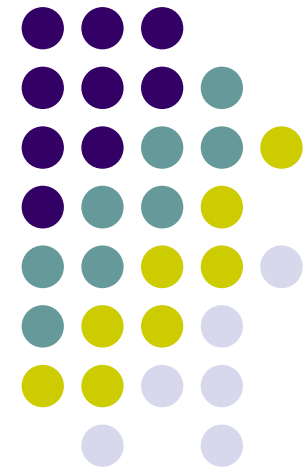


Lekcija 1: *Uvod u adaptivno upravljanje*

Prof.dr.sc. Jasmin Velagić
Elektrotehnički fakultet Sarajevo

Kolegij: Adaptivno i robusno upravljanje

2012/2013



Kolegij: Adaptivno i robusno upravljanje

Predmetni nastavnik: Prof.dr.sc. Jasmin Velagić, dipl.inž.el.

e-mail: jasmin.velagic@etf.unsa.ba

tel.: 033 25 07 65

Konzultacije:

Subotom 9 -13, ili po dogovoru

**Načini provjere
znanja:**

domaće zadaće	(20%)
seminarski rad	(40%)
završni ispit	(40%)



Kolegij: Adaptivno i robusno upravljanje



3/55

Nastavne jedinice:

1. Uvod u adaptivno upravljanje.
2. On-line estimacija parametara.
3. Adaptivno upravljanje s referentnim modelom.
4. Samopodesivi adaptivni regulatori.
5. Regulatori s promjenjivim pojačanjem.
6. Adaptivno stohastičko i prediktivno upravljanje.

Kolegij: Multivarijabilni sistemi



4/55

Preporučena literatura:

1. Jasmin Velagić, *Zabilješke s predavanja*, Elektrotehnički fakultet, Sarajevo, 2013, URL: <http://people.etf.unsa.ba/~jvelagic/laras/lectures/adaptivno.html>
2. Astrom, K. J. And Wittenmark, B. (2008). *Adaptive Control* (2nd revised edition). Dover Publications, New York, USA.
3. Ioannou, P. and Sun, J. (2012). *Robust Adaptive Control*, Dover Publications, New York, USA.
4. Sastry, S. and Bodson, M. (2011). *Adaptive Control: Stability, Convergence and Robustness*, Dover Publications, New York, USA.

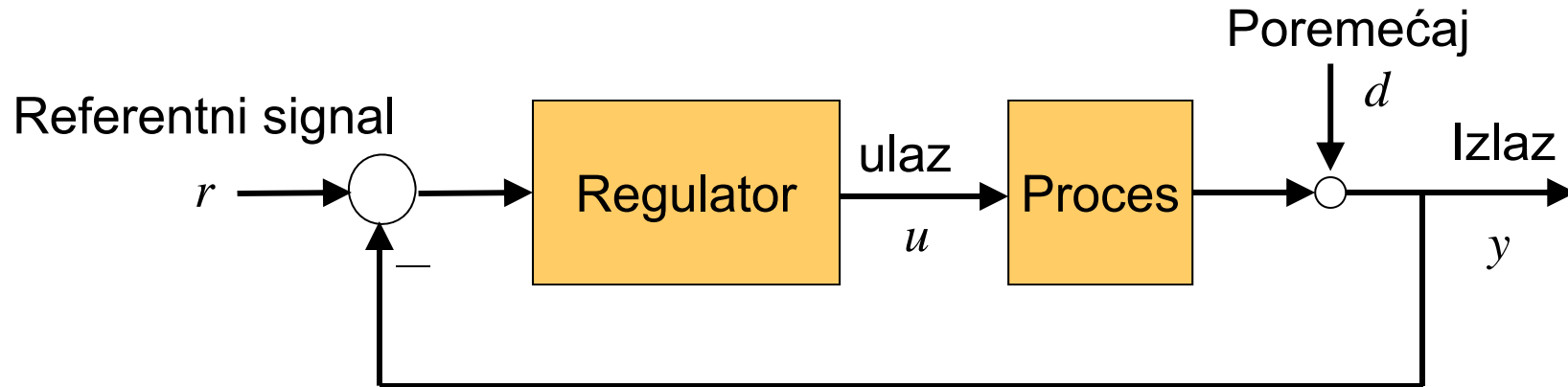
Uvod u adaptivno upravljanje

- **Adaptivno upravljanje predstavlja sistematičan pristup automatskom podešavanju (namještanju) regulatora u realnom vremenu s ciljem održavanja željene razine upravljačkih performansi kada su parametri dinamičkog modela procesa nepoznati i/ili se vremenski mijenjaju.**
- Parametri dinamičkog modela mogu biti:
 - **Upravljivi i nepoznati, ali konstantni** (struktura regulatora ne ovisi o pojedinačnim vrijednostima parametara modela procesa, ali se ispravno podešenje parametara regulatora ne može obaviti bez poznavanja njegovih vrijednosti).
 - **Vremenski promjenjivi na nepredvidiv način** (usljed promjena vanjskih uvjeta ili promatranje pojednostavljenih linearnih modela nelinearnih sistema).



Uvod u adaptivno upravljanje

- Opći problem upravljanja

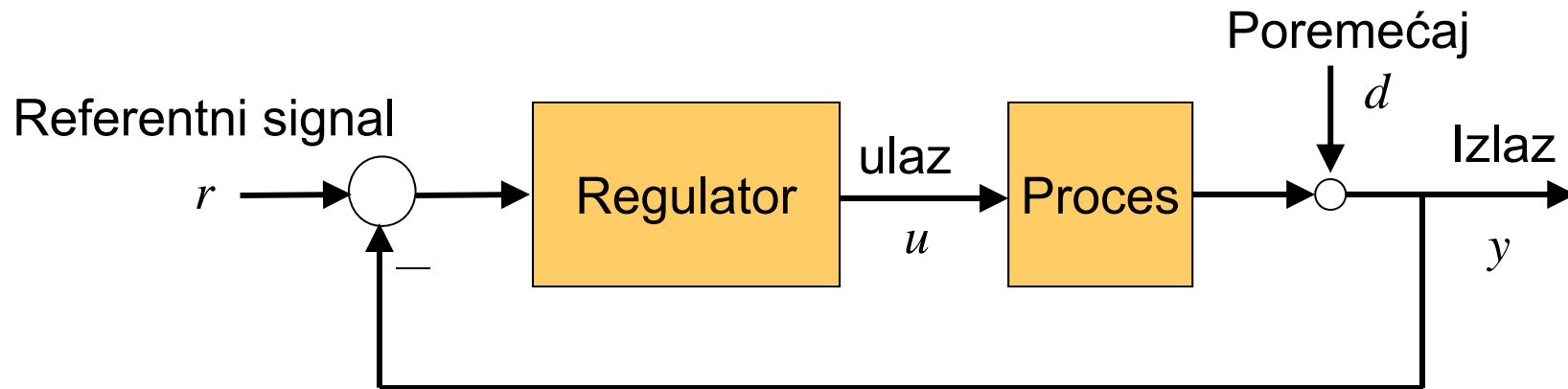


- Proces je inicijalno nepoznat, djelomično poznat ili je sporo promjenjiv.
- Postoji kriterij kakvoće (indeks performanse), npr. minimizirati:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [u^2 + (y - r)^2] dt$$

Uvod u adaptivno upravljanje

- **Neadaptivni regulator**



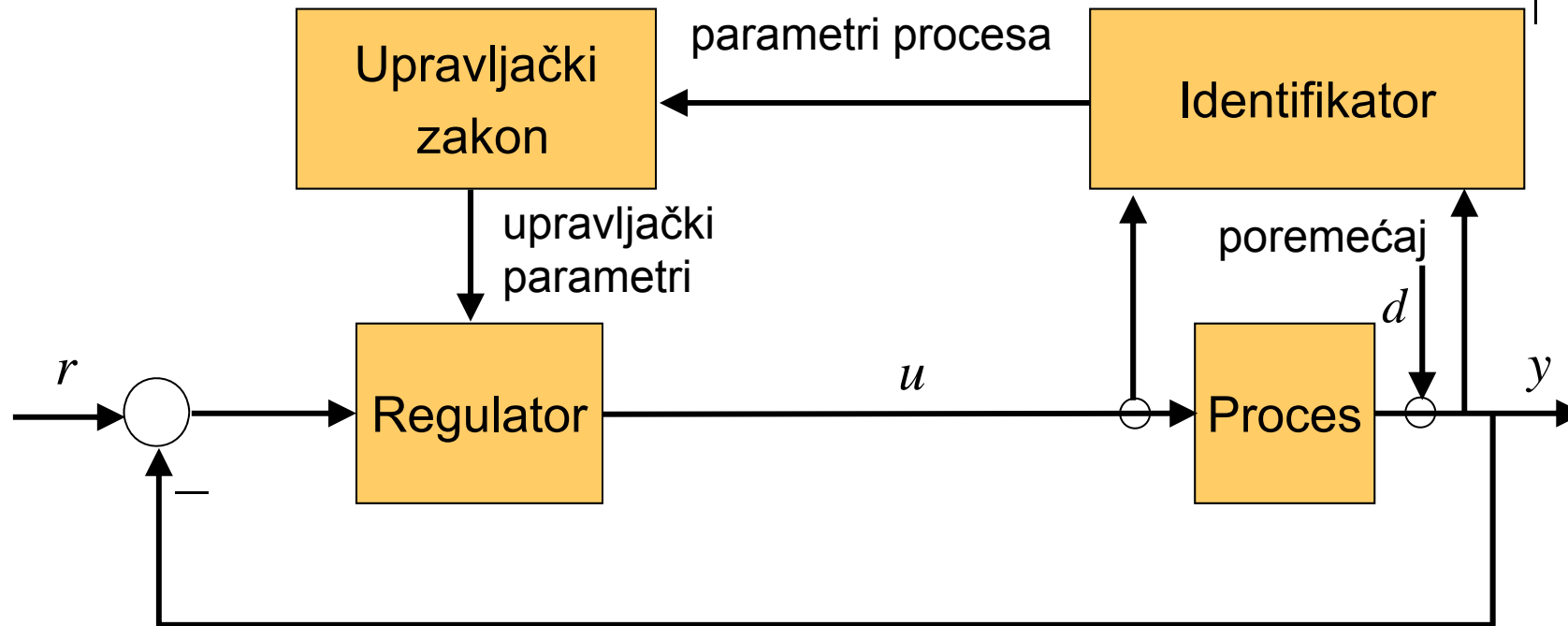
- Neadaptivni regulator preslikava signal pogreške $(r-y)$ u u na kauzalan, vremenski nepromjenjiv način, npr.:

$$\dot{x}_c = A_c x_c + b_c (r - y)$$
$$u = c_c x_c$$

gdje su A_c , b_c i c_c konstante, a x_c vektor.

