

SEGWAY – lični transporter

Prvi projektni zadatak iz predmeta Sistemi automatskog upravljanja.

Autori:

Mihajlović Sofija RA 10/2022,

Kanazir Dragana RA 11/2022,

Rodić Milan RA 13/2022 i

Bratić Petar RA 14/2022.

Uvod

Segway predstavlja električno vozilo na dva točka, osmišljeno i isprojektovano od strane pronalazača Dina Kamena (Dean Kamen), poznatom pre toga po kreiranju električnih invalidskih kolica "iBOT" na kojima je i sam Segway zasnovan. Isprojektovan je u tajnosti na Univerzitetu u Plimutu (Velika Britanija) u kolaboraciji sa kompanijama vazduhoplovnih sistema BAE systems i SUMITOMO Precision Products Co.

Prvi model, nazvan Segway PT (PERSONAL TRANSPORTER), javno je promovisan na televizijskom programu *Good Morning America* na ABC-ju 2001. godine, a postao je prvi dostupan javnosti rane 2002. godine. Inicijalne projekcije na tržištu bile su izuzetno optimistične, a ideju za projekat hvalili su i podržali razni biznsmeni i pronalazači kao što su Stiv Džobs i Džon Doer koji su za projekat rekli da će biti „veći od otkrića interneta" i „podjednake važnosti kao rasprostranjenost ličnih kompjutera" respektivno.

Optimistične procene, međutim, pokazale su se kao pogrešne i sam Segway nikad nije ispunio očekivanja potražnje na tržištu. Ovo se ogleda u činjenici da je odnos ukupnog broja prodatih jedinica kroz svih 19 godina rada kompanije i projektovanog broja jedinica za samo prvu godinu proizvodnje 140,000/100,000. Razlog ovome je, između ostalog, činjenica da Segway nije bio adekvatna zamena ni za dalje puteve koji bi se obavljali automobilima, ni za kraće puteve koji bi se mogli prepešačiti. Jednostavno, bio je prespor i neadekvatno zaštićen za prvo, a previše kabast i skup za drugo. Osim toga, u medijima se kreirala negativna reputacija za Segway kao neozbiljno vozilo i često je ismevano, kako zbog svog izgleda i načina rada, tako i zbog stereotipizacije ljudi koji su ga posedovali. Nije pomogla ni činjenica da su se više puta dešavali i softverski kvarovi, pa su već prodane jedinice bile masovno opozvane na prepravke. Iako su vremenom noviji modeli imali napredniju bateriju, veći domet i poboljšane senzore naginjanja, stav javnog mnjenja ostalo je nepromenjen.



Slika 1 Segway – lični transporter

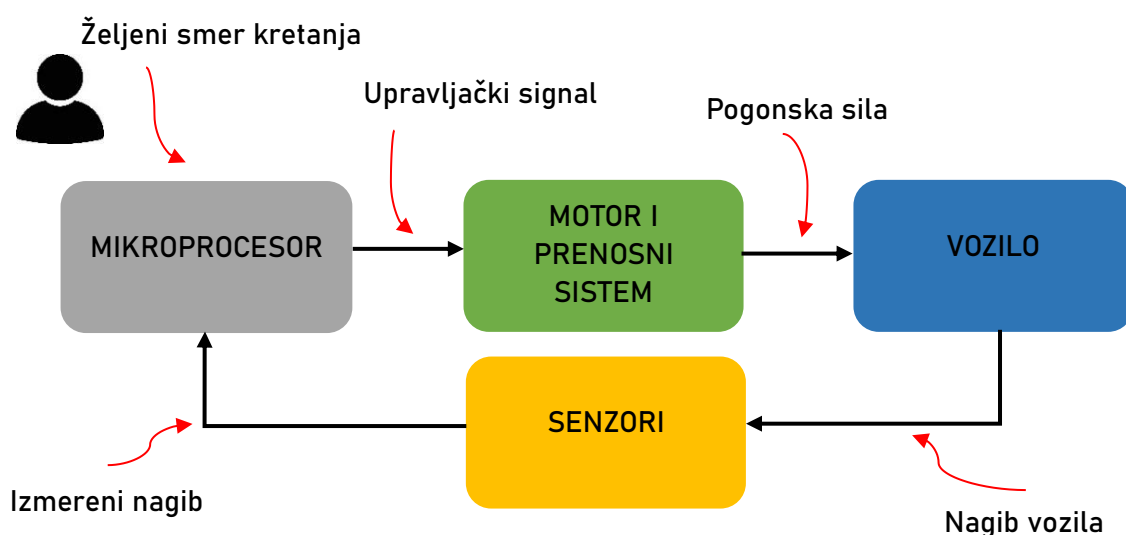
Kompanija je bivala kupljena dva puta, prvi put od strane britanskog biznismena Džimi Heseldena koji je samo 10 meseci nakon akvizicije tragično poginuo u nesreći koju je izazvao Segway koji je vozio. Drugi put, firmu je kupila kineska kompanija Ninebot koja je neuspešno pokušala da poveća zainteresovanost

