

RASPODJELA STRUJNOG POLJA UZEMLJIVAČKOG SISTEMA U SLUČAJU INSTALIRANJA PODZEMNOG ČELIČNOG CJEVOVODA U BLIZINI

CURRENT FIELD DISTRIBUTION OF THE GROUNDING SYSTEM IN INSTALLATION OF NEARBY UNDERGROUND STEEL PIPELINE

Adnan Mujezinović¹, Alija Muharemović¹, Aida Muharemović²

Sažetak: Glavna uloga uzemljenja jeste da odvede struje kvara u zemlju, te da unutar elektroenergetskog postrojenja obezbijedi sigurnost osoblju i opremi za vrijeme kvarova u sistemu. Odvođenje struje sa uzemljivača rezultira nastankom strujnog polja u njegovoj blizini. Postavljanje podzemnih metalnih objekata u zoni utjecaja strujnog polja uzemljivača po pravilu dovodi do iznošenja potencijala. U radu je sa posebnom pažnjom analizirana problematika iznošenja potencijala preko čeličnih cjevovoda koji su ukopani u blizini uzemljivača trafostanica. Analize su provedene na primjerima jednoslojnog i dvoslojnog tla.

Ključne riječi: uzemljivač, strujno polje, čelični cjevovod.

Abstract: The main goal of grounding is to ride away fault current and to ensure personnel and equipment safety within the electric-power system during the system breakdown. Riding the current away from the grounding electrode results from the emergence of the current field in its vicinity. Placing metal objects underground within the grounding electrode current field results in transfer of potential. The special focus of this paper was placed on the analysis of the transfer of potential through steel pipelines that are buried near the substation grounding electrode. The analysis was implemented on examples of single and double-layer soil.

Keywords: grounding electrode, current field, steel pipeline.

UVOD

Uloga uzemljivača elektroenergetskih objekata jeste da osigura pouzdan rad opreme u toku havarijskih režima rada elektroenergetskog sistema (npr. kratak spoj ili atmosfersko pražnjenje), te da se osigura osoblje unutar i van postrojenja. Odvođenjem struje sa uzemljivača u okolnu zemlju površina tla dolazi na potencijal tako da između pojedinih tačaka na površini postoji potencijalna razlika. Oblik i razmak ekvipotencijalnih linija oko uzemljivača ovise o geometriji uzemljivača, vrijednosti struje kvara koja protječe kroz uzemljivač, kao i o specifičnom električnom otporu tla, dok je potencijal uzemljivača jednak proizvodu struje kroz uzemljivač i otpora rasprostiranja uzemljivača. Stoga je prilikom analize i projektovanja uzemljivača elektroenergetskih objekata potrebno, na neki od prikladnih načina, proračunati otpor rasprostiranja uzemljivača, raspodjelu strujnog polja na površini tla gdje je postavljen uzemljivač, kao i struju kvara [1]-[3].

Današnji elektroenergetski sistemi su karakterizirani velikim vrijednostima struja kratkih spojeva i dovođenjem visokih napona u urbane zone. Često se u takvim situacijama nameće rješavanje problema zajedničkog korištenja koridora elektroenergetskih objekata i čeličnih cjevovoda (npr. vodovoda, plinovoda i sl.). Tada, zbog sigurnosti, nije dovoljno razmatrati samo potencijal na površini tla gdje je ukopan uzemljivač, nego treba analizirati i raspodjelu potencijala u slojevima ispod površine tla. Pogrešno ili površno projektiranje uzemljivača elektroenergetskih objekata, kao i podzemnih cjevovoda u njihovoj neposrednoj blizini može imati za posljedicu iznošenje potencijala preko cjevovoda izvan trafostanice, te prouzrokovati opasnosti za osoblje koje radi na instalacijama vezanim za cjevovode [4].

Zbog kompleksnosti geometrije, odnosno međusobnog odnosa uzemljivača i cjevovoda, razmatrani problem je potrebno analizirati u 3 – D prostoru. U nastavku rada dati su rezultati proračuna stacionarnog strujnog polja u okolini uzemljivača koji je smješten u jednoslojnom i dvoslojnom tlu u neposrednoj blizini podzemnog čeličnog cjevovoda.