Uvod u adaptivno upravljanje

- **Adaptivni regulator**



- **Kod adaptivnog regulatora parametri su podesivi.**
- Postoji dodatna petlja, tzv. petlja adaptacije.
- **Osim regulatora sa podesivim parametrima postoje adaptivni regulatori kojima se mijenja struktura.**

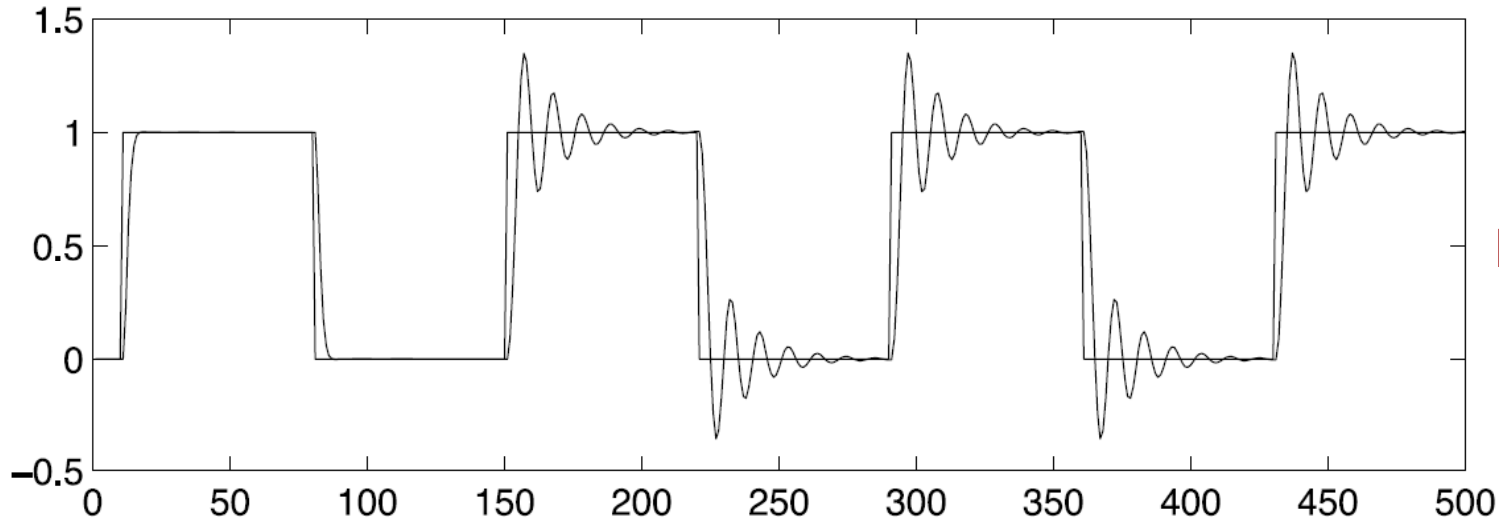
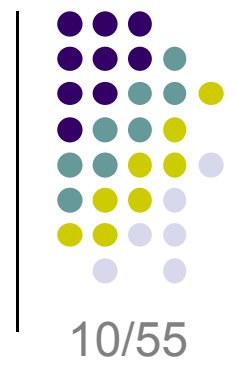


Uvod u adaptivno upravljanje

- **Sistem adaptivnog upravljanja predstavlja regulacijski sistem koji se može prilagođavati promjenama unutar upravljanog sistema.**
- **Osnovna regulacijska petlja povratne veze** – regulira proces na temelju promjene procesnih signala.
- **Dodatna regulacijska petlja** – kompenziranje promjene parametara upravljanog (reguliranog) sistema.
- **Karakteristike adaptivnog upravljanja:**
 - Upravljanje u zatvorenoj petlji.
 - Informacije o karakteristikama sistema određuju se za vrijeme rada sistema (on-line).
 - Identifikacija nepoznatih parametara ili mjerenje i računanje kriterija kvalitete (indeks performansi – IP).
 - Odabir upravljačke strategije i djelovanje na sistem modifikacijom signala, parametra ili strukture.

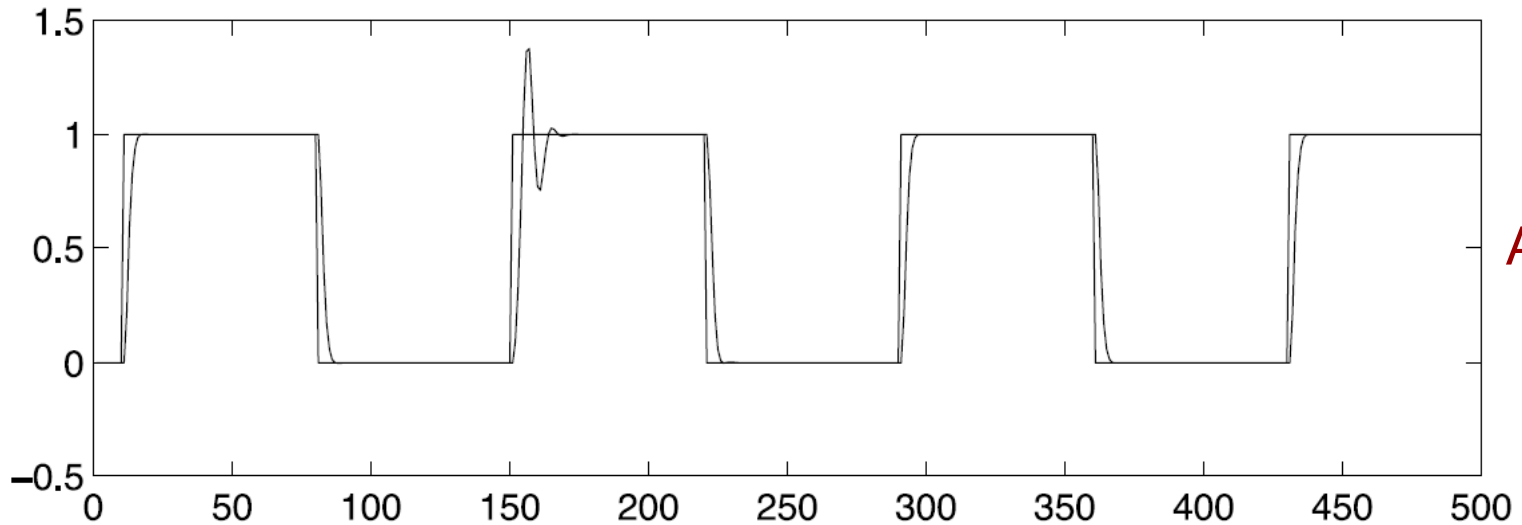
Uvod u adaptivno upravljanje

■ Konvencionalno vs. adaptivno upravljanje



Konvencionalno

Promjena parametara modela se događa u $t = 150$.



Adaptivno

Uvod u adaptivno upravljanje

- U oba slučaja promjena parametara modela procesa dešava se u $t = 150$.
- Korišteni konvencionalni regulator ima konstantne parametre.
- Nakon promjene parametara procesa konvencionalni regulator iskazuje slabe upravljačke performanse (nadvišenje, oscilatornost,...).
- Rezultati sa adaptivnim regulatorom pokazuju da se nakon **adaptivnog prijelaza** (procedura namještanja parametara regulatora) postiže zahtijevana nominalna performansa.
- **Konvencionalni sistem upravljanja je primarno orijentiran na eliminiranje efekta poremećaja na upravljane varijable (veličine).**





Uvod u adaptivno upravljanje

- **Adaptivni sistem upravljanja je primarno orijentiran na eliminiranje poremećaja na performanse sistema upravljanja.**
- **Poremećaji** koji djeluju na sistem upravljanja:
 - Poremećaji koji djeluju na upravljane varijable.
 - Poremećaji koji djeluju na performanse sistema upravljanja.
- Prema tome, adaptivni sistem upravljanja je sistem s povratnom vezom čija je upravljana varijabla **indeks performansi** (IP).
- **Cilj konvencionalnog upravljanja:** nadziranje upravljanih varijabli u skladu s IP za slučaj poznatih parametara.
- **Cilj adaptivnog upravljanja:** nadziranje IP sistema upravljanja sa nepoznatim i promjenjivim parametrima.

Uvod u adaptivno upravljanje

- **Adaptivni sistem upravljanja mjeri određeni IP sistema upravljanja korištenjem ulaza, stanja, izlaza i poznatih poremećaja.**
- Na osnovi usporedbe izmjenjenog IP-a i zadanog skupa IP-ova, adaptacijski mehanizam modificira parametre podesivog regulatora i/ili generira pomoćno upravljanje da bi održao IP sistema upravljanja bliskim zadanom skupu IP-a (unutar skupa prihvatljivih IP-ova).
- **Kod ovakvih sistema performanse se mogu podešavati modificiranjem parametara regulatora.**
- Konvencionalni sistem upravljanja nadzire upravljane varijable unutar efekta djelovanja poremećaja, ali se njegove performanse mijenjaju (ne mogu se nadzirati) usljed efekta poremećaja (sinteza uz pretpostavku poznatih i konstantnih parametara procesa).



Uvod u adaptivno upravljanje

- **Metodologija adaptivnog upravljanja**
- Adaptacija (prilagođavanje) na parametarske neizvjesnosti.
- Robusnost na strukturirane i okolinske neizvjesnosti.
- Istovremeno zadovoljavanje stabilnosti i slijeđenja referentnih veličina.
- Samopodešavanje parametara regulatora.
- Sistematičan dizajn i analiza.
- Real-time implementacija.
- Efikasno za kvarove (pogreške) i neizgladene nelinearnosti.
- Visok potencijal za aplikacije.
- Atraktivno i otvoreno područje za istraživanje.





Uvod u adaptivno upravljanje

- **Primjena adaptivnog upravljanja**
- **Modeliranje sistema**
- **Upravljački ciljevi**
 - stabilnost, prijelazni proces, slijeđenje, optimalnost, robusnost,...
- **Parametarske neizvjesnosti**
 - promjena tereta, starenje komponenti, promjena uvjeta,...
- **Strukturirane neizvjesnosti**
 - neispravne (nekvalitetne) komponente, nemodelirana dinamika
- **Okolinske neizvjesnosti**
 - vanjski poremećaji (smetnje)
- **Nelinearnosti**
 - glatke funkcije i neizgladene karakteristike



Uvod u adaptivno upravljanje

- **Motivacija za adaptivno upravljanje – avion**
- Za razumijevanje koncepta adaptivnog upravljanja ilustrativan primjer je avion.
- Avion operira u širokom opsegu promjene brzina i visina leta.
- Dinamika aviona je nelinearna i vremenski promjenjiva.
- Za zadanu radnu tačku, specificiranu brzinom aviona (Mach broj) i visinom, složena dinamika aviona može se aproksimirati linearnim modelom:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}, \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u}$$

gdje matrice \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} i \mathbf{D} mogu biti konstantne ili vremenski promjenjive.