puštanjem u proizvodnju Segway mini pro-a, manju verziju vozila koja bi se upravljala kolenima. Na kraju, modeli Segway-a su se pokazali korisnim samo u uskim sferama upotrebe, kao što su policijske patrole i turističke svrhe.

Konačna odluka da se obustavlja proizvodnja svih novih jedinica doneta je 20. jula 2020. godine i Ninebot je otpustio sve preostale radnike aktivne na Segway projektu. [3]

Princip rada vozila

Na slici *Slika 2* grafički je prikazan princip rada Segway-a. On svojim komponentama reprezentuje osnovno kolo sistema automatskog upravljanja. Vozilo u sebi sadrži senzore, tj. merne uređaje koji očitavaju nagib. Izmereni podaci šalju se mikroprocesoru koji predstavlja regulator sistema, odnosno upravljački uređaj. Obradeni signal se prosleđuje motorima koji preko prenosnog sistema ostvaruju kretanje. Ove komponente u osnovnom kolu SAU oslikavaju izvršni organ. U nastavku je dat detaljniji prikaz svih prethodno pomenutih komponenti.



Slika 2 Funkcionalni prikaz rada Segway-a

Mikroprocesor

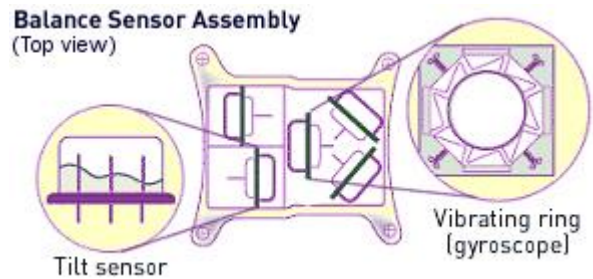
Sve informacije o nagibu, prethodno izmerene senzorima, prosleđuju se regulatoru sistema koji se sastoji od dve štampane ploče. Svaka od njih sadrži skup od po pet mikroprocesora koji zajedno poseduju tri puta veću snagu od prosečnog desktop računara. Predviđeno je da obe štampane ploče rade istovremeno, međutim, ako i dođe do kvara jedne od njih, vozilo će poslati upozorenje vozaču i blagovremeno se zaustaviti.

Segway zahteva veliku količinu procesorske moći zbog potrebe preciznog računanja, a sve u cilju izbegavanja ispadanja iz ravnoteže. Pri normalnim uslovima rada, podaci o poziciji se proveravaju oko stotinu puta u sekundi. Za potrebe obrade ovolike količine podataka implementiran je napredni softver koji nadgleda sve informacije o stabilnosti i, u skladu sa tim, podešava brzine električnih motora. [1]

Senzori

Primarni senzorski sistem je sklop žiroskopa, a žiroskop je točak koji se okreće unutar stabilnog okvira. Predmet koji se okreće opire se promenama svoje ose rotacije jer se primenjena sila kreće zajedno sa samim objektom.