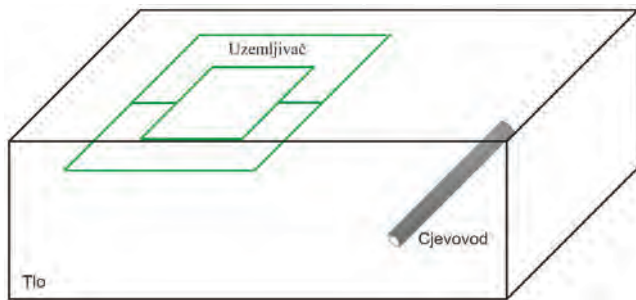
¹ Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Sarajevu, Bosna i Hercegovina

² BH Telecom, d.d. Sarajevo, Bosna i Hercegovina
am14618@etf.unsa.ba

Rad prihvaćen u februaru 2012. godine.

1. KRATAK OPIS RAZMATRANOG PRIMJERA

Na slici 1 dat je prikaz analiziranog sistema. Sistem se sastoji od dva metalna objekta (uzemljivač i cjevovod) koji su ukopani u tlo, vrlo blizu jedan drugom. Uzemljivač trafostanice sastavljen je od dvije međusobno povezane konture postavljene na dubini 0.7 m, ispod zone smrzavanja. Pretpostavljena struja kvara koja sa uzemljivača istječe u tlo iznosi 100 A. U neposrednoj blizini uzemljivača ukopan je cjevovod koji se nalazi na dubini 4.5 m od površine tla, a udaljen je 3.5 m od uzemljivača. Analizirani čelični cjevovod ima debljinu stijenke 1.5 cm i prečnik od 1 m. Zanemareno je postojanje sistema katodne zaštite.



Slika 1: Prikaz analiziranog sistema

Analize su provedene za jednoslojni i dvoslojni model tla. Prilikom analiza jednoslojnog modela tla razmatrane su situacije kada je specifični električni otpor tla $50 \Omega\text{m}$ i $500 \Omega\text{m}$. Za dvoslojni model tla odabran je primjer kada je površinski sloj tla do dubine 1 m i specifične električne otpornosti $50 \Omega\text{m}$. Ostatak predstavlja drugi sloj specifične električne otpornosti od $500 \Omega\text{m}$ i beskonačne dubine. Također je razmatran i obrnut slučaj kada je specifična električna otpornost gornjeg sloja (dubine 1 m) $500 \Omega\text{m}$ a donjeg $50 \Omega\text{m}$.

2. STRUJNO POLJE U OKOLINI UZEMLJIVAČA

Određivanje raspodjele struje i potencijala u uzemljivačkim sistemima svodi se na rješavanje Laplaceove jednačine uz korištenje adekvatnih graničnih uvjeta. Jednačina (1) izvodi se iz Maxwellovih jednačina:

$$\text{rot} \vec{E} = 0 \quad (1)$$

gdje je: $\vec{E}$ – vektor električnog polja.

Isto tako u stacionarnim strujnim poljima mora biti zadovoljen prvi Kirchhoffov zakon, koji se u diferencijalnom obliku daje kao:

$$\text{div} \vec{J} = 0 \quad (2)$$

$\vec{J}$ – vektor gustoće struje.

Analitička veza između električnog potencijala φ u nekoj tački i vektora jačine električnog polja $\vec{E}$ data je kao:

$$\vec{E} = -\nabla \varphi = -\text{grad} \varphi \quad (3)$$

U slučaju stacionarnog strujnog polja, proračun raspodjele gustoće struje i potencijala temelji se na pretpostavci da se na tok struje u zemlji može primjeniti Ohmov zakon, a potencijal i struja se raspodjeljuju tako da se ukupni omski gubici smanjuju i raspodjela se prilagođava graničnim uvjetima. Iz prethodnog slijedi da vektor gustoće struje u linearnim sredinama mora zadovoljiti poopćenu verziju Ohmovog zakona:

$$\vec{J} = \gamma \cdot \vec{E} = -\gamma \cdot \text{grad} \varphi \quad (4)$$

gdje je γ – specifična električna vodljivost.

Uvrštavanjem jednačine (4) u relaciju za prvi Kirchhoffov zakon u diferencijalnom obliku dobija se :

$$\text{div} \vec{J} = -\text{div}(\gamma \cdot \text{grad} \varphi) \quad (5)$$

Ako se primjeni standardni vektorski identitet:

$$\text{div}(\text{grad} \varphi) = \Delta \varphi \quad (6)$$

na jednačinu (5) dobija se Laplaceova parcijalna diferencijalna jednačina koja ima oblik:

$$\gamma \cdot \Delta \varphi = 0 \quad (7)$$

Raspodjela potencijala, pored toga što mora zadovoljiti Laplaceovu jednačinu u razmatranom mediju, mora zadovoljiti i granične uvjete koji su dati u nastavku.

