

Az elektromágneses szennyezettség korróziós hatásai épített környezetünk acél és vasbeton szerkezeteire

Corrosive effects of electromagnetic pollution on the steel and reinforced concrete structures from the complex built-up media

LINGVAY Mónika¹, Dr. LINGVAY József²

¹ Nyíregyházi Egyetem, Műszaki és Agrártudományi Intézet, Műszaki Alapozó,
Fizika és Gépgyártástechnológia Tanszék,
H-4400 Nyíregyháza, Kótaji út 9–11, <https://mati.nye.hu/hu>
E-mail: lingvay.monika@nye.hu

² Research-Development Institute for Environmental Protection Technologies and Equipment – ICPE Bistrița SA,
Str. Parcului, Nr. 7, 420035, Bistrița, BN-RO,
Fax: +40 263 210938, <https://www.icpebn.ro>
E-mail: iosiflingvay@yahoo.com

Abstract

The corrosion effects of electromagnetic pollution and stray currents on steel and reinforced concrete structures in our built-up media have been investigated. The investigations show that direct and alternating stray currents cause significant corrosion damage in steel and reinforced concrete structures in our built-up media. Corrosion damage caused by the synergistic effects of complex DC and AC stray currents is particularly dangerous.

Key words: corrosion, stray currents, electromagnetic pollution, built-up media, artifacts

Összefoglaló

Az elektromágneses szennyezettség, kóboráramok által okozott, korróziós hatásai az épített környezetünk acél és vasbeton szerkezeteire lettek megvizsgálva. A vizsgálatokból megállapítható, hogy épített környezetünk acél és vasbeton szerkezeteiben az egyen és váltakozó áramú kóboráramok számottevő korróziós rongálódásokat okoznak. Különösen veszélyesek az összetett (egyen és váltakozó áramú) kóboráramok szinergiás hatásai által okozott korróziós rongálódások.

Kulcsszavak: korrózió, kóboráramok, elektromágneses szennyezés, beépített környezet, műtárgyak

1. BEVEZETÉS

A hosszú távú fenntartható fejlesztés szellemében az építet infrastruktúra (műtárgyak, épületek, energia és víz hálózatok stb.) biztonságos üzemeltetése egy komplex, nagyfontosságú kihívás és feladat.

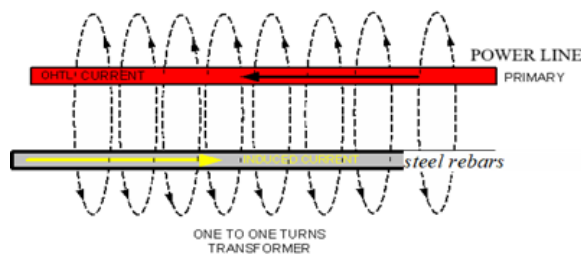
Az építet infrastruktúra épségét és biztonságos üzemeltetését elsősorban ezek kivitelezésénél felhasznált anyagok korróziós rongálódásai, határozzák meg. A biztonságos üzemeltetést csak szakszerűen elvégzett aktív diagnosztikai (előrejelzés és kezelés) tanulmányok alapján lehet biztosítani. A diagnosztikai tanulmányok kivitelezésében fontos szerepe van azoknak a tényezőknek a meghatározása, amelyek befolyásolhatják a vizsgált rendszer biztonságos üzemeltetését [1].

Sok előnyös tulajdonságára való tekintettel különböző műtárgyak kivitelezésénél előszeretettel használják az acél és/vagy vasbeton szerkezeteket. Ezek általában ki vannak téve az időjárás viszontagságainak (eső, erős szélfúvás, zúzmara és havazás, stb.), a légköri szennyezéseknek (CO₂, SO₂, NO_x, por stb.) valamint – a telepítési hely függvényében – egy aránylag intenzív egyen [2] és / vagy váltakozó (általában szinuszosan) váltakozó elektromos térnek [3]. Ezeknek a tényezőknek együttes és szinergikus hatása nagymértékben meghatározza az acél és vasbeton szerkezetek korróziós állapotát, épségét, és ebből kifolyólag a vasbeton szerkezetek biztonságos üzemeltetését [2-7].

