

doc. dr. sc. Andreas Schöbel, dipl. ing. građ.  
 Jelena Aksentijević, MA  
 Dražen Vinšćak, dipl. ing. prom.

# SIMULACIJA ŽELJEZNIČKE MREŽE UZ POMOĆ KRONECKEROVE ALGEBRE ZA OPTIMIZACIJU PROTOKA PROMETA

## 1. Uvod

Upravitelj infrastrukture odgovoran je za siguran tijek željezničkog prometa planiranjem iskoristivosti kapaciteta na željezničkoj mreži. Željeznički prometni sustav jedan je od najsigurnijih prometnih sustava [1] s malim postotkom izvanrednih događaja u odnosu na prijeđene kilometre. Nažalost, zbog starosti željezničke infrastrukture i sve snažnijih klimatskih promjena koje utječu na željezničku infrastrukturu može se očekivati to da će se povećati postotak izvanrednih događaja na željezničkoj infrastrukturi u Republici Hrvatskoj.

Prema tome, glavni je cilj projekta GoSAFE RAIL (*Global SAFETY Management Framework for RAIL Operations* – Globalni okvir upravljanja sigurnošću za rad željeznice) razvoj evolucijskog mehanizma za podršku u odlučivanju. Njegova je osnovna zadaća sigurna, pouzdana i učinkovita željeznička infrastruktura.

Primjena alata za mikroskopsku simulaciju rada željeznice na temelju fizičkog i matematičkog modela željeznice jest najnovija tehnologija u razvoju željezničkog prometa. Uobičajeno, takvi alati prikazuju indikatore operativnog učinka kao što su kašnjenja ili potrošnja energije. Do sada optimalno rješenje definirao je korisnik alata, i to tako što su određeni parametri uvedeni u simulaciju i testirani kroz njegovu promjenjivost tijekom simulacije. To je dovelo do propuštenih mogućnosti za pronalaženje optimalnog rješenja na razini cijelog sustava, što je u nastavku doprinijelo tomu da simulacijski programi nisu u mogućnosti sami pronaći optimalno rješenje. Također, simulacijski mehanizmi imaju jedan nedostatak, i to nemogućnost automatske optimizacije kretanja vlaka. Da bi se to nadomjestilo, u sklopu rada željeznice s povećanim opsegom prometa razvijeni su i primijenjeni algoritmi koji uzimaju u obzir sve istodobne relacije vlakova. Primjenom Kroneckerove algebre mikroskopski simulacijski mehanizam poboljšat će protok prometa i procijeniti utjecaj prijedloga za održavanje i obnavljanje. Dio je to podrške upravitelju infrastrukture

prilikom donošenja odluke. Algoritam za izračunavanje optimalne strategije vožnje i optimizaciju ukupnoga željezničkog sustava temeljen je na doktorskoj disertaciji „Energetski efikasna optimizacija rada na željeznici. Algoritam zasnovan na Kroneckerovoj algebri“ [10].

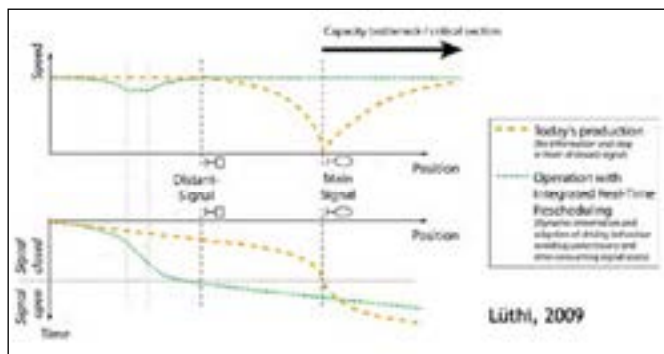
Mikrosimulacijom mehanizma OpenTrack za modulaciju razvit će se prometni model koji će koristiti algoritme optimizacije s više kriterija kako bi se riješili složeni zahtjevi za putnički i teretni prijevoz. Korištenjem Kroneckerove algebre [3], koja je pokazala dobre rezultate prilikom rješavanja optimizacijskih scenarija tijekom željezničkog prometa, osobito kada se radi o izbjegavanju tzv. uskih grla i konflikata, simulirat će se realan rad željezničke mreže na trasi između Zagreba i Rijeke u Hrvatskoj.

