

Primljen / Received: 2.3.2020.

Ispravljen / Corrected: 8.5.2020.

Prihvaćen / Accepted: 5.6.2020.

Dostupno online / Available online: 10.8.2020.

Korozija i lutajuće struje na tračničkoj infrastrukturi u urbanoj sredini

Autori:



Katarina Vranešić, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
kvranesic@grad.hr
Autor za korespondenciju



Prof.dr.sc. **Stjepan Lakušić**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
laki@grad.hr



Doc.dr.sc. **Marijana Serdar**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
mserdar@grad.hr

Pregledni rad

Katarina Vranešić, Stjepan Lakušić, Marijana Serdar

Korozija i lutajuće struje na tračničkoj infrastrukturi u urbanoj sredini

Tračnice su dio kolosiječne konstrukcije na kojima će se korozija neizbježno pojaviti, osim ako su u potpunosti izolirane te nemaju kontakt s bilo kojim drugim dijelom kolosijeka (prag, pričvrtni pribor) ili elektrolitom poput vlažnog tla ili vode u kolosiječnoj konstrukciji. Korozija će biti znatno brža u prisutnosti lutajućih struja, što će kroz vrlo kratko vrijeme rezultirati gubitkom materijala na nožici tračnice. U radu je dan pregled i opis parametara koji utječu na razinu lutajućih struja, poput električnog potencijala u tračnici i uzdužne provodljivosti tračnice, električnog otpora između tračnice i tla, kao i električne provodljivosti nosivih betonskih slojeva kolosiječne konstrukcije i električne provodljivosti tla.

Ključne riječi:

tračnice, korozija, lutajuće struje, električni potencijal tračnice, električni otpor između tračnice i tla

Subject review

Katarina Vranešić, Stjepan Lakušić, Marijana Serdar

Corrosion and stray currents at urban track infrastructure

Rails are a part of track structure where corrosion process inevitably occurs, except if they are fully insulated and devoid of contact with any other part of the structure (sleepers, fastening accessories) or electrolyte like moist soil or water in track structure. Corrosion occurs much faster in the presence of stray currents, which very soon results in the loss of material at the rail foot. The paper presents an overview and description of parameters influencing stray current levels, such as electrical potential in rail and longitudinal rail conductivity, rail-to-earth electrical resistance, electrical conductivity of load-bearing concrete layers of track structure, and electrical conductivity of soil.

Key words:

rails, corrosion, stray currents, rail potential, rail-to-earth electrical resistance

Übersichtsarbeit

Katarina Vranešić, Stjepan Lakušić, Marijana Serdar

Korrosion und Streuströmungen auf der Schieneninfrastruktur in der städtischen Umgebung

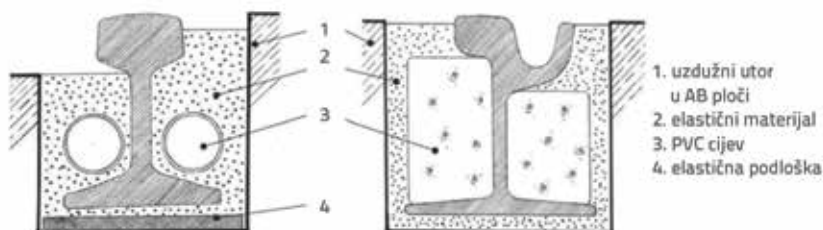
Schienen sind ein Teil der Gleisstruktur, auf welcher unweigerlich Korrosion auftritt, ausgenommen, sie sind vollständig isoliert und haben keinen Kontakt mit irgendeinem anderen Teil des Gleises (Schwelle, Befestigungszubehör) oder Elektrolyten des feuchten Bodens oder Wasser in der Gleiskonstruktion. Die Korrosion wird bei Vorhandensein von Streuströmungen viel schneller sein, was in kürzester Zeit zu Materialverlust am Schienenbein führen wird. In der Abhandlung ist eine Übersicht und die Beschreibung der Parameter darlegt, welche sich auf das Niveau der Streuströmungen auswirken, wie auf das elektrische Potenzial der Schiene und die Längsleitfähigkeit der Schiene, den elektrischen Widerstand zwischen der Schiene und dem Boden, wie auch auf die elektrische Leitfähigkeit der tragenden Betonschichten der Gleiskonstruktion und die elektrische Leitfähigkeit des Bodens.

Schlüsselwörter:

Schienen, Korrosion, Streuströmung, elektrisches Schienenpotenzial, elektrischer Widerstand zwischen Schiene und Boden

1. Uvod

Tramvajski sustavi i sustavi lake gradske željeznice glavni su oblik prijevoza u urbanim sredinama mnogih europskih metropola. Izvedeni su u tijelu cestovne prometnice ili u zasebnom pojasu, a njihove konstrukcije međusobno se veoma razlikuju. Kada je riječ o korozijskim procesima na tračnicama, najvažnije karakteristike kolosijeka su način izolacije tračnice koji ovisi o načinu pričvršćenja tračnice. U slučaju kontinuiranog pričvršćenja, tračnice su ugrađene u utore izvedene u nosivoj betonskoj podlozi te se nakon uređenja kolosijeka po smjeru i visini, slobodan prostor ispunjava elastičnim materijalom. Radi uštede materijala, u praksi se primjenjuju ispune poput PVC cijevi (slika 1.) [1]. Kod ovih kolosijeka tračnice su elastičnim materijalom u potpunosti odvojene od okolne konstrukcije, što ih čini zaštićenim od djelovanja korozijskih procesa.

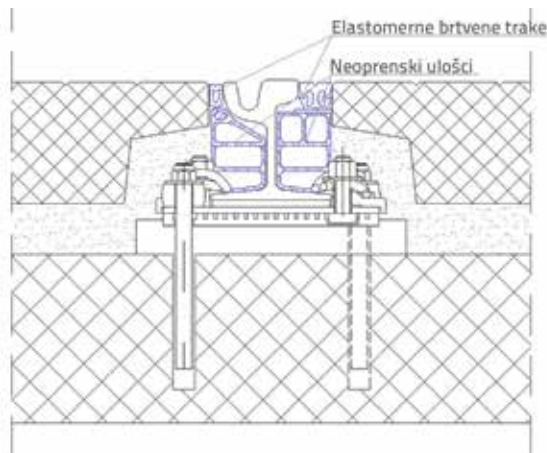
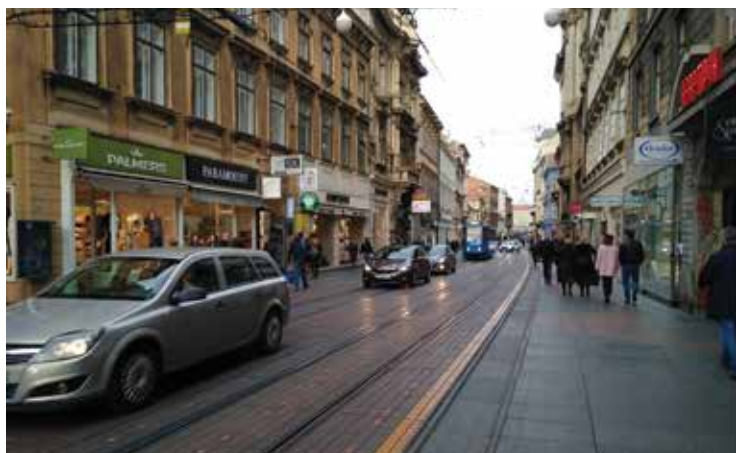


Slika 1. Primjer kontinuirano izoliranih tračnica kod ugrađenog kolosijeka [2]

U slučaju pojedinačnih oslonaca, tračnice su pomoću pričvrstnog pribora pričvršćene za podlogu. Ovdje je najčešće riječ o sustavima kolosijeka bez pojedinačnih pragova, gdje se primjenjuju betonski nosivi slojevi, a mjesta pričvršćenja tračnice integrirana su u nosivi sloj [1, 3]. Primjer takvih konstrukcija je i tramvajska infrastruktura u Zagrebu, gdje je tračnica preko neoprenske podloške oslonjena na čeličnu podložnu ploču i ležaj od sintetskog kompozita na razmaku od jednog metra [4]. Među prvim je sustavima pričvršćenja, koji se primjenjivao na tramvajskoj infrastrukturi u Zagrebu jednostruko elastični pričvrstni pribor ZG 3/2 (slika 2.a). Međutim, zbog nedostataka koje je pokazivao taj sustav, počeli su se primjenjivati drugi sustavi, a u proteklih 20 godina najviše se primjenjuju pričvrstni pribor povećane elastičnosti ("PPE" sustav) te dvostruko elastični pričvrstni pribor (sustav "DEPP") [5]. Za razliku od sustava ZG 3/2, kod PPE i DEPP sustava, ispod čelične podložne ploče nalazi se rebrasta neoprenska podloška koja omogućuje bolju elastičnost i izoliranost pričvrstnog pribora (slike 2.b i 2.c), što će se dalje u ovome radu pokazati kao prednost kada je riječ o djelovanju lutajućih struja. Osnovna razlika između DEPP i PPE sustava jest u razdvajanju sidrenog vijka od elastične pritiskalice te elastičnim svojstvima neoprenske podloške kod DEPP sustava [6, 7].



Slika 2. Poprečni presjek sustava pričvršćenja u gradu Zagrebu: a) ZG 3/2; b) PPE; c) DEPP [8]



Slika 3. Primjer kolosijeka u sastavu cestovne prometnice (lijevo), poprečni presjek mjesta pričvršćenja kod kolosijeka u zoni cestovne prometnice, sustav pričvršćenja DEPP (desno)

Ako se kolosijeci nalaze u zoni cestovne prometnice, zatvoreni su asfaltom, armiranobetonskim pločama ili na neki drugi način te se nazivaju ugrađeni kolosijeci (slika 3. lijevo). U gradu Zagrebu kod ugrađenih kolosijeka izolacija tračnice ostvaruje se elastomernim ulošcima na vratu tračnice, a brtvljenje između tračnica i pokrovnih ploča upotrebom elastomernih traka za brtvljenje (slika 3. desno) [7, 8]. S obzirom na to da se po ugrađenim kolosijecima odvija i promet cestovnih vozila, tijekom uporabe dolazi do oštećenja armiranobetonskih pokrovnih ploča, propadanja neoprenskih uložaka uz vrat tračnice te ispadanja elastomernih brtvenih traka (slika 4.). Takva oštećenja rezultiraju prodiranjem vode u kolosijek, čime se stvaraju pogodniji uvjeti za razvijanje korozivskih procesa.

