

ANALIZA STABILNOSTI UPRAVLJANJA AUTOBUSA SA POGONOM NA PRIRODNI GAS

Ivan Ivković, dipl. inž.
Saobraćajni fakultet Beograd

Dragan Sekulić, dipl. inž.
Saobraćajni fakultet Beograd

Prof. dr Srećko Žeželj, dipl. inž.
Saobraćajni fakultet Beograd

Upotreba prirodnog gasa kao pogonskog goriva autobusa uslovljava pored primene pogonskog agregata prilagođenog korišćenju prirodnog gasa i primenu odgovarajuće gasne instalacije. U prvom delu rada dat je prikaz gasne opreme sa osnovnim elementima koji je čine. Najveća pažnja posvećena je rezervoarima za smestaj gasa kao glavnim nosiocima dodatne mase usled korišćenja ovog energenta za pogon autobusa, položaj istih u sklopu autobusa, i njihov uticaj na konstrukcione karakteristike vozila.

Drugi deo rada obuhvata formiranje i analizu diferencijalnih jednačina koje opisuju kretanje autobusa na gas sa svojim konstrukcionim specifičnostima prema definisanom modelu za slučajevne kretanja vozila po pravcu i u krivini konstantnom brzinom.

Ključne reči: autobus, stabilnost, upravljanje

UVOD

Stabilnost motornog vozila u opstem slučaju podrazumeva njegovu sposobnost da se kreće po željenoj trajektoriji u različitim uslovima eksploatacije bez proklizavanja (zanošenja) jednog ili više točkova bilo kog mosta (pogonskog ili nepogonskog) i bez prevrtanja oko uzdužne ili poprečne ose vozila /3/, /5/.

Kao poseban vid stabilnosti prilikom kretanja vozila, a koji je obuhvaćen prethodnom definicijom izdvaja se stabilnost upravljanja /9/. Specifičnost ovog pojma je ta što pored uticaja konstrukcionih karakteristika na "stabilno kretanje" vozila, uzima u obzir i kinematiku sistema za upravljanje.

Za vozilo se smatra da ima stabilno upravljanje ako se pod dejstvom spoljnih poremećajnih sila početne amplitude oscilovanja oko željenog kursa kretanja smanjuju u što kraćem vremenskom periodu, vraćajući vozilo u prvobitni način kretanja. U ovom slučaju za zadate uslove kretanja "poremećeno kretanje" se u toku vremena malo razlikuje od neporemećenog kretanja.

U slučaju nestabilnog upravljanja početne amplitude oscilovanja se tokom vremena povećavaju, vozilo odstupa od željene putanje što ima za posledicu da vozač nije u stanju da održi kretanje po željenoj trajektoriji ili to čini sa velikim naporom. Analogno prethodnom, poremećeno kretanje se u toku vremena razlikuje sve više od neporemećenog kretanja.

Pod poremećajem se podrazumevaju posledice nastale usled:

- različitih pojava na putu (neravnine, poprečni i podužni nagib,...);
- interakcije vozila i puta po kome se vozilo kreće (tangetne i bočne reakcije,...);
- inercionih i aerodinamičkih uticaja (centrifugalna sila, udar vetra,).

U matematičkoj formi navedena problematika se najbolje opisuje pomoću definicije Ljapunova. Formulacija se zasniva na pretpostavci da je u određenom trenutku vozilo pod dejstvom poremećajnih sila narušena ravnoteža parametara koji opisuju kretanje vozila po željenoj trajektoriji tj.:

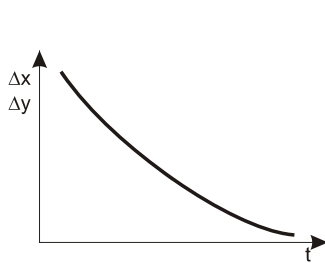
$$X(t_0) = X_0 + \Delta X$$

$$Y(t_0) = Y_0 + \Delta Y$$

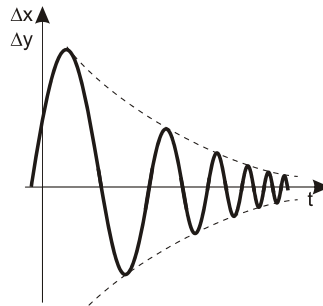
gde su:

- ΔX i ΔY vrednosti priraštaja parametara u trenutku t_0 izazvanih poremećajnim silama

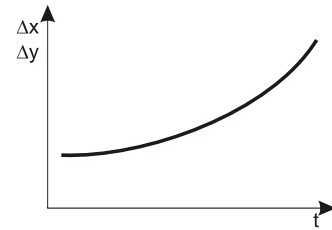
Kretanje vozila biće stabilno ukoliko parametri kretanja ($Y(t_0)$ i $X(t_0)$) posle malog njihovog odstupanja ostanu bliski prethodnim veličinama (Y_0) i ostanu takvi u daljem vremenskom toku (Δt_{\min} za $\Delta X \rightarrow 0$). Grafička interpretacija prikazana je na slikama 1 i 2 /7/.



Slika 1: Stabilno kretanje

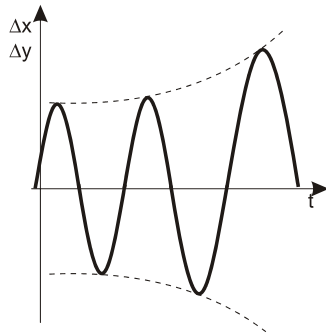


Slika 2: Stabilno kretanje

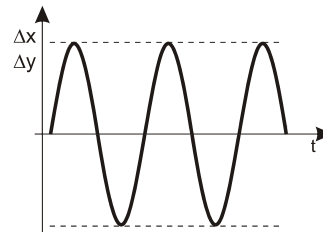


Slika 3: Nestabilno kretanje

Kada je kretanje nestabilno parametri koji ga opisuju posle malog odstupanja nisu bliski početnim vrednostima zbog povećanja priraštaja (ΔX i ΔY) tokom vremena (slike 3 i 4). U slučaju da se vrednosti priraštaja ponašaju tokom vremena prema slici 5, kretanje se nalazi na granici stabilnosti i nestabilnosti (labilna ravnoteža) i ukoliko ne dođe do prigušivanja kretanje se smatra nestabilnim.



Slika 4: Nestabilno kretanje



Slika 5: Labilna ravnoteža

Na osnovu prethodnog u radu je izvršena uporedna analiza stabilnosti upravljanja autobusa na gas i autobusa sa pogonom na konvencionalno dizel gorivo. Cilj rada je da se utvrdi u kojoj meri gasna oprema usled pojave dodatne mase utiče na ponašanje vozila pri kretanju po pravcu, i u krivini konstantnom brzinom.

STRUKTURA AUTOBUSA SA POGONOM NA PRIRODNI GAS

Upotreba prirodnog gasa kao pogonskog goriva autobusa uslovljava pored primene pogonskog agregata prilagođenog korišćenju prirodnog gasa i primenu odgovarajuće gasne instalacije. Broj elemenata gasne instalacije i njihova funkcionalna svojstva zavise u najvećoj meri od konceptijsko konstrukcijskog rešenja motora i

načina skladištenja gasa u sklopu autobusa /11/.

U opštem slučaju, bez obzira na vrstu pogonskog agregata gasna instalacija se sastoji i uvek obuhvata sledeće elemente: ulivni sistem, gasovode, zaporne ventile, elektromagnetne ventile, regulatore pritiska, dozator, mešač, kontrolnu i mernu opremu, posebne elemente koji zavise od tipa motora i vozila, rezervoar ili bateriju rezervoara. Od svih navedenih elemenata najveći uticaj na dinamičko ponašanje autobusa prilikom kretanja imaju rezervoari za smeštaj gasa, pa se na osnovu toga svaka dalja analiza stabilnosti upravljanja vrši preko sagledavanje uticaja dodatne mase koja potiče upravo od ovih elemenata gasne instalacije.

REZERVOARI ZA PRIRODNI GAS

Prirodni gas predstavlja mešavinu ugljovodonika alkalnog reda, ugljendioksida, sumporvodonika i merkaptana. Osnovna komponenta je metan čiji se molarni udeo kreće u granicama od 80 do 99%. Donja toplotna moć prirodnog gasa kreće se u granicama od 31-34MJ/m³ pri pritisku od 1 bara i temperaturi od 0°C što u poređenju sa klasičnim dizel gorivom od 34-35GJ/m³ govori da se radi o energentu sa veoma malom zapreminskom koncentracijom. Navedene činjenice ukazuju na najveći nedostatak gasa kao pogonskog goriva motra SUS, tj. na moguće teškoće oko skladištenja prirodnog gasa.

Povećanje zapreminske koncentracije uz bezbednosne uslove je osnovni zadatak koji je potrebno ispuniti pri skladištenju prirodnog gasa i može se ostvariti na tri načina (jedan osnovni i dva alternativna):

- smeštanje prirodnog gasa u sabijenom-komprimovanom stanju pod visokim pritiskom (Compressed Natural Gas, CNG (osnovni koncept));
- smeštanje prirodnog gasa u tečnom stanju (Liquefied Natural Gas, LNG (alternativni koncept));
- smeštanje prirodnog gasa u rezervoarima niskog pritiska u "apsorbovanom obliku" pomoću apsorbenata (Absorbed Natural Gas, ANG (alternativni koncept)).

U svetskim razmerama odnos primene CNG rezervoara prema primeni ostalih alternativnih koncepata daleko ide u korist CNG rezervoara (u svetu preko 85% autobusa sa pogonom na prirodni gas koristi CNG rezervoare; izvor: EPA) pa se usled toga sve dalje analize vrše sa aspekta primene prirodnog gasa u komprimovanom stanju za pogon autobusa.

Osnovne prednosti korišćenja rezervoara za komprimovani prirodni gas su:

- jednostavniji i relativno jeftiniji sistem punjenja rezervoara na pumpnim stanicama;
- jednostavnija konstrukcija rezervoara;
- manji uticaj variranja kvaliteta gasa na sastav smeše koja se dozira motoru;
- ne postoji problem hladnog starta;
- jednostavnija instalacija na motoru (npr. ne postaoji isparivač);
- manja cena pratećih uređaja u odnosu na druge načina skladištenja gasa;

- manja stručnost osoblja pri rukovanju i distribuciji;
- tehnologije neophodne za manipulaciju su već na raspolaganju;
- znatno veći stepen komercijalizacije u odnosu na druga rešenja.

