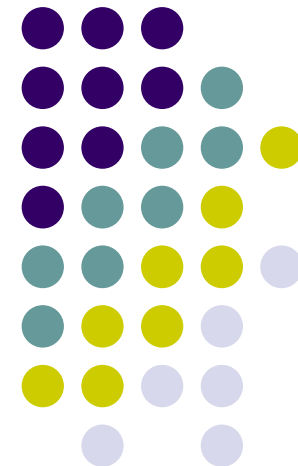


Lekcija 11: *Automobilski mehatronički procesi – kočenje, pogonski sistemi, tolerancija na kvarove,...*

Prof.dr.sc. Jasmin Velagić
Elektrotehnički fakultet Sarajevo

Kolegij: Mehatronika

2012/2013





11.1. Kočioni sistem

- Standardni kočioni sistem – hidraulički sistem sa dva neovisna hidraulička kruga.
- Zbog pojave novih funkcija kao što su ABS i ESP dizajn sistema kočenja postaje složeniji.
- Da bi se povećala (unaprijedila) funkcionalnost, uštedio prostor i smanjili troškovi proizvodnje (montaže), te povećala sigurnost, razvijena su dva sistema kočenja “preko žice” (pomoću električkih kablova):
 - **Elektrohidrauličke kočnice** (EHB – Electro Hydraulic Brake),
 - **Elektromehaničke kočnice** (EMB – Electro Mechanic Brake).

Kočioni sistem

Konvencionalni hidraulički kočioni sistem

- Mehanička veza između papučice (pedale) kočnice i glavnog hidrauličkog cilindra je paralelna sa pneumatskim aktuatorom (booster).
- Ako pneumatski aktuator zakaže, mehanička veza prenosi silu sa papučice, koju pritišće vozač.
- Hidraulički cilindar djeluje na dva neovisna, paralelna hidraulička kruga.
- Ovo znači da je **sistem kočenja tolerantan na kvarove** s obzirom na kvarove jednog od dva hidraulička kruga.



Kočioni sistem

Konvencionalni hidraulički kočioni sistem

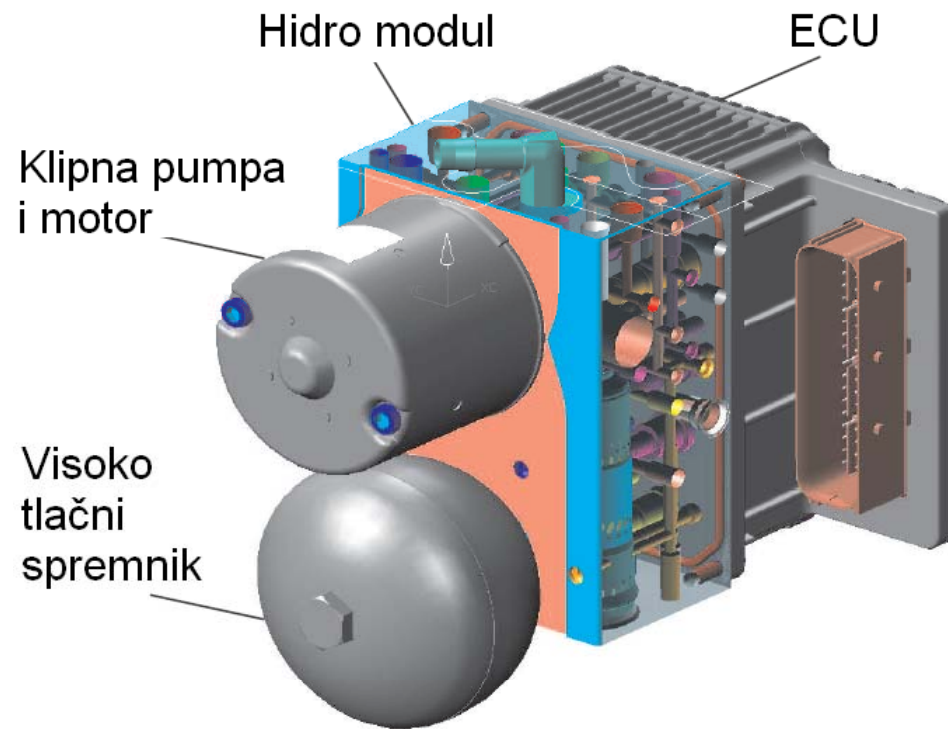
- Kvarovi u elektronicima sistema upravljanja kočnjem, kao što je ABS, dovodi hidrauličke aktuatora (npr. magnetski ventili) u siguran (bezopasan) status tako da hidrauličke kočnice nabijaju pritisak direktno iz glavnog hidrauličkog cilindra.
- ABS funkcije su realizirane sa preklapajućim ventilima, koji imaju tri pozicije za smanjenje, držanje ili povećanje pritiska tekućine i stoga omogućuju samo diskretnu akciju momenta kočenja, sa jakim oscilacijama.



Kočioni sistem

Elektrohidrauličke kočnice

- Prve elektrohidrauličke kočnice – 2001. godine ugrađene u Mercedes SL i E klase.



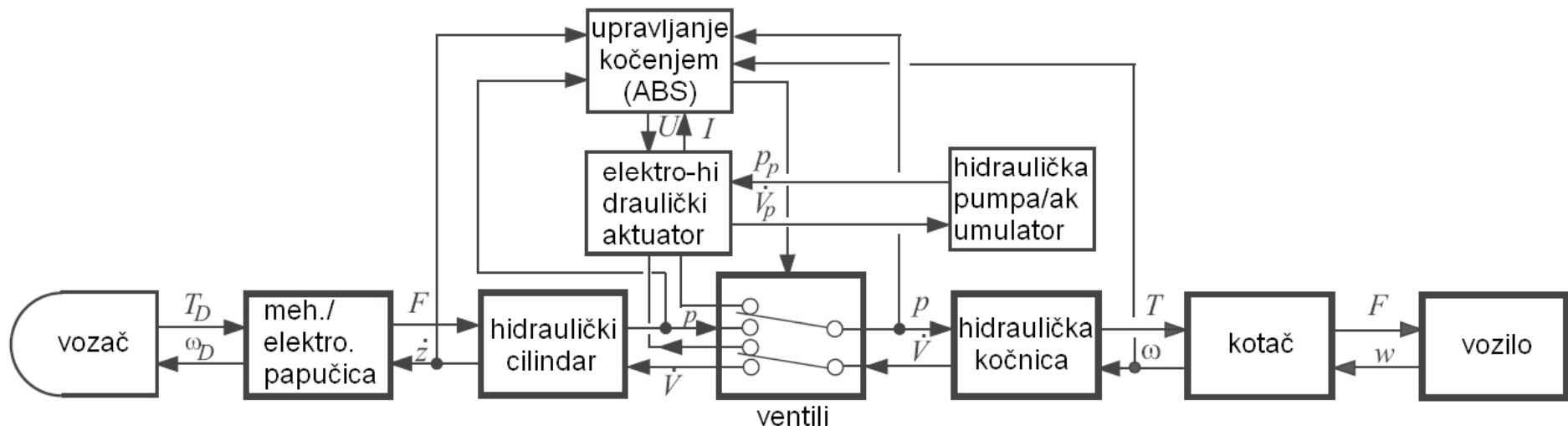
Proizvođač: Bosch



Kočioni sistem

Elektrohidrauličke kočnice

- Mehanička papučica ima senzore za poziciju i hidraulički tlak.
- Njihovi signali se prenose do odvojenih hidrauličkih petlji tlaka sa proporcionalnim magnetskim ventilima, manipulirajući tokom hidrauličkog fluida iz 160 barskog spremnik/pumpa sistema prema kočnicama na kotačima.



Kočioni sistem

Elektrohidrauličke kočnice

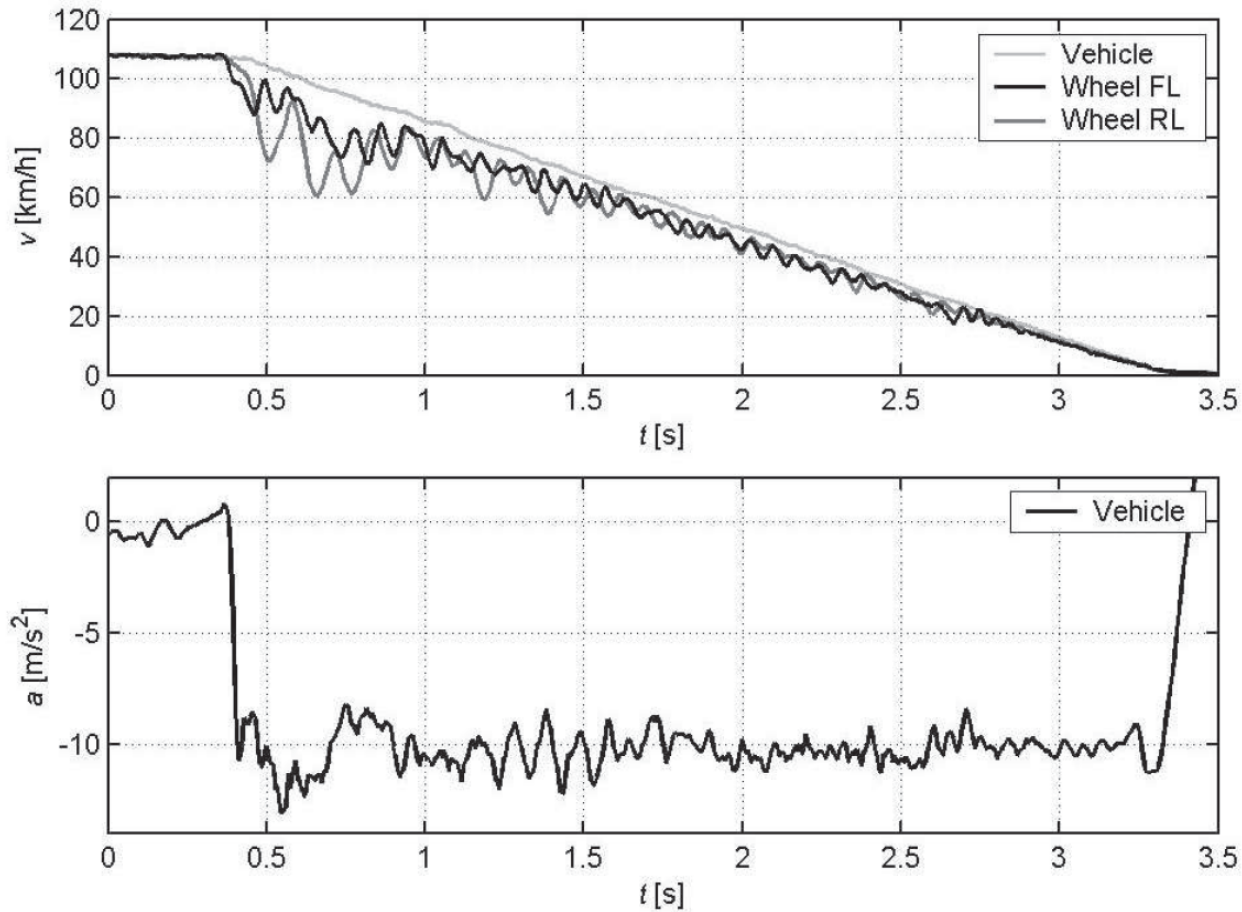
- Ako elektronika zakaže, odvajanje papučice od kočnica kotača se blokira.
- Slijedi da hidraulički back-up omogućuje veću sigurnost od konvencionalnih hidrauličkih kočnica.
- Rezultati punog kočenja sa ABS funkcijama zasnovanim na kontinuiranom, proporcionalnom djelovanju “kliznog” regulatora prikazani su na sljedećem slajdu.
- Ovaj regulator je linearizirani “feedback” nelinearni regulator koji optimira klizanje (proklizavanje kotača) i na taj način omogućuje postizanje maksimalnih vrijednosti sila kočenja.



