivim pojačanjem

Primjer - ventil



- Odzivi
 - Za referencu manju od 3 nema korekcije (PI i GS su isti)
 - Za referencu veću od 3 GS bolji odziv
- Pобоljšanje ponašanja
 - regulator projektirati u više točaka



Adaptivno i robustno upravljanje

27



Regulator s promjenjivim pojačanjem

Prim. 2. Uzlazni DC/DC pretvarač napajan gorivnim člankom

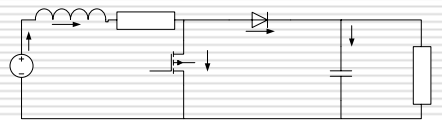


□ Usrednjeni model pretvarača

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{L1} \\ \dot{v}_{C1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{L1}}{L_1} & \frac{1-d}{L_1} \\ \frac{1-d}{C_1} & -\frac{1}{R_1 C_1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{L1} \\ v_{C1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ 0 \end{bmatrix} v_{in},$$

$$v_{out} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L1} \\ v_{C1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} v_{in},$$

- Pojačanje pretvarača ovisi o V_{C1} i d
- Prigušenje sustava ovisi o izlaznom otporu R_1 i upravljačkoj varijabli d
- Upravljačka varijabla d je mjera izlaznog napona
- Projektiranje regulatora s promjenjivim pojačanjem
 - Pojačanje regulatora ovisi o izlaznom naponu i otporu
 - Izlazni otpor se određuje iz izlaznog napona i izlazne struje
 - Izlazni napon i izlazna struja se mjere



$$G_{c1}(s) = \frac{v_{out}(s)}{d(s)} = \frac{K_1(1 - T_b s)}{T_n^2 s^2 + 2T_n \zeta s + 1}$$

$$G_{c2}(s) = \frac{v_{out}(s)}{v_{in}(s)} = \frac{K_2}{T_n^2 s^2 + 2T_n \zeta s + 1}$$

$$K_1 = \frac{V_{C1}}{1-d} = \frac{I_{L1} \cdot R_{L1}}{(1-d)^2},$$

$$K_2 = \frac{1}{1-d},$$

$$T_b = \frac{I_{L1} \cdot L_1}{(1-d) \cdot V_{C1} - R_{L1} \cdot I_{L1}},$$

$$T_n = \frac{\sqrt{L_1 \cdot C_1}}{1-d},$$

$$\zeta = \frac{\sqrt{L_1 \cdot C_1} \left(\frac{R_{L1}}{L_1} + \frac{1}{R_1 \cdot C_1} \right)}{2(1-d)}.$$

Adaptivno i robustno upravljanje

28



Regulator s promjenjivim pojačanjem

Prim. 2. Uzlazni DC/DC pretvarač napajan gorivnim člankom



- Tablica pojačanja regulatora određena optimiranjem za

- 6 vrijednosti otpora
- 6 vrijednosti napona
- Dimenzije tablice pojačanja 6x6

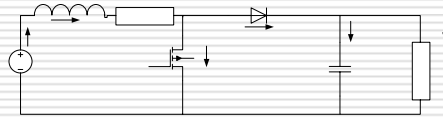
- Kriterij optimiranja

$$J(e) = \int_0^T [e^2(t) + f(e(t))] dt$$

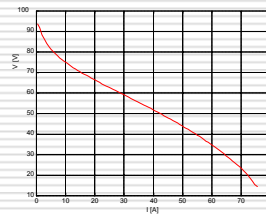
- Varijable

- $e = V_{ref} - V_{out}$ – signal pogreške
- V_{ref} – referentni napon,
- $f(e)$ – težinska funkcija derivacije signala pogreške

$$f(e) = K_w \begin{cases} \left(\frac{de(t)}{dt} \right)^2, & \forall \left(\frac{de(t)}{dt} \right)^2 \leq D_{max} \\ D_{max}, & \forall \left(\frac{de(t)}{dt} \right)^2 > D_{max} \end{cases}$$



Karakteristika gorivnog članka



Adaptivno i robustno upravljanje

29



Regulator s promjenjivim pojačanjem

Prim. 2. Uzlazni DC/DC pretvarač



- Tablica pojačanja regulatora određena optimiranjem za

- 6 vrijednosti otpora
- 6 vrijednosti napona
- Dimenzije tablice pojačanja 6x6

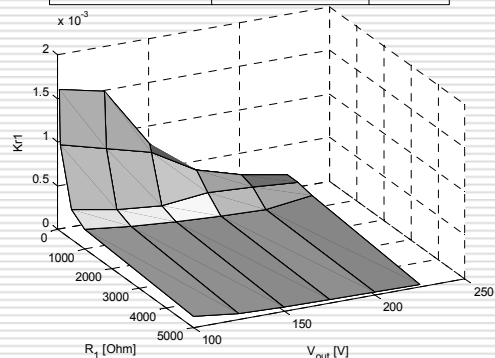
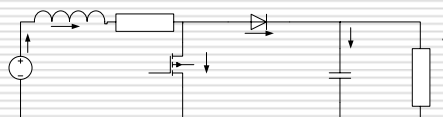
- Kriterij optimiranja