Ulazne podatke koji se koriste za optimizacijski mehanizam za tijek prometa definiraju dvije komponente, i to trenutačne karakteristike željezničkog sustava, infrastrukture te voznog parka i voznog reda koje su temelj za daljnje proračune te upraviteljeva identifikacija i procjena ograničene dostupnosti infrastrukturnih sredstava. Te dvije komponente integrirat će se korištenjem mehanizma za simulaciju OpenTrack za vizualizaciju svih postojećih podataka, a dalje će biti obrađene u konkretnu sintaksu za ulazne datoteke neophodne za optimizacijski mehanizam. Ovaj rad bavi se ulaznim podacima neophodnima za buduće proračune optimizacije.

## 2. Motivacija za simulaciju

Glavna je motivacija za novo, dinamično preraspoređivanje izbjegavanje nepotrebnog i dugotrajnog zaustavljanja. Naime, omogućavanje prilagođavanja ponašanja strojovođa promjenjivome okružju rezultirat će izbjegavanjem tzv. uskih grla, a samim tim smanjenjem kašnjenja te povećanjem kapaciteta [4]. Protok podataka u simulaciji željezničkih operacija sa sadašnjom produkcijom i opsegom rada te s integriranim preraspoređivanjem u realnome vremenu prikazan je na slici 1.

Prvi korak u korištenju računalnih modela za željezničko planiranje jest kalibriranje osnovnog modela. Taj bi model trebao točno odražavati promatrane željezničke operacije na postojećoj infrastrukturi, voznome parku i voznome redu. Odmah po završetku kalibracije model se može koristiti za ispitivanje raznih problema, uključujući procjenu stabilnosti novoga voznog reda, određivanje minimalnih infrastrukturnih potreba za dani vozni red ili evaluaciju učinka promjena u voznome parku. Bitna beneficija modela jest njihova mogućnost da procijene učinak incidenata ili vremenskih promjena na mreži (npr. sanacija mreže) na željezničku operativu.



Slika 1. Operativan učinak bez preraspoređivanja u realnome vremenu i s njim

Računalna simulacija vrlo je važna za željezničko planiranje. Jednom razvijeni i kalibrirani modeli mogu se koristiti radi lakšeg modeliranja i planiranja cijele mreže u vrlo kratkom roku. Ručno analiziranje više od jednog paketa za poboljšanje trajalo bi predugo. To znači da učinkoviti željeznički simulacijski modeli omogućuju planerima da identificiraju i ocijene više alternativa, dovodeći do kreativnijih i razumljivijih rješenja problema.

Dok se računalna simulacija smatra izvanrednim alatom za analizu i planiranje željezničke mreže, programi za simulaciju željezničke mreže imaju određena ograničenja:

- Programi moraju biti važeći za trenutačne okolnosti.
- Manevarske operacije moraju biti simulirane odvojeno.
- Ograničenja u resursima kao što je raspored zaposlenih u većini su slučajeva zanemarena, iako ih određeni specijalizirani softveri uzimaju u obzir.
- Simulacija uključuje samo područje izgrađeno u modelu.
- Pojednostavljuvanjem pretpostavki kreiraju se iluzija i optimizam o zagušenju, pridržavanju rasporeda i oporavku. [5]

Imajući u vidu ta ograničenja, posebno posljednje, vrlo je važno to da se rezultati simulacije pažljivo pregledaju, razmotre i usporede s realnošću.

### 3. Softver OpenTrack za simulaciju željezničkog prometa

OpenTrack jest softver za mikrosimulaciju željezničkog prometa. On simulira ponašanje svih elemenata željeznice (infrastrukturne mreže, voznog parka

i voznog reda), kao i sve procese među njima. Može se vrlo lako koristiti i za razne projekte, uključujući i testiranje stabilnosti novoga voznog reda, procjenu beneficija različitih dugoročnih infrastrukturnih paketa za poboljšanje i analizu učinka promjene voznog parka.