Kočioni sistem

Elektrohidrauličke kočnice

- Rezultati kočenja dobiveni sa navedenim regulatorom prikazani su na sljedećoj slici.



Kočioni sistem

Sinteza regulatora elektrohidrauličkog kočenja

- Za prijenos djelovanja sile između gume kotača i površine ceste, uz pretpostavku pravolinijskog kretanja, vrijedi:

$$F_L(t) = \mu F_z(t)$$

- Dinamika kotača je opisana na sljedeći način:

$$J_w \dot{\omega}(t) = T_{Dr}(t) - T_{Br}(t) - r_{dyn} F_L(t)$$

gdje su: $T_{Dr}(t)$ - moment pogona vozila,
 $T_{Br}(t)$ - moment kočenja,
 J_w - moment inercije kotača,
 r_{dyn} - dinamički radijus gume,
 $F_L(t)$ - uzdužna (longitudinalna) sila gume,
 $\dot{\omega}(t)$ - ugaona brzina kotača.





Kočioni sistem

Sinteza regulatora elektrohidrauličkog kočenja

- Uzdužno kretanje vozila je opisano sljedećom jednažbom:

$$m\ddot{x}(t) = F_{LFL}(t) + F_{LFR}(t) + F_{LRL}(t) + F_{LRR}(t) + F_{smetnja}(t)$$

gdje $F_{smetnja}$ uključuje, naprimjer, djelovanje vjetra i nagiba ceste.

- Sila kočenja svakog kotača, uz $\tau_{Dr} = 0$ i $J_w \dot{\omega} \ll T_{Br}$ ponaša se po sljedećem zakonu:

$$F_{L_{ii}}(t) \cong -\frac{T_{Br_{ii}}(t)}{r_{dyn}}$$

- Uvodimo smjenu:

$$T_B = T_{BrFL} + T_{BrFR} + T_{BrRL} + T_{BrRR}$$



Kočioni sistem

Sinteza regulatora elektrohidrauličkog kočenja

- Uvrštavanjem zadnja dva izraza u jednažbu uzdužnog kretanja vozila dobiva se:

$$\ddot{x}(t) = -\frac{T_B(t)}{m \cdot r_{dyn}} + \frac{F_{smetnja}(t)}{m}$$

- Moment kočnice se može modelirati sistemom drugog reda (pretpostavljamo da ima jednako ponašanje za sva četiri kotača), čija je prijenosna funkcija:

$$G_{EHB}(s) = \frac{T_B(s)}{p_B(s)} = \frac{K_{EHB}}{1 + 2\frac{D_{EHB}}{\omega_{0EHB}}s + \frac{1}{\omega_{0EHB}^2}s^2}$$

K_{EHB} , ω_{0EHB} i D_{EHB} sadrže parametre kočnice i raspodjele sile između prednje i zadnje osovine.

Kočioni sistem

Sinteza regulatora elektrohidrauličkog kočenja

- Uz $F_{smetnja} = 0$ dobiva se sljedeća prijenosna funkcija kočenja vozila:

$$G_B(s) = \frac{\ddot{x}(s)}{p_B(s)} = \frac{-\frac{K_{EHB}}{m \cdot r_{dyn}}}{1 + 2\frac{D_{EHB}}{\omega_{0EHB}}s + \frac{1}{\omega_{0EHB}^2}s^2}$$

- Kao regulator kočenja koristi se PI regulator:

$$G_R(s) = \frac{p_B(s)}{x_r(s)} = K_R \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right)$$

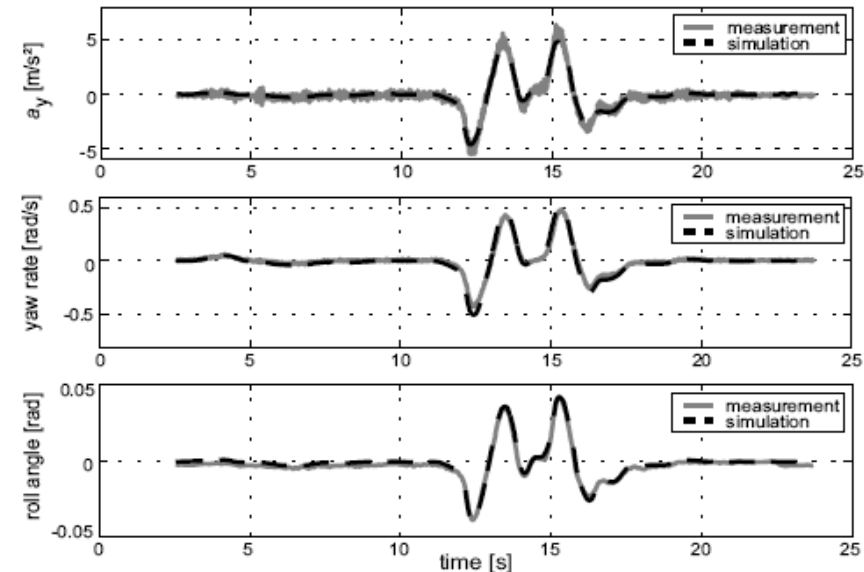
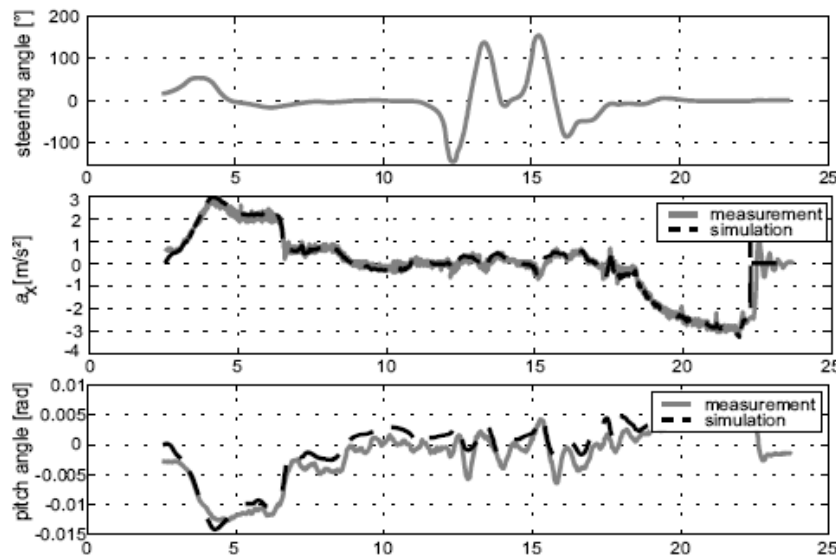
- Parametri PI regulatora se mogu podesiti korištenjem metode postavljanja polova (pole placement).



Kočioni sistem

Sinteza regulatora elektrohidrauličkog kočenja

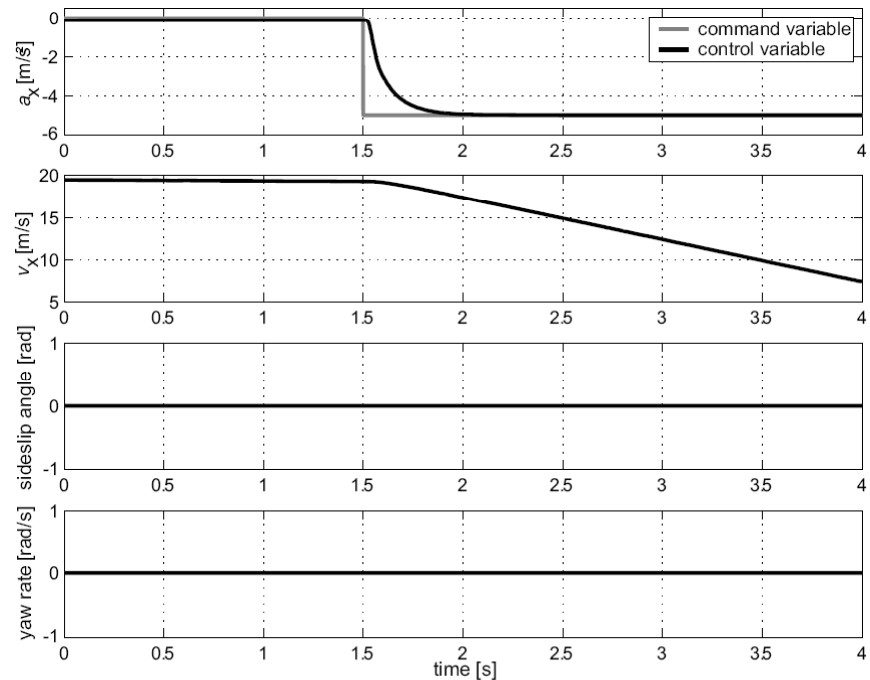
- Rezultati sa Golf 4 (Halfmann and Holzmann, 2003).
- Vozilo ima 6 stupnjeva slobode (valjanje, poniranje, zaošijenje, longitudinalno, lateralno i vertikalno kretanje).
- Slaganje simulacijskog modela sa mjerenim podacima prikazano je na sljedećim slikama (manevar sa promjenom vozne trake pri brzini od 10 m/s).