REZERVOARI ZA KOMPRIMOVANI PRIRODNI GAS

Rezervoari za komprimovani prirodni gas izrađuju se u obliku cilindričnih boca od visokokvalitetnog čelika standardnih dimenzija u koje je smešten sabijeni prirodni gas pod pritiskom od 200 bara. Boce visokog pritiska se ugrađuju u autobuse u sklopu baterije. Jedna baterija najčešće obuhvata 10 boca. Raspoloživi rezervoarski prostor određuje se u zavisnosti od željene autonomije kretanja, odnosno dužine puta koje vozilo može da pređe sa jednim punjenjem rezervoara. Polazeći od pretpostavke da autobus sa pogonom na komprimovani prirodni gas treba da ima autonomnost kao autobus koji koristi dizel gorivo potrebna zapremina rezervoara se za gas sabijenog na 200 bara određuje na osnovu donje toplotne moći oba goriva:

Donja toplotna moć jednog litra dizel goriva iznosi:

$$Q_D = 850 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 42,5 \left[\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right] = 36125 \left[\frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} \right] = 36,125 \left[\frac{\text{MJ}}{\text{l}} \right]$$

Zapremina koju zauzima prirodni gas sabijen na 200 bara a ima istu toplotnu moć kao jedan litar dizel goriva računa se prema relaciji:

$$V_{\text{CNG}} = \frac{Q_D \cdot K_{\eta} \cdot 1000}{Q_{\text{NG}} \cdot \varepsilon} = \frac{36,125 \cdot 1,2 \cdot 1000}{32 \cdot 264} = 5,13 [\text{l}]$$

gde su: K_{η} odnos između stepena korisnosti dizel motora pri radu sa dizel gorivom; $\eta_d=0,413$ i stepena korisnosti pri radu sa prirodnim gasom $\eta_{\text{NG}}=0,343$; Q_{NG} zapreminska toplotna moć prirodnog gasa; ε stepen sabijanja prirodnog gasa pri temperaturi od 273K i pritisku od 200 bara.

Iz ovoga proizilazi da bi jedan litar dizel goriva trebalo da se zameni sa oko 5 litara sabijenog prirodnog gasa (na pritisku od 200 bara i temperaturi od 0°C) kako bi se zadržao približno isti akcioni radijus vozila. U slučaju gradskog autobusa sa rezervoarom za dizel gorivo kapaciteta 200 litara, isti je potrebno zameniti sa 1000 litara ukoliko autobus koristi komprimovani prirodni gas kao pogonsko gorivo

da bi autonomnost u oba slučaja bila približno ista.

Pri tome, količina gasa smeštena u rezervoarima ukupne zapremine od 1000 litara pri normalnim uslovima iznosi:

$$V_{NG} = \frac{V_r \cdot P_{max} \cdot T_o}{P_o \cdot (T_o + \Delta T) \cdot 1000} = \frac{1000 \cdot 200 \cdot 273,15}{1,013 \cdot (273,15 + 20) \cdot 1000} = 183,96 [m^3]$$

gde su: V_r ukupna zapremina baterije sa bocama; P_{max} pritisak gasa u rezervoarima kada su potpuno puni (maksimalni radni pritisak u rezervoaru); P_o , T_o , ΔT atmosferski pritisak $P_o = 1,013$ bara; $T_o = 0^\circ C = 273,15 K$; $\Delta T = 20 K$;

Kako je radni pritisak u ostatku instalacije 10 bara raspoloživa količina (zapremina) gasa za sagorevanje je umanjena za 5%, tj kada su rezervoari "prazni" u njima uvek ostaje određena mala količina gasa pri pritisku od 10 bara.

Masa u rezervoarima koja potiče od prirodnog gasa iznosi:

$$m_{CNG} = \rho_o \cdot \frac{P + P_o}{P_o} \cdot \frac{T_o}{T_o + \Delta T} \cdot \frac{V_r}{1000} = 0,8 \cdot \frac{200 + 1,013}{1,013} \cdot \frac{273,15}{273,15 + 20} \cdot \frac{1000}{1000} = 147,91 [kg]$$

gde je: ρ_o gustina prirodnog gasa pri normalnim uslovima;

Pored zapremine rezervoara koji može da primi sabijeni gas, veoma važna karakteristika pored kvaliteta izrade i atestiranih varova je odnos mase rezervoara prema korisnoj zapremini ili specifična masa rezervoara (M/V [kg/dm^3]). Prema ovom faktoru uočavaju se sledeće grupe:

- $M/V > 1,2 kg/m^3$, klasični čelični rezervoari (teški rezervoari);
- $0,5 < M/V < 0,75 kg/m^3$, rezervoari od legiranog čelika u kombinaciji sa stakloplastikom (laki rezervoari);
- $M/V < 0,4 kg/m^3$ rezervoari od kompozitnih materijala (ultra laki rezervoari).

Rezervoari za komprimovani prirodni gas se mogu puniti na dva načina: prvi su tzv. "fast-fill" sistemi za brzo punjenje, a drugi su tzv. "slow-fill" sistemi za spore punjenje. Glavna komponenta i jednog i drugog sistema je višestupni kompresor koji omogućuje sabijanje gasa do preko 300 bara, iako je radni pritisak 200 bara ali sa tendencijom povećanja pritiska u cilju proširenja radijusa kretanja. Sistemi

"brzog punjenja" su namenjeni uglavnom za pojedinačno snabdevanje autobusa gasom u kratkom vremenskom periodu i ono iznosi oko 10 min. "Slow-fill" sistemi istovremeno vrše snabdevanje za više vozila i pre svega su namenjeni za "grupni" transport, odnosno za transportna preduzeća, kod kojih se vozila noću pune na parkingu za dnevni rad.

SMEŠTAJ REZERVOARA U SKLOPU AUTOBUSA

Rezervoari za komprimovani prirodni gas se mogu smestiti na dva mesta u sklopu autobusa: na krovu ili neposredno ispod poda. Položaj zavisi od tipa autobusa tj. od njegovih odgovarajućih konstrukcionih i funkcionalnih osobina. Osnovni faktori (uz bezbednosne zahteve) koji utiču na lociranje rezervoara su: položaj pogonskog agregata i sistema za prenos snage; visina poda i ukupna visina autobusa; postojanje i veličina prtljažnog prostora.

U slučaju gradskih autobusa CNG rezervoari se mogu smestiti ispod poda ako šasija nije niskopodna i ako se motor nalazi pozadi u zadnjem prepustu. Kod gradskih niskopodnih autobusa s obzirom na visinu platforme (320-400 mm) jedino mesto za smeštaj je ojačani krov autobusa.

Prigradski i međugradski autobusi po visini platforme (>950 mm) ispunjavaju zahteve vezane za smeštaj rezervoara ispod poda ukoliko se motor nalazi pozadi. Problem kod međugradskih autobusa u ovom slučaju uzrokovan je postojanjem potrebnog prtljažnog prostora tako da se kod ovih autobusa gas smešta isključivo na krov.

Turistički autobusi poseduju rezervoare za dizel gorivo veličine od 500 do 600 litara što im u zavisnosti od uslova eksploatacije i načina vožnje omogućava autonomiju od oko 1000 kilometara. U slučaju pogona na prirodni gas (u komprimovanom stanju) za isti radijus kretanja neophodno je obezbediti veću količinu goriva u odnosu na gradske, prigradske i međugradске autobuse. U opštem slučaju problem je moguće rešiti: primenom rezervoara u kojima je gas sabijen pod pritiskom većim od 200 bara, primenom rezervoara većih prečnika (>250 mm), primenom standardnih rezervoara manjeg prečnika (250 mm) ali u većem broju. Kako se rezervoari visokog pritiska iznad 200 bara ne koriste i uz ograničenje ukupne maksimalno dozvoljene visine autobusa od 4 metara, kao jedino moguće rešenje se nameće smeštanje

većeg broja rezervoara pod pritiskom od 200 bara na krovu autobusa i ispod poda. Pri tome smanjeni prtljažni prostor je neophodno proširiti vezivanjem pomoćne kasete na zadnju stranicu autobusa ili opciono uz prisustvo prikolice vučene od strane autobusa. Evidentne teškoće oko primene CNG-a kod turističkih autobusa predstavljaju jednu vrstu razloga i njegove male upotrebe kao pogonskog goriva ovog tipa autobusa.

U bilo kojoj varijanti ako se smeštaj vrši ispod poda autobusa, obezbeđuje se odgovarajuće provetranje prostora u kome se nalaze rezervoari. Ovakav smeštaj, kod savremenih konstrukcija autobusa se izbegava i najčešće se upotrebljava sa idejom dodatnog povećanja rezervoarskog prostora kako bi se povećala autonomija vozila.

U praksi u najvećem broju slučajeva rezervoari se smeštaju na krov autobusa, i to u posebno ojačane oslonce sa gumenim podmetačima, za koje se pritežu metalnim trakama i pokrivaju ukrasno-zaštitnim poklopcem.

Za ostala dva alternativna koncepta smeštaja gasa važe ista pravila kao i u slučaju komprimovanog prirodnog gasa.

Ostalu gasnu opremu (regulator, dozator, elektromagnetni ventili, cevovodi itd.) relativno je lako smestiti u vozilo jer je malih dimenzija i male sopstvene mase, a pored toga postoje namenski kompleti koji su prilagođeni ugradnji za dati tip autobusa. Jedino treba da se vodi računa da oprema bude smeštena na najbezbednijim mestima u vozilu, a da sama gasna oprema bude lako dostupna za održavanje, pregled i opsluživanje, a da pri tome funkcionalno ne smeta postojećim delovima i agregatima na vozilu prilikom korišćenja ili održavanja. Ukoliko postoji opasnost da se neki delovi gasne instalacije oštete usled udesa, dejstva toplote, dejstva atmosferilija, mogućih oštećenja prilikom odgovarajućih postupaka održavanja ili opsluživanja, a nemoguće je da se smeste na neko drugo mesto u vozilu, potrebno je montirati odgovarajuće štitnike.

UTICAJ GASNE INSTALACIJE NA KONSTRUKCIONE KARAKTERISTIKE AUTOBUSA

Da bi se odredio uticaj gasne instalacije na konstrukcione karakteristike autobusa, pre svih na položaj težišta, vozilo se posmatra kao heterogeno telo sačinjeno od dve kruto povezane koncentrisane mase sa svojim

specifičnim karakteristikama. Prvu masu sačinjava model autobusa sa pogonom na konvencionalno dizel gorivo (u daljem tekstu konvencionalni autobus) dok drugu masu sačinjavaju čelični rezervoari¹ u kojima se nalazi gas pod pritiskom od 200 bara.