#### 3.1. Opendtrack

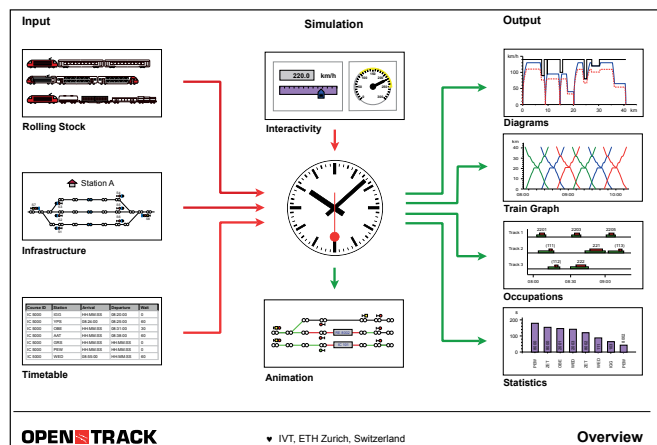
Na slici 1. prikazana su tri glavna elementa OpenTracka: ulazni podaci, simulacija i izlazni podaci.

##### 3.1.1. Ulazni podaci

OpenTrack upravlja ulaznim podacima u tri modula: vozni park (vlakovi), infrastruktura i vozni red. Podatke treba unijeti samo jednom i oni se mogu koristiti za razne projekte simulacije.

Vlakovi (lokomotive i vagoni) i vozni red uneseni su u OpenTrackovu bazu podataka u formatu koji je vrlo lagan za korištenje i koji uključuje prečice koje omogućuju učinkovit ulazak. Na primjer, korisnik kao ulazni podatak može definirati vlakove koji voze svakog sata i koji imaju isti raspored službenih mjesta za stajanje. Infrastrukturni podaci (npr. izgled trase, signali tip/lokacija) uneseni su uz pomoć grafičkog sučelja lakog za korištenje, a kvantitativni infrastrukturni podaci (npr. nagib) dodaju se uz pomoć unosnih formata koji su povezani s grafičkim elementima. Budući da OpenTrack koristi railML[8] strukturu, podaci o voznome redu, vlakovima i infrastrukturi mogu se izravno unijeti iz railML baze podatke.

Druga prednost OpenTracka jest to što omogućava korisniku da prilagodi razne parametre koji utječu na eksploataciju željezničkog prometa. Na primjer, korisnik može simulirati utjecaj vremena na vuču uz definiciju adhezijskog scenarija (dobar, normalan, loš).



Slika 2. Promet podataka u simulaciji željezničkih operacija

### 3.1.2. Simulacija

Tijekom simulacije vlakovi na prugama pokušavaju ostvariti unaprijed određeni vozni red. Podaci o kretanju vlakova dobivaju se rješavanjem diferencijalne jednadžbe za kretanje, tj. iz maksimalne snage vlaka, otpornih sila i parametara pruge dobit će se maksimalno moguće ubrzanje po jedinici vremena. Integracijom funkcije ubrzanja dobiva se brzina, a još jednom integracijom prijedeni put vlaka. Kolodvorska postrojenja, čija je funkcija omogućiti sigurnost vlakova i pruga, imaju dodatni utjecaj na kretanje vlaka (npr. zauzetost blokovnih prostornih odsjeka ili ograničenje informacija na signalima). Tijekom simulacije prikupljaju se podaci (npr. ubrzanje, brzina i razmak) o svakome vlaku na cijeloj dionici kako bi se poslije iskoristili za razne analize i izvještaje. Simulacija može biti predstavljena kao model animacije, i to tako da korisnik vidi sve vlakove, zauzete i rezervirane prostorne odsjeke i stanje svih signalno-sigurnosnih infrastrukturnih podsustava.