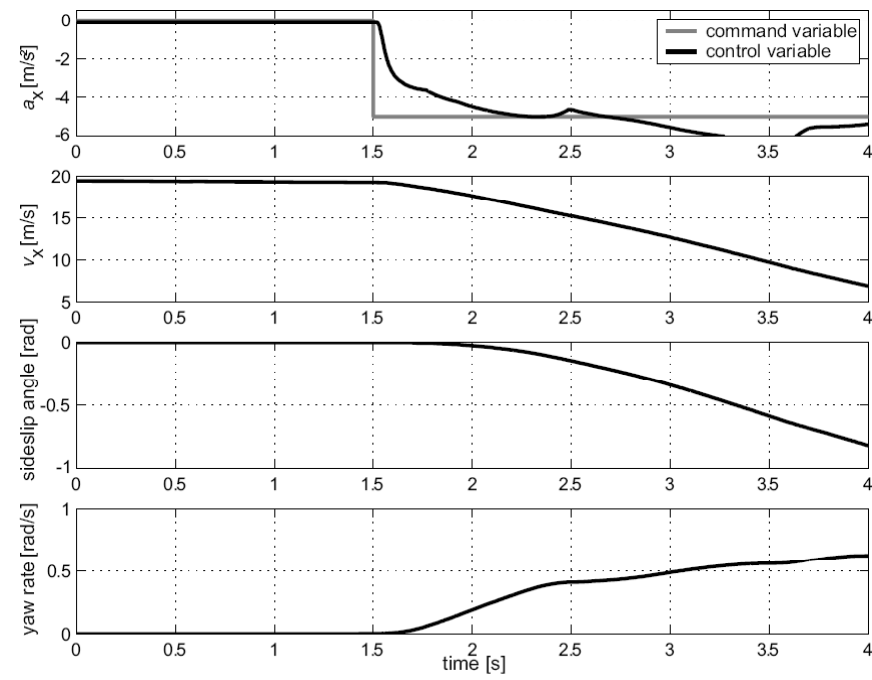
Kočioni sistem

Sinteza regulatora elektrohidrauličkog kočenja

- Na sljedećim dijagramima su prikazani rezultati sa različitim vrijednostima μ -a uz usporenje vozila $a_x = -5 \text{ m/s}^2$.
- Za $\mu=1$ (homogena raspodjela koeficijenta trenja) sistem stabilan i ima dobro ponašanje.
- Za male i velike vrijednosti μ -a sistem postaje nestabilan (različite vrijednosti sila gume na kotačima).



$\mu=1$

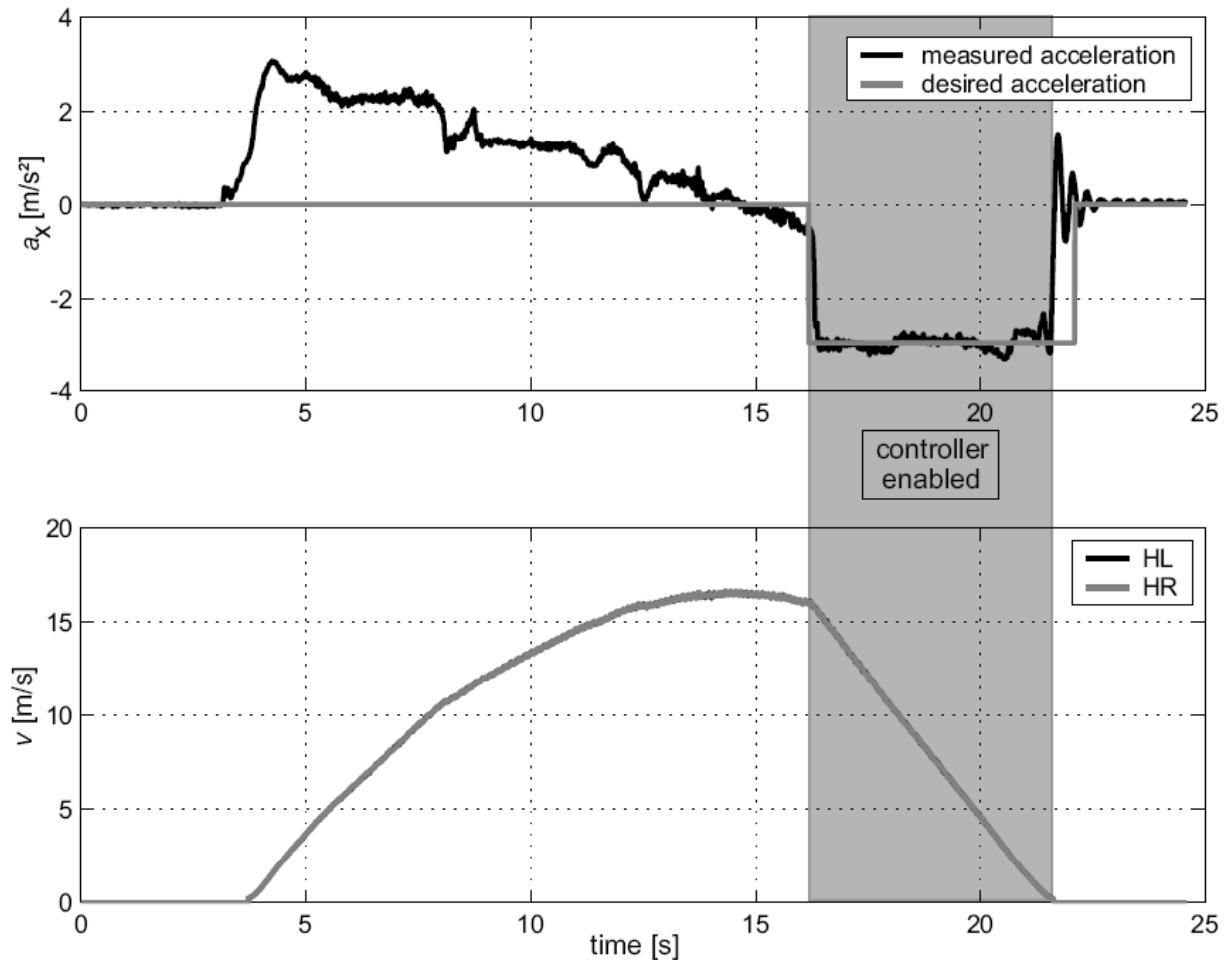


$\mu \neq 1$

Kočioni sistem

Sinteza regulatora elektrohidrauličkog kočenja

- Eksperimentalni rezultati



Kočioni sistem

Sinteza regulatora elektrohidrauličkog kočenja

- Svi prethodni rezultati su dobiveni sa kočenjem gdje ABS nije bio aktivan.
- Da bi se poboljšala kočiona svojstva vozila dodaje se ABS sistem, elektronički stabilizirajući sistem (ESP) ili aktivni pogon prednje osovine (AFS).
- Za stabilizaciju vozila na iscjepkanoj cesti, zahtijeva se feedback regulator sa AFS sistemom.



Kočioni sistem

Elektromehaničke kočnice

- Prototip elektromehaničkih kočnica razvila je kompanija Continental Teves.