Usled stalne promene mase i rasporeda putnika u vozilu tokom rada neprestano se menjaju i dinamički osovinski pritisci i položaj težišta autobusa. Svaka analiza koja se sprovodi mora uzimati u obzir i ovu činjenicu.

Pored promene radnog opterećenja usled ulaska i izlaska putnika u i iz autobusa na konstrukcione karakteristike utiče i položaj rezervoara sa gasom. U okviru ovog rada razmatraće se granični uticaji (maksimalno mogući) dodatne mase, te se smatra da se rezervoari smeštaju samo na krovu vozila ali ne i ispod poda između prednje i zadnje osovine.

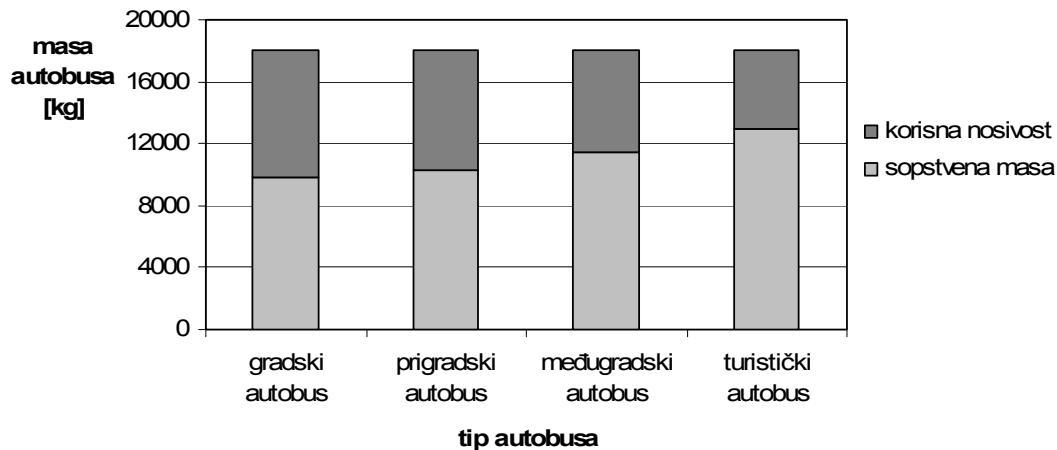
Koncepcija gradnje autobusa zavisi od više faktora: namene autobusa, dužine, ukupne visine, visine poda, tipa šasije, položaja motora itd. Prema nameni razlikuju se gradski, prigradski, međugradski, turistički i autobusi specijalne namene. Prema dužini postoje sledeće grupe: minibusevi (dužine do 6,6m, kapaciteta 16-38² mesta), midibusevi (6,5-10m, kapaciteta 45-65¹ mesta), veliki (standardni) autobusi (dužine 12m, kapaciteta 59-115), megabusevi (dužine 12-15m, kapaciteta 73-140 mesta), zglobni autobusi (dužine do 18m, kapaciteta do 180 putnika). U odnosu na visinu poda razlikuju se kod gradskih autobusa: visokopodni (700-950mm), srednjepodni (500-650mm), niskopodni (320-440mm); Visina autobusa ograničena je na maksimalnih 4 metra. Uobičajena visina gradskih i prigradskih autobusa je oko 3 m, dok kod turističkih ta visina iznosi za visokokrovne do 3,8 m /1/.

Predmet istraživanja u radu je dvoosovinski autobus standardne dužine od 12 m. U cilju kvantifikacije uticaja gasne opreme na konstrukciju autobusa, kao polazna osnova odabran je model IK 104 (konvencionalni autobus) čija je sopstvena masa $M_o=9850$ kg dok je masa maksimalno opterećenog vozila $M_p=18000$ kg, visina 3090 mm, visina podesta 900 mm, međuosovinsko rastojanje 5650 mm, ukupna dužina 11862 mm, prednji prepust 2820 mm, zadnji prepust 3392 mm.

¹ Masa ostale gasne opreme, ulivnog sistema, cevi, dozatora mešača itd. je neznatna u odnosu na masu rezervoara pa se njen uticaj na KK-e autobusa zanemaruje

² Kapacitet pored dužine zavisi i od namene autobusa

Rasponom mase od M_o do M_p obuhvaćene su sve kategorije vozila (slika 6) iz podele prema nameni (zbog specifičnosti gradnje ne razmatraju se "specijalni autobusi").



Slika 6: Odnos korisne nosivosti i sopstvene mase različitih kategorija autobusa

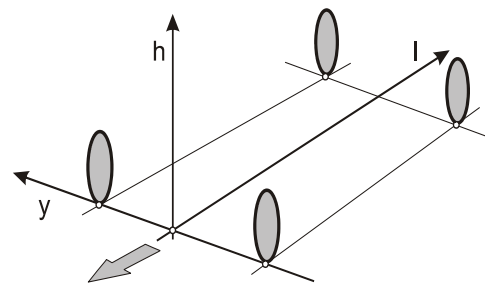
Visina težišta h_t i odnos l_p/l kreću se (sumarno za gradske, prigradske, međugradске i turističke autobuse) u granicama od 0,7m do 1,25m i od 0,4 do 0,8 respektivno.

Navedene vrednosti za M_o i M_p uz varijacije veličine h_t i l_p/l opisuju celokupan raspon uslova eksploatacije prema svim tipovima autobusa. Primera radi, ukoliko je $M_o=10000\text{kg}$, $h_t=0,75$, $l_p/l=0,53\text{m}$, navedeni podaci opisuju kretanje praznog niskopodnog autobusa; ukoliko je $M_o=18000\text{kg}$, $h_t=1,0$, $l_p/l=0,60\text{m}$, navedeni podaci opisuju kretanje maksimalno opterećenog međugradskog autobusa. Promena broja putnika u autobusu izaziva promenu ukupne mase i dinamičkih pritisaka, ali nikako ne može da uzrokuje vrednosti veličina h_t i l_p/l van granica 0,7m do 1,25m i od 0,4 do 0,8 respektivno.

U cilju maksimizacije uticaja gasne opreme na različite konstrukcije autobusa i njegovo ponašanje pri različitim uslovima kretanja analiza se sprovodi u odnosu na primenu klasičnih čeličnih rezervoara u kojima je prirodni gas pod pritiskom od 200 bara. Odnos ukupne mase prema korisnoj zapremini iznosi $1,24\text{kg/dm}^3$, tj. masa jedne boce od 50 litara i prečnika od 250mm bez gasnog punjenja je 62,1kg. Akcioni radijus od najmanje 350km (sa jednim punjenjem do pritiska od 200 bara) zahteva 1000 litara ukupne zapremine rezervoara. Dvadeset boca smešteno je u jednu bateriju ukupne dužine 7,5m na krovu autobusa. Masa prirodnog gasa u 1000 litara korisnog prostora, pri pritisku od 200 bara iznosi 160kg, tako da je ukupna masa jedne baterije od 20 boca sa uležištenjem, spojevima i sa 160kg gasa 1560kg. Napomena: Prirodni gas

se može smestiti i u pojedinačne boce većih prečnika od 250mm ali se to ne može značajno odraziti na visinu težišta autobusa sa pogonom na CNG uvažavajući činjenicu da se baterija smešta na krov vozila tj. na visinu od oko 3000mm.

Položaj težišta modela autobusa sa pogonom na prirodni gas (konvencionalni autobus+rezervoari za CNG) određuje se u odnosu na referentni koordinatni sistem (slika 7) sa sledećim osobinama /2/, /3/:



Slika 7: Referentni koordinatni sistem za određivanje položaja težišta

- koordinatni početak se nalazi na podlozi, u preseku ravni simetrije vozila i projekcije prednje osovine;
- l osa se nalazi u ravni simetrije vozila i usmerena je unazad;
- Y osa je paralelna sa pednjom osovinom i usmerena je udesno (gledano u pravcu kretanja vozila);
- h osa je vrtikalna i usmerena prema gore.

PROMENA VISINE TEŽIŠTA

Pri određivanju uticaja gasne instalacije na visinu težišta autobusa a na osnovu postupka prikazanog u prethodnoj tački, analiza se sprovodi za dva slučaja: za prazno (M_o) i za puno vozilo (M_p).

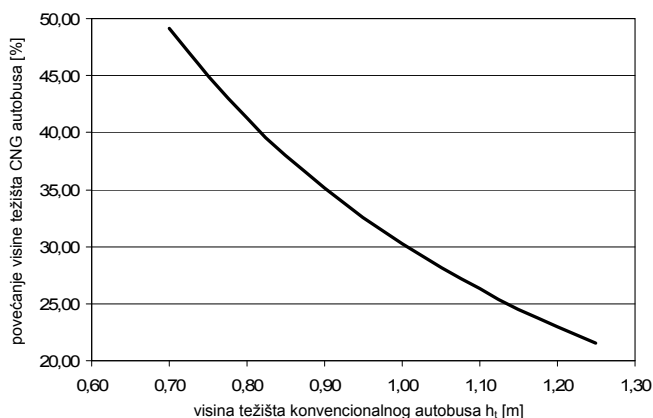
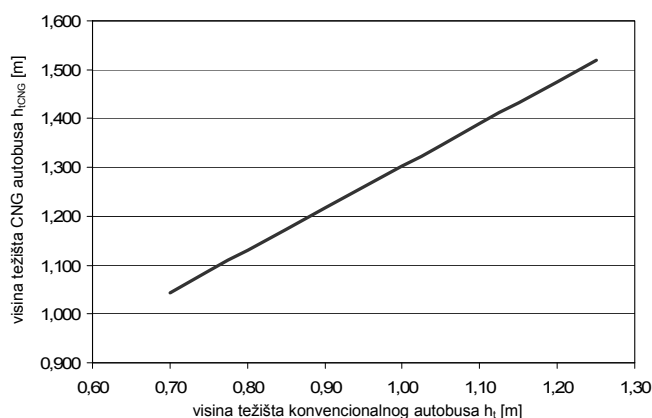
1. Prazno vozilo (M_o); Početni podaci:

$h_t=0,7m$; $M_o=9850kg$; $h_g=3,215m$; $M_g=1560kg$;
 $h_t=1,25m$; $M_o=9850kg$; $h_g=3,215m$; $M_g=1560kg$;

gde su: h_t , M_o , h_g , M_g , visina težišta konvencionalnog autobusa, masa konvencionalnog autobusa, visina težišta baterije sa bocama komprimovanog prirodnog gasa, masa baterije, respektivno

Visina težišta CNG autobusa računa se prema formuli:

$$h_t = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \cdot h_i}{G}, \quad \text{Na slici 8 prikazani su rezultati proračuna:}$$



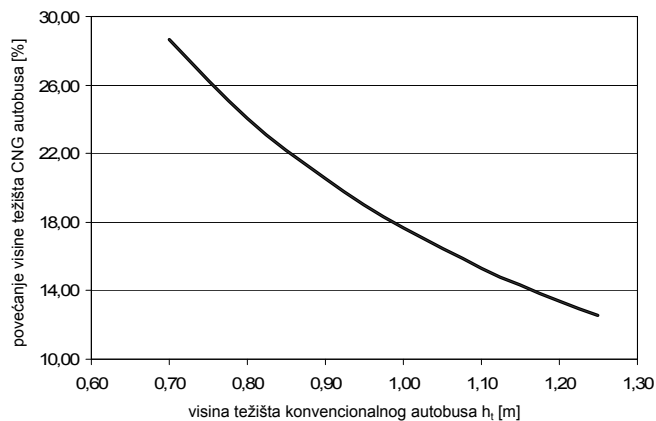
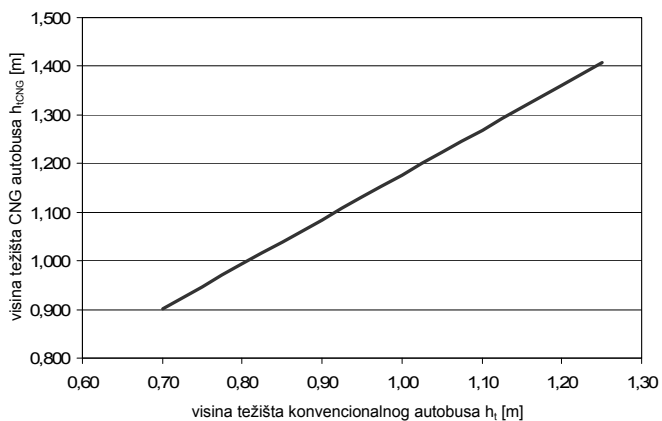
Slika 8: Odnos visine težišta konvencionalnog autobusa i CNG autobusa za $M=M_o$

2. Puno vozilo (M_p); Početni podaci:

$h_t=0,7m$; $M_p=18000kg$; $h_g=3,215m$; $M_g=1560kg$;
 $h_t=1,25m$; $M_p=18000kg$; $h_g=3,215m$; $M_g=1560kg$;

gde su: h_t , M_p , h_g , M_g , visina težišta konvencionalnog autobusa, masa punog konvencionalnog autobusa, visina težišta baterije sa bocama komprimovanog prirodnog gasa, masa baterije, respektivno.

Na slici 9 prikazani su rezultati proračuna:



Slika 9: Odnos visine težišta konvencionalnog autobusa i CNG autobusa za $M=M_p$

PROMENA ODNOSA l_p/L

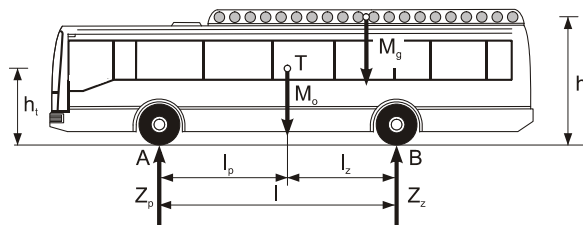
Pri proračunu položaja težišta u odnosu na prednju osovinu (osu I) uočavaju se četiri različita slučaja: baterija sa gasom nalazi se u zadnjem delu vozila, prazan autobus; baterija sa gasom se nalazi napred, pun autobus; baterija sa gasom se nalazi u zadnjem delu vozila, prazan autobus; baterija sa gasom se nalazi napred, pun autobus.

1. Prazan autobus (M_o), baterija sa CNG-om pozadi (slika 10); Početni podaci:

$l_p/l=0,4m$; $M_o=9850kg$; $h_g=3,215m$; $M_g=1560kg$;
 $l_p/l=0,8m$; $M_o=9850kg$; $h_g=3,215m$; $M_g=1560kg$;

gde su: l_p/l , M_p , h_g , M_o , odnos položaja težišta i međuosovinskog rastojanja konvencionalnog autobusa, masa praznog konvencionalnog

autobusa, visina težišta baterije sa bocama komprimovanog prirodnog gasa, masa baterije, respektivno.

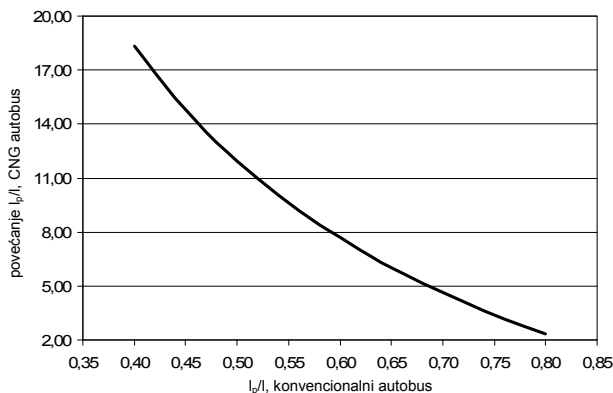
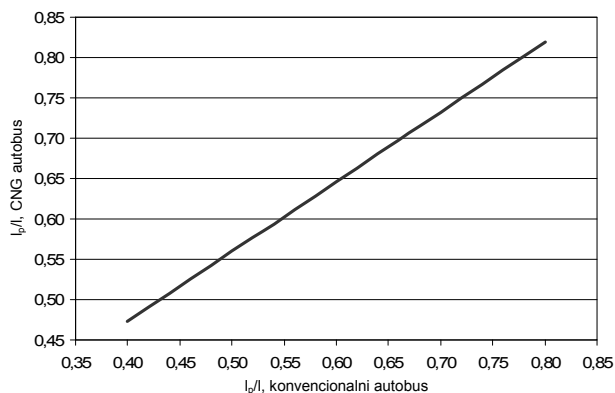


Slika 10: Položaj baterije sa CNG-om u zadnjem delu autobusa

Položaj težišta (l_p) CNG autobusa računa se prema formuli:

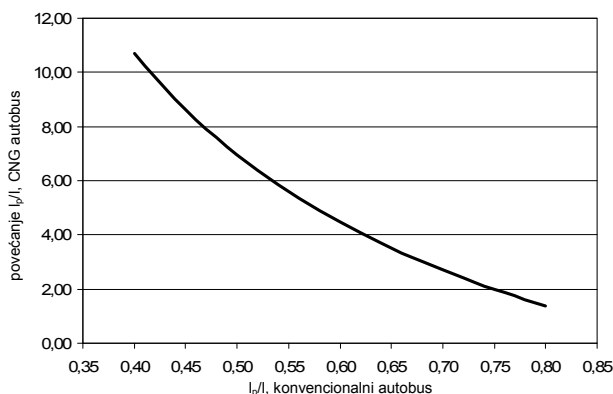
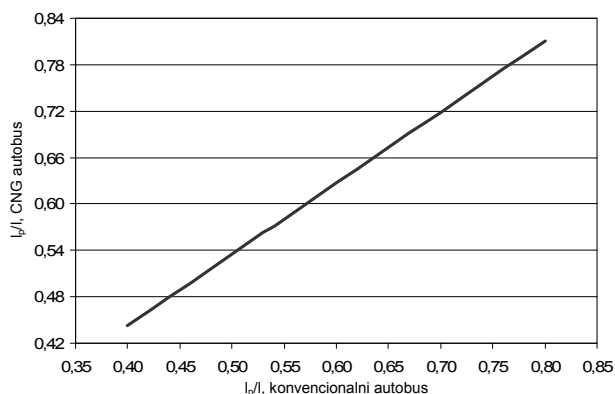
$$l_T = l_p = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \cdot l_i}{G}$$

Na slici 11 prikazani su rezultati proračuna:



Slika 11: Odnos veličine l_p/l konvencionalnog autobusa i CNG autobusa za $M=M_o$

Na slici 12 prikazani su rezultati proračuna:



Slika 12: Odnos veličine l_p/l konvencionalnog autobusa i CNG autobusa za $M=M_p$

2. Pun autobus (M_p), baterija sa CNG-om pozadi

Početni podaci:

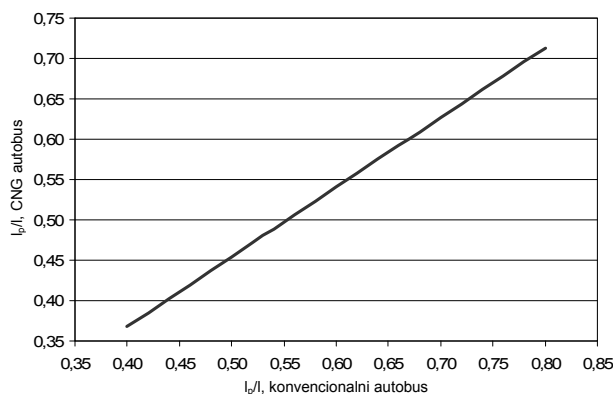
$l_p/l=0,4m$; $M_p=18000kg$; $h_g=3,215m$; $M_g=1560kg$;
 $l_p/l=0,8m$; $M_p=18000kg$; $h_g=3,215m$; $M_g=1560kg$;

gde su: l_p/l , M_p , h_g , M_g , odnos položaja težišta i međuosovinskog rastojanja konvencionalnog autobusa, masa maksimalno opterećenog konvencionalnog autobusa, visina težišta baterije sa bocama komprimovanog prirodnog gasa, masa baterije, respektivno.

