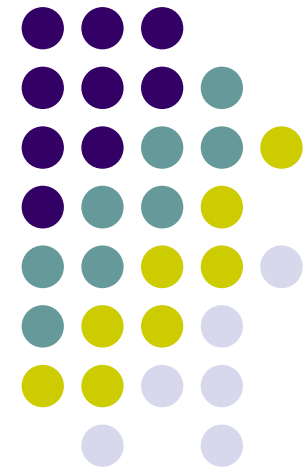


Lekcija 10: *Automobilski mehatronički procesi - suspenzija*

Prof.dr.sc. Jasmin Velagić
Elektrotehnički fakultet Sarajevo

Kolegij: Mehatronika

2012/2013



10. Automobilaska suspenzija

- Sistem suspenzije vozila je odgovoran za:
 - udobnost (komfor) u vožnji,
 - sigurnost u vožnji (sistem suspenzije nosi tijelo vozila i prenosi sve sile između vozila i ceste).
- Da bi se osigurao utjecaj ovih svojstava uvode se **poluaktivne** ili/i **aktivne** komponente koje omogućuju sistemu suspenzije adaptiranje različitim uvjetima vožnje.
- Ubrzanje vozila \ddot{z}_B je bitan parametar (kvantitet) za **udobnost** putnika u vožnji.
- Dinamička promjena opterećenja gume F_{zdyn} je mjera za **sigurnost** – indicira djelovanje sile između gume i ceste.



Automobiliska suspenzija

Sistem suspenzije



3/43



Automobilska suspenzija

- **Poluaktivna suspenzija** omogućuje adaptaciju prigušivačkih karakteristika amortizera na promjenu opterećenja kotača i deflekcije suspenzije, npr. aktivna papučica gasa.
- Osnovna ideja poluaktivne suspenzije je adaptacija parametara amortizera ili opruga tijela vozila na **trenutne uvjete ceste** i odgovarajuću **situaciju u vožnji**.
- Ovo se postiže *ugradivim procesorom*, koji indicira da se elektronika, mehanika i softver istovremeno razmatraju.
- Potrebno je podizati, odnosno, spuštati kotače i na taj način minimizirati vertikalno kretanje vozila.
- Sigurnost tokom vožnje je ugrožena zbog **neravnina na cesti** koje uzrokuju vibracije kotača i vozila.



Automobilska suspenzija

- Neophodno je osigurati zadovoljavajuće **prigušenje** ovih vibracija (rezonancije).
- Vibracije snažno utječu na povećanje **opterećenja kotača**.
- Ovo opterećenje će se smanjiti usljed podizanja kotača.
- Na ovaj način trenje između kotača i ceste, odnosno razvijena sila kotača prema cesti pada na nulu, što može dovesti do problema kada se vozilo nalazi u krivini.
- Ovi problemi se mogu izbjeći povećanjem prigušenja (veliki iznos).
- Međutim to povećanje prigušenja dovodi do **negativnih efekata na komfor u vožnji**, jer će se utjecaj neravnina direktno prenositi na vozilo, a samim time i na putnike.



Automobilska suspenzija

- Ovo je posebno izraženo za vibracije u području **4-8 Hz**, koje su neprijatne ili se manifestiraju neudobnom (nekomfornom) vožnjom.
- Glavni zadatak je pronaći razuman kompromis između **sigurnosti vožnje** i **komfora u vožnji**.
- Poluaktivna suspenzija se temelji na principu da **prigušenje uvjeta** ceste može biti mijenjano na odgovarajući način tokom putovanja.
- Problematične situacije u vožnji zahtijevaju visoku razinu prigušenja koja se prvo prepoznaje razmatranjem **vertikalnog ubrzanja** tijela vozila, iz kojeg se trigerovanjem ove vibracije sa cestom mogu reducirati.

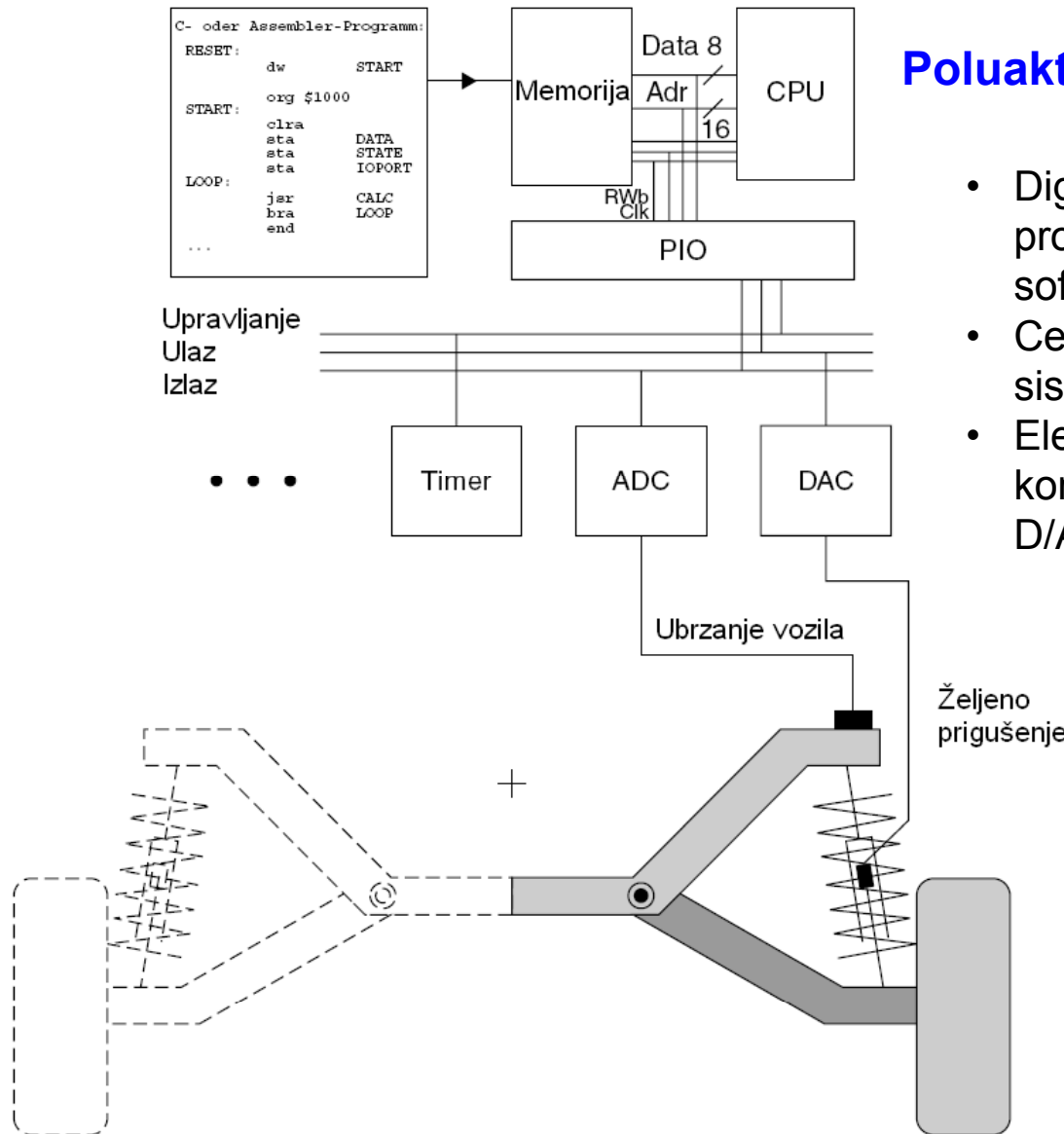


Automobilska suspenzija

- Dodatno, manevri tokom vožnje, koji također zahtijevaju **povećanje stabilnosti**, se automatski prepoznaju, kao naprimjer naglo kočenje, brza vožnja u krivinama ili brzo pritiskanje papučice gasa.
- Rezultirajuće poniranje i valjanje vozila treba biti limitirano većim prigušenjem.
- Nakon identifikacije uvjeta ceste i stanja vožnje, sljedeći korak je određivanje **ispravne razine prigušenja** i postavljanje njene vrijednosti na amortizer.



Automobilska suspenzija



Poluaktivna suspenzija

- Digitalni kontroler koji procesira ugradivi softver.
- Centralni element sistema je amortizer.
- Elektroničke komponente za A/D i D/A pretvorbe.

Automobilska suspenzija

Amortizer

- Amortizer koristi Stokesovo trenje viskozne tekućine, naprimjer hidrauličkog ulja, da bi pretvorio energiju kretanja u toplotu.
- Ulje se sabija kroz uski ventil u skladu sa kretanjem kotača, odnosno vozila.
- Ako se upravlja putanjom ulja u skladu sa smjerom protoka, tada se različiti dijametri ventila, odnosno različite konstante prigušenja, mogu postići za kompresiju i naprezanje.
- Osim toga, nekoliko karakterističnih linija prigušenja se može planirati za odgovarajući amortizer.



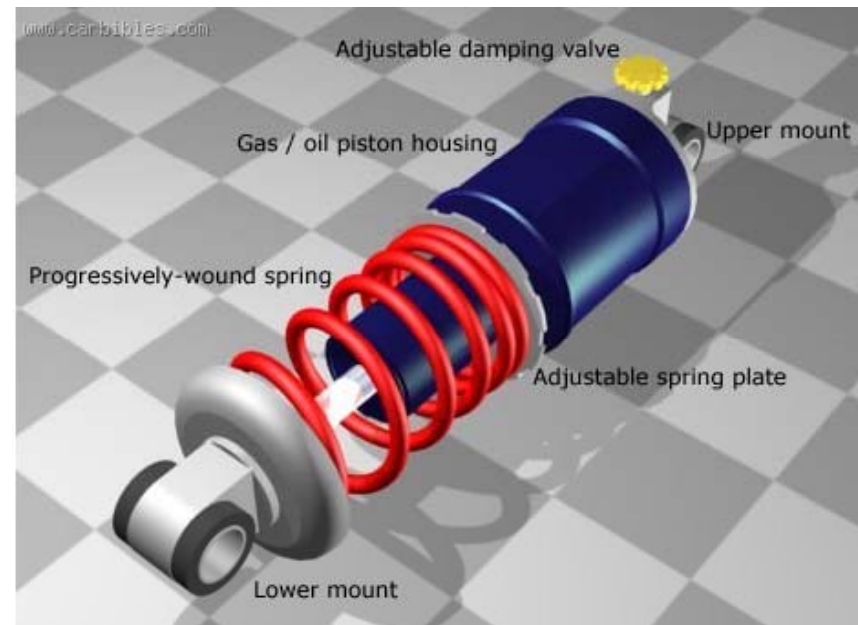
Automobilska suspenzija

Amortizer

- Korištenjem ventila u obliku rotirajućeg diska, putanja hidrauličkog ulja je određena na način da ulje prolazi kroz različite ventile.
- Potrošnja energije je stoga ograničena jer se samo ventil sa rotirajućim diskom može koristiti.
- Tipična vremena kašnjenja za podešavanje karakteristične linije iznose oko 20 ms.