2. AZ ELEKTROMÁGNESES SZENNYEZÉS ÉS A KÓBORÁRAMOK

Környezetünk elektromágneses szennyezését az elektromos energia termelési, szállítási és fogyasztói rendszerei okozzák. Ezeknek a rendszereknek a vezetőin áthaladó áramok környezetükben elektromos tereket képeznek aminek hatására a környezetükbe telepített acél és vasbeton szerkezetekbe – induktív és / vagy rezisztív csatlakozás által – kóboráramok keletkeznek.

A vasbeton szerkezetekbe gerjesztett indukciós kóboráramok keletkezése és tipikus esete az 1. ábrán van bemutatva.

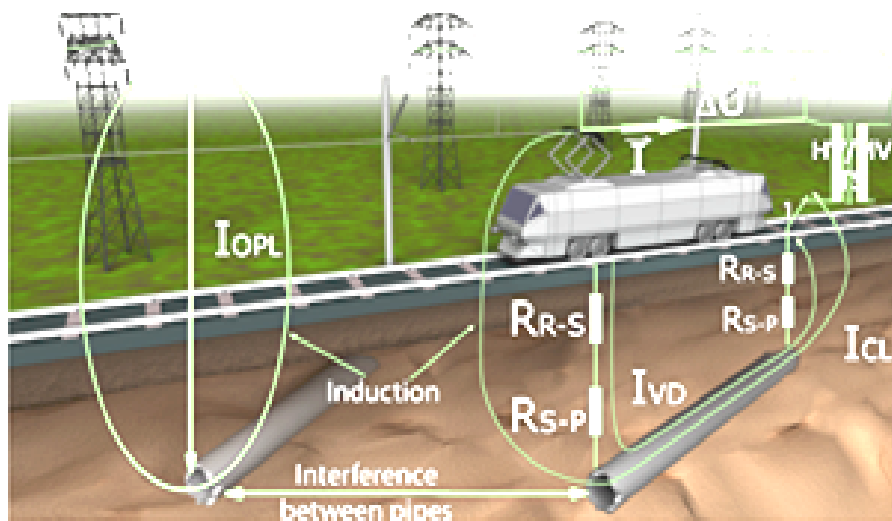


1. ábra

Az indukciós kóboráramok keletkezése és tipikus esete [3]

Az 1. ábrán bemutatott vázlatból megállapítható, hogy az energiahálózat vezetője és az épület vasbeton szerkezete gyakorlatilag egy 1/1 transzformátor primer és szekunder – légtérben csatolt – tekercsét képezik. A primeren áthaladó áram a szekunderben (a vasbeton acélrúdjai) feszültséget indukál, aminek hatására a beton/acélrúd felület szórt ellenállásának valamint a beton vezetőképességének függvényében, adott erősségű kóboráram képződik.

A talajba ágyazott acélcsövekben képződő, a váltakozóáramú elektromos vontatás által okozott kóboráramos viszonyok a 2. ábrán vannak bemutatva.



2. ábra

Az elektromos vontatás által okozott kóboráramok:

R_{R-S} – sínpálya/talaj szórt ellenállás;

R_{S-P} – acélcső/talaj szórt ellenállás; I – vontatóáram,

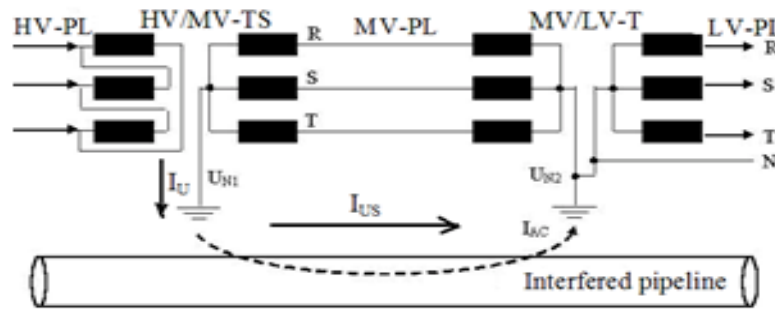
ΔU – feszültségcsökkenés a síneken a mozdony helyzete és az áramforrás csatlakoztatási pontja között;

$HV/MV-TS$ – magas/közép feszültségű transzformátor;

I_{OPL} – magasfeszültségű tápvonalakból indukált áram az acélcsőbe; I_{CL} – közép feszültségű táp/kontakt vezetékéből az acélcsőbe indukált áram, I_{VD} – a ΔU által okozott kóboráram [3].