Na primer, ako pritisnemo tačku na vrhu točka koji se okreće, ta tačka se pomera ka prednjem delu točka dok još uvek oseća silu koju ste primenili. Kako tačka sile nastavlja da se kreće, ona na kraju primenjuje silu na suprotne krajeve točka čime se sila izbalansira.



Slika 3 Senzori

Zbog svoje otpornosti na spoljnu silu, točak žiroskopa će zadržati svoju poziciju u prostoru (u odnosu na tlo) čak i ako ga nagnete, ali okvir žiroskopa će se slobodno kretati u prostoru. Merenjem položaja okretnog točka žiroskopa u odnosu na okvir, precizan senzor može odrediti nagib objekta - koliko se nagnije od uspravnog položaja, kao i njegovu brzinu - koliko se brzo nagnije.

Konvencionalni žiroskop bi bio težak za održavanje u ovoj vrsti vozila, tako da Segway dobija isti efekat sa drugom vrstom mehanizma. Segway koristi specijalni poluprovodnički senzor ugaone brzine napravljen od silicijuma. Ova vrsta žiroskopa određuje rotaciju objekta koristeći Koriolisov efekat na veoma maloj skali.

Jednostavno rečeno, Koriolisov efekat je očigledno okretanje objekta koji se kreće u odnosu na drugi rotirajući objekat. Na primer, avion koji putuje pravolinijski deluje kao da se okreće zato što se Zemlja rotira ispod njega.

Tipičan silikonski žiroskop u čvrstom stanju sastoji se od male silikonske ploče postavljene na potporni okvir. Čestice silicijuma se pomeraju elektrostatičkom strujom koja se primenjuje preko ploče. One se kreću na određeni način, što uzrokuje da ploča vibrira na predvidljiv način, ali kada se ploča rotira oko svoje ose (to jest kada se Segway rotira u toj određenoj ravni), čestice se iznenada pomeraju u odnosu na ploču. Ovo menja vibraciju, a promena je proporcionalna stepenu rotacije. Sistem žiroskopa meri promenu vibracija i prosleđuje ovu informaciju računaru. Na ovaj način računar može da otkrije kada se Segway rotira duž određenih osa.

Segway HT ima pet žiroskopskih senzora, ali su mu potrebna samo tri da bi detektovao korak napred i nazad, kao i nagnjanje ulevo ili udesno (nazvano *roll*). Dodatni senzori služe da bi vozilo bilo pouzdanije. Pored toga, Segway ima dva senzora nagiba napunjena tečnošću elektrolita. Kao i naše unutrašnje uho, ovaj sistem određuje sopstveni položaj u odnosu na tlo na osnovu nagiba površine tečnosti. [1]

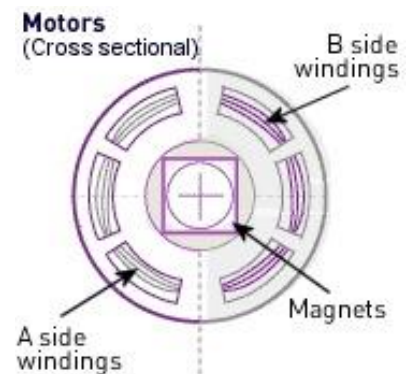
Motori i pogonski sistem

Motori Segway-a su jedinstveni na mnogo načina. Oni su najsnažniji motori koji su ikada proizvedeni u svojoj klasi težine i veličine. Zahtevaju 330 vati za kontinuirani rad i proizvode kratkotrajne performanse do 4 KS.