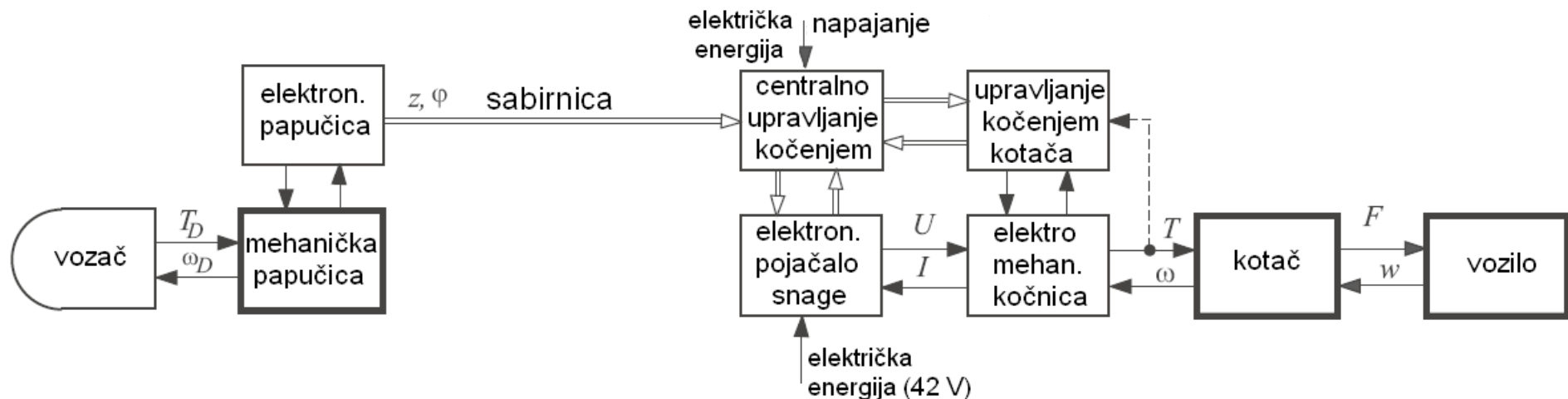


Continental Teves

Kočioni sistem

Elektromehaničke kočnice

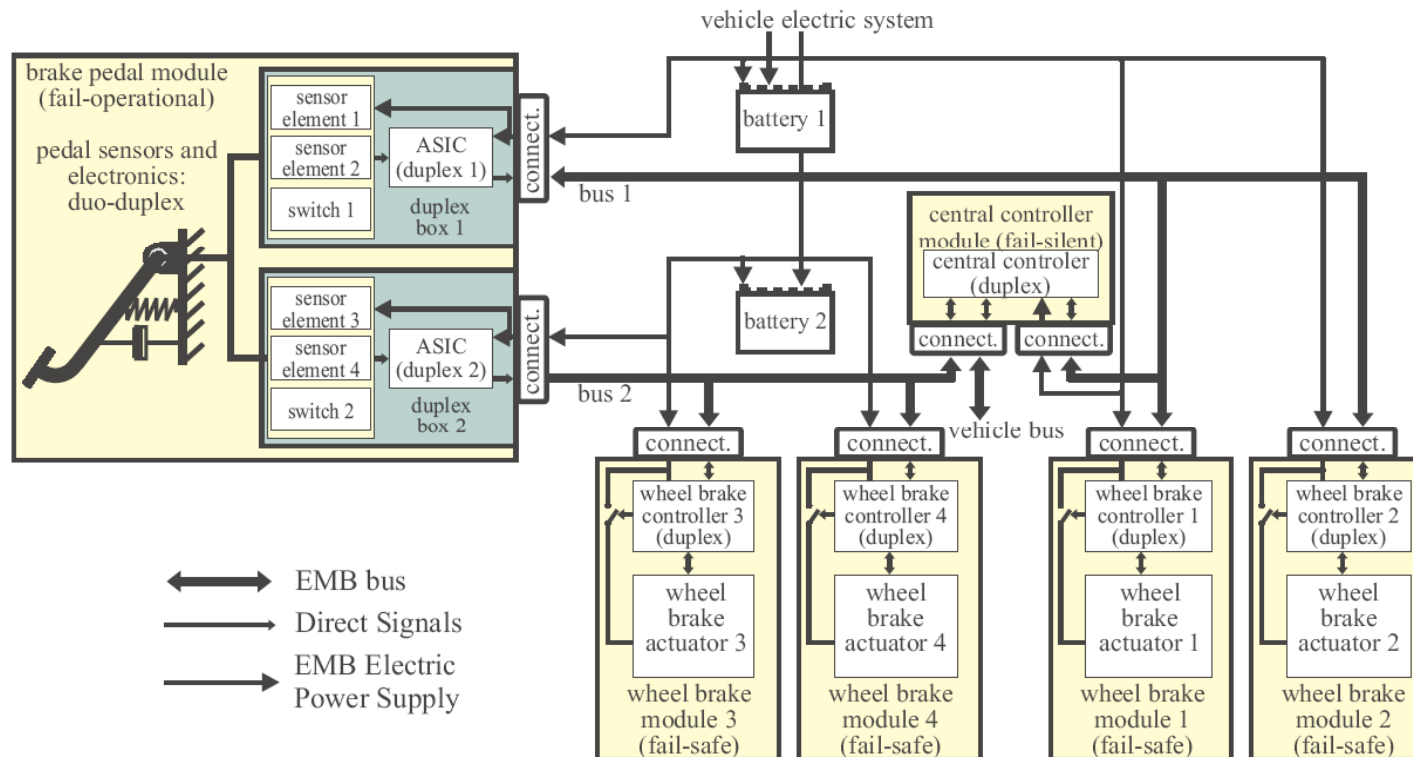
- Ne sadrže, uopće, hidrauličke elemente.
- Papučica posjeduje senzore i njihovi signali se šalju do centralnog računara za upravljanje kočenjem i regulatora za kočenje pojedinačnih kotača, gdje oba djeluju preko elemenata energetske elektronike (pojačala, ...) na elektromotore, npr. disk pločice.



Kočioni sistem

Elektromehaničke kočnice

- Budući da nema mehaničkih ili hidrauličkih veza, slijedi da nije moguć hidraulički sigurnosni sistem.
- Prema tome, kompletna električka staza mora biti tolerantna na kvarove (vidjeti sljedeću sliku).



Kočioni sistem

EHB i EMB kočioni sistemi

- Elektrohidrauličke i elektromehaničke kočnice imaju važno svojstvo, a to je sposobnost **kontinuiranog manipuliranja momentom kočenja**.
- Elektromehanički sistem kočenja nije još realiziran, odnosno ugrađen u automobile, trenutno postoji samo prototip.
- Kompletan sistem kočenja preko žice nije, trenutno, još ostvariv zbog velikih troškova njegovog razvoja i 42 V-nog električkog sistema.
- Zbog toga se još mnoge funkcije mogu realizirati sa elektromehaničkim i elektrohidrauličkim sistemima.

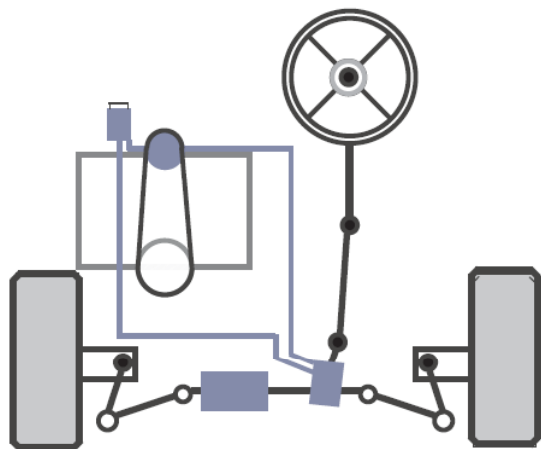


11.2. Pogonski sistem vozila

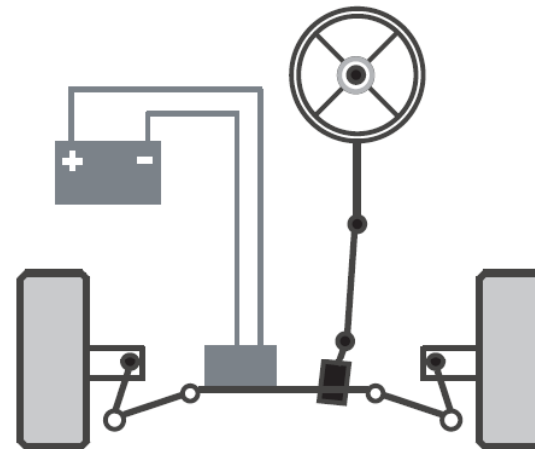
- Pogonski sistem vozila – steering system.
- Od 1945. godine hidraulički pogonjeno kretanje.
- Povećanje brzine kretanja vozila sa elektronički upravljanim by-pass ventilima.
- EPS (električki pogonjen sistem) od 1996. god.



21/47



Hidraulički pogonjen sistem (HPS)



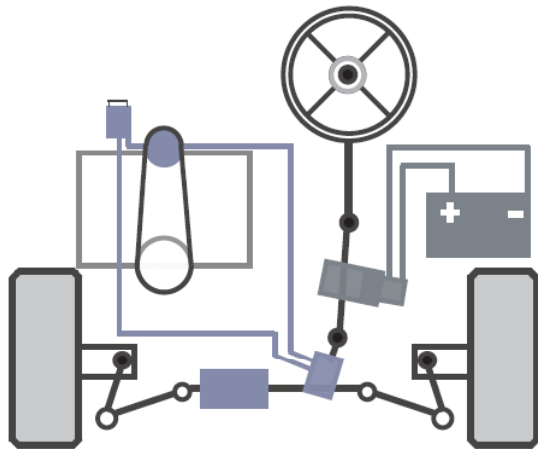
Električki pogonjen sistem kretanja (EPS)

Pogonski sistem vozila

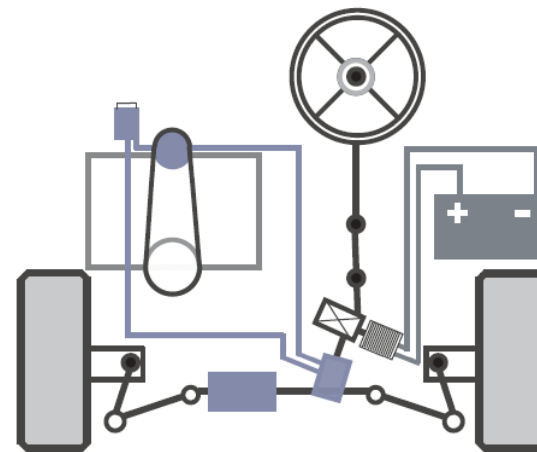
- Kombinacija HPS + EPS pogonskih sistema za teretna (velika) vozila.
- AFS (Active Front Steering) uveden 2003. godine.
- AFS osigurava dodatne zakrete kotača (uglove) generirane pomoću DC motora i zupčanika.



22/47



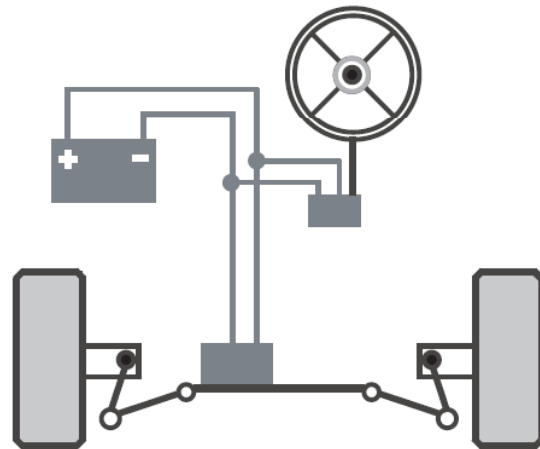
HPS + EPS



AFS

Pogonski sistem vozila

- Kod AFS sistema zadržane su mehaničke veze sa kotačima, s tim da su električki signali nadređeni.
- Ovo omogućuje povećanje pojačanja napredovanja vozila (steering gain) na malim brzinama, dinamiku napredovanja vozila višeg reda i promjene zaošijanja vozila (npr. bočni udari vjetra).

