

NOVE MOGUĆNOSTI SPOZNAJE O RAVNOME OBODU KOTAČA POZNATOM KAO OPASNI ČIMBENIK POREMEĆAJA U DINAMIČKOM SUSTAVU VOZILO-PRUGA

prof. dr. sc. Simo Janjanin, dipl. ing. elek. *

UDK: 625.01

Rad je objavljen. Željeznice 21. 1/2013. 19-28.

1. Uvod

Već dulje su predmet naših istraživanja nepravilnosti na tračnicama i na kotačima kao poremećaji u dinamičkom i oscilirajućem sustavu vozilo-pruga. Veliki dio tih istraživanja prikazan je u radu »Opći simulacijski model za promatranje ponašanja osovine kotača na neravninama površine valjanja«. Objekti istraživanja bili su valovitost i druge opasne neravnine na površini valjanja kotača po tračnici kao što su ravni obodi kotača, loši varovi tračnica, sastavi tračnica i druge neravnine te njihovo opasno djelovanje na dinamički sustav vozilo-pruga.

U ovome radu bit će obrađen simulacijski model izveden iz općega simulacijskog modela specijalno za promatranje gibanja težišta kotača uz ravne obode kotača, i to ne samo pri malim voznim brzinama, već i pri većim voznim brzinama. Simulacijski model morao bi biti postavljen tako da kvalitativno i kvantitativno udovoljava zahtjevima fizikalnog procesa vertikalnoga gibanja osi kotača uz ravni obod i da izračuna sve sile i njihove međusobne odnose.

Iz fizikalnog procesa poznato je i to da pri većim brzinama težište kotača ne uspijeva slijediti teorijsku krivulju gibanja težišta izvedenu za male brzine. Kotač se na lijevome rubu ravnog dijela oboda skoro odvaja od tračnice pa težište kotača preskače dio teorijske krivulje za male brzine, sve dok kotač desnim rubom ravnog dijela ne udari u tračnicu.

Fizikalna osnova vertikalnoga gibanja težišta kotača nakon udara malo se spomi-

njala u postojećoj literaturi. Simulacijski model mogao je obuhvatiti i to gibanje, a prvi novi rezultati bit će izneseni u ovome radu.

Za očekivati je da će stručnjaci biti zainteresirani za definitivnu provjeru simulacijskog modela i prvih novih rezultata istraživanja gibanja težišta kotača te za sudjelovanje u daljnjim istraživanjima, pogotovo u onima čiji je cilj otkrivanje metode mjerenja poremećaja na stvarnome vozilu i pruži.

2. Dodaci fizičkome i matematičkome modelu sustava

2.1. Osnovni model

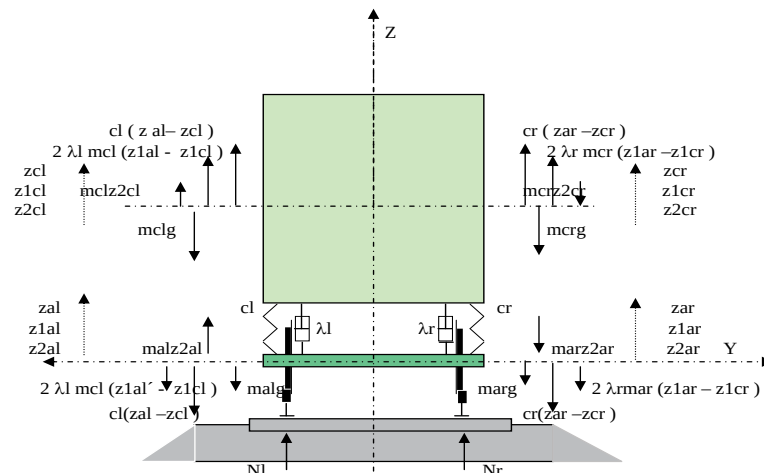
U radu »Opći simulacijski model za promatranje ponašanja osovine kotača na neravninama površine valjanja« [6] osnovni oscilirajući sustav i njegov fizički i matematički model definirani su prema slici 2.1.1. Svi detalji matematičkog i simulacijskog modela, ali za male brzine, navedeni su u navedenome radu, a u

ovome radu bit će izneseni samo dodatci tim modelima za određeni raspon brzina.

Osovina kotača vagona i vozilo gibaju se konstantnom brzinom v po horizontalnim tračnicama. Neravnine na površini valjanja kotač-tračnica u ovome su radu ravni obodi kotača, što izaziva poremećaje u vertikalnome gibanju kotača i osovine, a time i dinamička opterećenja kotača i tračnica.

Dakle, u ovome radu istraživat će se samo djelovanje ravnih oboda kotača na vertikalna gibanja kotača, osovine, neovještene i ovještene mase, i to ne samo pri malim voznim brzinama, nego i pri većim brzinama vozila, dinamičke veličine tih gibanja, koje su zajedničke vozilu i pruži, kao i način kako će se to odraziti na međudjelovanje kotača i tračnica te na njihova dinamička opterećenja.

Ravni obodi kotača oštećenja su kotača, a posljedica su blokiranja kotača pri kočenju. U prethodnome radu određen je matematički izraz za gibanje težišta ko-



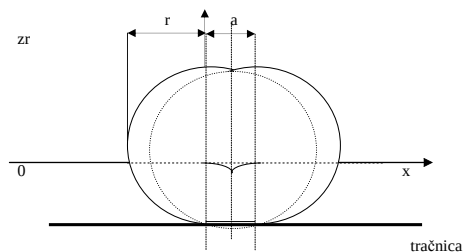
Slika 2.1.1. Gibanje vozila uz neravnine na površini valjanja

* preminuo 2017. godine

tača, ali pri malim brzinama vozila. Kotač polumjera r i s ravnim, oderanim obo-
dom duljine a valja se jednoliko po rav-
noj tračnici. Što se događa kada ravni dio
kotača dođe u dodir s tračnicom?

Na slici 2.1.2. koja je također preuzeta iz
prethodnog rada, vide se tri karakteri-
stična položaja kotača pri valjanju kada
je obod kotača ravan.

Prvi lijevi položaj jest onaj kada se kotač
još uvijek valja po tračnici, a prije nastu-
pa ravnog dijela oboda. Srednji položaj
jest onaj kada je pri malim voznim brzi-
nama ravni dio oboda čitavom dužinom
na tračnici, a desni položaj onaj kada se
kotač nastavlja valjati po tračnici.



Slika 2.1.2. Valjanje ravnog oboda kotača po tračnici

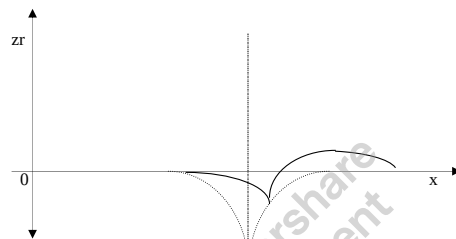
2.2. Dodaci fizikalnome modelu za veće vozne brzine

Pri većim brzinama vozila mijenja se pu-
tanja desne točke ravnog dijela kotača,
no nije ista i putanja težišta kotača. Ono
što se događa s putanjom težišta kotača
između tih dvaju položaja te u desnome
položaju, ali i nakon udarca u desnoj toč-
ki, nije egzaktno obrađeno, što zaslužuje
naše zanimanje i opravdava istraživanja
opisana u ovome radu. Očekuje se da će
korist od ovih istraživanja biti bolje razu-
mijevanje prirode sile i dinamičkih odno-
sa kotač-tračnica, da će ona omogućiti
otkrivanje novih metoda mjerenja, pa
time i racionalnije korištenje i održavanja
pogona.