2.1. Granični uvjeti

Laplaceova parcijalna diferencijalna jednačina ima beskonačno mnogo rješenja. Jedino rješenje Laplaceove parcijalne diferencijalne jednačine, koje odgovara razmatranom strujnom polju, dobije se pri uvažavanju odgovarajućih graničnih uvjeta. Granični uvjeti koji moraju biti zadovoljeni pri protjecanju struje sa uzemljivača su granice diskontinuiteta specifične električne vodljivosti tla [5]. Uz pretpostavku da se granica diskontinuiteta nalazi na granici između medija A i medija B, granični uvjeti se mogu pisati kao:

$$\vec{n} \times (\rho_B \vec{J}_B - \rho_A \vec{J}_A) = 0 \quad (8)$$

$$\vec{n} \cdot (\vec{J}_B - \vec{J}_A) = 0 \quad (9)$$

gdje su:

$\vec{n}$ – vektor normale na granice diskontinuiteta specifičnog električnog otpora,

$\vec{J}_A$ – gustoća struje u mediju A na granici diskontinuiteta specifičnog električnog otpora,

$\vec{J}_B$ – gustoća struje u mediju B na granici diskontinuiteta specifičnog električnog otpora,

ρ_A – specifični električni otpor medija A,

ρ_B – specifični električni otpor medija B.

Budući da se obližnji cjevovod ponaša kao pasivna elektroda na njemu se induciraju plivajući potencijali. Na granici između cjevovoda i medija u koji je cjevovod postavljen vlada granični uvjet:

$$\int_S \vec{n} \cdot (\vec{J}_D - \vec{J}_C) = 0 \quad (10)$$

gdje su:

$\vec{J}_C$ – gustoća struje u cjevovodu, na granici između cjevovoda i medija u kojem je postavljen cjevovod,

$\vec{J}_D$ – gustoća struje u mediju u kojem je postavljen cjevovod, na granici između cjevovoda i medija.

Poznavanje graničnih uvjeta omogućava matematičko rješavanje problema i određivanje potencijala na površini tla i na površini cjevovoda.

3. REZULTATI PRORAČUNA

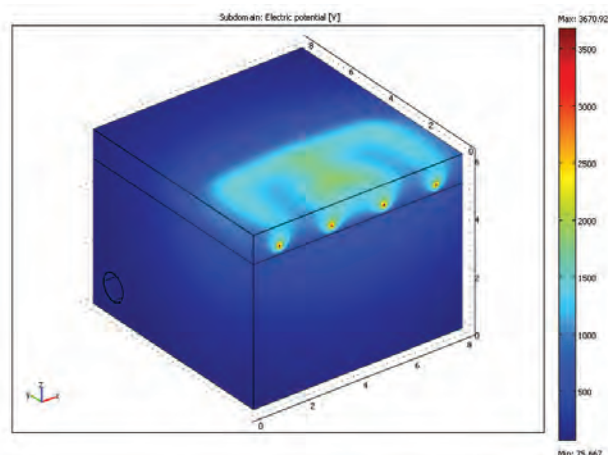
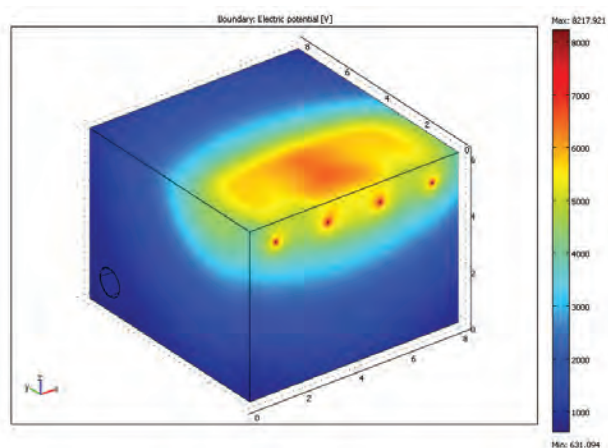
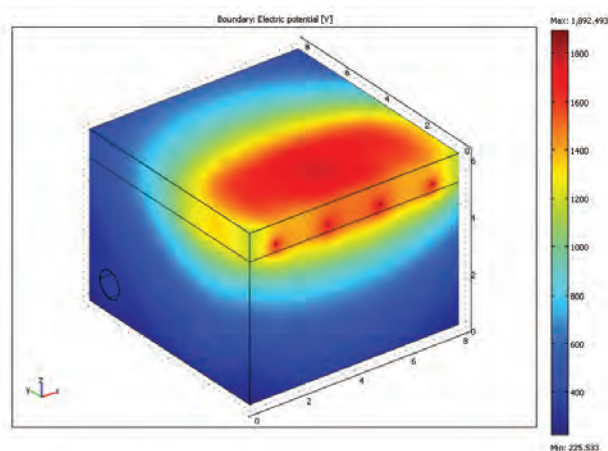
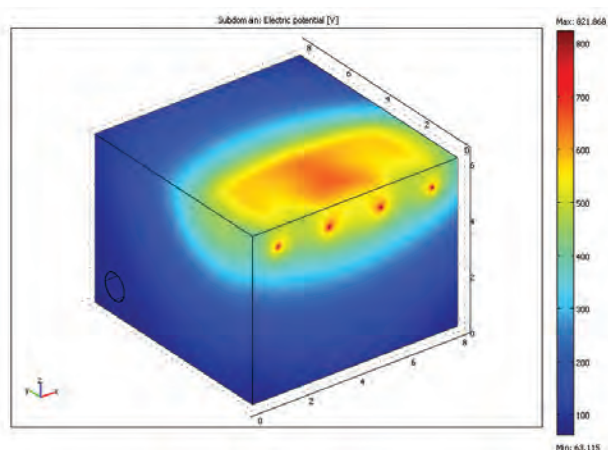
U nastavku rada su prezentirani rezultati proračuna za slučajeve jednoslojnog i dvoslojnog modela tla, dobiveni primjenom softverskog paketa COMSOL Multiphysics. Slika 2 prikazuje rezultate raspodjele polja u jednoslojnom tlu, za slučajeve specifične električne otpornosti 50 Ωm i 500 Ωm , respektivno. Na slici 3 su prikazani rezultati