10/43



Automobilska suspenzija

Modeliranje softvera

- Softver se izvršava na ugradivom procesoru (naprimjer procesori kompatibilni sa 68HC05).
- Najčešće se piše u C-u, nakon čega se inicijalno prevodi (kompajlira) u Asembler i dalje prekompajlira u mašinski kod.
- Za testiranje softvera se najčešće koriste mehatroničke hardver/softver kosimulacije.
- Jednostavniji modeli opisuju ovisnosti između ubrzanja i karakteristika prigušenja.



Automobilska suspenzija

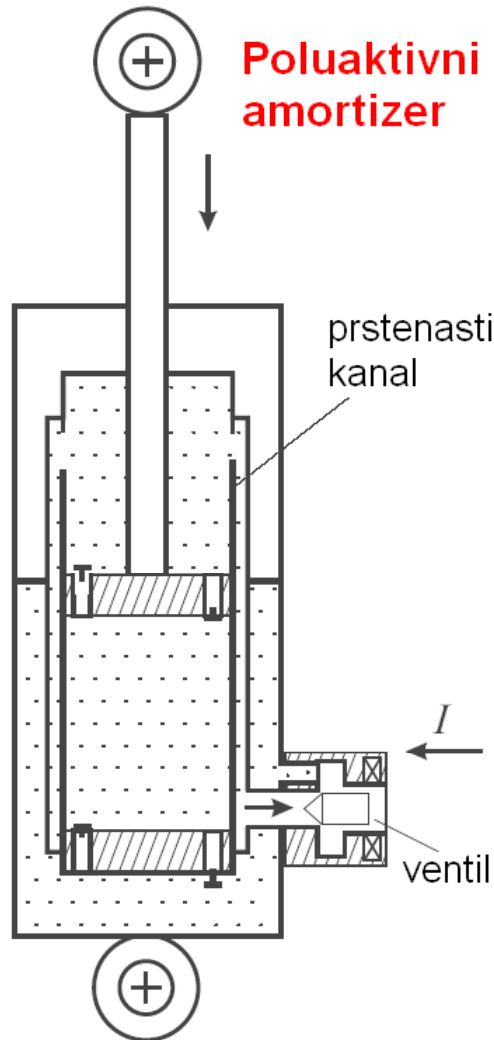
Upravljanje poluaktivnim amortizerom

- Nove mogućnosti se pojavljuju sa elektro-reoločkih fluida.
- Na sljedećem slajdu su prikazani poluaktivni amortizer i njegovo upravljanje.
- Upravljanje se sastoji od **klasične regulacijske petlje** (brza petlja) i **adaptacijske petlje** (spora petlja) kojom se preračunavaju parametri regulatora usljed promjena u sistemu.

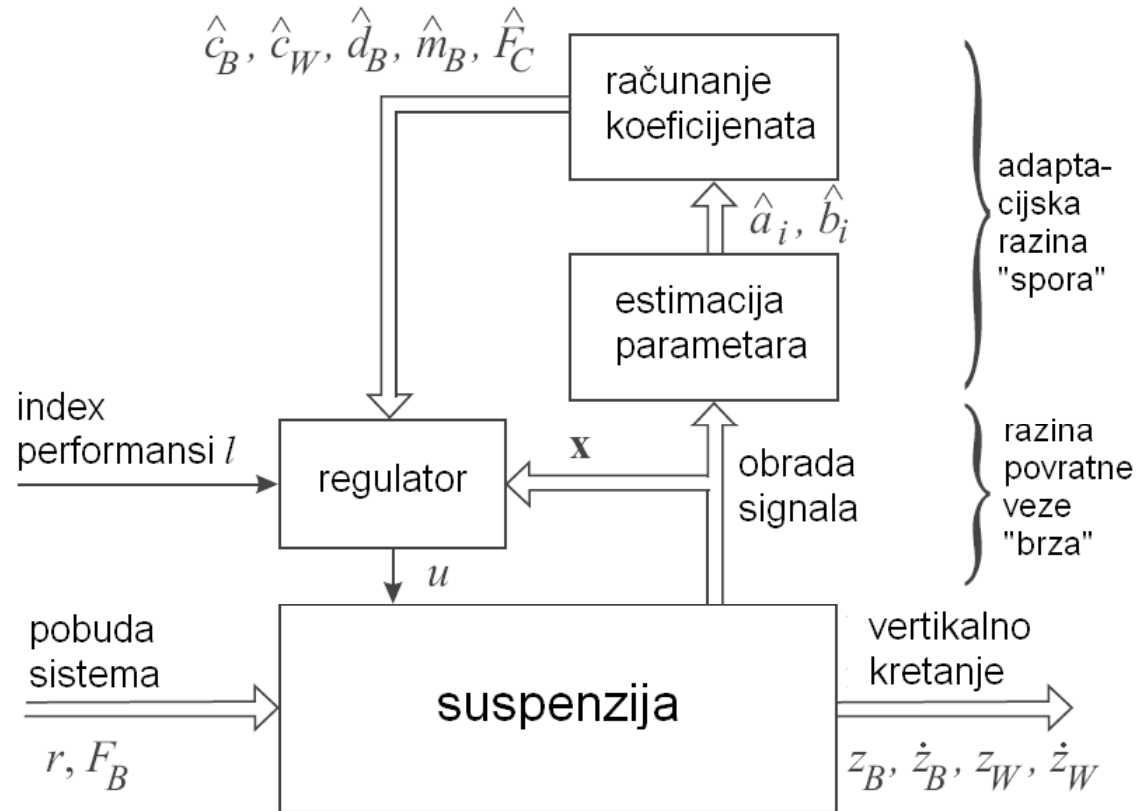


Automobilska suspenzija

Poluaktivni amortizer i njegovo upravljanje



Upravljanje amortizerom



Automobilska suspenzija

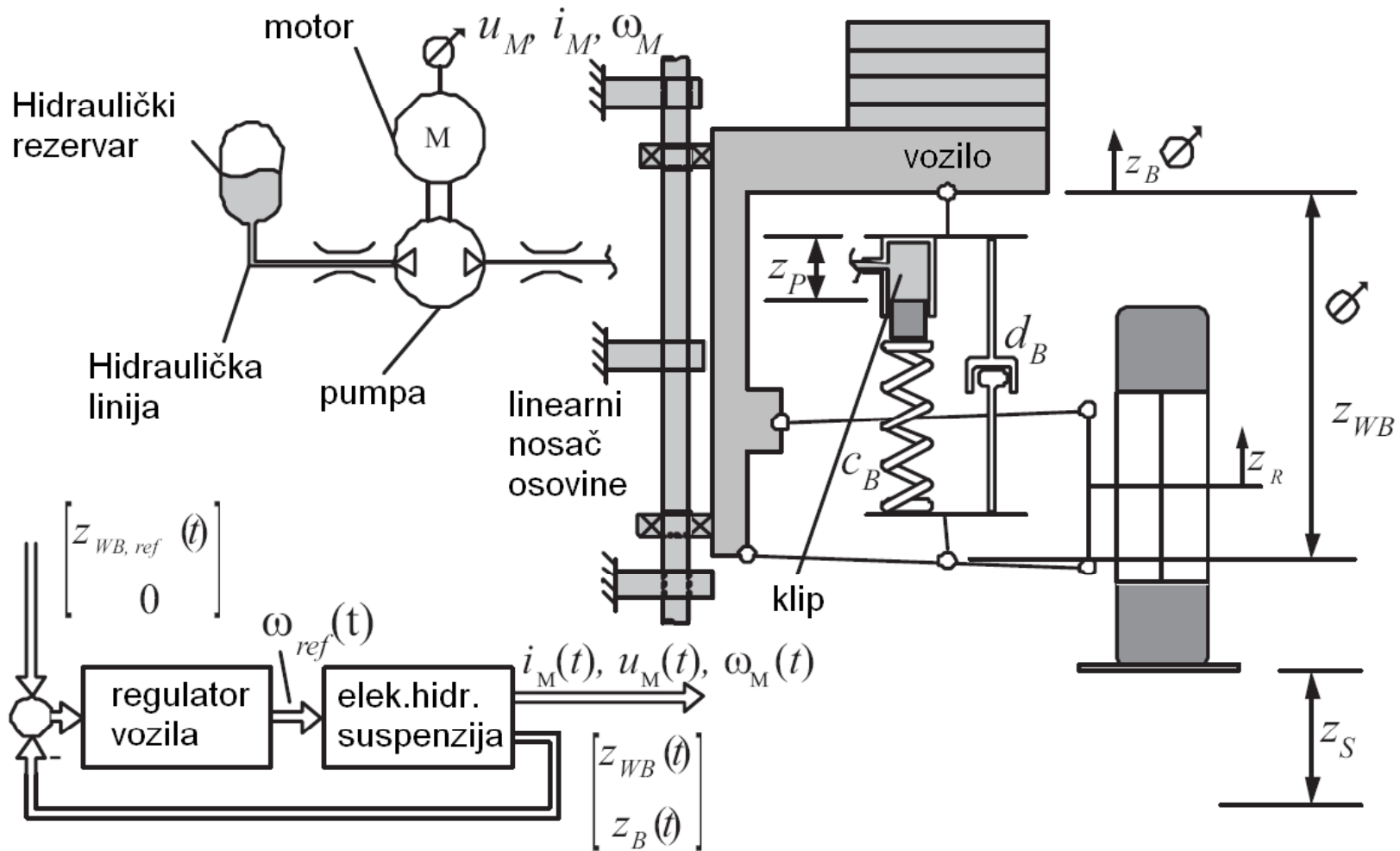
- **Aktivna suspenzija** osigurava poseban ulaz sile kao dodatak na postojeće pasivne opruge.
- One se mogu realizirati kao hidraulički, hidro-pneumatski ili kao pneumatski sistemi.
- Zahtijevana energija za putnička vozila u radnom opsegu od 0 do 5 Hz iznosi 1-2kW, a između 0-12 Hz iznosi 2-7 KW.
- Na sljedećoj slici je prikazan primjer hidrauličke aktivne suspenzije sa hidrauličkim klipom u seriji sa čeličnom oprugom.
- Ovaj koncept je dizajniran kako bi se smanjila niskofrekvencijska kretanja vozila ($f < 2\text{Hz}$), usljed valjanja i poniranja (posrtanja) i reducirale visokofrekvencijske pobude od strane ceste ($f > 6\text{Hz}$).
- Ovo je regulirano sa state-feedback regulatorom sa mjerenjem defleksije z_{WB} između tijela vozila i kotača i ubrzanja tijela vozila \ddot{z}_B .