Nakon istraživanja na simulacijskome
modelu fizikalni proces vertikalnoga gi-
banja težišta kotača, koji je definiran re-
troaktivno, opisan je nastavku. Pri većim
brzinama promjena teorijske krivulje gi-
banja težišta kotača je prebrza te masa
kotača ne može pratiti tu promjenu. Re-
akcija N tračnice u lijevoj točki smanjuje
se sa svojega normalnog iznosa na malu
vrijednost, lagani dodir kotača i tračni-

ce u lijevoj točki ostaje, a jedine sile koje
djeluju na kotač su one od težine kota-
ča i osovinskog sklopa te dinamičke sile
preko ovjesa koje nastaju djelovanjem
vagonkog sanduka. Pod djelovanjem tih
sila događaju se slobodni pad i rotacija
kotača sve dok ne dođe do kontakta iz-
među desne točke ravnog dijela i tračni-
ce (slika 2.2.).

Taj novi kontakt kotača i tračnice u ne-
koj točki, koja odgovara položaju težišta
na uzlaznoj teorijskoj krivulji, jest veliki
udarac pa se kotač ponovno odvaja od
tračnice te ponovno nastaje slobodno
gibanje kotača i njegova težišta po ne-
poznatoj krivulji. Gibanje završava novim
udarcem prilikom vraćanja kotača u nje-
gov redoviti položaj na tračnici.



Slika 2.2. Preskakanje osi kotača ravnog oboda

2.3. Dodaci matematičkome modelu

Za osnovni matematički model nema
novih matematičkih zahtjeva, ali će biti
novih zahtjeva i logičkih uvjeta koje će
trebati unijeti u simulacijski model. De-
finiranje logičkih uvjeta nije bilo jed-
nostavno. Oni su odabrani nakon niza
raznih pokušaja i provjera na simulacij-
skome modelu.

Prvi logički uvjet proizlazi iz prirode sile
na kontaktu između kotača i tračnice već
u lijevoj točki. Taj kontakt postoji sve dok
je sila tračnice N pozitivna kao reakcija
na aktivnu dinamičku silu kotača usmje-
renu na tračnicu:

$$N > 0$$

Ako je reakcija tračnice kao neka rezul-
tanta sile reakcije vrlo mala, onda se ko-
tač praktično odljepljuje od tračnice.

Sve dok je reakcija tračnice jako mala,
težište kotača ne giba se po teorijskoj
krivulji, jer sile koje bi prisiljavale na ta-
kvo gibanje nisu dovoljno velike pa kao
aktivne sile na kotač djeluju samo njego-

va težina i sila ovjesa koji pak uzrokuju
vertikalno ubrzanje, koje opet, u pravilu,
zbog veće brzine vozila djeluju u kra-
ćem vremenu i centar osovine kotača ne
može slijediti teorijsku krivulju.

Slijedi nekoliko novih uvjeta gibanja u
desnoj točki dodira ravnog oboda te
zbog velikog udarca kotača i ponovnoga
gubitka kontakta s tračnicom na dijelu
gibanja do povratka u redoviti položaj
težišta kotača.

Kada desna točka ravnog dijela udari u
tračnicu, vertikalno gibanje težišta kota-
ča zaustavi se u kratkome vremenu, br-
zina u negativnome smjeru pada na nulu
i od udarca naglo naraste do pozitivne
vrijednosti, koja odgovara brzini u točki
udara na teorijskoj krivulji vertikalnoga
gibanja težišta za male brzine. Od udar-
ca vertikalno ubrzanje mora biti takvo da
uslijedi inverzija vertikalne brzine slična
onoj u najnižoj točki teorijske krivulje za
male brzine. Budući da reakcija tračnice
ne može biti negativna i ne može prisiliti
težište da se giba po teorijskoj krivulji, u
desnoj točki ravnog oboda ponovno ne-
staje kontakt, a daljnje gibanje težišta
je uz veliku početnu pozitivnu brzinu u
točki dodira i pod djelovanjem sile težine
kotača i sile ovjesa. Težište se ponovno
giba po slobodnoj krivulji i bez kontakta u
desnoj točki ravnog oboda sve dok kotač
ponovno ne udari u tračnicu.

Ova fizikalna osnova modela iznosi se
hrabro kao pretpostavka, a nastala je,
kao što je rečeno, retroaktivno, nakon
promatranja gibanja težišta na simula-
cijskome modelu. Provjera na stvarnoj
pruzi i vozilu jedino može presuditi pot-
punu ili djelomičnu osnovanost iznesene
pretpostavke.

Stvarno ubrzanje $Z2a$, brzinu $Z1a$ i put Za
uz dodatke u oznakama za desnu i lijevu
stranu moramo posebno generirati. Pri
malim brzinama to je jednostavno izve-
divo integriranjem iz ubrzanja $Z2a = z2a$,
a ovdje slično u dva koraka:

$$\begin{aligned} Z1a &= \int Z2a \, dt \\ Za &= \int Z1a \, dt \end{aligned}$$

Ovo ponovno generiranje brzine i puta
na simulacijskome modelu poslužiti će
kao provjera postupka i modela za male
brzine gibanja vozila kod kojih su te ve-
ličine jednake.

Za sada se zadovoljavamo promatranjem vertikalnih dinamičkih veličina između kotača i tračnice. Te dinamičke veličine će nam više trebati kasnije u istraživanjima opterećenja pruge jer su one uzbuđa u oscilirajućim sustavima pruge i vozila. No kada bi željeli saznati još više o dinamičkim veličinama i naprezanjima u samome kotaču izazvanih pojavom udarne sile na ploču kotača i tračnicu u desnoj točki ravnog dijela, moralo bi se voditi računa o realnome obliku ruba ravnog dijela kotača, koji od udaraca sigurno nema teorijski oštri rub, već malo stučeno zaobljenje, što će utjecati na maksimalne iznose sila udaraca. To će se spominjati i kasnije.

3. Dodaci u simulacijskome modelu

U upravljačkim datotekama simulacijskog modela dodatci su mali, ali je simulacijska datoteka u SIMULINK-u potpuno dograđena. Čak su napravljeni novi grupni blokovi jer se u postojećim dijagramima desnog i lijevog kotača moralo naći mjesta za ugradnju novih dijelova modela za dvostruko integriranje i ugradnju logičkih uvjeta u slučajevima gibanja vozila većim brzinama, kada se kotači nakratko, u dva navrata gotovo odvajaju od tračnica.

3.1. Dodaci u upravljačkoj datoteci axfw.m

Upravljačka datoteka *axfw.m* ima drugi naziv, ali i male dodatke u dijelu namijenjenom za crtanje rezultata simulacije. To su naredbe za crtanje stvarnih veličina gibanja *Zar* i *Zal*, *Z1ar* i *Z1al*, *Z2ar* i *Z2al* te njihovih dijagrama u usporedbi s teorijskim veličinama gibanja *za*, *z1a* i *z2a*.