raspodjele polja u dvoslojnom tlu specifične električne otpornosti gornjeg sloja tla 50 Ωm i donjeg 500 Ωm , kao i rezultati za obrnut slučaj. Primjeti se da je najviša vrijednost potencijala na površini zemlje na mjestu ukopavanja uzemljivača. Sa porastom rastojanja od uzemljivača vrijednost potencijala opada, kako po površini tla tako i po dubini. Na modeliranim primjerima može se uočiti da je najniži potencijal u slučaju jednoslojnog zemljišta sa malim specifičnim električnim otporom. Vrijednost potencijala se najviše mijenja (opada) sa promjenom udaljenosti od uzemljivača ako se radi o homogenom jednoslojnom tlu sa velikim specifičnim električnim otporom.

Dodatne promjene u raspodjeli potencijala nastaju zbog prisustva diskontinuiteta specifične električne otpornosti tj. zbog slojevitosti tla, kao i zbog prisustva čeličnog cjevovoda.

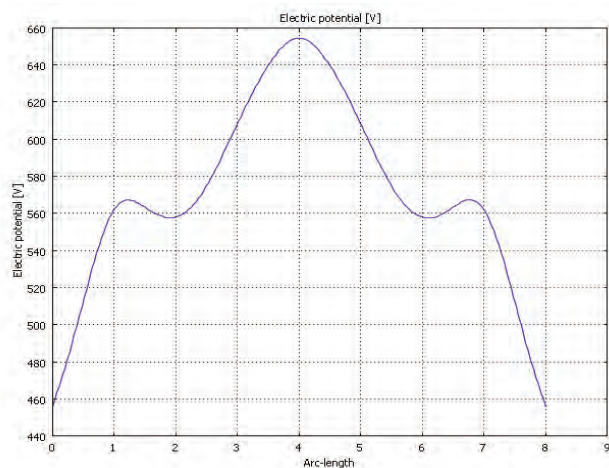
Na slikama 4 i 5 su dati prikazi promjene potencijala na površini tla ($y = 2 \text{ m}$, $z = 6 \text{ m}$, $0 \text{ m} \leq x \leq 8 \text{ m}$). Promjena potencijala se očituje u padu potencijala sa porastom udaljenosti od mjesta ukopavanja uzemljivača.

