

VIRTUALNA ISPITIVANJA ŽELEZNIČKIH VOZILA

Mr Miloš Milovančević, dipl.inž.
Mašinski fakultet u Nišu

Mr Aleksandar Miltenović, dipl. inž.
Mašinski fakultet u Nišu

Simulacije kretanja železničkih vozila predstavljaju novinu u nauci, prvi softveri su se pojavili početkom devedesetih godina XX veka, dok se prva regulativa vezana za tu oblast pojavila 1997. godine u Engleskoj pod nazivom „The Manchester Benchmarks“. U ovoj opsežnoj studiji date su preporuke i pravila vezana za izvođenje simulacija kretanja. Istraživanje u oblasti softverskih ispitivanja ima za cilj da unapredi procesi kako projektovanja i konstruisanja železničkih vozila tako i održavanja infrastrukture.

Ključne reči: železnička vozila, dinamika, simulacija

RAZVOJ SOFTVERSKOG PAKETA VAMPIRE

Dinamičko ponašanje železničkih vozila je predmet proučavanja više od jednog veka. Oscilacije koje se javljaju kao posledica kretanja točka po šinama opisane su po prvi putu od strane George Stephenson-a 1821. godine ("Observations on edge and tram railways", 19th May 1821). Od tada je puno rađeno na sistemu regulacije vibracija železničkih vozila, a naročito su ispitani slučajevi ulaska vozila u krivinu.

Tek početkom šezdesetih godina prošlog veka kada su računari postali dostupniji, a sa druge strane matematičke formule preciznije, dobili su se kvalitetniji rezultati u određivanju dinamike kretanja železničkih vozila. Napredak u kompjuterskoj tehnologiji doveo je do brzog razvoja numeričkih tehnika za rešavanje problema dinamike vozila.

U okviru Britanske asocijacije za istraživanje železnice (sada je to AEA technology rail) veliki broj programa je razvijen poslednjih dvadeset pet godina za rešavanje dinamike kretanja. Ovaj razvoj podrazumeva kreiranje linearnih modela koji se koriste u linearnoj analizi i programu za linearnu teoriju kretanja. Linearni program za kretanje kroz krivine je vremenom napredovao kao i razumevanje nelinearnih sila na dodiru točak-šina.

Daljim razvojem došlo se do nelinearnog programa za analizu prelaznih stanja kojim se proučavaju karakteristike vozila koristeći diskretne ulaze i karakteristike pruge na bazi poznatih vertikalnih i bočnih pomeranja. Ovi programi su objedinjeni u pre i post procesorske module od kojih je danas sastavljen softverski paket VAMPIRE.

Došlo se do zaključka da linearni program ima izvesna ograničenja vezana za teorijske postavke kontakta točak-šina, ali ako se ova ograničenja prepoznaju i ako se na njih računa linearni programi su izuzetno korisni. Jedna od namena je i upoređivanje voznih karakteristika vozila pri promeni koničnosti točkova ili za proveru modela vozila i razumevanje dinamičkog ponašanja pre izvođenja nelinearnog proračuna.

RAZVOJ LINEARNE ANALIZE

Jednačine kretanja točka po šini su uglavnom nelinearne. Prve studije kojim se proučavala dinamika vozila koristile su tehnike linearizacije da bi se dobio skup linearnih jednačina kretanja koje su zatim rešavane što je dovelo do razumevanja dinamičkog ponašanja vozila. Ovi rani radovi Britanskog instituta za razvoj železnice rezultirali su CEI nagradom 1975. godine. Oni i dalje predstavljaju veliki deo tehnike linearne analize koji se koriste u softverima. Ovo je podrazumevalo korišćenje linearizovanog modela dodira točka-šina (koji je generisan statičkom procedurom Booton-a) i linearizacije sila koje se javljaju pri sporom kretanju točka po šini (puzanju). Takođe je još tada došlo do određenih

pojednostavljenja vezanih za simetriju vozila. Uočeno je da koordinate koje opisuju kretanje vozila mogu da se podele u grupe vertikalnih i bočnih. Vertikalne koordinate objedinjuju ona kretanja vozila koja izazivaju pomeranja u vertikalnoj i longitudinalnoj ravni. Grupa bočnih koordinata daje pomeranja upravna u odnosu na predhodno navedene ravni. Radi pojednostavljenja mala pomeranja vertikalnih i bočnih grupa koordinata-jednačina može da se podeli i veliki broj prvih modela su zapravo bili samo vertikalni ili bočni modeli. Danas se koriste isključivo trodimenzionalni modeli, a jedino ograničenje linearnog softvera je to što je ograničen na mala pomeranja.

Linearne metode omogućavaju analizu dinamičkog ponašanja vozila na pravoj pruži pod uslovom da se uradi linearizacija elemenata ogibljenja. U suštini, osnovni problem vezan za linearni model je to što je matematički model u potpunosti adekvatan, ali je vrlo teško dodeliti adekvatne parametre samom modelu. Davanje tačnih parametara je glavni faktor koji utiče na tačnost predviđanja dinamičkog ponašanja vozila.

Kod softverskog paketa VAMPIRE postoji linearizacija modela, ali je moguće uraditi model sa više masa. U samu linearizaciju ulaze i linearne jednačine kretanja celog dinamičkog sistema uključujući i elastičnost pruge. Ograničenja linearnih tehnika postoje samo u podacima koji su izabrani za analizu. Takođe se automatski vrši linearizacija elemenata ogibljenja.