U pomoćnoj upravljačkoj datoteci *flatwhee.m* dodatak je vrlo specifičan, a odnosi se na pomicanje vektora *der2* za korak udesno da bi se ispravio pomak ulijevo, koji je MATLAB napravio prilikom deriviranja. Dodaje se:

```
r=[0];
der2=[r;der2];
```

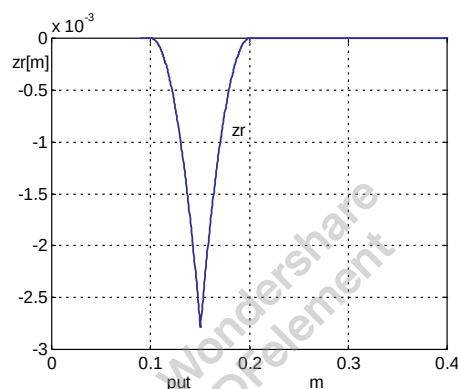
Kod raznih slučajeva gibanja, prema potrebi mijenjat će se početni podatci.

Postupak za korištenje simulacijskog modela u gotovo svim sljedećim slučajevima analize bit će prikazan na jednome od slučajeva analize. Izneseni su polazni podatci analize, a potom najvažniji krajnji rezultati te njihovi komentari.

Specifični polazni podatci za izabrani slučaj vožnje većom brzinom jesu:

$v=30$
 $a=0.100$; $r=0.45$; $Stop\ time = 0.04$
 $xm=0.35$; $tstep=0.00003$;

To da je generiranje uspješno uz zadane podatke vidi se na dijagramima veličina gibanja u ovisnosti o putu kod apliciranja simulacijskog programa.

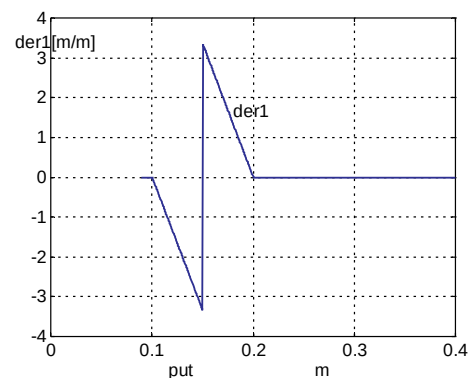


Slika 3.1.1. Teorijska krivulja ovisnosti puta *zr* o putu *x* kod ravnog oboda

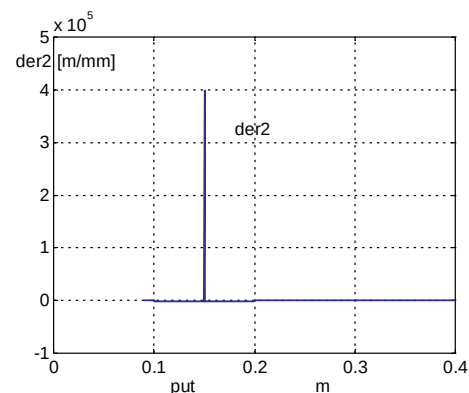
Na slici 3.1.1. prikazana je jedinstvena teorijska krivulja gibanja težišta *zr* za male brzine vozila u ovisnosti o putu *x*, koja se uz pomoć upravljačkih datoteka generira prije otvaranja simulacijskog dijagrama. Iz krivulje *zr* generiraju se teorijska brzina *der1* i teorijsko ubrzanje *der2* u vertikalnome smjeru kao derivacije po putu *x*, da bi se na kraju u simulacijskome postupku generirala i sila koja težišta kotača prisiljava na gibanje po teorijskoj krivulji. Krivulja $zr = f(xr)$ jest invarijanta brzine pa je to i krivulja za male i velike brzine.

Teorijski zakoni iznosa i oblika brzine te ubrzanja u ovisnosti o putu *x* vide se na slikama 3.1.2. i 3.1.3.

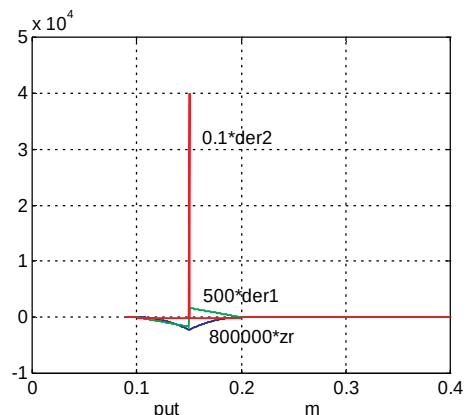
Na slici 3.1.4. vide se međusobni odnosi teorijskih veličina puta, brzine i ubrzanja u vertikalnome smjeru u ovisnosti o prijedenoj putu vozila. Ti dijagrami puno su pregledniji na ekranu u boji.



Slika 3.1.2. Teorijska krivulja ovisnosti brzine *der1* o putu *x* kod ravnog oboda kotača



Slika 3.1.3. Teorijska krivulja ovisnosti ubrzanja *der2* o putu *x* kod ravnog oboda



Slika 3.1.4. Međusobni odnosi teorijskih *zr*, *der1* i *der2* kod ravnog oboda

3.2. Dodaci prethodnoj simulacijskoj datoteci axfwh.mdl

Novoj simulacijskoj datoteci *axfw.mdl* nije promijenjen samo naziv, već su joj dodani novi bitni dijelovi.

U preglednome dijagramu simulacijskog modela (slika 3.2.1.) pojavila su se dva nova grupna bloka, i to *Right car side* i *Left car side*, jer se u dijagramima lijevog i desnog kotača morao naći prostor za dodatne blokove novog rješenja.

Već na preglednome simulacijskom dijagramu vidi se da je simulacijska datoteka iz praktičnih razloga podijeljena na pet dijagrama, i to na:

- pregledni dijagram simulacijske datoteke axfw.mdl
- simulacijski dijagram desnog kotača *Right wheel*
- simulacijski dijagram lijevog kotača *Left wheel*
- simulacijski dijagram desnog dijela vagona *Right car side*
- simulacijski dijagram lijevog dijela vagona *Left car side*.

Grupni blokovi lako se otvaraju dvostrukim klikom i njihovi dijagrami vide se prema želji i potrebi trajno ili povremeno.