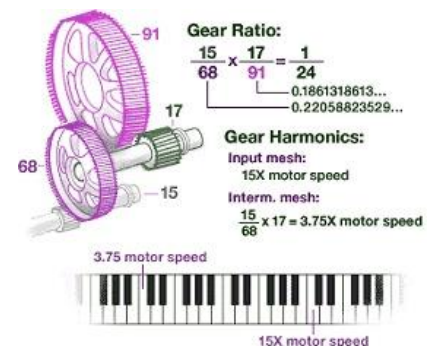
Motori koriste servo tehnologiju bez četkica. To znači da nema mehaničkih kontakata koji se troše i time smanjuju izlaz. Svaki motor je opremljen sa dva nezavisna namotaja sa kojih se upravlja nezavisno svakom pločom. U normalnim uslovima upotrebe, namotaji rade paralelno jedan sa drugim i dele opterećenje. U slučaju kvara, motor deaktivira neispravan namotaj i kontroliše preostali kako bi održao kontrolu nad Segway-em dok se ne zaustavi. Motor precizno podesi izlaz do 8000 obrtaja u minuti što omogućava veoma visok nivo snage u kratkom dometu. Merenjem položaja magneta, beskontaktni i analogni senzori daju povratnu informaciju od motora do upravljačkih jedinica. Motorna osovina je jedini pokretni deo.

Menjač Segway-a više je uporediv sa švajcarskim preciznim satom, nego sa tradicionalnim automobilom. Dvostepeni sistem nudi smanjenje stepena prenosa od 24:1 koji omogućava rad motora na moćnom i efikasnom nivou brzine u celom opsegu brzina Segway-a.

Svaki korak zupčanika je urezan u spiralno formiran profil i ova vrsta veze minimizira buku i povećava maksimalno dozvoljeno opterećenje. Odabran je broj zubaca na svakom stepenu prenosa tako da je postignut neintegralni prenosni odnos. To znači da se zupci drže na drugom mestu prenosnika pri svakom okretu i samim tim se produžava životni vek menjača. Segway inženjeri su razvili zupce zupčanika tako da zvuci koji se pojavljuju leže tačno dve muzičke oktave jedna od druge. Kada se Segway kreće, pre stvara muziku, nego buku. Menjač je prethodno sastavljen, podmazan i ne zahteva dalje održavanje tokom ukupnog životnog veka Segway-a. Testiran je na hiljadama kilometara u teškim radnim uslovima. [4]



Slika 4 Motori



Slika 5 Prenosni mehanizam

Poređenje nelinearnog i linearizovanog modela Segway-a

Matematički model Segway-a je opisan sledećim jednačinama:

$$\left((M + m)R + \frac{I_w}{R} \right) \ddot{x} + mlR \cos \theta \cdot \ddot{\theta} = T + mlR \sin \theta \cdot \dot{\theta}^2$$

$$ml \cos \theta \cdot \ddot{x} + (I_r + ml^2) \cdot \ddot{\theta} = mgl \sin \theta - KT$$

Zbog jednostavnosti zapisa, uvode se konstante:

$$k_1 = (M + m)R + \frac{I_w}{R}, k_2 = mlR, k_3 = ml, k_4 = I_r + ml^2, k_5 = mgl, k_6 = mlR$$

Početne jednačine dobijaju oblik:

$$k_1 \ddot{x} + k_2 \cos \theta \cdot \ddot{\theta} = T + k_6 \sin \theta \cdot \dot{\theta}^2$$

$$k_3 \cos \theta \cdot \ddot{x} + k_4 \cdot \ddot{\theta} = k_5 \sin \theta - KT$$

Pri čemu su oznake: M – masa postolja, m – masa „ručke“, R – poluprečnik točkova, I_w i I_r – momenti inercija, l – dužina „ručke“, g – gravitaciono ubrzanje, T – moment kojim se deluje na točkove, KT – moment kojim se deluje na „ručku“.