Linearno rešavanje kontakta točak-šina ima svoja ograničenja, ali ako se ona prepoznaju program je i dalje vrlo koristan jer omogućava variranje parametara koničnosti točka i shvatanje dinamike kretanja.

RAZVOJ NELINEARNE ANALIZE

Iskustva sa linearnom teorijom dinamike kretanja dovela su do studije o ponašanju vozila u krivini i ponašanju vozila kada postoje diskretni inputi, tada je neophodno u potpunosti koristiti nelinearne jednačine kretanja.

Kvazi-statična teorija kretanja je razvijena do 1978 godine. Ovo je ustvari nelinearna teorija koja se bavi problemima geometrije dodira točak-šina kao i silama koje se javljaju pri sporom kretanju vozila (puzanje, sile puzanja) i to po metodama Kalker-a.

Koriste se dva različita metoda za proračun i rešavanje jednačina i oba daju slične rezultate. Prva metoda koristi delimičnu linearizaciju

podataka o kontaktu točak-šina tako da može da se izvrši njihova interpolacija i kvazi-statičko rešenje ravnoteže sila se dobija brзом konvergencijom. Drugi metod koristi integraciju korak po korak koja podrazumeva kreiranje vremenskog opsega vozila u krivini, takva konvergencija takođe daje kvazi-statičko rešenje. Tehnika integraljenja je sporija, ali podrazumeva integraljenje prigušenja koja se javljaju kao posledica bočnih i podužnih ubrzanja. Prednost ove druge metode je što može da se proširi na predviđanje ponašanja vozila pri prolasku kroz skretnice, odnosno, uopšteno posmatrano za bilo koji vid predviđanja nelinearnih ponašanja.

Razvijen je teoretski metod koji omogućava analizu momenta trenja pri kočenju, ovo pored sile puzanja koja je proizašla iz Kelkerovog rada i variranja vrednosti veličine površine kontaktne elipse omogućava predviđanje ponašanja osovinskog sklopa kao i iskliznuće iz šina.

Nelinearna programska metoda je testirana pri simulaciji kretanja dvoosovinskog šinskog vozila-dresine po određenoj pruži. Rezultati dobijeni simulacijom poređani su sa eksperimentalnim rezultatima na zadatoj pruži. Rezultati dobijeni simulacijom u odnosu na stare rezultate merenja se nalaze u dijapazonu do 20% odstupanja.

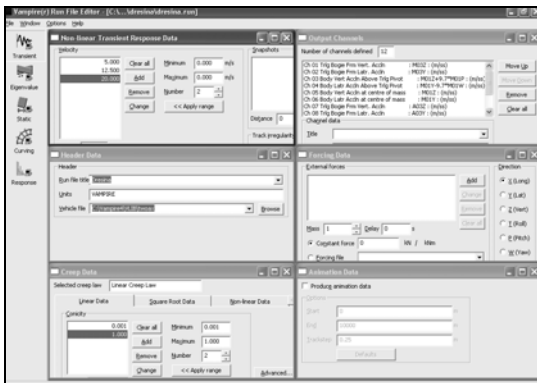
Eksperimentalno je potvrđeno da se simulacijom kretanja može vršiti predviđanje dinamičkog ponašanja na pravoj i ravnoj pruži, međutim, ispitivanja vršena u svetu ukazuju na to da je moguće predvideti dinamičko ponašanje pri kretanju vozila kroz ukrasnice i skretnice.

PROGRAM ANALIZE PRELAZNIH STANJA

Program analize prelaznih stanja koristi se za računanje dinamičkog odgovora vozila na spoljašnje dejstvo geometrijske nesavršenosti pruge i spoljašnjih sila uopšte.

Proračun obuhvata potpunu nelinearnu analizu modela vozila i oscilacija koje se javljaju kao posledica kretanja-odnosno dodira točak/šina. Program analize prelaznih stanja u softverskom paketu Vampire, predstavljen je kroz složen i vrlo zahtevan korisnički interfejs prikazan na slici 1.

Dinamički odgovor vozila na spoljašnje uticaje uslovljen je velikim brojem različitih parametara vozila, kontakta točak/šina, ali i geometrijom šina, geometrijom točka. Analiza prelaznih stanja predstavlja najsloženiji oblik analize obzirom da pored svega navedenog u proračun ulazi i dvostruki kontakt točak/šina.



Slika 1: Korisnički interfejs VAMPIRE-a

Model ispitivanog vozila

Proces dinamičke analize kretanja šinskog vozila, počinje definisanjem vozila (geometrije i fizičkih karakteristika) u smislu definisanja i određivanja fajla iz koga će softver da očitava podatke o vozilu, kao i imenovanja analize, što je prikazano na slici 2.