### 3.1.3. Izlazni podaci

Velika prednost korištenja objektno orijentiranog jezika jest velika raznovrsnost vrsta podataka, formata prezentacije i specifikacija koje korisniku stoje na raspolaganju. Tijekom simulacije svaki vlak hrani virtualni tahograf (bazu izlaznih podataka) koji čuva podatke kao što su ubrzanje, brzina i prijedena dionica. Čuvanje podataka na taj način omogućava korisniku da provede različite vrste analiza po završetku simulacije.

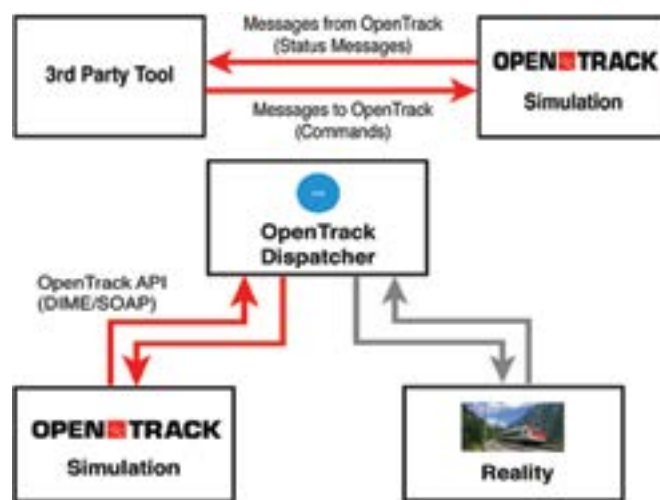
OpenTrack pruža mogućnost prezentiranja podataka u različitim formatima, uključujući razne vrste grafika (npr. vrijeme – put dijagrami), tablice i slike. Slično tomu, korisnici mogu izabrati žele li modelirati cijelu mrežu ili samo njezine određene dijelove, ovisno o potrebama. Izlazni podaci mogu se koristiti ili za dokumentaciju određenog scenarija simulacije ili kao privremeni podatak koji se koristi kao pomoć pri identifikaciji modifikacije parametara za drugi scenarij simulacije [7].

## 3.2. OpenTrack i API

Open Track sučelje za programiranje aplikacija (API – *Application Programming Interface*) u mogućnosti je komunicirati s aplikacijama treće strane. Kao što je prikazano na slici 4, OpenTrack prihvaća komande (poruke koje se šalju programu OpenTrack) i šalje statusne poruke (poruke koje šalje program OpenTrack). Najvažnije jest to što su te poruke dizajnirane tako da odgovaraju porukama koje su razmijenjene u realnome/stvarnome željezničkom sustavu, između vlakova ili prometnog osoblja. Na primjer, poruka primljena od programa OpenTrack može biti vezana uz vlak, vozni red, zakrčenje/trasu, dolazno ili polazno vrijeme iz

službenog mjesta, međusobne poruke (*interlocking messages*) i drugo. S druge strane OpenTrack šalje komande za brzinu, promjenu voznog reda i dispečerske odluke (*dispatching decisions*) koje su rezultat dinamičke simulacije. Na slici 4. prikazan je primjer OpenTrack dispečera. U ovome slučaju OpenTrack djeluje kao zamjena za realni sustav. Naime, komande (poruke) idu u program OpenTrack, a statusne poruke stižu iz OpenTracka (željezničke tehnologije OpenTrack).

Aplikacija OpenTrack API nudi neograničen broj mogućnosti, počevši od implementacije algoritama specifičnih za korisnike do dubinske procjene rada željeznice, veza između vlakova i njihove cirkulacije. Međutim, za projekt GoSAFE RAIL najvažnija je mogućnost razvoja i analize novih koncepata kontrole vlakova kao što su optimizacija energetske potrošnje, smanjenje kašnjenja i izbjegavanje tzv. uskih grla i konflikata. To će pružiti podršku upraviteljima infrastrukture u postizanju maksimalne količine vremenskih intervala za željezničke prijevoznike i njihovo točno funkcioniranje po voznome redu (*punctual* – stići na vreme). Konačni je cilj to da simulacija realnosti/stvarnosti dokaže to da algoritam optimizacije pruža odgovarajuća rješenja u kratkome vremenskom periodu.