3. Prazan autobus (M_o), baterija sa CNG-om napred

Početni podaci:

$l_p/l=0,4m$; $M_o=9850kg$; $h_g=3,215m$; $M_g=1560kg$;
 $l_p/l=0,8m$; $M_o=9850kg$; $h_g=3,215m$; $M_g=1560kg$;



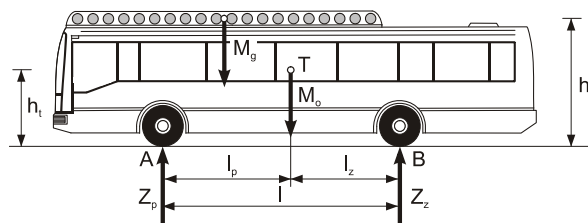
Slika 14: Odnos veličine l_p/l konvencionalnog autobusa i CNG autobusa za $M=M_o$

4. Pun autobus (M_p), baterija sa CNG-om napred (slika XX)

Početni podaci:

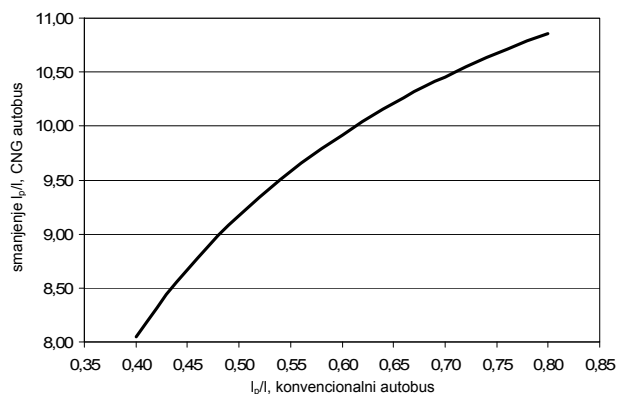
$l_p/l=0,4m$; $M_p=18000kg$; $h_g=3,215m$; $M_g=1560kg$;
 $l_p/l=0,8m$; $M_p=18000kg$; $h_g=3,215m$; $M_g=1560kg$;

gde su: l_p/l , M_o , h_g , M_g , odnos položaja težišta i međuosovinskog rastojanja konvencionalnog autobusa, masa praznog konvencionalnog autobusa, visina težišta baterije sa bocama komprimovanog prirodnog gasa, masa baterije, respektivno.



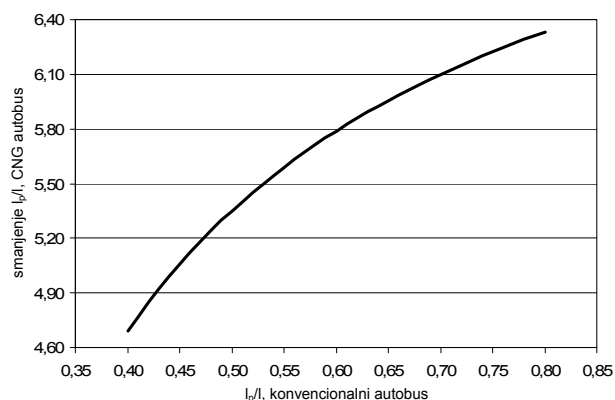
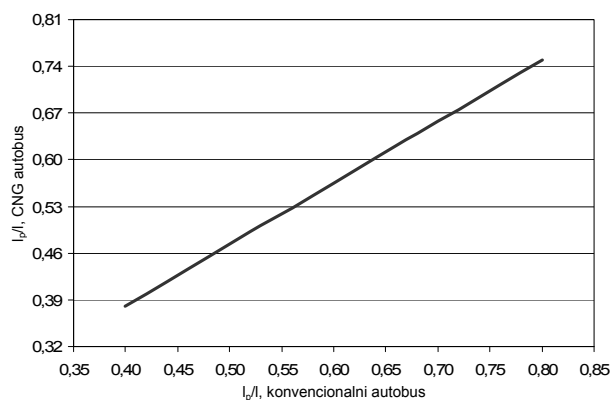
Slika 13: Položaj baterije sa CNG-om u zadnjem delu autobusa

Na slici 14 prikazani su rezultati proračuna:



gde su: l_p/l , M_p , h_g , M_g , odnos položaja težišta i međuosovinskog rastojanja konvencionalnog autobusa, masa maksimalno opterećenog konvencionalnog autobusa, visina težišta baterije sa bocama komprimovanog prirodnog gasa, masa baterije, respektivno.

Na slici 15 prikazani su rezultati proračuna:



Slika 15: Odnos veličine I_p/I konvencionalnog autobusa i CNG autobusa za $M=M_p$

STABILNOST UPRAVLJANJA PRI KRETANJU CNG AUTOBUSA PO PRAVCU I U KRIVINI

Pojam "stabilnost upravljanja vozila" definisan u uvodu rada a u odnosu na CNG autobus moguće je analizirati na osnovu metode Ljapunova. Prema metodu Ljapunova, kretanje materijalnog sistema biće stabilno ako se izvrši mali poremećaj osnovnog kretanja i ako je to poremećeno kretanje takvo da se malo razlikuje od osnovnog kretanja, bez obzira koliki je vremenski interval protekao od trenutka kada je poremećaj izvršen. Ako se vozilu koje se kreće na pravolinijskom i krivolinijskom delu puta konstantnom brzinom saopšti mali poremećaj reprezentovan kroz brzinu centra mase u bočnom pravcu V_{Tn} i početnu ugaonu brzinu $\dot{\Psi}$, i ako se vozilo i dalje bude kretalo pravolinijski ili krivolinijski a dobijeni poremećaj se pri tome prigušuje kretanje vozila biće stabilno. Ukoliko se poremećaj ne prigušuje kretanje je nestabilno³.

U ovom delu rada vrši se proučavanje stabilnosti upravljanja autobusa sa pogonom na komprimovani prirodni gas sa bočno elastičnim točkovima u odnosu na navedene karakteristične slučajeve kretanja uzimajući u obzir naravno specifičnost konstrukcije vozila usled korišćenja gasne instalacije.

DIFERENCIJALNE JEDNAČINE KRETANJA

Diferencijalne jednačine kretanja formiraju se prema modelu autobusa prikazanog na slici 16. Autobus se posmatra kao kruto telo koje vrši ravno kretanje.

³ Napomena: Na osnovu prethodnog, svakako da se ovde pod terminom stabilnosti upravljanja podrazumeva praktično bočna stabilnost CNG autobusa u datim uslovima kretanja: po pravcu i u krivini.

Na šemi modela bočne reakcije u kontaktnoj površini pneumatika i puta zamenjene su sa po jednom silom, koje deluju u centru prednje i zadnje osovine. Takođe za tangencijalne sile smatra se da deluju u centru mase vozila "T" u pravcu uzdužne ose vozila.

Takođe prema šemi modela, kretanje autobusa se prati u odnosu na nepokretni koordinatni sistem O $\xi\eta$. Kako se radi o ravnom kretanju, sam položaj vozila određen je sa dve koordinate ξ i η koje određuju položaj trenutnog pola i ugla obrtanja (Ψ) tela oko ose koja je upravna na ravan kolovoza a prolazi kroz pokretni (trenutni) pol.

Diferencijalne jednačine koje opisuju kretanje autobusa su:

$$\frac{dV_{Tn}}{dt} - \left(v + \frac{I_p \cdot K_{\dot{\varphi}} - I_z \cdot K_{\dot{\omega}}}{m \cdot V} \right) \cdot \omega + \left(\frac{K_{\dot{\varphi}} + K_{\dot{\omega}}}{m \cdot V} \right) \cdot V_{Tn} + \frac{K_{\dot{\varphi}} \cdot \theta}{m} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d\omega}{dt} + \left(\frac{I_p^2 \cdot K_{\dot{\varphi}} + I_z^2 \cdot K_{\dot{\omega}}}{I_i \cdot V} \right) \cdot \omega - \left(\frac{I_p \cdot K_{\dot{\varphi}} - I_z \cdot K_{\dot{\omega}}}{I_i \cdot V} \right) \cdot V_{Tn} - \frac{I_p \cdot K_{\dot{\varphi}} \cdot \theta}{I_i} = 0 \quad (2)$$

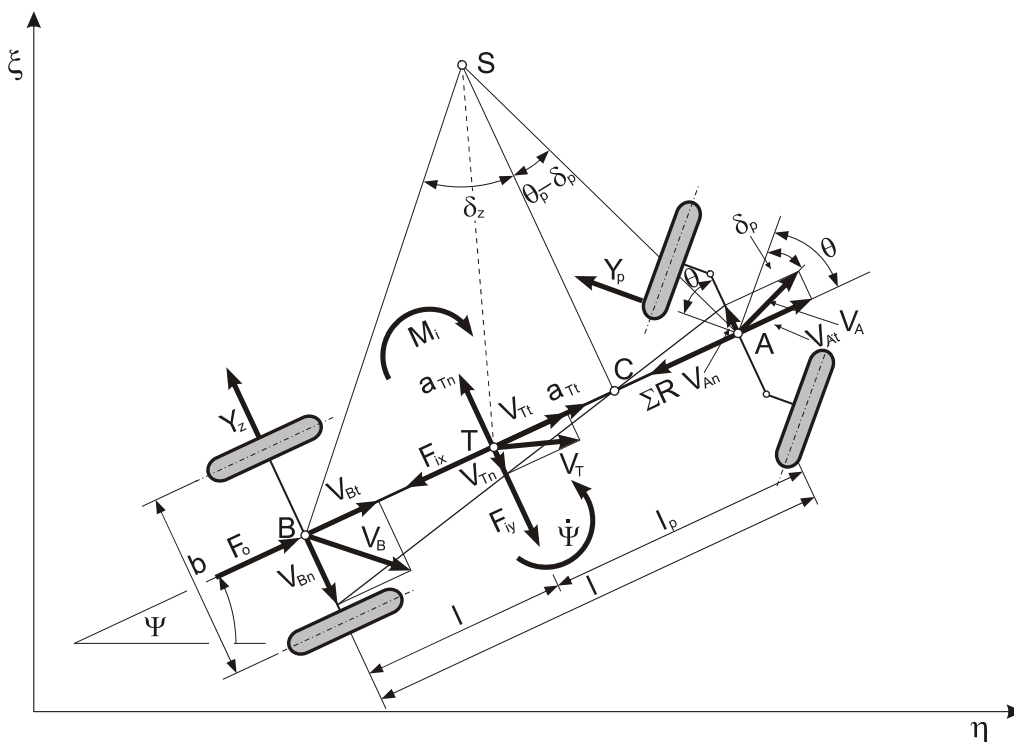
Uz $V \approx \text{const}$ u jednačinama (1) i (2) konstantni članovi su:

$$\frac{I_p^2 \cdot K_{\dot{\varphi}} + I_z^2 \cdot K_{\dot{\omega}}}{I_i \cdot V} = A, \quad \left(\frac{I_p \cdot K_{\dot{\varphi}} - I_z \cdot K_{\dot{\omega}}}{I_i \cdot V} \right) = B,$$

$$\left(v + \frac{I_p \cdot K_{\dot{\varphi}} - I_z \cdot K_{\dot{\omega}}}{m \cdot V} \right) = C, \quad \left(\frac{K_{\dot{\varphi}} + K_{\dot{\omega}}}{m \cdot V} \right) = D$$

$$\frac{I_p \cdot K_{\dot{\varphi}} \cdot \theta}{I_i} = \mu, \quad \frac{K_{\dot{\varphi}} \cdot \theta}{m} = n$$

pa će uz odgovarajuće diferenciranje po vremenu biti:



Slika 16: Kinematska šema modela CNG autobusa

$$\begin{aligned} \frac{d^2\omega}{dt^2} + A \cdot \frac{d\omega}{dt} - B \cdot \left[C \cdot \omega - n \cdot \theta - D \cdot \left(\frac{1}{B} \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{A}{B} \cdot \omega - \frac{\mu}{B \cdot \theta} \right) \right] \\ - \mu \cdot \frac{d\theta}{dt} = \frac{d^2\omega}{dt^2} + A \cdot \frac{d\omega}{dt} - B \cdot C \cdot \omega + B \cdot n \cdot \theta + \\ + D \cdot \frac{d\omega}{dt} + A \cdot D \cdot \omega - \mu \cdot D \cdot \theta - \mu \cdot \frac{d\theta}{dt} \end{aligned} \quad (3)$$

tj.:

$$\begin{aligned} \frac{d^2\omega}{dt^2} + (A+D) \cdot \frac{d\omega}{dt} + (A \cdot D - B \cdot C) \cdot \omega = \\ = (\mu \cdot D - n \cdot B) \cdot \theta + \mu \cdot \frac{d\theta}{dt} \end{aligned} \quad (4)$$

Analiza stabilnosti upravljanja podrazumeva ispitivanje korena homogenog dela diferencijalne jednačine (4).

Ako se pretpostavi da je rešenje jednačine u obliku: $\omega = e^{\lambda t}$; posle odgovarajućih zamena i diferenciranja sledi:

$$\lambda^2 + (A+D) \cdot \lambda + (A \cdot D - B \cdot C) = 0 \quad (5)$$

Rešenja jednačine su:

$$\lambda_{1,2} = -\frac{A+B}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{A+B}{2}\right)^2 - (A \cdot D - B \cdot C)} \quad (6)$$

Stabilnost kretanja uslovljena je oblikom rešenja λ . Ukoliko je λ konjugovano kompleksni broj sa negativnim realnim delom priraštaji ugaone brzine

($\Delta\omega$) i komponente brzine težišta autobusa (ΔV_{tn}) od trenutka t_0 (kada je prestalo dejstvo poremećajne sile) tokom vremena se menjaju prema slici 2 što odgovara stabilnom kretanju. U slučaju kada su koreni karakteristične jednačine realni i pozitivni (diskriminanta $D > 0$) ili konjugovano kompleksni sa pozitivnim realnim delom promena veličina $\Delta\omega$ (ΔV_{tn}) i ΔV_{tn} tokom vremena prikazana je na slikama 3 i 4 respektivno. Tada je kretanje nestabilno. Ako su koreni jednačine imaginarni promena parametara $\Delta\omega$ i ΔV_{tn} u funkciji vremena data je na slici 5, kretanje je na granici stabilnosti i nestabilnosti i ukoliko se početne oscilacije ne priguše kretanje se smatra nestabilnim. Na osnovu prethodnog sledi da je potreban i dovoljan uslov stabilnog upravljanja prilikom stacionarnog kretanja autobusa u odnosu na pravolinijski ili kružni put predstavljen nejednačinama:

$$A + D > 0 \quad A \cdot D - B \cdot C > 0$$

Zamenom vrednosti za konstante A, B, C, D, potreban i dovoljan uslov stabilnog kretanja dobija oblik:

$$A + D > 0 \Rightarrow \frac{I_p^2 \cdot K_{\delta p} + I_z^2 \cdot K_{\delta z}}{I_i \cdot V} + \left(\frac{K_{\delta p} + K_{\delta z}}{m \cdot V} \right) > 0 \quad (7)$$

Kako su vrednosti svih fizičkih veličina u izrazu (7) uvek veće od nule nejednakost je uvek zadovoljena.

$$A \cdot D - B \cdot C > 0 \Rightarrow \frac{l_p^2 \cdot K_{\delta p} + l_z^2 \cdot K_{\delta z}}{I_i \cdot V} \cdot \left(\frac{K_{\delta p} + K_{\delta z}}{m \cdot V} \right) - \left(\frac{l_p \cdot K_{\delta p} - l_z \cdot K_{\delta z}}{I_i \cdot V} \right) \cdot \left(v + \frac{l_p \cdot K_{\delta p} - l_z \cdot K_{\delta z}}{m \cdot V} \right) > 0 \quad (8)$$

$$\frac{l^2 \cdot K_{\delta p} \cdot K_{\delta z} - m \cdot V^2 \cdot (l_p \cdot K_{\delta p} - l_z \cdot K_{\delta z})}{I_i \cdot m \cdot V^2} > 0 \quad (9)$$

Uzimajući u obzir da su l_p , l_z , $K_{\delta p}$, $K_{\delta z}$, I_i , m , materijalne konstante (pojedine stalne tokom ukupnog vremena posmatranja, pojedine u trenutku t_0 kada je prestalo dejstvo poremećajne sile) rešenje nejednačine daje vrednost kritične brzine pri kojoj vozilo pod uticajem bilo kakve male bočne sile počinje kretanje po krivoj sa sve manjim poluprečnikom (po spirali), što dovodi do gubitka upravljivosti odnosno stabilnosti vozila⁴.

Prema izrazima (8) i (9) kriterijumi stabilnosti u analitičkoj formi mogu se napisati:

1. $l_p \cdot K_{\delta p} < l_z \cdot K_{\delta z}$ nejednakost (7) zadovoljena; **kretanje vozila je stabilno**
2. $l_p \cdot K_{\delta p} > l_z \cdot K_{\delta z}$ $V < V_{kr}$, **kretanje vozila je stabilno**
 $V > V_{kr}$, **kretanje vozila je nestabilno**
 $V > V_{kr}$, **stanje labilne ravnoteže**

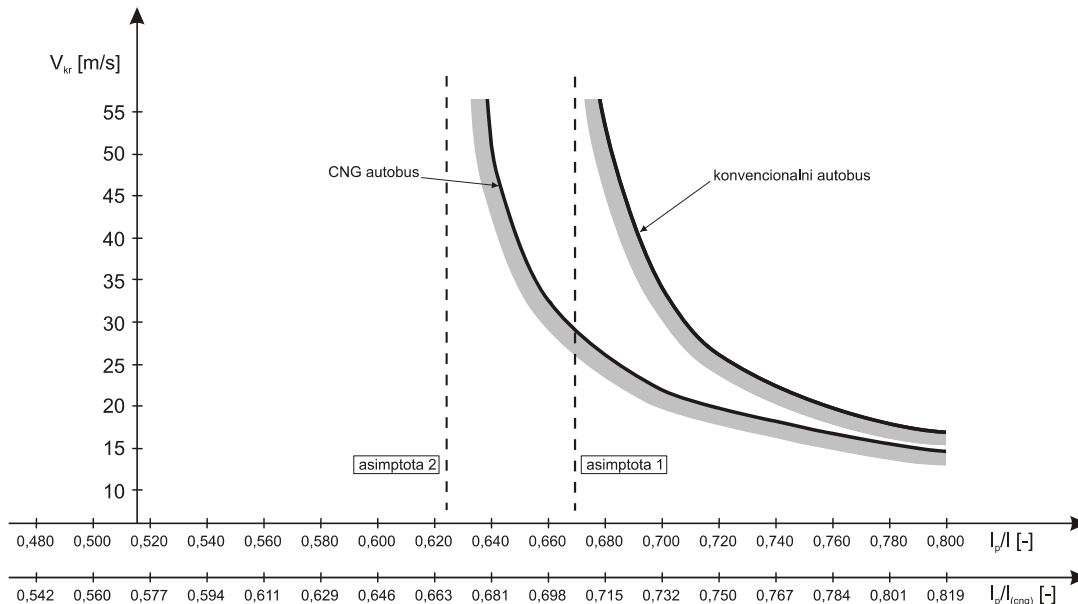
gde je:

$$V_{kr} = \sqrt{\frac{K_{\delta p} \cdot K_{\delta z} \cdot l^2 \cdot g}{G \cdot (l_p \cdot K_{\delta p} - l_z \cdot K_{\delta z})}}$$

PRORAČUN KRITIČNE BRZINE

Proračun kritične brzine za konvencionalni i CNG autobus sprovodi se za različite kategorije autobusa i različite uslove eksploatacije a koji su, kako je ranije navedeno, određeni karakterističnim veličinama položaja težišta h_t i l_p/l .

Detalji proračuna dati su u tabelama 1 i 2, na osnovu koje su formirani dijagrami zavisnosti kritične brzine stabilnog upravljanja od konstrukcionih parametara konvencionalnog i CNG autobusa (slika 17, slika 18, slika 19, slika 20).



