

Velimir Ravlić, dipl. ing. el.
Ravel d.o.o.
velimir.ravlic@ravel.hr

Ante Ravlić, mag. ing. el.
Ravel d.o.o.
ante.ravlic@ravel.hr

Josip Pavleka, dipl. ing. el.
HEP ODS d.o.o.
josip.pavleka@gmail.com

Korozijsko ponašanje materijala za uzemljivački sustav

SAŽETAK

Ovaj članak obrađuje probleme korozije koji nastaju spajanjem dijelova uzemljivačkog sustava koji su iz različitih materijala u elektroenergetskim postrojenjima kao i zbog spojeva dijelova uzemljivačkog sustava s drugim uzemljenim metalnim konstrukcijama. Korozijsko ponašanje, zasnovano na razvoju elektrokemijskih članaka i s djelovanjem dodatnih izmjeničnih (AC) struja je analizirano u razvojnom projektu u SR Njemačkoj. Pri tome su izvršena ispitivanja u laboratoriju i na terenu kod definiranih uvjeta.

Ključne riječi: uzemljivački sustavi, spojevi različitih materijala, elektrokemijska korozija, korozija zbog izmjenične (AC) struje

Corrosion behaviour of earthing materials

SUMMARY

This report deals with corrosion problems due to the interconnection of earth electrodes made from different materials at electrical power plants and due to interconnection of earth electrodes with other earthed metal structures. Corrosion behaviour, based on development of electrochemical cells and with superimposed AC current was examined in a research project in Germany. To do this, laboratory and field tests were made under defined conditions.

Key words: earthing installations, interconnection of different materials, electrochemical corrosion, AC current corrosion

1. UVOD

U elektroenergetskim postrojenjima struje koje teku u zemlju su male za vrijeme normalnog pogona. U slučaju kvarova velike struje mogu protjecati u zemlju. Blizu mjesta mogućih ulaza i izlaza struja u zemlju izrađeni su dijelovi uzemljivačkog sustava kako bi se osigurala zaštita od djelovanja navedenih struja. Pri tome treba razlikovati zaštitu ljudi i zaštitu materijala. Kako bi se osigurala zadovoljavajuća zaštita ljudi, potrebno je izvršiti izjednačavanje potencijala između svih metalnih dijelova postrojenja, između kojih se nedopušteno visoki naponi dodira ili čak električni lukovi mogu razviti. Kako bi se postigla zadovoljavajuća zaštita za materijale u uvjetima kvarova, vodiči u sustavu uzemljenja i za izjednačavanje potencijala moraju biti projektirani kako bi mogli podnijeti termička i dinamička naprezanja.

Izjednačavanje potencijala koja su rezultat spojeva svih metalnih dijelova, znače i izvođenje spojeva metalnih dijelova u zemlji koji su iz različitih materijala i imaju različite elektrokemijske karakteristike.

To može imati za posljedicu formiranja korozijskih članaka s pripadajućim istosmjernim (DC) strujama. Pri tome elektrokemijski pozitivna površina metala djeluje kao katoda, a elektrokemijski negativna površina metala djeluje kao anoda. Korozija se može očekivati ako su male anodne površine spojene s velikim katodnim površinama.

Primjeri takvih slučajeva korozije su oštećenja podzemnih cjevovoda, kontejnera i uzemljivačkih elektroda. U takvim slučajevima formiraju se korozijski elementi zbog protjecanja struje kroz spojeve ovih komponenti s armaturom u armiranom betonu temelja.

Dodatno dolazi do protjecanja DC struje zbog formiranja članka i to zbog toga što u području visokih gustoća AC struje, ispravljački utjecaj proizvodi DC struje na sučelju čelik/elektrolit koji dovodi do značajne korozije, u ovisnosti o smjeru struje.

U uzemljivačkim postrojenjima u sklopu elektroenergetskih objekata mogući su u mnogo slučajeva AC naponi od više stotina mV pri čemu taj napon ostaje konstantan kao napon uzemljenja za vrijeme normalnog pogona.

U slučaju novih projekata, treba uzeti u obzir rezultate navedene u ovom radu, a na osnovi ponašanja kombinacija različitih materijala za uzemljenje koji se analiziraju tijekom ispitivanja u laboratorijima i na terenu kod definiranih uvjeta u vezi proizvodnje korozijskih članaka. Za istraživanje utjecaja AC napona objavljena su dodatna ispitivanja s dodatnim gustoćama AC struje što rezultira postojanjem napona uzemljenja u normalnom pogonu, uzimajući pri tome u obzir proširenje postojećeg uzemljivačkog sustava [1].