A 2. ábra alapján megállapítható, hogy a váltakozó áramú elektromos vontatási rendszerekből induktív és rezisztív csatlakozás által képződnek kóboráramok a szomszédos, talajba ágyazott fém szerkezetekbe.

A háromfázisú energetikai rendszer transzformátor állomások földelésein áthaladó kiegyenlítő áramok okoznak (a 3. ábrán felvázoltak szerint) kóboráramokat a talajban telepített fém szerkezetben (acélcsőhálózatok, vasbeton szerkezetek stb.)



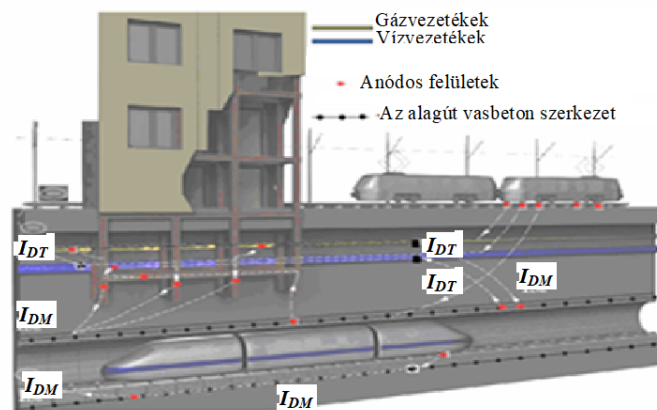
3. ábra

A háromfázisú energetikai rendszer által okozott kóboráramok: HV-PL – magasfeszültségű tápvonal;
 HV/MV-TS – magas/közép feszültségű transzformátor; MV-PL – közép feszültségű tápvonal;
 MV/LV-T – közép/alacsony feszültségű transzformátor; LV-PL – alacsony feszültségű tápvonalak;
 I_U – a földelések közötti kiegyenlítő áram;
 U_{N1} és U_{N2} – a háromfázisú transzformátorok kiegyensúlyozatlan feszültségei;
 I_{CS} – a kiegyenlítő áram talajban haladó komponense;
 I_{AC} – a kiegyenlítő áram fém szerkezeten haladó komponense (AC kóboráram)[3].

Tekintettel az aránylag gyakori indulásokra és az egyenáramú motorok kedvező indítási karakterisztikájára, nagyvárosokban és sűrűn lakott területeken a közszállítás egyenáramú vontatással van megoldva (villamosok, metró). A kötőpályán közlekedő villamos és metró szerelvények energiatáplálása a pálya síneivel és egy felsővezetékkel (villamos) vagy egy „harmadik vezető sínnel” (metró) van megoldva. Ebből kifolyólag a síneken, az I_V vontatóárammal arányos, ΔU feszültségesés lép fel (1),

$$\Delta U = R \cdot I_V \quad (1)$$

ahol R a táplálási pont és a jármű helyzete közötti sínek ellenállása. A ΔU feszültségesés a sínpálya/talaj szórt ellenálláson keresztül a talajba telepített fém szerkezetekben (acélcső, vasbetonszerkezet stb.) egyenáramú kóboráramokat produkál (úgy, mint a 2. ábrán van felvázolva). A metrókat és villamosokat üzemeltető agglomerációs központokban fellépő komplex kóboráramos viszonyok a 4. ábrán vannak felvázolva.