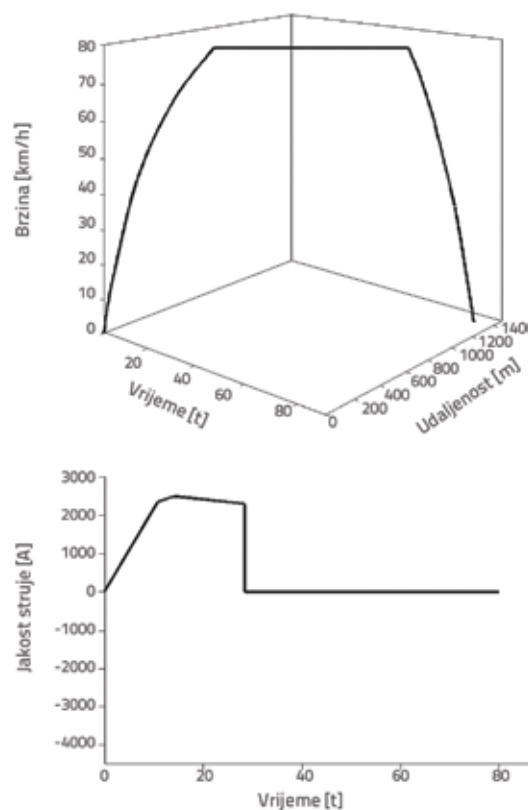


Slika 4. Oštećena armiranobetonska ploča na kolosijeku u sastavu cestovne prometnice (lijevo), propali neoprenski ulošci uz vrat tračnice i ispadanje elastomerne brtvene trake (desno) [6]

U većini slučajeva tramvaje i podzemne željeznice pokreće istosmjerna struja napona od 550 do 750 V, a prigradske i gradske željeznice istosmjerna struja napona od 750 do 1500 V [11]. Trenutačno je u upotrebi i kontaktna mreža željeznice nazivnog napona istosmjerne struje 3000 V. Kada je riječ o željeznicama za daleki promet, u primjeni je izmjenična struja frekvencija 50 Hz i 16 2/3 Hz [11].

Električna se energija iz elektroenergetske mreže dovodi do ispravljačke stanice gdje se, pomoću transformatora i ispravljača, pretvara u istosmjernu struju određenog napona koja je potrebna vozilu za pokretanje [10-12]. Svaka ispravljačka stanica napaja svoj dio kontaktne mreže neovisno o ostalim dijelovima, a vozilo struju pomoću pantografa preuzima iz kontaktne mreže [14]. U isto vrijeme samo jedna ispravljačka stanica može opskrbljivati vozilo na tramvajskoj infrastrukturi [5]. Za povratak struje u ispravljačku stanicu najčešće se koriste vozne tračnice te povratni vodovi koji čine vezu između tračnica i ispravljačke stanice. Korištenjem tračnica kao povratnog vodiča struje smanjuju se troškovi prilikom izgradnje kolosijeka jer nije potrebna ugradnja dodatnog povratnog vodiča [10, 13]. Jakost struje potrebne za pokretanje vozila ovisi o načinu vožnje vozila. Na slici 5. gore prikazan je dijagram ovisnosti vremena, brzine te prijeđenog puta prilikom kretanja vozila, a na slici 5. dolje, jakost struje koja je potrebna vozilu s obzirom na različite načine kretanja. Na tom su dijagramu analizirana tri slučaja: u vremenskom intervalu od 0 do 28 sekundi vozilo ubrzava, od 28 do 63 sekunde vozilo se kreće jednolikom brzinom, a od 63 do 84 sekunde usporava do konačnog zaustavljanja. Ako se vozilo

kreće jednolikom brzinom ili usporava bez mogućnosti regenerativnog kočenja (vraćanja električne energije u napojnu mrežu koristeći motore prilikom kočenja vozila kao generatore [16]), njegova potrošnja struje je minimalna, čime će i lutajuće struje biti minimalne. S druge strane, potrošnja struje se povećava ubrzavanjem, što će rezultirati i većim vrijednostima lutajućih struja [17, 18]. Kod ubrzanja vozila, količina lutajućih struja ovisit će i o akceleraciji vozila, pri čemu će kod većih akceleracija poprimati veće vrijednosti.



Slika 5. Dijagram ovisnosti vremena, brzine i prijeđene udaljenosti prilikom kretanja tračničkog vozila (gore), jakost struje potrebne vozilu s obzirom na različite načine kretanja (dolje), prema [17]

U elektrificiranim tračničkim sustavima najčešće primjenjivani sustav uzemljenja tračnica je plivajući sustav (*eng. floating system*). Kod tog sustava tračnice nisu vezane za tlo u ispravljačkoj stanici, već je jedina veza između tračnice i tla preko pričvrstnog pribora. Primjenom takvog sustava, u tračnici se mogu stvoriti visoki naponi koji će ugrožavati sigurnost korisnika tračničke infrastrukture, što je moguće riješiti upotrebom uređaja za kontrolu visokih napona [16, 17]. U ovom će se sustavu, prilikom povrata struje od vozila do ispravljačke stanice, električni napon u tračnici pojaviti kao pozitivan s obzirom na tlo u blizini tračničkog vozila te negativan u blizini ispravljačke stanice. Raspodjela napona duž tračnice definirat će i lokacije pojava lutajućih struja [17, 18].

2. Korozija na tračničkoj infrastrukturi u urbanoj sredini

2.1. Korozija uslijed lutajućih struja

Elektrokemijska korozija je prirodni proces pri kojemu metal u kontaktu s elektrolitom poput zraka, vode ili tla korodira te dolazi do njegovog otapanja [15, 19]. Da bi se korozijski proces mogao ostvariti, mora postojati razlika potencijala između dva metala, pri čemu jedan postaje anoda, a drugi katoda. Nadalje, metali moraju biti električno spojeni i uronjeni u elektrolit. Elektrolit će osigurati ionsku provodljivost, dok će se između anode i katode ostvariti elektronska provodljivost [20, 21]. Kada je riječ o koroziji na tračnicama u kolosijeku, ona je posljedica kontakta čelika tračnice s korozivskim okolišem u kojemu se tračnica nalazi te djelovanja lutajućih struja na kolosijeku. Korozija uslijed lutajućih struja posebni je tip elektrokemijske korozije koja se javlja uslijed istjecanja struje iz nekog metalnog objekta (električnog vodiča), a predstavlja gorući problem novijeg doba za kolosijeka u gradu koji kao izvor energije koriste istosmjernu struju. U slučaju ovog tipa korozije na tračnici se pod utjecajem struje koja izlazi iz tračnice formiraju anoda i katoda, a elektrolit predstavlja korozivni okoliš u kojemu se tračnica nalazi.

Prilikom povratka struje kroz tračnicu od vozila do ispravljačke stanice, u tračnici se stvara električni otpor (otpor kojim se materijal vodiča opire prolasku struje) te uzrokuje razliku električnog potencijala u tračnici [24]. Razlika potencijala u tračnici ovisit će o načinu uzemljenja tračnica. Kod plutajućeg sustava, koji je danas najviše u primjeni, potencijal poprima pozitivne vrijednosti na mjestima položaja vozila, a negativne vrijednosti u blizini ispravljačke stanice. Ako tračnica nije potpuno izolirana od tla, na mjestima pozitivnog potencijala dio struje izlazi iz tračnice. Ta struja pronalazi put manjeg električnog otpora kojim će se vratiti na izvor struje (slika 6.) i naziva se lutajućom strujom [23, 24].



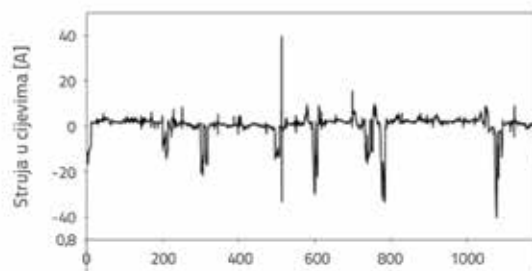
Slika 6. Shematski prikaz nastanka lutajućih struja na tračničkoj infrastrukturi

Na mjestima izlaženja struje iz tračnice, korozijski procesi se dodatno ubrzavaju zbog djelovanja lutajućih struja [17]. Struja iz tračnice kroz tlo ulazi u obližnju ukopanu metalnu konstrukciju, poput metalnog cjevovoda, kojom nastavlja svoj povratni put do izvora. Na mjestima gdje će struja izlaziti iz tih ukopanih konstrukcija kako bi se vratila u tračnicu ili ispravljačku stanicu,

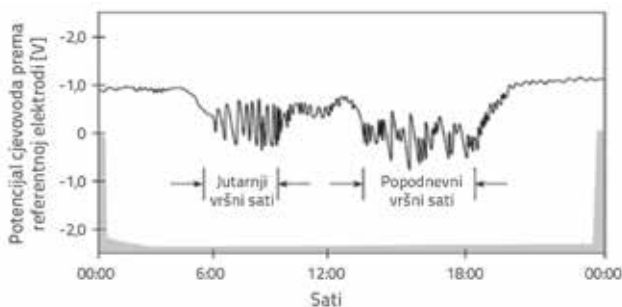
također će se stvarati korozija koja može rezultirati puknućem cjevovoda [27]. Zbog navedenog, korozija uslijed lutajućih struja predstavlja zajednički problem operatorima tračničkih infrastruktura te operatorima komunalnih infrastruktura.

S obzirom na to da korozija uslijed lutajućih struja, uzevši u obzir sve vrste elektrokemijske korozije, predstavlja najveću opasnost od degradacije tračnica u kolosijeku i komunalne infrastrukture u blizini kolosijeka, treba stoga veliku pozornost usmjeriti na monitoring parametara kolosijeka koji će definirati količinu lutajućih struja na određenom segmentu kolosijeka [13]. Ti su parametri detaljno opisani u poglavlju 3.

