

Primljen / Received: 17.12.2014.

Ispravljen / Corrected: 28.1.2015.

Prihvaćen / Accepted: 7.2.2015.

Dostupno online / Available online: 10.4.2015.

Analiza degradacije kolosijeka u sklopu sustava za upravljanje održavanjem željezničke infrastrukture

Autori:



Doc.dr.sc. **Stanislav Jovanović**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Novom Sadu
Fakultet tehničkih znanosti
Zavod za građevinarstvo i geodeziju
stasha.jovanovic@gmail.com



Izv.prof.dr.sc. **Hakan Guler**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Sakarya, Turska
Zavod za građevinarstvo
hguler@sakarya.edu.tr



Mr.sc. **Boško Čoko**, dipl.ing.građ.
Prometni institut CIP
Beograd, Srbija
bosko.coko@gmail.com

Pregledni rad

Stanislav Jovanović, Hakan Guler, Boško Čoko

Analiza degradacije kolosijeka u sklopu sustava za upravljanje održavanjem željezničke infrastrukture

Stanje elemenata željezničke infrastrukture ključni je faktor koji utječe na sigurnost prometa, raspoloživost infrastrukture, ukupne troškove radova na održavanju i remontu, kao i prihode. Mjerenje i analiza stanja elemenata željezničke infrastrukture je jedini ispravan pristup kako bi se na učinkovit način pratilo njihovo ponašanje te planirali radovi na održavanju. U radu se opisuje optimalna struktura sustava za upravljanje održavanjem željezničke infrastrukture (Railway Maintenance Management System - RMMS) s posebnim osvrtom na primjenu modela degradacije kao jednog od ključnih dijelova RMMS-a.

Ključne riječi:

upravljanje, održavanje, željeznička infrastruktura, modeliranje degradacije kolosijeka

Subject review

Stanislav Jovanović, Hakan Guler, Boško Čoko

Track degradation analysis in the scope of railway infrastructure maintenance management systems

The condition of railway infrastructure elements is the key factor influencing the traffic safety, infrastructure availability, total maintenance and renewal costs, and revenues. The measurement and analysis of the condition of railway infrastructure elements is the only correct approach enabling an efficient monitoring of their behaviour and proper planning of maintenance activities. An optimum structure of the railway Maintenance Management System - RMMS is presented in the paper, with a special emphasis on the utilization of deterioration models, as one of the RMMS's key components.

Key words:

management, maintenance, railways infrastructure, track degradation modelling

Übersichtsarbeit

Stanislav Jovanović, Hakan Guler, Boško Čoko

Analyse der Degradierung von Gleisen im Rahmen des Verwaltungssystems zur Erhaltung der Eisenbahninfrastruktur

Der Zustand einzelner Elemente der Eisenbahninfrastruktur beeinflusst wesentlich die Verkehrssicherheit, die Verfügbarkeit der Infrastruktur, die gesamten Kosten der Erhaltungs- und Überholungsarbeiten, sowie den Umsatz. Einzig durch Messungen und Analysen ist es möglich, das Verhalten dieser Elemente wirksam zu verfolgen und die Wartungsarbeiten zu planen. In dieser Arbeit wird die optimale Struktur des Verwaltungssystems zur Erhaltung von Eisenbahnen (Railway Maintenance Management System - RMMS) beschrieben, und insbesondere die Anwendung des Degradationsmodells, eines der wesentlichen Bestandteile des RMMS, erläutert.

Schlüsselwörter:

Verwaltung, Instandhaltung, Eisenbahnen Infrastruktur, Modellierung der Zustandsdegradation

1. Uvod

Održavanje i remont železničke infrastrukture zahtijevaju značajne investicije. Prosječni godišnji troškovi održavanja jednog kilometra pruga zapadnoeuropskih željeznica iznose oko 50.000 eura [1]. Da bi se elementi željezničke infrastrukture održali u zadovoljavajućem stanju, mora se pravilno razumjeti način na koji se mijenja stanje svakog od elemenata. Razumijevanje te promjene stanja zapravo znači razumjeti ponašanje elemenata željezničke infrastrukture, što dalje omogućava njegovo predviđanje u budućnosti. Da bi se utvrđeno (izmjereno) stanje u prošlosti moglo dovesti u vezu s prognoziranim ponašanjem u budućnosti, potrebni su tzv. modeli degradacije. Ugradnja tih modela u odgovarajući, snažan, ali i fleksibilan sustav za upravljanje održavanjem željezničke infrastrukture (eng. *Railway Maintenance Management System - RMMS*) omogućava željeznicama provoditi dugoročne simulacije ponašanja elemenata željezničke infrastrukture, koje onda omogućavaju uravnoteženje postignutog (prognoziranog) ponašanja s troškovima radova na održavanju i remontima izvedenim da se to ponašanje/stanje postigne. To se odnosi i na nadzor i druge posljedice stanja elemenata željezničke infrastrukture, kao što su prekidi prometa, smanjenje dostupnosti pruge, itd. Takve simulacije mogu donijeti znatne uštede ukupnih troškova održavanja i remonta. S obzirom na današnje željezničko okruženje, ekonomična željeznička infrastruktura može se osigurati jedino redovnim nadgledanjem i mjerenjem stanja i svojstava elemenata željezničke infrastrukture, kao i primjenom pouzdanih metoda za predviđanje, planiranje i optimizaciju. Sve su to glavni ciljevi pravilno projektiranog RMMS-a. Njegova struktura objasniti će se na primjeru (i to samo za neke specifične aspekte, npr. vizualizacije) sustava "TrackIT" i "AMA" (eng. *Automated Maintenance Advisor*) tvrtke EnSCO Inc., USA, od kojih je drugi sustav osmislio, za potrebe tvrtke EnSCO, prvi autor ovog rada.

1.1. Funkcionalna organizacija RMMS-a

Kako bi zadovoljio složenu kombinaciju zahtjeva koji se pred njega postavljaju, RMMS mora biti osmišljen kao izrazito modularan sustav, kod kojeg su svi moduli potpuno nezavisni i tako "razdvojivi", s jedne strane, tj. primjenljivi pojedinačno i nezavisno, i/ili u bilo kojoj kombinaciji, ali također s druge strane u potpunosti objedinjeni i sposobni funkcionirati skladno zajedno, kada je to potrebno. Modularna struktura prikazana je na slici 1. Prema prikazu na slici 1. slijedi popis svih ključnih RMMS modula i opis njihove funkcionalnosti.