Automobilska suspenzija

Sistem hidrauličke aktivne suspenzije

Primjer: ABC, Mercedes CL i S klase.



Automobilska suspenzija

Suspenzija prednjih kotača (front suspension)

- Sistemi suspenzija su neovisni.



16/43



jednosegmentni

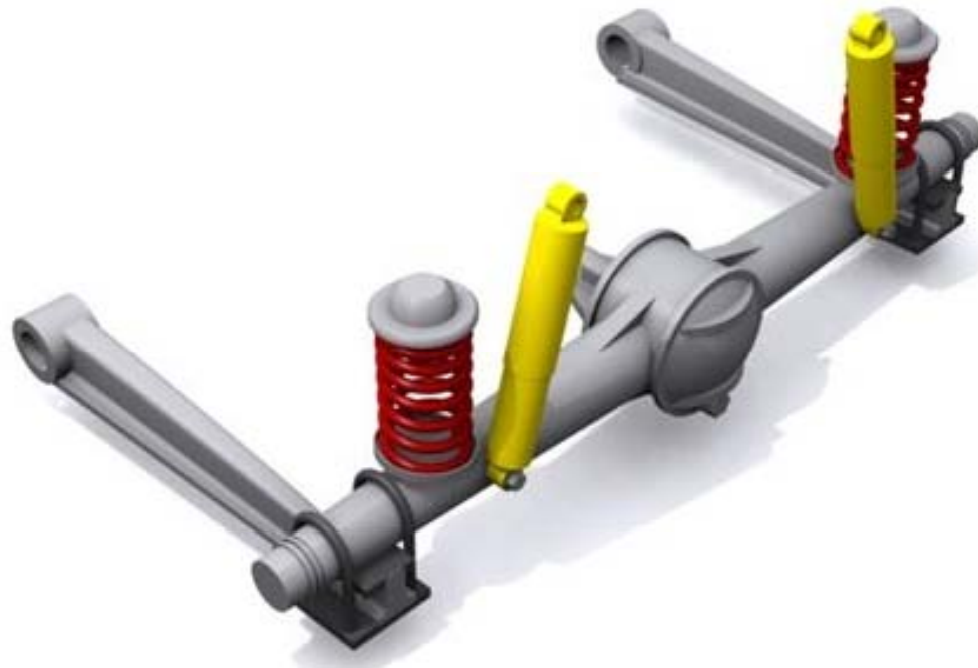


višesegmentni

Automobilska suspenzija

Suspenzija zadnjih kotača (rear suspension)

- Sistemi suspenzije su međusobno ovisni (povezani sistemi)



Automobilska suspenzija

Linearna elektromagnetska suspenzija

- Najnoviji sistem automobilske suspenzije.
- Umjesto opruga i amortizera na svakom kraju automobila, koriste se linearni elektromagnetski motori i pojačala snage.
- Kada pojačalo snage napaja namote motora, motor podiže i spušta ovjes i na taj način upravlja kretanjem između kotača i tijela vozila.
- Linearni elektromagnetski motor reagira veoma brzo na pobudu i obavlja zadatke koji su ranije bili rezervirani za amortizer.



Automobilska suspenzija

Linearna elektromagnetska suspenzija



19/43



Sistem LEM suspenzije



Standardna suspenzija sa amortizerom

Automobil u
zavoju



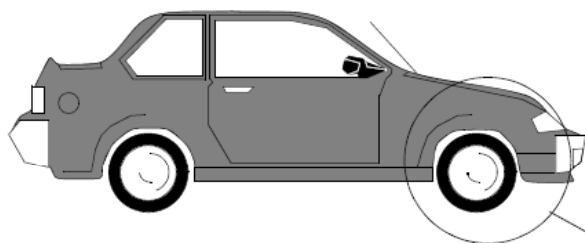
LEM suspenzija

10.1. Sistem automobilske suspenzije

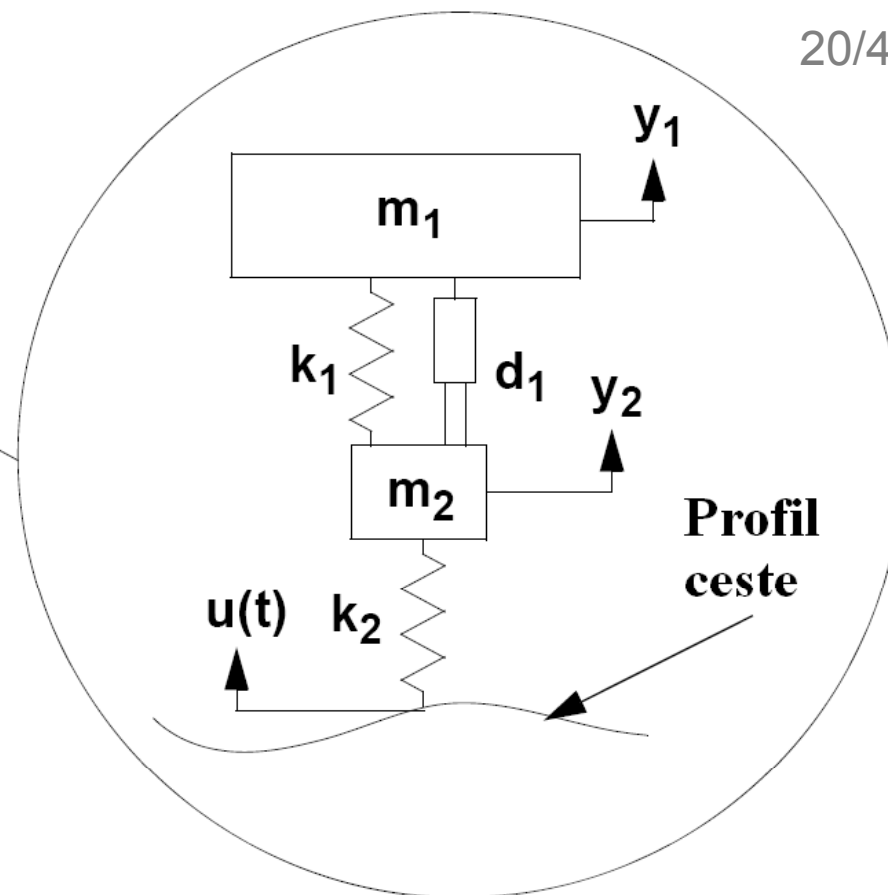


20/43

Opis sistema



m_1 =masa kojom se automobil oslanja na kotač (masa tijela vozila),
 m_2 =masa kotača,
 k_1 =konstanta opruge ovjesa,
 k_2 =konstanta opruge gume,
 d_1 =konstanta prigušenja,
 u =premećaj uzrokovan oblikom ceste (ulaz u sistem, vertikalna pozicija),
 y_1 =izlaz koji prikazuje kretanje vozila,
 y_2 =izlaz koji prikazuje kretanje kotača.

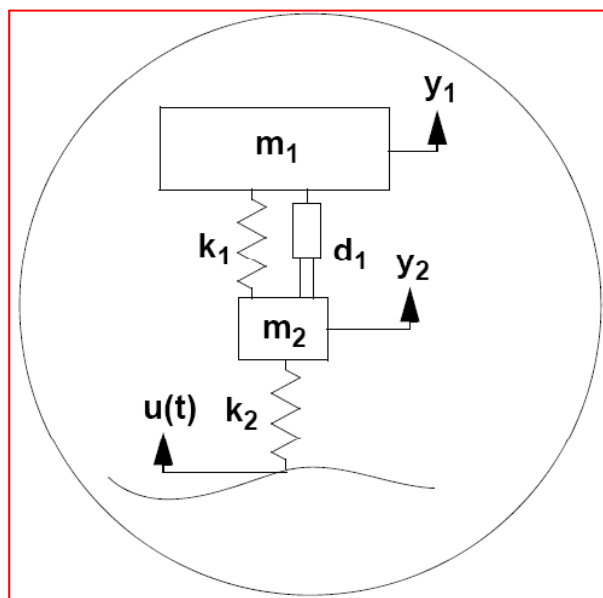


Pretpostavlja se da je u ravnotežnom stanju $y_1=0$ i $y_2=0$, tako da se utjecaj gravitacije može zanemariti.