Uvod u adaptivno upravljanje

- **Ukoliko su matrice A , B , C i D nepoznate, djelomično poznate, vremenski promjenjive ili promjenjive s promjenom radne tačke tada upravljanje takvim procesom spada u kategoriju adaptivnih sistema upravljanja.**
- Za radnu tačku i , linearni model aviona ima oblik:

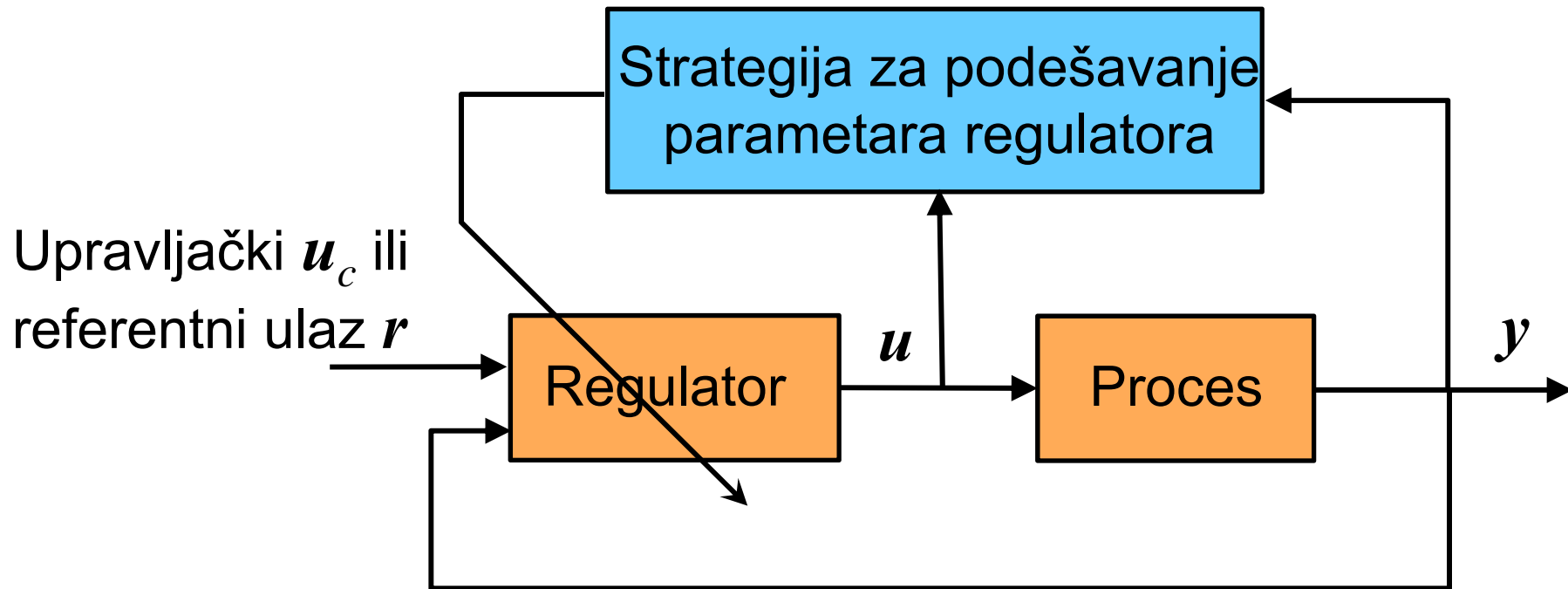
$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}_i \mathbf{x} + \mathbf{B}_i \mathbf{u}, \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}_i \mathbf{x} + \mathbf{D}_i \mathbf{u}\end{aligned}$$

gdje su \mathbf{A}_i , \mathbf{B}_i , \mathbf{C}_i i \mathbf{D}_i funkcije radne tačke i .

- Kako avion prolazi kroz različite režime leta, radna tačka se mijenja što uzrokuje promjene \mathbf{A}_i , \mathbf{B}_i , \mathbf{C}_i i \mathbf{D}_i .

Uvod u adaptivno upravljanje

- Budući da odziv $y(t)$ nosi informacije o stanju x kao i parametrima, sofisticirani regulator u sistemu s povratnom vezom je sposoban naučiti kako se mijenjaju parametri obradom $y(t)$ i koristiti odgovarajuća pojačanja za njihovu prilagodbu.



Uvod u adaptivno upravljanje

- Npr. kod aviona se u toku leta smanjuje masa zbog potrošnje goriva, pa se upravljački algoritam mora prilagoditi promijenjenim uvjetima leta.
- **Adaptivno upravljanje - upravljanje kojim se preodešavanjem parametara regulatora omogućuje upravljanje procesima čiji parametri su vremenski promjenjivi ili su inicijalno neizvjesni.**
- Adaptivno upravljanje se razlikuje od robusnog jer ne zahtijeva a priori znanje o granicama neizvjesnosti parametara procesa ili njihove vremenske promjenjivosti.
- Kod robusnog upravljanja upravljački zakon se ne mijenja ukoliko su neizvjesnosti unutar propisanih granica.
- Adaptivno upravljanje je fokusirano na mijenjanje upravljačkog zakona.



Uvod u adaptivno upravljanje

Razlike adaptivnog i robusnog regulatora

- **Adaptivno upravljanje:**
 - Upotrebljava se kada su unaprijed nepoznate promjene u procesu.
 - On-line estimacija parametara regulatora i određivanje oblika regulatora.
- **Robusno upravljanje:**
 - Upotrebljava se kada je poznata struktura procesa.
 - Poznate granice promjene parametara.



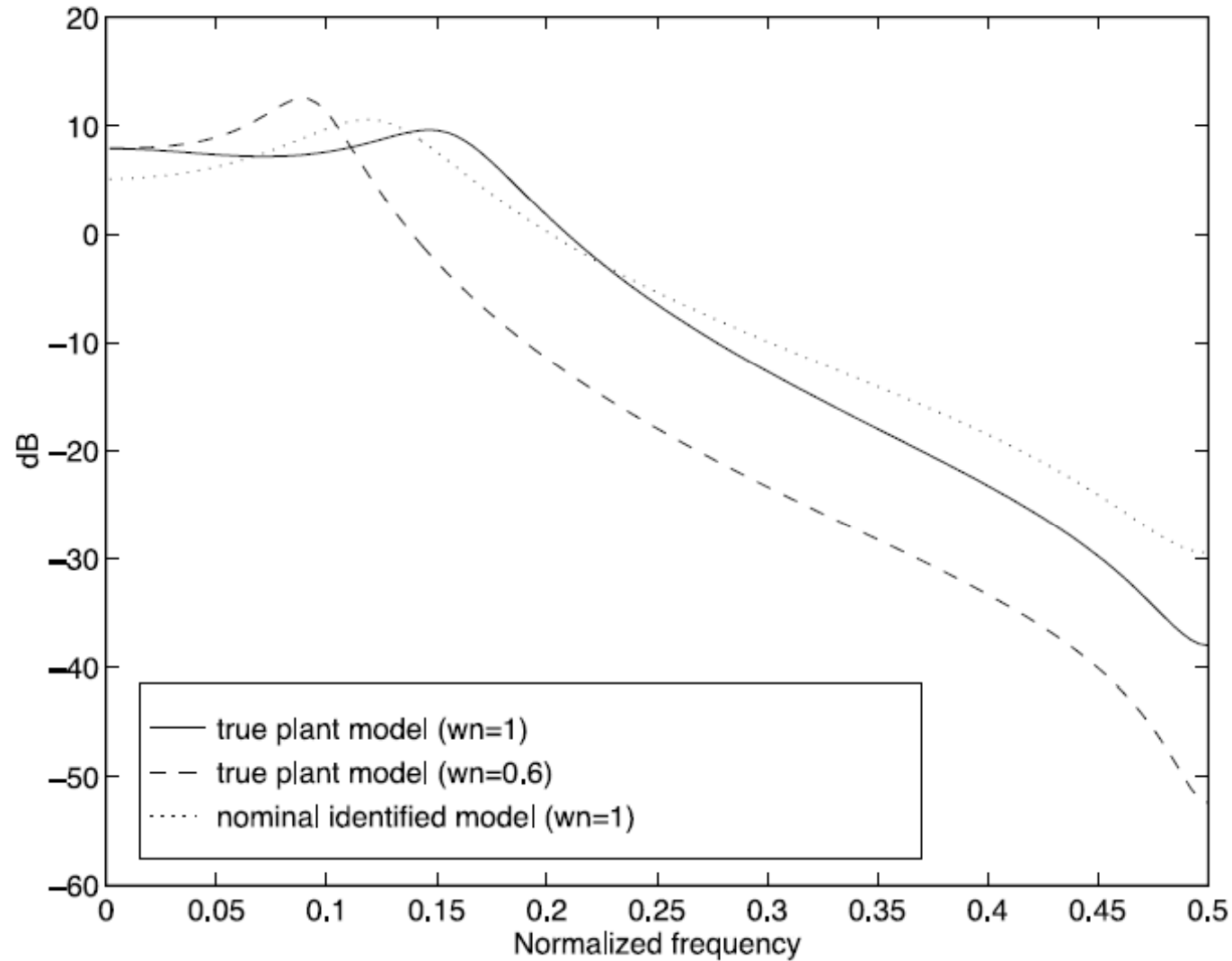
Uvod u adaptivno upravljanje

- **Primjer 1.** Promatra se sistema trećeg reda sastavljen od sistema drugog reda ($\zeta = 0.2$ i prirodna frekvencija se mijenja od $\omega_0 = 1$ rad/s do $\omega_0 = 0.6$ rad/s) i sistema prvog reda.
- Sistem prvog reda ima visoko-frekvencijsku dinamiku u odnosu na sistem drugog reda.
- Promjena faktora prigušena ζ događa se u $t = 150$ s.
- Nominalni sistem sa $\omega_0 = 1$ rad/s je identificiran korištenjem modela drugog reda.
- Frekvencijske karakteristike tačnog modela za $\omega_0 = 1$ rad/s, $\omega_0 = 0.6$ rad/s i identificiranog modela za $\omega_0 = 1$ rad/s prikazane su na sljedećoj slici.