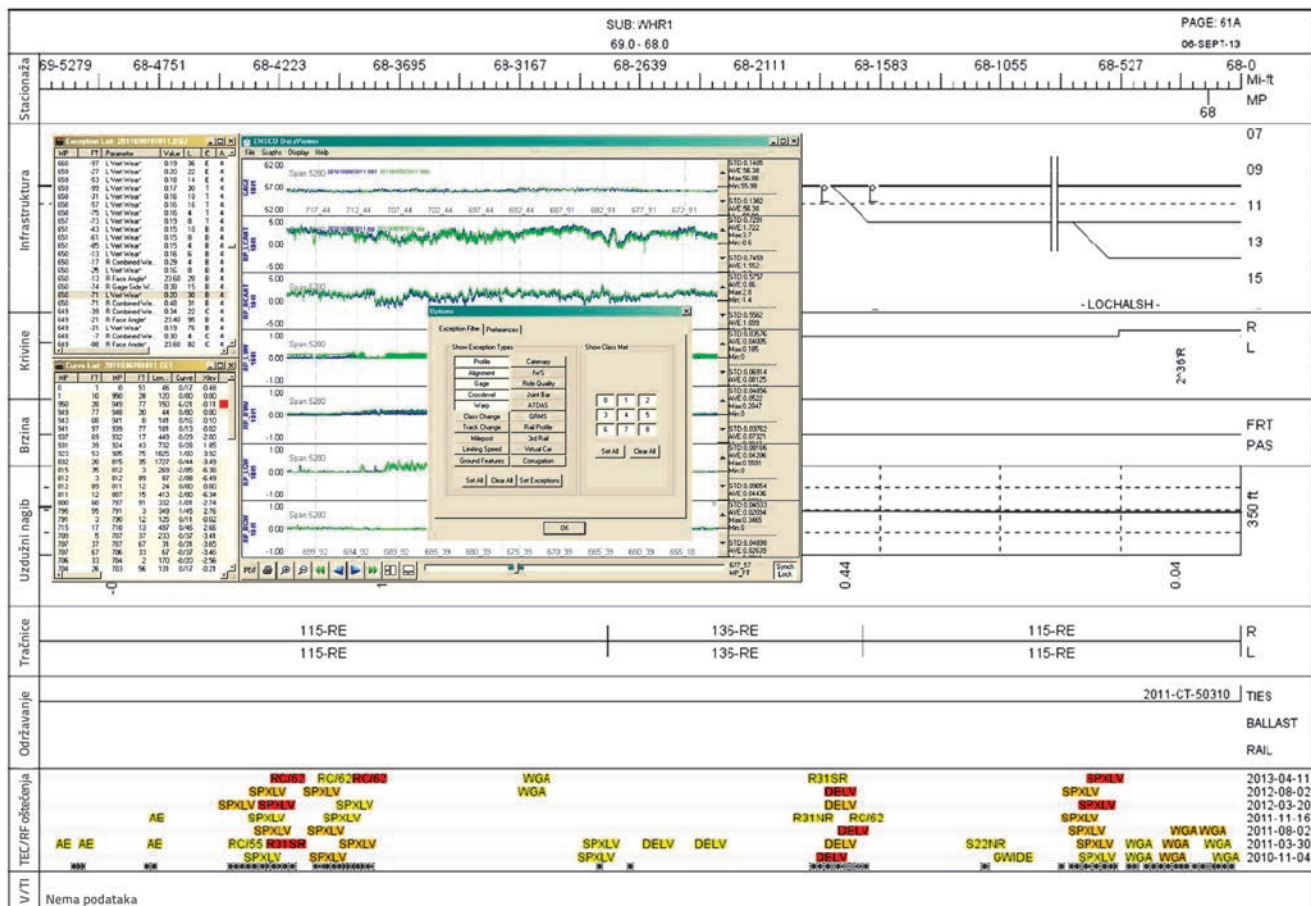
- Potpuno fleksibilna struktura baze podataka omogućava punu slobodu u uključivanju (ili povezivanju) svih podataka u što većem broju različitih formata. Time se znatno olakšava proces povezivanja s vanjskim sustavima (npr. Enterprise Resource Planning - ERP i Enterprise Asset Management - EAM), sustavima i/ili bazama podataka, kao i sustavima za nadgledanje/mjerenje stanja elemenata željezničke infrastrukture.
- Navode se svi dijelovi elemenata željezničke infrastrukture: njihove lokacije, karakteristike (npr. tipovi tračnica, pragova, zastora, pričvrstnog pribora, kontaktne mreže i kontaktnog voda, "treće tračnice"/provodnika, itd.), datumi ugradnje (što omogućava izračunavanje njihove starosti i akumuliranog prometnog opterećenja), informacije o elementima poprečnog presjeka, krivinama, prijelaznicama, uzdužnim nagibima, prijelomima nivelete, uporabne informacije o brzinama, osovinskim opterećenjima, godišnjim prometnim opterećenjima, kao i informacije o stanju (npr. sve vrste mjerenja i kontrola, izvedene pomoću mjernih vozila i/ili vizualno ophodnjom pruge) kao i sve aktivnosti (npr. radovi na održavanju i remontima, kontrole, itd.).
- Imaju sposobnost modeliranja željezničke infrastrukture kao linijsko prostornog objekta (npr. tračnice, pragovi, zastor, kontaktna mreža), koristeći "vezne/linijske" ("link") i "čvorne/točkaste" ("node") objekte (npr. skretnice i križišta, cestovni



Slika 1. Modularna struktura sustava za upravljanje održavanjem željezničke infrastrukture (RMMS-a)

- prijelazi, mostovi, propusti) preko stacionaže, i sve njihove komponente.
- Omogućava se linijsko prostorno (L-P) referenciranje svih "distribuiranih" karakteristika linijskih objekata (npr. tip tračnice i tip pragova, geometrija kolosijeka, profil tračnice, naboranost tračnice, geometrija i istrošenost kontaktnog voda).
- Imaju sposobnost korištenja i GPS koordinata i stacionaže za referenciranje elemenata željezničke infrastrukture s mogućnošću generiranja tematskih karti baziranih na GIS tehnologiji (Geografski informacijski sustavi).
- Omogućena je vizualizacija - fleksibilna, inteligentna i međusobno povezana vizualizacija svih elemenata željezničke infrastrukture prisutnih u inventaru i njihovih karakteristika, elemenata presjeka i profila, parametara stanja i uporabljivosti, planova radova na održavanju i remontima, fotografija i video zapisa, itd., s punom mogućnošću modifikacije od strane korisnika.
- Omogućena je snažna, ali i fleksibilna segmentacija - po željama korisnika, promjenjiva, s neograničenim brojem kriterija i ovisnosti, zapravo provodeći "diskretizaciju", tj. konverziju linijsko/prostornih objekata u infrastrukturne segmente, tj. singularne/točkaste objekte.
- Sofisticirano, ali fleksibilno opće modeliranje degradacije i restauracije stanja - primjenjivo je na sve elemente

- željezničke infrastrukture i njihove parametre stanja (npr. profil tračnice, bilo koji od parametara geometrije kolosijeka, geometriju i trošenje kontaktnog voda, itd.) uz primjenu linearnih i nelinearnih krivulja degradacije, kao i mogućnosti predviđanja kratkoročnog i dugoročnog ponašanja elemenata željezničke infrastrukture i posljedičnog planiranja radova na održavanju i remontima
- Postoji algoritam za logičko zaključivanje, tj. softverski alat za potpuno fleksibilno oblikovanje "Pravila odlučivanja" (eng. Decision Rules) i "ograničenja" (graničnih vrijednosti) za ponašanje parametara stanja (tj. fleksibilna pravila odlučivanja koje korisnik može slobodno oblikovati i modificirati, a koji koriste modele degradacije (u okviru, i uz pomoć, "urednika pravila"); mogućnost planiranja bilo kojih aktivnosti (npr. radova na održavanju i remontu ili kontrola, itd.) i izbora bilo kojih od već prije oblikovanih pravila odlučivanja iz standardne baze pravila; sposobnost za oblikovanje tzv. službenih i neslužbenih pravila odlučivanja (gdje se službena pravila odlučivanja koriste za definiranje službenih planova radova na održavanju i remontu, a neslužbena se koriste za trening i virtualno planiranje); mogućnost izrade simulacija.
- Omogućava se automatsko planiranje i logičko grupiranje (optimizacija) radova na održavanju i remontu te podrška proračunu resursa za takve aktivnosti



Slika 2. RMMS vizualizacija

- Postoje široke mogućnosti upravljanja čitavom željezničkom mrežom, alati za izvještavanje i statistički alati, mogućnost izvoza podataka u druge softverske alate, uz punu fleksibilnost u svakom od koraka i mogućnost korisnika da definiraju nove ili modificiraju stare alate i formate.
- Omogućene su simulacije - ispitivanja različitih politika održavanja i remonta, različitih standarda i strategija te ocjena njihovih rezultata u smislu odnosa postignute (prognozirane) kvalitete elemenata željezničke infrastrukture i potrebnih troškova za njihovu realizaciju, u kratkoročnom i u dugoročnom planu.

Funkcionalnosti za analizu podataka u okviru RMMS-a su obično podijeljene u dvije razine, [2]:

- analize niže razine
- analize više razine.

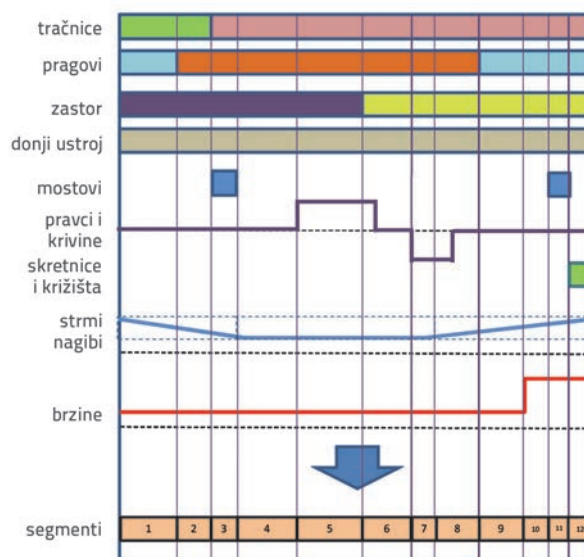
Analize niže razine - predstavljaju ručne detaljne analize (obično kraćih dionica kolosijeka i u kratkoročnom smislu) bilo kojih od parametara stanja, nezavisno ili "unakrsno" s bilo kojim brojem drugih parametara. Izvode se obično od strane korisnika tipa "Planer" ili "Promatrač" (eng. *Viewer*) putem jednostavnog uključivanja danih parametara stanja, ili elemenata željezničke infrastrukture i njihovih karakteristika, ili povijesti (ili nacрта) radova na održavanju i remontima, itd., u prostoru za vizualizaciju i dolaska do zaključaka jednostavnim opažanjem i/ili korištenjem dodatnih vizualizacijskih alata (slika 2.).

Analiza podataka mora biti izuzetno laka i intuitivna. Korisniku mora biti omogućeno da podatke organizira u bilo kojem željenom redoslijedu, da ih preklopi i kombinira na bilo koji način, kako bi se omogućio besprijekoran pregled situacije i uočile anomalije na elementima željezničke infrastrukture, npr. prekoračenja određenih graničnih vrijednosti, lokalna grupiranja defekata, i sl.