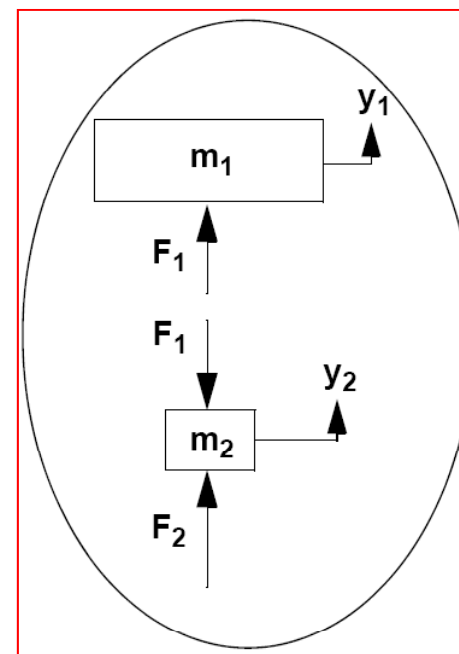
Sistem automobilske suspenzije

Modeliranje sistema

- Koristimo jednađbe za ravnotežu sila masa:



$$ma = \sum F$$



$$\begin{aligned} F_1 &= k_1(y_2 - y_1) + d_1(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) \\ F_2 &= k_2(u - y_2) \end{aligned}$$

=

$$\begin{aligned} F_1 &= m_1 \ddot{y}_1 \\ F_2 &= m_2 \ddot{y}_2 - F_1 = m_2 \ddot{y}_2 - m_1 \ddot{y}_1 \end{aligned}$$

Sistem automobilske suspenzije

Modeliranje sistema

- Ravnoteža sila (jednadžbe kretanja):

$$\begin{aligned}m_1 \ddot{y}_1 &= k_1 (y_2 - y_1) + d_1 (\dot{y}_2 - \dot{y}_1) \\m_2 \ddot{y}_2 &= k_1 (y_1 - y_2) + d_1 (\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + k_2 (u - y_2)\end{aligned}$$

- Sređivanjem se dobiva:

$$\begin{aligned}\ddot{y}_1 &= \frac{1}{m_1} [k_1 (y_2 - y_1) + d_1 (\dot{y}_2 - \dot{y}_1)] \\ \ddot{y}_2 &= \frac{1}{m_2} [k_1 (y_1 - y_2) + d_1 (\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + k_2 (u - y_2)]\end{aligned}$$



Sistem automobilske suspenzije

Modeliranje sistema

- Idemo na prikaz modela u prostoru stanja.
- Prvo se odabiru stanja, a nakon toga uspostavljaju jednađbe u prostoru stanja.
- Svakoj masi se pridružuju dva stanja, njena pozicija i brzina, respektivno.
- Vektor stanja prikazuje minimalan broj informacija neophodan u danom trenutku t da bi se bilo u stanju predvidjeti (predikcija) ponašanje sistema.
- Prostor stanja je prikladan za složenije sisteme (sistemi visokog reda), a posebno za viševarijabilne sisteme (MIMO sistemi).



Sistem automobilske suspenzije

Modeliranje sistema

- Prikaz sistema u prostoru stanja:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned}$$

$$x \in \mathcal{R}^n, \quad u \in \mathcal{R}^m, \quad A \in \mathcal{R}^{n \times n}, \quad B \in \mathcal{R}^{n \times m}$$

- Izbor varijabli stanja: $x_1 = y_1$, $x_2 = \dot{y}_1$, $x_3 = y_2$, $x_4 = \dot{y}_2$ daje sljedeće jednačbe u prostoru stanja:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k_1}{m_1} & -\frac{d_1}{m_1} & \frac{k_1}{m_1} & \frac{d_1}{m_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_1}{m_2} & \frac{d_1}{m_2} & -\frac{k_1+k_2}{m_2} & -\frac{d_1}{m_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{k_2}{m_2} \end{bmatrix} \cdot u, \quad \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}$$





Sistem automobilske suspenzije

Modeliranje sistema

- Na temelju prikaza sistema u prostoru stanju mogu se dobiti prijenosne funkcije korištenjem sljedećeg izraza:

$$G = C(sI - A)^{-1} B$$

- Iz ovog izraza slijedi:

Kretanje tijela vozila koji se oslanja na ovjes kotača:

$$G_1(s) = \frac{Y_1(s)}{U(s)} = \frac{k_2(d_1s + k_1)}{(m_1s^2 + d_1s + k_1)(m_2s^2 + k_2) + m_1s^2(d_1s + k_1)}$$

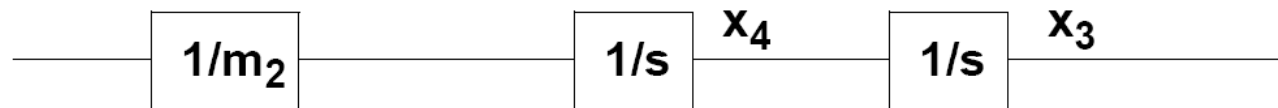
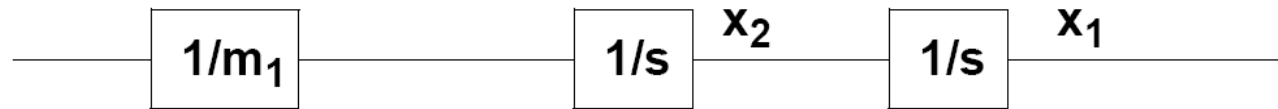
Kretanje kotača:

$$G_2(s) = \frac{Y_2(s)}{U(s)} = \frac{k_2(m_1s^2 + d_1s + k_1)}{(m_1s^2 + d_1s + k_1)(m_2s^2 + k_2) + m_1s^2(d_1s + k_1)}$$

Sistem automobilske suspenzije

Modeliranje sistema

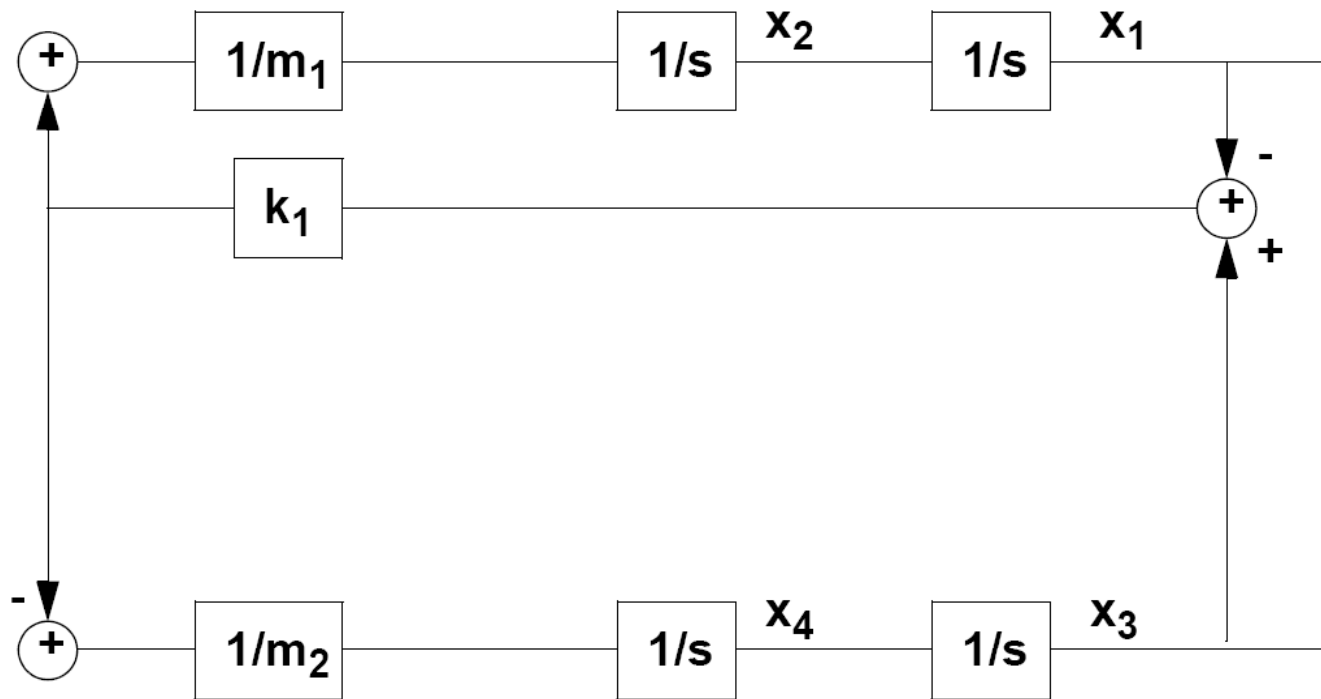
- Započinjemo sa masama i za svaku masu imamo po dva stanja.
- Ubrzanje je inverzno proporcionalno masi.



