



dipl. ing. dr. tech. **Olja Barbir**

System Engineer
olja.Barbir@plassertheurer.com



dipl. ing. **Bernhard Antony**

BSc, Head of Technology Centre
Purkersdorf
bernhard.antony@plassertheurer.com



dipl. ing. dr. techn. **Fabian Hansmann**

Head of Marketing
fabian.hansmann@plassertheurer.com



dipl. ing. dr. mont. **Christian Koczvara**

Research engineer
christian.koczvara@plassertheurer.com



dipl. ing. dr. techn. **Samir Omerović**

Simulation engineer
samir.omerovic@plassertheurer.com

UDK: 625.1+502.17

1. Uvod

Procjena stanja kolosiječnog zastora (tucanika) igra ključnu ulogu u daljnjem razvoju automatizacije strojnoga reguliranja, tj. podbijanja kolosijeka. Tucanik u gornjemu ustroju željezničke pruge temelj je tračnica, izravno utječe na njihovu stabilnost i dugovječnost geometrije. Preciznom procjenom stanja matrice kamena poput razine onečišćenja i promjena oblika i veličine mogu se

AUTOMATIZACIJA PODBIJANJA KOLOSIJEKA

U cilju bržeg, kvalitetnijeg i učinkovitijeg podbijanja kolosijeka prati se razvoj novih tehnologija koji dovodi do automatizacije podbijanja kolosijeka. Potvrđeno je da automatizacija podbijanja kolosijeka omogućuje optimalne i dosljedne rezultate podbijanja, minimizirajući ljudske pogreške i varijacije u kvaliteti. Takva visoka razina preciznosti posebno je važna za promet teških tereta (engl. heavy haul) te za prometovanje velikim brzinama, gdje čak i male nepravilnosti u geometriji tračnica mogu dovesti do povećanog trošenja svih elemenata kolosijeka, do smanjenih operativnih brzina pa čak i do potencijalno ugrožene sigurnosti.

dizajnirati i optimirati sustavi automatizacije kako bi se riješili specifični izazovi s kojima se suočavamo tijekom podbijanja. Ta procjena pruža vrijedne uvide u ponašanje kolosiječnog zastora i pomaže u određivanju odgovarajućih parametara i tehnika potrebnih za učinkovito automatizirano podbijanje. Nadalje, automatizacija podbijanja omogućuje učinkovito planiranje i izvođenje održavanja kolosijeka, skraćujući vrijeme potrebno za zatvaranje određene trase za promet.

2. Koraci u smjeru automatizacije podbijanja kolosijeka

Automatizacija podbijanja kolosijeka uključuje primjenu naprednih tehnologija radi smanjenja potrebe za dodatnim („ručnim“) intervencijama te u cilju optimiranja operacija i poboljšanja učinko-

vitosti i točnosti održavanja. Cilj je omogućiti precizno i konstantno homogeno kvalitetno obnavljanje geometrije tračnica. Različiti aspekti podbijanja opisani u idućim poglavljima mogu se (ili dijelom već jesu) automatizirati kako bi se postigli ti ciljevi.

2.1. Dizanje, poprečno niveliranje i rukanje

Prije podbijanja dolazi do inicijacije jedinice za podizanje i niveliranje. Taj ključni korak uključuje podizanje tračnica (podišu se između jednog i četiri praga, ovisno o vrsti podbijačice) na željenu poziciju. Kako se tračnice podišu i ponovno pozicioniraju, područje kontakta između praga i tucanika poremećeno je, što rezultira stvaranjem praznine ispod praga, istodobno osiguravajući precizno poprečno poravnanje [1].



Slika 1. Plasser SmartTamping – Plasser TampingAssistant

U nastojanju da se taj proces automatizira razvijen je novi sustav koji služi kao alat za podršku operatoru stroja u stvarnome vremenu (slika 1.). Jedinicama za lasersko skeniranje sustav bilježi detaljne podatke o tračnicama i okolnome području, generirajući visokoprecizan 3D model. Primjenom naprednih algoritama umjetne inteligencije sustav razlikuje i kategorizira različite objekte na kolosijeku, uključujući tračnice, pragove i potencijalne prepreke poput kabela ili instalacija. Sve preporuke za pozicioniranje prikazuju se operatoru stroja radi ocjene, pružajući mu priliku za odobrenje ili odbijanje. Nakon što predložene radnje odobre operatori, stroj prelazi u autonoman način rada, precizno pozicionirajući jedinicu za podizanje, niveliranje i podbijanje prema odobrenim uputama [1].