Analize više razine - predstavljaju automatske analize bilo kojeg elementa željezničke infrastrukture (ili grupe elemenata), ili bilo kojeg dijela željezničke mreže (obično većih razmjera, čak i na razini čitave mreže), i to u kratkoročnom, srednjoročnom i dugoročnom planu, temeljeno na pravilima odlučivanja i ograničenjima (graničnim vrijednostima) koja su utvrdili korisnici, a proveli modeli degradacije.

Analize više razine provode se na "singularnim" objektima (npr. skretnice i križišta, ili njihove komponente, cestovni prijelazi, prijevozna sredstva i njihovi dijelovi, itd.) ili, u slučaju linijsko prostornih objekata, na infrastrukturnim "segmentima". Segmenti, s druge strane, predstavljaju proizvod procesa segmentacije (slika 3.). Segmentacija predstavlja proces diskretizacije linijsko-prostornih elemenata željezničke infrastrukture (npr. kolosijeka, ali isto tako i kontaktne mreže ili bilo kojih drugih linijskoprostornih objekata definiranih u RMMS-u), dijeleći ih na segmente prema kriterijima koje slobodno mogu definirati i modificirati korisnici RMMS-a. Time

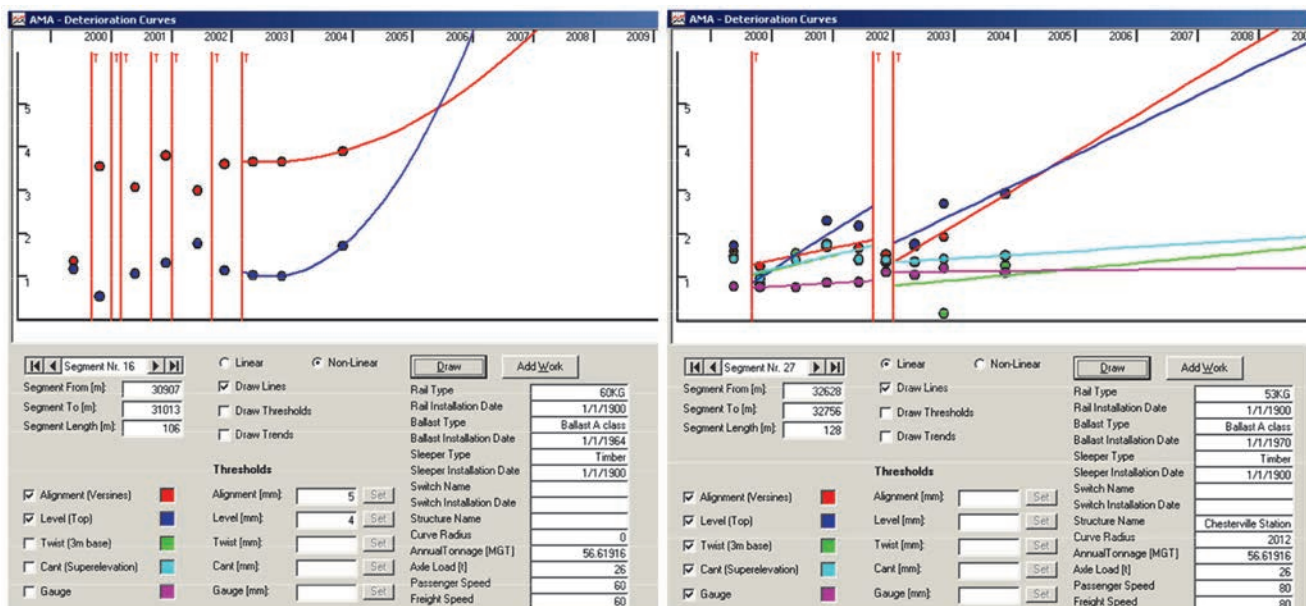
se zapravo dovode linijskoprostorni objekti na istu razinu sa singularno-točkastim objektima, što dalje omogućava njihovo identično i zajedničko tretiranje, tj. analizu.



Slika 3. Proces "Segmentacije" u RMMS

Osnovno je obilježje procesa segmentacije dobiti segmente sa što uniformnijim ponašanjem, jer se lokacije s različitim ponašanjem moraju tretirati na različite načine. S druge strane, očekuje se da će uniformnost ponašanja biti posljedica uniformnosti svojstava i okolnosti (npr. tipova komponenti, karakteristika projekta i profila, prometnih uvjeta, stanja odvodnjavanja, itd.). Tako na svakom mjestu gdje se neko od "kritičnih svojstava" (definiranih od strane korisnika) promijeni, jedan segment završava, a drugi počinje. Nakon takve segmentacije, svakom segmentu je omogućeno da se ponaša (tj. degradira tijekom vremena, ili da mu se stanje popravila kao posljedica radova na održavanju i remontima) na njemu specifičan/jedinstven način, baš kao da svaki segment predstavlja poseban "organizam". Ovo omogućava potpuno automatsku analizu većih razmjera (npr. čak i na razini čitave mreže), jer se nadalje analiza obavlja sekvencijalno, segment po segment, [3].

Automatske analize provode se na osnovi skupova pravila odlučivanja (eng. *Decision Rules*) definiranih od strane korisnika i ograničenja (graničnih vrijednosti), a provedenih od strane modela degradacije. Naime, u okviru tih analiza, za svaki segment (ili elemente željezničke infrastrukture ili njihovu komponentu) aktiviraju se pravila odlučivanja (diferencirana po svojoj relativnoj važnosti). Normalno, struktura pravila odlučivanja je takva da najprije provjerava zadovoljava li segment/element željezničke infrastrukture/komponenta određene uvjete (npr. sadrži li određeni tip tračnice ili praga, ili kotača i ovjesa (u slučaju prijevoznog sredstva), je li u krivini, itd.). Nakon toga "pravila odlučivanja" provjeravaju određene (definirane od strane korisnika) parametre stanja ovih elemenata željezničke infrastrukture



Slika 4. RMMS modeliranje degradacije stanja

u usporedbi s odgovarajućim graničnim vrijednostima i/ili izračunava moment kada će za dane granične vrijednosti biti dostignute. Da bi se izračunao moment dostizanja tih graničnih vrijednosti, primjenjuju se modeli degradacije. Naime, ukratko i jednostavno rečeno, svakom parametru stanja dodjeljuje se (od strane korisnika) odgovarajući model degradacije. Tipično, ovo dodjeljivanje predstavlja definiranje vrste krivulje degradacije stanja (linearna, nelinearna, npr. polinomna, eksponencijalna, logaritamska, itd.), kao i definiranje tipova radova na održavanju i remontima koji utječu na dani parametar stanja (jer ne utječu svi radovi na održavanju i remontima na sve parametre stanja). Kada je ovo definirano od strane korisnika, sustav izračunava, za svaki pojedinačni segment/element željezničke infrastrukture, na osnovi stvarnih podataka (npr. mjerenja i dosadašnjih radova na održavanju i remontima) stvarne krivulje degradacije, a koje najbolje aproksimiraju stvarno ponašanje danog segmenta/elementa željezničke infrastrukture (tj. koeficijente krivulje). Na osnovi ovog "uhvaćenog ponašanja", sustav dalje izračunava/ekstrapolira buduće ponašanje (npr. degradaciju ili reakciju na određene radove na održavanju i remontima, tj. njihovu učinkovitost), a zatim, na osnovi toga sustav dalje prognozira i predlaže kada bi i koje bi radove na održavanju i remontima trebalo obaviti, izračunava njihovu cijenu, dalje ih usklađuje itd. (slika 4.).

1.2. Karakterističan analitički proces RMMS-a

Za singularne elemente željezničke infrastrukture (i njihove komponente), kao i za segmentirane linijskoprostorne elemente željezničke infrastrukture, sve informacije o stanju (npr. koje dolaze s različitih mjernih vozila ili vizualnih kontrola pruge) stavljaju se na raspolaganje modelima degradacije, određenima

kao odgovarajući za svaki od elemenata željezničke infrastrukture i svaki od njihovih parametara stanja. Modeli degradacije najprije modeliraju "hvataju" ponašanje danih parametara stanja kroz "poznatu prošlost" (tijekom koje postoje raspoloživi mjerni podaci), nakon čega se to "uhvaćeno" ponašanje može iskoristiti u prognostičke svrhe (slika 4.).

Na osnovi prognostičkih sposobnosti, kao i baze pravila odlučivanja, svi predviđeni podaci se automatski procesiraju kako bi se generirali planovi radova na održavanju i remontima prema danim svojstvima scenarija i ograničenjima koje korisnici mogu definirati i/ili modificirati. Ove karakteristike scenarija i ograničenja, naravno, mogu biti varirani (i moraju se varirati) kako bi se došlo do optimalnih planova na održavanju i remontima, gdje se to variranje može obaviti ručno ili automatski.