Sistem automobilske suspenzije

Modeliranje sistema

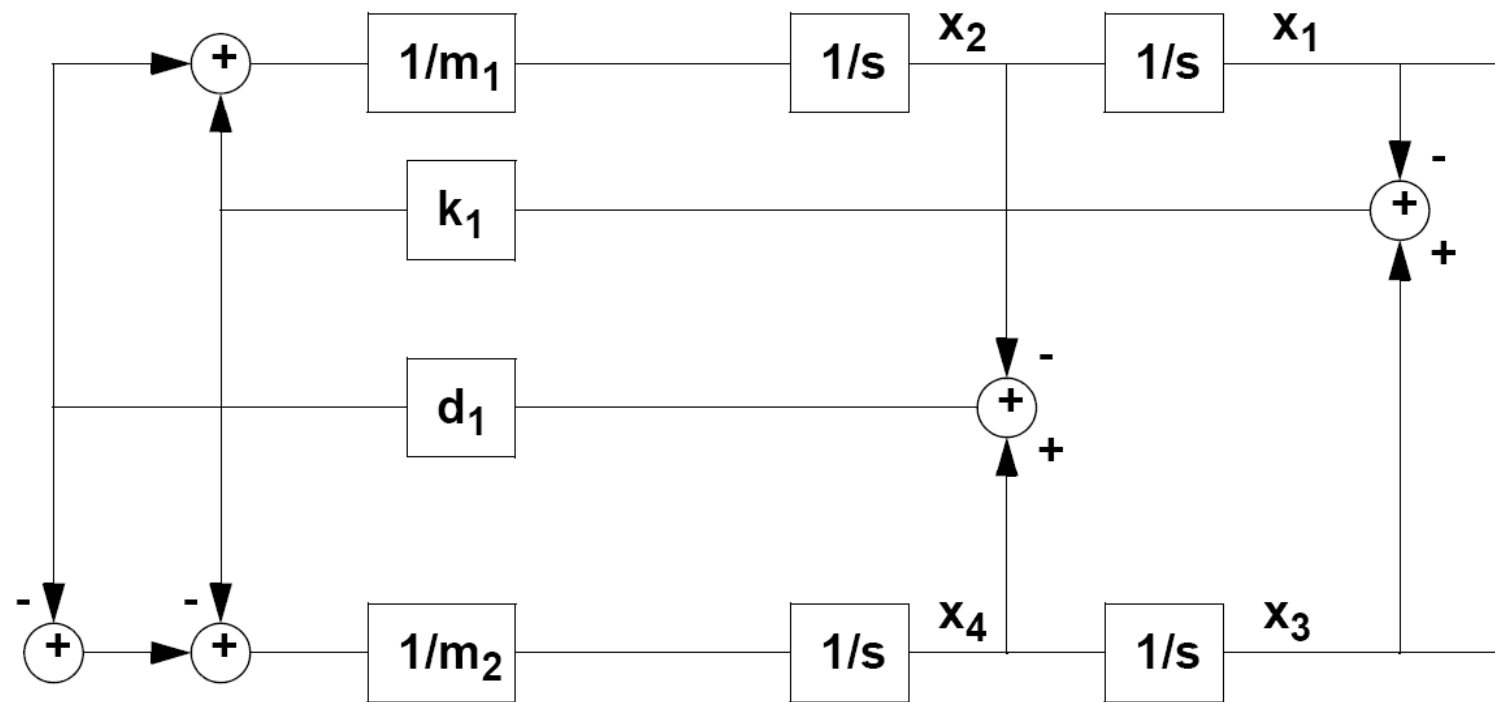
- Dodavanje sile opruge koja je proporcionalna sa k_1 .
- Djeluje na mase kotača i tijela vozila sa različitim predznacima.



Sistem automobilske suspenzije

Modeliranje sistema

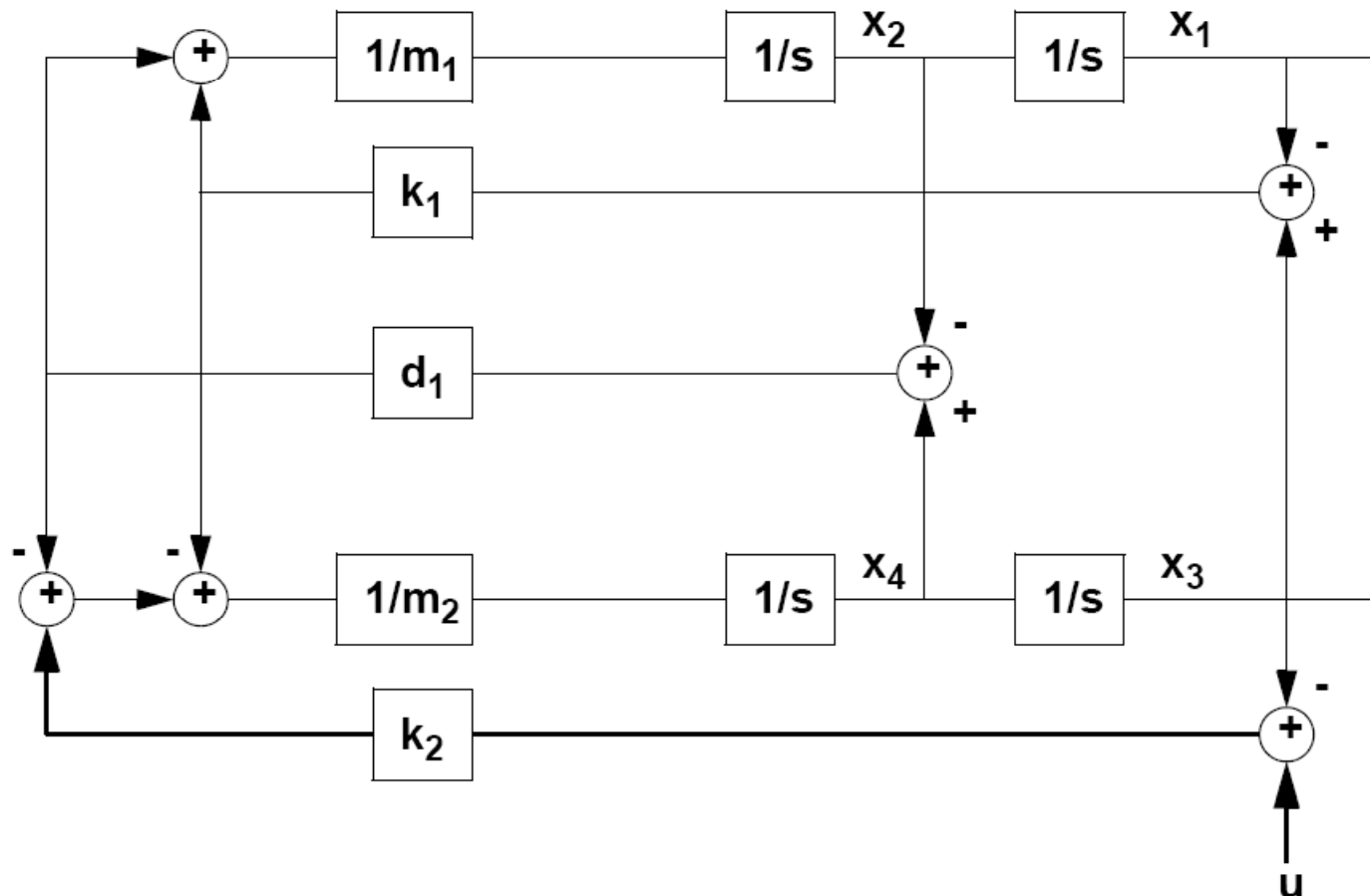
- Dodavanje sile (proporcionalna sa d_1) prigušivača amortizera.
- Ova sila djeluje na mase kotača i vozila sa suprotnim predznacima.



Sistem automobilske suspenzije

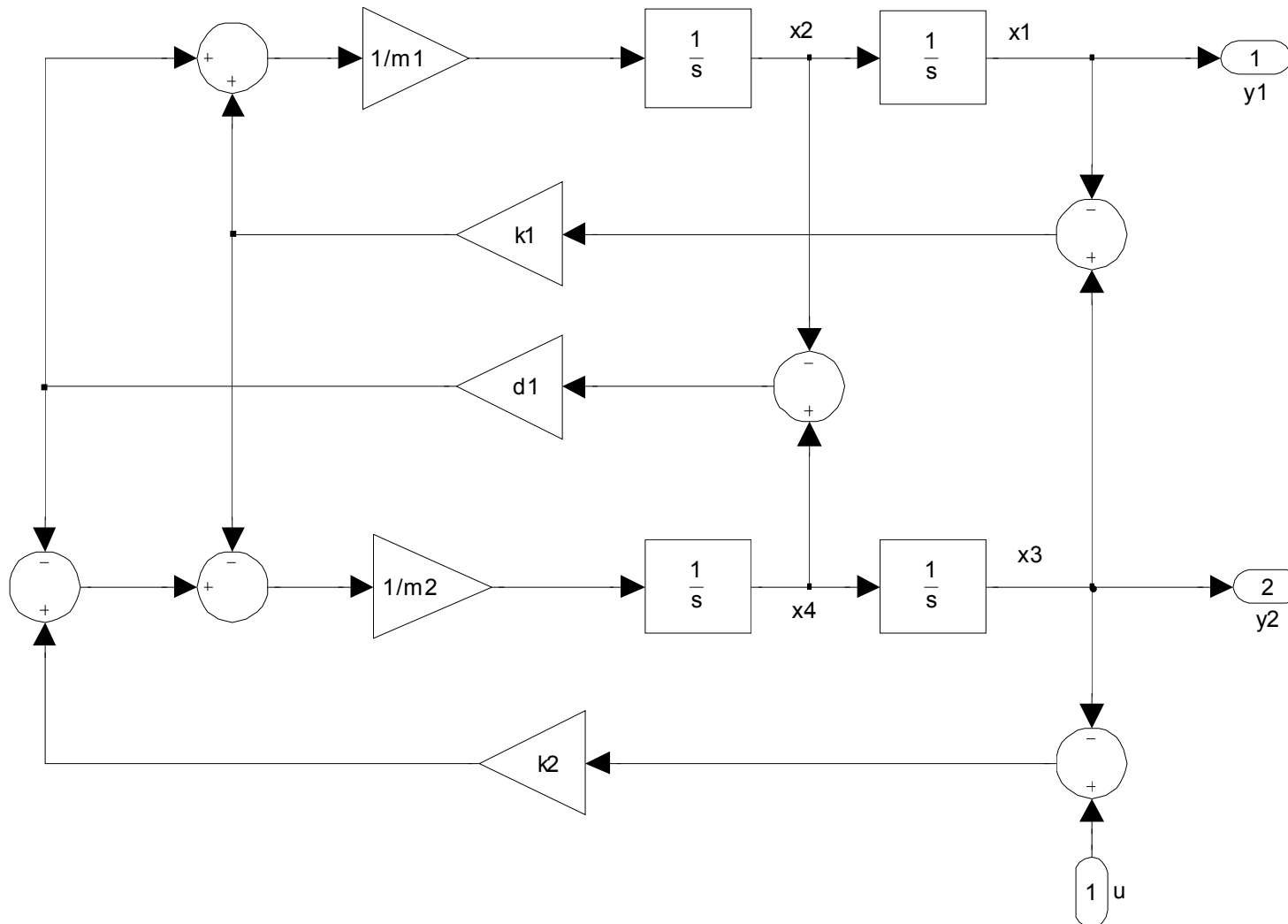
Modeliranje sistema

- Dodavanje utjecaja djelovanja između kotača i ceste.