Slika 17: Zavisnost kritične brzine stabilnog upravljanja od konstrukcionih karakteristika konvencionalnog i CNG autobusa, (prazno vozilo $M=M_0$, gas pozadi)

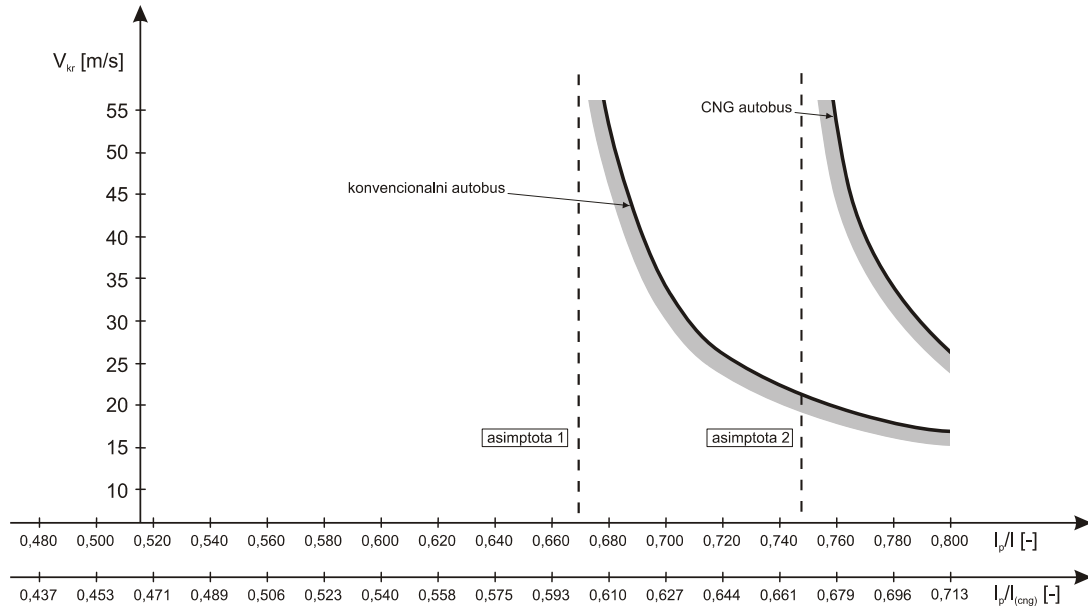
⁴ Nejednačina (9) opisuje uslove stabilnog stacionarnog kretanja autobusa na pravolinijskom i krivolinijskom kružnom putu.

| I_p/I | I_p/I_z | V_{kr} [m/s] | I_p/I_{novo} | I_p/I_z | V_{kr} [m/s] | I_p/I_{novo} | I_p/I_z | V_{kr} [m/s] |
|-------------------------------|-----------|-------------------|--------------------------------|-----------|-------------------|--------------------------------|-----------|-------------------|
| Konvencionalni autobus | | | CNG autobus, pozadi gas | | | CNG autobus, napred gas | | |
| 0,400 | 0,667 | n.d. | 0,473 | 0,899 | n.d. | 0,368 | 0,582 | n.d. |
| 0,420 | 0,724 | n.d. | 0,491 | 0,963 | n.d. | 0,385 | 0,626 | n.d. |
| 0,440 | 0,786 | n.d. | 0,508 | 1,032 | n.d. | 0,402 | 0,673 | n.d. |
| 0,460 | 0,852 | n.d. | 0,525 | 1,106 | n.d. | 0,420 | 0,723 | n.d. |
| 0,480 | 0,923 | n.d. | 0,542 | 1,185 | n.d. | 0,437 | 0,776 | n.d. |
| 0,500 | 1,000 | n.d. | 0,560 | 1,271 | n.d. | 0,454 | 0,832 | n.d. |
| 0,520 | 1,083 | n.d. | 0,577 | 1,364 | n.d. | 0,471 | 0,892 | n.d. |
| 0,540 | 1,174 | n.d. | 0,594 | 1,464 | n.d. | 0,489 | 0,956 | n.d. |
| 0,560 | 1,273 | n.d. | 0,611 | 1,574 | n.d. | 0,506 | 1,024 | n.d. |
| 0,580 | 1,381 | n.d. | 0,629 | 1,694 | n.d. | 0,523 | 1,097 | n.d. |
| 0,600 | 1,500 | n.d. | 0,646 | 1,825 | n.d. | 0,540 | 1,176 | n.d. |
| 0,620 | 1,632 | n.d. | 0,663 | 1,970 | n.d. | 0,558 | 1,261 | n.d. |
| 0,624 | 1,659 | n.d. | 0,667 | 2,000 | n.d. | 0,575 | 1,353 | n.d. |
| 0,640 | 1,778 | n.d. | 0,681 | 2,130 | 49,356 | 0,592 | 1,453 | n.d. |
| 0,660 | 1,941 | n.d. | 0,698 | 2,309 | 32,956 | 0,598 | 1,488 | n.d. |
| 0,667 | 2,000 | n.d. | 0,704 | 2,374 | 30,278 | 0,610 | 1,561 | n.d. |
| 0,680 | 2,125 | 54,219 | 0,715 | 2,510 | 26,435 | 0,627 | 1,680 | n.d. |
| 0,700 | 2,333 | 34,291 | 0,732 | 2,736 | 22,696 | 0,644 | 1,809 | n.d. |
| 0,720 | 2,571 | 27,110 | 0,750 | 2,994 | 20,197 | 0,661 | 1,953 | n.d. |
| 0,740 | 2,846 | 23,119 | 0,767 | 3,290 | 18,375 | 0,667 | 2,000 | n.d. |
| 0,760 | 3,167 | 20,493 | 0,784 | 3,633 | 16,971 | 0,679 | 2,111 | 53,259 |
| 0,780 | 3,545 | 18,597 | 0,801 | 4,036 | 15,847 | 0,696 | 2,288 | 34,044 |
| 0,800 | 4,000 | 17,146 | 0,819 | 4,515 | 14,920 | 0,713 | 2,486 | 26,987 |

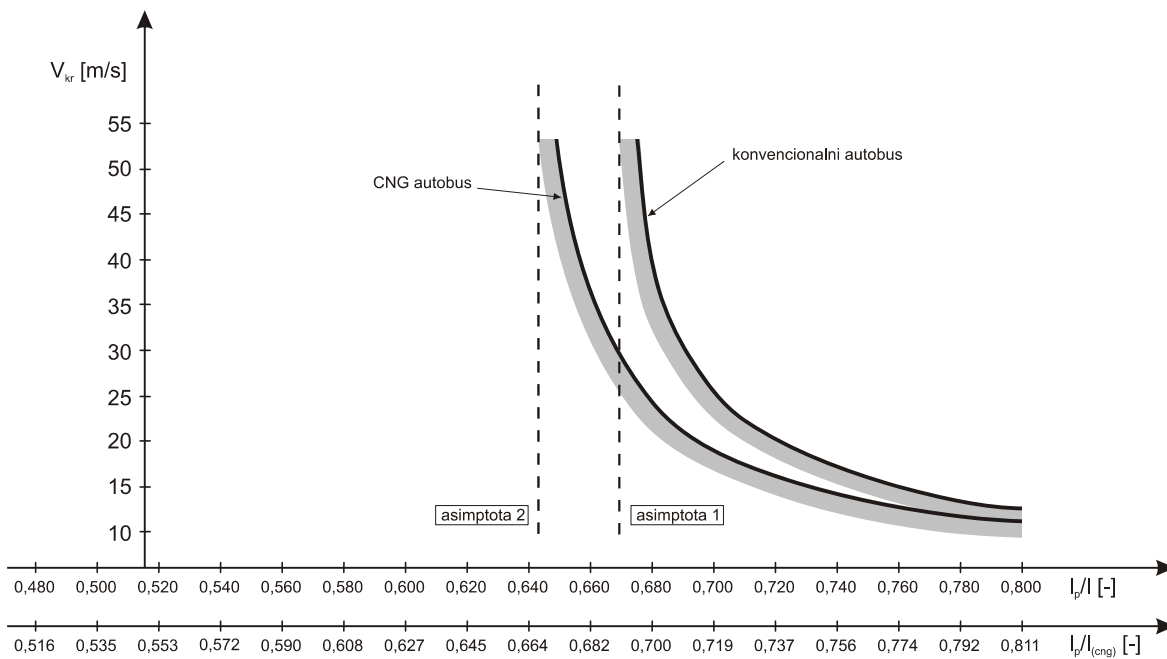
Tabela 1: Proračun kritične brzine praznih autobusa, $M=M_0$

| I_p/I | I_p/I_z | V_{kr} [m/s] | I_p/I | I_p/I_z | V_{kr} [m/s] | I_p/I | I_p/I_z | V_{kr} [m/s] |
|-------------------------------|-----------|-------------------|--------------------------------|-----------|-------------------|--------------------------------|-----------|-------------------|
| Konvencionalni autobus | | | CNG autobus, pozadi gas | | | CNG autobus, napred gas | | |
| 0,400 | 0,667 | n.d. | 0,443 | 0,795 | n.d. | 0,381 | 0,616 | n.d. |
| 0,420 | 0,724 | n.d. | 0,461 | 0,856 | n.d. | 0,400 | 0,666 | n.d. |
| 0,440 | 0,786 | n.d. | 0,480 | 0,922 | n.d. | 0,418 | 0,718 | n.d. |
| 0,460 | 0,852 | n.d. | 0,498 | 0,992 | n.d. | 0,436 | 0,774 | n.d. |
| 0,480 | 0,923 | n.d. | 0,516 | 1,068 | n.d. | 0,455 | 0,834 | n.d. |
| 0,500 | 1,000 | n.d. | 0,535 | 1,150 | n.d. | 0,473 | 0,898 | n.d. |
| 0,520 | 1,083 | n.d. | 0,553 | 1,238 | n.d. | 0,492 | 0,967 | n.d. |
| 0,540 | 1,174 | n.d. | 0,572 | 1,334 | n.d. | 0,510 | 1,041 | n.d. |
| 0,560 | 1,273 | n.d. | 0,590 | 1,439 | n.d. | 0,528 | 1,121 | n.d. |
| 0,580 | 1,381 | n.d. | 0,608 | 1,554 | n.d. | 0,547 | 1,207 | n.d. |
| 0,600 | 1,500 | n.d. | 0,627 | 1,680 | n.d. | 0,565 | 1,300 | n.d. |
| 0,620 | 1,632 | n.d. | 0,645 | 1,819 | n.d. | 0,584 | 1,402 | n.d. |
| 0,640 | 1,778 | n.d. | 0,664 | 1,973 | n.d. | 0,602 | 1,513 | n.d. |
| 0,643 | 1,803 | n.d. | 0,667 | 2,000 | n.d. | 0,620 | 1,635 | n.d. |
| 0,660 | 1,941 | n.d. | 0,682 | 2,145 | 35,805 | 0,627 | 1,678 | n.d. |
| 0,667 | 2,000 | n.d. | 0,688 | 2,207 | 30,278 | 0,639 | 1,769 | n.d. |
| 0,680 | 2,125 | 40,108 | 0,700 | 2,339 | 24,165 | 0,657 | 1,918 | n.d. |
| 0,700 | 2,333 | 25,367 | 0,719 | 2,557 | 19,444 | 0,667 | 2,000 | n.d. |
| 0,720 | 2,571 | 20,054 | 0,737 | 2,806 | 16,719 | 0,676 | 2,084 | 46,733 |
| 0,740 | 2,846 | 17,102 | 0,756 | 3,093 | 14,891 | 0,694 | 2,269 | 26,819 |
| 0,760 | 3,167 | 15,160 | 0,774 | 3,426 | 13,555 | 0,713 | 2,478 | 20,749 |
| 0,780 | 3,545 | 13,757 | 0,792 | 3,819 | 12,525 | 0,731 | 2,716 | 17,527 |
| 0,800 | 4,000 | 12,683 | 0,811 | 4,288 | 11,698 | 0,749 | 2,989 | 15,453 |