Lutajuće je struje na kolosijeku iznimno teško direktno mjeriti, ali je to moguće učiniti na komunalnim infrastruktura u blizini kolosijeka uporabom različitih uređaja. Martinez S. i dr. u svome su radu [28] provodili terensko mjerenje lutajućih struja na ukopanim cjevovodima postavljenim u blizini tramvajske infrastrukture. Analizom rezultata ustanovljeno je da prolazak tramvajskog vozila uzrokuje visoke vrijednosti struje u cjevovodima. Na slici 7. dan je prikaz izmjerene struje u cjevovodu u vremenskom intervalu od 1000 sekundi, pri čemu uski šiljasti vrhovi ("pikovi") odgovaraju prolasku tramvajskog vozila. Sa slike se jasno može uočiti prolazak sedam tramvajskih vozila. Također u slučaju 24-satnog mjerenja, analizom podataka moguće je detektirati povećanje lutajućih struja na cjevovodima u vrijeme jutarnjih i popodnevni sati kada je tračnički sustav najopterećeniji [29]. Na slici 8. prikazani su rezultati 24-satnog mjerenja potencijala cjevovoda, gdje je jasno uočljivo znatno povećanje potencijala u vrijeme vršnih sati [29].



Slika 7. Rezultati terenskog mjerenja struje u ukopanim cjevovodima, visoke vrijednosti odgovaraju prolasku tramvajskog vozila [28]



Slika 8. Potencijal cjevovoda mjereni u periodu od jednog dana [29]

2.2. Primjeri korozijskih oštećenja na tračnicama

Korozija se najčešće događa na mjestima pričvršćenja tračnica za prag, odnosno odgovarajuću podlogu ovisno o tipu kolosiječne konstrukcije, i to na bočnoj strani nožice tračnice (slika 9.) te s donje strane nožice tračnice (slika 10.) [10]. Može se reći da korozija nastaje na mjestima kontakta čelika tračnice s nekim drugim dijelom kolosiječne konstrukcije – pragom ili tračničkim pričvršnim priborom. U radu [30] analizirana je udaljenost tračnice od kolosiječne podloge s obzirom na brzinu korozije. Visinska udaljenost između tračnice i kolosiječne podloge definirana je vrstom praga, a u jednom je slučaju iznosila 35 mm, dok je u drugom bila 71 mm. Pokazano je da je u slučaju manje udaljenosti vjerojatnost pojave korozije tračnica veća za 1,3 puta nego kod veće udaljenosti [30]. Zbog toga je kod manjih visina pragova potrebno više pozornosti usmjeriti na kontrolu kolosijeka te predvidjeti češće izmjene tračnica. Naime, kod manjih visinskih udaljenosti između tračnice i kolosiječne podloge, tračnice češće dolaze u kontakt s vodom koja se može zadržavati u kolosijeku, naročito za vrijeme velikih oborina, pa se ubrzavaju procesi elektrokemijske korozije.



Slika 9. Ispitivani uzorak korodirane tračnice, gubitak materijala s bočne i gornje strane nožice tračnice; zaokružena mjesta predstavljaju mjesta koncentracije najvećih normalnih naprezanja [31]



Slika 10. Ispitivani uzorak korodirane tračnice, gubitak materijala s donje strane nožice tračnice; zaokružena mjesta predstavljaju mjesta koncentracije najvećih normalnih naprezanja [31]

Ako nije osigurana adekvatna odvodnja kolosijeka i ako tračnica dolazi u kontakt s vodom koja će se zadržavati u kolosijeku, tada će korozija na tračnicama biti još izraženija [32]. Kada je riječ o kolosiječnim konstrukcijama koje se nalaze u sastavu cestovne prometnice (slika 3.), brzini korozijske reakcije te boljoj provodljivosti lutajućih struja pogoduju i soli za odleđivanje kojima se tretiraju cestovne površine u sljedećim slučajevima: kada je kolnik vlažan i temperatura zraka ispod 0 °C, neposredno prije početka snijega, kada se očekuje pojava "ledene kiše" te kada je smanjena hvatljivost kolnika [33]. Kao sol za odleđivanje koristi se natrijev i kalcijem klorid, bez pijeska ili sitnog šljunka [33]. Ti kloridi se otapaju u vodi te vrlo lako dopijevaju u kolosijek [21].

Na slici 11. prikazan je uzorak tračnice izvađen iz kolosijeka ugrađenog u cestovnu prometnicu, gdje se korozija tračnice može primijetiti na cijeloj površini nožice, glave i vrata tračnice, a na slici 12. razaranje nožice tračnice na mjestu pričvršćenja.

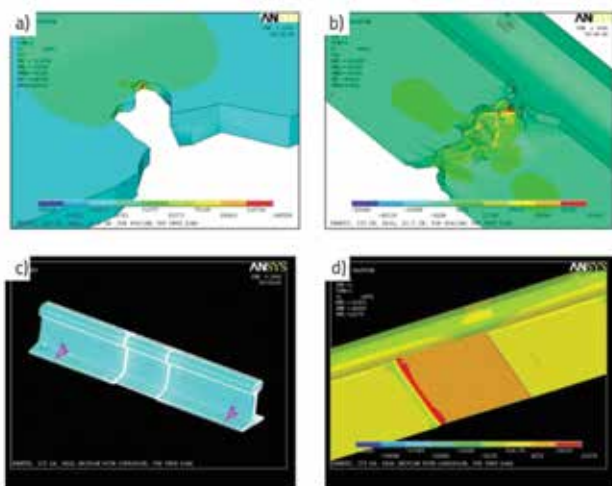


Slika 11. Korozija cijelom duljinom nožice i vrata tračnice, uzorak tračnice iz kolosijeka ugrađenog u cestovnu prometnicu



Slika 12. Razaranje nožice tračnice na mjestu pričvršćenja na kolosijeku ugrađenom u cestovnu prometnicu

Korozija na rubovima nožice tračnice stvara oštre rubove, što je vidljivo i na slikama 7. do 10. Gubitkom materijala na nožici stanjuje se njezin poprečni presjek, što rezultira nakupljanjem naprezanja uslijed opterećenja te proširenjem pukotina. Smanjuje se čvrstoća na smicanje i savijanje, kao i dinamička čvrstoća tračnice te ona postaje osjetljiva na lom uslijed zamora [27, 30]. Osim toga, slabi sila pričvršćenja tračnice što povećava mogućnost njenog naginjanja ili proširenja kolosijeka u zavojima malih polumjera, a to se može detektirati mjerenjem geometrije kolosijeka pod opterećenjem, odnosno mjernim vozilom [30, 31]. Robles Hernández F.C. i dr. [21] koristeći digitalizator napravili su digitalnom snimku uzoraka tračnica prikazanih na slikama 9. i 10. Snimka je prebačena u softver ANSYS te je oblikovan pouzdani numerički model čije su karakteristike odgovarale karakteristikama korodiranih uzoraka tračnice. Da bi se odredila raspodjela naprezanja na uzorcima tračnice, provedena je analiza konačnih elemenata. Na uzorku na slici 9. ustanovljeno je da se stvara velika koncentracija naprezanja na korodiranim, oštrim rubovima nožice tračnice (slike 13.a i 13.b) [21]. Ove vrijednosti dosežu granicu elastičnosti za tračnički čelik, pa korozijska oštećenja nožice tračnice mogu rezultirati lomom nožice [19, 28]. Kod uzorka na slici 10 najveća koncentracija naprezanja uočena je na početku suženja nožice tračnice, međutim vrijednosti naprezanja kod ovog uzorka znatno su manje nego kod prvoga uzorka (slike 13.c i 13.d).



Slika 13. Raspodjela naprezanja na korodiranoj nožici tračnice, a) i b) prvi uzorak, c) i d) drugi uzorak [21]

3. Parametri koji definiraju količinu lutajućih struja na kolosijeku

U modernim željezničkim sustavima, mjere koje se primjenjuju kako bi se smanjilo djelovanje lutajućih struja na izvoru moguće je podijeliti s obzirom na sljedeće dvije grupe parametara koje definiraju razinu lutajućih struja [17, 33]:

- smanjivanje uzdužnog električnog otpora tračnice kao povratnog puta struje
- povećavanje električnog otpora između tračnice i tla.

Ako tračnica nije potpuno izolirana, u obzir treba uzeti i električni otpor podloge (nosivih betonskih slojeva) te električni otpor tla [20].

3.1. Uzdužni električni otpor tračnice

S obzirom na to da se tračnice koriste kao povratni vodič struje od vozila do ispravljačke stanice, u njima će se, kao i u svakom vodiču, stvarati električni otpor, odnosno otpor kojim se materijal vodiča opire protoku struje [15]. Uzdužni električni otpor tračnice određuje razinu napona koji će se kao razlika potencijala pojaviti u tračnici. Veća vrijednost uzdužnog otpora rezultirat će većim naponom u tračnici, a time i većom količinom lutajućih struja [15]. Električni otpor može varirati ovisno o tipu čelika od kojega je tračnica izrađena, zatim o istrošenju glave tračnice te o temperaturi u tračnici [37]. Tijekom uporabe dolazi do istrošenja poprečnog presjeka čime se povećava električni otpor tračnice. S obzirom na vremenske uvjete, temperature u tračnici mogu varirati i do 40 °C, što može izazvati promjenu otpora i do 20 % [37]. Uzdužni električni otpor također ovisi i o duljini vodiča – kraći vodič rezultira manjim električnim otporom, pa će se kraćim povratnim putem struje (manjim razmacima između ispravljačkih stanica) stvoriti manja razlika napona u tračnici [24]. S obzirom na to da uzdužni električni otpor može mnogo varirati ovisno o gore navedenim parametrima, potrebno je učestalo pratiti stanje tračnica.

Prema [20], električni otpor tračnice iznosi od 40 do 80 mΩ/km. Otpor tečenju struje može se smanjiti korištenjem tračnica većega poprečnog presjeka te međusobnim zavarivanjem tračnica [24].

3.2. Električni potencijal u tračnici s obzirom na tlo

Definiranjem uzdužnog električnog otpora tračnice te poznajući jakost struje potrebne vozilu za kretanje, moguće je odrediti razlike potencijala koje će nastati u tračnici kada vozila nemaju mogućnost regenerativnog kočenja. Charalambous A. C. i dr. [25] u svome su radu analizirali raspodjelu potencijala u tračnici s obzirom na tlo na segmentu duljine 1000 metara. Pretpostavili su da se na početku segmenta nalazi ispravljačka stanica, a na udaljenosti 1000 m od ispravljačke stanice vozilo kojemu je za pokretanje potrebna struja jakosti 1000 A (slika 14.).