Uvod u adaptivno upravljanje

- **Frekvencijske karakteristike**

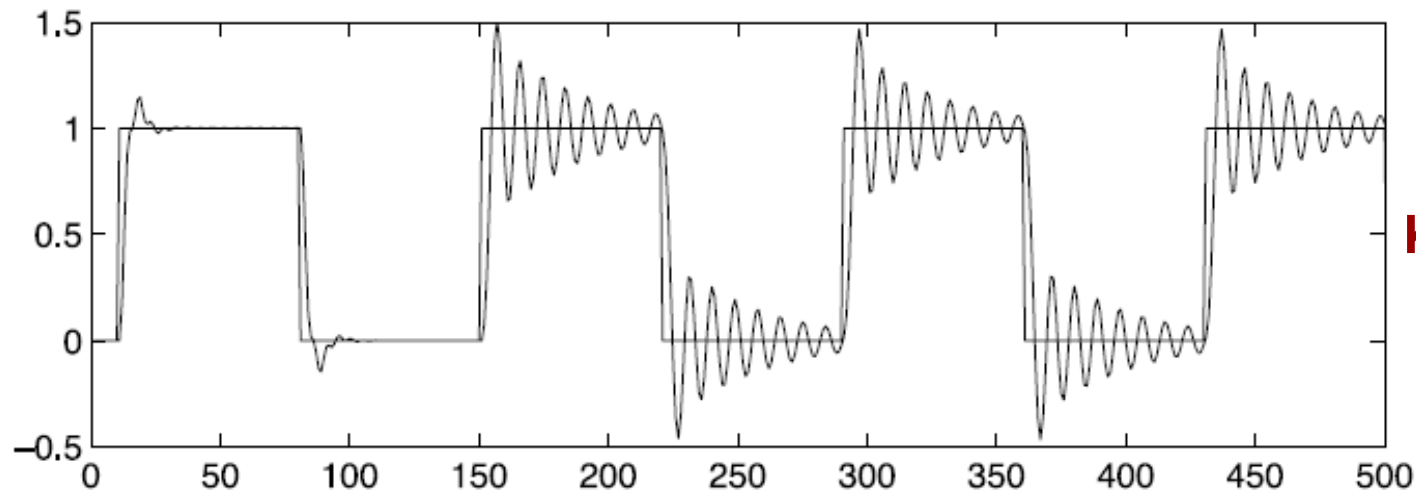


Uvod u adaptivno upravljanje

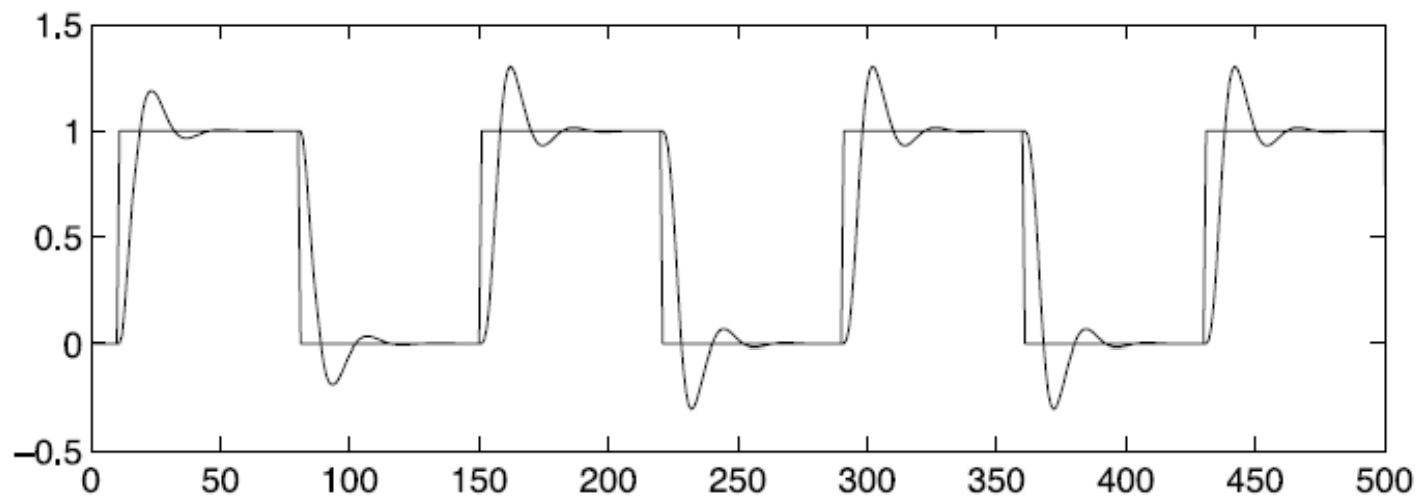
- **Konvencionalni i robusni regulatori**
- U ovom primjeru konvencionalni regulator je projektiran za nominalni model procesa drugog reda, metodom postavljanja polova.
- Performanse zatvorenog sistema upravljanja sa konvencionalnim regulatorom su značajno uvjetovane promjenom prirodne frekvencije (slika a) na sljedećem slajdu).
- Sinteza robusnog regulatora obavljena je metodom oblikovanja funkcija osjetljivosti u kombinaciji sa metodom postavljanja polova.
- Nominalne performanse su nešto slabije (sporiji odziv), ali su performanse prihvatljive u slučaju promjene karakteristika procesa (slika b) na sljedećem slajdu).

Uvod u adaptivno upravljanje

- Usporedba konvencionalnog i robusnog upravljanja



Konvencionalno



Robusno

Uvod u adaptivno upravljanje

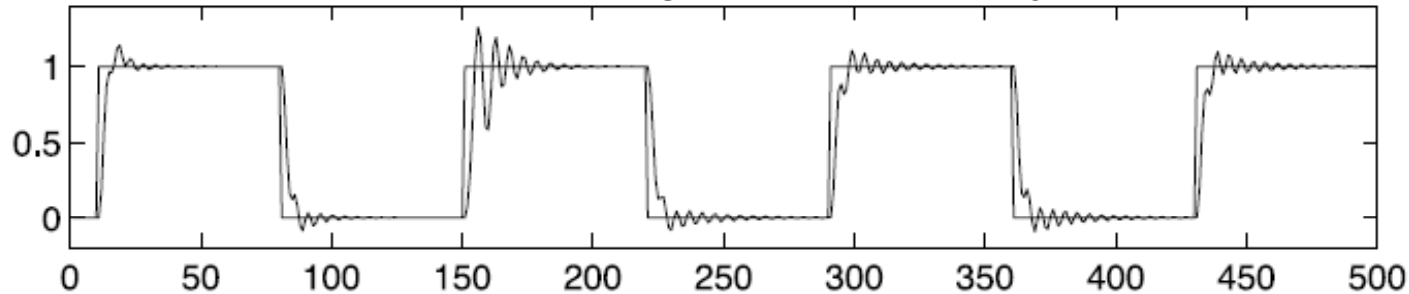
- **Adaptacija konvencionalnog i robusnog regulatora**
- **Adaptacija konvencionalnog regulatora** (slučaj a) zasnovana je na on-line estimaciji modela procesa drugog reda.
 - U odzivu se uočavaju rezidualne visoko-frekvencijske oscilacije (slika na sljedećem slajdu).
 - Povećanjem **robusnosti adaptacijskog algoritma** (u ovom primjeru se radi o filtriranju, slučaj b) ove oscilacije iščezavaju, ali je adaptacija prilično spora.
 - Treći slučaj predstavlja **robusni regulator sa adaptacijom parametara** (slučaj c) zasnovanoj na on-line estimaciji modela procesa. U ovom slučaju nema rezidualnih oscilacija i tranzijentni vrh na početku adaptacije je značajno manji.



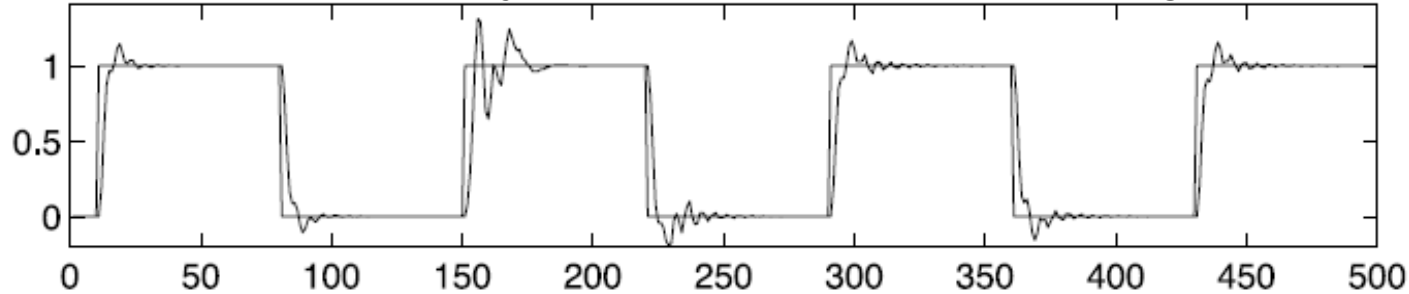
Uvod u adaptivno upravljanje

- **Usporedba odziva**

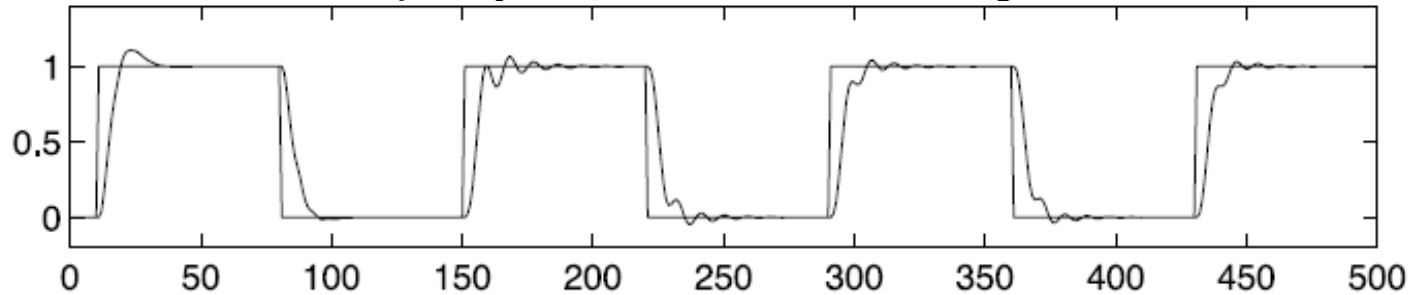
Konvencionalni regulator s adaptacijom



Robusna adaptacija dodana konvencionalnom regulatoru



Adaptacija dodana robusnom regulatoru



Uvod u adaptivno upravljanje

- Zaključci analize vremenskih odziva iz primjera 1.:
 - 1) Prije korištenja adaptivnog upravljanja obaviti sintezu robusnog regulatora.
 - 2) Dizajn robusnog upravljanja poboljšava adaptacijske tranzijente.
 - 3) Robusni regulator je regulator sa fiksnim parametrima koji trenutno ne osigurava željene karakteristike.
 - 4) Poboljšanje performansi pomoću adaptivnog upravljanja zahtijeva uvođenje dodatnih algoritama u petlji i prisustvo adaptacijskih tranzijenata (vrijeme potrebno za dostizanje željenih performansi iz degradirane situacije).
 - 5) Postoji trade-off u dizajnu između robusnog upravljanja i robusne adaptacije.