2.2. Podbijanje

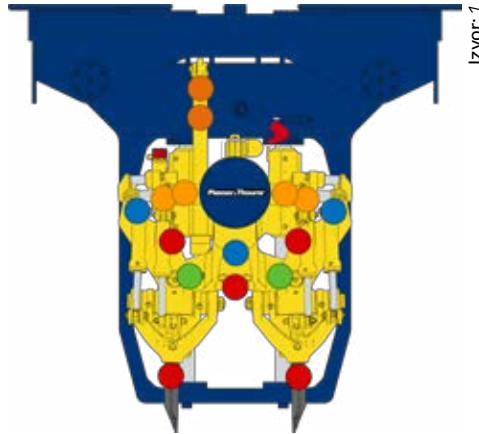
Po završetku podizanja i niveliranja započinje podbijanje. Podbijanje se može podijeliti u tri faze [2]:

1. prodiranje (penetracija) podbijačice u matricu tucanika
2. stiskanje, koje se sastoji od:
 - a. punjenja šupljine nastale postupkom podizanja
 - b. zbijanja tucanika ispod praga
3. podizanje jedinice za podbijanje praćeno njezinim premještanjem na sljedeći prag ili grupu pragova.

Automatizacija samog podbijanja provodi se uz pomoć mjernih sustava i senzora, analize prikupljenih podataka i uz strojno učenje. Praćenje u stvarnome vremenu, olakšano senzorskim sustavima za mjerenje i mehanizmima povratne informacije, omogućuje trenutačnu (*on-the-spot*) informaciju o njegovu napretku i učinkovitosti. Mjerni sustav implementiran na podbijačici kao i načini analize prikupljenih podataka i rezultati u obliku novih proizvoda dostupnih na tržištu opisani su u sljedećim poglavljima.

2.2.1. Smart Tamping Units

Nadzor nad podbijanjem omogućen je upotrebom pametnih jedinica za podbijanje (*Smart Tamping Units*), prikupljanjem informacija o podkonstrukciji tračnica i stanju (stupnju onečišćenja) kolosiječnog zastora. Nekoliko strojeva za podbijanje tračnica u Europi, Japanu i SAD-u [3] opremljeno je pametnim jedinicama za podbijanje s ugrađenim mjernim sustavom koji je prikazan na slici 2.



Izvor: 7

Slika 2. Pametna jedinica za podbijanje univerzalnog stroja za podbijanje Unimat 09-4x4/4s E³ s ugrađenim senzorima: tenzometri (crvena), kutni pretvornik pomaka (zeleni), akcelometri (plavi) i senzori tlaka (narančasti)

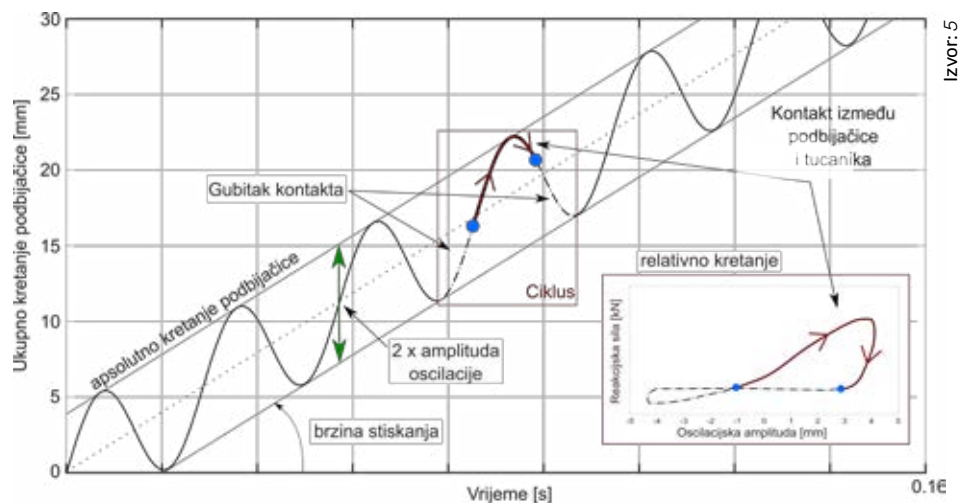
Senzorski postav sastoji se od:

- tenzometara koji se koriste za mjerenje otpora penetracije i reakcijskih sila na dodiru između ploče podbijačice i tucanika
- senzora tlaka koji se koriste za mjerenje pritisaka tijekom procesa stiskanja, iz čega se izračunavaju sile koje djeluju na ploču podbijačice u odsutnosti ili u slučaju kvara tenzometara
- kutnih pretvornika pomaka i akcelometara koji su postavljeni na jedinicu za podbijanje, a koji omogućuju precizno izračunavanje ukupnog pokreta podbijačice, koji obuhvaća apsolutno kretanje definirano brzinom stiskanja te relativno kretanje, ovisno o parametrima dinamičke pobude – frekvenciji i amplitudi (slika 3.).

Opisani mjerni sustav koristi se za prikupljanje podataka i omogućuje sveobuhvatnu dokumentaciju podbijanja. Snimanje i analiza podataka provode se do najmanjega mogućeg detalja. Uzimajući u obzir uzorkovanu frekvenciju od 1 kHz, svaki od primijenjenih senzora pruža 10³ podatkovne točke u sekundi. Takvo detaljno snimanje podataka omogućuje analizu svakoga pojedinačnog oscilacijskog ciklusa s trajanjem od otprilike 28 ms (pri frekvenciji od 35 Hz). Svaki ciklus prikazan je u obliku dijagrama opterećenja-pomaka, omogućujući grafički prikaz svakog ciklusa (slika 4.) i izračun sljedećih karakteristika podbijanja uz napomenu da je svaka karakteristika podbijanja izračunana, a parametar veličina postavlja operator stroja (npr. trajanje stiskanja):

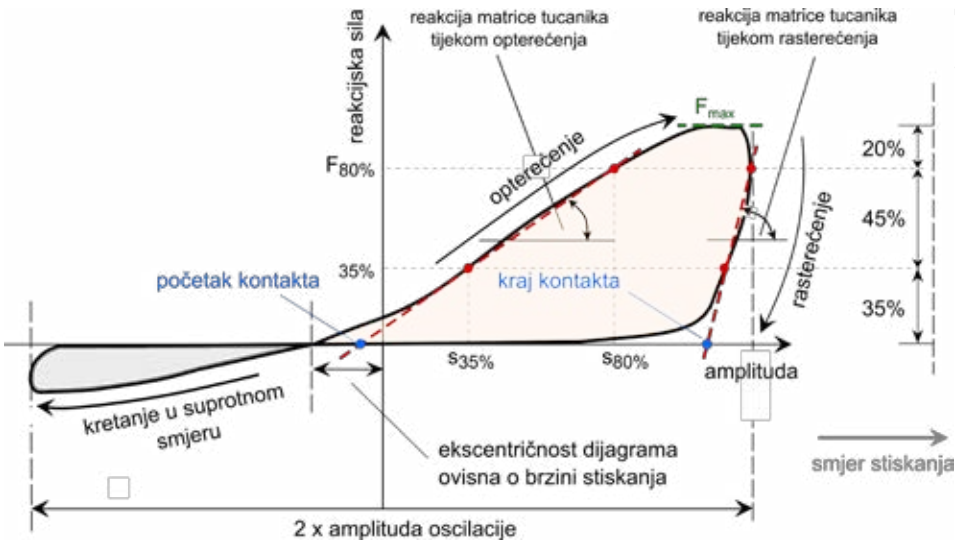
- amplitude oscilacije
- maksimalne reakcijske sile po ciklusu
- odziv ili reakciju matrice tucanika tijekom opterećenja i rasterećenja
- energiju prenesenu u tucanik (površina omeđena krivuljom opterećenja-pomaka)
- točke početka i gubitka kontakta podbijačice s tucanikom.