Slika 3. Primjer primjene aplikacije Open Track API

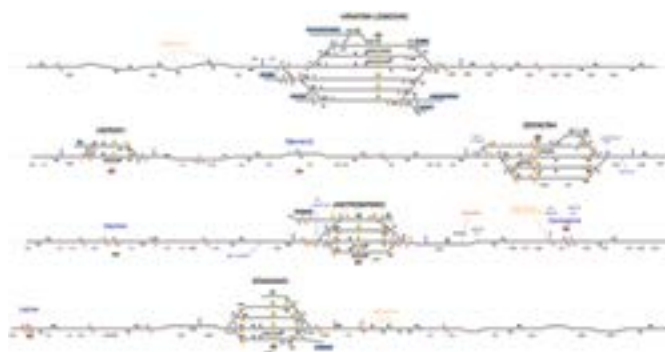
## 4. Studija slučaja: dionica Zagreb – Rijeka

U suradnji s HŽ Infrastrukturom za studiju slučaja izabrana je dionica Zagreb – Rijeka. Prvi je razlog važnost te dionice u domaćemu prijevozu, a drugi, i puno važniji taj što pripada TEN-T koridoru.

Na slikama 4. i 5. prikazani su primjeri infrastrukture za studiju slučaja. Kao što se to može vidjeti u grafičkim reprezentacijama topologije, infrastrukturni su podaci



Slika 4. Infrastruktura u OpenTracku: Zagreb Glavni kolodvor



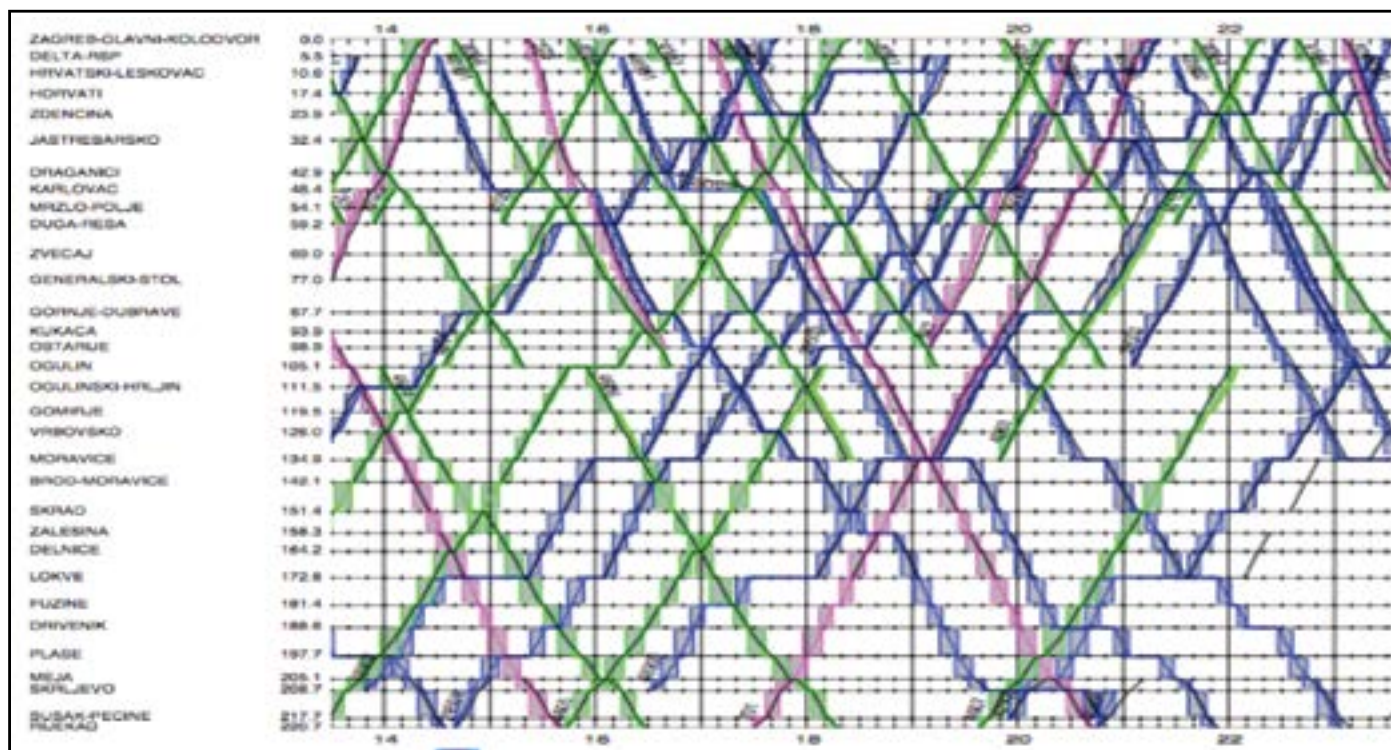
Slika 5. Infrastruktura u OpenTracku: Hrvatski Leskovac – Draganići