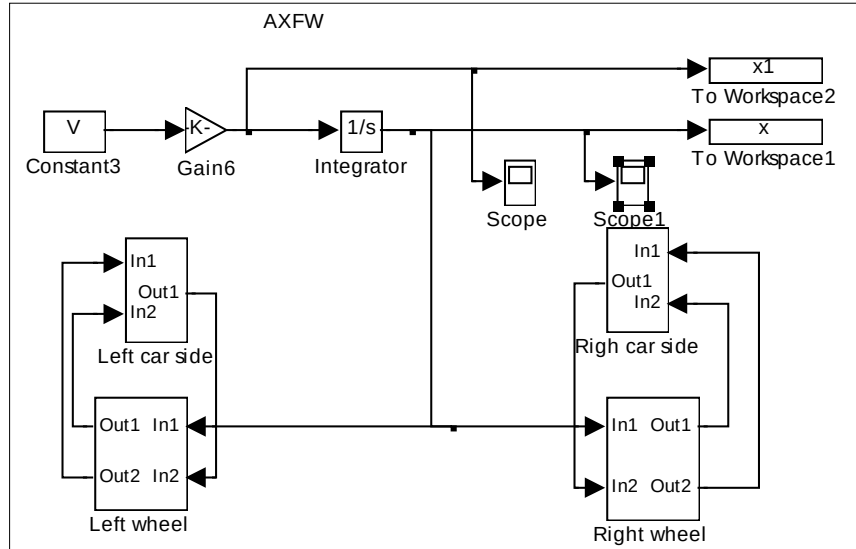
Parovi dijagrama istovjetni su po obliku i elementima, ali se razlikuju po oznakama veličina i parametara za desnu i lijevu stranu. Na primjer, na slici 3.2.2. prikazan je dijagram samo za desni kotač. Na tome dijagramu vidi se već poznati osnovni lanac za izračunavanje puta vozila u simulacijskome procesu x kao funkcije vremena integriranjem iz brzine vozila $x1=v$ prema diferencijalnoj jednadžbi iz matematičkog modela.

Dijagrami desnog i lijevog kotača imaju veliki dodatak u odnosu na ranija rješenja. Ako se promatra dijagram za desni kotač, kao novi dio vidi se lanac za izračunavanje stvarnih ubrzanja $Z2ar$, brzina $Z1ar$ i putova Zar .

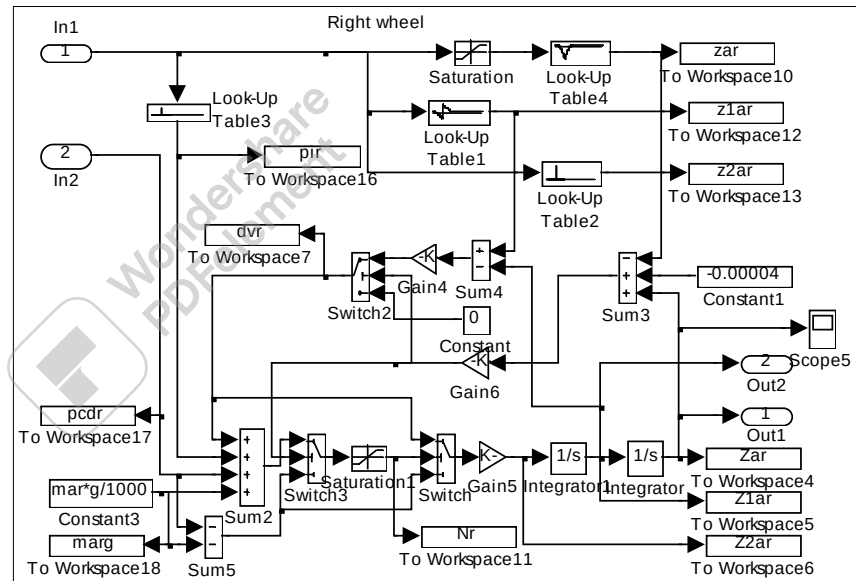
Preko ulaznih i izlaznih vrata ostvaruju se veze s grupnim blokom dijela vagona i sa zajedničkim dijelom za generiranje puta vozila.

Dvostruko integriranje obavlja se u lancu Gain5, Integrator3 i Integrator4. Na Switch se bira stvarno ubrzanje prema karakteru reakcije Nr .

Ako je $Nr > 0$, onda je ubrzanje $Z2ar$ u lancu za izračunavanje stvarnih veličina gibanja i od sile generirane iz razlike brzina $z1ar$ i $Z1ar$, inače je to ubrzanje samo sile težine kotača $marg$ i sile $pcdr$ koja djeluje preko ovjesa.



Slika 3.2.1. Pregledni dijagram simulacijske datoteke axfw.mdl



Slika 3.2.2. Simulacijski dijagram desnoga kotača

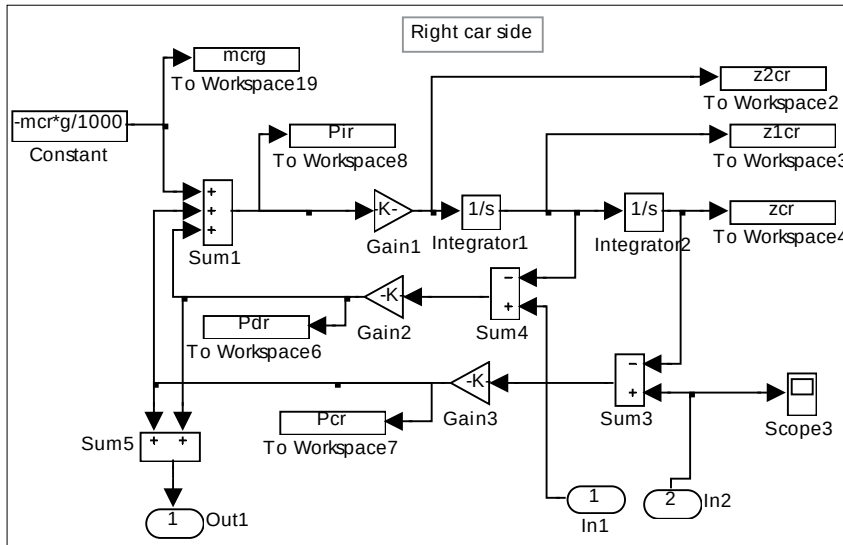
Reakcija Nr određena je, dakle, na dva načina. Dok je stvarni put Zar u relativnome iznosu manji od teorijskog zar (Gain6, Switch3), kotač je odvojen od tračnice, reakcija Nr je nula, a stvarno ubrzanje jest ono sile težine i sile ovjesa.

Kada se na uzlaznoj teorijskoj krivulji Zar i zar izjednače, preko Sum4, Gain4 i Switch2 generira se udarac, koji traje dok se ne obavi inverzija brzine i dok se ne izjednače stvarna brzina $Z1ar$ i teorijska brzina $z1ar$.

Izgled grupnog bloka *Right car side* može se vidjeti na slici 3.2.3. Istovjetan

je lijevome bloku. Taj dijagram opisan je u prethodnome radu, a novost su ulazna i izlazna vrata za vezu s ostalim blokovima simulacijskog modela.

Detaljni pregled i funkcioniranje simulacijskih dijagrama lako se i temeljito prati na ekranu računala. Ovdje je to napravljeno kako bi se dobio grubi uvid u simulacijsku datoteku i njezino funkcioniranje. Na rezultatima istraživanja gibanja kotača s ravnim obodom na simulacijskome modelu i praćenja ponašanja dinamičkih veličina sustava vidjet će se kako stvarno funkcionira cjelokupan simulacijski model.



Slika 3.2.3. Simulacijski dijagram grupnog bloka Right car side

4. Funkcioniranje simulacijskog modela u istraživanju procesa

Funkcioniranje simulacijskog modela u istraživanju procesa prevoznice kotača s oderanim i ravnim obodom na ravnoj tračnici bit će pokazano za jedan slučaj vožnje, za koji su opći parametri simulacijskog modela kao i specifični parametri zadani i do sada korišteni u njihovim upravljačkim datotekama. Mogućnosti istraživanja realnog procesa vožnje s ravnim obodom kotača na njegovome simulacijskom modelu bit će prikazane i ovdje, i to na izabranome slučaju.