U nastavku je prikazano dobijanje $\ddot{\theta}$ iz početnih jednačina. Na početku je iz obe početne jednačine izraženo \ddot{x} .

$$\ddot{x} = \frac{T + k_6 \sin \theta \cdot \dot{\theta}^2 - k_2 \cos \theta \cdot \ddot{\theta}}{k_1}$$

$$\ddot{x} = \frac{k_5 \sin \theta - KT - k_4 \ddot{\theta}}{k_3 \cos \theta}$$

Izjednačavanjem dobijenih izraza i daljim sređivanjem dolazi se do potrebnog oblika (unakrsno množenje i prebacivanje sabiraka na odgovarajuću stranu jednakosti).

$$\frac{T + k_6 \sin \theta \cdot \dot{\theta}^2 - k_2 \cos \theta \cdot \ddot{\theta}}{k_1} = \frac{k_5 \sin \theta - KT - k_4 \ddot{\theta}}{k_3 \cos \theta}$$

$$k_3 \cos \theta \cdot T + k_3 \cos \theta \cdot k_6 \sin \theta \cdot \dot{\theta}^2 - k_3 k_2 \cos^2 \theta \cdot \ddot{\theta} = k_1 k_5 \sin \theta - k_1 KT - k_1 k_4 \ddot{\theta}$$

$$k_1 k_4 \ddot{\theta} - k_3 k_2 \cos^2 \theta \cdot \ddot{\theta} = k_1 k_5 \sin \theta - k_1 KT - k_3 \cos \theta \cdot T - k_3 \cos \theta \cdot k_6 \sin \theta \cdot \dot{\theta}^2$$

$$\ddot{\theta} = \frac{k_1 k_5 \sin \theta - k_1 KT - k_3 \cos \theta \cdot T - k_3 \cos \theta \cdot k_6 \sin \theta \cdot \dot{\theta}^2}{k_1 k_4 - k_3 k_2 \cos^2 \theta}$$

Sledi prikaz dobijanja izraza za \ddot{x} . Iz početnih jednačina izražene su vrednosti $\ddot{\theta}$.

$$\ddot{\theta} = \frac{T + k_6 \sin \theta \cdot \dot{\theta}^2 - k_1 \ddot{x}}{k_2 \cos \theta}$$

$$\ddot{\theta} = \frac{k_5 \sin \theta - KT - k_3 \cos \theta \cdot \ddot{x}}{k_4}$$

Izjednačavanje izraza i njihovo dalje sređivanje dovodi do potrebnog oblika.

$$\frac{T + k_6 \sin \theta \cdot \dot{\theta}^2 - k_1 \ddot{x}}{k_2 \cos \theta} = \frac{k_5 \sin \theta - KT - k_3 \cos \theta \cdot \ddot{x}}{k_4}$$

$$k_4 T + k_4 k_6 \sin \theta \cdot \dot{\theta}^2 - k_1 k_4 \ddot{x} = k_2 \cos \theta \cdot k_5 \sin \theta - KT k_2 \cos \theta - k_2 k_3 \cos^2 \theta \cdot \ddot{x}$$

$$k_2 k_3 \cos^2 \theta \cdot \ddot{x} - k_1 k_4 \ddot{x} = k_2 \cos \theta \cdot k_5 \sin \theta - KT k_2 \cos \theta - k_4 T - k_4 k_6 \sin \theta \cdot \dot{\theta}^2$$

$$\ddot{x} = \frac{k_2 \cos \theta \cdot k_5 \sin \theta - KT k_2 \cos \theta - k_4 T - k_4 k_6 \sin \theta \cdot \dot{\theta}^2}{k_2 k_3 \cos^2 \theta - k_1 k_4}$$

Uvođenje promenljivih stanja

$$\begin{aligned} x_1 &= x & \dot{x}_1 &= x_2 \\ x_2 &= \dot{x} & \dot{x}_2 &= \frac{k_2 \cos \theta \cdot k_5 \sin \theta - KT k_2 \cos \theta - k_4 T - k_4 k_6 \sin \theta \cdot \dot{\theta}^2}{k_2 k_3 \cos^2 \theta - k_1 k_4} \\ x_3 &= \theta & \dot{x}_3 &= x_4 \\ x_4 &= \dot{\theta} & \dot{x}_4 &= \frac{k_1 k_5 \sin \theta - k_1 KT - k_3 \cos \theta \cdot T - k_3 \cos \theta \cdot k_6 \sin \theta \cdot \dot{\theta}^2}{k_1 k_4 - k_3 k_2 \cos^2 \theta} \end{aligned}$$