Slika 14. Shema promatranog segmenta kolosijeka, vozilo na udaljenosti 1000 m od ispravljačke stanice (IS)

Također, pretpostavljen je konstantni električni otpor tračnice duž cijele promatrane dionice. Ona iznosi 40 mΩ/km za kolosijek, odnosno 20 mΩ/km po tračnici, iz čega slijedi da se za svaki 1 mΩ/km u tračnici javlja pad napona od 1 V/km. Prema

tome, za jakost struje od 1000 A na promatranoj dionici stvara se razlika napona od 20 V. Ta će se razlika napona, kada je riječ o plivajućem sustavu uzemljenja, manifestirati kao +10 V na mjestu položaja vozila te -10 V na mjestu položaja ispravljačke stanice (slika 15.) [25].



Slika 15. Razlika potencijala u tračnici kada se na dionici nalazi jedno vozilo na udaljenosti 1000 m od ispravljačke stanice

Kad bi se na promatranoj dionici nalazilo više vozila, potencijal u tračnici bio bi veći, što će rezultirati i većom količinom lutajućih struja. Promatramo slučaj kada se na dionici od 1000 m vozilo nalazi na svakih 250 m (slika 16.). Raspodjela potencijala u ovom slučaju prikazana je na slici 17.



Slika 16. Shema promatranog segmenta kolosijeka, vozila na svakih 250 m



Slika 17. Raspodjela potencijala duž tračnice, vozilo na svakih 250 m od ispravljačke stanice

Na mjestima pozitivnog električnog potencijala u tračnicama stvara se anodna zona te u slučaju nedovoljne izolacije tračnice, dio povratne struje izlazi iz tračnice i postaje lutajuća struja. S druge strane, na mjestima gdje se struja vraća u tračnicu stvara se katodna zona koju karakterizira negativan električni potencijal. Na tim je mjestima tračnica pod takozvanom katodnom zaštitom te se elektrokemijska korozija neće razvijati.

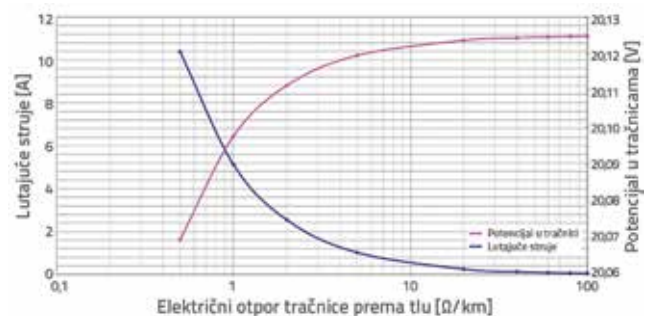
Kako je prikazano na slikama 14. do 17., napon tračnice prema tlu koji će se razviti duž promatranog segmenta kolosijeka, a samim time i količina lutajućih struja, ovisi i o broju vozila koja se na promatranoj dionici nalaze u određenom trenutku. Kod većeg prometnog opterećenja, zabilježene su veće vrijednosti potencijala u tračnici, što rezultira i većim količinama lutajućih struja.

Normom HRN EN 50122-2:2011 [22] definiran je najveći potencijal prema tlu koji se u tračnicama može stvoriti, a da kolosijek nije ugrožen djelovanjem lutajućih struja. Kod otvorenih kolosijeka on iznosi $U_{RE} \leq +5$ V, a kod zatvorenih (ugrađenih) kolosijeka $U_{RE} \leq +1$ V. Ako se mjerenjem električnog potencijala tračnice prema tlu u periodu od 24 sata pokaže da je potencijal tračnice veći od navedenih vrijednosti, postoji opasnost od pojave lutajućih struja te je potrebno provesti daljnja mjerenja kako bi se odredio električni otpor između tračnice i tla [38].

3.3. Električni otpor između tračnice i tla kod ugrađenih kolosijeka

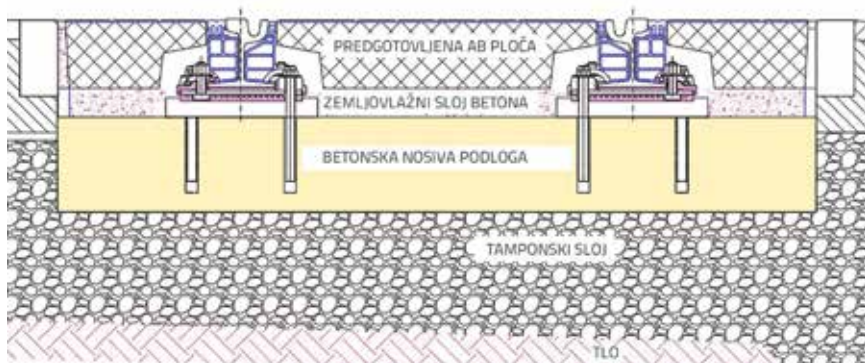
Električni otpor između tračnice i tla definira jakost lutajućih struja na određenom segmentu kolosijeka, a određen je načinom izoliranosti tračnice od pričvrstnog pribora i praga, što se ostvaruje pomoću gumenih podtračničkih podloški na mjestima pričvršćenja tračnice na prag. Međutim, s obzirom na to da kod ugrađenih kolosijeka češće dolazi do zadržavanja vode u kolosijeku, izoliranost tračnice mora biti kontinuirana i po cijeloj površini tračnice. Time se sprječava kontakt tračnice s elektrolitom poput vlage, vode ili klorida koji će se zadržavati u kolosiječnoj konstrukciji, a električni otpor poprima visoke vrijednosti. U mnogim slučajevima tračnice nisu dovoljno izolirane te dio struje izlazi iz njih i prolazi kroz podlogu, pri čemu se podloga ponaša kao vodič struje, odnosno elektrolit [39]. Normom [40] definirane su vrijednosti električnog otpora tračnice prema tlu po jedinici duljine. Kod otvorenih kolosijeka specifični električni otpor tračnice prema tlu iznosi $R_{RE} \geq 2$ Ω /km, a kod ugrađenih kolosijeka $R_{RE} \geq 0,4$ Ω /km.

Porastom električnog otpora tračnice prema tlu, smanjit će se količina lutajućih struja. Međutim, u tračnicama se mogu stvoriti visoke vrijednosti električnog potencijala koji može ugroziti sigurnost korisnika tračničke infrastrukture. Na slici 18. uočava se da će količina lutajućih struja znatno porasti ako vrijednost električnog otpora između tračnice i tla padne ispod 10 Ω /km.



Slika 18. Odnos električnog potencijala tračnice i lutajućih struja s obzirom na električni otpor tračnice prema tlu [20]

Prema smjernicama [41], izolaciju tračnica treba izvesti na način da se zadovolji balans između pojave lutajućih struja i opasnih potencijala tračnice prema tlu, odnosno da se dopusti određena količina lutajućih struja kako ne bi došlo do stvaranja visokih

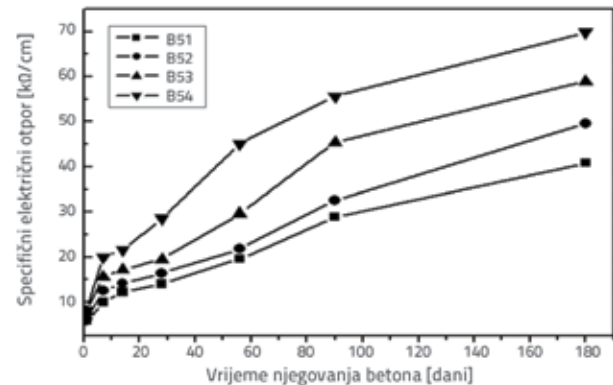


Slika 19. Poprečni presjek kolosiječne konstrukcije s elementima koji definiraju razinu električnog otpora između tračnice i tla kod ugrađenog kolosijeka

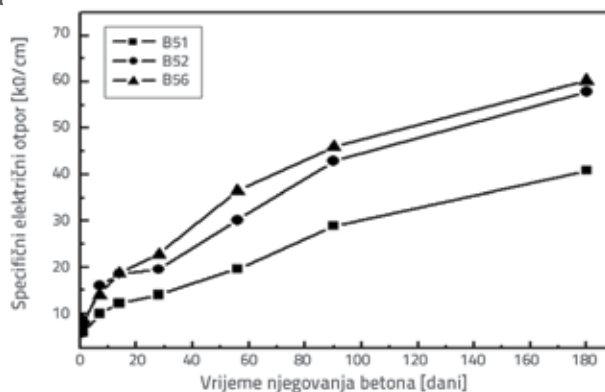
vrijednosti električnog potencijala u tračnicama. Kod nedovoljne izoliranosti tračnice, na pojavu lutajućih struja utjecat će i električni otpor betona u ležajevima, betonskim nosivim slojevima, kao i električni otpor tamponskog sloja i okolnog tla (slika 19).

3.3.1. Električni otpor betonskih nosivih slojeva kolosiječne konstrukcije

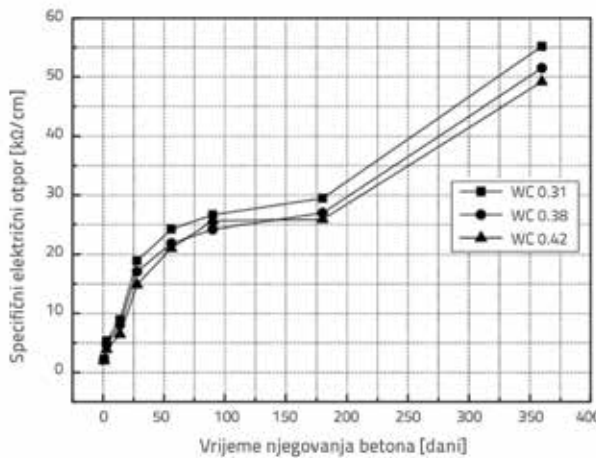
Kako bi se umanjilo štetno djelovanje lutajućih struja, između tračnice i tla mora postajati izolacijski sloj. Osim izolacije tračnice, taj se sloj može ostvariti ako beton u betonskoj nosivoj podlozi ima dovoljnu vrijednost električnog otpora. Beton je porozni kompozit različitih materijala, a njegov električni otpor ovisi o vlažnosti [42]. U suhim se uvjetima beton ponaša kao loš vodič električne struje, a povećavanjem vlažnosti te zadržavanjem vode u kolosiječnim konstrukcijama, postaje vrlo dobar vodič. Njegov se specifični električni otpor mijenja od 10 do 108 kΩcm [40, 41]. U svome su radu Geng J. i dr. [44] analizirali specifični električni otpor betona s dodatkom letećeg pepela i zgre. Ispitivani su sljedeći uzorci: B51 (0 % letećeg pepela i zgre), B52 (10 % letećeg pepela), B53 (20 % letećeg pepela), B54 (25 % letećeg pepela), B55 (20 % zgre) te B56 (30 % zgre). Mjeren je specifični električni otpor tijekom 180 dana, a rezultati su prikazani u dijagramima na slikama 20. i 21. Iz navedenih istraživanja očito je da se specifični električni otpor betona povećava s udjelom mineralnih dodataka u vezivu.