Najvažniji parametri za izabrani slučaj gibanja jesu:

$x1=v=30$
 $a=0.100$; $r=0.45$;
 $xm=0.35$; $tstep=0.00003$; $tstop=0.02$
 $Gain4: 12000$; $Constant: -0.000004$

Svi dijagrami veličina gibanja i sila u simulacijskome modelu za desni i lijevi kotač i za ovješene mase vozila mogu se vidjeti na ekranu prema naredbama iz drugog dijela datoteke *axfwp.m*, što je ostavljeno za kasnije korištenje.

Međutim, u ovome radu nalaze se samo neki izabrani dijagrami karakteristični za simulacijski model, ali i za ilustriranje pretpostavki iz fizičkog i logičkog modela, prema kojima se vertikalno gibanje težišta kotača i ovješene mase kod ravnih oboda kotača i većih brzina odvija po vrlo specifičnim krivuljama.

Budući da će se u ovome prikazu parametri za desnu stranu unositi i na lijevu stranu osovine, dinamičke veličine lijeve i desne strane su iste pa će se crtati samo dijagrami desne strane.

Suženi program prikaza dijagrama dinamičkih veličina za odabrani slučaj gibanja uz ravne obode kotača sadrži usporedne dijagrame veličina gibanja prema teorijskom gibanju težišta kotača (*zar*, *z1ar*, *z2ar*) i stvarnih veličina gibanja (*Zar*, *Z1ar*, *Z2ar*) te pojedinačne dijagrame stvarnog ubrzanja *Z2ar* i sile reakcije tračnice *Nr*. Svi dijagrami generiraju se u simulacijskome modelu pa kao vektori imaju isti broj koraka, što je uvjet za njihovo međusobno grafičko predočavanje.

Za ilustraciju navedene namjere generirat će se složeni dijagrami veličina gibanja ovisno o vremenu t prema sljedećim naredbama:

```
plot(t,zar,t,Zar),grid
plot(t,z1ar,t,Z1ar),grid
plot(t,z2ar,t,Z2ar),grid
plot(t,Z2ar),grid
plot(t,Nr),grid.
```

U opisu rezultata simulacijskog modela težište je na dva najvažnija pitanja, i to na:

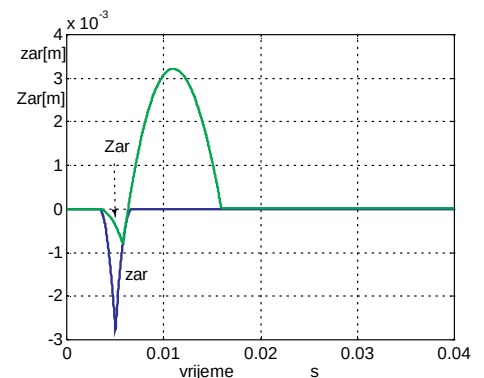
- funkcioniranju simulacijskog modela
- prikazu prvih rezultata istraživanja pri većim brzinama i specifičnog oblika stvarnih krivulja po kojima se giba težište kotača s ravnim obodom.

Prvi korak u zajedničkome opisu jest istodobno promatranje ovisno o vreme-

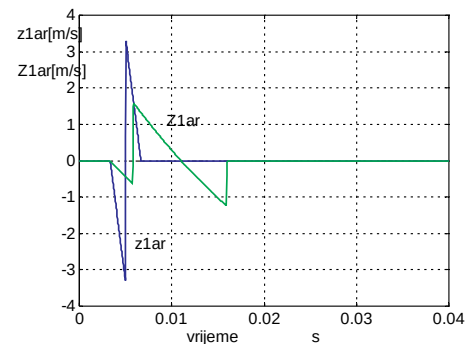
nu t svih dijagrama prema danim naredbama. Rezultati se mogu vidjeti na slikama od 4.1. do 4.5.

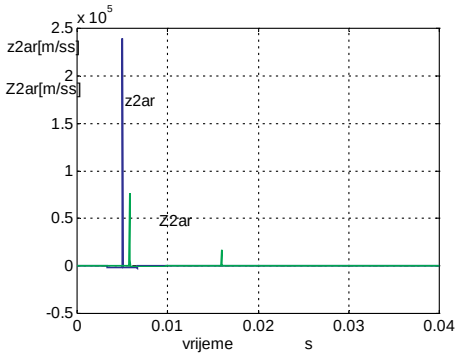
Usporedni dijagrami za vertikalne putove osovine kotača vide se na slici 4.1. Oblik teorijske krivulje gibanja težišta kotača *zar* uz ravni obod poznat je od ranije, a ovdje se generira i daje samo za usporedbu sa stvarnom krivuljom *Zar*.

Stvarna krivulja *Zar* specifičnog je oblika, kao što je prethodno i najavljivano. Od lijeve točke ravnog oboda težište kotača ne može slijediti teorijsku krivulju *zar* jer je apsolutna vrijednost stvarnog ubrzanja *Z2ar* manja od teorijskog ubrzanja *z2ar*.

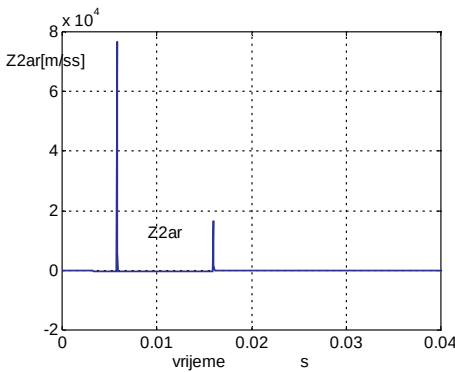
Slika 4.1. Teorijski i stvarni put kao funkcija vremena t kod ravnog oboda

Gibanje težišta kotača na uzlaznome dijelu krivulje i dalje nije po teorijskoj krivulji, već po specifičnoj krivulji, kao što se to može vidjeti na slici 4.1. Kotač će od udara i dobivene pozitivne brzine (slika 4.2.) ponovno izgubiti kontakt s tračnicom i u krivulji sličnoj paraboli nadvisiti svoj redoviti položaj u odnosu na tračnicu i nakon toga pasti na tračnicu. Krivulja je slična paraboli jer je ubrzanje slabo promjenljivo zbog promjena sile ovjesa.

Slika 4.2. Teorijska i stvarna brzina kao funkcije vremena t kod ravnog oboda

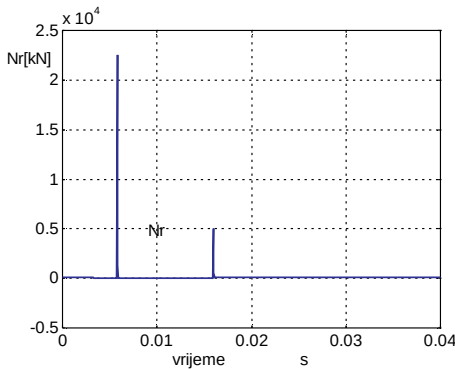


Slika 4.3. Teorijsko i stvarno ubrzanje kao funkcije vremena t kod ravnog oboda kotača



Slika 4.4. Stvarno ubrzanje kao funkcija vremena t kod ravnog oboda

Maksimalne vrijednosti Nr kao udarne sile vrlo su velike. Prvi maksimum je veći od 20 000 kN, a drugi oko 5000 kN. Iz vektora te sile integriranjem po putu mogu se izračunati i energije, ako za to bude interesa kasnije u kompletnim i kompleksnim istraživanjima. Najveća vrijednost sile Nr na dijagramu ipak je prevelika. I kasnije će se to pojaviti i to zato što se u obzir ne uzima realno malo stučeno zaobljenje na rubovima ravnog dijela, već se računa s oštrim rubom. Ta činjenica sigurno smanjuje znatno generirani iznos sile Nr .