Slika 2: Definisanje fajla iz koga se očitavaju podaci o vozilu

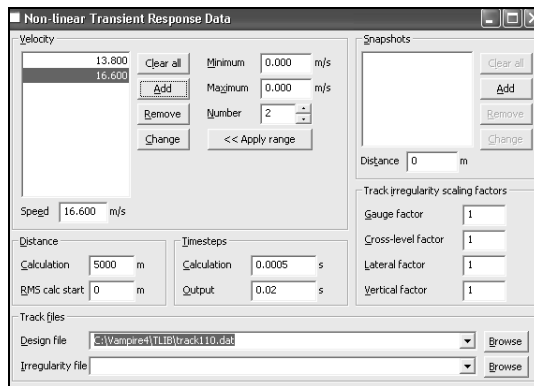
Fajl koji se koristi za definisanje geometrije i fizičkih karakteristika vozila (drezine) nosi ime «twoax» inače se radi o kodnom zapisu koji shodno određenim pravilima mora da se ispiše u notepad-u. Kako se radi o dinamičkom ispitivanju drezine u fajl koji nosi kodni zapis o drezini uneti su sledeći podaci:

- Dresina je vozilo sa dve osovine (2 axle);
- Masa osovinskog sklopa je 1313,63 kg;
- Ukupna masa maksimalno opterećene dresine je 15373 kg;
- Krutost opruga primarnog ogibljenja je 1.1MN/m;
- Modul klizanja 80 kN/mm²;
- Razmak između osovina 3,9 m.

Dalje je potrebno definisati uslove dinamičkog ispitivanja vozila u smislu definisanja tačno željene brzine kretanja vozila (u našem slučaju 50 km/h i 60 km/h). Takođe je moguće definisati opseg brzina na kojima vršimo ispitivanje.

Potrebno je takođe i softverski definisati dužinu deonice pruge na kojoj želimo da odredimo dinamički odgovor vozila.

Dalje potrebno je definisati vremenske korake za proračun (preporučene vrednosti su 1-5 milisekundi) i za dobijanje izlaznih podataka (ne postoje preporuke) prikazano na slici 3.



Slika 3: Definisanje uslova ispitivanja

Kvalitet pruge u mnogome utiče na kvalitet kretanja šinskog vozila. Softverski paket Vampire koji se koristi za simulaciju kretanja dresine na potezu Niš-Niška Banja, uticaj pruge definiše preko fajla koji nosi podatke o pruzi (track 110-deonica od 5000 m).

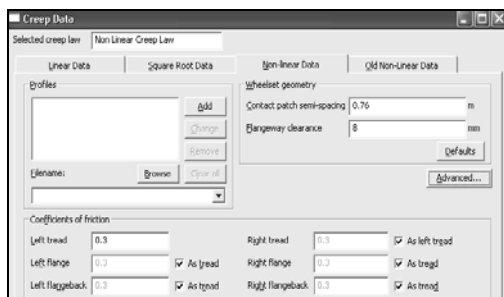
Kako se radi o pruzi koja je u trećoj kategoriji pruga i čija su odstupanja, prema vrsti deformacije (stabilnost, vitoperenje i nadvišenje) vrlo velika, fajl sa podacima je zapravo listing u kome su uneta odstupanja na deonici Niš-Niška Banja. Deo podataka o stanju šina uzetih iz ZOP-a Niš koji su snimljeni pomoću mernih kola, dati su u tabeli 1. U tabeli su prikazani podaci odstupanja geometrije šina od konstruktivno popisanih vrednosti (nađene mere). Možemo uočiti da nadvišenje na delu pruge od 4716 m - 4718 m pruge iznosi 15 mm u odnosu na konstruktivno popisanu vrednost, dok na delu od 4979 m – 4982 m pruge iznosi 17 mm.

Vrsta Deformacije	Stacionaža		Dužina (m)	Nađene mere
	Od	Do		
Nadvišenje	4.716	4.718	2	15 mm
Stabilnost-d	4.808	4.811	3	23 mm
Stabilnost-d	4.815	4.817	2	25 mm
Stabilnost-l	4.815	4.818	3	25 mm
Vitoperenje 3.5m	4.979	4.981	2	19 mm
Nadvišenje	4.979	4.982	3	17 mm

Tabela 1: Stanje šina na pruzi Niš-Niška banja

Složenost nelinearnog dinamičkog modela demonstrira i neophodnost definisanja parametara potrebnih za proračun relativnih brzina na osovinskom sklopu. U tom smislu potrebno je definisati profile točka i šine u kontaktu, geometriju osovinskog sklopa, koeficijente trenja na kontaktu gazne površine točka i šine, ali i

koeficijent trenja između bočne strane venaca bandaža i šine obzirom da postoji mogućnost ostvarivanja kontakta u dve tačke. Korisnički interfejs je u ovom slučaju relativno jednostavan (slika 4), ali zahteva unošenje vrlo kompleksnih podataka u fajlove opisa profila točka i šine.



Slika 4: Unošenje podataka o kontaktu točak/šina

Profil točka dresine definisan je UIC propisima kao i kod svih ostalih železničkih vozila tako da su podaci o profilu točka koji se nalaze u fajlu S1002-SW određeni na osnovu UIC 510-2. Profil šina je takođe definisan UIC propisima tako da je fajl sa podacima o profilu šine određen na osnovu UIC 54.

Definisanje geometrije osovinskog sklopa bazirano je na unošenju vrednosti polu rastojanja između točkova i zazora između točka i šine.