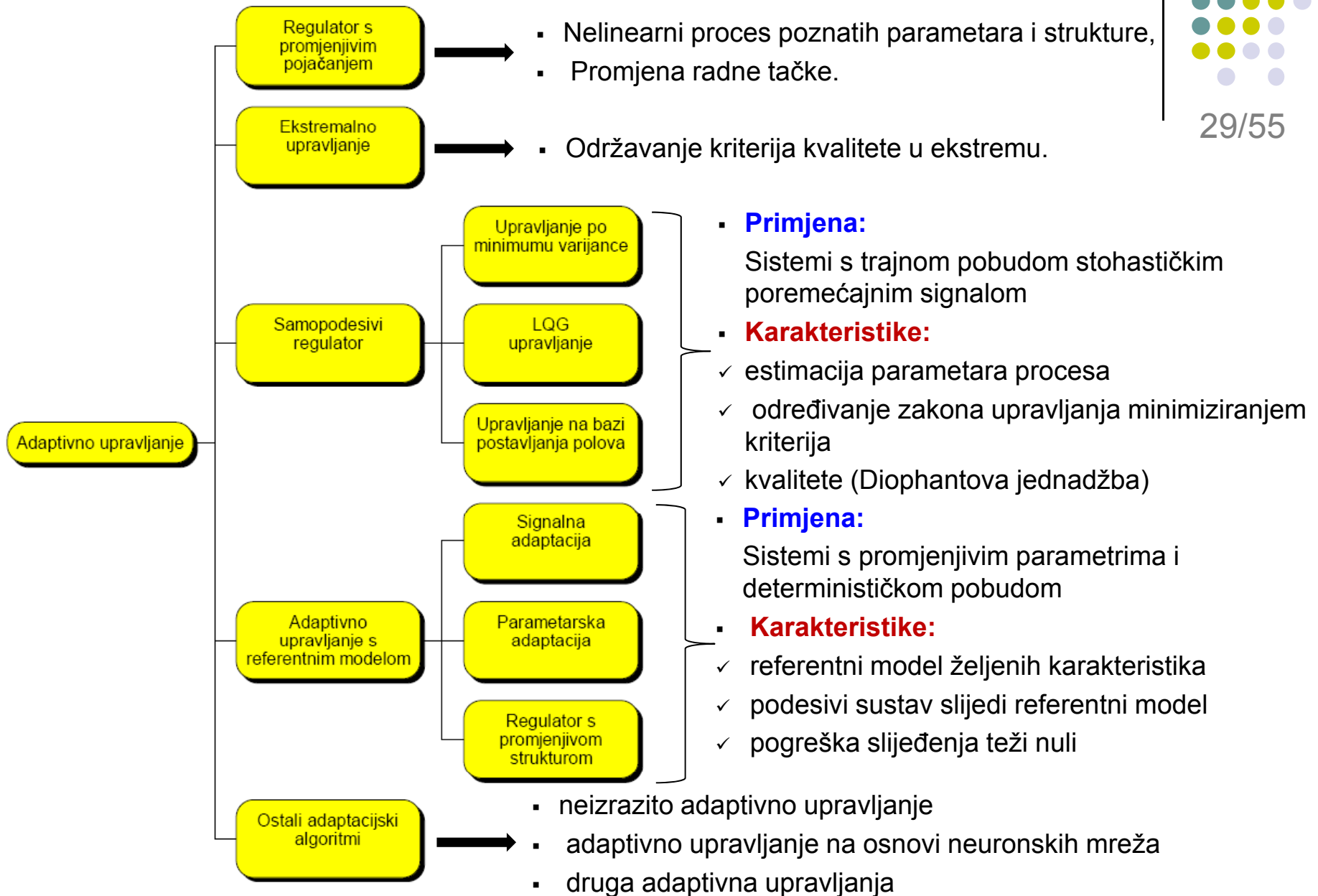
Uvod u adaptivno upravljanje

Razlozi za upotrebu adaptivnog regulatora

- **Promjene u dinamici procesa**
 - promjena reda sistema tokom rada,
 - promjene parametara procesa,
 - djelomično nepoznata dinamika ili parametri procesa,
 - promjena radne tačke nelinearnog sistema.
- **Promjene karakteristika upravljačkog signala ili smetnji**
 - pojava stohastičkih smetnji.
- **Povećanje efikasnosti sistema.**



Strukture adaptivnih regulatora



Strukture adaptivnih regulatora

Regulator s promjenjivim pojačanjem (GS)

- Kod modela aviona za svaku radnu tačku i , $i = 1, 2, \dots, N$, parametri A_i , B_i , C_i i D_i su poznati.
- Za zadanu radnu tačku i , regulator s konstantnim pojačanjima θ_i može se dizajnirati tako da postiže zahtijevane performanse za korespondentni linearani model.
- Na ovaj način se dobiva regulator $C(\theta)$ sa skupom pojačanja $\{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i, \dots, \theta_N\}$ koji pokrivaju N radnih tačaka.
- Kada se u toku rada detektira radna tačka i tada regulator mijenja svoja pojačanja θ_i na iznose koji odgovaraju danoj radnoj tački, a koji se nalaze u prethodno određenom skupu pojačanja.



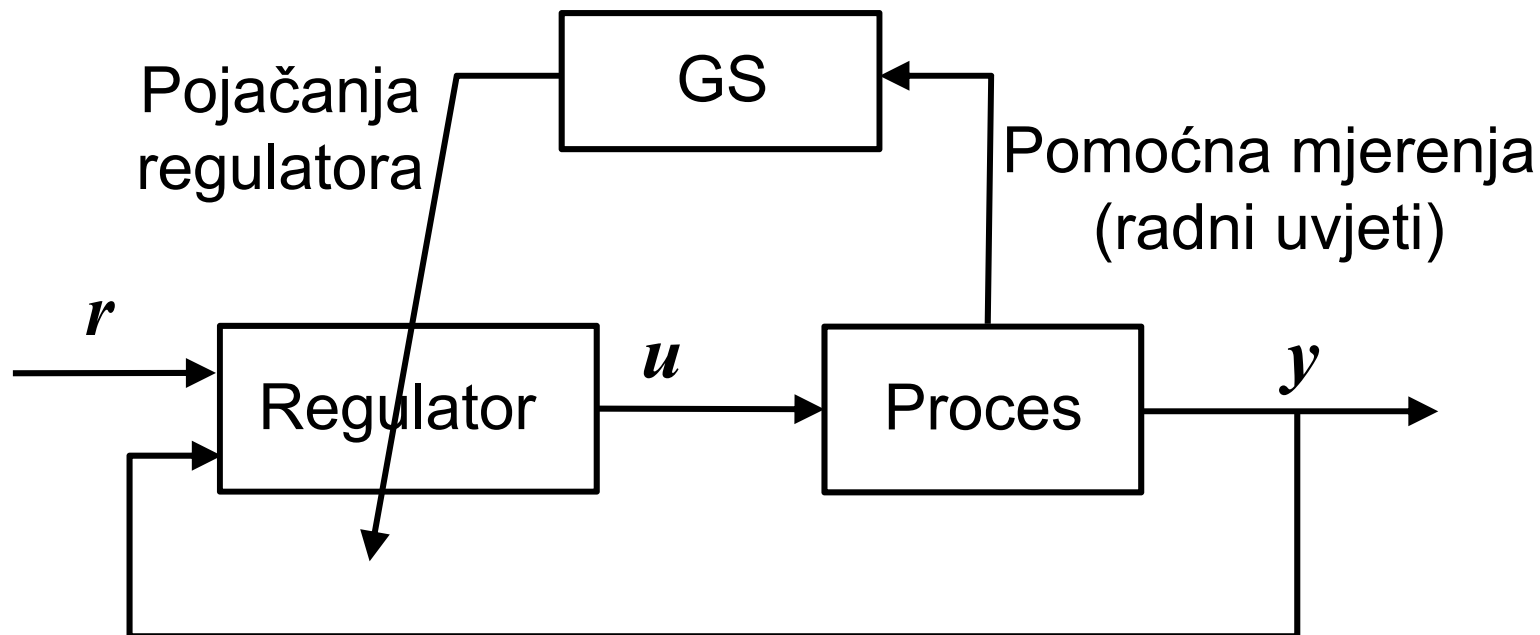
Strukture adaptivnih regulatora

- Ukoliko vrijednosti za danu radnu tačku nisu prethodno pohranjeni u tabeli, tada se radi interpolacija između dvije najbliže pohranjene radne tačke.
- Za implementaciju GS regulatora esencijalna su dva elementa: **tabela** (look-up) u koju se pohranjuju vrijednosti pojačanja θ_i , i **pomoćna mjerenja** iz procesa koja koreliraju sa promjenama radnih tačaka.
- Prema tome, GS sadrži tabelu sa prethodno određenim pojačanjima regulatora za korespondentnu radnu tačku (skup parametara) i odgovarajuću logiku za detekciju radne tačke i izbor odgovarajućih pojačanja θ_i iz tabele.
- U slučaju aviona, pomoćna mjerenja su Machov broj i dinamički pritisak.



Strukture adaptivnih regulatora

- Korištenjem GS pristupa, varijacije parametara procesa mogu se kompenzirati mijenjenjem pojačanja regulatora kao funkcije pomoćnih mjerenja.
- GS koncept je originalno razvijen za upravljanje letom aviona, gdje se Machov broj i visina mjere pomoću senzora i koriste kao varijable (schedule variables).



Strukture adaptivnih regulatora

- **Prednosti:**
 - Pojačanja regulatora mogu se brzo mijenjati kako pomoćna mjerenja odgovaraju na promjene parametara procesa.
- Rapidno brze promjene pojačanja mogu dovesti do nestabilnosti, što predstavlja ograničenje - kako često i brzo se mogu mijenjati pojačanja regulatora.
- **Nedostaci:**
 - Mehanizam prepodešavanja parametara regulatora je prethodno izračunat u off-line režimu i ne može osigurati povratnu vezu za kompenziranje nekorektnih planova (schedule).
 - Neprediktibilne promjene u dinamici procesa mogu prouzročiti distorziju performansi (ili čak i kvar).
 - Visoki troškovi dizajna i implementacije, koji rastu s brojem radnih tačaka.



Strukture adaptivnih regulatora

Direktno i indirektno adaptivno upravljanje

- Adaptivni regulator se formira kombinacijom **on-line estimatora parametara** (estimira nepoznate parametre u svakom vremenskom trenutku) i **upravljačkog zakona**.
- Postoje dva načina ovog kombiniranja:
 - **Indirektno adaptivno upravljanje** – parametri procesa se estimiraju on-line i koriste za računanje parametara regulatora. Ovaj pristup je poznat i pod imenom **eksplicitno adaptivno upravljanje**, budući da se sinteza zasniva na eksplicitnom modelu procesa.
 - **Direktno adaptivno upravljanje** – model procesa se parametrizira preko parametara regulatora koji se direktno estimiraju bez međuračunanja estimiranih parametara procesa.