2. OSNOVNI PRINCIPI

Korozija ispitivanih materijala uzemljivačkih elektroda opisana je kroz anodnu strujnu gustoću raspadanja J_a , prema formuli:

$$J_{A,a} = J_a + J_A \quad (1)$$

Pri tome je J_a dio gustoće struje na koji djeluje proizvodnja članka. Ovaj dio gustoće struje treba razlikovati od dijela J_A koji se zove unutarnja gustoća korozije. U idućem tekstu je detaljnije opisan dio gustoće struje J_a (proizvodnja članka). Pri tome se gustoća J_a može opisati formulom:

$$J_a / (\text{mA}/\text{m}^2) = \frac{I_e}{S_a} = \frac{U_{R,k} - U_{R,a}}{r_a + r_k \cdot (S_a/S_k) + R_k \cdot S_a + R_a \cdot S_a} \quad (2)$$

Oznake imaju sljedeće značenje:

- I_e – struja članka (mA);
- S_a – površina anode (m^2);
- S_k – površina katode (m^2);
- $U_{R,k}$ – slobodni korozijski potencijal na katodi (mV);
- $U_{R,a}$ – slobodni korozijski potencijal na anodi (mV);
- r_a – specifični otpor polarizacije anode (Ωm^2);
- r_k – specifični otpor polarizacije katode (Ωm^2);
- R_a – otpor prema zemlji anode (Ω);
- R_k – otpor prema zemlji katode (Ω).

S ciljem smanjenja parametara ispitivanja, ispitivanja su izvedena u niskoomskim elektrolitima. Tada se veličine $R_k \cdot S_a$ i $R_a \cdot S_a$ mogu zanemariti.

Ako omjer površina nije prevelik, r_a se može također zanemariti u odnosu na veličinu $r_k \cdot \frac{S_a}{S_k}$.

Ukoliko označimo $\Delta U = U_{R,k} - U_{R,a}$, tada se formula (2) može aproksimirati formulom (3), koja je poznata kao pravilo površina:

$$J_a = \frac{\Delta U}{r_k} \cdot \frac{S_k}{S_a} \quad (3)$$

3. IZVOĐENJE ISPITIVANJA

3.1 Ispitivanje članka u laboratorijima

Ispitivanja u laboratoriju su bila izvedena prema shemi ispitivanja sa slike 1.

Pri tome treba odrediti koji materijal će biti anoda i koji će biti katoda, primjenjujući određene kombinacije materijala te koliko dugo će protjecati određena gustoća struje članka. Kako se tlo normalno formira u višim slojevima, ispitivanje u laboratorijima se izvelo rješenjem sa zrakom uz zemlju kako bi se simulirali isti uvjeti u vezi formiranja gornjih slojeva [2].

Krivulje u ovisnosti o vremenu su snimljene dok je promjena J_a u ovisnosti o vremenu očekivana u vezi formiranja gornjih slojeva.

Isto tako je određena vremenska ovisnost anodnih i katodnih potencijala i određeni mješoviti polielektrodni potencijali M pripadajućih kombinacija. Svi potencijali su izmjereni pomoću 0,1 MAgCl elektrode i pretvoreni u standardni potencijal vodika. Pri tome su se mijenjali sljedeći parametri:

- kombinacija elemenata iz različitog materijala
- omjer površina $\frac{S_k}{S_a}$.

Gustoća struje J_a može se transformirati u linearne erozijske vrijednosti u skladu s Faradayevim zakonom. Za čelik vrijedi $1 \text{ mA/m}^2 \triangleq 1,2 \text{ } \mu\text{m/a}$, a za cink $1 \text{ mA/m}^2 \triangleq 1,5 \text{ } \mu\text{m/a}$.

Kontinuiranim mjerenjem J_a mogu se dobiti informacije o vremenskoj promjeni zbog korozijskog djelovanja na anodu bez potrebe da se vrše odspajanja i mjerenja težine anoda.

Objavljena su kompletna ispitivanja koja obuhvaćaju ispitivanja statičkih potencijala prema DIN 50918 [6] kako bi se moglo odrediti odnos $r_a(t)$ i $r_k(t)$. Samo taj opseg potencijala se razmatrao, što omogućuje primjenu rezultata ispitivanja članka.

Za povezivanje s utjecajem izmjeničnih napona (AC) frekvencije 50 Hz izvodilo se ispitivanje članka superponiranim AC naponom.

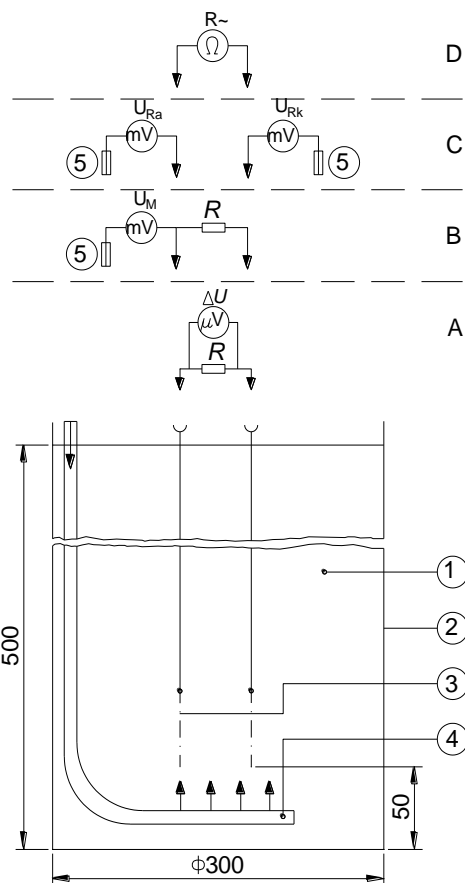
Pri tome su uzete u obzir sljedeće bitne pretpostavke kod analize utjecaja izmjeničnih napona:

U visokonaponskim postrojenjima može se očekivati otpor uzemljenja od oko 0,1 Ω pri čemu protječe nekoliko A za vrijeme normalnog pogona. To znači da napon uzemljenja iznosi maksimalno nekoliko stotina mV na pogonskoj frekvenciji. Naponi takve vrijednosti mogu se također očekivati u niskonaponskim mrežama. Za ispitivanja je izabran napon $U = 0,2 V_{eff}$, 50 Hz, uzimajući u obzir prethodne pretpostavke. Pri tome treba napomenuti da je kod navedenih uvjeta normalna gustoća izmjenične struje oko 0,3 A_{eff}/m^2 koja se pojavljuje na površini uzemljivačke elektrode.

Trajne struje koje proizvode ove gustoće struje, mogu biti značajne i mogu proizvesti za dvije transformatorske stanice srednje veličine sljedeće tehničke vrijednosti [3]:

- TS 110/20 kV
Površina materijala uzemljivačke elektrode: 354 m^2
Trajna izmjenična struja: 106 A
- TS 400/220 kV
Površina materijala uzemljivačke elektrode: 354 m^2
Trajna izmjenična struja: 202 A

Uzimajući izmjenični napon konstantne vrijednosti 0,2 V_{eff} , izvršen je nadzor AC i DC struje u krugu članka.



Slika 1. Shematski prikaz ispitne opreme za mjerenje karakteristike elektrokemijskog članka sa sljedećim oznakama [3]

Oznake:

- 1 otopina zemlje ili otopina soli NaCl svaki s otporom $\rho = 1000 \Omega cm$;
- 2 plastična posuda;
- 3 elektrode, detaljno opisane na slikama 2 A i 2 B;
- 4 ulaz zraka;
- 5 referentna elektroda.

Izvedba mjerenja:

- A struja članka $I_e = \frac{\Delta U}{R}$;
- B mješoviti polielektrodni potencijal U_M ;
- C mjerenje pojedinih potencijala $U_{R,a}$ i $U_{R,k}$;
- D mjerenje izmjenične (AC) struje kod otpora $R\sim$.

3.2 Ispitivanje na terenu

Rezultati laboratorijskih ispitivanja su provjereni ispitivanjima na terenu uz primjenu kombinacije različitih materijala s omjerom površina $S_k/S_a = 1:1$. Ispitivanja na terenu su izvršena istovremeno u 4 elektroenergetska postrojenja.

Za određivanje karakteristike tla, uzorci tla su uzimani i ponovno analizirani u skladu s radnim listom GW9 organizacije eksperata koja se bavi plinom i vodom DVGW [5]. Krugovi ispitivanja su prikazani na slici 2. Elektrode E1 i E2 sastoje se od različitih metala što uključuje kombinacije materijala koji će se analizirati. Između mjerne elektrode GE i elektrode članka E1/E2 priključit će se izmjenični napon odgovarajuće vrijednosti tako da protječe struja od 12 mA (izmjereno kao pad napona na otporu R_{MGE}). To iznosi za pripadajuću gustoću struje 300 mA/m² na elektrodama članka i 600 mA/m² na mornoj elektrodi. Tada se izmjenični napon ne mijenja.

Elektrode (E1), (E2) i (GE) sastoje se od istog materijala kao i elektrode E1, E2 i GE. Prirodni korozijski potencijali ovih elektroda se mjere kada nisu opterećeni člankom i izmjeničnom (AC) strujom.

Mjerenja potencijala su izvedena na terenu primjenom elektroda iz bakrenog sulfata. Sa svrhom definiranja potencijala na standardni način, ove vrijednosti potencijala su pretvorene u standardne vrijednosti vodikovih elektroda. Za ovu vrstu transformacije koristio se referentni potencijal sulfatne elektrode od 320 mV_{eff} u odnosu na standardnu vodikovu elektrodu.

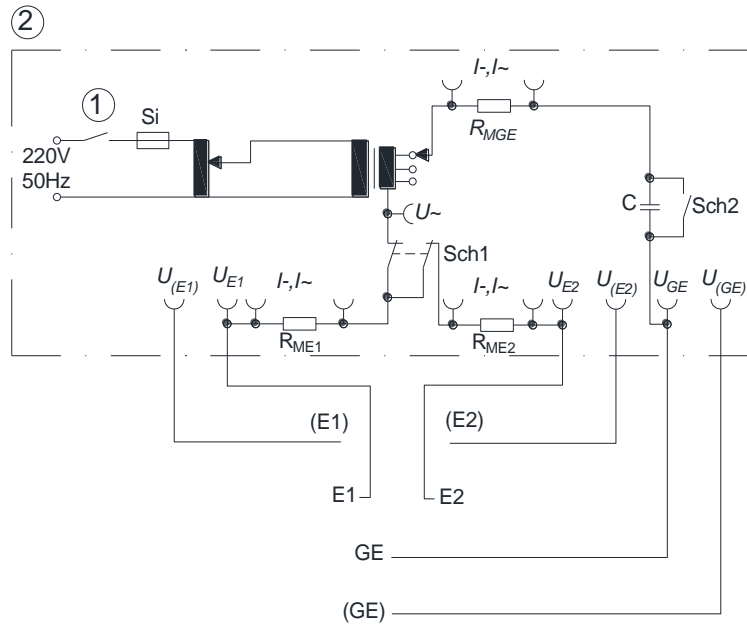
Sva ispitivanja su izvršena sa sljedećim materijalima (korišteni su simboli kao kratice za oznake materijala):