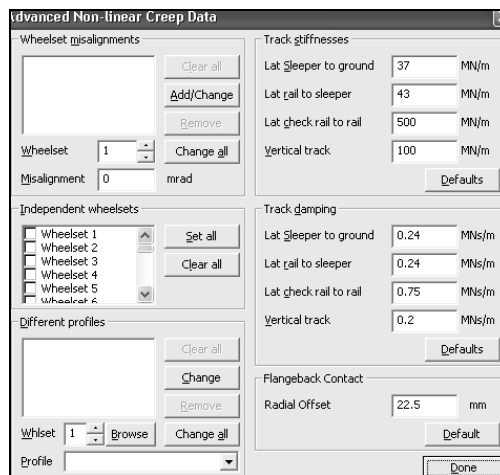
Da bi kontakt točak/šina bio potpuno određen potrebno je definisati i koeficijente trenja na dodiru između gazne površine točka i šine za levi i desni točak, kao i koeficijente trenja između boka točka i šine takođe za levu i desnu stranu. U slučaju ispitivanja drezine usvojeno je da su svi navedeni koeficijenti 0,3.

Kako nelinearnost kontakta proističe iz složenih uslova relativnih odnosa vozila i koloseka, moguće je definisati parametre pruge po kojoj se vozilo kreće odnosno definisati određene parametre koloseka, slika 5.

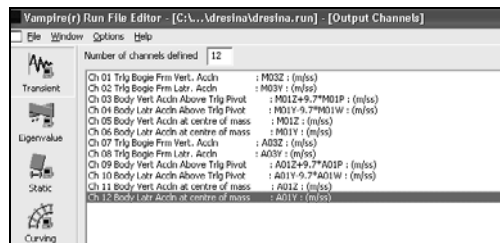
U okviru dela interfejsa za definisanje karakteristika koloseka moguće je uneti vrednosti za bočno i vertikalno prigušenje i krutost. Međutim ako je potrebno ostvariti složene uslove dinamičkog ispitivanja moguće je uneti i vrednosti radialnih bacanja za svaki točak ponaosob kao i dužinu bočnog kontakta između točka i šine.

Nakon potpunog definisanja svih predhodno navedenih parametara potrebno je definisati i parametre koje želimo da dobijemo kao izlaz iz analize, odnosno izlazne kanale, slika 6. Obzirom da postoje eksperimentalni podaci o vertikalnom ubrzanju na kućištu ležaja osovinskog sklopa i u centru mase (kod vozačevog sedišta), definisani izlazni kanali nose podatke o vertika-

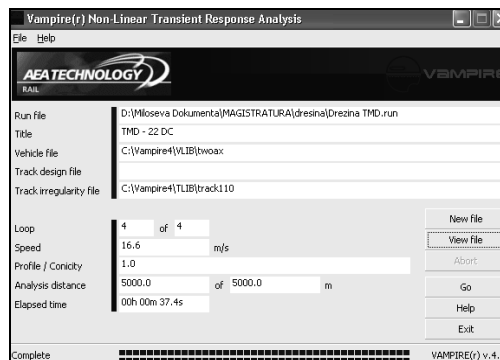
lnom ubrzanjima na kućištu ležaja i u težištu mase drezine.



Slika 5: Definisanje karakteristika koloseka



Slika 6: Definisanje izlaznih kanala analize



Slika 7: Vreme potrebno za kompletan proračun analize prelaznih stanja

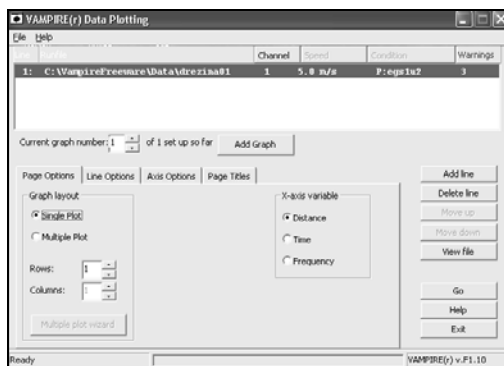
Nakon definisanja svih potrebnih podataka za vršenje nelinearne analize prelaznih stanja dovoljno je sve snimiti kao jedan fajl. Zatim se pokreće procesor za proračun i nakon vrlo kratkog vremena se dobijaju podaci simulacije kretanja (slika 7), najkompleksnije simulacije se vrše nekoliko minuta dok se jednostavnije vrše desetak sekundi.

REZULTATI PRORAČUNA

Nakon izvršenog proračuna moguće je sagledavati rezultate za unapred definisane kanale/izlaze kroz dijagrame u korisničkom interfejsu.

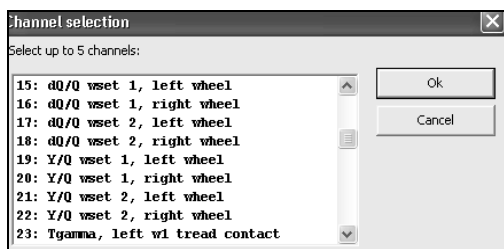
Korisnički interfejs VAMPIR-a za interpretaciju podataka

Pokretanjem opcije *Data Plotting* pokreće se postprocesor (slika 8), kojim se omogućava grafički prikaz rezultata analize u odnosu na rastojanje, frekventnom ili vremenskom domenu.



Slika 8: Interfejs za grafički prikaz rezultata analize *Data Plotting*

Takođe moguće je izvršiti izbor kanala (slika 9) (Channel), vrednosti koje se mogu grafički prikazati, moguće je izabrati najviše pet kanala koji se grafički prikazuju na dijagramu.



