

STATIČKI ELEKTRICITET KAO UZROK PALJENJA EKSPLOZIVNIH ISPARENJA NAFTINIH DERIVATA

Milan Dobričić¹, Mirko Simijonović²

REZIME

Godine 2013. Međunarodna elektrotehnička komisija objavila je tehnički izvještaj pod nazivom IEC/TS 60079-32-1: *Explosive atmospheres - Part 32-1: Electrostatic hazards - Guidance*. Ovaj članak pruža pregled osnova elektrostatičke i upućuje na vredan dokument sobzirom na statički elektricitet kao potencijalni uzrok paljenja eksplozivne atmosfere koja nastaje prilikom punjenja, pražnjenja i čuvanja naftnih derivata kroz specifičan primer postolja za goriva u motorna vozila. Dodatno se uvodnom delu članka navode ključni izrazi, formule i parametri c na temelju kojih su određene mere zaštite sprečavanja paljenja eksplozivnih atmosfera.

Ključne reči: statički elektricitet, generisanje, akumulacija, elektrostatičko pražnjenje, kapacitet, provodni, disipativan, uzemljenje, otpornost uzemljenja, izjednačenje potencijala, pretakanje, istakanje, eksplozivna atmosfera, minimalna energija paljenja.

STATIC ELECTRICITY AS A CAUSE OF IGNITION OF EXPLOSIVE FUMES OF OIL DERIVATIVES

SUMMARY

In 2013 the International Electrotechnical Commission has published Technical Specification called IEC/TS 60079-32-1: "Explosive atmospheres - Part 32-1: Electrostatic hazards - Guidance. This article provides an overview of electrostatic basics and the guidance document regarding ignition risks from static electricity during filling, loading and storage of oil derivatives through the specific example of oil filling stations. In addition, an introductory part of the article lays down key physical expressions, formulas and parameters used to determine measures to prevent hazard ignitions.

Keywords: Static electricity, charging, accumulation, electrostatic discharge, capacitance, conductive, dissipative, earthing, earthing resistance, loading, filling, explosive atmosphere, minimum ignition energy.

¹1.UVOD

Statički je elektricitet teško predvidiv i teško se detektuje pa je stoga jedan od "podmuklijih" uzroka požara i eksplozija. Ubrzanje proizvodnih procesa i

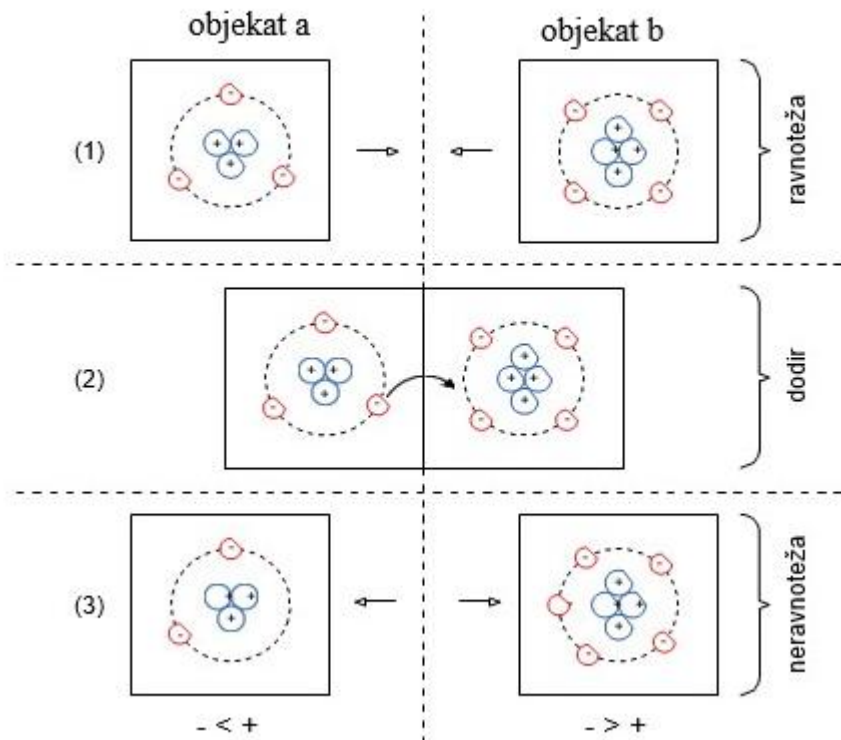
¹ Gorenje D.O.O. Beograd Cara Dušana 10a, 11000 Beograd

primena novih materijala u današnjoj industriji, postrojenjima i objektima za posledicu imaju povećanje učestalosti požara i eksplozija izazvanih statičkim elektricitetom. Posebnu pažnju treba posvetiti pojavi statičkog elektriciteta u prostorima i procesima gde je moguća pojava eksplozivne atmosfere (Ex-prostori) jer i relativno vrlo mala, ljudima nevidljiva i ne osetljiva elektrostatička pražnjenja imaju dovoljnu energiju da prouzokuju eksploziju. Ovaj članak obrađuje opasnosti vezane uz pojavu statičkog elektriciteta pri manipulaciji opremom i naftnim derivatima, tj. tečnim ugljovodonicima na primeru postojnja tečnih goriva (naftni gas, benzin, dizel). Veliki broj različite opreme, radnji i procesa različite prirode i trajanja na navedenim objektima, te posebno činjenica da su benzinske stanice samouslužne i javne (posećuje ih veliki broj ljudi i motornih vozila), upozoravaju na potrebu povećanog opreza i primenu odgovarajućih mera zaštite. Uvodni deo članka opisuje fizičke osnove statičkog elektriciteta te pojavu statičkog elektriciteta kao potencijalnog uzroka paljenja u korelaciji s eksplozivnom atmosferom tečnih ugljovodnika.