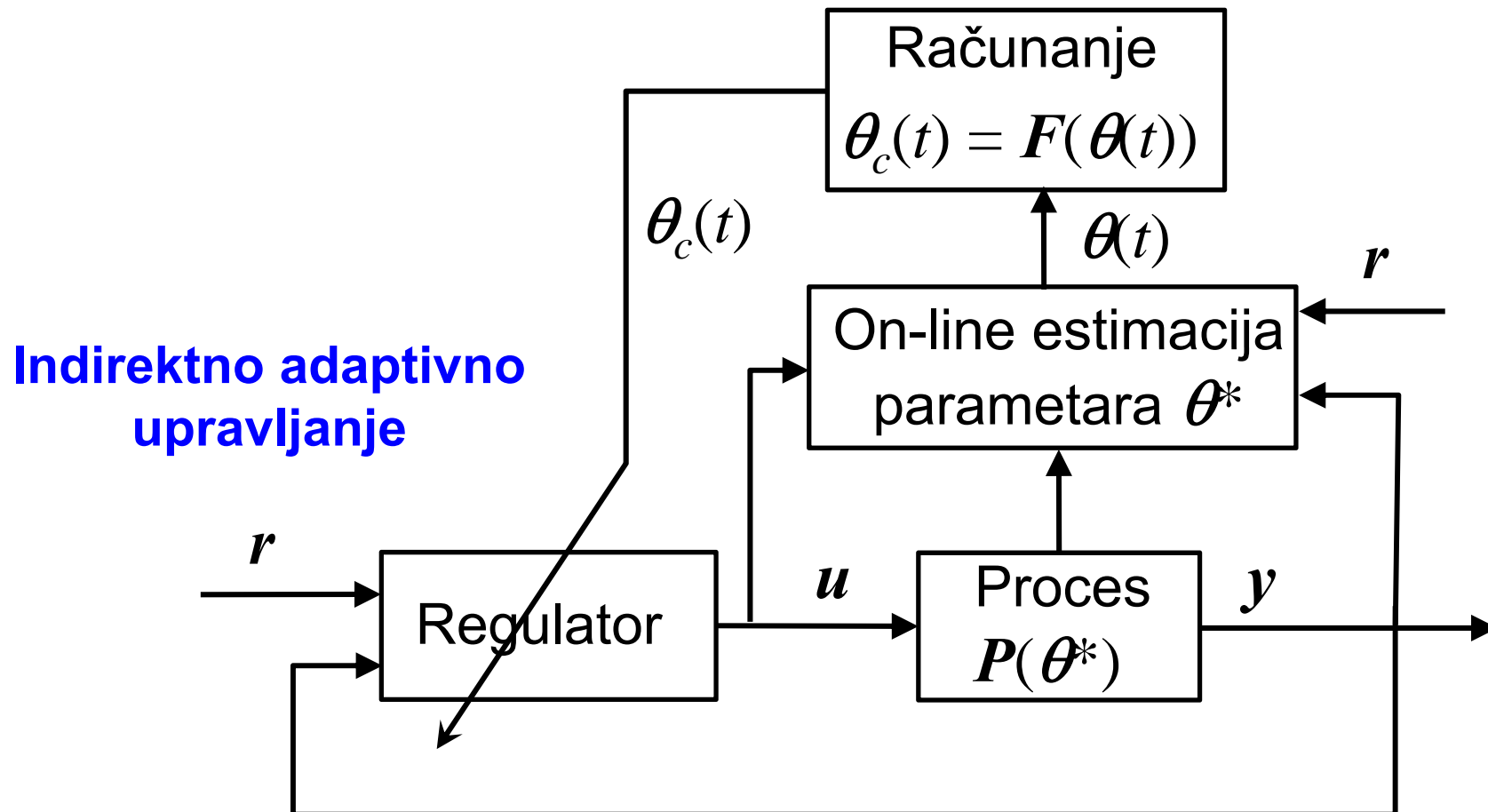




Strukture adaptivnih regulatora

Indirektno adaptivno upravljanje

- Drugi pristup je poznat i pod imenom **implicitno adaptivno upravljanje** jer se sinteza regulatora zasniva na estimaciji implicitnog modela procesa.



Strukture adaptivnih regulatora

- Kod indirektnog adaptivnog upravljanja model procesa $P(\theta^*)$ je parametriziran vektorom nepoznatih parametara θ^* .
- On-line estimator parametara generira estimate $\theta(t)$ od θ^* u svakom vremenskom trenutku t na temelju vrijednosti ulaza u i izlaza y .
- Estimirani parametri $\theta(t)$ specificiraju estimirani model procesa karakteriziran sa $\hat{P}(\theta(t))$, koji se za potrebe sinteze upravljanja tretira kao “tačan” model, i koji se koristi za računanje vektora upravljačkih parametara ili pojačanja $\theta_c(t)$ rješavanjem algebarske jednadžbe $\theta_c(t) = F(\theta(t))$ u svakom vremenskom trenutku t .



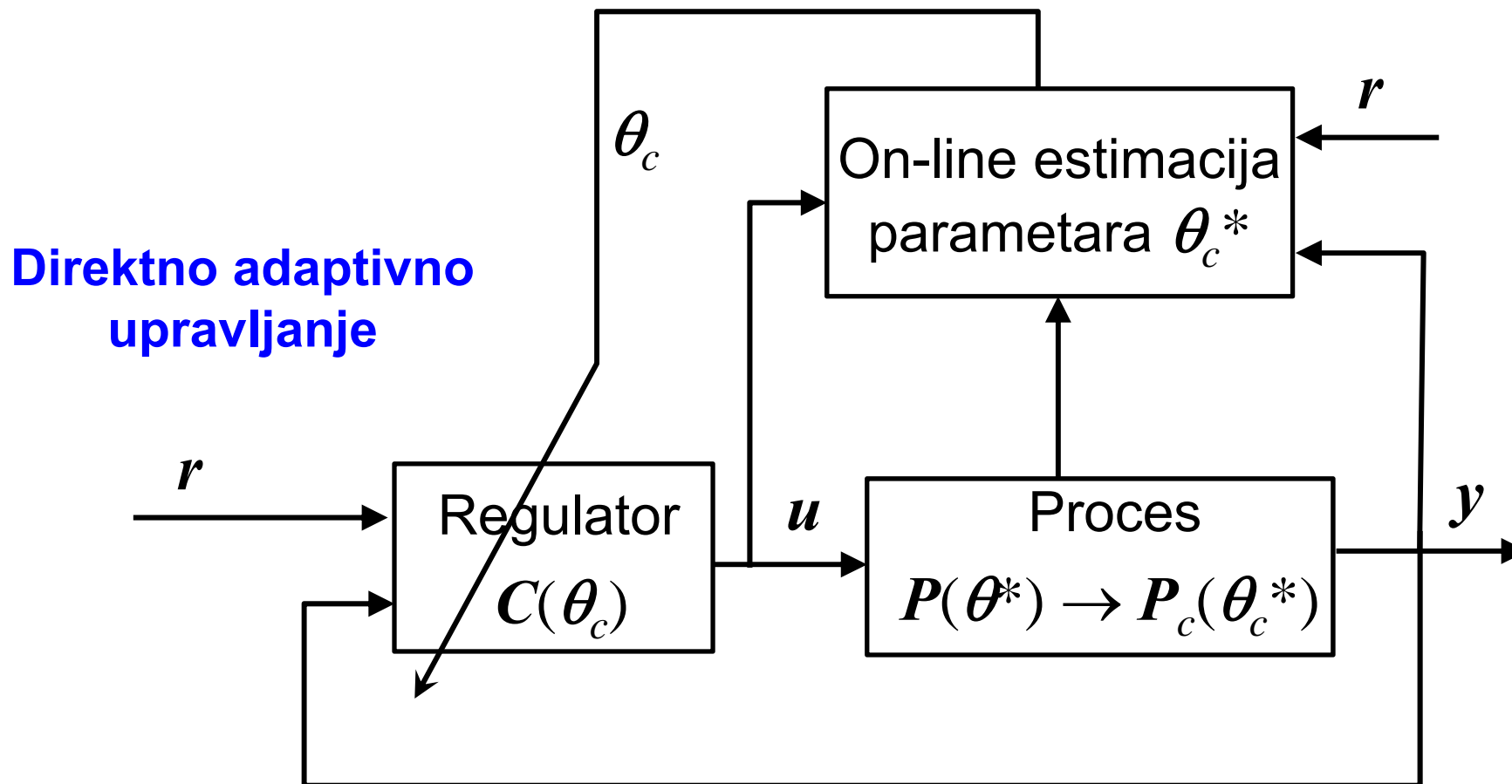
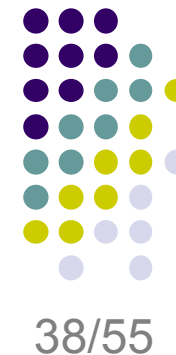
Strukture adaptivnih regulatora

- Sa indirektnim adaptivnim upravljanjem, upravljački zakon $C(\theta_c(t))$ se dizajnira za svaki t da bi zadovoljio zahtjeve na performanse estimiranog modela procesa $\hat{P}(\theta(t))$, koji se može razlikovati od nepoznatog modela procesa $P(\theta^*)$.
- Glavni problem ovog upravljanja jest odabrati klasu upravljačkih zakona $C(\theta_c(t))$ i klasu estimatora parametara koji generiraju $\theta(t)$ kao i odabrati algebarsku jednadžbu $\theta_c(t) = F(\theta(t))$ takvu da $C(\theta_c(t))$ postiže zahtijevane performanse za model procesa $P(\theta^*)$ sa nepoznatim θ^* .

Strukture adaptivnih regulatora

Direktno adaptivno upravljanje

- Struktura direktnog adaptivnog upravljanja prikazana je na slici.



Strukture adaptivnih regulatora

- Kod direktnog adaptivnog upravljanja, model procesa $P(\theta^*)$ je parametriziran u obliku vektora nepoznatih parametara regulatora θ_c^* , za koji $C(\theta_c^*)$ postiže zahtjevane performanse, da bi se dobio model procesa $P_c(\theta_c^*)$ sa tačnim ulazno/izlaznim karakteristikama kao kod $P(\theta^*)$.
- On-line estimator parametara je dizajniran na temelju $P_c(\theta_c^*)$, umjesto na $P(\theta^*)$, kako bi se direktno estimirao $\theta_c(t)$ od θ_c^* za svaki t obradom ulaza u i izlaza y procesa.
- Estimirani $\theta_c(t)$ se zatim koriste za prepodešavanje vektora parametara regulatora θ_c bez među računanja.

Strukture adaptivnih regulatora

- **Izbor klase upravljačkih zakona $C(\theta_c)$ i estimatora za generiranje parametara $\theta_c(t)$ za koje $C(\theta_c(t))$ postiže zahtijevane performanse model procesa $P(\theta^*)$ je temeljni problem u direktnom adaptivnom upravljanju.**
- Dizajn $C(\theta_c)$ tretira estimacije $\theta_c(t)$ (u slučaju direktnog adaptivnog upravljanja) ili estimacije $\theta(t)$ (u slučaju indirektnog adaptivnog upravljanja).
- Ovakav pristup dizajna naziva se **ekvivalencija izvjesnosti** (certainty equivalence) i može se koristiti za generiranje široke klase adaptivnih upravljačkih shema, kombiniranjem različitih on-line estimatora parametara i različitih upravljačkih zakona.



Strukture adaptivnih regulatora

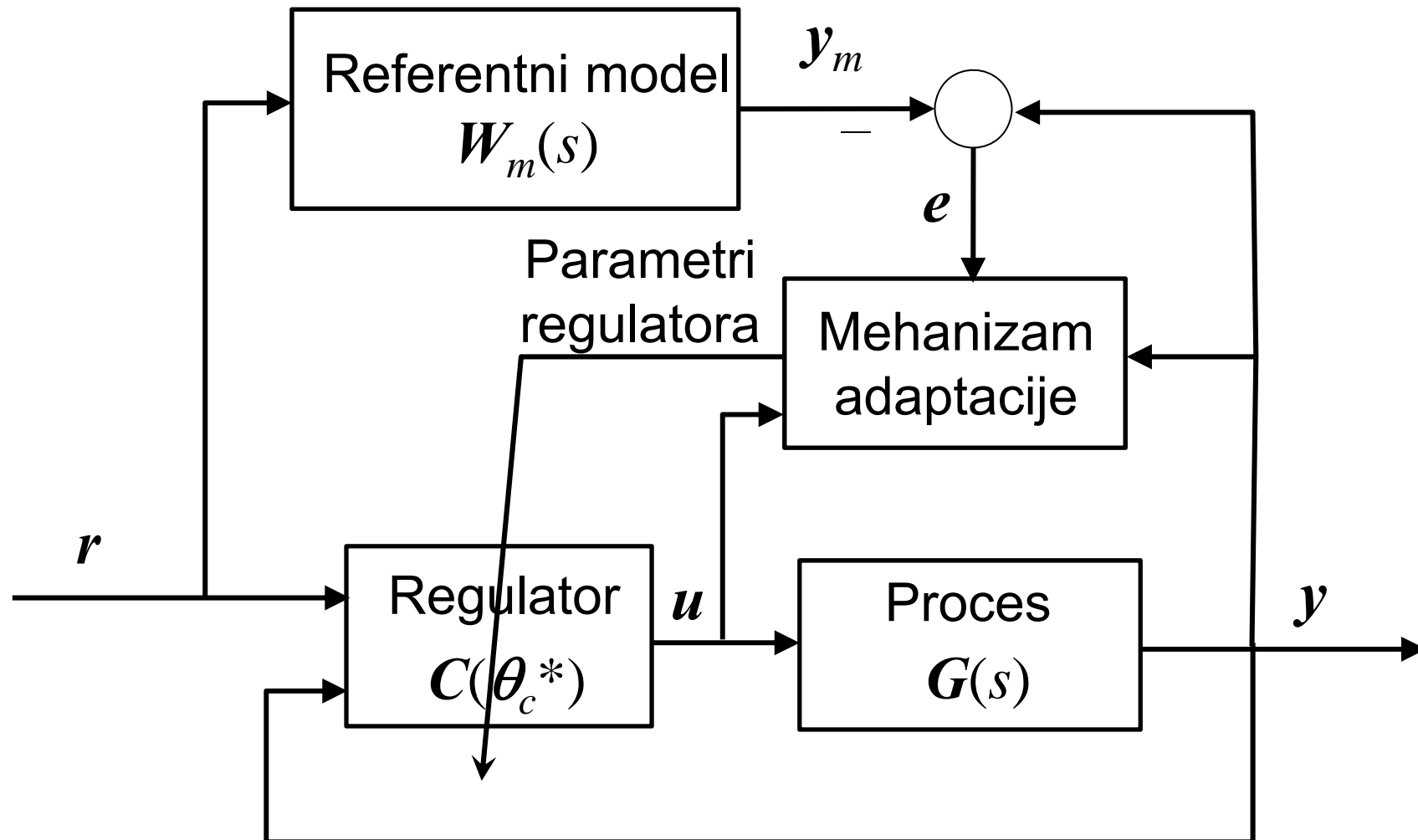
Adaptivni regulator s referentnim modelom