Prikazani oblici potencijalnih lijevka uzrokovani su činjenicom da struja koja izlazi iz uzemljivača nailazi na sve veći presjek tla tj. otpor postaje manji. Potencijali koji se dobiju na površini tla, u slučaju jednoslojnog modela tla sa

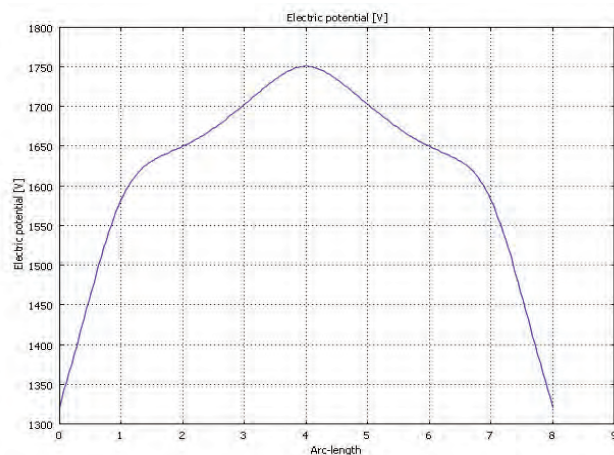


Slika 2: 3-D prikaz raspodjele strujnog polja u jednoslojnom tlu

Slika 3: 3-D prikaz raspodjele strujnog polja u dvoslojnom tlu



Slika 4: Potencijal na površini tla za jednoslojni model



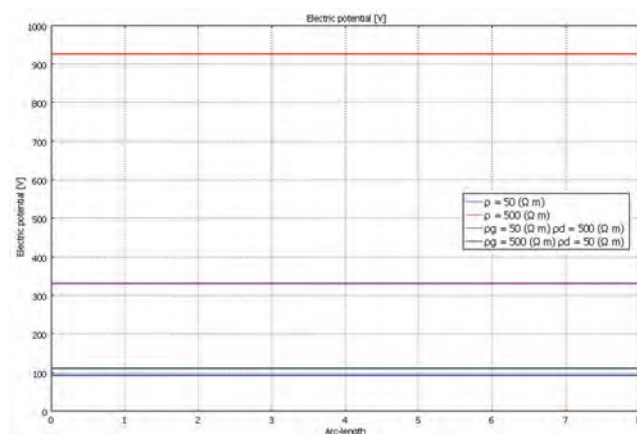
Slika 5: Potencijal na površini tla za dvoslojni model

malim specifičnim električnim otporom, su znatno niži u odnosu na ostale slučajeve. Promjena potencijala na površini tla, tj. potencijalna razlika koraka je u ovoj situaciji unutar standardima propisanih granica. Kod dvoslojnog modela tla gdje je uzemljivač ukopan u sloj tla sa malom specifičnom električnom otpornošću, potencijali koji se mogu javiti na površini tla unutar elektroenergetskog objekta su također u okviru dopuštenih granica. Visoke vrijednosti potencijala i potencijalnih razlika na površini tla nastaju u situacijama postavljanja uzemljivača u tlo sa velikim specifičnim električnim otporom. Tada je potrebno poduzeti mjere za sprečavanje visokih napona koraka i dodira na površini tla. Jedna od mjera jeste dodavanje punila, male specifične električne otpornosti, u području oko uzemljivača.

Slika 6 prikazuje promjene potencijala induciranog na cjevovodu, duž osi cjevovoda ($y = 7 \text{ m}$, $z = 1.5 \text{ m}$, $0 \text{ m} \leq x \leq 8 \text{ m}$). Razmatrani cjevovod ima mali električni otpor pa se unutar promatranog domena promjena potencijala duž njega može zanemariti. Zbog te činjenice cjevovod iznosi potencijal van trafostanice, što može dovesti do opasnih napona dodira i koraka izvan područja djelovanja uzemljivača. U ovoj situaciji, kao i u prethodnim razmatranjima, najboljim se pokazao jednoslojni model tla male specifične električne otpornosti, jer je

vrijednost induciranog potencijala na cjevovodu najniža. Kod dvoslojnog modela gdje je cjevovod ukopan u sloj tla sa malom specifičnom električnom otpornošću, također se inducira niska vrijednost potencijala na cjevovodu.

U situacijama kada se cjevovod nalazi u tlu velikog specifičnog električnog otpora na njemu se induciraju visoke vrijednosti potencijala, te je potrebno preduzeti dodatne mjere zaštite.