Slika 20. Specifični električni otpor betona s dodatkom letećeg pepela; uzorci: B51 (0 % letećeg pepela), B52 (10 % letećeg pepela), B53 (20 % letećeg pepela), B54 (25 % letećeg pepela) [44]



Slika 21. Specifični električni otpor betona s dodatkom zgre, uzorci: B51 (0 % zgre), B55 (20 % zgre), B56 (30 % zgre) [44]



Slika 22. Specifični električni otpor betona s različitim vodocementnim omjerom (0,31 %, 0,38 %, 0,42 %) [45]

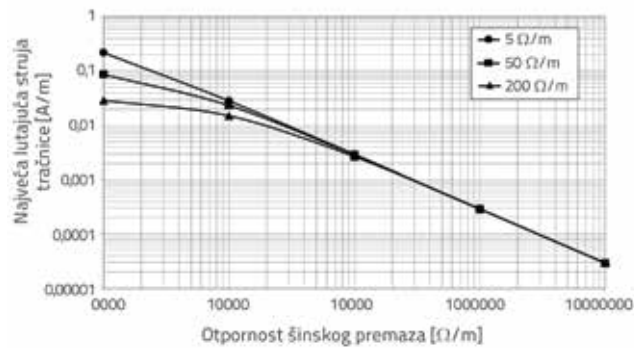
Povećavanjem električnog otpora betona u nosivoj podlozi u tračničkoj infrastrukturi može se djelovati na smanjenje lutajućih struja koje će se pojaviti na određenom segmentu kolosijeka. Najbolje će rezultate pokazivati beton u suhim uvjetima, smanjenog vodocementnog omjera, s dodatkom letećeg pepela ili zgre u iznosu od 35 %. Primjenom betona povećanog specifičnog električnog otpora u kolosiječnim konstrukcijama postići će se znatno bolji rezultati, ali i u tom

slučaju mora biti osigurana adekvatna odvodnja kolosijeka kako bi se spriječilo zadržavanje vode.

U radu [46] pokazano je da se dodatkom letećeg pepela smanjuje tlačna čvrstoća betona u početnom periodu, a smanjivanjem vodocementnog omjera može se postići povećanje čvrstoće. Tako kod udjela letećeg pepela 30 % i smanjenje vodocementnog omjera na 0,4, tlačna se čvrstoća može povećati za 8 MPa, a kod vodocementnog omjera 0,3 čvrstoća se može povećati za 23 MPa. Smanjenje vodocementnog omjera rezultirat će potrebom da se upotrijebi superplastifikator kako bi se osigurala ugradivost betona. Međutim, uslijed pucolanskih karakteristika letećeg pepela pokazano je da tijekom vremena dolazi do porasta čvrstoće betona [46]. Nadalje, Maruthachalam V. i dr. [47] u svome su istraživanju pokazali da se dodavanjem zgre u beton postiže veća vrijednost tlačne čvrstoće nego kod konvencionalnog betona.

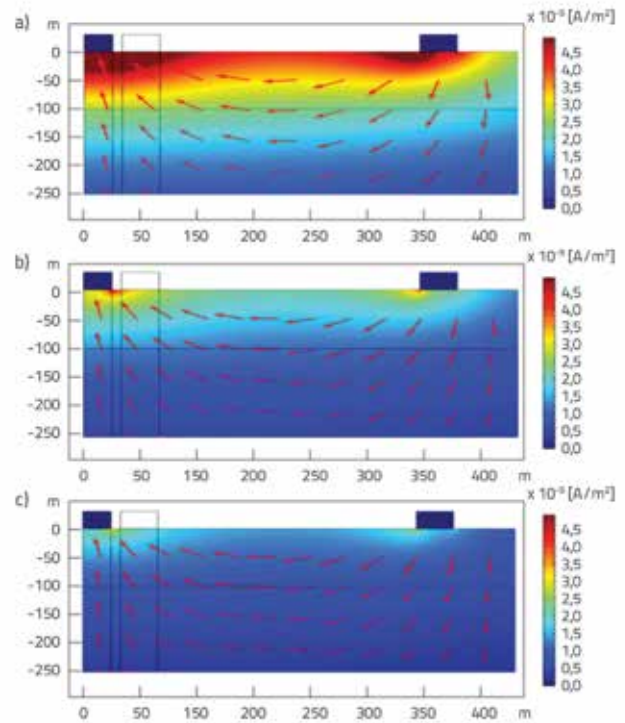
3.3.2. Specifični električni otpor tla

Ako tračnice i ostali elementi kolosiječne konstrukcije nisu dovoljno izolirani, tada na povećavanje istjecanja struje uvelike utječe i specifični električni otpor tla koji se smanjuje s povećavanjem vlage u tlu (slika 23.).



Slika 23. Količina lutajućih struja kao varijabla specifičnog električnog otpora izolacijskog materijala tračnice i specifičnog električnog otpora tla [20]

Na slici 24. prikazan je utjecaj različite vlažnosti tla na količinu lutajućih struja. Vlažnost je utjecala na vrijednost električnog otpora tla, a proučavana su sljedeća tri uzorka: mokro tlo (50 Ω/m), vlažno tlo (100 Ω/m), suho tlo (150 Ω/m). Uočeno je da manji električni otpor dovodi do većih vrijednosti lutajućih struja [17]. Navedenim istraživanjima pokazano je i to da se dodavanjem nekih materijala u tlo, poput letećeg pepela, povećava specifični električni otpor tla te u isto vrijeme osigurava smanjivanje vrijednosti lutajućih struja i električnog potencijala prilikom ubrzanja vozila, kada je vrijednost lutajućih struja najveća [17].



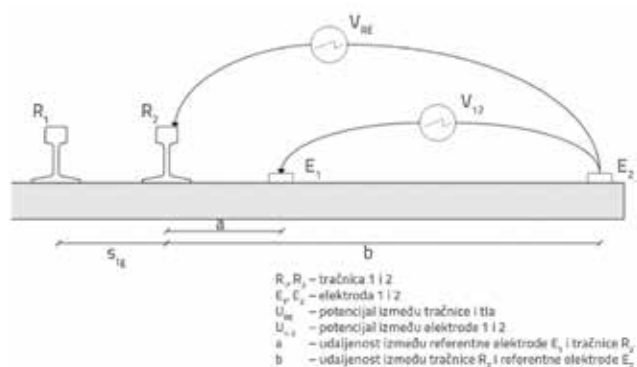
Slika 24. Raspodjela lutajućih struja u različitim uvjetima vlažnosti: a) mokro tlo, b) vlažno tlo, c) suho tlo [17]

3.3.3. Određivanje električnog otpora između tračnice i tla te jakosti lutajućih struja

U normi EN 50122-2:2011 [40] opisano je nekoliko metoda određivanja električne provodljivosti između tračnice i tla. Na slici 25. prikazana je metoda mjerenja potencijala u tračnici s obzirom na tlo pomoću referentnih elektroda postavljenih u tlo. Na to mjerenje ne utječe prometno opterećenje, pa ne treba obustavljati promet. Električni potencijal tračnice U_{RE} bilježi se između tračnice i referentne elektrode E_2 koja je postavljena u tlo na nekoj udaljenosti b od tračnice R_2 [40]. Gradient potencijala $U_{1,2}$ zabilježen je pomoću druge elektrode E_1 koja je postavljena na udaljenosti "a" te elektrode E_2 . U svome radu Bongiorno J. i Mariscotti A. [48] upućuju kako je u slučaju mjerenja potencijala tračnice u urbanim sredinama ponekad vrlo teško pronaći prikladno mjesto za postavljanje referentne elektrode s obzirom na asfaltne površine. Stoga je moguće koristiti asfaltne elektrode $CuSO_4$ kao referentne, ali tada treba uzeti u obzir učinak ukopanih cjevovoda i kabela. Autori također preporučuju da se takva mjerenja provode u suhim vremenskim uvjetima zbog vlažnosti tla.

Prilikom ovog mjerenja naponi se bilježe na mjernom uređaju, a gradient potencijala $\Delta U_{1,2}$ se može prikazati kao funkcija ΔU_{RE} , pri čemu nagib krivulje dobivene linearnom regresijom

predstavlja omjer prijenosa lutajućih struja (*eng. stray current transfer ration*) m_{SE} . Prije provođenja ovog mjerenja potrebno je odrediti i električni otpor tla ρ_E u blizini elektrode E_1 . Udaljenost a od tračnice R_2 do elektrode E_1 mora biti minimalno 1 m, a udaljenost b mora biti toliko velika da na elektrodu E_2 ne utječe gradijent napona (*eng. voltage gradient*). Za takvu vrstu mjerenja u urbanim područjima obično je dovoljna udaljenost od 30 m, ali tijekom mjerenja treba provjeriti je li udaljenost b dovoljna ili ju treba povećati. Kako bi se analizirala izolacija tračnice od tla, mjerenja treba provesti na nekoliko lokacija, naročito na mjestima gdje se sijeku tračničke infrastrukture s metalnim ukopanim infrastrukturama.