- Adaptivni regulator s referentnim modelom (MRAC – Model Reference Adaptive Control) je izveden iz MRC problema.
- Referentni model opisuje željena ulazno/izlazna svojstva zatvorenog sistema (procesa), odnosno kako idealan izlaz procesa treba da da odziv na upravljački signal
- Cilj MRC-a je pronaći upravljački zakon zatvorene petlje koji mijenja strukturu i dinamiku procesa tako da su njegova ulazno/izlazna svojstva ista kao kod referentnog modela.
- MRAC rješava problem u kome su specifikacije performansi dane u obliku referentnog modela.
- Struktura MRAC-a prikazana je na sljedećoj slici.



Strukture adaptivnih regulatora

- MRAC struktura



Strukture adaptivnih regulatora

- **Kod MRAC strukture imamo:**
- **Proces** poznate strukture, ali sa nepoznatim parametrima.
- **Referentni model** koji specificira idealan (željeni) odziv y_m na vanjski upravljački ili referentni signal r .
- **Regulator** koji je parametriziran i osigurava slijeđenje.
- **Adaptacija** (mehanizam adaptacije ili mehanizam podešavanja) koja se koristi za podešavanje parametara u upravljačkom zakonu.





Strukture adaptivnih regulatora

- Vanjska petlja ima zadatak podesiti parametre regulatora tako da pogreška modela e , razlika između izlaza procesa y i izlaza referentnog modela y_m , bude malog iznosa.
- Mehanizam podešavanja (namještanja) kod MRAS-a naziva se MIT pravilo:

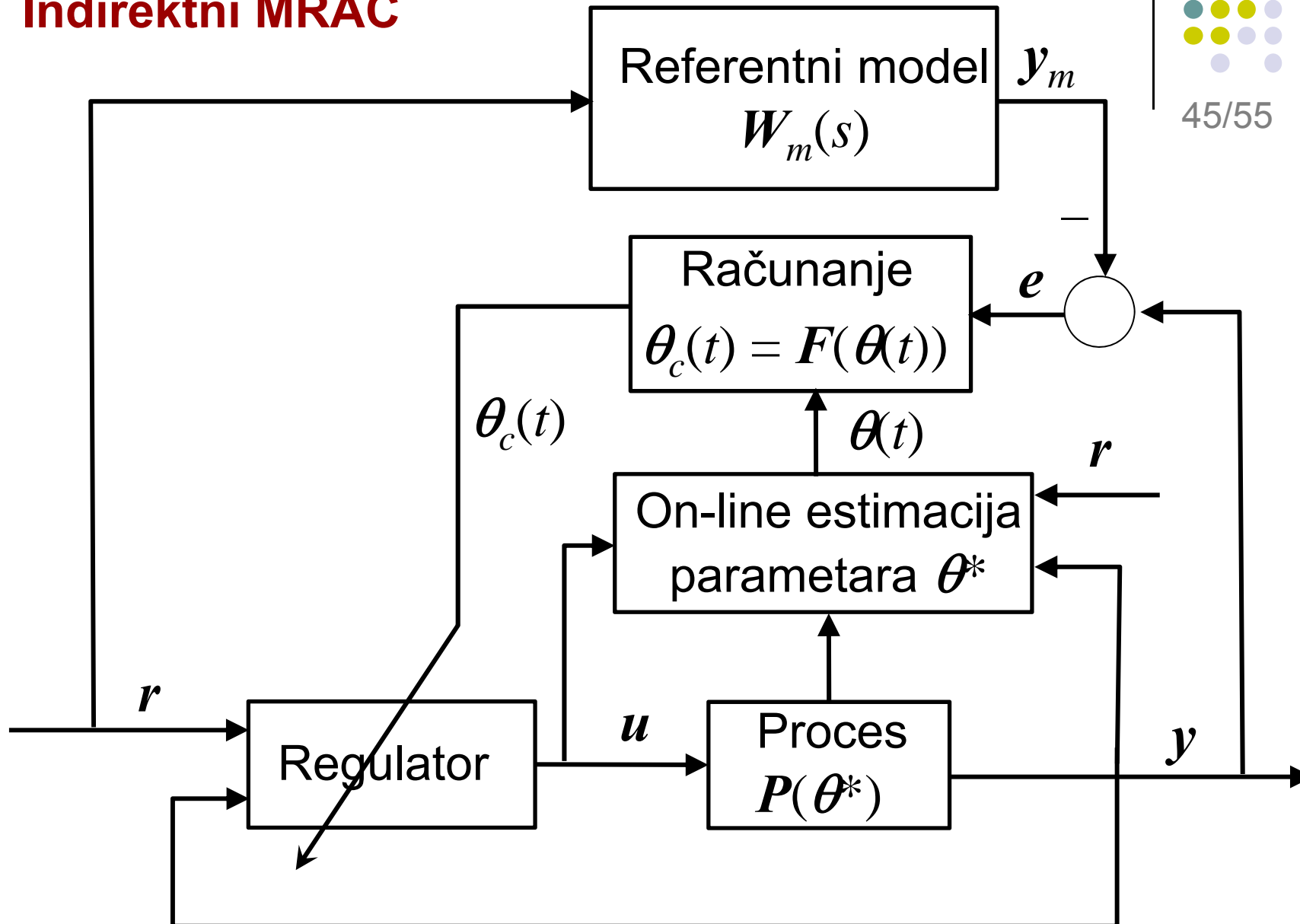
$$\frac{d\theta_c^*}{dt} = \gamma \frac{\partial e}{\partial \theta_c^*}$$

gdje je θ_c^* vektor parametara regulatora i γ je parametar koji određuje brzinu adaptacije.

- MRAS je originalno razvijen za upravljanje letom aviona, gdje referentni model opisuje željeni odziv aviona na kretanja palice (joystick).