Slika 6: Dijagram potencijala duž cjevovoda

4. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada je bio da se pokaže da dosadašnji tzv. preliminarni načini računanja parametara uzemljivača, korištenjem empirijskih formula, gube svaki koristan smisao pred moćnim numeričkim metodama (npr. metoda konačnih elemenata). U radu je izvršen proračun raspodjele strujnog polja i iznošenja potencijala sa uzemljivača preko cjevovoda postavljenih unutar potencijalnog lijevka. Proračunom je pokazano da postavljanje čeličnih cjevovoda u blizini uzemljivača elektroenergetskih objekata može izazvati potencijale na cjevovodu opasne za osoblje koje dolazi u kontakt s njim. Osim toga ovo predstavlja i opasnost za tehnički integritet cjevovoda. Ako se u blizini cjevovoda generira visoki napon zbog dozemnog spoja, na cjevovodu može doći do propalijavanja stijenke i eventualno instaliranih izolirajućih prirubnica.

U radu su izvršene analize različitih primjera. Analizama se pokazalo da je jednoslojno tlo koje ima mali specifični električni otpor najpogodniji slučaj. U ovoj situaciji su najniže vrijednosti potencijala, razlika potencijala na površini tla i najniže vrijednosti induciranog potencijala na cjevovodu. Međutim ovo se veoma rijetko susreće u praksi. Najnepovoljnijim se pokazao model jednoslojnog tla sa velikim specifičnim električnim otporom. Neprilike koje se javljaju u ovom slučaju se mogu izbjeći postavljanjem uzemljivača u niskootporno punilo, što se može posmatrati kao dvoslojni model tla sa malim specifičnim električnim otporom gornjeg sloja. Tada se pojavljuju niži potencijali na površini tla, dok inducirani potencijal na cjevovodu ostaje visok. Kod dvoslojnog modela sa velikim specifičnim električnim otporom gornjeg sloja tla potencijal na cjevovodu je znatno snižen, ali potencijali i potencijalna razlika na površini tla imaju nedopušteno visoke vrijednosti. Kod oba dvoslojna modela tla, u ovisnosti o kojem je riječ, neophodno je izvršiti dodatne mjere zaštite od povišenih potencijala na cjevovodu ili previsokih napona dodira i koraka na površini tla.

LITERATURA

- [1] H. Požar: Visokonaponska rasklopna postrojenja, Tehnička knjiga Zagreb, 1973.
- [2] F. Majdančić: Uzemljivači i sustavi uzemljenja, Graphis, Zagreb, 2004.
- [3] A. Muharemović, V. Boras: Električne instalacije i mjere sigurnosti, Elektrotehnički fakultet Sarajevo, 2009.
- [4] F. Lattarulo: Electromagnetic compatibility in power system, Elsevier Series in Electromagnetism, Elsevier, 2007.
- [5] Z. Haznadar, Ž. Štih: Elektromagnetizam, Školska knjiga, Zagreb, 1997.

BIOGRAFIJA

Adnan Mujezinović je rođen 21.02.1987. u Sarajevu. Diplomirao je na Elektrotehničkom fakultetu u Sarajevu 2009. i na istom magistrirao 2011. godine. Područja profesionalne orijentacije su mu: katodna zaštita, uzemljivački sistemi, električna mjerenja, električne instalacije i mjere sigurnosti.

Alija Muharemović rođen je 1951. u Višegradu. Profesor je na Elektrotehničkom fakultetu u Sarajevu na predmetima Električna mjerenja i Elektroenergetski sistem i okolina. Diplomirao je 1974. na istom fakultetu. Magistarski rad Katodna zaštita u funkciji zaštite cjevovoda odbranio je 1981., a doktorsku disertaciju Doprinos analizi uticaja polarizacionih efekata u optimizaciji i dimenzionisanju sistema katodne zaštite 1989., obje na Elektrotehničkom fakultetu u Sarajevu.

Autor je više knjiga i radova iz oblasti katodne zaštite, kao i različitih projekata iz ove oblasti, kako u zemlji tako i u inozemstvu. U periodu 1991.-1996. obavljao je funkciju Pomoćnika ministra za energetiku u Vladi BiH. U tom ratnom razdoblju posebno težak problem bila je opskrba Sarajeva energijom, pa se njegov tadašnji angažman može istaći kao poseban doprinos u preživljavanju grada.

Aida Muharemović je rođena 29.06.1986. u Sarajevu. Diplomirala je na Elektrotehničkom fakultetu u Sarajevu 2009., a magistrirala na istom 2011. Trenutno je zaposlena u BH Telekomu. Područja profesionalne orijentacije su joj: elektromagnetska kompatibilnost, električna mjerenja, električne instalacije i mjere sigurnosti.