uspješno uneseni u OpenTrack. To se može vidjeti na slici 4., na kojoj je detaljno prikazan Zagreb Glavni kolodvor, dok je na slici 5. prikazan dio mreže izabrane za studiju slučaja odnosno dionica od Hrvatskog Leskovca preko Horvata, Jastrebarskog i Draganića do Karlovca.

Topologija infrastrukture uključuje sve podatke o signalima, službenim mjestima, nagibu i profilu brzina za svaku kilometarsku točku.

Na slici 6. prikazan je grafički prikaz voznog reda vlakova različitih kategorija između Zagreba Glavnog kolodvora i Rijeke između 14.00 i 23.00 sata. Ružičastom bojom prikazani su brzi putnički vlakovi, zelenom regionalni putnički vlakovi, a plavom teretni vlakovi.

Sljedeći koraci uključuju definiranje scenarija za testiranje i samo testiranje integracije algoritma u alatu za mikrosimulaciju izabranog scenarija. Scenarij će uključiti zatvaranje kolosijeka radi obnove u jednom ili više određenih vremenskih intervala, na primjer, kada vozi manje vlakova ili više teretnih i manje putničkih. Sljedeća razina može uključivati određivanje dionice sa smanjenom brzinom zbog neodržavanja bilo kojeg elementa na dionici. Ti će scenariji biti testirani korištenjem Kroneckerove algebre za automatsku optimizaciju u cilju minimalizacije zakašnjenja prouzrokovanih različitim prekidima eksploatacije.



Slika 6. Grafički prikaz voznog reda u OpenTracku: Zagreb Glavni kolodvor – Rijeka

## 5. Zaključak

Projekat GoSAFE RAIL nudi mogućnost otklanjanja iznenadnih problema na željezničkoj infrastrukturi. OpenTrack će kao program za mikrosimulaciju s API funkcijom omogućiti analizu učinaka sigurnosnih odluka na kapacitet mreže. Uz povezivanje infrastrukturnih elemenata (npr. pruga, mostova i tunela) i prometa (npr. vlakova) bit će omogućeni učinkoviti rezultati održavanja ili novih radova uz maksimizaciju povezanosti i fleksibilnosti cijelog sustava.

Konačno, maksimizacija dostupnosti prometne mreže dovodi do minimizacije ekološkog učinka kao što su emisija ugljikova dioksida i smanjenje kašnjenja do 40 posto. Projekat GoSAFE RAIL financira se iz programa Horizon 2020 za istraživanje i inovacije Europske unije Shift2Rail pod brojem 730817 (*Ac-knowledgment*).