Sistem automobilske suspenzije

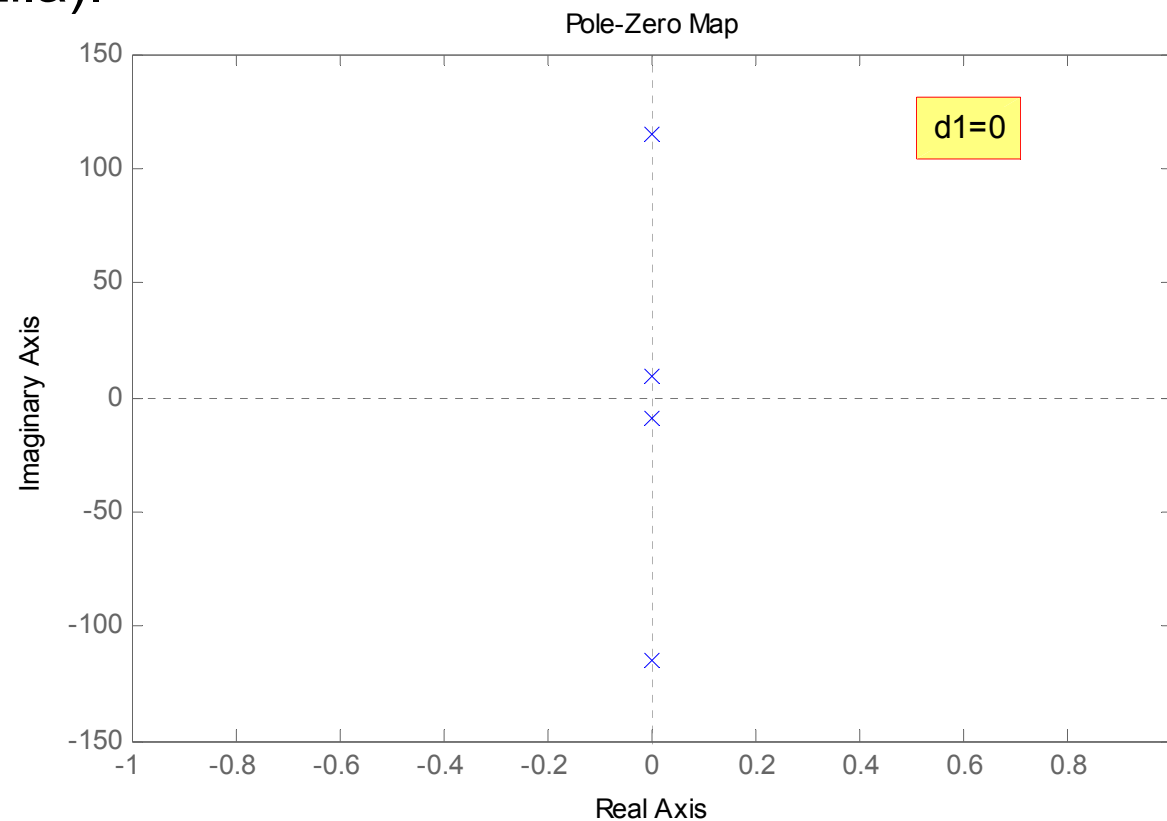
- Simulacijska shema u Simulink-u



Sistem automobilske suspenzije

Suspenzija bez prigušenja

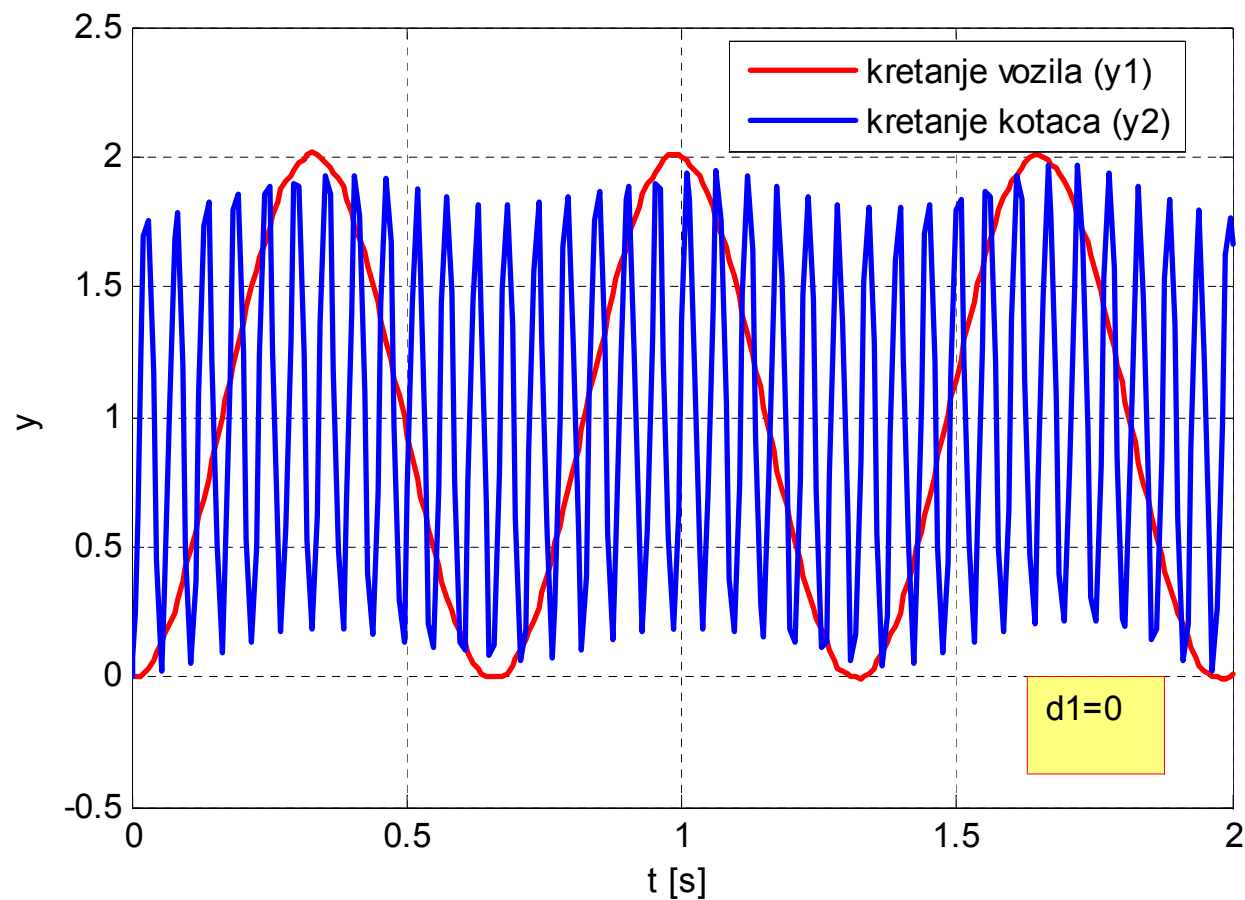
- Nema prigušenja u sistemu (niti u amortizeru, niti u gumi) $d_1=0$.
- Dva brza pola (kretanje kotača) i dva spora pola (kretanje tijela vozila).



Sistem automobilske suspenzije

Suspenzija bez prigušenja

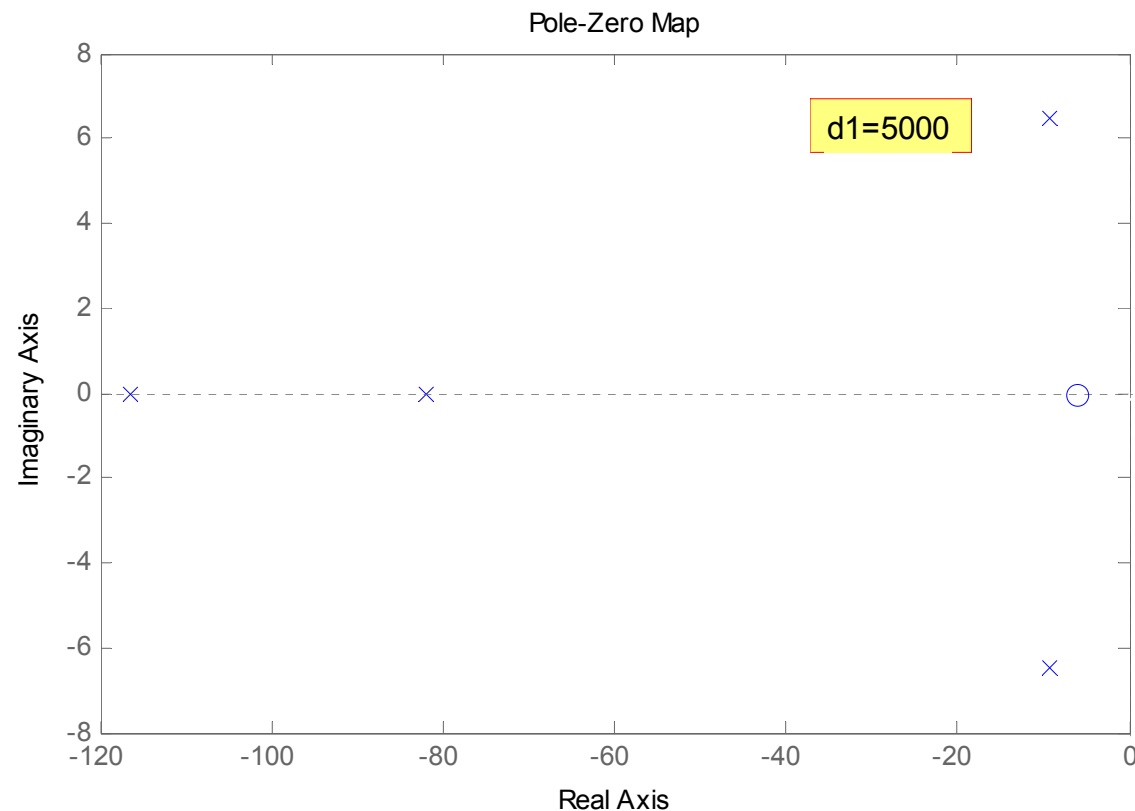
- Sistem na granici stabilnosti.