Radna tačka - $(x_1, x_2, x_3, x_4) = (0, 0, 0, 0)$. Posmatrani sistem ima radnu tačku kada je „ručka“ u uspravnom položaju što znači da su, u tom slučaju, sve promenljive stanja jednake nuli. Sada je moguće uvesti aproksimacije $\sin \theta \approx \theta$ i $\cos \theta \approx 1$.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{k_2 k_5 x_3 - k_2 KT - k_4 T - k_4 k_6 x_3 x_4^2}{k_2 k_3 - k_1 k_4} \\ \dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_4 &= \frac{k_1 k_5 x_3 - k_1 KT - k_3 T - k_3 k_6 x_3 x_4^2}{k_1 k_4 - k_2 k_3} \end{aligned}$$

Linearizacija

U nastavku je prikazan postupak linearizacije.

$$\begin{aligned} \Delta \dot{x}_1 &= \Delta x_2 \\ \Delta \dot{x}_2 &= \frac{k_2 k_5 - k_4 k_6 x_{40}^2}{k_2 k_3 - k_1 k_4} \Delta x_3 + \frac{-2 k_4 k_6 x_{30} x_{40}^2}{k_2 k_3 - k_1 k_4} \Delta x_4 + \frac{-k_2 K - k_4}{k_2 k_3 - k_1 k_4} \Delta T \\ \Delta \dot{x}_3 &= \Delta x_4 \\ \Delta \dot{x}_4 &= \frac{k_1 k_5 - k_3 k_6 x_{40}^2}{k_1 k_4 - k_2 k_3} \Delta x_3 + \frac{-2 k_3 k_6 x_{30} x_{40}^2}{k_1 k_4 - k_2 k_3} \Delta x_4 + \frac{-k_1 K - k_3}{k_1 k_4 - k_2 k_3} \Delta T \end{aligned}$$

Uvrštavanje vrednosti radne tačke.

$$\Delta \dot{x}_1 = \Delta x_2$$

$$\Delta \dot{x}_2 = \frac{k_2 k_5}{k_2 k_3 - k_1 k_4} \Delta x_3 + \frac{-k_2 K - k_4}{k_2 k_3 - k_1 k_4} \Delta T$$

$$\Delta \dot{x}_3 = \Delta x_4$$

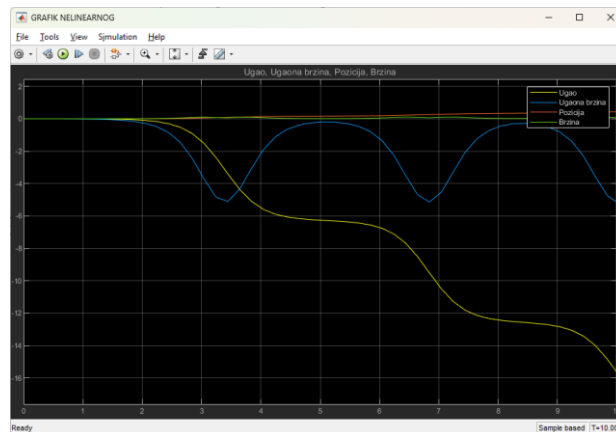
$$\Delta \dot{x}_4 = \frac{k_1 k_5}{k_1 k_4 - k_2 k_3} \Delta x_3 + \frac{-k_1 K - k_3}{k_1 k_4 - k_2 k_3} \Delta T$$

Dobijen je linearizovan model Segway-a.