Slika 25. Mjerenje potencijala između tračnice i tla [40]

Nakon provedenog mjerenja, provodljivost tračnice prema tlu po jedinici duljine određuje se prema izrazima danim u normi [40] ovisno o tome je li riječ o jednokolosiječnoj ili dvokolosiječnoj pruzi. Za jednokolosiječne pruge provodljivost tračnice prema tlu računa se prema izrazu (1), a u slučaju dvokolosiječnih pruga prema izrazu (2):

$$G'_{RE} = \frac{m_{sr} \cdot \pi \cdot 2000}{\rho_E [\ln(b \cdot (b + s_{ig}))] - \ln(a \cdot (a + s_{ig}))]} \quad (1)$$

$$G'_{RE} = \frac{m_{sr} \cdot \pi \cdot 1000}{\rho_E [\ln((b + 5 \cdot s_{ig}) \cdot (b + 5 \cdot s_{ig} + s_{id}))] - \ln((a + 5 \cdot s_{ig}) \cdot (a + 5 \cdot s_{ig} + s_{id}))]} \quad (2)$$

Prema [40], jakost lutajućih struja koja će se pojaviti na određenoj lokaciji, osim o električnom naponu u tračnici, ovisi i o električnoj provodljivosti tračnice prema tlu, a dana je izrazom (3):

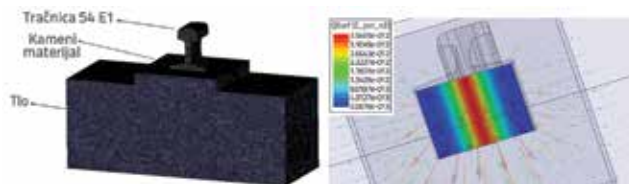
$$I_s = U_{RE} \cdot G_{RE} \quad (3)$$

pri čemu je:

- I_s – jakost lutajuće struje [A/km]
- U_{RE} – električni napon u tračnici [V]
- G_{RE} – električna provodljivost tračnice prema tlu [S/km].

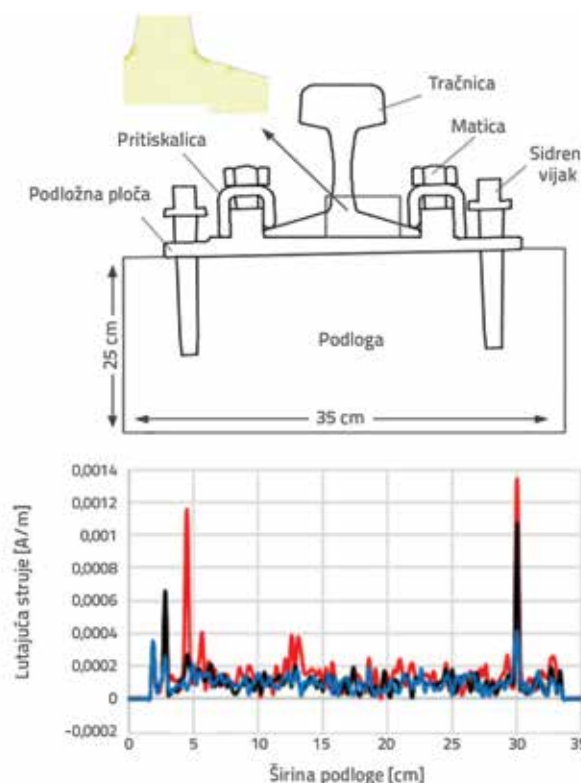
Ako vrijednost lutajućih struja po tračnici iznosi manje od 2, 5 mA/m, u periodu od 25 godina ne postoji opasnost od degradacije kolosijeka uslijed djelovanja lutajućih struja [40]. Zaboli, A. i dr. [13] pomoću numeričkog modela analizirali su raspodjelu lutajućih struja na kontaktu tračnice i kamenog

materijala. U modelu su pretpostavili da je tračnica oslonjena direktno na kameni materijal, a kameni materijal na tlo (slika 26. lijevo). Ustanovljeno je da se najveća količina lutajućih struja javlja na sredini nožice tračnice (slika 26. desno). Ovakva raspodjela lutajućih struja na nožici tračnice događa se na mjestima pričvršćenja tračnice gdje je tračnica preko pričvrstnog pribora oslonjena na pragove ili ležajeve kao u slučaju tramvajskog kolosijeka u gradu Zagrebu. Mjesta najveće količine lutajućih struja dobivena modelom odgovaraju liniji loma nožice tračnice na mjestu pričvršćenja prikazane na slici 12.



Slika 26. Numerički model korišten u analizi lutajućih struja (lijevo), raspodjela lutajućih struja na nožici tračnice prema numeričkom modelu (desno) [13]

Isti je tim autora u radu [49] analizirao raspodjelu lutajućih struja na elementima pričvrstnog pribora, kada se ispod sustava pričvršćenja nalaze različite vrste podloge (tla) s obzirom na specifični električni otpor: 100 Ω m (model A), 300 Ω m (model B), 1000 Ω m (model C). Ustanovljeno je da će količina lutajućih struja koja izlazi iz tračnice varirati ovisno o električnom otporu podloge, a najveće vrijednosti struje bit će na mjestima sidrenih vijaka (slika 27.).



Slika 27. Raspodjela lutajućih struja na mjestu pričvršćenja tračnice kod različitih vrijednosti električnog otpora podloge [49]

To odgovara činjenici da će, ako na mjestima pričvršćenja nije osigurana dobra izoliranost tračnice i pričvrstnog pribora kao što je slučaj kod sustava pričvršćenja ZG 3/2, veća količina lutajućih struja izlaziti iz tračnice te kroz podložnu ploču i sidrene vijke odlaziti u betonske nosive slojeve i tlo. Kod bolje izoliranih sustava pričvršćenja, poput PPE i DEPP sustava, ostvaruju se veće vrijednosti električnog otpora između tračnice i tla, odnosno manje količine lutajućih struja. Navedeno se može poistovjetiti s modelom B i C (slika 25.) gdje je korištenjem tla većeg specifičnog električnog otpora, smanjeno istjecanje struje iz tračnica.

4. Rasprava

Europske norme koje opisuju električnu sigurnost na tračničkim infrastrukturama su EN 50122-1:2011 [50] te EN 50122-2:2011 [40]. U normi [50] definirane su zaštitne mjere protiv električnog udara na tračničkim sustavima s istosmjernom strujom za pokretanje vozila, a u normi [40] definirane su mjere protiv učinaka lutajućih struja na tračničkim infrastrukturama s istosmjernom vučom. Da bi se lutajuće struje detektirale narijeme, potrebno je kontinuirano pratiti stanje kolosijeka te parametara koji definiraju količinu lutajućih struja na kolosijeku. Naime, lutajuće struje mogu stvoriti velika korozijska oštećenja na metalnim dijelovima kolosijeka, a korozija na tračnicama u ekstremnim slučajevima može smanjiti uporabljivost tračnice čak na samo godinu dana [31].

Stupanj korozije koji se pojavljuje na nožici tračnice znatno je veći od stupnja korozije mjerenog u laboratorijskim ispitivanjima. Zbog toga jedina pouzdana metoda određivanja korozije na tračnicama tijekom njihove uporabe je mjerenje korozijskih oštećenja prilikom pregleda tračnica, što je moguće provesti kod otvorenih i klasičnih kolosiječnih konstrukcija, ali ne i kod ugrađenog kolosijeka [31]. S obzirom na velika oštećenja tračnica i pričvrstnog pribora koja može uzrokovati korozija uslijed lutajućih struja, osim kontrole standardnih parametara stanja elemenata tračničke infrastrukture opisanih u radu [51], potrebno je provoditi i kontrolu parametara koji definiraju razinu lutajućih struja, a opisani su u ovom radu. Sveobuhvatnom i pravovaljanom kontrolom kolosijeka produžiti će se uporabljivost elemenata gornjeg ustroja koji čine najskuplji dio tračničke infrastrukture [51]. Za uspješno smanjivanje količine lutajućih struja na tračničkim infrastrukturama danas su najčešće u primjeni sljedeće mjere [23]:

- smanjenje uzdužnog električnog otpora tračnica
- što bolja električna izolacija tračnice od ostalih elemenata kolosiječne konstrukcije (povećanje električnog otpora između tračnice i podloge)
- sprječavanje prodiranja vode u kolosijek
- dovoljan broj ispravljačkih stanica
- osiguravanje sustava kontinuiranog praćenja stanja kolosijeka.

4.1. Smanjenje uzdužnog električnog otpora tračnica

Uzdužni otpor tračnice mora imati vrlo male vrijednosti. Zbog toga se tračnice moraju međusobno povezivati, što se u današnje vrijeme ostvaruje zavarivanjem. Dodatno, uzdužni se otpor može smanjiti korištenjem tračnica većeg poprečnog presjeka te međusobnim povezivanjem tračnica u kolosijeku [21]. S obzirom na to da otpor može varirati ovisno o vrsti tračnice, vrsti čelika od kojega je tračnica izrađena, istrošenju tračnice te o temperaturi [37], potrebno je provoditi praćenje stanja tračnica.

4.2. Povećanje električnog otpora između tračnice i podloge

Visoku vrijednost električnog otpora tračnice prema tlu treba osigurati izolacijom tračnice od tla, pri čemu se kvaliteta izolacijskog materijala ne smije oštetiti uslijed djelovanja vode koja će se vjerojatno zadržavati u kolosijeku. Neke od metoda povećanja električnog otpora tračnice prema tlu jesu primjena izolacijskih podložaka na mjestima pričvršćenja, izolacija pričvrstnog pribora, oblaganje tračnica i podložne ploče izolacijskim membranama na mjestima gdje se kolosijek nalazi u cestovnoj prometnici. U svakom slučaju nužno je osigurati adekvatnu odvodnju kolosijeka te provoditi redovite mjere održavanja. Kod otvorenih kolosijeka u kojima su tračnice položene na pragove predlaže se upotreba plastičnih kompozitnih pragova kako bi se osigurala izolacija tračnice od tla. Naime, budući da kompozitni pragovi imaju znatno veći električni otpor od drugih vrsta pragova, uporabom tih pragova sprječava se istjecanje lutajućih struja iz tračnica te se na taj način može reducirati korozija nožice tračnice [31]. U radu [31] provedeno je ispitivanje električnog otpora plastičnih, kompozitnih pragova, pri čemu je njihov otpor iznosilo 65 k Ω , što je 3,25 puta više od minimalnih 20 k Ω koji se navode u specifikacijama American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (AREMA).