4. ábra

Metrókat és villamosokat üzemeltető agglomerációs központokban fellépő komplex kóboráramos viszonyok:
 I_{DM} – a metró által okozott kóboráramok, I_{DT} – a villamosok által okozott kóboráramok

A 4. ábra alapján megállapítható, hogy a ΔU feszültségeséseknek következtében:

- a villamos pálya által produkál kóboráramok anódos felületeket képeznek, úgy a gáz, víz hálózatok, metró alagút és az épületek vasbeton szerkezetein (koncentráltan, a „–”, tápkábel sínre csatlakoztatási helyének közelében) mint a síneken (szórtan – a villamosok alatt);
- a metró által produkál kóboráramok anódos felületeket képeznek, úgy az alagút vasbeton szerkezetén (koncentráltan, a „–”, tápkábel sínre csatlakoztatási helyének közelében) mint a síneken (szórtan – a metró szerelvények alatt);

- a metróalagút vasbeton szerkezetén áthaladó kóboráram általi ohmikus feszültségés a szomszédos fém szerkezetekben (gáz és/vagy vízvezetékek, kábelek, épületek stb.) „szekunder” kóboráramokat és az ezekkel járó anódos felületeket képeznek.

A 2. ábra alapján megállapítható, hogy a kóboráramok erősségét elsősorban a ΔU és az R_{R-S} határozzák meg. A ΔU általában adott (adott vontatóáramnál az acél vezetőképesége, a sínek keresztmetszete és hossza). Az R_{R-S} értéke a mindenkori sín/talpfá/talaj szigetelésének minőségétől függ. A rosszul megtervezett/kivitelezet vagy karbantartott pályák esetében (gyenge sín/talaj szigetelés, nagy átmeneti ellenállású sín csatlakozások stb.) a kóboráramok akár a 200A-t is meghaladhatják [8]. Ez komoly korróziós rongálódásokat okozhat a sínek talpán (5. ábra), a sín/talpfarögzítés szerkezetekben (6. ábra) és a szomszédos fém szerkezetekben.



5. ábra

*A talajtól rosszul szigetelt sínek kóboráramú korróziós rongálódásai
(Nagyvárad, 2009) [3]*



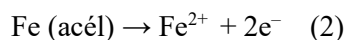
6/ ábra

*A talajtól rosszul szigetelt sínrögzítő-elemeinek kóboráramú korróziós rongálódásai
(Millenniumi földalatti vasút, Budapest 2004 – 2 éves üzemeltetés a teljes felújítás után) [3, 8]*

A 1., 2., 3. és 4. ábrák alapján megállapítható, hogy a kóboráramok intenzitása és iránya állandóan változnak (a zavaró forráson/vezetéken áthaladó áram valamint a vonat, villamos vagy metró pillanatnyi pozíciója stb. függvényében) – ezért nevezzük őket „kóboráramnak” (angolul = stray currents)

3. A KÓBORÁRAMOK ÁLTAL GYORSÍTOTT KORRÓZIÓ

Az egyenáramú kóboráramok, általában lokálisan, anódosan polarizálják a vezető II. rendű közegbe (elektrolitok – talaj, beton stb.) ágyazott fémeket Ez, az acél esetében, lokalizáltan az anódos felületeken, a vas oldódásához vezet (2):



A kioldott vas mennyisége (tömegvesztés Δm) a fém/vezetőközeg felületen áthaladó töltéshordozók száma (e^-) adja meg – Faraday törvénye szerint (3):

$$\Delta m = \frac{M}{z \cdot F} \int_{t_0}^t I_A(t) dt \quad (3)$$

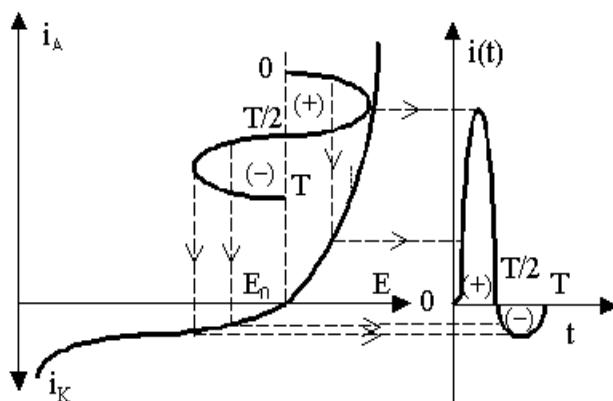
M – az oldott fém (vas = 56) atomsúlya, z – a fém vegyértéke (vas = 2), F – Faraday szám (96.500C), I_A – anódáram, t – az anódos polarizáció ideje.