- bakar, bez prevlake, Cuu
- bakar, pokositren, Cu/Sn (debljina prevlake 2 – 10 μs)
- bakar, pocinčan, Cu/Zn (debljina prevlake 300 g/m²)
- olovo, bez prevlake, Pb
- čelik, vruće pocinčan, Stf (debljina prevlake 300 – 700 g/m²)
- čelik, bez prevlake, Stu.

U tablici 1. je dan prikaz podataka u vezi s laboratorijskim ispitivanjima i ispitivanjima na terenu.

Tablica 1. Prikaz podataka u vezi s laboratorijskim ispitivanjima i ispitivanjima na terenu [3]

	Kombinacije materijala	Laboratorijska ispitivanja					Ispitivanja na terenu
		Omjer površina S_k/S_a					
		1:1	15:1	60:1	200:1	800:1	1:1
		Otopine zemlje, $\rho = 1000 \Omega cm$					zemlja
A	Cuu – Stu	x o	x	x	x	x	
B	Cu/Sn – Stu	x o	x	x	x	x	x o (RWE)
C	Pb/Stu	x o	x	x	x	x	x o (VEW)
D	Cuu – Stf	x o		x			x o (BW)
E	Cu/Sn – Stf	x o		x			x o (BW)
F	Pb – Stf	x o		x			
C	Cu/Zn – Stu	x o				x	x o (BAG)
H	Cu/Zn – Cuu	x					x o (VEW)
I	Cu/Zn – Stf	o		x			
		Na Cl, $\rho = 1000 \Omega cm$					
	Cu/Zn – Stu	x					
	Cu/Zn – Cuu	x					
x – ispitivanje dijelova bez djelovanja AC napona o – ispitivanje dijelova s djelovanjem AC napona							
U laboratoriju su izvršena ispitivanja sljedećih materijala: Stu, Stf, Stg, Cuu, Cu/Zn i Pb u mješavini sa zemljom							



Slika 2. Krug mjerenja za ispitivanja na terenu

Oznake:

(1) Sklopka za napajanje.

(2) Plastično kućište.

U~ Transformator s izlaznim naponom 24 V_{eff}.

R_{MGE} Otpornik R_M za određivanje vrijednosti AC i DC struje u različitim krugovima, $R_M \leq \frac{1}{50}$ otpora mjernog kruga.

R_{ME1}

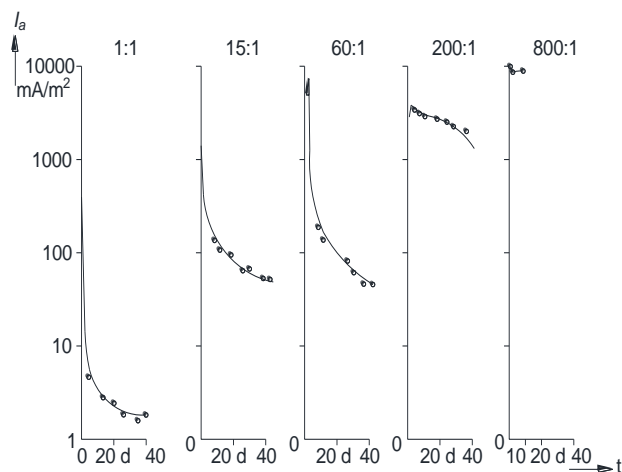
R_{ME2}

C Kondenzator za sprječavanje protjecanja DC struje kroz mjernu elektrodu GE ($\frac{1}{\omega C} \leq \frac{1}{50}$ otpora mjernog kruga). Normalno je C kratkospojen sklopkom Sch2.

4. REZULTATI ISPITIVANJA

4.1 Ispitivanja članka bez utjecaja AC napona

Slika 3. prikazuje tipičan primjer ovisnosti gustoće struje članka za kombinaciju Cuu-Stu kod različitih omjera površina $\frac{S_k}{S_a}$.