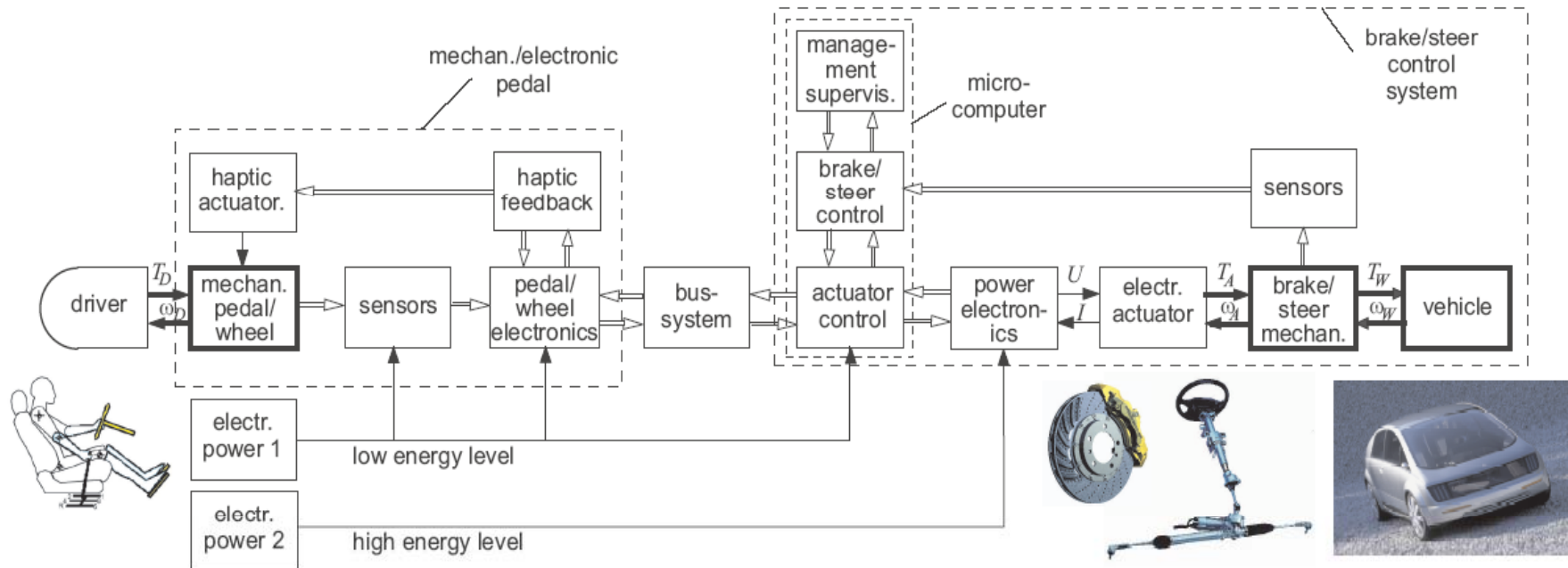


SbW sistem još nije uveden.

SbW (Steer-by-wire)

Pogonski sistem vozila

- Sistem vožnje preko žice (drive-by-wire-system)
- Vozačeva **operacijska jedinica** (pogonski kotači, papučica kočnice) ima mehaničke ulaze (sila, moment) i električki izlaz (naprimjer, sabirnički protokol).



Pogonski sistem vozila

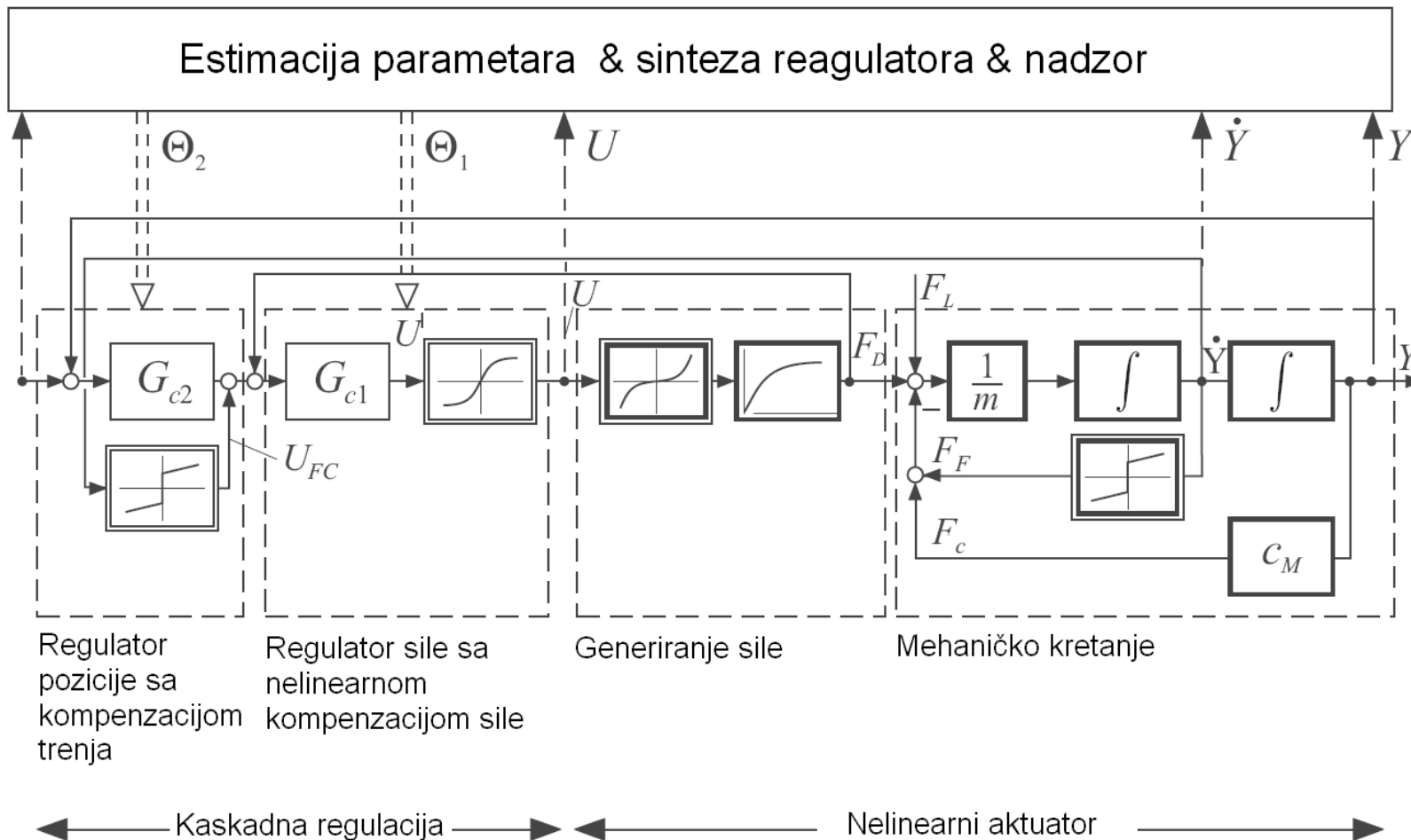
- Navedena operacijska jedinica ima senzore i sklopke (prekidače) za poziciju i/ili silu, mikroelektroničke krugove i jednu od pasivnih (opruga-prigušivač) ili aktivnih (električki aktuator) povratnih veza koji vozaču daju “haptic” informacije (naprimjer, “pedalfeeling” – osjećaj kočenja papučicom) tokom djelovanja.
- Sabirnica je povezana sa kočnicama ili pogonskim upravljačkim sistemom sa aktuatorskim upravljanjem, kočionim ili pogonskim upravljačkim funkcijama, supervizijom i različitim vrstama menadžmenta (naprimjer, tolerancija na kvarove sa rekonfiguracijom).
- Važni su redundantni električki izvori energije, kao dvije baterije (12 V i 42 V) i jedan generator.



Pogonski sistem vozila

Adaptivno upravljanje aktuatorom

- Sistem upravljanja zasnovan na parametarskoj adaptaciji.



Pogonski sistem vozila

Adaptivno upravljanje aktuatorom

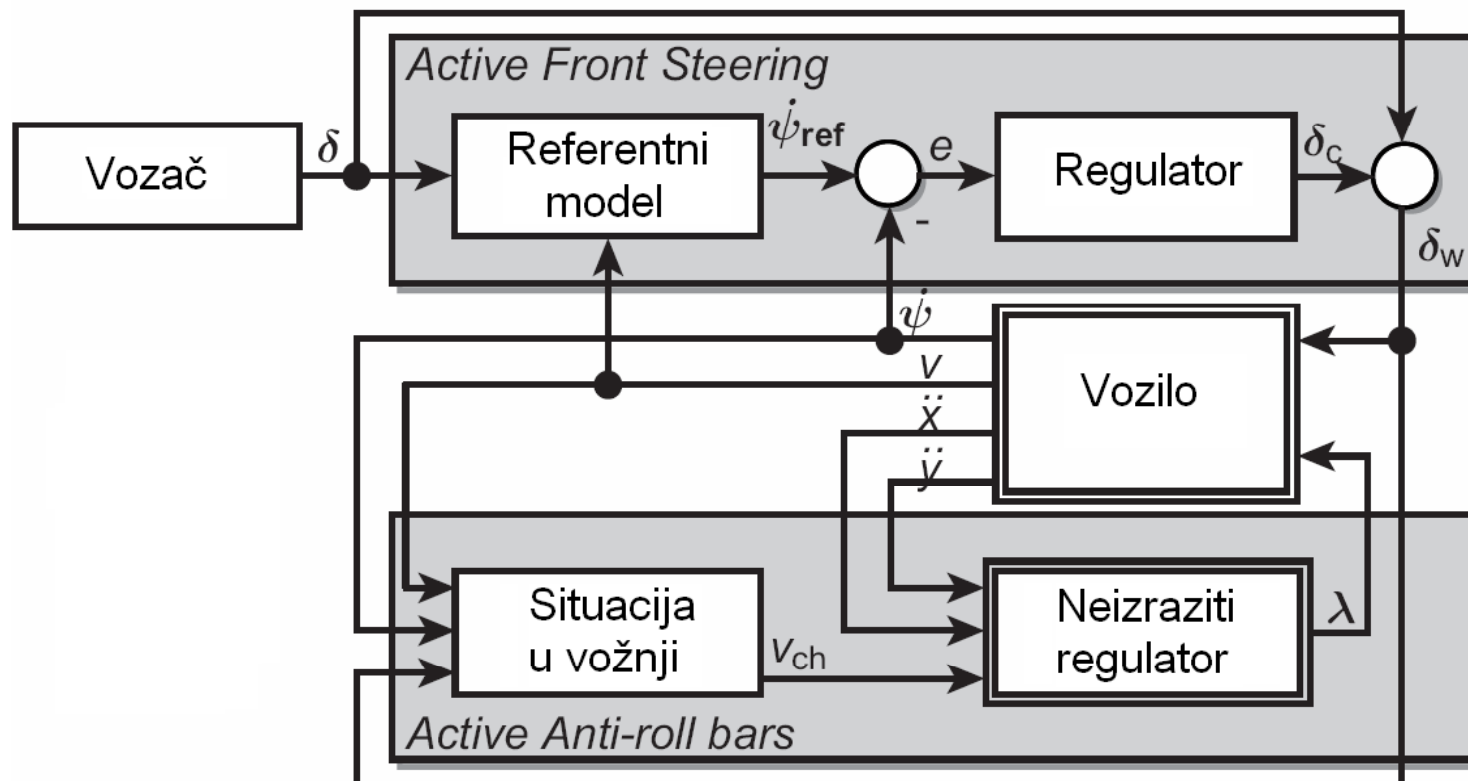
- Sistem **parametarske adaptacije** koristi identifikacijske metode za parametarske modele procesa.
- Najvažniji dio procesa identifikacije je **estimacija parametara**.
- Estimacija parametara se pokazala kao dobra osnova za adaptivno upravljanje mehaničkim procesima, koji uključuju adaptaciju nelinearnih karakteristika, Coloumbovog trenja i nepoznatih parametara, kao što su mase, krutost, prigušenje, itd.
- Navedeni adaptivni sistem upravljanja može se primijeniti na elektromehaničke, hidrauličke i pneumatske aktuatore.