$$J(e) = \int_0^T [e^2(t) + f(e(t))] dt$$

- Varijable

- $e = V_{ref} - V_{out}$ – signal pogreške
- V_{ref} – referentni napon,
- $f(e)$ – težinska funkcija derivacije signala pogreške

$$f(e) = K_w \begin{cases} \left(\frac{de(t)}{dt} \right)^2, & \forall \left(\frac{de(t)}{dt} \right)^2 \leq D_{max} \\ D_{max}, & \forall \left(\frac{de(t)}{dt} \right)^2 > D_{max} \end{cases}$$



Adaptivno i robustno upravljanje

30

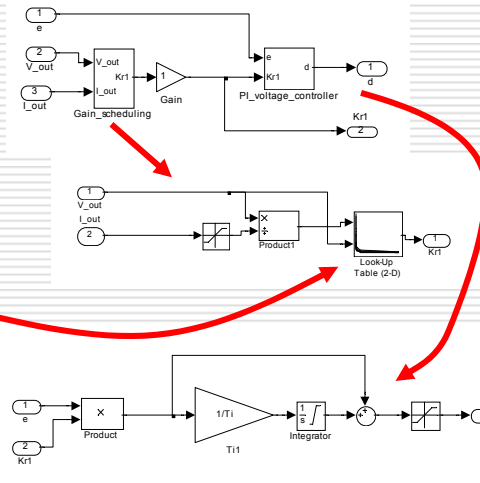
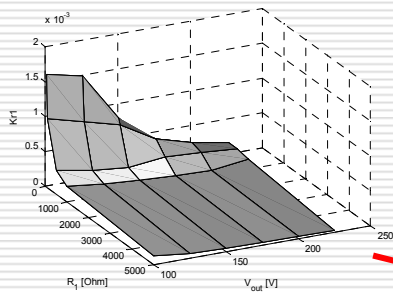


Regulator s promjenjivim pojačanjem

Prim. 2. Uzlazni DC/DC pretvarač



Izvedba regulatora



Adaptivno i robusno upravljanje

31

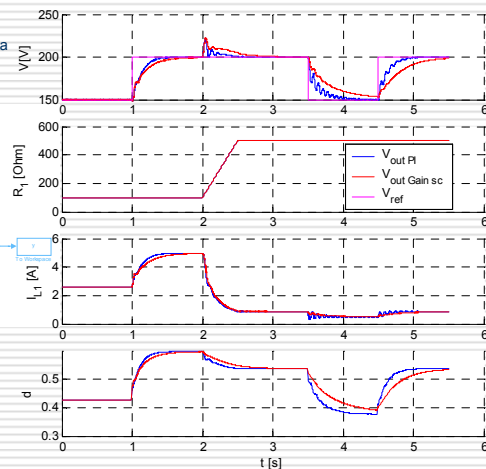
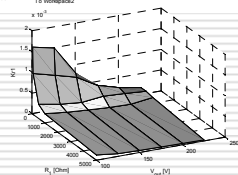
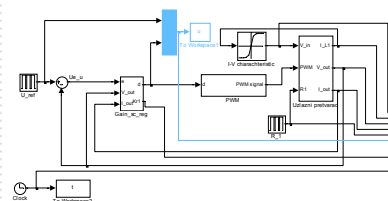


Regulator s promjenjivim pojačanjem

Prim. 2. Uzlazni DC/DC pretvarač



- Regulator s promjenjivim pojačanjem
 - približno isti odziv u svim radnim točkama (za velike i male struje)
- PI regulator – odziv ovisan o radnoj točki



Adaptivno i robusno upravljanje

32



Ekstremalno adaptivno upravljanje

Extremal adaptive control



- Primjena za regulaciju procesa kad se u ekstremu održava:
 - izlazna veličina procesa
 - neovisno o smetnjama i promjenama parametara
- Kriterij (koji se drži u ekstremu) određuje vrstu upravljanja:
 - vremenski optimalno upravljanje
 - upravljanje optimalno po utrošku energije
 - upravljanje po maksimalnoj snazi
- Sustav s promjenjivim parametrima
 - potreba za estimiranjem ekstremalne funkcije