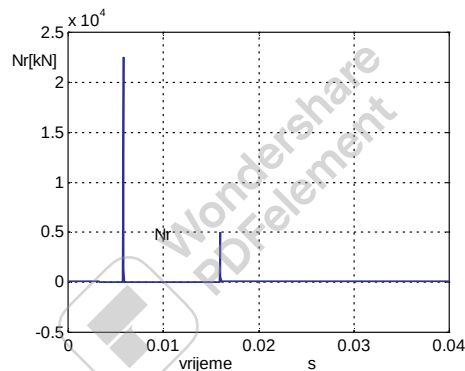
Slika 4.5. Stvarna reakcija tračnice Nr kao funkcija vremena kod ravnog oboda

Model omogućuje crtanje i drugih zanimljivih krivulja gibanja i dinamičkih veličina. Takva dinamička veličina je i zcr kao gibanje desne strane ovještene mase vozila prema slici 2.1.1.

Dijagram te sile vidi se na slici 4.6 prema naredbi

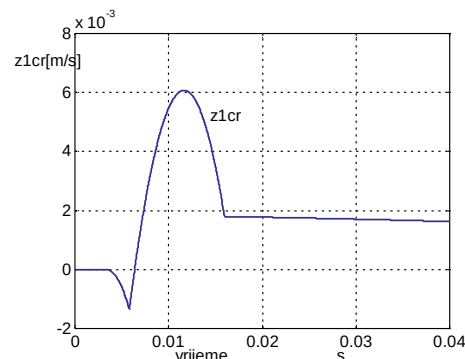
`plot(t,zcr+ICZr).grid`

Na slici 4.6. prikazana je ovisnost puta desne strane ovještene mase zcr o vremenu. Ne daju se početni pomak, statički pomak, ovještene mase i od težine ovještene mase, već samo promjenljivi dio. Prvi dinamički pomak ovještene mase je prema dolje, ali je vrlo mali (desetak mikrona). Masa se potom vraća prema gore i nadvisuje nulti položaj. Ta masa vjerojatno dalje istitrava vlastitom frekvencijom, što bi se moglo vidjeti duljim promatranjem ponašanja na simulacijskome modelu.



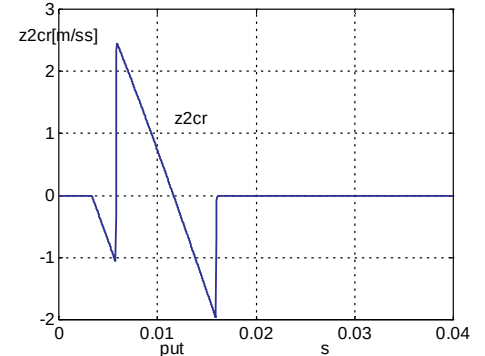
Slika 4.6. Ovisnost pomaka zcr o vremenu t kod ravnog oboda

Na slici 4.7. krivulja vertikalne brzine dijela ovještene mase, brzina $z1cr$ na početku ima negativni smjer, sličan putu neovještene mase, a potom prelazi na pozitivnu vrijednost i smanjuje se na neku vrijednost.



Slika 4.7. Ovisnost brzine $z1cr$ o vremenu t kod ravnog oboda kotača

Prema slici 4.8, ubrzanje $z2cr$ dijela ovještene mase ima pilasti oblik titranja. Najveći pozitivni i negativni iznos ubrzanja su oko 2 m/s^2 .



Slika 4.8. Ovisnost ubrzanja $z2cr$ o vremenu t kod ravnog oboda kotača

To vertikalno ubrzanje sanduka mjera je udobnosti vožnje, koja u ovome slučaju predstavlja neudobnost.

Može se naći i frekvencija toga ubrzanja, ali o tome drugom prilikom.

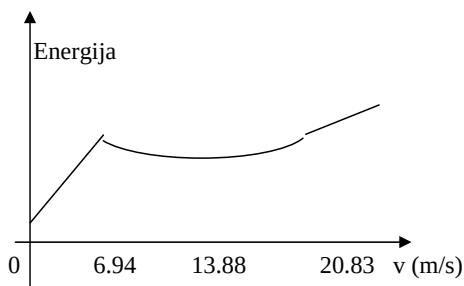
Prvi zadatak u ovome poglavlju bio je provjera funkcioniranja simulacijskog modela gibanja kotača s ravnim obodom pri većim voznim brzinama te demonstriranje velikih mogućnosti prezentacije rezultata simulacije sustava. Na temelju iznesenih rezultata možemo biti zadovoljni postignutim rezultatom ove faze istraživanja.

Izneseni rezultati prvih istraživanja velika su novost u spoznaji prirode gibanja kotača s ravnim obodom, no njihova vjerodostojnost mora se provjeriti mjerenjem na stvarnoj pruzi i na kotaču s ravnim obodom. U paralelnim istraživanjima na simulacijskome modelu i mjerenjem na realnoj pruzi doći će vjerojatno i do međusobnog usklađivanja rezultata mjerenja i simulacije.

5. Primjer korištenja simulacijskog modela u istraživanjima

Empirijski je poznata činjenica da krivulja ovisnosti energije udaraca kotača s ravnim obodom o brzini vozila ima oblik koji je približno prikazan na slici 5.0.

Energija udaraca nije linearna s obzirom na vožnu brzinu, već raste do brzine od $6,94 \text{ m/s}$ (ili 25 km/h), a potom lagano pada do $13,88 \text{ m/s}$ (ili 50 km/h) pa ponovno raste prema povećanju vozne brzine.



Slika 5.0. Približna empirijska krivulja ovisnosti energije udaraca o brzini kod ravnog oboda kotača

Simulacijski model gibanja težišta kotača ravnih oboda može se koristiti za grubu provjeru empirijske ovisnosti energije udaraca o brzini, što je istodobno verifikacija postupka i funkcioniranja simulacijskog modela.

Budući da u ovoj fazi istraživanja nema podataka o numeričkim iznosima energije, ali i zbog pojednostavljenja ove provjere, kao mjera veličine iz modela uzima se maksimalni iznos sile reakcije tračnice Nr na udarce za vozne brzine od 3, 7, 14 i 25 m/s.

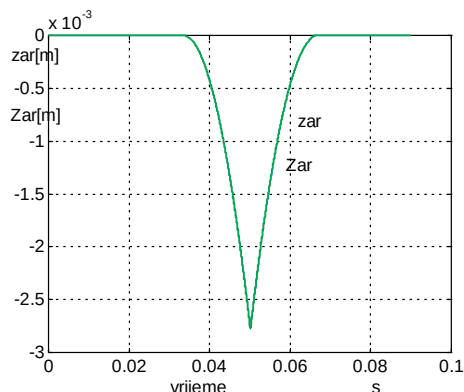
Za izabrane brzine izradit će se usporedni dijagrami teorijskog puta zar i stvarnog puta Zar i izračunati najveći iznos reakcije tračnice Nr .