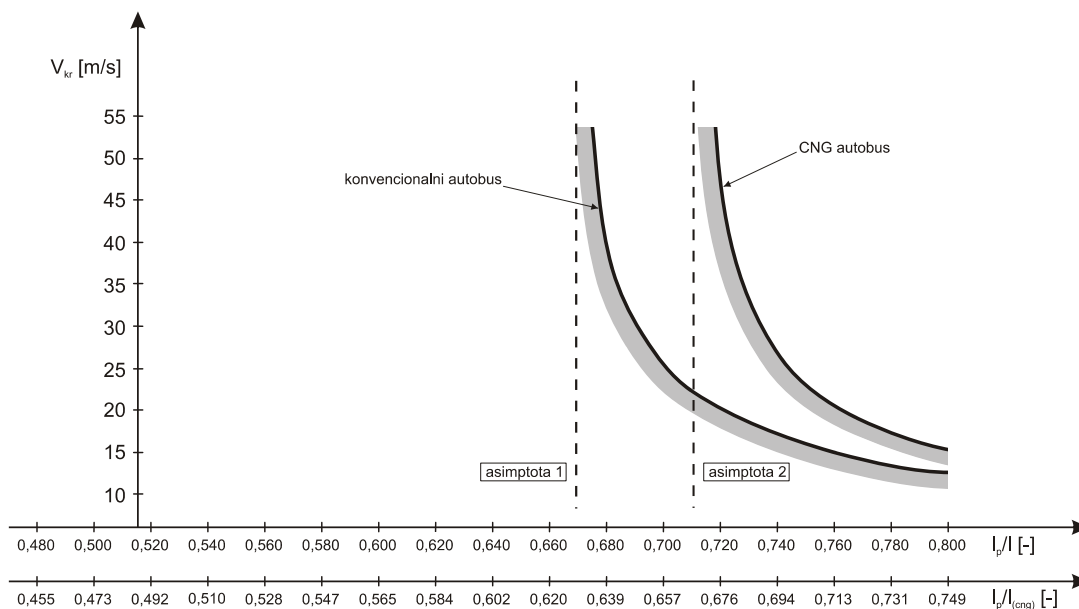
Tabela 2: Proračun kritične brzine punih autobusa, $M=M_p$



Slika 18: Zavisnost kritične brzine stabilnog upravljanja od konstrukcionih karakteristika konvencionalnog i CNG autobusa, (prazno vozilo $M=M_o$, gas napred)



Slika 19: Zavisnost kritične brzine stabilnog upravljanja od konstrukcionih karakteristika konvencionalnog i CNG autobusa, (puno vozilo $M=M_p$, gas pozadi)



Slika 20: Zavisnost kritične brzine stabilnog upravljanja od konstrukcionih karakteristika konvencionalnog i CNG autobusa, (puno vozilo $M=M_p$, gas napred)

ANALIZA REZULTATA I ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Diferencijalne jednačine date u prethodnom tekstu opisuju ravnomerno kretanje autobusa u krivini i po pravcu bez pojave delimičnog ili čistog klizanja i proklizavanja u bilo kom pravcu.

Uslov stabilnog kretanja dat je u odnosu na definisanost i veličinu kritične brzine dobijene na osnovu Routh-Hurwitz-ovog kriterijuma:

$$V_{kr} = \sqrt{\frac{K_{\delta p} \cdot K_{\delta z} \cdot l^2 \cdot g}{G \cdot (I_p \cdot K_{\delta p} - I_z \cdot K_{\delta z})}}$$

Prema dijagramima prikazanim na slikama 17, 18, 19, 20, granice stabilne zone određene su zavisnošću kritične brzine od konstrukcionih karakteristika konvencionalnog i CNG autobusa dobijenih prema lokaciji CNG rezervoara u sklopu autobusa i iskorišćenja kapaciteta autobusa.

U prvom slučaju (slika 1) kada su CNG rezervoari smešteni na krovu autobusa (prazan autobus) u zadnjem delu, oni negativno utiču na stabilnost kretanja. Kritična brzina je beskonačno velika za vrednost $I_p/I_{CNG}=0,667$, što u odnosu na vrednost I_p/l konvencionalnog autobusa ukazuje da je negativna vrednost potkorene veličine prisutna za manji opseg vrednosti I_p/l konvencionalnog autobusa tj. od 0,400 do 0,624. U početnom slučaju kada vozilo nije opremljeno CNG opremom taj opseg je u granicama od 0,400 do 0,667.

Sa desne strane asimptote 1 i asimptote 2 za obe koncepcije autobusa kritična brzina ima konačne vrednosti. Svakako da su vrednosti definisane krivom $V_{kr}=f(I_p/l)$ u slučaju CNG autobusa manje od odgovarajućih vrednosti konvencionalnog autobusa pošto se date funkcije ne seku pa su i veličine V_{kr} za CNG autobus manje.

Uticaj gasne opreme na položaj težišta u odnosu na prednju osovinu je takav da je primena CNG ograničena za konvencionalne autobuse svih kategorija kod kojih je $I_p/I_{max}=0,780$ jer se instalacijom CNG rezervoara na zadnjem delu krova autobusa tada opterećenje prednje osovine smanjuje ispod 20% ukupnog opterećenja autobusa. Ovo ukazuje da je i sa desne strane asimptote 2 stabilnom zonom obuhvaćen manji opseg odnosa I_p/l konvencionalnog autobusa tj. od 0,667 do 0,780.

Prema slici 18, smeštanje CNG rezervoara na krovu autobusa u prednjem delu uzrokuje povoljnije efekte po pitanju stabilnosti u odnosu na konvencionalni autobus. S` obzirom da su krive zavisnosti $V_{kr}=f(I_p/l)$ više međusobom udaljene nego u prethodnom slučaju time su i pozitivne posledice više izražene nego negativne vezano za smeštaj rezervoara u zadnjem delu autobusa. Za opseg vrednosti I_p/l CNG autobusa od 0,400 do 0,667 kretanje je stabilno jer je prema Routh-Hurwitz-ovom kriterijumu ispunjen uslov (9). Intenzitet pozitivnih posledica (a u odnosu na moguću primenu CNG za pogon autobusa) može se

sagledati prema vrednostima I_p/I konvencionalnog autobusa.

Vrednosti I_p/I CNG autobusa levo od asimtote 2 na slici 18 (stabilna zona u slučaju negativne vrednosti potkorene veličine u izrazu za V_{kr}) odgovaraju vrednostima I_p/I konvencionalnog autobusa koje se kreću u granicama od 0,400 do 0,748 dok su vrednosti u ostala tri slučaja (praznog vozila):

- asimtota 1 (slika 1), konvencionalni autobus, $I_p/I_{max}=0,667$
- asimtota 1 (slika 2), konvencionalni autobus, $I_p/I_{max}=0,667$
- asimtota 2 (slika 1), CNG autobus, CNG nazad, $I_p/I_{max}=0,624$

Zavisnost kritične brzine od konstrukcionih karakteristika kod maksimalno opterećenog autobusa prikazana je na slikama 19 i 20. Sve što je napred navedeno u tekstu ove tačke važi i u ovim slučajevima. Dodatno se uočava uticaj povećanja mase (ukupne mase obe koncepcije autobusa) na smanjenje vrednosti kritične brzine za ceo opseg I_p/I konvencionalnog autobusa od 0,400 do 0,800, što znači da se izražena suvišna upravljivost autobusa postiže za manje brzine što je nepovoljno sa aspekta stabilnog upravljanja pošto se smanjivanjem poluprečnika zakretanja povećava centrifugalna sila a time dalje povećava povodjenje.

Sve krive su takođe bliže jedna drugoj usled smanjenog procentualnog učešća mase CNG rezervoara u ukupnoj masi maksimalno opterećenih autobusa pa je samim tim i uticaj instalacije za prirodni gas manji na ponašanje autobusa pri kretanju.

LITERATURA:

- /1/ Glumac S., Žeželj S., (2002) "Projektovanje proizvodnja i eksploatacija autobusa", IKARBUS AD, Beograd.
- /2/ Mitschke M., (2004) "Dynamic der Kraftfahrzeuge", Springer Verlag, Berlin.

- /3/ Dedović V., (1998) "Nezavisno oslanjanje automobila", Saobraćajni fakultet, Beograd.
- /4/ Lenasi J., Žeželj S., Danon G., (1995) "Motorna vozila" Saobraćajni fakultet, Beograd.
- /5/ Dedović V., (2004) "Dinamika vozila", Saobraćajni fakultet, Beograd.
- /6/ Ćućuz N., Rusov L., (1973) "Dinamika motornih vozila", Privredni pregled, Beograd.
- /7/ Janković D., Todorović J., (1990) "Teorija kretanja motornih vozila", Mašinski fakultet, Beograd.
- /8/ Janković A., (1996) "Bezbednost automobila", Mašinski fakultet, Beograd.
- /9/ Simić D., (1979) "Motorna vozila", Naučna knjiga, Beograd.
- /10/ Janković D., Todorović J., (1996) "Konstrukcija motornih vozila".
- /11/ "Compressed Natural Gas, Freedom CAR and Vehicle Technologies Program" (2002), U.S. Department of Energy, CD izdanje.

DIRECTIONAL STABILITY ANALYSIS OF NATURAL GAS BUS

Usage of natural gas as power bus fuel requires adequately adapted power unit and gas facility. First part of this paper presents gas facility and its basic elements. In particular it gives detailed information about gas tanks, their setting up in ng bus and influence on vehicle construction characteristics.

Formulation and analysis of differential equations of bus movement according to models for movement in straight line and bend with constant speed are done in the second part of the paper.

Key words: natural gas bus, stability, handling