Ennek alapján, kiszámítható, hogy egy csupán 1A átlag értékű egyenáramú kóboráram, egy év alatt kb. 10kg vasat old le az ennek kitett acélszerkezet anódosan polarizált (általában lokalizált/aránylag kis területű) felületéről.

Az egészséges ($\text{pH} > 12$) és száraz beton egy aránylag jó szigetelő közeg (fajlagos ellenállása kb. 800 – 1000 Ωm [10]) – tehát, elvileg, a benne levő vasalás aránylag jól védve van a kóboráramoktól. A nedvesség a légköri vagy a talajban levő nedvesség hatására a beton fajlagos ellenállása csökken, megjelennek a kóboráramok és beindul a (2) folyamat. Az acél korróziós termékeinek a térfogata sokkal nagyobb, mint annak az acélnek amiből képződtek – ebből kifolyólag a beton és a benne levő rozsdás acél között akár 500kg/cm² nyomás képződik [10]. A nyomás hatására, a beton pórusai megnyílnak, több nedvesség hatol be, a szigetelési ellenállás csökken, a kóboráram erőssége megnő és vasbeton szerkezet korróziós rongálódásának sebessége számottevően felgyorsul. Másrészt, laboratóriumban végzett meghatározások kimutatták, hogy az anódos polarizáció hatására a beton lúgossága csökken [5] ami a beton szakítószilárdságának a csökkenéséhez vezet. Az intenzív katódos polarizáció is rongálja a betont [6] ez azzal magyarázható, hogy katódos polarizációnál a cement fémoxid komponensei részben redukálódnak, a beton zsugorodik és megrepedezik. Tehát a beton szakítószilárdságának csökkenéséhez az intenzív kóboráramok által okozott katódos polarizáció is vezethet.

Az egyenáramú kóboráramoktól eltérően (amelyek lokálisan képződő anódosan polarizált felületeken rongálnak) a váltakozó áramú kóboráramok esetében a fémfelületek teljes felülete, diszkrét polarizálva van.

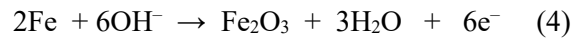
Tekintettel arra, hogy szinuszos váltóáramú polarizáció esetében a pozitív félperiódusban oxidált/ kioldott vas tömege azonos a negatív félperiódusban lerakottal, elvileg a váltakozó áramnak korróziót gyorsító hatása nem kéne, hogy legyen. Ennek ellenére a gyakorlati tapasztalatok és a laboratóriumi vizsgálatok számottevő korróziós rongálódásokat mutattak ki váltakozó árammal polarizált felületeken [11, 12]. Ez a tapasztalat azzal magyarázható, hogy az egyenárammal nem polarizált (E_0 – nyugalmi, egyensúly potenciál) acél /elektrolit elektrokémiai rendszer jellegzetes polarizációs görbéjének anódos ága sokkal meredekebb, mint a katódos ág és ebből kifolyólag, egy a felületen áthaladó váltakozó áram hatására, a rendszer egy felerősített anódos komponenssel válaszol (7. ábra).



7. ábra

A vas/elektrolit elektrokémiai rendszer válasza egy T periódusú, szinuszos zavaró jel hatására

A 7. ábra alapján megállapítható, hogy a vas (acél)/elektrolit elektrokémiai rendszer gyakorlatilag egyenirányítja az acél/elektrolit felületen áthaladó váltóáramot és anódosan polarizálja az acélt. Az anódos polarizáció hatására, nedves közegben (pl. nedves beton) első lépésként vasoxidok (rozsdá) képződik (4):



A váltakozó áramú indukciós kóboráramok által okozott korrózió tipikus példái az intenzív elektromágneses terek kitett műtárgyak (pl. az elektorenergetikában használt vasbeton fenntartószerkezetek – 8. ábra; villamosított vasutak műtárgyai: hidak, alagutak, épületek/peronok – 9. ábra).



8. ábra

Az elektorenergetikában használt vasbeton fenntartószerkezetek korróziós rongálódásai



9. ábra

Egy vasúti állomás előterének vasbeton szerkezetének katasztrofális korróziós rongálódása (Újvidék, Szerbia – 2024. november 1.)