Pogonski sistem vozila

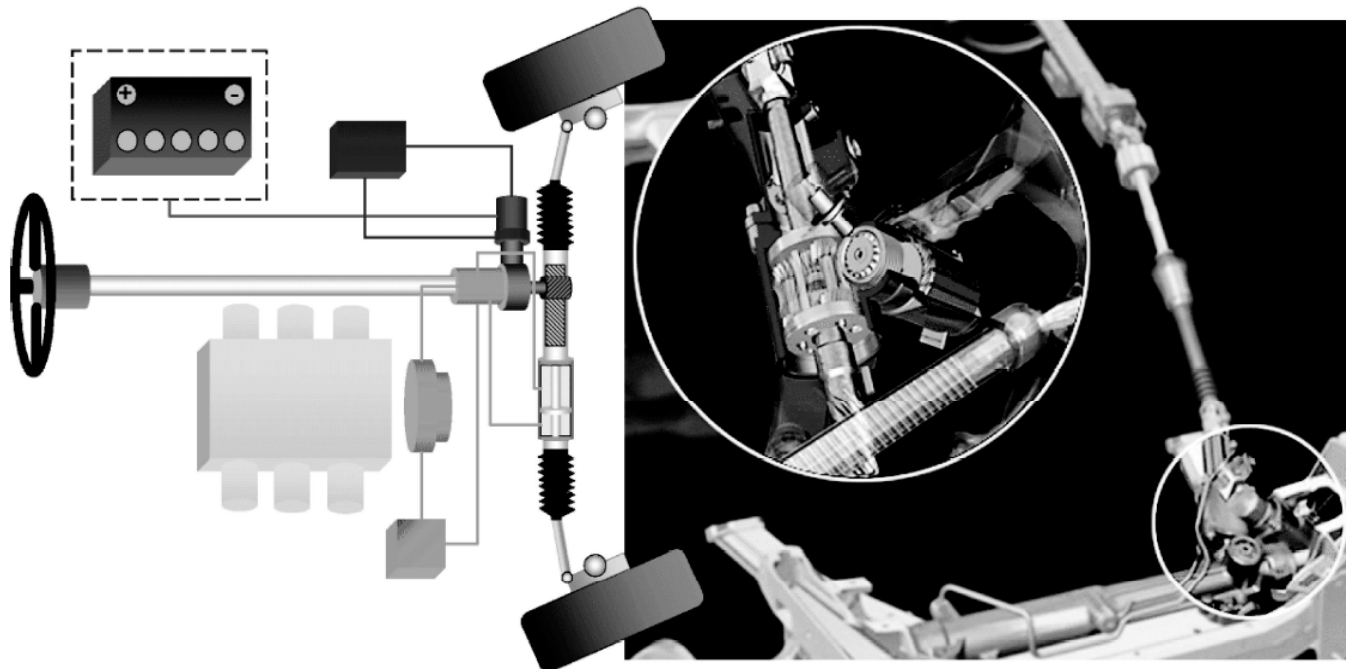
Upravljanje AFS sistemom sa aktivnim anti-roll bar stiffness promjenom.

- Adaptivno upravljanje zasnovano na referentnom modelu (AFS upravljanje i Active Anti-roll bars).



Pogonski sistem vozila

- AFS generira uglove napredovanja (steering angles) $\delta_c(t)$ pomoću planetarnog zupčanika i DC motora kao dodatak na vozačev ugao napredovanja $\delta(t)$.
- Generiranje dodatnih pogonskih uglova (zakreta) pomoću planetarnog zupčanika i DC motora bez četkica (BMW).



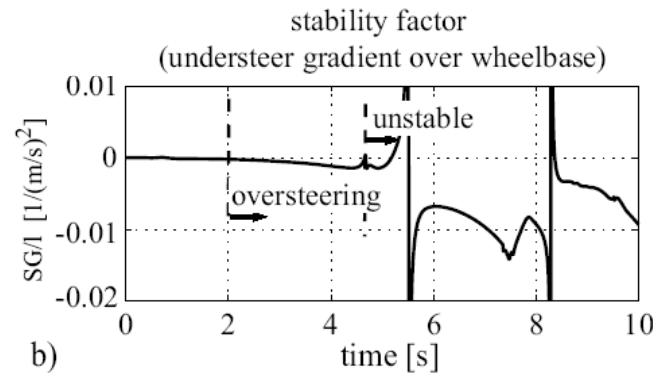
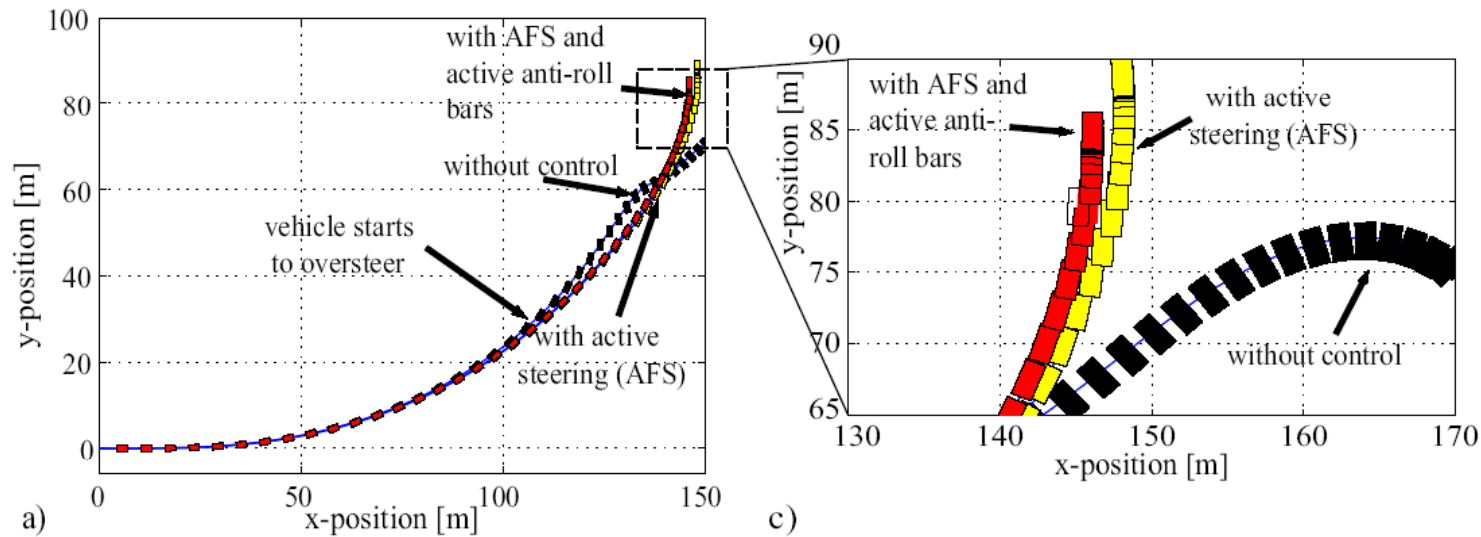
Pogonski sistem vozila

- Zadatak feedback regulatora napredovanja u AFS podsystemu je upravljanje ukupnim uglom $\delta_w(t)$, tako da brzina zaošijanja $\dot{\psi}(t)$ što manje odstupa od one koja se dobiva iz referentnog modela.
- Ovaj regulator je PID tipa sa parametrima koji su ovisni o brzini.
- Na sljedećem slajdu su prikazani rezultati kada automobil ulazi u krivinu brzinom 144 km/h bez AFS sistema.
- Nakon ulaska u zavoj (krivinu) u trenutku $t=0$ s, a nakon tri sekunde vozač maksimalno pritišće papučicu sa pritiskom p_B od 100 bara (ABS sistem).
- U trenutku $t=5$ s vozilo postaje nestabilno i silazi sa ceste po bočnoj strani.



Pogonski sistem vozila

- Sa AFS-om vozilo je stabilizirano i slijedi zavoј, ali sa prevelikim polumjerom.