4.3. Sprječavanje prodiranja vode u kolosijek

Kod kolosijeka u urbanim područjima, naročito kada je kolosijek u sastavu cestovne prometnice, sprječavanje prodiranja vode nije jednostavan zadatak. Na slici 4. prikazan je najčešći primjer degradacije elementa zatvaranja kolosijeka na tramvajskoj infrastrukturi u Zagrebu, nakon čega je omogućeno slobodno prodiranje vode u kolosijek. Kako se uočava na toj slici, armiranobetonska pokrovna ploča je oštećena, a elastomerne brtvene trake koje se postavljaju uz tračnicu su ispale. Primjenom novih tehnologija brtvljenja moguće je dugotrajnije spriječiti prodiranje vode u kolosijek. Prilikom rekonstrukcije kolosijeka na dionici Savske ceste u Zagrebu, umjesto dosadašnjih elastomernih brtvenih traka ugrađen je materijal za zapunjavanje (slika 28.) [9]. Taj je materijal s jedne strane vezan na tračnicu, a s druge na armiranobetonsku pokrovnu

ploču, čime je smanjeno slijevanje vode uz tračnicu u kolosijek, a time su smanjene i lutajuće struje. Poput mokrog tla (slika 24.), i mokra kolosiječna podloga bolji je električni vodič pa ako tračnica nije potpuno izolirana, lutajuće će struje kroz tračnicu i pričvrсни pribor odlaziti u podlogu i dalje u tlo, kao što je prikazano na slikama 26. i 27. Međutim, ako se adekvatnim mjerama smanji prodiranje vode u kolosijek te odvodnjom spriječi zadržavanje vode, lutajuće struje će se reducirati.



Slika 28. Ugradnja materijala za zapunjavanje umjesto traka za brtvljenje na dionici tramvajskog kolosijeka u Savskoj cesti, Zagreb [9]

4.4. Razmak između ispravljačkih stanica

Kao jedna od mjera smanjivanja lutajućih struja predlaže se i manji razmak između ispravljačkih stanica, odnosno više povratnih kabela između tračnice i ispravljačke stanice. Na taj način povratni put struje od vozila do ispravljačke stanice postaje sve kraći te se sprječava stvaranje visokog napona u tračnici, a time i lutajućih struja. Međutim, kod visoke vrijednosti električnog otpora između tračnice i tla, udaljenost između ispravljačkih stanica ne utječe značajno na količinu lutajućih struja (slika 29.).



Slika 29. Smanjivanje lutajućih struja ostvareno povećanjem električnog otpora između tračnice i tla te manjim razmakom između ispravljačkih stanica [20]

4.5. Troškovi prouzročeni korozijom uslijed lutajućih struja

Korozija uslijed lutajućih struja najbrži je oblik elektrokemijske korozije, a osim degradacije elemenata kolosijeka, velika oštećenja nastaju i na komunalnim infrastrukturnama položenim u blizini tračničke infrastrukture, gdje se u mnogim slučajevima javlja puknuće cjevovoda što izaziva velike troškove sanacije. U radu [52] analizirana je korozija uslijed lutajućih struja armature u betonu te je ustanovljeno da ona predstavlja znatno veću opasnost i od djelovanja klorida. Također, provedene su mnoge analize oštećenja armature na mostovima i vijaduktima, gdje je pokazano izrazito štetno djelovanje lutajućih struja te neizostavnost provođenja mjera zaštita kako bi se održala funkcionalnost ovih konstrukcija [53].

U radu [54] provedena je analiza troškova nastalih zbog djelovanja lutajućih struja na nekoliko tračničkih infrastrukturna. Operatori koji su dostavili podatke o troškovima djelovanja korozije na tračničkoj infrastrukturi izjavili su kako je riječ o malim troškovima, a oštećenja koja nastaju odnose se na tračnice i pričvrсни pribor. Međutim, ako se u obzir uzmu oštećenja koja nastaju i na konstrukcijama u blizini tračničke infrastrukture, troškovi su neusporedivo veći. Primjerice, u SAD-u godišnji troškovi uzrokovani korozijom uslijed lutajućih struja iznose 500 milijuna dolara. Kako bi se ti troškovi smanjili, najbolji je način primjenjivati mjere smanjivanja lutajućih struja na izvoru (kolosijeku) te djelovati na povećavanje električnog otpora između tračnice i tla. Danas postoje mnoge mjere smanjivanja lutajućih struja, poput manjeg razmaka između ispravljačkih stanica te kontinuirano izoliranih tračnica, čija implementacija zahtijeva velike troškove, a neke od mjera moguće su samo kod novih kolosijeka. Upravo zbog toga se uvelike usmjerava na održavanje kolosijeka i adekvatnu odvodnju kako bi se na taj način povećao električni otpor između tračnice i tla, smanjila količina lutajućih struja i produžilo trajanje svih ugroženih konstrukcija. Osim toga, malim investicijama poput bolje izolacije pričvrsnog pribora te poboljšavanjem zatvaranja kolosijeka moguće je djelovati na smanjenje lutajućih struja.

Zbog velikih direktnih i indirektnih troškova koje uzrokuje djelovanje lutajućih struja, u gradu Zagrebu počeli su se uvoditi novi sustavi pričvršćenja tračnica – Zagreb 21 CTT, kako bi se povećao električni otpor između tračnice i podloge. Taj sustav pričvršćenja omogućuje izoliranje pojedinih kolosiječnih elemenata, kao što su sidreni vijci i čelična podložna ploča. Također, da bi se djelovalo na smanjivanje prodiranja vode u kolosijek, razmatra se poboljšavanje zatvaranja kolosijeka upotrebom materijala za zapunjavanje (slika 28.) umjesto dosadašnjih brtvenih traka [9, 55].

5. Zaključak

Na tračnicama je gotovo nemoguće izbjeći elektrokemijsku koroziju, osim ako je tračnica potpuno izolirana. Korozija uslijed lutajućih struja predstavlja najrazorniji oblik korozije,

a najveća korozijska razaranja uočavaju se na ugrađenim kolosijecima jer je kod njih najteže održavati visoku vrijednost električnog otpora između tračnice i tla. Na mnogim tračničkim infrastrukturama diljem svijeta uočen je velik gubitak materijala i stanjivanje nožice tračnice na mjestima pričvršćenja tračnice za pragove. Takav gubitak materijala rezultira lomom tračnice i ugrožavanjem sigurnosti korisnika tračničkih infrastruktura. Operatori su, na temelju dosadašnjeg iskustva, procijenili koji se maksimalni gubitak materijala na nožicama tračnica može javiti, a da se ne ugrozi cjelovitost tračnice i sigurno odvijanje prometa. Međutim, veoma je teško procijeniti rok uporabljivosti tračnice, koji se u vrlo nepovoljnim uvjetima može svesti i na samo godinu dana. Djelovanjem lutajućih struja, uporabljivost

se tračnice i pričvrsnog pribora još dodatno smanjuje, a lutajuće struje ugrožavaju i konstrukcije u blizini tračničke infrastrukture (cjevovode, mostove, vijadukte), čime nastaju vrlo visoki troškovi održavanja i sanacije.

Lutajuće je struje iznimno teško direktno mjeriti. Međutim, mjerenjem drugih parametara poput električnog otpora između tračnice i tla te uzdužne električne provodljivosti tračnice, mogu se dobiti precizni podaci o stanju tračnica te primjereno tome provoditi zaštita ili zamjena tračnica.

Na kraju, za uspješno smanjivanje količine lutajućih struja na tračničkim infrastrukturama nužno je kontinuirano pratiti stanje tračničke infrastrukture, kao i vrijednosti potencijala tračnice prema tlu te osigurati da je kolosijek suh i dobro dreniran.