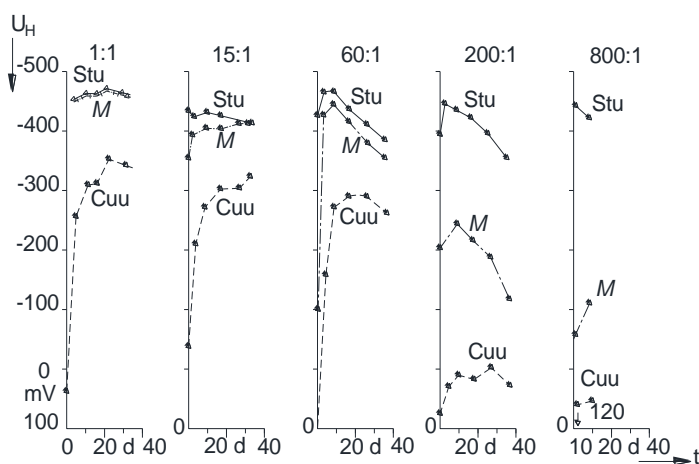
Slika 3. Vremenska ovisnost gustoće članka za kombinaciju Cuu-Stu kod različitih omjera površine [3]

Stu – anoda

t – vrijeme trajanja ispitivanja

U slučaju omjera površine do 60:1, prvobitne vrlo velike vrijednosti gustoće J_a se vremenom smanjuju te nakon 40 dana ispitivanja postaju gotovo konstantne. Sljedeća razmatranja su zasnovana upravo na vrijednostima koje se dobiju nakon 40 dana ispitivanja. U slučaju većih omjera površina vremenska ovisnost je znatno smanjena, što je vidljivo na slici 3. Ovo je očito posljedica smetnji koje nastaju u gornjem sloju koji se formira na površini elektrode.

Snažna promjena potencijala katode Cuu kod omjera površine 60:1 vidljiva je iz vremenske ovisnosti krivulje potencijala sa slike 4. Već omjeri površina od 200:1 vode prema pozitivnim potencijalima bakra. Mješoviti potencijali polielektroda M, odnosno potencijal koji katode Cuu i anode Stu usvoje kada su električki spojeni ovisi o veličini površine katode S_k . Veća površina S_k znači i podizanje višeg mješovitog potencijala M blizu potencijala katode.

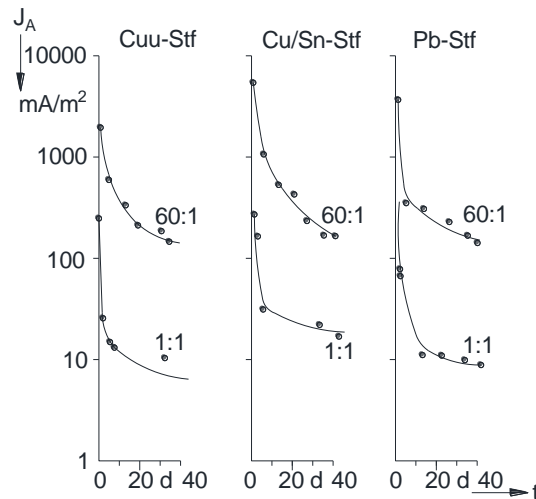


Slika 4. Vremenska ovisnost potencijala za kombinaciju Cuu – Stu [3]

Stu – anoda

M – mješoviti potencijal polielektrode

t – vrijeme trajanja ispitivanja



Slika 5. Primjeri za različite kombinacije Cuu, Cu/Sn, Pb [3]

Stf – anoda

t – vrijeme trajanja ispitivanja

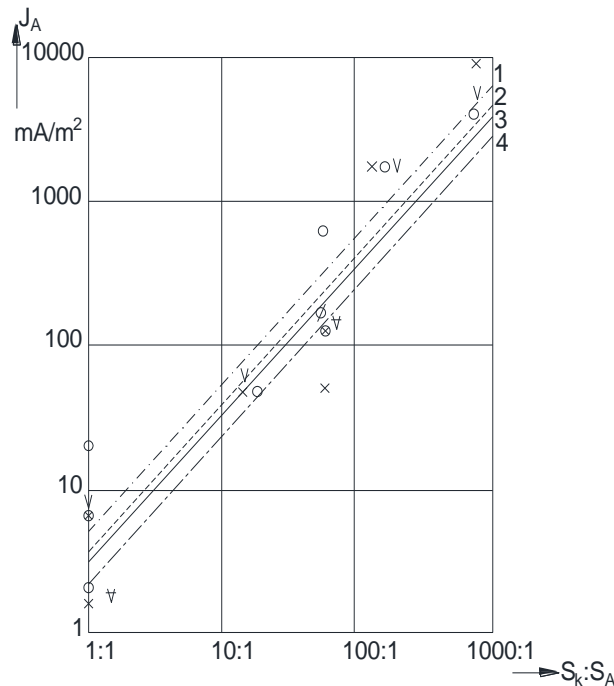
Krivulje prikazane na slici 5. vrijede za primjere s različitim kombinacijama materijala katode Cuu, Cu/Sn i Pb u odnosu na anodu Stf te prikazuju tipične vremenske ovisnosti vrijednosti gustoće J_a .

S druge strane vidljivo je sa slike 5. da su gustoća struje članka koje se razvijaju nakon 40 dana skoro uvijek neovisne o materijalu iz kojeg je izrađena katoda.