Sistem automobilske suspenzije

Dobro prigušena suspenzija

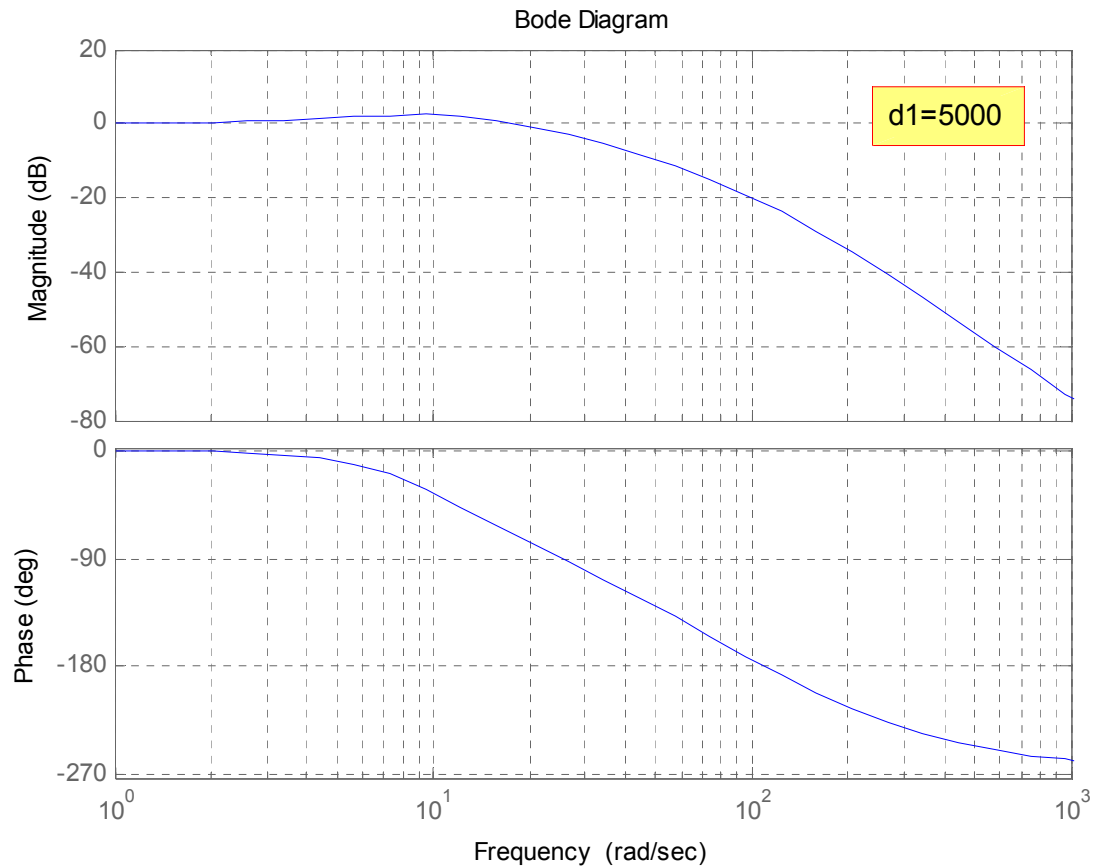
- Amortizer je montiran, ali nema prigušenja u gumi.
 - Oscilatorno ponašanje brzih polova je iščezlo.
 - Spori polovi uzrokuju prilično dobro ponašanje.
 - Sporiji polovi praktički određuju ponašanje sistema.



Sistem automobilske suspenzije

Dobro prigušena suspenzija

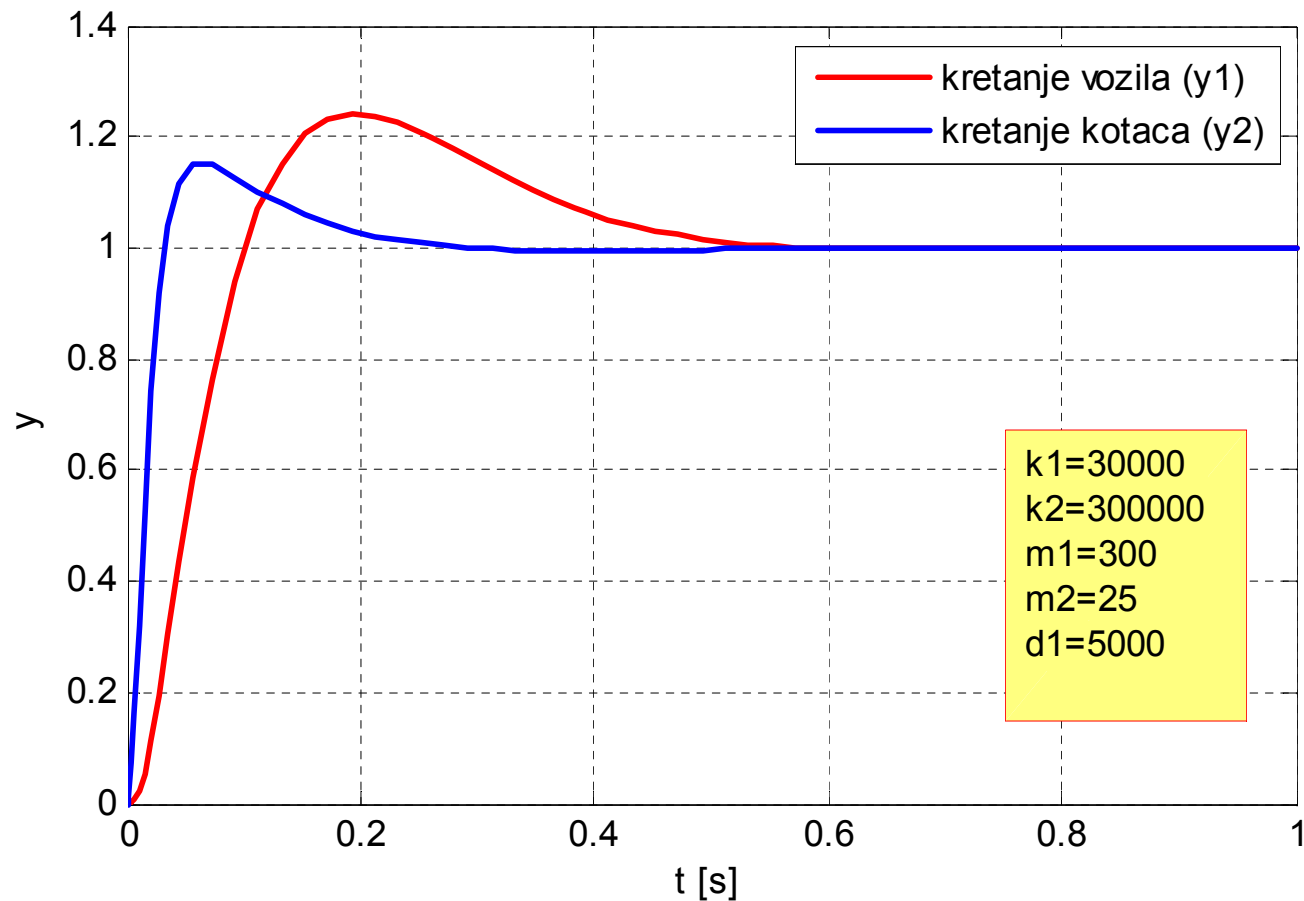
- Bodeov dijagram
- Pomak u fazi za 270° na visokim frekvencijama (polni višak jednak 3 (razlika stupnjeva brojnika i nazivnika)).



Sistem automobilske suspenzije

Dobro prigušena suspenzija

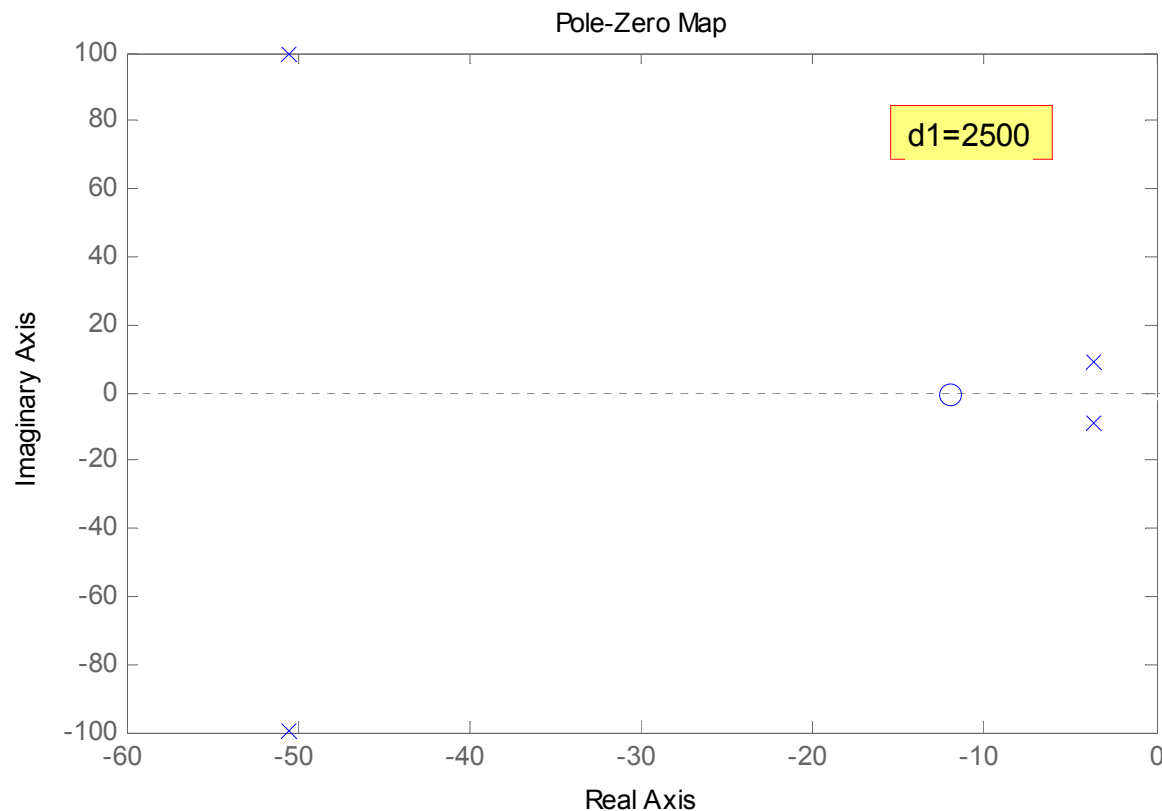
- Blizu kritičnom prigušenju, necikličko ponašanje.