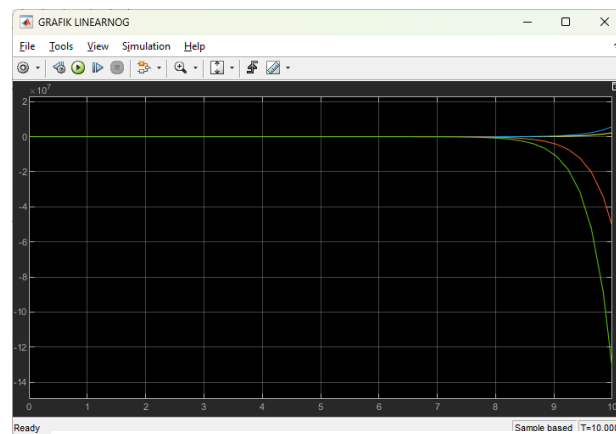
$$\Delta \dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{k_2 k_5}{k_2 k_3 - k_1 k_4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{k_1 k_5}{k_1 k_4 - k_2 k_3} & 0 \end{bmatrix} \Delta x + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{-k_2 K - k_4}{k_2 k_3 - k_1 k_4} \\ 0 \\ \frac{-k_1 K - k_3}{k_1 k_4 - k_2 k_3} \end{bmatrix} \Delta T$$

Simulacija

Rezultati simulacije u okruženju Matlab. Na slici *Slika 6* prikazan je grafik nelinearnog sistema, a na slici *Slika 7* prikazan je grafik linearnog sistema. S obzirom na to da je sistem koji je modelovan nestabilan, bilo je očekivano da će posmatrane veličine težiti beskonačnosti sa protekom vremena.



Slika 6 Grafik nelinearnog sistema



Slika 7 Grafik linearnog sistema

Regulator po stanjima

Linearizovan sistem iz prethodnog dela projekta:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{k_2 k_5}{k_2 k_3 - k_1 k_4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{k_1 k_5}{k_1 k_4 - k_2 k_3} & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{-k_2 K - k_4}{k_2 k_3 - k_1 k_4} \\ 0 \\ \frac{-k_1 K - k_3}{k_1 k_4 - k_2 k_3} \end{bmatrix} T$$

Radi jednostavnijeg i preglednijeg zapisa, uvode se konstante:

$$p_1 = \frac{-k_2 K - k_4}{k_2 k_3 - k_1 k_4}, p_2 = \frac{-k_1 K - k_3}{k_1 k_4 - k_2 k_3}, p_3 = \frac{k_2 k_5}{k_2 k_3 - k_1 k_4}, p_4 = \frac{k_1 k_5}{k_1 k_4 - k_2 k_3}.$$

Sistem dobija oblik:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & p_4 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ p_1 \\ 0 \\ p_2 \end{bmatrix} T$$

Sistem poseduje četiri promenljive stanja. Shodno tome, uz signal reference, uvode se i četiri podesiva parametra a_1, a_2, a_3, a_4 .

$$T = -a_1 x_1 - a_2 x_2 - a_3 x_3 - a_4 x_4 + k_r r$$

Pošto Segway treba da stoji uspravno, signal reference treba da bude jednak nuli.

$$T = -a_1 x_1 - a_2 x_2 - a_3 x_3 - a_4 x_4$$

Zapis prethodne formule u vektorskom obliku.

$$T = -ax$$

Uvrštavanje prethodnog izraza u linearizovan model.

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & p_4 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ p_1 \\ 0 \\ p_2 \end{bmatrix} T = Ax + BT = Ax + B(-ax) = (A - Ba)x$$

Stvarni karakteristični polinom se izjednačava sa željenim koji je četvrtog stepena zbog četiri nepoznata parametra. Za željeni polinom je uzet onaj koji daje četvorostruki pol u tački $(-1, 0)$.

$$f(s) = \det(sI - (A - Ba)) = f_{\text{željeno}}(s) = (s + \lambda)^4 = (s + 1)^4$$

U nastavku je prikazan postupak računanja izraza $f(s)$ analitički.

$$a = [a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4]$$

$$Ba = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_1 p_1 & a_2 p_1 & a_3 p_1 & a_4 p_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_1 p_2 & a_2 p_2 & a_3 p_2 & a_4 p_2 \end{bmatrix}$$

$$A - Ba = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -a_1 p_1 & -a_2 p_1 & p_3 - a_3 p_1 & -a_4 p_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -a_1 p_2 & -a_2 p_2 & p_4 - a_3 p_2 & -a_4 p_2 \end{bmatrix}$$

$$sI - (A - Ba) = \begin{bmatrix} s & -1 & 0 & 0 \\ a_1 p_1 & s + a_2 p_1 & -p_3 + a_3 p_1 & a_4 p_1 \\ 0 & 0 & s & -1 \\ a_1 p_2 & a_2 p_2 & -p_4 + a_3 p_2 & s + a_4 p_2 \end{bmatrix}$$