## Literatura:

- [1] European Railway Agency, Intermediate report on the development of railway safety in the European Union 2013.
- [2] GoSAFE Rail project: <http://shift2rail.org/projects/GoSAFE-rail/>
- [3] Mittermayr, R., Blieberger, J. and Schöbel, A. 2012. Kronecker algebra-based deadlock analysis for railway systems. *Traffic Planning*. 24(5): 359-369.
- [4] Luethi M. (2009): Structure and Simulation Evaluation of an Integrated Real-Time Rescheduling System for Railway Networks, *Journal of Networks and Spatial Economics*, vol 9, Issue 1, pp. 103-121.
- [5] Gibson, J. Train Performance Calculators and Simulation Models. Handout, Transportation Research Board, "TRB Workshop on Railroad Capacity and Corridor Planning." January 13, 2002.
- [6] Huerlimann, D. Object oriented modeling in railways; ETH Dissertation Nr. 14281; 2001 (in German).
- [7] OpenTrack Railway Technology: [www.opentrack.at](http://www.opentrack.at)
- [8] railML: [www.railml.org](http://www.railml.org)
- [9] Huerlimann, D. and Nash, A. OpenTrack – Simulation of Railway Networks. User Manual Version 1.3; ETH Zurich, Institute for Transportation Planning and Systems; May 2003; Page 58.
- [10] Volcic, M. 2014. Energy-efficient Optimization of Railway Operation: An Algorithm on Kronecker Algebra. Dissertation: Vienna University of Technology.

## UDK: 656.22

Adresa autora:

doc. dr. sc. Andreas Schöbel, dipl. ing. građ.  
andreas.schoebel@tuwien.ac.at

Jelena Aksentijević, MA  
jelena.aksentijevic@voestalpine.com

Dražen Vinšćak, dipl. ing. prom.  
drazen.vinscak@hzinfra.hr

### SAŽETAK

*U sklopu projekta GoSAFE RAIL jedan radni paket posvećen je razvoju integriranog modela željezničke mreže koji će inkorporirati podatke o infrastrukturnim resursima kako bi omogućio sigurnu, pouzdanu i učinkovitu željezničku infrastrukturu. Uz pomoć mehanizma za simulaciju mikrorazina OpenTrack omogućuje optimizaciju kapaciteta i maksimalnu dostupnost mreže. Do sada optimizaciju su unaprijed definirali korisnici te je testirana, što je dovelo do propuštenih optimalnih rješenja. Taj modelacijski alat bit će u stanju dinamički optimizirati operacije, osobito tijekom degradiranog rada, koristeći algoritme optimizacije s više kriterija za rješavanje složenih zahtjeva. Korištenjem Kroneckerove algebre za optimizaciju, kao i programskog sučelja aplikativnog softvera (API) u sklopu studije željezničke mreže Zagreb – Rijeka, simulirano je ponašanje stvarnih protoka mreže kao dokaz o prihvatljivosti rješenja danih algoritmom.*

**Ključne riječi:** mikrosimulacija, rad željeznice, model protoka prometa, održavanje infrastrukture, algoritam optimizacije

**Kategorizacija:** stručni rad

### SUMMARY

*SIMULATION OF RAILWAY NETWORK USING KRONECKER ALGEBRA FOR OPTIMIZATION OF THE TRANSPORT FLOW*

*As a part of the project GoSAFE RAIL, one working package is dedicated to the development of the integrated model of the railway network which will incorporate the data on infrastructural resources in order to enable the safe, reliable and efficient railway infrastructure. Using the mechanism for simulation of micro-levels OpenTrack enables the optimization of the capacity and maximum availability of the network. Until now the optimization was defined in advance by the users and it was tested, which led to the missed optimum solutions. This modelling tool will be able to dynamically optimize the operations, especially during the degraded operations, using the algorithms for optimization with multiple criteria for solution of complicated requests. Using the Kronecker algebra for optimization as well as the programme interface of application software (API) as a part of the study of the railway network Zagreb – Rijeka, the behaviour of the real flows of the network was simulated as the proof on the acceptability of the solutions given by the algorithm.*

**Key words:** micro simulation, operation of the railway line, model of transport flow, maintenance of infrastructure, algorithm of optimization

**Categorization:** expert paper