U skladu s pravilom površina (3), gustoća struje anodnog članka je proporcionalna omjeru površina katode i anode $\left(\frac{S_k}{S_a}\right)$. Kako bi se ispitalo ovo pravilo na kombinaciju materijala, gustoća struje anodnog članka J_a koja se može dobiti nakon 40 dana, uz primjenu omjera površina 1:1 do 800:1, prikazana je na slici 6. Kako bi se povratno mogle dobiti linearna funkcija za linijski prikaz svih mjerenih parova J_a i $\frac{S_k}{S_a}$ sa slike 6., određena je formula:

$$\ln \frac{J_a}{J_o} = \ln \frac{\Delta U}{J_o \cdot r_k} + b \cdot \ln \frac{S_k}{S_a} \quad (4)$$

pri čemu je ravna linija prikazana na slici 6. (oznaka 3) izračunata prema formuli (4). Faktor b iznosi 1 uz korelacijski koeficijent $r = 89,3\%$.



Slika 6. Gustoća struje članka koje se pojavljuju nakon 40 dana [3]

Oznake

x Cuu – Stu
o Cu/Sn - Stu

⊗ Cu – Stf
∅ Cu/Sn – Stf

V Pb – Stf
▽ Pb – Stu

$$\frac{\Delta U}{r_k} \text{ je u } \frac{mA}{m^2} \text{ za } \frac{S_k}{S_a} = 1:1$$

J_o – referentna gustoća struje 1 mA/m²

1 – Cu/Sn 5,4

2 – Pb 3,9

3 – Srednja vrijednost 3,4

4 – Cuu 2,5

4.2 Ispitivanja zadržavajućeg statičkog potencijala

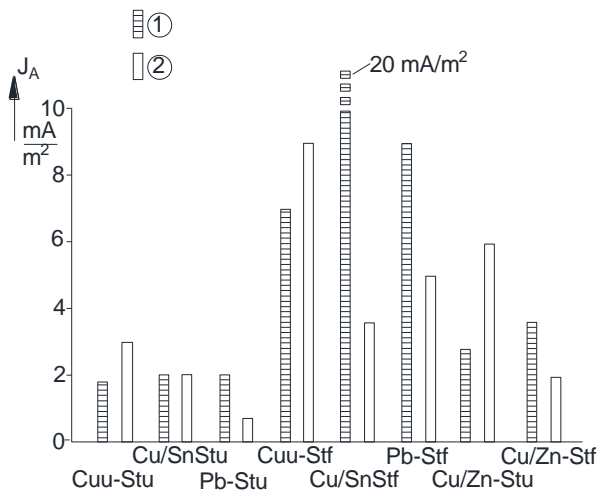
Kako bi se odredio specifični otpor polarizacije r_k katode Cuu, Cu/Sn i Pb, određene su krivulje ukupne katodne strujne gustoće. One vrijede uz određene katodne strujne gustoće kod različitih potencijala. Da bi se to postiglo, potrebno je odrediti vremensku ovisnost katodnih gustoća struja uvažavajući utjecaj formiranja gornjih slojeva u otopini tla. Na taj su način određeni specifični katodni otpori polarizacije u tablici 2. [3].

Tablica 2. Specifični katodni otpori polarizacije za $t = 20 \cdot d$

Materijal uzemljivačke elektrode	$r_k (10^3 \Omega \text{ cm}^2)$
Cuu	130
Cu/Sn	270
Pb	430

4.3 Ispitivanje članka sa superponiranim AC naponom

Ova ispitivanja pokazuju, slično kao i u slučaju ispitivanja bez superponiranog AC napona, smanjenje gustoće DC struje J_- . Vremenska ovisnost je slična i kod gustoće AC struje J_+ . Rezultati ovih ispitivanja su vidljivi na slici 7. i odnose se na rezultate ispitivanja nakon 40 dana te su vrijednosti gustoće struje J_- prikazane grafički zajedno s vrijednostima J_a , ali bez U_+ .



Slika 7. Gustoće struje članka kao rezultati ispitivanja s i bez AC napona [3]

$\left. \begin{array}{l} Stu \\ Stf \\ Cu/Zn \end{array} \right\}$ anode;