Slika 9: Izbor kanala za prikaz dijagrama

ISPITIVANJE VERTIKALNIH UBRZANJA

Vertikalna ubrzanja značajno utiču na stabilnost i mirnoću hoda šinskog vozila. U objavi UIC 518 u potpunosti su definisani uslovi merenja, analize i granične vrednosti vertikalnih ubrzanja.

Iz opštih uslova izdvajaju se oni vezani za ispitivanja specijalnih vozila koja ograničavaju brzinu, odnosno merenje se vrši pri brzinama manjim od 120 km/h¹, kao i da osovinsko opterećenje ne sme da pređe graničnu vrednost od $2Q_0 < 225 \text{ kN}$, uz uslov da brzina ispitivanja: $V=1,1V_{\text{doz}}$ sa minimumom² od $V_{\text{doz}}+10 \text{ [km/h]}$ tolerancija: $\pm 5 \text{ km/h}$.

Uslovi vezani za stanje i izbor koloseka za ispitivanje su takođe navedeni i to: ispitivanje se vrši na koloseku koji se koristi u redovnoj eksploataciji³ uz

uslov da šine moraju biti suve⁴. Merenje se vrši pri brzinama manjim od 120 km/h⁵.

Granične vrednosti vertikalna ubrzanja na sanduku vozila⁶ -za vučna vozila (sa jedno-stepenim ogibljenjem $(z)_{\text{lim}} = 4 \text{ m/s}^2$).

Vršeno je proračunavanje vertikalnih ubrzanja u sanduku iznad prednjeg osovinskog sklopa dresine i iznad točka na kućištu ležaja osovine. Izmerene vrednosti analizirane su u vremenskom i frekventnom domenu.

Obavezno merenje i analiza bočnih ubrzanja propisano je objavom UIC 518, kao i maksimalna vrednost od $(y)_{\text{lim}} = 4 \text{ m/s}^2$. Softverski paket Vampire ima mogućnost određivanja i grafičkog prikaza bočnih ubrzanja, kao i odnosa bočne i vertikalne sile Y/Q i ostale dinamičke parametre koji određuju sigurnost i mirnoću hoda vozila. S obzirom da ne postoje eksperimentalni podaci o bočnom ubrzanju u radu nisu prikazani softverski dobijeni podaci.

Rezultati proračuna vertikalnih ubrzanja na kućištu osovinskog sklopa

Vrednosti vertikalnih ubrzanja pod različitim uslovima date su u vremenskom i frekventnom domenu. Vertikalna ubrzanja na mernom mestu na kućištu ležaja osovinskog sklopa, sa dijagrama se mogu očitati. Dijagram 1a prikazuje vrednosti vertikalnog ubrzanja u vremenskom domenu, gde se jasno uočava da u opsegu od 0-60 s je najveći broj maksimalnih amplituda ubrzanja. Vremenskom opsegu od 0-60 s odgovara opseg rastojanja od 0-1000 m koji je prikazan na dijagramu 1b. U opsegu od 80-230 s javlja se stabilizacija kretanja i amplitude maksimalnih ubrzanja se nalaze u opsegu od 10 do 10 m/s². Zatim u opsegu od 230 - 270 s javljaju se amplitude u opsegu od 20 do 20 m/s², a zatim ponovo dolazi do stabilizacije kretanja vozila.

Prikazivanje podataka u frekventnom domenu u Vampiru podrazumeva prikaz frekventne funkcije $S(f)$ u zavisnosti od frekvence f . Frekventna funkcija je signal ubrzanja koji ima jedinicu $((\text{mm/s}^2)^2)/\text{Hz}$. Ako je amplituda $a \text{ mm/s}^2$, signal ubrzanja je $G(f)=S(f)\cdot\Delta f$, odnosno ubrzanje može da se izračuna kao $a = \sqrt{2G(f)}$ -prema izveštaju ERRI B 153/RP 21 mart 1993. Dužina FFT analize u post procesiranju kod Vampira je 1024 tačaka, koje daju 512 tačaka u frekventnom domenu $\Delta f=1/1024\Delta t$, vremenski

¹ UIC 518 poglavlje 5.3.1

² UIC 518 poglavlje 6.1.1

³ UIC 518 poglavlje 6.2

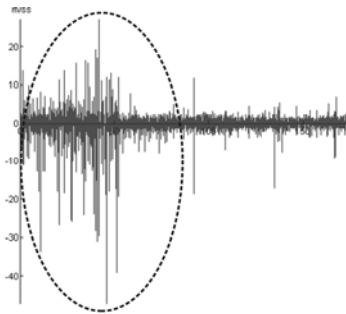
Istraživanja i projektovanja za privredu 16/2007

⁴ UIC 518 poglavlje 6.4.3

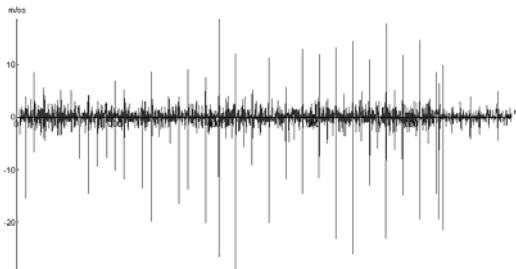
⁵ UIC 518 poglavlje 5.3.1

⁶ UIC 518 poglavlje 10.1.2

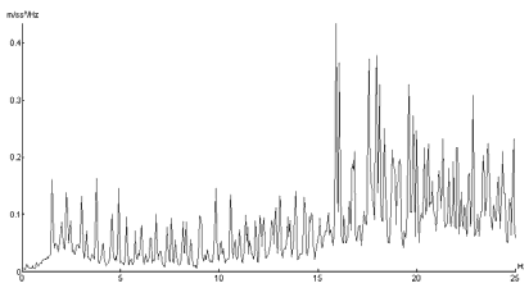
korak se zadaje softverski dok maksimalna frekvencija može biti $f_{\max}=1/2\Delta t$.