Konačno, rezultati radova na održavanju i remontima provjeravaju se u odnosu na raspoložive resurse i zadana ograničenja (koja je moguće također mijenjati i varirati) kako bi se odredili prioriteta, što daje kao rezultat optimalan skup radova na održavanju i remontima koje je potrebno provesti da bi se dobila zahtijevana kvaliteta elemenata željezničke infrastrukture, ili štoviše, određena željena ravnoteža/odnos između troškova i kvalitete, kao i između ukupne količine radova na održavanju i radova na remontu.

Na samom kraju, skup radova na održavanju i remontima s najvišom razinom prioriteta, a koji je objektivno ostvariv u okvirima zadanih ograničenja u smislu raspoloživih resursa, grupira se kako bi se postigli najbolji ekonomski učinci, tj. uštede, a koje potječu od zajedničkog/istovremenog provođenja danih radova u okviru istog zatvaranja pruge (obustave prometa), uzimajući u obzir raspoložive strojeve i ostalu opremu, kao i raspored i trajanja mogućih zatvaranja pruge (npr. tijekom noći ili vikendom, itd.).

2. Osnovni podaci potrebni za prognozu i planiranje

Za pravilno modeliranje i predviđanje degradacije stanja i upravljanje elementima željezničke infrastrukture potrebna je velika količina različitih podataka o stanju. Na primjer, talijanski upravitelj željezničke infrastrukture, *Rete Ferroviaria Italiana* (RFI), prikuplja oko 1 TB podataka o stanju svakog mjeseca putem samo jednog mjernog vlaka "ARCHIMEDE" [4]. Neki od najvažnijih predstavnika tih podataka koje je potrebno prikupiti u svrhe optimalnog korištenja RMMS-a navedeni su kako slijedi:

1. Dijelovi gornjeg i donjeg ustroja i infrastrukture:

- tračnice (tip tračnice, pokazatelj jesu li tračnice zavarene u DTT ili ne, tip zavora ili tip sastava tračnica, datum ugradnje, indikator jesu li tračnice ugrađene kao nove ili kao rabljene, akumulirano prometno opterećenje u trenutku ugradnje u slučaju da su ugrađene kao rabljene),
- zastor (tip zastornog materijala, datum ugradnje, debljina zastora, itd.),
- pragovi (tip pragova, datum ugradnje, indikator jesu li pragovi ugrađeni kao novi ili kao rabljeni, akumulirano prometno opterećenje u trenutku ugradnje u slučaju da su ugrađeni kao rabljeni, razmak pragova, tip pričvrstnog pribora),
- donji ustroj (geološki uvjeti, mjerenja modula stišljivosti posteljice, razna druga mjerenja, itd.),
- objekti (tip objekta, početna i krajnja stacionaža, naziv/kôd objekta, lista komponenata),
- skretnice i križišta (tip, naziv/kôd, početna i krajnja stacionaža),

2. Kontrole kolosijeka i druga mjerenja:

- opće stanje kolosijeka
- stanje zastora (izražena u postotcima količina zemlje, dionica s podlokavanjem pragova, dionica s korovom)
- stanje pričvršćenja (izražena u postotcima nefunkcionalnih pričvršćenja, labava pričvršćenja)
- stanje pragova (izraženi u postotcima loših pragova, pragova srednje kvalitete, trulih (drvenih) pragova, napuknutih (betonskih) pragova, grupiranje/"grozdanje" loših pragova)
- neispravnosti na tračnicama: unutrašnje i površinske, broj neispravnosti izvan zone zavarenih spojeva, postotak tračnica koje su neispravne
- istrošenost tračnica (vertikalna istrošenost glave tračnice, bočna istrošenost glave tračnice, kombinirana istrošenost glave tračnice, zaobljenost "kuta" glave tračnice),
- naboranost tračnica (amplituda naboranosti u različitim valnim duljinama).
- Informacije o presjeku i profilu pruga, kao i njihovoj uporabljivosti
- krivine i prijelaznice (početna i krajnja stacionaža, orijentacija lijeva ili desna, radijus, itd.),
- prometno opterećenje (milijuna bruto tona godišnje, maksimalno osovinsko opterećenje [kN]),

- brzine (brzine teretnih i putničkih vlakova),
- uzdužni nagib (početna i krajnja stacionaža, vrijednost nagiba).

3. Informacije o dosadašnjim radovima na održavanju i remontima:

- dosadašnji radovi na remontima (tip, početna/krajnja stacionaža, cijena, korišteni resursi, itd.),
- dosadašnji radovi na održavanju (npr. brušenju tračnica i podbijanju i planiranju zastora) (tip, početna i krajnja stacionaža, cijena, korišteni resursi, itd.),
- podaci o sporim vožnjama (ograničenja brzina uslijed loše kvalitete) (početna i krajnja stacionaža, početni i krajnji datum važenja "spore vožnje", vrijednost "spore vožnje", tj. smanjenja brzine, cijena/troškovi/štete uslijed smanjenja brzine),
- dosadašnje lokalne intervencije na održavanju (tip, lokacija, datum, cijena).

4. Mjerenja stanja elemenata željezničke infrastrukture:

- kolosijek (horizontalna geometrija (eng. *alignment*), vertikalna geometrija, vitoperenje, bočno nadvišenje, širina kolosijeka, indeksi kvalitete, broj grešaka - prekoračenja dopuštenih vrijednosti; profil/istrošenje tračnice, naboranost tračnice (svih valnih duljina); profil zastorne prizme; video kontrola kolosijeka i pružnog pojasa),
- kontaktna mreža i kontaktni vod (statička i dinamička geometrija, istrošenost (poprečni profil) kontaktnog voda, dinamičke sile na kontaktu pantografa i kontaktnog voda, jačina električne struje primljena preko pantografa, detekcija i mjerenje iskrenja, video-nadzor),
- udobnost vožnje (geometrija kontakta kotač/tračnica, vertikalna ubrzanja (osovinskog sklopa, osovinskog postolja, sanduka vozila), dinamičke sile na kontaktu kotač/tračnica,
- telekomunikacijska oprema i signali (npr. GSM, GSM-R, GPRS, itd.),
- signalno-sigurnosni uređaji (balize, pozicija i ispravnost signala), kodirana struja.

3. Degradacija željezničke infrastrukture

3.1. Geometrija kolosijeka

Kako geometrija kolosijeka predstavlja jedan od najvažnijih parametara stanja kolosijeka, a usko je povezana s mnogim drugim pojavama degradacije stanja drugih elemenata željezničke infrastrukture, i koja predstavlja najčešći razlog za iniciranje čitavog niza aktivnosti na održavanju i remontima, ona će se razmatrati u radu i na njenom će primjeru biti objašnjen čitav koncept modela degradacije i njihovog korištenja. Čitava kolosiječna konstrukcija je tako projektirana i održavana da osigura zahtijevanu geometriju. Odluke o remontu su veoma

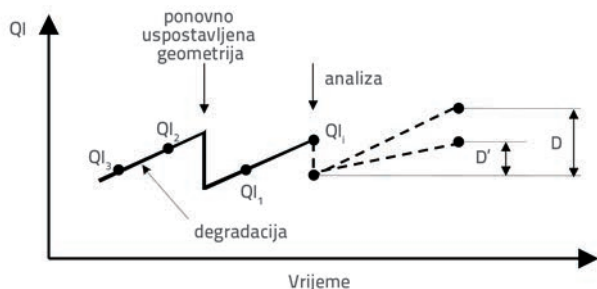
često utemeljene na geometriji kolosijeka. Grubo rečeno, previše popravaka tračnica pogoršava geometriju tračnice i čini zamjenu tračnica prijeko potrebnim, dok se zamjena zastora provodi kada više ne može održati zahtijevanu geometriju kolosijeka. Za pragove i pričvrtni pribor smatra se da su degradirani kada se ne može održati zahtijevana širina kolosijeka. Međutim, proces odlučivanja o tome je li potrebno, kada, gdje i kako najbolje intervenirati, mnogo je složeniji.

3.2. Degradacija geometrije kolosijeka

Ako se izuzmu problemi odvodnjavanja i donjeg ustroja, dolazi do degradacije geometrije kolosijeka većinom uslijed utjecaja dinamičkih opterećenja izazvanih vozilima. Mehanizam koji upravlja ovom pojavom je prilično složen. Poznato je da neposredno nakon podbijanja kolosijeka dolazi do relativno velikih slijeganja zastora. Kada bi se čitav zastor jednako slijegao, ne bi došlo do razvoja nepravilnosti. Međutim, ta su slijeganja često daleko od homogenih, zbog nehomogenosti u uvjetima oslanjanja, konstrukcije kolosijeka i preraspodjele opterećenja. Sve to dovodi do diferencijalnih slijeganja, koja izazivaju razvoj nepravilnosti u geometriji kolosijeka u valnim duljinama koje utječu na prijevozna sredstva.