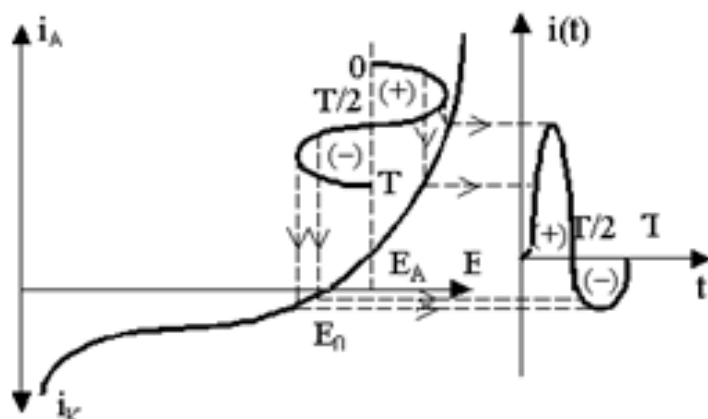
A háromfázisú energetikai rendszer transzformátor állomásainak földeléseinek fém szerkezetei (általában horganyzott acél) egy szinte állandó jellegű váltóáramú polarizációnak vannak kitéve (3. ábra), aminek hatására ezek intenzív korróziós rongálódásoknak vannak kitéve [12, 14] (10. ábra).



10. ábra.

Egy transzformátor állomás földelésének korróziója – 20 éves üzemeltetés után (Kolozsvár 2005.) [13]

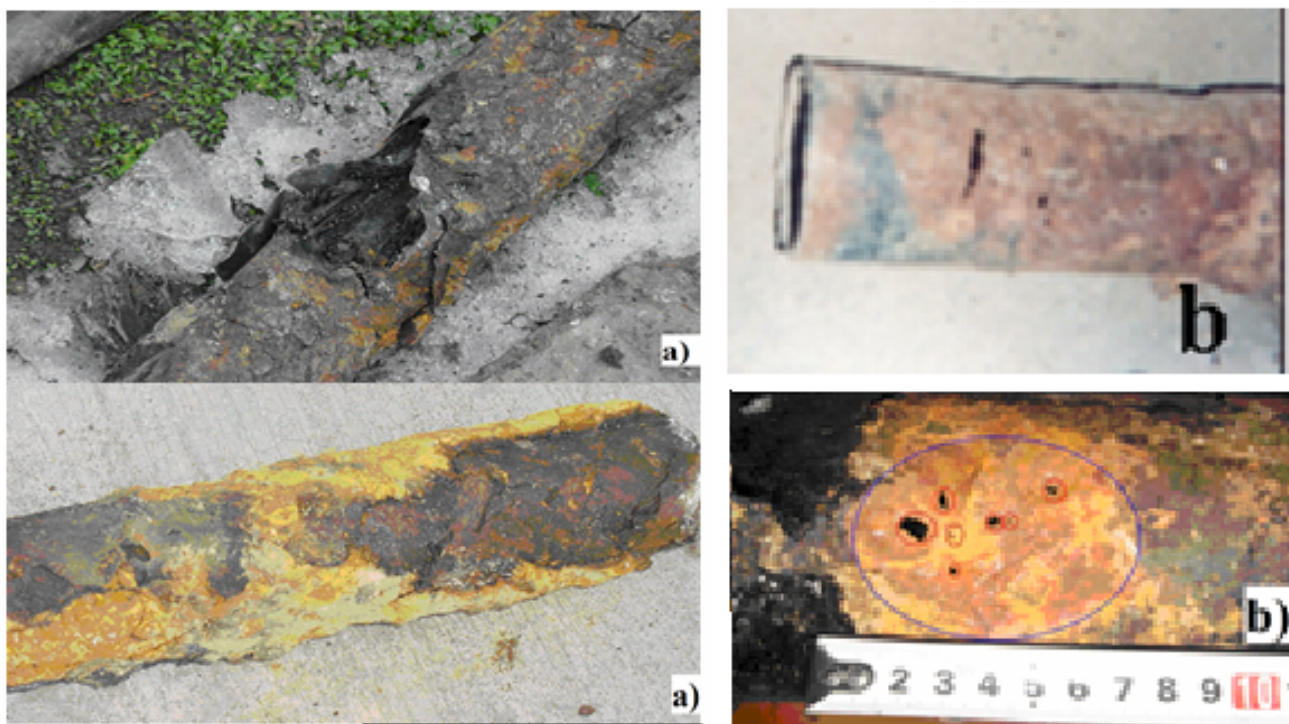
Korróziós szempontból, különösen veszélyesek azok az esetek, amikor a II. rendű vezető közegben (talaj, nedves beton) üzemelő fémszerkezeteket egyen és váltakozó áramú összetett kóboráramok zavarják. Ezekben az esetekben (11. ábra) az a E_A anódos potenciálra polarizált felületeken megjelenő váltóáramú szinuszos zavaró jel hatására a fém/elektrolit rendszer egy felerősödött, szinuszosan váltakozó anódárammal - $i(t)$ - válaszol [3, 15, 16]