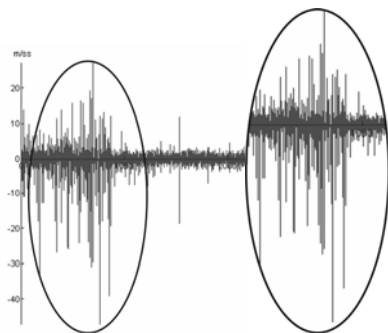
Dijagram 1a: Vertikalna ubrzanja u vremenskom domenu



Dijagram 1b: Vertikalna ubrzanja u odnosu na pređeno rastojanje 0-1000 m

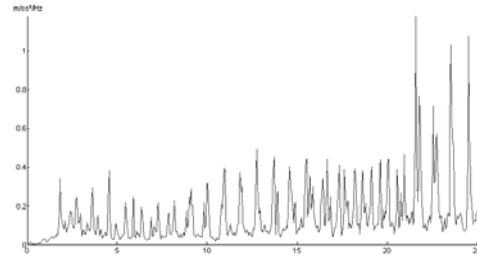


Dijagram 1c: Vertikalna ubrzanja u frekventnom domenu



Dijagram 2a: Vertikalna ubrzanja u zavisnosti od rastojanja (60 km/h)

Rezultat merenja vertikalnog ubrzanja drezine iznad kućišta ležaja osovinskog sklopa pri brzini 50 km/h ukazuje na ekstremne vrednosti vertikalnog ubrzanja 29,21 i 18,64 m/s². Ove vrednosti značajno premašuju ograničenje prema UIC 518 od 4 m/s², ali nisu relevantne za upoređenje s obzirom da se radi o ne ogibljenom delu.



Dijagram 2b: Vertikalna ubrzanja u frekventnom domenu (60 km/h)

Rezultat merenja vertikalnog ubrzanja drezine na mernom mestu kućišta ležaja osovinskog sklopa pri brzini 60 km/h ukazuje na ekstremne vrednosti vertikalnog ubrzanja 47,25 i 27,28 m/s².

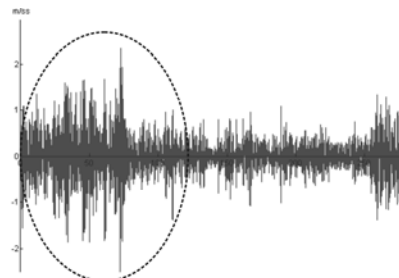
Veličine vertikalnih ubrzanja na kućištu ležaja osovinskog sklopa koje dosežu vrednosti od 47,25 m/s² ukazuju da postoje izuzetno velike dinamičke promene „dinamički udari“ na ležaju. Ovakvi podaci su očekivani obzirom da se radi o simulaciji neogibljenog kretanja točak-šina.

Ovako visoke vrednosti, pikovi maksimalnih amplituda vertikalnih ubrzanja su posledica podataka unetih o stanju šina. Radi se o pruzi koja prema UIC propisima spada u 3 kategoriju.

Vertikalna ubrzanja prikazana u frekventnom domenu predstavljaju okosnicu razvoja softverske dijagnostike železničkih vozila. Značajna istraživanja u oblasti primene FFT analize u dijagnostici stanja radne ispravnosti šinskih vozila se vrše, a imaju za cilj da utvrde koji uticajni parametri definišu sliku FFT odziva vozila. Na osnovu predhodno prikazanih FFT dijagrama može se zaključiti da se maksimalne amplitude ubrzanja nalaze u opsegu od 15-25 Hz. Takođe sa porastom brzine amplitudni opseg se pomera ka većim frekvencijama.

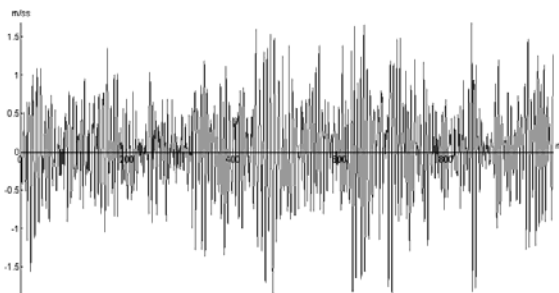
Rezultati proračuna vertikalnih ubrzanja na podu sanduka

Vrednosti ubrzanja pod različitim uslovima data su u vremenskom i frekventnom domenu. Vertikalna ubrzanja na mernom mestu na podu tj. upravljačnice sanduka drezine, sa dijagrama se mogu očitati. Dijagram 3a prikazuje vrednosti verti-