Mnoga su istraživanja provedena u vezi procesa degradacije i mogućnosti kontroliranja ove pojave modelom degradacije (eng. *Deterioration Models*), kao i postojećim i poboljšanim metodama održavanja, [5-13].

Međutim, često su ti modeli degradacije, uz pristup problemu modeliranja, statistički bili pojednostavljeni na jednostavni linearni prikaz (slika 5.) [14], te su usmjereni samo na dio "degradacije", a posve zapostavljajući dio "restauracije" (ponovnog uspostavljanja) stanja, tj. učinkovitost radova na održavanju i remontima (u ovom slučaju prije svega podbijanja kolosijeka).



Slika 5. Degradacija i restauracija geometrije kolosijeka u smislu indeksa kvalitete kolosijeka (Track Quality Index)

To je zapravo spriječilo bilo kakvo razmatranje povećanja frekvencije radova na održavanju i remontima (tj. podbijanja) tijekom vremena, što ih je opet učinilo upotrebljivim za samo mali raspon parametara stanja i veoma kratkoročne prognoze (najviše 2-3 godine unaprijed), dok su bili potpuno neupotrebljivi za srednjoročne i dugoročne simulacije u rasponu 5-30 godina. Znajući da uslijed relativno dugogodišnje uporabljivosti

elemenata željezničke infrastrukture (tipično 20-60 godina, ovisno o njihovoj kvaliteti i načinu uporabe), mogu samo dugoročne, strateške optimizacije dovesti do stvarnih rezultata, moglo bi se zaključiti da su potrebni bolji i fleksibilniji modeli, pogotovo uzimajući u obzir današnje količine raspoloživih informacija o stanju, a koje su vjerojatno i više stotina puta veće nego do prije samo nekoliko godina, i proračunsku moć računala koja je također znatno porasla.

3.3. Osnove procesa predviđanja degradacije geometrije kolosijeka

Da bi se znalo koja je to granična kvaliteta kolosijeka i da bi se odlučilo kada je potrebno obaviti radove na održavanju i remonte, treba moći predvidjeti degradacije geometrije kolosijeka. Također, slične dionice kolosijeka mogu imati različite brzine degradacije, kao i različite brzine ponovnog uspostavljanja stanja, kao što je posljedica izvođenja radova na održavanju i remontima. Stoga je nužno prikupiti i obraditi podatke geometrije kolosijeka na veoma kratkim dionicama za potrebe optimizacije radova na održavanju i remontima te identificiranja utjecajnih faktora.

Takve dionice za obradu podataka tradicionalno su imale 200 m. U današnje vrijeme, one predstavljaju rezultat procesa "segmentacije", kao što je spomenuto u potpoglavlju 1.1. Kako je osnovna ideja segmentacije stvaranje segmenata s ujednačenim ponašanjem, ti bi segmenti mogli imati bilo kakvu dužinu, ali su obično ograničeni u okviru procesa segmentacije na dužine u rasponu 100 do 500 m. U stvarnosti, za kratkoročne analize (npr. od 3 mjeseca do 1 godine unaprijed), obično lokalnog karaktera (npr. dionice od po nekoliko kilometara) koje se prije svega usmjeravaju na radove održavanja, preferirala bi se "finija" segmentacija sa segmentima dužine do 200 m. Nasuprot tome, za dugoročne analize, tipično iz financijskih razloga, koje su prije svega usmjerene na remonte, više nego na održavanje, i koje su "globalnijeg" karaktera (npr. za čitavu prugu, ili dio mreže, ili čak za čitavu željezničku mrežu), preferirala bi se "grublja", sa segmentima dužine 500 do 1000 m. Tipovi podataka potrebni za analize navedeni su u drugom poglavlju ovog rada.

Vertikalna i horizontalna geometrija kolosijeka obično se mjeri mjernim kolima. Takva mjerenja omogućavaju izračunavanje standardnih devijacija, koje su se pokazale veoma korisnima u svrhu predviđanja ponašanja geometrije kolosijeka. U nekim slučajevima, reakcije vozila izračunane iz izmjerene geometrije kolosijeka služe također za ocjenu kvalitete kolosijeka. Kada su mjerenja izvršena tijekom perioda više od jednog ciklusa podbijanja kolosijeka, prosječne vrijednosti brzine degradacije i brzine restauracije se mogu izračunati za svaki segment.

Brzine degradacije indeksa kvalitete obično se izračunavaju ili u funkciji prometnog opterećenja (primjerice u milimetrima standardne devijacije / milijuna bruto tona) ili u funkciji vremena (primjerice u milimetrima standardne devijacije / godišnje).

Ako se izuzme brzo slijeganje i ubrzana degradacija kolosijeka odmah nakon izvedenog podbijanja (obično u periodu od mjesec dana nakon podbijanja), brzina degradacije često pokazuje linearni trend između bilo koje dvije aktivnosti na održavanju (ako nije dopuštena daljnja degradacija bez obavljanja bilo kakvih intervencija) [18].

Linija koja prikazuje degradaciju geometrije kolosijeka ima tzv. nazubljeni oblik, gdje se kvaliteta smanjuje između dviju uzastopnih aktivnosti (u ovom slučaju podbijanja), što se jasno vidi porastom izmjerenih vrijednosti (ili obrađenih vrijednosti, kao npr. standardne devijacije ili indeksa kvalitete kolosijeka) nakon kojih je izvedeno podbijanje, što izaziva nagli skok kvalitete (tj. pad/smanjenje u izmjerenim vrijednostima). Međutim, tijekom vremena, kako kolosijek stari, dolazi do nekoliko promjena. Kao prvo, mijenja se učinkovitost podbijanja, tj. intenzitet vertikalnog "skoka" kvalitete, odnosno "pada" u grafikonu koji prikazuje izmjerene vrijednosti. Kao drugo mijenja se brzina degradacije, tj. nagib linije definirane izmjerenim vrijednostima, odnosno točkama na dijagramu. U konačnici, te promjene utječu na zahtijevanu frekvenciju podbijanja, koja postaje sve veća, tj. vremenski razmak između dvaju uzastopnih podbijanja (ciklus podbijanja) postaje sve kraći. Naposljetku, frekvencija podbijanja postaje toliko velika da se podbijanje može smatrati neučinkovitim pa bi bilo bolje učiniti nešto drugo, tj. izvesti neku drugu aktivnost na održavanju i remontima, primjerice remont/zamjenu ili "rešetanje" (čišćenje) zastora.

Općenito je zamišljeno se analizira stanje elemenata kolosijeka sa što više stajališta. Cilj je omogućiti upravitelju željezničkom infrastrukturom da vidi "cijelu sliku", tj. da prikaže istovremeno sve vrste informacija koje bi mogle utjecati na stanje kolosijeka, kako bi mogao pronaći stvarne razloge različitih problema i donijeti odluke u vezi s najboljim mogućim mjerama koje je potrebno poduzeti. To donošenje odluka može biti provedeno ručno, prikazom i preklapanjem svih mogućih informacija vizualno u okviru sustava za upravljanjem održavanjem željezničke infrastrukture ili automatski, primjenom prethodno definiranih pravila odlučivanja.

4. Općeniti/univerzalni model degradacije

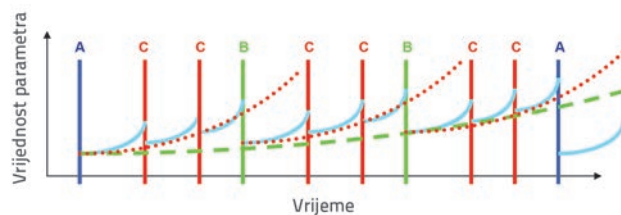
Zbog navedenih nedostataka prijašnjih modela, kao i osnovnih principa analize, provedeno je istraživanje koje je djelomično prikazano u ovom radu, s konačnim ciljem razvitka generičkog/univerzalnog modela degradacije koji bi bio dovoljno fleksibilan da se primijeni na degradaciju bilo kojeg od parametara stanja, ali ujedno i dovoljno snažan i fleksibilan da precizno reprezentira različita ponašanja, uočena na osnovi izmjerenih podataka. Imajući prethodno navedeno kao krajnji cilj, početna pozicija za istraživanje definirana je na sljedeći način:

- Zadan je parametar stanja koji predstavlja neki od aspekata stanja nekog elementa željezničke infrastrukture.
- Postoji određeni broj aktivnosti koje utječu na ponašanje ovog elementa željezničke infrastrukture iskazano promjenom danog parametra stanja tijekom vremena. Prema utjecaju

koji imaju na zadani parametar stanja, te aktivnosti se mogu karakterizirati kao:

- **ključne aktivnosti** koje bitno, dakle duboko, utječu na određeni parametar stanja tako što ga "resetiraju", dakle vraćaju na manje-više početnu poziciju (npr. način na koji zamjena zastora utječe na ponašanje geometrije kolosijeka),
- **privremene aktivnosti** većinom se odnose na održavanje, koja se izvode jednom ili više puta između dva uzastopna izvođenja *ključnih aktivnosti*. Dakle, te aktivnosti samo privremeno mijenjaju vrijednost parametra stanja (obično ga poboljšavaju), ali se njihova učinkovitost, to jest vrijednost njihova poboljšanja parametra stanja s vremenom smanjuje (manje ili više postupno), onako kao što stari element željezničke infrastrukture.