Osim toga parametri podbijanja koje postavlja operator stroja, GPS koordinate, sve poduzete radnje kao i odstupanja ili anomalije otkrivene tijekom procesa snimaju se i služe kao vrijedni zapisi za analizu i buduće planiranje održavanja. Ukupno se zabilježi otprilike 600 000 podatkovnih točaka za svaki podbijeni prag. Velika količina podataka dobivena je korištenjem pametnih jedinica za podbijanje tijekom redovitog održavanja i



Izvor: 5

Slika 3. Ukupno kretanje podbijačice s istaknutim jednim oscilacijskim ciklusom



Slika 4. Pojednostavljena krivulja opterećenja-pomaka

Izvor: 5
Tijekom prodiranja

Stanje tucanika može biti procijenjeno na temelju podataka snimljenih tijekom penetracije ili prodora podbijačice u kolosiječni zastor. Maksimalna vertikalna sila otpora u odnosu na maksimalnu brzinu pokreta podbijačice prema dolje daje *Ballast Coefficient*, vrijednost dobivenu iz praktičnih promatranja i mjerenja [6]. Ta vrijednost služi kao pokazatelj sposobnosti kolosiječnog zastora da se odupre deformaciji i održi strukturnu cjelovitost. Niža vrijednost sugerira stabilniji i kompaktniji gornji sloj kolosiječnog zastora. Takve odlike obično odgovaraju boljemu stanju tucanika, s manje onečišćenja i degradacije. Viša vrijednost upućuje na smanjen otpor deformaciji i na povećanu osjetljivost na lom pojedinih čestica (kamen), što se uglavnom povezuje s tucanikom koji je u višem stupnju istrošen i/ili kontaminiran.

Tijekom stiskanja

Ispravnom interpretacijom interakcije između podbijačice i tucanika tijekom stiskanja također je moguće utvrditi stanje kolosiječnog zastora. Kako bi to bilo moguće, stiskanje treba podijeliti na integralne dinamičke komponente – cikluse (slika 4.). Napredovanjem procesa onečišćenja tucanika (engl. *ballast fouling*), ponašanje i odgovor matrice tucanika tijekom kontakta s podbijačicom mijenjaju se, rezultirajući različitim oblicima krivulja opterećenja-pomaka, ovisno o stanju kolosiječnog zastora (slika 5.).

nakon rekonstrukcije tračnica u nekoliko zemalja diljem svijeta. Najvažniji rezultati analize podataka prikazani su u sljedećim poglavljima.

Podbijanje se oslanja na dinamičku pobudu kako bi učinkovito postigao svoje ciljeve jer bi bez dinamičke pobude samo spuštanje jedinice za podbijanje rezultiralo povećanim trošenjem kako jedinice za podbijanje tako kolosiječnog zastora. Osim toga samo ubrzanje spuštanja ne bi bilo dovoljno da podbijačica prodre u tucanik i dosegne željenu poziciju ispod praga.

Dinamička je pobuda višestruko korisna tijekom podbijanja. Osim što olakšava prodiranje u kolosiječni zastor, igra i ključnu ulogu u izvođenju stiskajućeg pokreta. Taj je pokret neophodan kako bi se prevladao pasivni tlak tla i učinkovito repositionirao kamen tucanik, ispunjavajući prazninu ispod praga i stvarajući stabilnu podlogu za tračnice. Iako povećanje frekvencije pobude može ubrzati zbijanje, također uvodi rizik od dilatacije u matrici tucanika. Zato je pronalaženje pravilne ravnoteže u frekvenciji pobude ključno kako bi se osigurali optimalni rezultati podbijanja, bez ugrožavanja stabilnosti i integriteta kolosiječnog zastora [4].

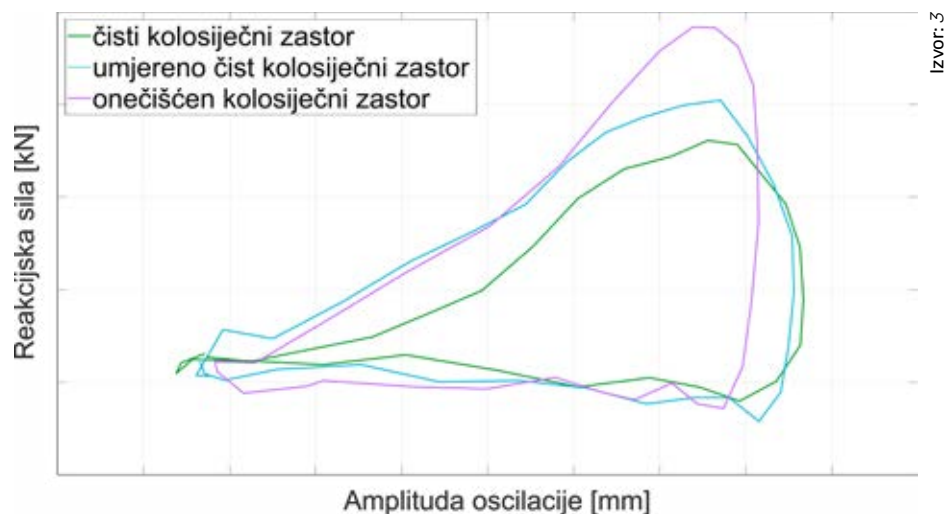
2.2.2. Evaluacija stanja kolosiječnog zastora