11. ábra

Az anódosan polarizált acélfelület válasza egy T periódusú szinuszos zavaró jel hatására

Az összetett, egyen és váltakozó kóboráramok által okozott korróziós rongálódások gyakran tapasztalhatók nagyvárosokban a metró és/vagy villamos pályák szomszédságába telepített kábeleknél, gáz és/vagy ivóvíz vezetékeknél (12. ábra).



12. ábra

10kV-os kábelek (a) és gázcsövek (b) korróziós rongálódásai (Kolozsvár 1998)

Nem csak az 50Hz-es váltóáramú zavaró források okoznak korróziós rongálódásokat. Egy, a GSM (880 – 960 MHz-en üzemelő) cellák által gerjesztett indukciós kóboráramoknak tulajdoníthatók azok vasbeton-rongálódások, amelyek a 13. ábrán vannak bemutatva. Ezek a kb. 9 m-es körzetbe lokalizált rongálódások csak a GSM antennák felszerelése után jelentek meg (kb. 5 éves üzemeltetés után). A hatalmas sarok-tömbház, az antennáktól 9m-rel távolabbi felületein hasonló szerkezetrongálódások nem voltak kimutathatók.



13. ábra

*Egy tömbház vasbetonszerkezetének korróziós rongálódásai
a GSM antennák kb. 9m-es körzetében
(Bukarest 2011, a Bd. Muncii és Bd. Chișinău sarkán)*

Megállapítható, hogy épített környezetünk acél és vasbeton szerkezeteiben az egyen és váltakozó áramú kóboráramok számottevő korróziós rongálódásokat okoznak. Tekintettel az épített környezet komplexitására valamint a zavaró források sokasságára és összetettségére, a kóboráramok által okozott rongálódások megelőzése egy nagyon komplex és interdiszciplináris tudásokat (elektrotechnika, elektrokémia, anyagtudományok, építészet stb.) igénylő feladat [12-16].

4. KÖVETKEZTETÉSEK

Az elektromágneses szennyezettség, kóboráramok által okozott, korróziós hatásai az épített környezetünk acél és vasbeton szerkezeteire lettek megvizsgálva. Vizsgálatainkból kitűnik, hogy:

- az épített környezetünk acél és vasbeton szerkezeteiben jelentkező kóboráramok gyakori forrásai a háromfázisú energetikai rendszer hálózatai és a nagy egyen (villamosok, metró) és/vagy váltakozó áramú (villanyvasút, nagy és magas frekvenciás generátorok – ideértve a rádió és TV adókat, kommunikációs hálózatokat is, stb.);
- a talajba ágyazott acél és vasbeton szerkezetekben fellépő kóboráramok erősségét főleg a zavart fémszerkezetek és a zavaró források közötti ellenállási viszonyok határozzák meg;
- a közép és magas feszültségű váltóáramú légvezetékek induktív csatolással zavarják úgy a talajba ágyazott fémszerkezeteket, mint a felszíni vasbetonszerkezeteket;
- a nagyvárosokban (kötőpályás elektromos vontatású közszállítás és sűrű háromfázisú elektromos hálózatok), korróziós szempontból, különösen veszélyesek az összetett (egyen és váltakozó áramú) kóboráramok.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Chen, Y. (1995), *A Fuzzy Decision System for Fault Classification Under High Levels of Uncertainty*, Transactions of the ASME -Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 117, pp.108-115.
- [2] I. Lingvay, M. Gabor, C. Lingvay, *Degradation by corrosion of steel rebars from reinforced concrete structures. 1 Studies regarding the corrosion of the Bucharest metro's structures of concrete steel*, Rev. Chim. (București) 57, nr. 2, 2006. pp. 180-183
- [3] I. Lingvay, A. M. Bors, D. Lingvay, I. Radermacher, V. Neagu, *Electromagnetic Pollution of the Environment and its Effects on the Materials from the Built up Media*, REV.CHIM.(Bucharest), vol. 69 (12), 2018. pp. 3593-3599
- [4] I. Lingvay, C. Lingvay, C. Homan, O. Ciogescu, *Degradation by corrosion of steel rebars from reinforced concrete structures. 5. Contributions to the Study of Corrosion of Concrete Steel Sustaining Elements from the Systems Involved in Energy Transportation and Distribution*, Rev. Chim. (București), 57, nr. 12. 2006, pp.1279-1282.
- [5] I. Lingvay, S. Gombos, C. Lingvay, J. Kovács, C.D. Voinițchi, *Degradation by corrosion of steel rebars from reinforced concrete structures. 4. The pH and chemical composition modifications of concrete caused by stray currents*, Rev. Chim. (București) 57, nr. 5, 2006, pp. 498-500
- [6] I. Lingvay, M. Gabor, C.D. Voinițchi, C. Lingvay, *Degradation by corrosion of steel rebars from reinforced concrete structures. 3. Contributions to Study of Physico-Mechanical Degradation of Reinforced Concrete due to Stray Currents*, Rev. Chim. (București) 57, nr. 4, 2006, pp. 378-382
- [7] I. Lingvay, *Degradation by corrosion of steel rebars from reinforced concrete structures. 2. Contributions to study of degradation mechanism of reinforced concrete structures situated in natural electrolytic media*, Rev. Chim. (București) 57, nr.3, 2006 pp. 261-265
- [8] Puklus Z., Lingvay J., Hodossy L., *A kóboráramok és hatásainak vizsgálata a millenniumi földalatti vasút környezetében*, Korróziós figyelő 45, 2, 2005 pp. 43-48.
- [9] Neville, A.M., *Properties of Concrete*, Pitman Publishing Ltd.1975, p.370.
- [10] R. Piltner, Paulo J.M. Monteiro, *Stress analysis of expansive reactions in concrete*, Cement and Concrete Research 30 (2000) 843-848
- [11] I. Lingvay, G. Rus, F. Stoian and C. Lingvay, *Corrosion Study of OL37 Carbon Steel in the Presence of Both Aspergillum Niger Fungi and AC Stray Currents*, UPB Sci. Bull, Series B, Vol. 63, No. 3, 2001, pp. 263-270.
- [12] I. Lingvay, *Contributions to Study and Control of Accelerated Corrosion due to AC Stray Currents*, 12th Romanian International Conference on Chemistry and Chemical Engineering" vol. Quality Control and Analytical Chemistry - Corrosion and Electrochemistry, Bucharest, september 13-15, 2001, pp. 342-355.
- [13] Lingvay J., Lingvay C., *A háromfázisú energetikai rendszer földeléseinek korróziós károsodásai*, Korróziós figyelő, 46, 1, 2007. pp. 8-12
- [14] Lingvay, I., Homan, C., Lingvay, C., *Corrosion study of zinc covered steel of ground plates from the three-phase power system*, Rev. Chim. (București), 58, nr. 11, 2007. pp. 1051-1054
- [15] Lingvay J, Szatmári I, Lingvay M., Tudosie L., *Az erősáramú kábelek öregedése. Esettanulmány – 5 éves megfigyelések eredményei: Korróziós figyelő*, Vol. LIII (3) 2013. pp. 71 – 80
- [16] Lingvay J., *Hozzájárulás a csőrendszerek váltakozóáram okozta korróziójának vizsgálatához és megelőzéséhez*, Korróziós figyelő 44, 2, 2004 pp. 49-56.