5.1. Brzina od 3 m/s

Pripadajući početni podatci i parametri za taj slučaj jesu:

$v=3$;
 $a=0.100$; $r=0.45$;
 $xm=0.35$; $tstep=0.0001$; Stop time=0.09
 Gain4: 12000; Constant: - 0.00004

Usporedni dijagram teorijskog i stvarnog puta može se vidjeti na slici 5.1. Brzina je mala i težište kotača može slijediti teorij-



Slika 5.1. Usporedni dijagrami teorijskog i stvarnog puta za $v = 3$ m/s

sku krivulju pa se teorijska i stvarna putanja težišta u cijelosti podudaraju.

Minimalna reakcija tračnice veća je od nule.

Maksimalni iznos reakcije tračnice je
 $\max(Nr)$
 $\text{ans} = 2.4338e+003 \text{ kN}$

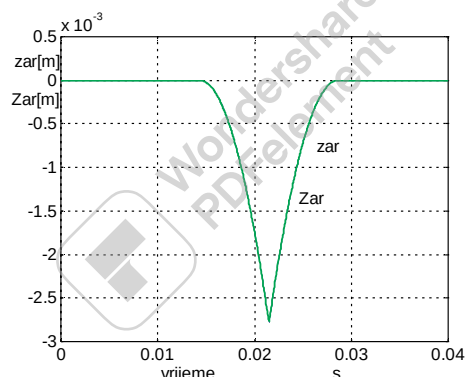
5.2. Brzina od 7 m/s

Pripadajući polazni podatci i parametri jesu:

$v=7$;
 $a=0.100$; $r=0.45$;
 $xm=0.35$; $tstep=0.00004$; Stop time=0.04
 Gain4: 12000; Constant: - 0.00004

Trebalo je samo promijeniti korak integracije odnosno smanjiti ga na $tstep = 0.00004$ s i brzinu povećati na $v=7$ m/s.

Usporedni dijagrami teorijskog i stvarnog puta vide se na slici 5.2.



Slika 5.2. Usporedni dijagrami teorijskog i stvarnog puta za $v = 7$ m/s

Teorijska i stvarna krivulja gibanja težišta kotača izgledaju isto, ali ako bi zumirali donji dio dijagrama, našli bi razliku među njima.

Najmanji iznos reakcije tračnice pada gotovo na nulu:

$\min(Nr)$
 $\text{ans} = 2.9916 \text{ kN}$

dok najveći iznos reakcije iznosi:

$\max(Nr)$
 $\text{ans} = 1.0137e+004 \text{ kN}$

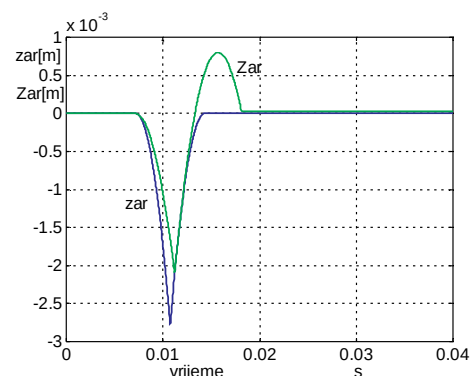
5.3. Brzina od 14 m/s

Pripadajući polazni podatci i parametri jesu:

$v=14$;
 $a=0.100$; $r=0.45$;
 $xm=0.60$; $tstep=0.00004$; Stop time=0.04
 Gain4: 12000; Constant: - 0.00004

U upravljačkoj datoteci trebalo je povećati samo brzinu na $v=14$ m/s.

Usporedni dijagrami teorijskog i stvarnog puta mogu se vidjeti na slici 5.3.



Slika 5.3. Usporedni dijagrami teorijskog i stvarnog puta za $v = 14$ m/s kod ravnog oboda kotača

Teorijska krivulja zar i stvarna krivulja Zar gibanja težišta kotača nisu iste. Kotač preskače, odbija se i pada na tračnicu, pa njegovo težište ima svoju specifičnu putanju.

Računski najmanja reakcija tračnice je oko nule.

Najveći iznos reakcije tračnice je

$\max(Nr)$
 $\text{ans} = 9.3849e+003$

5.4. Brzina od 25 m/s

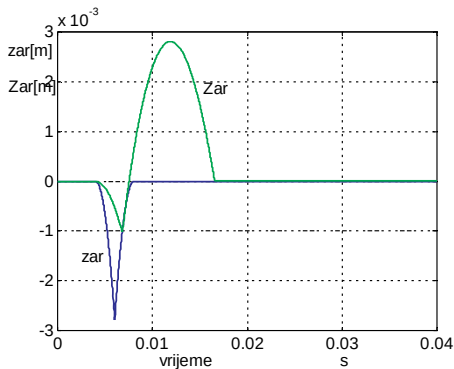
Pripadajući polazni podatci i parametri jesu:

$v=25$;
 $a=0.100$; $r=0.45$;
 $xm=0.60$; $tstep=0.00002$; Stop time=0.04
 Gain4: 12000; Constant: - 0.00004

Trebalo je povećati brzinu, a korak integracije smanjiti na $tstep = 0.00002$.

Usporedni dijagram teorijskog i stvarnog puta može se vidjeti na slici 5.4. Teorijska i stvarna krivulja gibanja težišta kotača

vrlo su različite. Kotač preskače, odbija se i ponovno pada na tračnicu, pa njegovo težište ima specifičnu putanju.



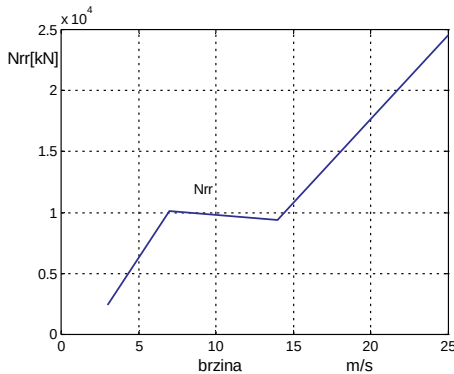
Slika 5.4. Usporedni dijagrami teorijskog i stvarnog puta za $v = 25 \text{ m/s}$

Najveći iznos reakcije tračnice jest:
 $\max(Nr)$
 $\text{ans} = 2.4582\text{e}+004$

Od iznosa odabranih brzina napravi se jedan vektor, a skupe li se svi iznosi najvećih reakcija tračnice, formalno se dobiju vektori vv i Nrr

$vv = [3 \ 7 \ 14 \ 25];$
 $Nrr = [2.4338\text{e}+003 \quad 1.0137\text{e}+004 \quad 9.3849\text{e}+003 \quad 2.4582\text{e}+004];$

Rezultat naredbe `plot(vv,Nrr,grid)` vidi se na slici 5.5.