Jedan od ključnih aspekata u procesu automatizacije podbijanja kolosijeka jest procjena stanja tucanika, tj. kolosi-

ječnog zastora. Stanje se može utvrditi na dva načina: tijekom penetracije ili tijekom stiskanja, ali obje metode podrazumijevaju korištenje pametnih jedinica za podbijanje, odnosno korištenje senzornog sustava za mjerenje i analize podataka.

Geološko podrijetlo i vrsta tucanika, vremenski uvjeti tijekom podbijanja, oblik čestica (kamen) te izvori mogućih onečišćenja ne uzimaju se u obzir tijekom analize podataka i tumačenja rezultata.

Uspješno i točno utvrđivanje stanja tucanika omogućava razvoj *condition-based* podbijanja te čini mogućom prilagodbu parametara podbijanja svakoj specifičnoj situaciji *in situ*.



Slika 5. Usporedba karakterističnih krivulja opterećenja-pomaka za tri različita stanja kolosiječnog zastora

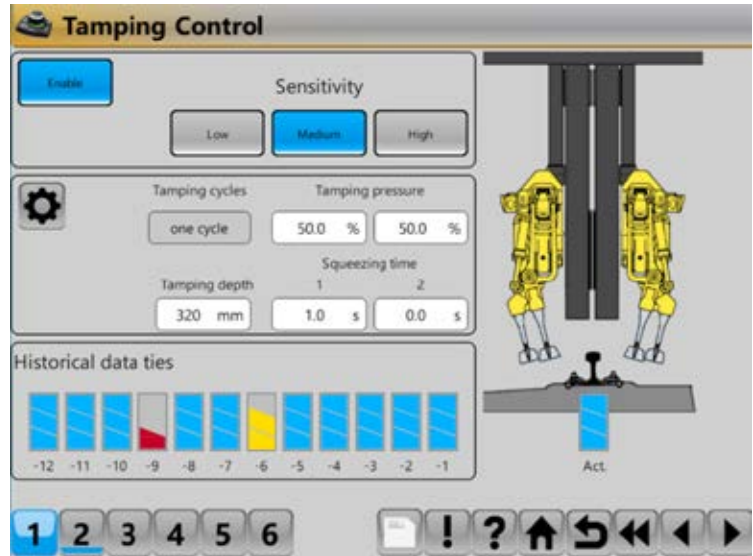
Osim promjena uzrokovanih ranim uzročnicima onečišćenja, razlike između čistog i umjerenog čistog tucanika dodatno su istaknute početnim slijeganjem i konsolidacijom od posljedica prometnog opterećenja. Onečišćenje generira i potrebu za znatno većom reakcijskom silom potrebnom za provedbu relativnoga kretanja podbijačice, što rezultira i znatno većom energijom zbijanja (izračunano kao područje omeđeno krivuljom opterećenja-pomaka).

Nadzor punjenja

Popunjavanje praznine ispod pragova koja nastaje tijekom podizanja ključan je prvi korak u održavanju željene geometrije kolosijeka. Radi poboljšanja kvalitete podbivanja razvijen je nadzorni sustav *Plasser TampingControl* (slika 6.) [2, 7]. Taj sustav detektira promjene u otporu dok se praznina ispod praga popunjava tucanikom tijekom inicijalnog dijela stiskanja. U početku je brzina kretanja podbijačice veća zbog manjeg otpora, ali kako se praznina ispod praga popunjava, brzina se smanjuje. Ta automatska prilagodba uvjetima na kolosijeku i stanju kolosiječnog zastora sprječava njegovo prekomjerno trošenje. Sustav pruža operatoru stroja povratne informacije u stvarnome vremenu prikazivanjem brzine kretanja podbijačice, omogućujući trenutačno djelovanje u slučaju nepotpunog popunjavanja (slika 6.). Taj nadzorni sustav poboljšava točnost i učinkovitost podbivanja, minimizirajući pojedinačne nedostatke i osiguravajući potpuno i homogeno popunjavanje praznina ispod svakog praga [7].