Pogonski sistem vozila

- Odnos ugla napredovanja i Ackermannovog ugla δ_0 :

$$\frac{\delta}{\delta_0} = 1 + \frac{1}{v_{ch}^2} v^2 = 1 + \frac{SG}{l} v^2$$

gdje su:

$$SG = \frac{l}{v_{ch}^2} \quad \text{- gradijent napredovanja}$$

$$v_{ch}^2 = \frac{c_{\alpha F} c_{\alpha R} l^2}{m(c_{\alpha R} l_R - c_{\alpha F} l_F)} \quad \text{- karakteristična brzina}$$

c_α – krutost kotača, $l_{F,R}$ – udaljenost između centra gravitacije i osovine, F se odnosi na prednje kotače, a R na zadnje, $l=l_F+l_R$.



Pogonski sistem vozila

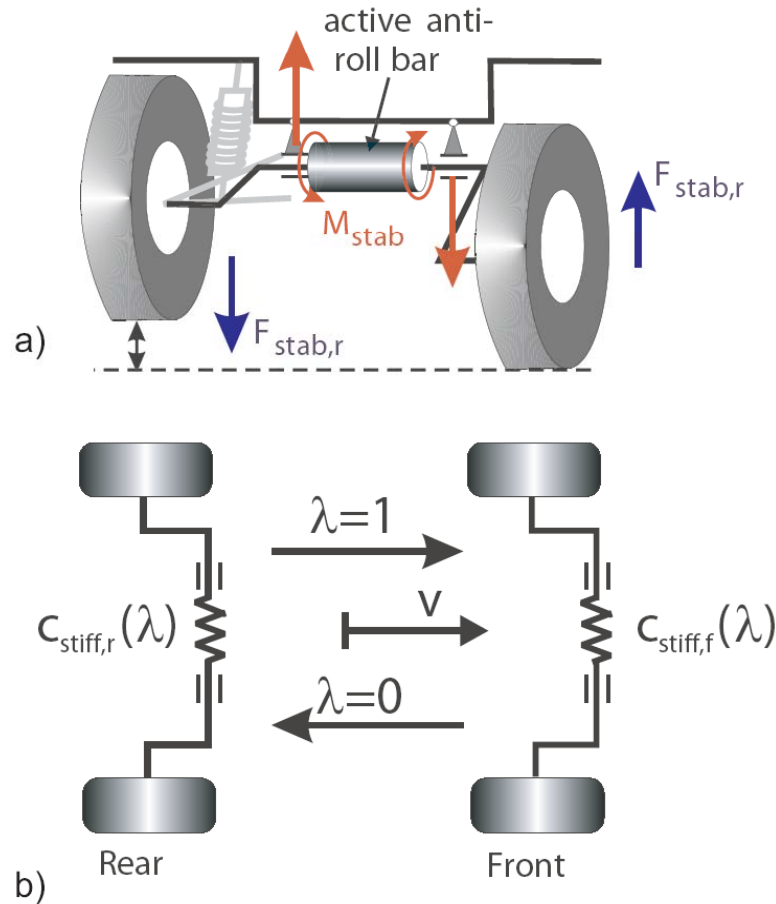
- Dodatni upravljački ulaz se može postići iz *active anti-roll bars* podсистema, koji se koristi za stabilizaciju kotrljanja (valjanje-roll).
- Izbor krutosti c_{stiff} pasivnih “roll bars” na prednjoj i zadnjoj osovini utječe na samonapredovanje.
- Uvođenjem, naprimjer, hidrauličkih anti-roll barova, kako je prikazano na sljedećem slajdu, dodatni momenti distorzije mogu biti generirani tako da se mijenja krutost parametra λ :

$$\lambda = \frac{c_{stiff,r}}{c_{stiff,f} + c_{stiff,r}}, \quad \lambda \in [0,1]$$

- Ako je $\lambda=1$ tada je cjelokupni anti-roll bar moment primijenjen na prednju osovину.

Pogonski sistem vozila

- Prikladnim izborom λ može se utjecati na ponašanje napredovanja, na način da vozilo postaje pokretljivije i da se može dobro ponašati u kritičnim situacijama.



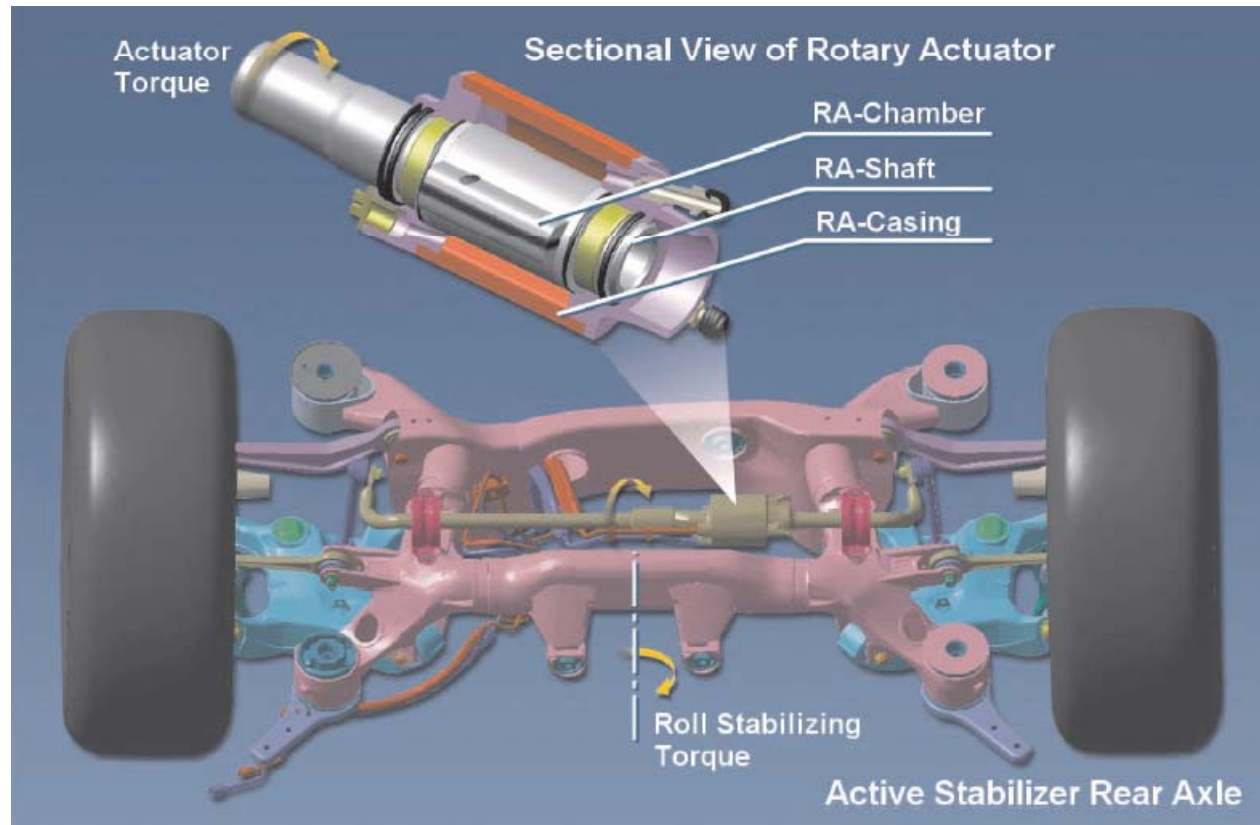
Pogonski sistem vozila

- Za manipuliranje parametrima koristi se neizraziti (fuzzy) regulator.
- Pomoću neizrazitog regulatora može se postići željeno ponašanje na temelju zadane vrijednosti SG -a.
- Parametar SG predstavlja ustvari i faktor stabilnosti.
- Na ovaj način je poboljšano rukovanje vozilom u kritičnim situacijama, zbog malih vrijednosti ugla napredovanja i brzine zaošijanja.
- Vozilo uspijeva ostati u zavoju korištenjem neizrazitog regulatora.



Pogonski sistem vozila

- Aktivni anti-roll bar sistem za stabilizaciju kotrljanja i podršku napredovanju vozila (BMW).



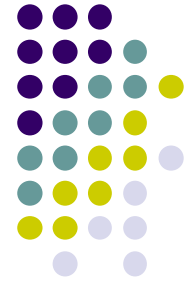
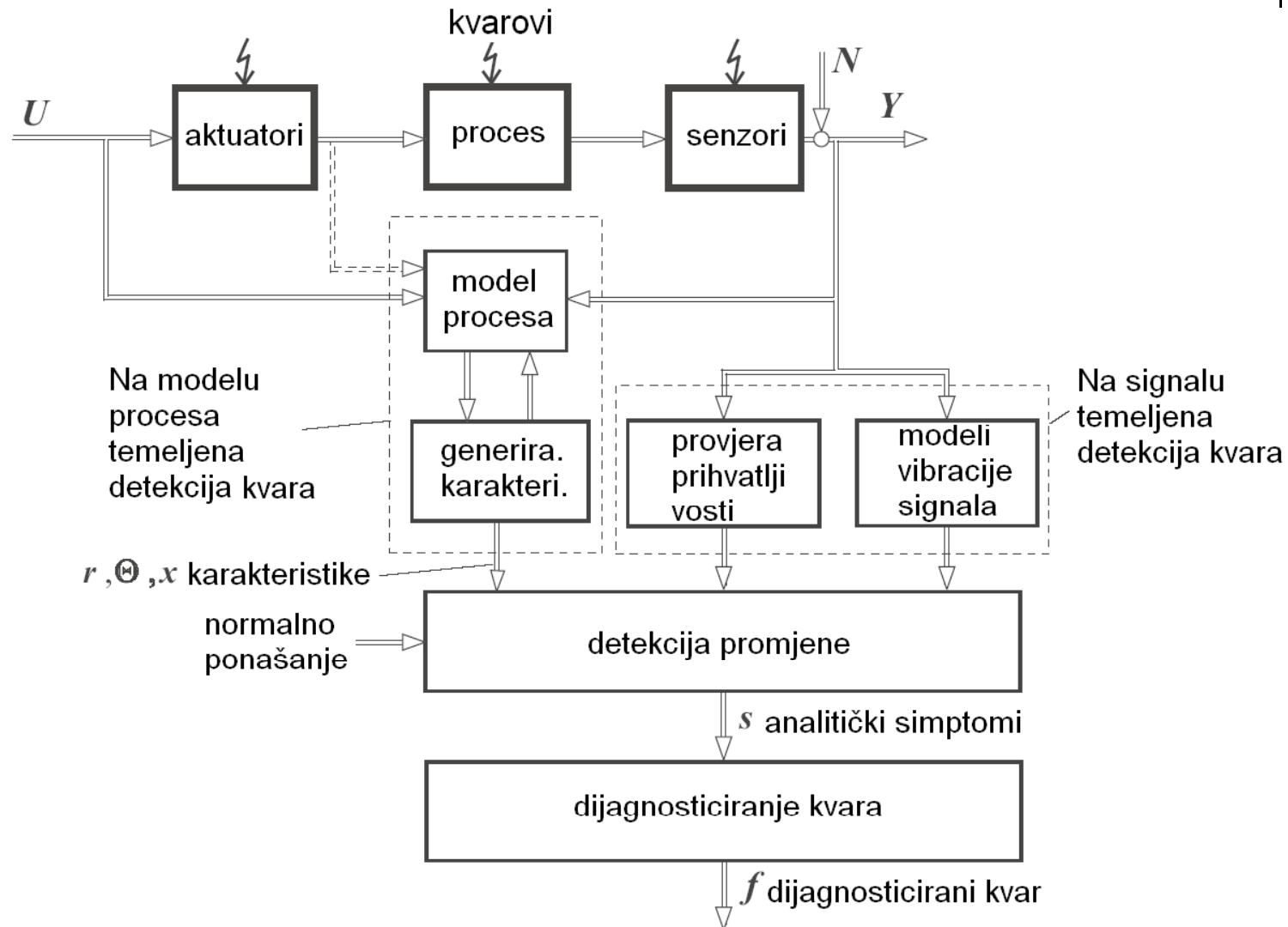
11.3. Dijagnosticiranje kvara