Prethodna matrica je razvijena po prvoj vrsti i dobijen je sledeći izraz:

$$\det(sI - (A - Ba)) = s \begin{vmatrix} s + a_2 p_1 & -p_3 + a_3 p_1 & a_4 p_1 \\ 0 & s & -1 \\ a_2 p_2 & -p_4 + a_3 p_2 & s + a_4 p_2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_1 p_1 & -p_3 + a_3 p_1 & a_4 p_1 \\ 0 & s & -1 \\ a_1 p_2 & -p_4 + a_3 p_2 & s + a_4 p_2 \end{vmatrix}$$

$$f(s) = s^4 + s^3(a_4 p_2 + a_2 p_1) + s^2(-p_4 + a_3 p_2 + a_1 p_1) + s(-a_2 p_1 p_4 + a_2 p_2 p_3) + (-a_1 p_1 p_4 + a_1 p_2 p_3)$$

$$f_{\text{željeno}}(s) = s^4 + 4s^3 + 6 + 4s + 1$$

Izjednačavanje odgovarajućih koeficijenata.

$$a_4 p_2 + a_2 p_1 = 4$$

$$-a_2 p_1 p_4 + a_2 p_2 p_3 = 4$$

$$-p_4 + a_3 p_2 + a_1 p_1 = 6$$

$$-a_1 p_1 p_4 + a_1 p_2 p_3 = 1$$

Rešavanjem sistema jednačina dobijene su vrednosti parametara.

$$a_1 = -115,4$$

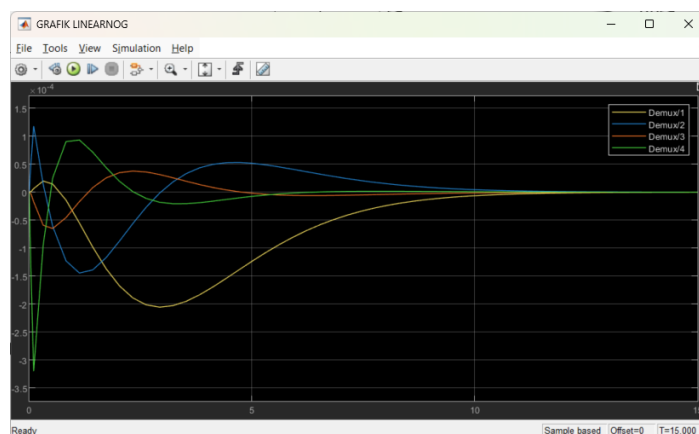
$$a_3 = -3283,6$$

$$a_2 = -461,5$$

$$a_4 = -1192,9$$

Simulacija

Rezultati simulacije u okruženju Matlab. U malom intervalu vremena na početku simulacije dodata je pobuda koja oponaša korisnika koji izvede Segway iz ose ravnoteže. Kao rezultat, sa protokom vremena vozilo uspostavlja balans što je prikazano na slici *Slika 8*.



Slika 8 Grafik sistema posle uvođenja regulatora

Bibliografija

[1] How Stuff Works, „How Segways Work“, [Na mreži]. Available:
<https://science.howstuffworks.com/transport/engines-equipment/ginger.htm>

[2] Progressive, „What is a Segway? “, [Na mreži]. Available:
<https://www.progressive.com/answers/what-is-a-segway/>

[3] How It Happened, „What Happened To Segway?“, 2020. [Na mreži]. Available:
https://www.youtube.com/watch?v=QNdZV_NSMVc

[4] Segway, Technology. [Na mreži]. Available:
https://www.segway.ch/en/infos/technologie.php#anchor_e8fa9ae3_Control-Units--CU-