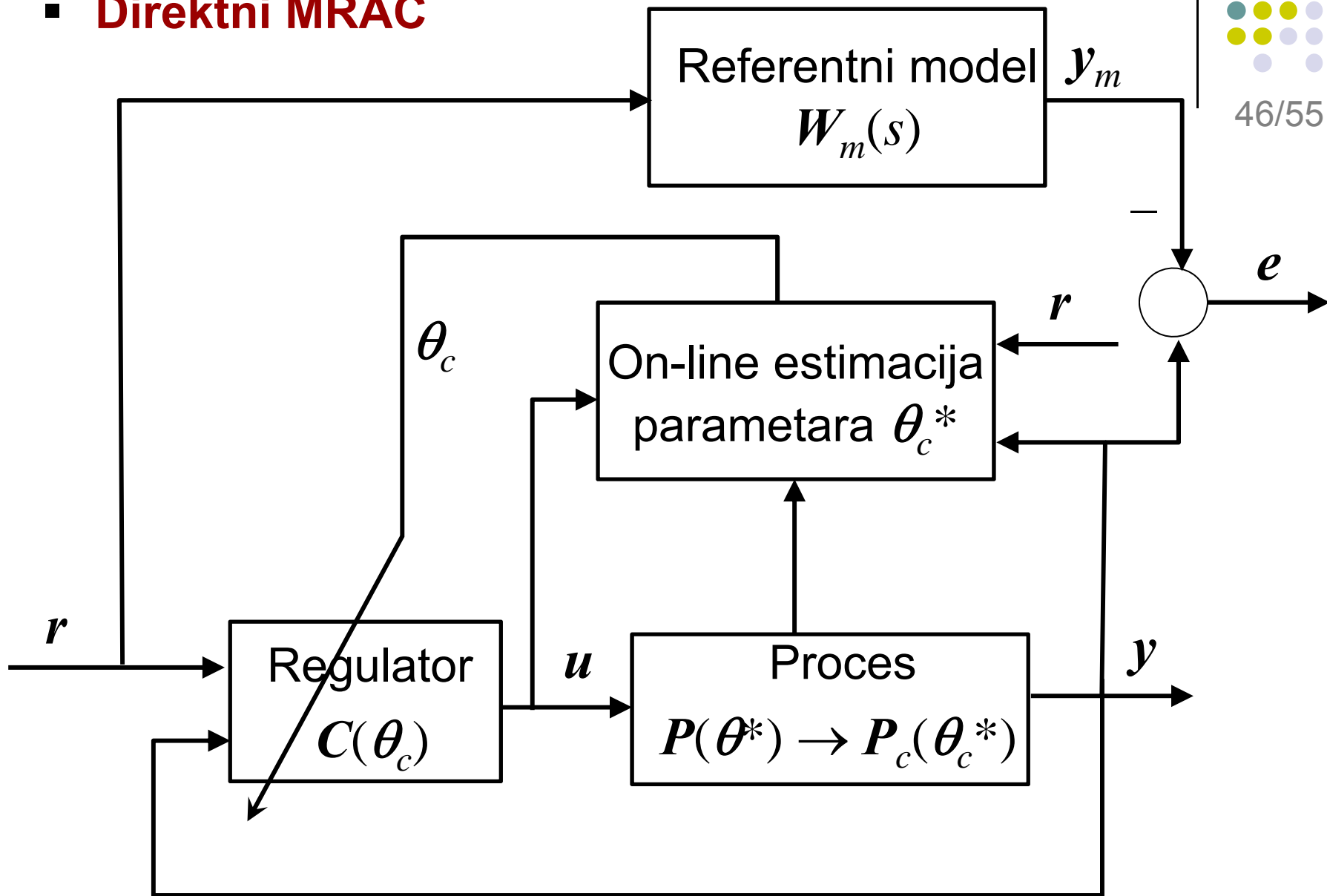
Strukture adaptivnih regulatora

- **Indirektni MRAC**



Strukture adaptivnih regulatora

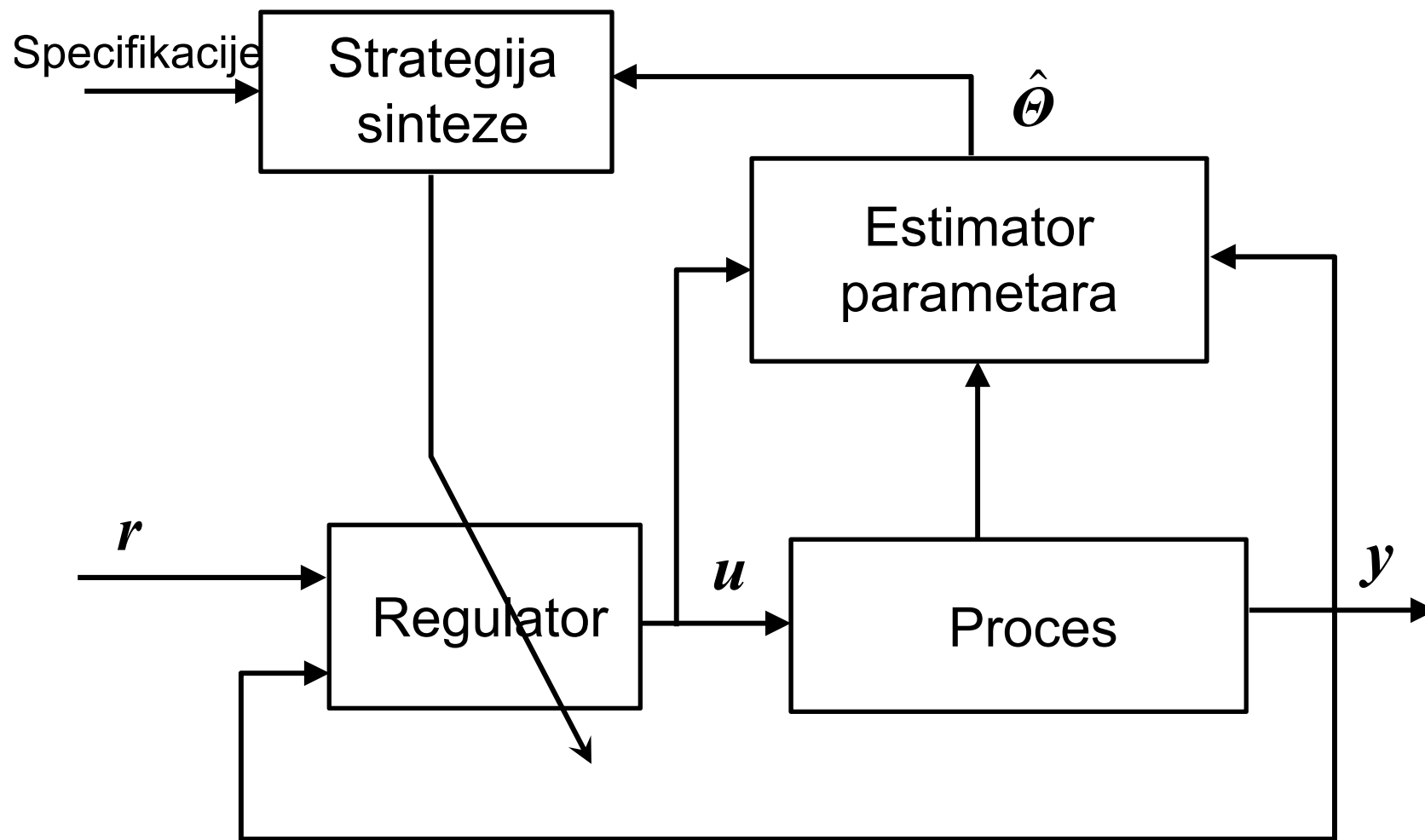
- **Direktni MRAC**



Strukture adaptivnih regulatora

Samopodesivi regulator

- Samopodesivi regulator (Self-Tuning Controllers, STC).



Strukture adaptivnih regulatora

- Samopodesivi regulator kombinira regulator sa on-line (rekurzivno) estimatorom parametara procesa.
- Obavlja istovremeno identifikaciju parametara i upravljanje.
- Može se dodati i referentni model.
- **Svojstva:**
 - Osigurava traženu kvalitetu regulacije bez obzira na promjene parametara sistema.
 - Parametri regulatora se određuju u realnom vremenu iz parametara estimiranog modela procesa.
 - Estimirani model procesa je linearan.



Strukture adaptivnih regulatora

- **Koraci tokom rada u realnom vremenu:**
 - Estimacija parametara modela
 - Sinteza regulatora
 - Proračun signala izlaza iz regulatora za sljedeći korak diskretizacije.
- **Vrsta modela:**
 - Linearni
 - Jedan ulaz jedan izlaz (SISO)
 - S konstantnim parametrima
 - Diskretni



Strukture adaptivnih regulatora

Adaptivni regulator s postavljanjem polova

- Samopodesivi regulator na bazi postavljanja polova.
- Ideja: **Postaviti polove tako da prijenosna funkcija zatvorenog sistema bude jednaka željenoj prijenosnoj funkciji.**
- Parametri prijenosne funkcije procesa određeni estimacijom:

$$G_p(q) = \frac{B(q)}{A(q)}$$

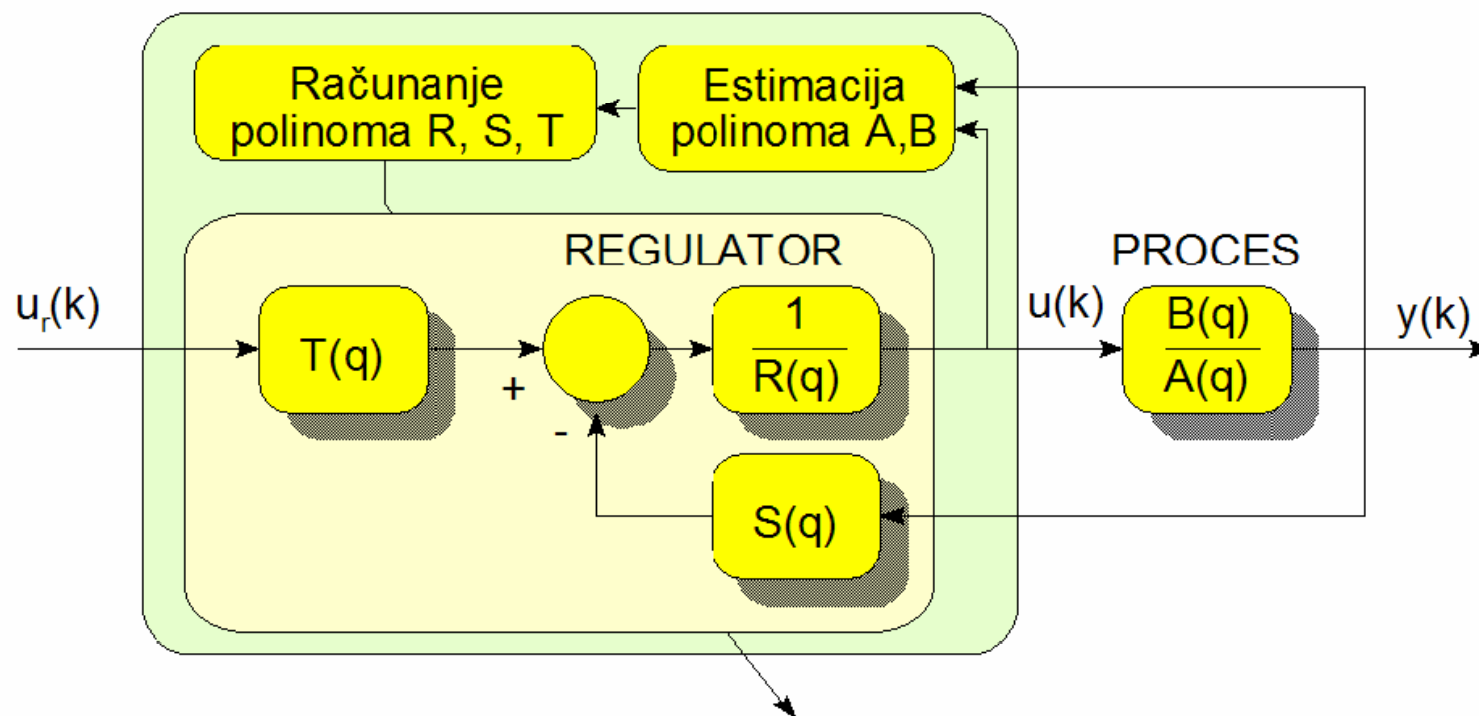
- Željeno ponašanje sistema određeno prijenosnom funkcijom modela:

$$G_m(q) = \frac{B_m(q)}{A_m(q)}$$



Strukture adaptivnih regulatora

- Samopodesivi regulator na bazi postavljanja polova - struktura.



- $R(q)$, $S(q)$ i $T(q)$ su polinomi samopodesivog regulatora.

Strukture adaptivnih regulatora

- Izjednačavanje funkcije prijenosa zatvorenog kruga i željene funkcije prijenosa:

$$\frac{B(q)T(q)}{A(q)R(q) + B(q)S(q)} = \frac{B_m(q)}{A_m(q)}$$

- Izjednačenje polova (jednadžba identiteta ili Diophantova jednadžba):

$$A(q)R(q) + B(q)S(q) = A_m(q)$$

- Izjednačenje nula:

$$B(q)T(q) = B_m(q)$$





Strukture adaptivnih regulatora

- Rješavanjem jednačbe izjednačenja polova dobivaju se polinomi $R(q)$ i $S(q)$ na temelju polinoma željene funkcije ($A_m(q)$) i estimiranih polinoma procesa ($A(q)$ i $B(q)$).
- Korištenjem jednačbe izjednačenja nula dobiva se polinom $T(q)$.
- Adaptivni algoritam upravljanja:

$$u(k) = \frac{1}{R(q)} [T(q)u_r(k) - S(q)y(k)]$$

Sumarno o adaptivnom upravljanju

- **Osnovne ideje u adaptivnom upravljanju:**

- Estimacija neizvjesnih parametara procesa/regulatora korištenjem mjernih signala iz sistema.
- Korištenje estimiranih parametara za računanje upravljačkog ulaza.

- **Adaptivni regulator predstavlja dinamički sistem sa on-line estimacijom parametara:**

- Adaptivni regulator je inherentno nelinearan.
- Analiza i dizajn se oslanjaju na Lyapunovljevoj teoriji stabilnosti.



Sumarno o adaptivnom upravljanju

■ Zašto adaptivno upravljanje?

- Upravljanje složenim sistemima koji imaju nepredvidivu promjenu parametara i neizvjesnosti.

■ Koji je osnovni cilj adaptivnog upravljanja?

- Održavati konstantnim preformanse sistema u prisustvu neizvjesnosti i varijacija u parametrima procesa.

■ Adaptivno vs. robusno upravljanje

- Adaptivno superiorno kada postoje neizvjesnosti u konstantnim ili sporopromjenjivim parametrima.
- Robusno u prednosti kada djeluju poremećaji, postoji brza promjena parametara i nemodelirana dinamika.



55/55