Ako pretpostavimo primjerice neki zamišljeni parametar stanja i tri aktivnosti (A, B, C), njihovo bi uobičajeno dugoročno ponašanje moglo izgledati kao na slici 6.

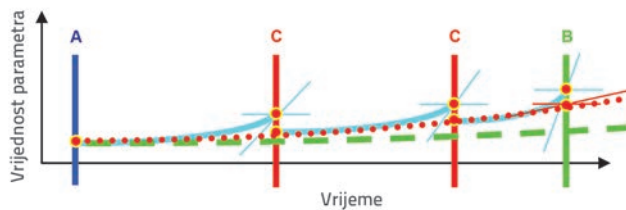


Slika 6. Shematski prikaz hipotetičkog standardnog mono-parametarskog dugoročnog generičkog modela degradacije

Aktivnost "A" predstavlja "ključnu" aktivnost, dok aktivnosti "B" i "C" predstavljaju "privremene" aktivnosti. Pri tome bi se aktivnost C mogla nazvati privremenom aktivnošću razine 1, a aktivnost B privremenom aktivnošću razine 2, gdje je za model razvijen u ovom radu broj razina neograničen, iako se zapravo u praksi rijetko susreću situacije s više od tri razine.

Prema slici 6., možemo također razlikovati nekoliko "obrazaca" (načina, karakteristika) degradacije, ili modela. Svjetloplava kontinuirana krivulja (bilo kojeg oblika, npr. polinomna ili eksponencijalna, itd.) predstavlja bazičnu, ili osnovnu krivulju degradacije između bilo koje dvije uzastopne aktivnosti (krivulja degradacije razine 1); crvena točkasta krivulja (krivulja degradacije razine 2) predstavlja promjenu tzv. "restauracijskih točkaka" (točkaka do kojih su privremene aktivnosti tipa C uspjele poboljšati vrijednost danog parametra stanja) bazične krivulje (krivulje razine 1) tijekom nekoliko privremenih aktivnosti tipa C (crvenih); konačno, zelena crtkana linija predstavlja promjenu "restauracijskih točkaka" sekundarne, crvene točkaste krivulje (krivulje razine 2) (dakle, "promjena promjene") između dvije privremene aktivnosti tipa B (zelene), ili u ovom slučaju, između početne aktivnosti A (plave) i prve susjedne privremene aktivnosti tipa B (zelene). Također, period između bilo koje dvije susjedne aktivnosti, bez obzira na njihovu razinu, naziva se analitički period stupnja 1, a periodi između uzastopnih

privremenih aktivnosti razine 2 naziva se analitički period razine 2, itd. Ako bismo "uvećali" prvih nekoliko analitičkih perioda razine 1, dobili bismo situaciju kao na slici 7.



Slika 7. Monoparametarski dugoročni generički model degradacije (dio između ključne aktivnosti "A" i privremene aktivnosti razine 2 ("B"), tijekom dvije privremene aktivnosti razine 1 ("C"), tj. tijekom 3 analitička perioda razine 1

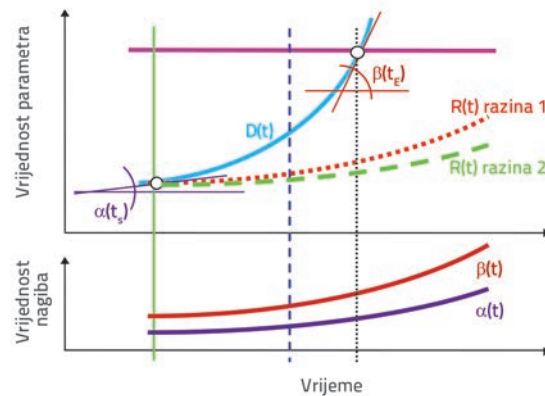
Na slici 7. može se tijekom tri analitička perioda razine 1 uočiti sljedeće:

- početna krivulja degradacije (svijetloplava, kontinuirana) postaje sve "strmija", a to se uočava povećanim kutem koji zatvara tangenta na osnovnu krivulju (svijetloplavu) na njenim krajevima;
- početna točka, koja predstavlja restauracijsku vrijednost osnovne krivulje (svijetloplave), postaje sve viša, a to je povećanje praktično prikazano krivuljom razine 2 (crvena točkasta krivulja);
- ako pogledamo sliku, od 6 do 9 analitičkih perioda (ustvari, moglo bi se reći da ih ima 10, jer za posljednji analitički period samo ne znamo kada završava), možemo uočiti da i krivulja degradacije razine 2 (crvena točkasta krivulja) također postaje sve strmija, pokazuje i kut koji zatvara tangenta krivulje degradacije razine 2 (crvene točkaste) u njenim krajnjim točkama, kao i da početne točke crvene točkaste krivulje (razine 2) postaju sve više, što ustvari pokazuje krivulja razine 3 (zeleno-crtkana krivulja), koja povezuje ove početne točke (restauracijske vrijednosti) krivulje razine 2 (crvene točkaste), tj. restauracijske vrijednosti koje postižu privremene aktivnosti razine 2 (zeleno, aktivnosti tipa "B").

Prema tome, ako poznamo za svaki parametar stanja - koje su to aktivnosti koje na njega utječu, koje od njih su "ključne", a koje su "privremene" (i koje razine važnosti), koji su tipovi krivulja degradacije (linearne, polinomne, eksponencijalne, logaritamske, itd.), koji je "zakon promjene" kuta tangente svake od krivulja degradacije na njihovim krajnjim (početnim i krajnjim) točkama (redom označene kao krivulje " α " i " β "), a što sve možemo dobiti iz poznatog ponašanja danog parametra stanja u prošlosti, tj. na osnovi provedenih mjerenja stanja, možemo nedvosmisleno modelirati bilo koji parametar stanja s bilo kojim brojem aktivnosti i krivulja.

Ako sad obratimo pažnju isključivo na posljednji analitički period, tj. deseti na slici 6., ili četvrti na slici 7., tj. baš onaj za koji ne znamo kada završava, dobivamo situaciju kao na slici 8., koja upravo predstavlja srž problema modeliranja degradacije, tj.

sâm model degradacije, gdje t_s i t_e predstavljaju početnu i krajnju točku uočenog analitičkog perioda (pri čemu je t_e nepoznato, tj. potrebno ga je izračunati).



Slika 8. Opći početni oblik krivulje degradacije

4.1. Konkretna rješenja u odnosu na tip krivulje degradacije i matematičku formulaciju

Očigledno, u ovisnosti o konkretnom tipu krivulja $D(t)$, $R(t)$, $\alpha(t)$ i $\beta(t)$ (na svim razinama), pristup modeliranju i rješenje bit će različito. Konkretnije, u ovisnosti o parametarskom obliku krivulje (tj. konkretnom broju nepoznatih koeficijenata krivulje), bit će potreban različit broj poznatih točaka kako bi se problem riješio. Radi mogućnosti usporedbe ovog modela s prijašnjim modelima, u ovom radu bit će prikazan samo slučaj temeljen na sljedećim pretpostavkama:

- $D(t)$ krivulja je linearna,
- $R(t)$ i $\alpha(t)$ krivulje su kvadratne (polinom drugog stupnja)
- postoje samo dvije razine dijagnoze, tj. postoje samo dva tipa aktivnosti - jedna "privremena" (podbijanje) i jedna "ključna" (zamjena/remont/"rešetanje"/čišćenje zastora).