2.3. Projektna dokumentacija – Plasser TampingReport

Detaljno protokoliranje podbivanja označava važan korak prema postizanju transparentnoga i sveobuhvatnoga automatskog dokumentiranja. Taj protokol obuhvaća sve relevantne aspekte i parametre ključne za kvalitetu podbivanja poput preciznih podataka o položaju jedinice za podbivanje i odabranih postavki parametara stroja. Uz rezultate DPR izvješća (*Data Recording Processor*) operatori stroja mogu koristiti i *Plasser TampingReport* kako bi pružili dokaz o tehnički ispravnome održavanju kolosijeka. Upravitelji infrastrukturom mogu provjeriti je li održavanje izvedeno u skladu s njihovim standardima i analizi-



Izvor: 3

Slika 6. *Plasser TampingControl* pruža operatoru stroja povratne informacije u stvarnome vremenu koristeći kolorističku skalu: potpuno popunjavanje praznine ispod praga (plavo), nepotpuno popunjavanje (crveno), preporuča se ponavljanje popunjavanja radi dodatnog poboljšanja kvalitete (žuto)

rati učinkovitost rada. *Plasser TampingReport* također omogućuje prilagodbu i optimiranje planiranja nadolazećih radova na temelju zabilježenih informacija. Te se informacije mogu koristiti za pomoć pri donošenju strateških odluka, na primjer, kod raspisivanja natječaja za održavanje kolosijeka.

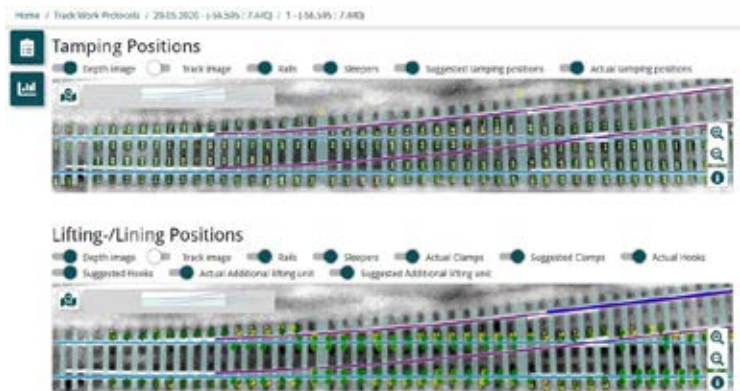
3. Unakrsno referenciranje i kalibracija primjenom drugih dostupnih metoda

Rezultati dobiveni iz *in situ* mjerenja i opisani u prethodnim poglavljima korišteni su za napredak automatizacije. Ipak, za osiguranje pouzdanosti potrebna je provjera vjerodostojnosti uz primjenu alternativne i pouzdane metode. Plauzibilnost novorazvijenih metoda utvrđu-

je se korištenjem simulacija podbivanja (mehaničkog i numeričkog modela), povijesnih podataka o geometriji kolosijeka, unakrsnim referenciranjem s uzorcima tucanika ispitanimi u geotehničkome laboratoriju te uključivanjem GPR (*Ground Penetrating Radar*) mjerenja. Te dodatne metode validacije pomažu osigurati pouzdanost i točnost dobivenih rezultata. Više informacija o dostupnim metodama i rezultatima dostupno je u [3].

4. Zaključak

Automatizacija podbivanja kolosijeka poboljšava njegovu učinkovitost i preciznost te istodobno omogućuje ujednačene rezultate visoke kvalitete. Održavanje kolosijeka postaje brže i preciznije, što rezultira većom razinom sigurnosti



Izvor: 8

Slika 7. *Plasser TampingReport*

prometa i unaprjeđenjem ukupnih željezničkih operacija.