Sistem automobilske suspenzije

Slabo prigušena suspenzija

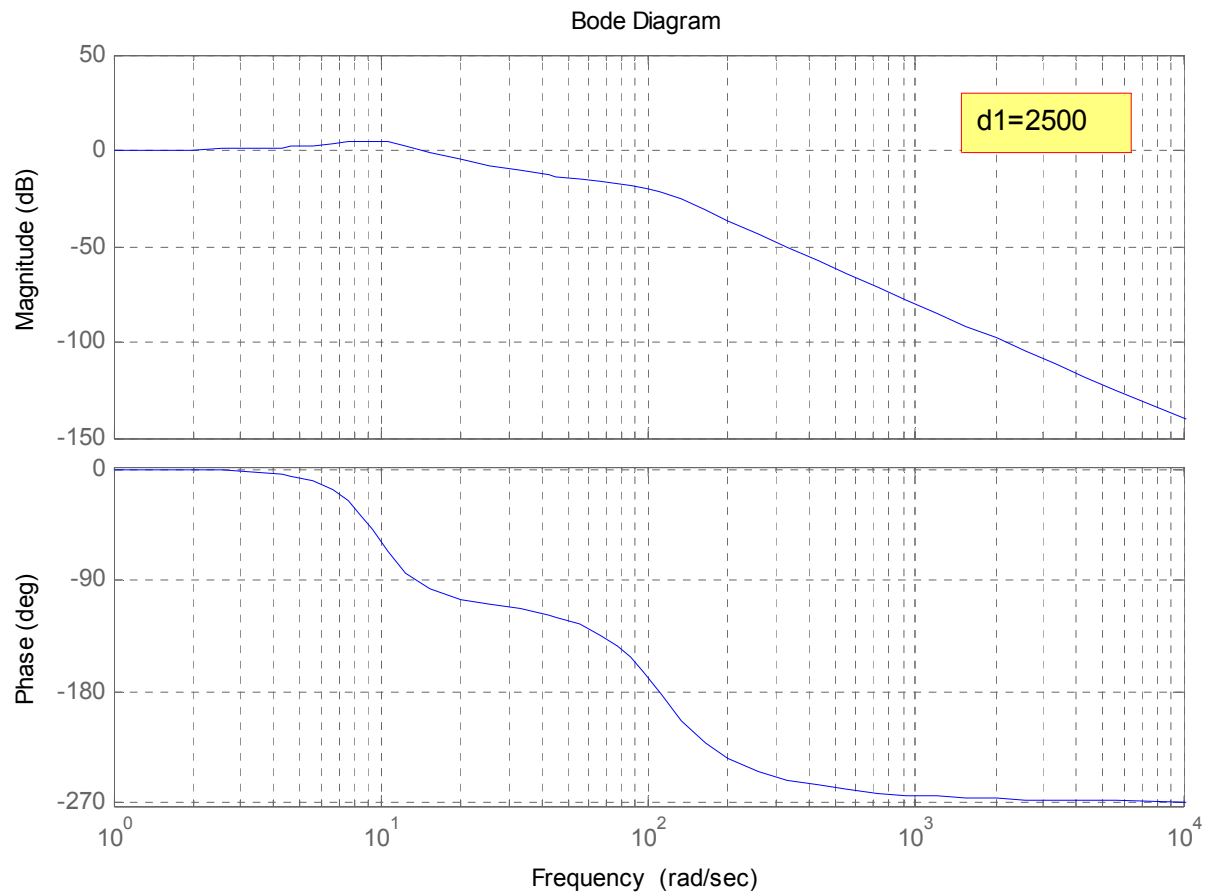
- Imamo dva oscilatorna moda i preslabo prigušenje.
- Malo prigušenje sporijih i dominantnih polova.



Sistem automobilske suspenzije

Slabo prigušena suspenzija

- Bodeov dijagram prikazuje pojačanje ulaza oko niske prirodne frekvencije za slučaj kretanja tijela vozila.



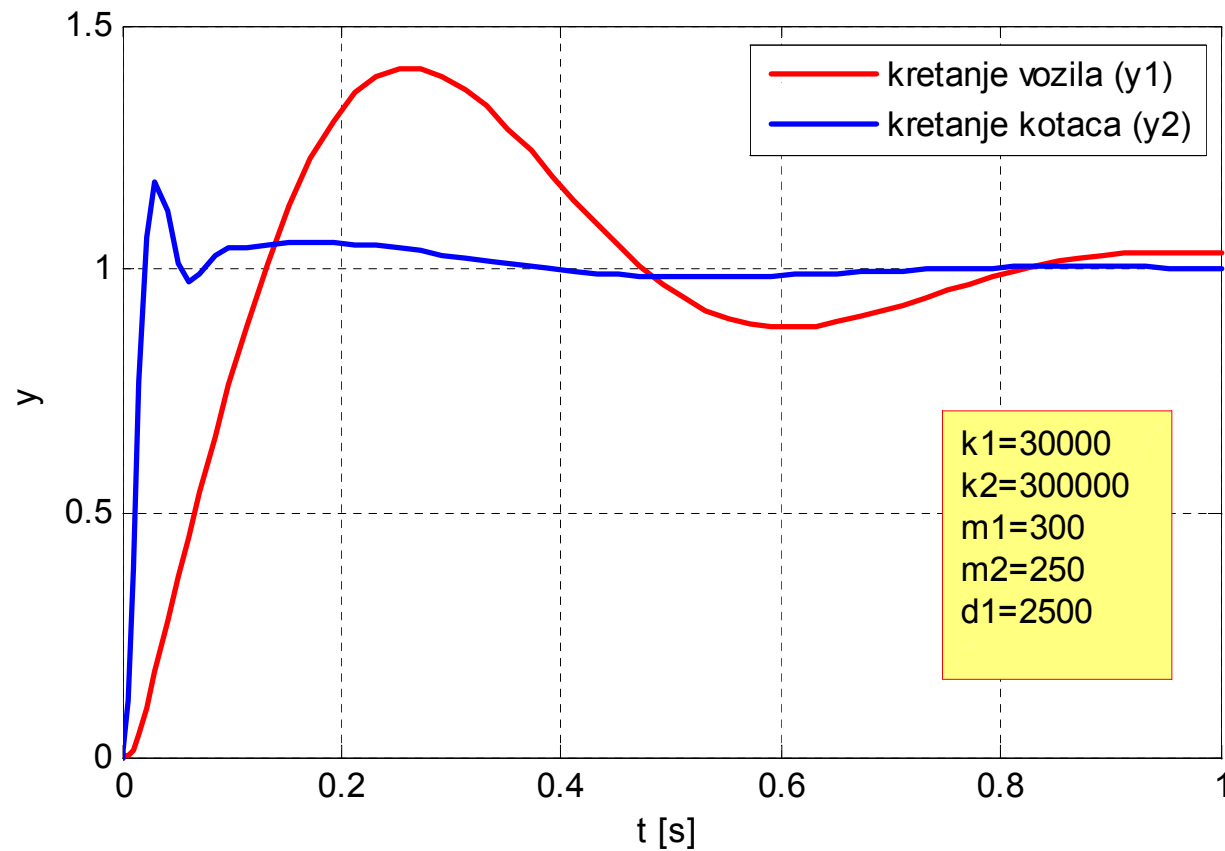
Sistem automobilske suspenzije

Slabo prigušena suspenzija

- Imamo tendenciju oscilatornog ponašanja.



38/43



Sistem automobilske suspenzije

Interpretacija matrica

- Matrica sistema A definira dinamička svojstva sistema (ima utjecaj na nazivnik prijenosne funkcije).
- Drugim riječima, matrica A određuje polove sistema.
- Matrica ulaza B opisuje kako su ulazni signali povezani.
- Matrica B ima utjecaj na brojnik prijenosne funkcije, to jest na nule prijenosne funkcije.
- Matrica C definira kako su izlazi sistema povezani (također ima utjecaja na brojnik prijenosne funkcije).



Sistem automobilske suspenzije

Interpretacija polova

- Predstavljaju svojstvene vrijednosti matrice sistema A .
- Ili ekvivalentno korijene nazivnika prijenosne funkcije.
- Svi polovi su locirani u lijevoj poluravnini s -ravnine, što odgovara stabilnom sistemu.
- Pol u desnoj poluravnini daje nestabilan sistem.
- Veća udaljenost od ishodišta, brži sistem.



Sistem automobilske suspenzije

Interpretacija nula

- Predstavljaju nule prijenosne funkcije (odnosno brojnika prijenosne funkcije).
- Definira koji ulazni signali su više ili manje blokirani od strane sistema.
- Također poznati pod imenom prijenosni polovi (MIMO sistemi).
- Nula u desnoj poluravnini znači da je inverzna prijenosna funkcija procesa nestabilna. Zbog toga kompletan model slijeđenje (korištenjem inverzije procesa) nije moguće postići.



Sistem automobilske suspenzije

Ponašanje kotača

- Prijenosna funkcija koja opisuje vertikalno kretanje kotača:

$$G_2(s) = \frac{Y_2(s)}{U(s)} = \frac{k_2(m_1s^2 + d_1s + k_1)}{(m_1s^2 + d_1s + k_1)(m_2s^2 + k_2) + m_1s^2(d_1s + k_1)}$$

- Jasno je da imamo dvije nule prijenosne funkcije (prijenosne nule).
- Na temelju lokacije ovih nula u s -ravni može se razumijeti njihova fizička interpretacija.



Sistem automobilske suspenzije

Ponašanje kotača – raspored polova i nula

- Postojanje dvije oscilatorne (konjugirano kompleksne) nule indicira da je određena frekvencija ulaznog signala djelomično blokirana usljed djelovanja