Očigledno, s porastom broja razina ubrzano raste složenost čitavog modela, gdje se broj "kontrolnih krivulja" ($R(t)$, $\alpha(t)$ i $\beta(t)$) uvećava tri puta sa svakom dodatnom razinom. Potpun model je naravno općenit i funkcionira za bilo koji broj razina dijagnoze i bilo koji tip krivulja na svakoj od razina. Prema navedenim pretpostavkama, osnovna struktura modela izgleda kao na slici 9. Uz $D(t) = b*t + c$, dobivaju se sljedeća tri uvjeta koje bi model morao zadovoljiti da bi se jednoznačno definirala krivulja $D(t)$:

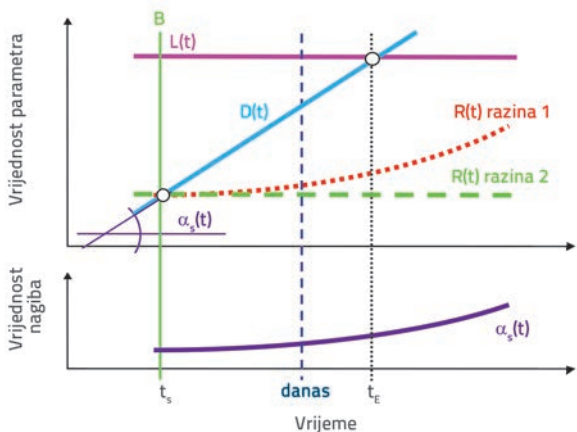
$$b = \alpha(t_s), \quad (1)$$

znajući da

$$D(t_s) = R(t_s), \text{ tj. } R(t_s) = \alpha(t_s)*t_s + c \quad \text{daje: } c = R(t_s) - \alpha(t_s)*t_s, \quad (2)$$

kao i:

$$t_e = t_s + [L - R(t_s)] / \alpha(t_s) \quad (3)$$



Slika 9. Općeniti početni oblik krivulje degradacije linearnog tipa

Poznate vrijednosti su očigledno t_s , $\alpha(t_s)$, $R(t_s)$, $L(t) = const. = L$, dok su nepoznati koeficijenti krivulje $D(t)$ tj. "a" i "b", kao i t_e . Rješavajući sustav jednažbi (1-3), krivulja $D(t)$ dobiva oblik:

$$D(t) = R + (t - t_s) * \alpha(t_s) \tag{4}$$

U praksi se mogu naći različiti tipovi krivulja, tako da u okviru RMMS-a sve značajnije krivulje (linearne, kvadratne,

eksponencijalne, logaritamske) moraju biti matematički riješene i stavljene na raspolaganje u okviru općenitog modela degradacije. Međutim, u željezničkoj praksi također, najpogodnija, a tako i najčešće korištena kombinacija tipova krivulja (pogotovo za geometriju kolosijeka) jest linearna ili kvadratna za krivulju razine 1, i kvadratna za krivulje viših razina (posebno za razinu 2).

4.2. Analiza slučaja

Za potrebe ovog rada razmatrati će se analiza slučaja za linearnu krivulju $D(t)$ (razine 1). Korišteni su sljedeći podaci: mjerenja geometrije kolosijeka (standardna devijacija horizontalne geometrije, vrijednosti za 200 m segmenta kolosijeka), što je obavljeno mjernim kolima talijanskih željeznica, tj. talijanskog upravitelja željezničke infrastrukture RFI, na pruži prve kategorije Rim-Napulj (tablica 1.) (Napomena: Datumi su zaokruženi na nivou mjeseca, zbog sustava bilježenja radova i kontrola u Italiji, tj. na RFI, gdje se zapravo bilježi samo mjesec, a ne i datum u okviru mjeseca. Iz tog razloga, u okviru mjeseca, datumi su uzeti arbitrarno, tako što je, radi olakšanja, stavljeno da datum bude isti kao i redni broj mjeseca u godini, npr. 3/3 ili 6/6 ili 9/9; također, mjerenja su obavljena redovito i sustavno dva puta godišnje, u ožujku proljetno mjerenje i u rujnu jesensko mjerenje).

Tablica 1. Mjerenja geometrije kolosijeka (standardne devijacije) i povijest radova (podbijanje kolosijeka)

Mjerenja horizontalne geometrije kolosijeka (standardna devijacija)				Povijest radova (Podbijanje)	
Datum	Izmjerena vrijednost	Datum	Izmjerena vrijednost	Datum	Aktivnost
3/3/98	1,2	3/3/01	1,5	1/1/98	podbijanje
9/9/98	1,4	9/9/01	1,9	6/6/00	podbijanje
3/3/99	1,6	3/3/02	2,3	6/6/02	podbijanje
9/9/99	1,8	9/9/02	1,8		
3/3/00	2,3	3/3/03	2,1		
9/9/00	1,4				

Tablica 2. Aktivnosti (radovi podbijanja kolosijeka) koji definiraju početke i krajeve analitičkih perioda

Analički period	Početni trenutak	Krajnji trenutak
1	Početak modela - datum prve aktivnosti (podbijanja) (1/1/98)	Datum druge aktivnosti (podbijanja) (6/6/00)
2	Datum druge aktivnosti (podbijanja) (6/6/00)	Datum treće aktivnosti (podbijanja) (6/6/02)
3	Datum treće aktivnosti (podbijanja) (6/6/02)	"danas" (početak perioda planiranja, tj. tzv. "referentni datum")

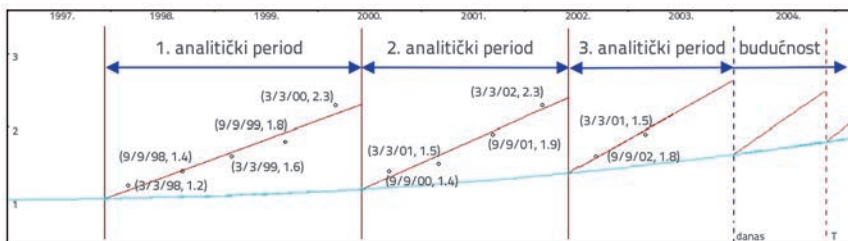
Tablica 3. Mjerenja geometrije kolosijeka (standardne devijacije) grupirane po analitičkim periodima

Datum	Vrijednost	Datum	Vrijednost	Datum	Vrijednost
1. analitički period		2. analitički period		3. analitički period	
3/3/98	1,2	9/9/00	1,4	9/9/02	1,8
9/9/98	1,4	3/3/01	1,5	3/3/03	2,2
3/3/99	1,6	9/9/01	1,9		
9/9/99	1,8	3/3/02	2,3		
3/3/00	2,3				

Budući da aktivnosti (radovi na podbijanju kolosijeka) utječu na vrijednosti danog parametra stanja (horizontalna geometrija kolosijeka), mogu se razlikovati tri analitička perioda, kako je prikazano u tablici 2.

Prema tome, možemo zapisati izmjerene vrijednosti standardnih devijacija geometrije kolosijeka grupirane u analitičke periode kako je prikazano u tablici 3.

Primjenom modela dobiva se situacija u smislu modeliranja prijašnjeg ponašanja, što je prikazano na slici 10.



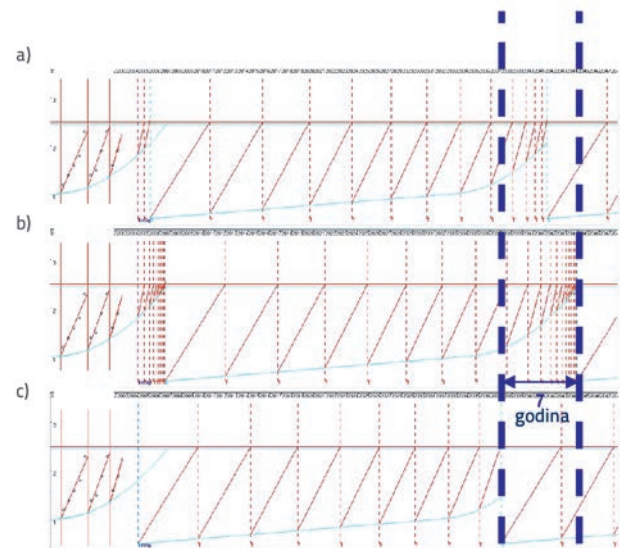
Slika 10. Modelirano prijašnje ponašanje (ponašanje u poznatoj prošlosti)

Međutim, ako primijenimo model degradacije da bismo dobili budući napredak prognoziranog ponašanja, dobivamo situaciju kao na slici 11.a. To nam omogućava da prebrojimo i aktivnosti razine 1 i aktivnosti razine 2 tijekom unaprijed definiranog perioda planiranja, koji bi morao biti dovoljno dug (npr. 50 godina), i znajući jediničnu cijenu tih radova, izračunamo ukupne troškove čitavog plana radova, eventualno također uključujući i troškove prekida prometa (zatvoren kolosijek) i drugih poremećaja u prometu. Ako se sve to može definirati, dakle i automatizirati, mogu se dalje ispitivati različiti scenariji/strategije. Primjerice primjenom različitih pravila odlučivanja, različitih pretpostavki za vrste krivulja degradacije razine 1 i 2, mogu se izračunati posljedični troškovi, kao i kvaliteta (vrijednost danog parametra stanja) u bilo kojem trenutku u budućnosti.