Kroz automatizaciju provode se i takozvane *predictive maintenance* strategije, kontinuirano nadgledajući stanje kolosijeka i performanse opreme za podbijanje. To omogućuje identifikaciju potencijalnih problema i zahtjeva za održavanjem unaprijed, što poboljšava ukupnu učinkovitost održavanja. Procjena stanja kolosiječnog zastora omogućila bi daljnje unaprjeđenje strategija održavanja, čineći ih temeljenima na stanju tucanika (*condition-based*), što je ključno iz nekoliko razloga. Prvo, stanje kolosiječnog zastora izravno utječe na stabilnost i performanse kolosijeka, što ga čini bitnim za praćenje i proaktivno rješavanje eventualnih problema. Drugo, implementacija automatizacije u održavanja kolosijeka omogućuje kontinuirano nadgledanje, ciljane intervencije i poboljšanu učinkovitost te unaprjeđenje sigurnosti prometa.

LITERATURA

- [1] B. Antony, O. Barbir, C. Koczwara. 2022. Intelligent tamping - from research to automation. The PWI Journal July 2022, Volume 140, Part 3.
- [2] M. Demml, C. Koczwara, S. Omerović. 2023. Od pijuka do bezemisijske mehanizacije za održavanje kolosijeka, Željeznice, stručni časopis hrvatskog društva željezničkih inženjera, 3/2023.
- [3] O. Barbir, B. Antony, F. Hansmann, C. Koczwara, S. Omerović, S. Offenbacher. 2023. Track ballast condition monitoring with Smart Tamping Units, IHHA Rio 2023 - International Heavy Haul conference 2023
- [4] J. Fischer. 1983. Einfluss von Frequenz und Amplitude auf die Stabilisierung von Oberbauschotter. Doktorski rad. Graz University of Technology, Institute for Railway Engineering and Transport Economy.
- [5] O. Barbir. 2022. Development of condition-based tamping process in railway engineering. Doktorski rad. TU Wien. Institute of Geotechnics.
- [6] Offenbacher, S., Reschke R. 2023. Stopfmaschinen als Datenquelle für einen nachhaltigeren Fahrwegzustand. 24th International Convention of the Working Committee on Railway Technology.
- [7] Koczwara C., Daxberger, H., Omerović, S. 2023. Immer reichlich Schotter unter der Schwelle - vollständige Verfüllung als Basis für das perfekte Auflager. ZEV Rail 2023 (Jahrgang 147) / Ausgabe 01/02.
- [8] <https://www.plassertheurer.com/en/innotrans/plasser-smarttamping> (pristupljeno 5. ožujka 2024.)

SAŽETAK

AUTOMATIZACIJA PODBIJANJA KOLOSIJEKA

Automatizacija podbijanja kolosijeka igra ključnu ulogu u poboljšanju učinkovitosti održavanja i postizanju rezultata visoke kvalitete. Primjenom naprednih tehnologija i pametnih sustava taj pristup omogućuje precizno podizanje, niveliranje i podbijanje tračnica. Praćenje u stvarnome vremenu senzorskim sustavima omogućuje brzu reakciju operatera stroja, a time i optimiranje procesa, minimizirajući ljudske pogreške. Analiza podataka dobivenih tijekom podbijanja dopušta procjenu stanja tucanika, što čini temelj za condition-based održavanje i daljnje unaprjeđenje strategija održavanja kolosijeka. Automatizacija također omogućuje bržu i precizniju provedbu održavanja, što rezultira većom razinom sigurnosti prometa i učinkovitijim željezničkim operacijama.

Ključne riječi: podbijanja kolosijeka, stanje kolosiječnog zastora, automatizacija

Kategorizacija: stručni rad

SUMMARY

AUTOMATION OF THE TRACK TAMPING PROCESS

Automation of the track tamping process plays a crucial role in improving maintenance efficiency and achieving high-quality results. By utilizing advanced technologies and smart systems, this approach enables precise lifting, leveling, and tamping of railway tracks. Real-time monitoring through sensor systems allows for quick response and process optimization, minimizing human errors. Analysis of data obtained during the tamping process enables assessment of ballast condition, providing a basis for condition-based maintenance and further enhancement of track maintenance strategies. Automation also enables faster and more precise execution of maintenance work, resulting in improved traffic safety and more efficient railway operations.

Key words: condition-based track tamping, ballast bed, automation process

Categorization: professional paper