$S_k : S_a = 1 : 1$

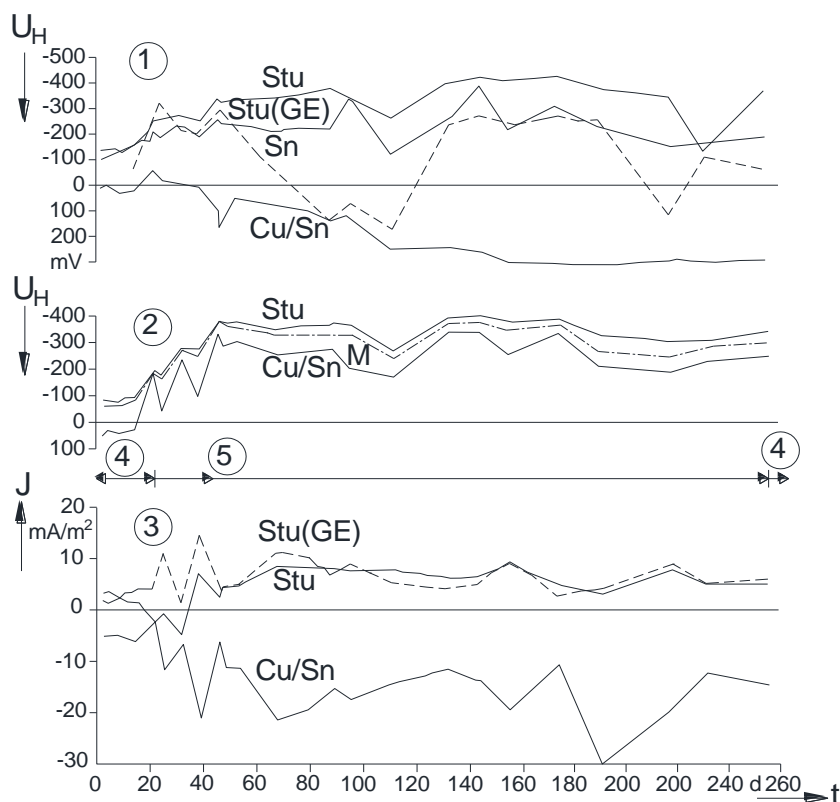
(1) ispitivanje bez superponiranog AC napona;

(2) ispitivanje sa superponiranim AC naponom;

t vrijeme trajanja ispitivanja.

4.4 Ispitivanja na terenu

Ispitivanje uzoraka tla koja se uzimaju za potrebe ispitivanja na terenu pokazuju da tlo može biti slabo agresivno ili agresivno, prema GW9. Prikaz rezultata koji pokazuju rezultate ispitivanja na 4 različite lokacije u SR Njemačkoj dan je na slici 8.



Slika 8. Primjer analize ispitivanja na terenu za Cu/Sn – Stu [3]

Oznake:

- (1) Slobodni korozijski potencijal kod elektroda koje nisu povezane.
- (2) Mješoviti potencijal M povezanih elektroda i pojedinačni potencijali neposredno nakon prekida kruga.
- (3) Gustoće struje povezanih elektroda.
- (4) Bez superponiranog AC napona.
- (5) Sa superponiranim AC naponom.

5. ZAKLJUČCI U VEZI REZULTATA ISPITIVANJA

Kod analiza laboratorijskih ispitivanja i ispitivanja na terenu, može se zaključiti da je potrebna primjena niskoomskih, ventiliranih elektrolita, koji imaju sklonost formiranja gornjih slojeva. Sljedeći su zaključci u vezi izabranih katoda i anoda ($S_a = 1 \text{ cm}^2$):

- Materijali uzemljivačke elektrode bakar/bakar sa S_n prevlakom, olovo, čelik u betonu ponašaju se kao katode u odnosu na materijale kao što su lake legure i vruće cinčano željezo [4].
- Jednakom ventilacijom katode i anode, spomenuto katodno djelovanje materijala za uzemljenje je jednako unutar područja naznačenog na slici 6.
- Bakar s pokositrenom prevlakom nema nikakvih prednosti u vezi elektrokemijskih procesa u odnosu na čisti bakar.
- Anodno rastvaranje nezaštićenog čelika je zanemarivo u slučaju malih omjera površina. Kod omjera površina 100:1 može doći do intenziteta erozije od 0,4 mm po godini, prema formuli (3), s $\frac{\Delta U}{r_k} = 3,4 \frac{\text{mA}}{\text{m}^2}$ i $1 \frac{\text{mA}}{\text{m}^2} \triangleq 1,2 \mu\text{m}/a$.
- Sloj Zn u slučaju pocinčanog čelika (postupak vrućeg pocinčavanja) erodira godišnje $5 \mu\text{m}$ kod omjera površina 1:1. To je još prihvatljivo za praktičnu primjenu. Kada je omjer površina 10:1, tada je intenzitet korozije $50 \mu\text{m}$ godišnje, što je već značajno. To znači da gubitak elektrokemijskog potencijala utječe na prevlaku cinka u slučaju postupka vrućeg pocinčavanja.
- Rezultati ispitivanja za vruće galvanizirani bakar variraju zbog nepravilnosti izvedbe prevlake iz cinka. Vruće galvanizirane uzemljivačke elektrode su uvijek anoda kada su u kontaktu sa čelikom.