Slika 5.5. Reakcija tračnice Nr kao funkcija brzine v za ravni obod kotača

Dijagram ovisnosti sile Nr o brzini v dosta je grub, ali ukazuje na sličnosti s ponašanjem krivulje sa slike 5.0. Ako bi se ispitivalo više točaka za brzinu, dobila bi se ljepša krivulja sile Nrr .

Težište istraživanja je na poimanju prirodne gibanja uz ravne obode kotača te na razvoju i funkcionalnosti simulacijskog modela, a odabrani primjeri primjene na istraživanja zakonitosti samog procesa u svim uvjetima i slučajevima samo su ilustracije mogućnosti simulacijskog modela i provjera vjerodostojnosti postupka i simulacijskog modela.

Tijekom istraživanja modela i ponašanja stvarnog sustava vozilo-pruga u slučaju ravnog oboda kotača došlo se na ideju koja bi mogla biti od velike praktične važnosti. To je ideja o finome mjerenju pojave ravnih oboda kotača.

Ideja za fino mjerenje postojanja ravnih oboda na kotačima temelji se na prevoženju optimalnom brzinom od 7 m/s (slika 5.5.) preko odsjeka kolosijeka u radionici ili uz prugu s tračnicama koje su na površini kotrljanja prevučene osjetljivim slojem s davačima za silu te pripadajućim instrumentima za mjerenje sile reakcije tračnice za prolazak kotača.

6. Zaključak

U ovome radu opisan je simulacijski model izveden iz općega simulacijskog modela i razvijen specijalno za promatranje gibanja težišta kotača uz ravne obode kotača, i to ne samo pri malim voznim brzinama već i pri velikim voznim brzinama.

Simulacijski model je postavljen tako da kvalitativno i kvantitativno prezentira tijek fizikalnog procesa vertikalnoga gi-

banja težišta kotača uz ravni obod te se može prilagođavati drugim zahtjevima. Iz fizikalnog procesa poznato je i to da kod većih brzina težište kotača ne uspijeva slijediti teorijsku krivulju gibanja težišta izvedenu za male brzine.

Kotač se na lijevome rubu ravnog dijela oboda gotovo odvajava od tračnice, a težište kotača preskače dio teorijske krivulje za male brzine, sve dok kotač desnim rubom ravnog dijela ne udari u tračnicu.

Fizikalna osnova vertikalnoga gibanja težišta kotača nakon udarca slabo se spominje u literaturi. Simulacijski model bila je prigoda da se njime obuhvati i to gibanje. U radu su prikazani zanimljiva stvarna krivulja gibanja težišta kotača i odgovarajuće ostale veličine gibanja te dinamičke veličine koje proizlaze iz simulacijskog modela i njegove matematičke i logičke osnove.

Pokusna istraživanja ovisnosti reakcije tračnice Nr o brzini v pokazala su slaganje s empirijskim podatcima o ovisnosti energije udarca o brzini, što je i potvrda vjerodostojnosti postupka i simulacijskog modela.

Izneseni rezultati prvih istraživanja velika su novost o prirodi gibanja kotača s ravnim obodom, no oni bi se trebali provjeriti mjerenjem na stvarnoj pruzi i na kotaču s ravnim obodom.

Udarci s ostrim rubom ravnog dijela oboda na tračnice u stvarnosti su nešto slabiji od onih dobivenih u ovome radu. Ti udarci kotača na tračnice opasne su sile za oscilirajući sustav vozilo-pruga i stoga nas obvezuju na daljnja istraživanja njihova djelovanja da bi se racionaliziralo održavanje vozila i pruge te smanjili troškovi eksploatacije.

LITERATURA

- [1] C. Esveld: *Principles of Track Quality Recording and Assessment*, Rail International – January 1992
- [2] S. Janjanin: *Promatranje ponašanja sustava oscilirajućih masa vozilo-pruga na simulacijskom modelu*, Prometni institut Ljubljana, Ljubljana, 1999.
- [3] *Tehnička dokumentacija za okretno postolje*, Tvornica J. Gredelj, Zagreb, 1999.
- [4] *Razni podaci o pruži*, Građevinski fakultet Zagreb, 1999.
- [5] A. Stipetić: *Model željezničkog kolosijeka na čvrstoj podlozi u funkciji velikih brzina, doktorska disertacija*, Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 1993.
- [6] S. Janjanin: *Opći simulacijski model za promatranje ponašanja osovine kotača na neravninama površine valjanja*, Prometni institut Ljubljana, Ljubljana, 1999.

SAŽETAK

NOVE MOGUĆNOSTI SPOZNAJE O RAVNOM OBODU KOTAČA POZNATOM KAO OPASNI ČIMBENIK POREMEĆAJA U DINAMIČKOM SUSTAVU VOZILU-PRUGA

Udarci ravnog oboda kotača u tračnicu opasni su poremećaji u dinamičkom sustavu vozilo-pruga te oštećuju vozilo i prugu.

Dinamički i oscilirajući sustav vozilo-pruga istražuje se od početka korištenja željeznice prema razini spoznaje i znanja te raspoloživosti alata i instrumenata za istraživanja.

U ovome radu dan je simulacijski model koji je izveden iz općega simulacijskog modela i razvijen specijalno za promatranje gibanja težišta kotača i pojava sila opasnih za vozilo i prugu uz ravne obode ne samo za male vozne brzine, nego i za veće vozne brzine. Kratko je navedena i ideja o pogonskome mjerenju i kontroliranju ravnih oboda.

Simulacijski model napravljen je tako da kvalitativno i kvantitativno objašnjava tijek fizikalnog procesa vertikalnoga gibanja osi kotača uz ravni obod i može se prilagođavati drugim zahtjevima.

SUMMARY

NEW POSSIBILITIES OF KNOWLEDGE ABOUT THE FLAT WHEEL KNOWN AS A DANGEROUS FACTOR OF DISRUPTIONS IN THE VEHICLE -TRACK DYNAMIC SYSTEM

Kicks of the flat wheel rim onto the rail are dangerous disruptions in the vehicle-track dynamic system damaging the vehicle and the track.

The dynamic and oscillating vehicle-track system has been the subject of research since the very beginning of rail use depending on the level of comprehension and knowledge, as well as available research tools and instruments.

This work gives a simulation model which was implemented from the general simulation model and developed specially for the observation of the motion of the wheel centre and the occurrence of forces dangerous for the vehicle and track along flat rims not only for low running speeds but also for higher ones. A concept on practical measurement and controlling flat rims is also given.

The simulation model is made in such a way that it gives a qualitative and quantitative explanation of the course of the physical process of vertical motion of the wheel axis along the flat rim and can be adjusted to other requirements.



Najveća članica CIOS grupacije, tvrtka CE-ZA-R, na samom je vrhu hrvatskih neto izvoznika.

u Hrvatskoj i
Bosni i Hercegovini

60+
poslovnih lokacija

1.100
zaposlenih



specijaliziranih vozila
i radnih strojeva

600+



>1.100.000
tona sakupljenog
i obrađenog otpada
godišnje

U bager za utovar i istovar željeznog otpada grupacija je investirala krajem 2022. godine, a prvi je takvoga tipa u uporabi na području Europske unije. Karakterizira ga dohvat "ruke" od čak 40 metara te ima značajnu ulogu u procesu izvoza materijala na međunarodna tržišta.

CIOS GRUPA