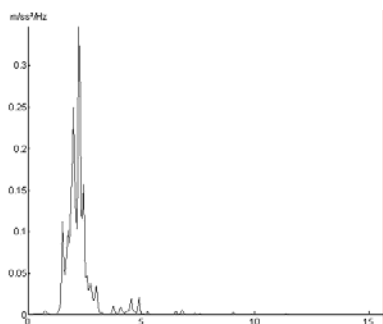


Dijagram 3a: Vertikalna ubrzanja u vremenskom domenu (50 km/h)

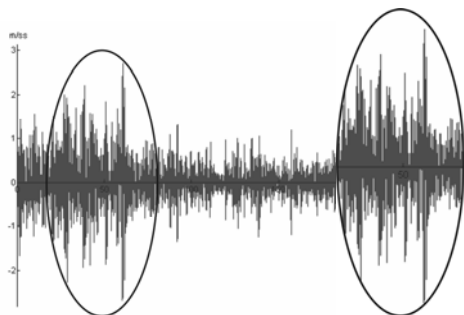
vertikalnih ubrzanja, u opsegu od 0-100 s javljaju se pikovi ubrzanja koji premašuju m/s^2 . Zatim u oblasti od 100-250 s javlja se stabilno kretanje vozila, nakon toga u ponovo se javlja dinamička nestabilnost. Na dijagramu 3b prikazan je opseg 0-80 s, ali ne u vremenskom domenu već u zavisnosti od pređenog rastojanja 0-1000 m.



Dijagram 3b: Vertikalna ubrzanja u odnosu na pređeno rastojanje 0-1000 m



Dijagram 3c: Vertikalna ubrzanja u frekventnom domenu (50 km/h)



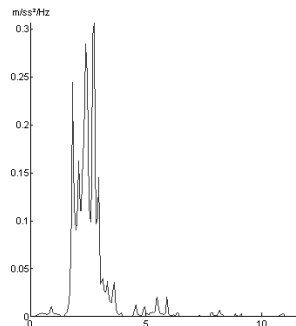
Dijagram 4a: Vertikalna ubrzanja u vremenskom domenu (60 km/h)

Rezultat merenja vertikalnog ubrzanja drezine na mernom mestu pod sanduka pri brzini 50 km/h ukazuje na ekstremne vrednosti vertikalnog ubrzanja 2,54 i 2,946 m/s^2 .

Rezultat proračuna vertikalnog ubrzanja drezine na mernom mestu pod sanduka pri brzini 60 km/h ukazuje na maksimalne vrednosti vertikalnog ubrzanja 2,814 i 3,122 m/s^2 .

Maksimalne vrednosti vertikalnih ubrzanja su manje od maksimalne dozvoljene vrednosti prema objavi UIC 518 od 4 m/s^2 . Ovo ukazuje na sledeće: uz uslov

Istraživanja i projektovanja za privredu 16/2007



Dijagram 4b: Vertikalna ubrzanja u frekventnom domenu (60 km/h)

da je softverski aparat koji simulira dinamiku kretanja adekvatan, drezina može sigurno da se kreće prugom 3 klase, brzinom od 60 km/h, bez opasnosti iskakanja iz šina sa aspekta dozvoljenog vertikalnog ubrzanja. Činjenica da postoji razlika u dijagramima vertikalnih ubrzanja pri 50 i 60 km/h ukazuje da postoji ne linearna zavisnost brzine i dinamičkog odgovora vozila.

Dijagrami frekventnog spektra vertikalnog ubrzanja ukazuju da se maksimalne amplitude ubrzanja, na ogibljenom delu drezine, nalaze u opsegu od 0-5 Hz.

Uočava se da sa porastom brzine rastu i vertikalna ubrzanja, ovo je posebno izraženo na mernom mestu kućišta ležaja gde je postignuta vrednost od 47,25 m/s^2 pri brzini od 60 km/h.

ANALIZA REZULTATA I ZAKLJUČCI

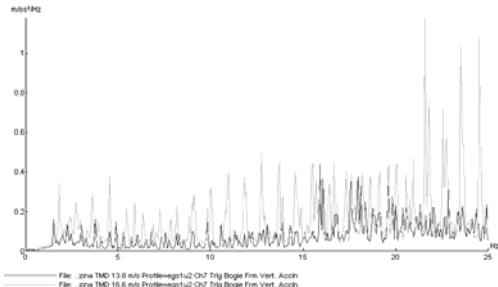
Rezultati simulacije kretanja drezine brzinama 50 i 60 km/h nedvosmisleno ukazuju na sledeće:

Vertikalna ubrzanja na kućištu ležaja osovinskog sklopa su značajno veća od vertikalnih ubrzanja na podu sanduka; ovo je posledica toga što su na kućištu ležaja ne prigušene oscilacije osovinskog sklopa dok su na podu sanduka prigušene oscilacije, prigušenje je srazmerno elementima ogibljenja (opruge i frikционе prigušnice).

Vertikalna ubrzanja na podu sanduka i na kućištu ležaja su veća sa porastom brzine, ovo je posledica toga što sa porastom brzine kretanja raste kinetička i potencijalna energija celog vozila, a samim tim rastu i amplitude oscilacija.