Ekstremalno adaptivno upravljanje

Extremal adaptive control



- Primjenjivo i na sustavu s više ulaza
 - Izlazni vektor (koji se želi držati u ekstremu) aproksimira se u svakom trenutku diskretizacije jednostavnom funkcijom ulazne varijable koja ima ekstrem
 - aproksimacija kriterija kvalitete u blizini ekstrema kvadratnom funkcijom
 - estimacija parametara funkcije u realnom vremenu
 - egzaktno računanje signala koji dovodi aproksimiranu funkciju u ekstrem bez obzira na promjene parametara sustava

$$y(k) = \underline{u}^T(k-1) \hat{\underline{A}} \underline{u}(k-1) + \hat{\underline{b}}^T \underline{u}(k-1) + \hat{c},$$

gdje su:

- $\hat{\underline{A}}$ - simetrična negativno definitna matrica dimenzije $m \times m$,
- $\hat{\underline{b}}$ - vektor parametara uz linearni član, dimenzije $m \times 1$,
- \hat{c} - konstanta,
- $y(k)$ - veličina sustava koja se dovodi u maksimum u trenutku k (izlazna veličina ili kriterij kvalitete),
- \underline{u} - upravljački vektor.

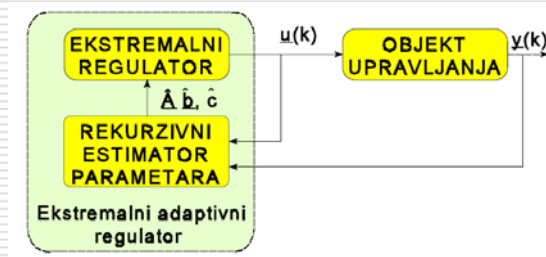
$$\underline{u}(k) = -\frac{1}{2} \hat{\underline{A}}^{-1} \hat{\underline{b}}.$$

Upravljačka varijabla koja dovodi do ekstrema

□ Blok shema ekstremalnog adaptivnog regulatora

$$y(k) = u^T(k-1) \hat{A} u(k-1) + \hat{b}^T u(k-1) + \hat{c},$$

$$u(k) = -\frac{1}{2} \hat{A}^{-1} \hat{b}.$$



□ Primjeri primjene

- Regulacija izlazne snage gorivnog članka
 - Izlazna snaga u ovisnosti o izlaznoj struji – zvonolika karakteristika (zbog nelinearne karakteristike otpora)
 - Ekstremalni regulator na DC/AC pretvaraču prema mreži
- Regulacija izlazne snage fotoelektričnog članka
 - Karakteristika članka se mijenja ovisno o dozačenosti energije i temperaturi
 - DC/AC pretvarač
 - ekstremalni regulator
 - održanje maksimalne snage članka
 - Isporuca snage mreži

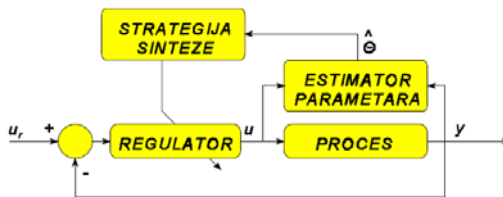


Samopodesivi adaptivni regulator

Self tuning adaptive control



- Primjena :
 - sustavi s trajnom pobudom stohastičkim poremećajnim signalom
- karakteristike:
 - estimacija parametara procesa
 - određivanje zakona upravljanja minimiziranjem kriterija kvalitete (diofantova jednadžba)
- rad regulatora
 - estimacija parametara procesa
 - rješenje diofantove jednadžbe
 - polinomi regulatora
 - računanje izlazne veličine iz regulatora



- Prednosti
 - promjenjivo na stohastičke sustave
 - digitalna realizacija
- Nedostaci
 - sporija adaptacija od MRAS upravljanja

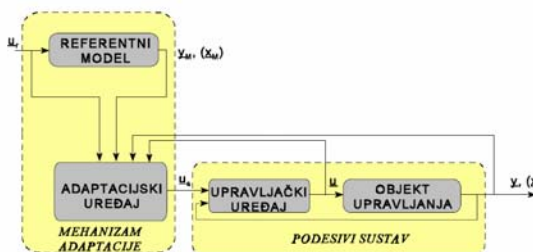


Adaptivni regulator s referentnim modelom

Model reference adaptive control



- karakteristike:
 - referentni model željenih karakteristika
 - podesivi sustav slijedi referentni model
 - pogreška slijeđenja teži nuli
 - signalna adaptacija - dodavanje signala adaptacije referentnom signalu
 - parametarska adaptacija - upravljački signal se određuje iz referentnog signala i varijabli stanja pomoću parametara adaptacije
 - regulator s promjenjivom strukturom - teorija regulatora s promjenjivom strukturom primjenjena na vektor razlike varijabli stanja referentnog modela i podesivog sustava
 - dovođenje u klizni režim
 - kliznim režimom određeno ponašanje sustava



- Prednosti
 - realizacija u analognoj i digitalnoj tehnici
- Nedostaci
 - određivanje parametara i modela
 - može dati velike upravljačke signale
 - nije preporučljiva za stohastičke sustave