Jedan od mogućih pristupa definiranju različitih strategija odlučivanja bi bio taj da se odredi kada treba primijeniti aktivnost razine 2 (u ovom slučaju remont/čišćenje zastora), umjesto aktivnosti razine 1, tj. održavanje (u ovom slučaju podbijanje kolosijeka). Strategija bi primjerice mogla biti usmjerena na ograničavanje minimalnog vremena između dvije uzastopne aktivnosti održavanja (tj. podbijanja), uzimajući u obzir stvarno stanje u praksi. Naime, zatvaranje kolosijeka potrebno je radi izvođenja tih aktivnosti, pa izaziva neugodne i skupe poremećaje u prometu, i tako nedvosmisleno poziva na minimalizaciju. Na slici 11.a prikazano ograničenje, tj. minimalno vrijeme je definirano kao 6 mjeseci (182 dana), i ukupni godišnji troškovi su dobiveni kao 2590 novčanih jedinica, dok je ukupna prosječna kvaliteta tijekom čitavog planskog perioda iznosila 1,68 (mm standardne devijacije). Može se pretpostaviti ograničenje na 30 dana, što je ekstremno, ali ipak ponekad primjenjivano u praksi. Obično se to odnosi na željeznice, a često i na metro linije u nekim posebnim uvjetima koje karakteriziraju stari i zaprljani zastor, često s lošim stanjem donjeg ustroja, ali i nemogućnost

izvođenja većih remonta (npr. zamjene/čišćenja zastora). Tada se zbog toga što nema dovoljno mogućnosti da se zatvori kolosijek ili jednostavno zbog nedostatka financijskih sredstava dobiva potpuno drugačija situacija, kao na slici 11.b. Prikazani ukupni godišnji troškovi iznose tada 3364 novčane jedinice (dakle skuplje) i kvaliteta od 1,71 mm standardne devijacije (dakle lošija - jer viša vrijednost u slučaju ovog parametra stanja, tj. standardne devijacije geometrije kolosijeka, predstavlja lošije stanje).

Kao krajnje ispitivanje, ovo ograničenje, tj. minimalni ciklus podbijanja, moglo bi se postaviti na veću vrijednost, npr. Na dvije godine, tj. 730 dana, a u tom slučaju se dobiva situacija kao na slici 11.c, gdje su prikazani ukupni godišnji troškovi od 2368 novčanih jedinica (dakle, najnižim!), ali i kvaliteta od 1,61 mm (najbolja!).



Slika 11. Modelirano buduće ponašanje s graničnom vrijednošću za minimalno vrijeme između dvije uzastopne aktivnosti na podbijanju kolosijeka: a) 6 mjeseci; b) 30 dana; c) 2 godine

Još jedna mudra strategija (a u potpunosti podržana modelom degradacije) mogla bi biti ta da se definira minimalno poboljšanje kvalitete koje se očekuje da se mora postići primjenom aktivnosti održavanja (podbijanjem). Naime ako bi poboljšanje kvalitete (vertikalni "pad" vrijednosti parametra na grafikonu) poslije određene aktivnosti održavanja (podbijanja) postalo premalo, to bi značilo da treba obaviti odgovarajuću aktivnost remonta (zamjene/rešetanja zastora), umjesto da se nastavlja s primjenom dane aktivnosti održavanja (podbijanja), koja je očigledno postala neučinkovita. Međutim, zbog raspoloživog prostora u ovom radu, ova mogućnost nije iskorištena i prikazana, a u njoj se zapravo primjenjuje učinkovitost aktivnosti razine 1 (podbijanja) kao "okidač", tj. kriterij za određivanje

trenutka potrebe izvođenja aktivnosti razine 2 (zamjene/čišćenja zastora), iako je to očigledno veoma značajna funkcionalnost i vrlo korisna za definiranje optimalnog balansa između troškova planiranih aktivnosti na održavanju i remontima i rezultirajuće kvalitete.

5. Zaključak

Razvoj generičkog modela degradacije omogućava željeznicama da provedu dugoročne simulacije ponašanja kolosijeka, uravnotežujući održavanje s remontom, kao i postignutu kvalitetu s troškovima radova na održavanju i remontima, kontrola i drugih posljedica, kao što su poremećaji prometa, smanjenje dostupnosti infrastrukture, itd. Osnajivanjem ovog modela tehnikama proračuna troškova čitavog uporabnog ciklusa (eng. *Life Cycle Costing*) i numeričke optimizacije (s pravilnom i fleksibilnom formulacijom ciljnih funkcija) u okviru dobro strukturiranog RMMS-a, može se postići stvarna dugoročna ravnoteža koja bi donijela značajne uštede u troškovima željezničkim organizacijama. Istovremeno, ovakav alat bi bio od neprocjenjive pomoći infrastrukturnim menadžerima.

Struktura sustava za upravljanje održavanjem željezničke infrastrukture i njegove funkcionalnosti opisane u ovom radu snažno potkrepljuju tvrdnju da je RMMS zasigurno poseban tip sustava u željezničkoj industriji. On u potpunosti podržava pristup temeljen na mjerenju i analizi stanja, tkz. 'condition-based' pristup u upravljanju radovima na održavanju i remontima, povezujući sve potrebne podatke od dijelova elemenata željezničke infrastrukture i eksploatacijskih informacija, preko podataka o mjerenju stanja, do povijesti radova na održavanju i remontima te alokacije resursa – kroz jedinstven i sofisticiran automatski proces modeliranja degradacije i učinkovitog planiranja radova utemeljenog na pravilima odlučivanja. Uz sve to, RMMS omogućava stvarni izbor optimalnih radova na održavanju i remontima, osiguravajući da se uvijek pravi radovi izvode na pravim mjestima, u pravo vrijeme i iz pravih razloga. Postizanje toga, u konačnici omogućava značajne uštede u troškovima, dok istovremeno omogućava držanje pune i konstantne kontrole sigurnosti prometa i kvalitete svih elemenata željezničke infrastrukture. Sve to naposljetku omogućava željeznicama simuliranje, ispitivanje i istraživanje različitih politika održavanja i remonta te njihove posljedice.

LITERATURA

- [1] Esveld, C.: *Modern Railway Track*, Second Edition, MRT-Productions, Zaltbommel, The Netherlands, 2001., ISBN 90-800324-3-3.
- [2] Pace, P., Jovanovic, S.: Using measurement data for decision support, *International Railway Journal*, 51 (2011) 7, pp. 37-39., ISSN 0744-5326
- [3] Jovanović S., Bozović D., Tomičić-Torlaković M.: Mjerenje i analiza stanja željezničke infrastrukture kao osnova za upravljanje održavanjem, *GRAĐEVINAR*, 66 (2014) 4, pp. 347-358.
- [4] Gianess, S., Pascoschi, G.: ARCHIMEDE - The first European diagnostic train for global monitoring of railway infrastructure, *WCRR2003 World Congress on Railway Research*, Edinburgh, 2003.
- [5] Tzanakakis, K.: *The Railway Track and Its Long Term Behaviour*, Springer, 2013., ISSN 2194-8119.
- [6] Chandra, S., Agarwal, M.: *Railway Engineering*, Oxford, University press, 2010. ISBN-10: 0-19-568779-5.
- [7] Ebersohn, W.: Track Maintenance Management Philosophy, *In the Proceedings of the Sixth International Heavy Haul Railway Conference*, Cape Town, South Africa, 1997.
- [8] Shenton, M., Tunna, J.: Planning Track Maintenance and Renewal for the Business Manager and Civil Engineer, *Proceedings of 1991 Heavy Haul Workshop*, Vancouver, pp. 243-257, 1991.
- [9] Iwnicki, S., Grassie, S., Kik, W.: *Track Settlement prediction using computer simulation tools*, Rail Technology Unit, Manchester Metropolitan University, 2000.
- [10] Uzarski, D., McNeil, S.: Technologies for planning railroad track maintenance and renewal, *Journal of transportation engineering*, 120 (1994), pp. 807., doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1994\)120:5\(807\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1994)120:5(807))
- [11] Esveld, C.: The application of Recording data for Track Maintenance - A six week's study at BR, *NS Report IS8/CE/15 London/Utrecht*, 1977.
- [12] Esveld, C., Jourdain, A., Kaess, G., Shenton, M.: Historic data on track geometry in relation to maintenance, *Rail Engineering International*, 2 (1988)
- [13] Hunt, G.: Computer-aided Track Management, *IQPC Asset Management for Railway Infrastructure 2002 Conference*, Workshop B, London, 2 (2002).
- [14] ERRI: D187/DT299, Decision Support System for Track Maintenance and Renewal, Utrecht, April 1994.
- [15] Jovanovic, S.: Kostenreduktion bei der Oberbauinstandhaltung durch ECOTRACK, *Der Eisenbahn Ingenieur (EI)*, Germany, (2003).
- [16] Jovanovic, S.: Condition-based decision making minimizes track costs, *Railway Gazette*
- [17] International, UK, May 2003 issue, pp. 277 - 282.
- [18] Jovanovic, S., Zaalberg, H.: ECOTRACK: Two years of experience, *Rail International - Schienen der Welt*, 2000., ISSN 00208442.