LITERATURA

- [1] Lakušić, S., Vajdić, M.: Pregled suvremenih kolosiječnih konstrukcija na čvrstim podlogama, GRAĐEVINAR, 63 (2011) 2, pp. 125–134.
- [2] Lakušić, S., Haladin, I., Stollenwerk, B.: Primjena sustava elastično obložene tračnice u urbanim sredinama, Dani prometnica 2015 Kvaliteta prometne infrastrukture - ključ razvoja gospodarstva, 2015, pp. 229–256.
- [3] Haladin, I., Lakušić, S., Bogut, M.: Overview and evaluation of ride comfort on tram tracks, Građevinar 71 (2019) 10, pp. 901–921, <https://doi.org/10.14256/JCE.2731.2019>
- [4] Lakušić, S., Haladin, I., Koščak, J.: Izvještaj o kontroli stanja gornjeg ustroja kolosijeka na ispitnoj dionici tramvajske pruge u Savskoj cesti, Zagreb, 2015.
- [5] Bajić, A.G., Vranješević, M.: Sustavi pričvršćivanja i zatavaranja tramvajskog kolosijeka u gradu Zagrebu, Željeznice 21, 1 (2014), pp. 27–31
- [6] Škare, L.: Rekonstrukcija tramvajskog kolosijeka u Savskoj cesti, diplomski rad, voditelj: S. Lakušić, Zagreb, 2014.
- [7] Lakušić, S.: Dinamički utjecaj vozila na tramvajski kolosijek, disertacija, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2003.
- [8] Lakušić, S., Haladin, I., Ahac, M.: The effect of rail fastening system modifications on tram traffic noise and vibration, Shock and Vibration, 2016, <https://doi.org/10.1155/2016/4671302>
- [9] Lakušić, S., Haladin, I., Škare, L.: Novi sustavi pričvršćenja kolosijeka na tramvajskim prugama u Zagrebu, Dani prometnica 2015 Kvaliteta prometne infrastrukture - ključ razvoja gospodarstva, 2015., pp.39–60.
- [10] Lakušić, S., Vranešić, K., Haladin, I.: Increasing electrical resistance on stray current and reducing vibration on tram track structures, The Fourth BiH Congress on Railways, 2017, pp. 322–331.
- [11] Steimel, A.: Power-electronic grid supply of AC railway systems, International Conference on Optimisation of Electrical and Electronic Equipment, OPTIM, 2012. pp. 16–25, <https://doi.org/10.1109/OPTIM.2012.6231844>
- [12] Serrano-Jiménez, D., Abrahamsson, L., Castaño-Solís, S., Sanz-Feito, J.: Electrical railway power supply systems: Current situation and future trends, Electrical Power Energy System, 92 (2017), pp. 181–192, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.05.008>
- [13] Oura, Y., Yoshifumi, M., Hiroki, N.: Railway Electric Power Feeding Systems, Japan Railway & Transport Review, 16 (1998), pp. 48–58.
- [14] Krajcar, S., Lugarić, L., Capuder, T., Brekalo-Štrbić, J.: Elektroenergetska studija tramvajske mreže grada Zagreba, Fakultet elektrotehnike i računalstva, Zagreb, 2009.
- [15] Zaboli, A., Vahidi, B., Yousefi, S., Hosseini-Biyouki, M.M.: Effect of control methods on calculation of stray current and rail potential in DC-electrified railway systems, 4th International Conference on Recent Advances in Railway Engineering, 2015, pp. 1–6.
- [16] Mandić, M., Milardić, V., Uglešić, I., Filipović-Grčić, B.: Primjena regenerativnog kočenja na elektrificiranim prugama izmjeničnog sustava vuče 25 kV, 50 Hz, Hrvatski ogranak međunarodnog vijeća za velike elektroenergetske sustave– CIGRÉ 12. savjetovanje HRO CIGRÉ, 2015, pp. 1–10
- [17] Zhichao, C., Cheng, H.: Evaluation of metro stray current corrosion based on finite element model, The Journal of Engineering, 2018., DOI: 10.1049/joe.2018.8653
- [18] Wang, C., Li, W., Wang, Y., Xu, S., Li, K.: Evaluation model for the scope of DC interference generated by stray currents in light rail systems, Energies, 12 (2019) 4, pp. 1–17., <https://doi.org/10.3390/en12040746>.
- [19] Niasati, M., Gholami, A.: Overview of stray current control in dc railway systems, International Conference on Railway Engineering - Challenges for Railway Transportation in Information Age, 2008, pp. 237–242, <https://doi.org/10.1049/ic:20080043>
- [20] Charalambos, C.A.: Stray current control and corrosion for DC mass transit systems, 2005. doktorska disertacija, School of Electrical and Electronic Engineering, University of Manchester
- [21] Robles Hernández, F. C., Plascencia, G., Koch, K.: Rail base corrosion problem for North American transit systems, Engineering Failure Analysis, 16 (2009) 1, pp. 281–294, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2008.05.011>
- [22] Kelly, R.G., Scully, J.R., Shoesmith, D.W., Buchheit, R.G.: Electrochemical Techniques in Corrosion Science and Engineering, 2003, <https://doi.org/10.1201/9780203909133>
- [23] Jarić, B., Rešetić, A.: Korozija: elektrokemijske osnove i katodna zaštita, 2003.
- [24] Stanić, E.: Osnove elektrotehnike, 29 izdanje, Školska knjiga, Zagreb, 2007.
- [25] Cotton, I., Charalambos, C., Aylott, P., Ernst, P.: Stray current control in DC mass transit systems, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 54 (2005) 2, pp. 722–730, <https://doi.org/10.1109/TVT.2004.842462>

- [26] Wang, C., Li, W., Wang, Y., Xu, S., Fan, M.: Stray Current Distributing Model in the Subway System: A review and outlook, *International Journal of Electrochemical Science*, 13 (2018) pp. 1700–1727., <https://doi.org/10.20964/2018.02.16>
- [27] Ogunsola, A., Mariscotti, A., Sandrolini, L.: Estimation of stray current from a DC-electrified railway and impressed potential on a buried pipe, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27 (2012) 4, pp. 2238–2246, <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2012.2211623>
- [28] Mujezinović, A., Martinez, S., Kekez, K.: Estimating harmful effect of dynamic stray currents on pipeline by simultaneous multiparametric field measurements, continuous wavelet cross-correlation analysis, and frequency plots, *Materials and Corrosion*, 2018, <https://doi.org/10.1002/maco.201810310>
- [29] Chen, Z., Koleva, D., Van Breugel, K.: A review on stray current-induced steel corrosion in infrastructure, *Corrosion Reviews* 35 (2017) 6, pp. 397–423, <https://doi.org/10.1515/corrrev-2017-0009>
- [30] Isozaki, H., Oosawa, J., Kawano, Y., Hirasawa, R., Kubota, S., Konishi, S.: Measures Against Electrolytic Rail Corrosion in Tokyo Metro Subway Tunnels, 15th International scientific conference Underground Urbanisation as a Prerequisite for Sustainable Development, 2016, pp. 583–592, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.754>
- [31] Robles Hernández, F. C., Plasencia Barrera, G.: Rail Based Corrosion Detection and Prevention, Report for TCRP Project D-7, Task 14, 2007.
- [32] U.S. Department of Transportation: Rail Base Corrosion Detection and Prevention, final report, Washington, D.C., 2007.
- [33] Kušter Marić, M., Mandić Ivanković, A., Vlašić, A., Bleiziffer, J., Sribić, M., Skokandić, D.: Ocjenjivanje korozije armature i oštećenja betona na mostovima primjenom nerazornih ispitivanja, *Građevinar*, 71 (2019) 10, pp. 843–862, <https://doi.org/10.14256/JCE.2724.2019>
- [34] Guidelines for Rail Base Inspection and Rail Condemnation Limits for Corrosion-Induced Material Loss, Transit Cooperative Research Program (TCRP), Transportation Technology Center, 2009., <https://doi.org/10.17226/21941>
- [35] Safa, M., Sabet, A., Ghahremani, K., Haas, C., Walbridge, S.: Rail corrosion forensics using 3D imaging and finite element analysis, *International Journal of Rail Transportation*, 3 (2015) 3, pp. 164–178, <https://doi.org/10.1080/23248378.2015.1054622>
- [36] Stray current corrosion induced by transit systems, <https://corrosion-doctors.org/StrayCurrent/Transit-Systems.htm>
- [37] Kolář, V., Hrbáč, R.: Measurement of ground currents leaking from DC electric traction, 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, 2014, <https://doi.org/10.1109/EPE.2014.6839423>
- [38] Mariscotti, A., Reggiani, U., Ogunsola, A., Sandrolini, L.: Mitigation of electromagnetic interference generated by stray current from a DC rail traction system, *International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2012, <https://doi.org/10.1109/EMCEurope.2012.6396805>
- [39] Chuchit, T., Kulworawanichpong, T.: Stray current assessment for DC transit systems based on modelling of earthing and bonding, *Electrical Engineering*, 101 (2019), pp. 81–90, <https://doi.org/10.1007/s00202-019-00758-0>
- [40] EN 50122-2: 2011 Railway applications - Fixed installations - Electrical safety, earthing and the return circuit - Part 2: Provisions against the effects of stray currents caused by d.c. traction systems
- [41] Dubai Rail Planning & Design Guidelines, Guidelines and Design Principles for Railway Projects undertaken by Developers in the Emirate of Dubai, 2013.
- [42] Layssi, H., Ghods, P., Alizadeh, A. R., Salehi, M.: Electrical Resistivity of Concrete Concepts, applications, and measurement techniques, *Concrete International*, 37 (2015) 5, pp. 41–46
- [43] Naik, T.R., Asce, F., Kraus, R.N., Ramme, B.W., Chun, Y. M., Kumar, R.: High-carbon fly ash in manufacturing conductive CLSM and concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18 (2006) 6, pp. 743–746., <https://doi.org/10.1061/?ASCE?0899-1561?2006?18:6?743?>
- [44] Geng, J., Shen, J., Chen, W.: Resistivity characters of concrete with fly ash and slag, *Advanced Materials Research*, 168-170 (2011). pp. 1409–1413., <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.168-170.1409>
- [45] Huajian, L., Yongjiang, X., Zhonglai, Y., Yanbin, T., Lu, Y., Liangwei, L.: Electrical Resistance of Ballastless Track Concrete Used in High-Speed Railway, Second International Conference on Microstructural-related Durability of Cementitious Composites, 2012., pp. 11–13.
- [46] Malešev, M., Radonjanin, V., Draganić, S., Šupić, S., Laban, M.: Utjecaj letećeg pepela i smanjenja vodovozivnog omjera na svojstva betona s recikliranim agregatom, *Građevinar*, 69 (2017) 9, pp. 811–820, <https://doi.org/10.14256/JCE.1379.2015>
- [47] Maruthachalam, V., Palanisamy, M.: Beton visokih uporabnih svojstava sa čeličanskom zgurom kao agregatom, *Građevinar*, 66 (2014) 7, pp. 605–612, <https://doi.org/10.14256/JCE.1052.2014>
- [48] Bongiorno, J., Mariscotti, A.: Track insulation verification and measurement, *MATEC Web of Conferences*, 2018., <https://doi.org/10.1051/mateconf/201818001008>
- [49] Zaboli, A., Vahidi, B., Yousefi, S., HosseiniBiyouki, M.M.: "Evaluation and Control of Stray Current in DC-Electrified Railway Systems, *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 66 (2017) 2, pp. 974–980, <https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2555485>
- [50] HRN EN 50122-1:2011/A3:2017 Željeznički sustav -- Stabilna postrojenja -- Električna sigurnost, uzemljivanje i povratni krug -- 1. dio: Zaštitne mjere protiv električnog udara (EN 50122-1:2011/A3:2016).
- [51] Jovanović, S., Božović, D., Tomičić-Torlaković, M.: Mjerenje i analiza stanja željezničke infrastrukture kao osnova za upravljanje održavanjem, *Građevinar*, 66 (2014) 4, pp. 347–358, <https://doi.org/10.14256/JCE.959.2013>
- [52] Chen, M., Wang, K., Wu, Q., Qin, Z.: An experimental corrosion investigation of coupling chloride ions with stray current for reinforced concrete, *Applied Mechanics and Materials*, 166–169 (2012), pp. 1987–1993, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.166-169.1987>
- [53] Zakowski, K., Narozny, M., Darowicki, K.: Protection of bridges against stray current corrosion, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 10 (2015) 1, pp. 11–16, <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2015.02>
- [54] Barlo T.J., Zdunek, A.D.: Stray Current Corrosion in Electrified Rail Systems - Final Report, 1995.
- [55] Lakušić S., Haladin, I., Vranešić, K.: Zagreb 21-CTT: new tram track fastening system for vibration reduction and increase the resistant on stray currents, *Automation in transportation*, Krapina, pp. 1-4, 2016.