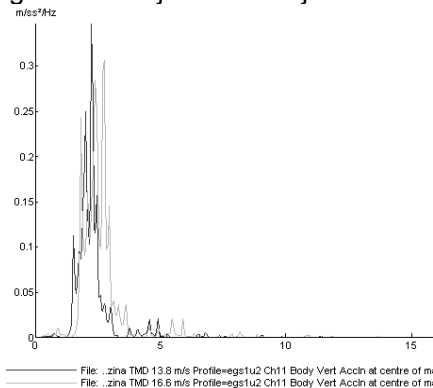
Uporednim prikazima u frekventnom domenu uočavaju se razlike u frekvencama kod kojih se javljaju maksimalne amplitude vertikalnih ubrzanja. Na dijagramu 5 dat je uporedni prikaz vertikalnih ubrzanja na kućištu ležaja u frekventnom domenu pri brzini od 50 i 60 km/h. Sa dijagrama se uočava da postoji određena zavisnost rasporeda amplituda u opsegu frekvence od 0-25 Hz. Takođe je lako uočivo da se maksimalne ampli-

tude vertikalnih ubrzanja pri brzini od 60 km/h javljaju u opsegu frekvencija oscilovanja od 20-25 Hz, dok se maksimalne amplitude vertikalnih ubrzanja pri brzini od 50 km/h javljaju u opsegu frekvencija oscilovanja od 15-20 Hz.

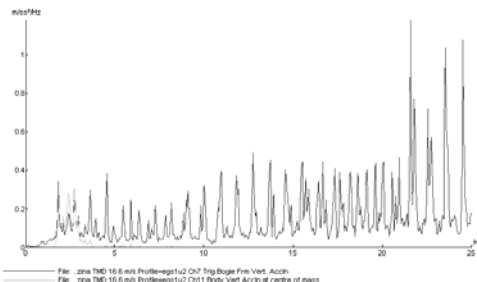


Dijagram 5: Frekventni spektar vertikalnih ubrzanja

Na dijagramu 6 dat je uporedni prikaz vertikalnih ubrzanja na podu sanduka u frekventnom domenu pri brzini od 50 i 60 km/h. Sa dijagrama se uočava da postoji određena zavisnost rasporeda amplituda u opsegu frekvence od 0-15 Hz. Takođe je lako uočivo da se amplitude vertikalnih ubrzanja pri brzinama od 50 i 60 km/h javljaju u opsegu frekvencija oscilovanja od 0-5 Hz.



Dijagram 6: Frekventni spektar vertikalnih ubrzanja



Dijagram 7: Frekventni spektar vertikalnih ubrzanja

Elementi ogibljenja (opruge i amortizeri) imaju ulogu da priguše oscilacije koje se javljaju kao posledica geometrijske nesavršenosti točka i šine. Na značaj njihove uloge ukazuje i uporedni dijagram 7 amplituda vertikalnih vibracija u frekventnom domenu na mernim mestima poda sanduka i kućišta ležaja pri brzini od 60 km/h.

LITERATURA

- 1/1 Kortuem W., Sharp, R.S., A report on the State-of-Affairs on 'Application of Multi-body Computer Codes to Vehicle System Dynamics', Vehicle System Dynamics 1997
- 1/2 Sharp R.S., and Kortuem, W., "Report on the Herbertov Workshop on Multibody systems Applications to Problems in Vehicle System Dynamics," Vehicle System Dynamics, 1997
- 1/3 Kortuem W., Sharp, R.S. 'The IAVSD Review of Multibody Computer Codes for Vehicle System Dynamics', Proc. Third ASME Symposium on Transportation Systems. SME Winter Annual Meeting, Anaheim, CA, November 9-13, 1992
- 1/4 Gimenez, J.G. Martin, L.M. Pascal, J.P. and Maupu J.L., "IAVSD Railway Benchmark No.2 Sidive and Voco Code Solutions", The Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks (G. Sauvage ed.), Proc. 12th IAVSD - Symposium, Swets and Zeitlinger, Lisse, 1992, pp 551-565
- 1/5 Kortuem W., Sharp, R.S. (editors), Multibody Computer Codes in Vehicle System Dynamics, Supplement to Vehicle System Dynamics, Vol. 22, Swets & Zeitlinger, Lisse, 1993
- 1/6 Bannasch, M.; Maly, H.; Klose, C.; Saglitz, M.: Intelligent and Flexible Inspection of Trains for High-Speed Services, RTR 2-3, 2002.
- 1/7 Tanel Telliskivi, Ulf Olofsson, Ulf Sellgren and Patrik Kruse Machine Elements, *A tool and a method for fe analysis of wheel and rail interaction* Department of Machine Design Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden 1999
- 1/8 Mr Miloš Milovančević „Istraživanje dinamičkog ponašanja železničkog vozila sa aspekta stanja radne ispravnosti“ magistarski rad, Mašinski fakultet u Nišu, jun 2006.

SOFTWARE RESEARCH AND SIMULATION OF RAIL VEHICLES RUNNING

Rail vehicle simulation is something new in scientific world; first software appeared at 90`es of XX century, while first regulative for that field of exploration appeared in 1997 in England „The Manchester Benchmarks“. In this wide study first recommendations for rail vehicle simulation are published. Exploration in this field has its goal to improve processes of rail vehicle construction and designing as well as rail infrastructure.

Key words: rail vehicle, dynamics, simulation