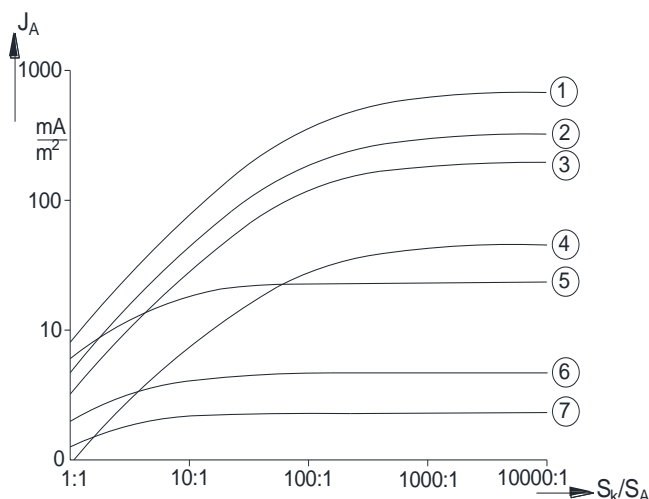
- Ispitni članci sa superponiranim AC naponom su bili ispitani s AC strujom gustoće $0,3 \text{ A/m}^2$. Kako ispravljačko djelovanje započinje kod ispitivanja metala s AC strujom znatno veće gustoće, utjecaj AC napona u vezi korozije praktično ne treba uzimati u obzir.
- Rezultati ispitivanja vrijede samo za elektrolite koji nastoje formirati slojeve pri vrhu. Kod ispitivanja je orijentacija u rastvoru takva da nema namjeru formirati slojeve pri vrhu, kao u slučaju agresivnih tala, što pokazuje da se veće gustoće struje članka mogu događati.

6. ZAKLJUČAK

Rezultati ispitivanja i njihove analize omogućuju izradu sljedećih zaključaka:

- Ako se katodni materijal, npr. olovo, nalazi u neventiliranom tlu i čisti čelik u ventiliranoj solnoj otopini, strujna gustoća će biti mala nakon otprilike 30 dana. Čelik je u tom slučaju također anoda čitavo vrijeme.
- U slučaju visokoomskih tla, vrijednosti $R_k \cdot S_a$ i $R_a \cdot S_a$ u jednadžbi (2) mogu se zanemariti. Na slici 9 je prikazana funkcija $J_a = f\left(\frac{S_k}{S_a}\right)$. Pri tome treba razmatrati i podatke iz tablice 3. Parametri otpora elektrolita za $S_a = 1 \text{ cm}^2$ i $S_a = 1 \text{ m}^2$ se koriste.

Krivulje na slici 9. prikazuju utjecaj veličine anodne površine S_a . U slučaju kada je površina S_a blizu cm^2 , u ovisnosti o otporu tla, događaju se visoki ili vrlo visoki iznosi erozije. Anodne površine od 1 m^2 i veće pokazuju male iznose erozije, čak i u slučaju vrlo malih otpora tla. Ovaj zaključak je potvrđen prilikom različitih ispitivanja.



Slika 9. Gustoća struje članka sa $S_a = 1 \text{ cm}^2$ i $S_a = 1 \text{ m}^2$ [3]

Oznake: 1 do 4 za $S_a = 1 \text{ cm}^2$; 5 do 7 za $S_a = 1 \text{ m}^2$

Tablica 3. Pretpostavke za proračun krivulja sa slike 9.

$U_{R,k} - U_{R,a} = 100 \text{ mV}$; $r_k = 10^5 \Omega \text{ cm}^2$; $r_k = 10^3 \Omega \text{ cm}^2$	
a)	$S_a = 1 \text{ cm}^2$ (npr. oštećena PE prevlaka na novoj cijevi) $R_a^* = R_a \cdot S_a$ $R_a = \frac{\rho}{2 \cdot D}$ i $S_a = \frac{D^2 \cdot \pi}{4}$ $R_a^* = 0,44 \cdot \rho$ ($\Omega \text{ cm}^2$) $R_k^* = R_k \cdot S_a$ s $R_k = \frac{3 \cdot \rho}{L}$ (Ω) (traka kao uzemljivačka elektroda: $L > 10 \text{ m}$ prema, a $L = S_k/U$) (traka kao uzemljivačka elektroda opsega 7 cm, tako da je $D = \sqrt{4 \cdot S_a/\pi} = 1,13 \text{ cm}$) $R_k^* = 2 \cdot l \cdot \rho \frac{S_a}{S_k}$ ($\Omega \text{ cm}^2$)
b)	$S_a = 1 \text{ m}^2$ (npr. mnogo velikih kvarova u prevlaci od katrana na staroj cijevi) $R_a^* = 44 \cdot \rho$ ($\Omega \text{ cm}^2$) $R_k^* = 2 \cdot l \cdot \rho \frac{S_a}{S_k}$ ($\Omega \text{ cm}^2$)

LITERATURA

1. Heim, G.: Korrosionsverhalten von Erderwerkstoffen Elektrizitätswirtschaft 81, 1982.
2. Baeckmann, v. W.: Kathodische Korrosion von Blei im Erdboden Werkstoffe und Korrosion 20, 1969.
3. Bertling, T., Dischner, J., Heim, G., Paul, H.U.: Corrosion behaviour of earthing materials, CIGRE Session, 1984.
4. Abel, H. J. und Kruse, C. L.: Untersuchung über die Auswirkung der Element-bildung zwischen Stahl in Beton und Stahl im Erdboden, Werkstoffe und Korrosion 33, 1982.
5. DIN VDE 0151; 1986 – 06: Werkstoffe und Mindestmaße von Erdern bezüglich der Korrosion.
6. DIN 50918: Korrosion der Metalle, elektrochemische Korrosionsuntersuchungen Jun, 1978.