- Ispravno funkcioniranje mehatroničkih sistema ne ovisi samo o procesu, već i o elektroničkim i električkim senzovima, aktuatorima, kablovima, konektorima i elektroničkim upravljačkim jedinicama (ECU).
 - U tom slučaju su od izuzetne važnosti su:
 - **automatizirani nadzor,**
 - **detekcija i dijagnostika kvara.**
- s obzirom na zahtjeve za visokom pouzdanošću i sigurnošću.



Dijagnosticiranje kvara

- Proces zahvaćen kvarom.



Dijagnosticiranje kvara

- Kvarovi indiciraju nedozvoljena odstupanja od normalnih stanja i mogu biti generirani iznutra ili izvana.
- Vanjski kvarovi su, npr. uzrokovani izvorom napajanja, kontaminacijom ili kolizijom.
- Unutarnji kvarovi su, npr. izazvani habanjem, gubitkom podmazivanja, kvarovi senzora ili aktuatora.
- Klasične metode za detekciju kvarova su ograničena provjera vrijednosti (*limit value checking*) ili provjera prihvatljivosti (*plausibility checks*) nekoliko mjernih varijabli.



Dijagnosticiranje kvara

- Međutim, početni i naizmjenični (prekidni) kvarovi obično se ne mogu detektirati ovim metodama, jer one ne omogućuju dublju dijagnostiku kvara.
- Osim toga, detekcije kvarova temeljene na signalu i na modelu i metode dijagnostike, koje su razvijene u zadnje vrijeme omogućuju ranu detekciju malih kvarova sa normalnim mjerenjem signala, također u zatvorenim petljama.
- Na temelju mjerenja ulaznih signala $U(t)$, izlaznih signali $Y(t)$ i modela procesa, generiraju se karakteristike sa, npr. analizom vibracija, estimacijom parametara, obzervera stanja i izlaza i jednadžbi pariteta.

Dijagnosticiranje kvara

- Ove karakteristike se zatim uspoređuju sa normalnim ponašanjem i nakon toga se primjenjuju metode detekcije promjena kojima se postižu analitički simptomi.
- Nakon toga slijedi proces dijagnosticiranja kvara primjenom metoda klasifikacije ili zaključivanja.
- Znatna prednost je da se isti model procesa može koristiti i za dizajn regulatora i za detekciju kvara.
- Općenito, vremenski kontinuirani modeli se preferiraju ako se detekcija kvara temelji na estimaciji parametara ili paritetnim jednadžbama.



Dijagnosticiranje kvara

- Međutim, diskretni vremenski modeli se također mogu koristiti.
- Napredna supervizija (nadzor) i dijagnostika kvara su osnove za poboljšanje pouzdanosti i sigurnosti, održavanje ovisnosti o stanju sistema, triggerovanje redudancija i rekonfiguracija za na kvarove tolerantne sistema.
- Osim dijagnosticiranja kvarova, jako su važni i sistemi tolerantni na kvarove, posebno za visokointegrirane sisteme.



11.4. Sistem tolerantan na kvarove

- **Sistem tolerantan na kvarove** – kompenzira kvarove na način da se oni ne reflektiraju na ispravno funkcioniranje, odnosno rad sistema.
- **Metode tolerancije na kvarove općenito koriste redudanciju.**
- To znači da se, uz postojeće module, dodaje jedan ili više modula koji su povezani, obično, u paraleli.
- Ovi redudantni moduli su identični ili su pak različiti.



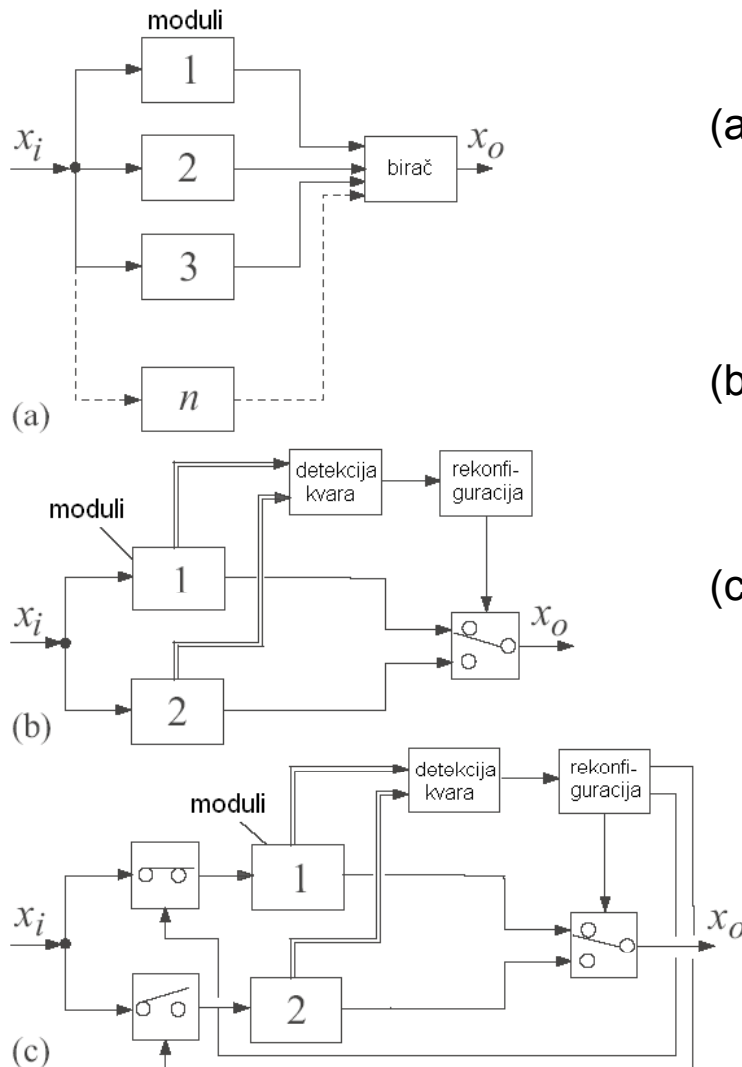
Sistem tolerantan na kvarove

- Takve redundantne sheme mogu se dizajnirati za hardver, softver, obradu informacija i mehaničke i električke komponente kao što su senzori, aktuatori, mikroračunari, sabirnice, izvori napajanja, itd.
- Postoje dva glavna pristupa za toleranciju na kvarove:
 - statička redundancija,
 - dinamička redundancija.
- Ovi pristupi su prikazani na sljedećem slajdu.



Sistem tolerantan na kvarove

- Sheme tolerantne na kvarove za električne uređaje



- (a) Statička redundancija: višestruko redundantni moduli sa glavnim biračem i maskom za kvarove, sa m izlaza n sistema (svi moduli su aktivni).
- (b) Dinamička redundancija: standby modul koji je kontinuirano aktivan, “hot standby”;
- (c) Dinamička redundancija: standby modul koji nije aktivan, “cold standby”

Sistem tolerantan na kvarove

- Sljedeći koraci se razlikuju:
- **FO (*fail-operational*)**: jedan kvar se tolerira, tj. komponenta ostaje operacionalna nakon jednog kvara. Ovo se zahtijeva ako ne postoji trenutno sigurno stanje nakon kvara komponente.
- **FS (*fail-safe*)**: nakon jednog, ili nekoliko kvarova, komponente izravno posjeduju sigurno stanje (pasivna sigurnost, bez vanjske energije) ili dolaze u sigurno stanje pomoću specijalnih akcija (aktivna sigurnost, sa vanjskom energijom).
- **FSIL (*fail-silent*)**: nakon jednog, ili nekoliko kvarova, komponenta je, gledano iz vana, mirna, tj. ostaje pasivna i nema utjecaja na druge komponente u smislu remećenja njihovog rada.



Sistem tolerantan na kvarove

- U prikazanim strukturama su manje kritične funkcije ispuštene zbog održavanja mnogo kritičnijih raspoloživih funkcija (IEC61508, 1997).
- Za mehatroničke sisteme na kvarove tolerantni senzori, mikroračunari i aktuatori su od posebnog interesa.
- Posebno su atraktivni senzori sa analitičkom redudancijom zasnovanom na modelu i na kvarove tolerantni aktuatori, pri čemu su samo dijelovi sa niskom pouzdanošću redudantni, kao u hidrauličkim avionskim ventilima sa kalemom (spool valves) ili potencijometrom za dovod goriva električkim putem.