2. STATIČKI ELEKTRICITET KAO UZROK PALJENJA

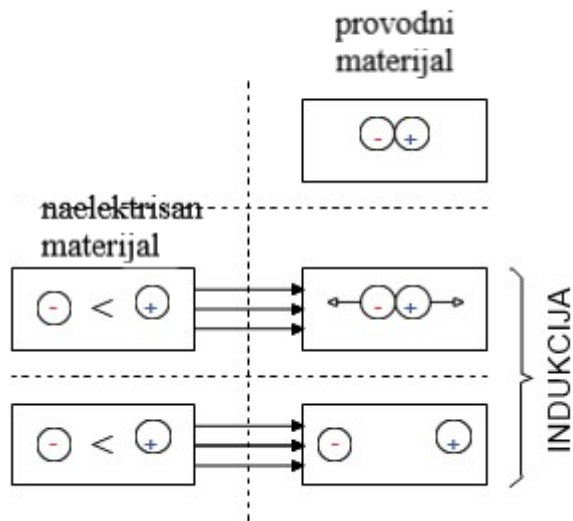
2.1. Generisanje elektrostatičkog naelektrisanja

Većina materijala električno je neutralna, tj. ima jednak broj pozitivnih negativnih naelektrisanja u atomima od kojih su izgrađeni (pozicija (1) - slika 1.), međutim u određenim uslovima elektron se može odvojiti od atoma. Pri dodiru, tj. kontaktu dva prethodno elektrostatički neutralnih objekata izrađenih od različitih materijala od kojih jedan ima tendenciju otpuštanja elektrona, a drugi tendenciju prihvatanja elektrona, dolazi do prelaza elektrona s jednog tela na drugo (pozicija (2) - slika 1.). Nakon razdvajanja objekata, površina jednog imaće manjak elektrona u odnosu na stanje ravnoteže, tj. višak pozitivnog naelektrisanja, a površina drugog imaće višak elektrona u odnosu na stanje ravnoteže, tj. višak negativnog naelektrisanja (pozicija (3) - slika 1.). Opisana pojava naziva se elektrostatičko generisanje elektrostatičkog naelektrisanja, a nastalo stanje neravnoteže naelektrisanja na objektu naziva se STATIČKI ELEKTRICITET. Stepenu elektrostatičkog naelektrisanja dodirnom zavisi od vrste, površini i trajanju sudara, brzini razdvajanja, vrsti materijala te uslovima okoline. Ako neutralni objekat dođe u dodir s naelektrisanim, deo viška naelektrisanja sa naelektrisanog prelazi na neutralni objekat. Navedena pojava naziva se KONDUKCIJA.



Slika 1. Grafički prikaz pojave elektrostatickog naelektrisanja

Poznato je da svako naelektrisanje stvara električno polje koje može uticati na objekte u okolini te da se istoimena naelektrisanja odbijaju (-/-), a raznoimena privlače (-/+), prema Kulonovu zakonu. Navedene pojave poruzrokuju da se naelektrisanja objekata od elektroprovodnog materijala, kad se nađu u električnom polju drugog naelektrisanog objekta, preraspodele, tj. razdvoje unutar objekta (slika 2.). Navedena pojava polarizacije naelektrisanja u provodnom materijalu pod uticajem spoljašnjeg električnog polja naziva se ELEKTROSTATIČKA INDUKCIJA



Slika 2. Grafički prikaz pojave elektrostatičke indukcije

Dakle, do pojave statičkog elektriciteta dolazi:

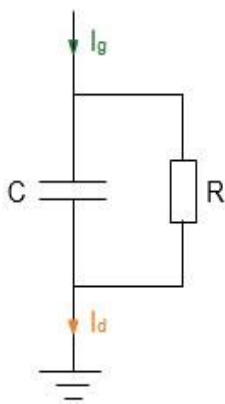
- dodirom
- delovanjem spoljašnjeg električnog polja indukcijom.

Osim navedenih mehanizama generisanje elektrostatičkog naelektrisanja u objektima, postoje i neki drugi, međutim nisu relevantni za objekte, procese i radnje koje ovaj članak razmatra.

2.2. Akumulisanje elektrostatičkog naelektrisanja

Ako postoji mehanizam generisanje elektrostatičkog naelektrisanja, posledica je da dolazi ili do akumulisanja naelektrisanja ili do disipacije/relaksacije naelektrisanja, zavisno od električne provodnostisti materijala objekta/tečnosti i povezanosti objekta/tečnosti sa zemljom.

Akumulacija naelektrisanja na objektima događa se isključivo na slaboprovodnim ili neprovodnim površinama (npr. plastika) ili metalnim objektima koji su izolovani od zemlje. Proces akumulacije naelektrisanja na nekom objektu može se uopšteno opisati pomoću ekvivalentnog strujnog kruga prikazanog na slici 3.



Slika 3. Prikaz ekvivalentnog strujnog kruga akumulacije i disipacije naelektrisanja

Izraz kojim se računa elektrostatički potencijal objekta koji se naelektriše prema slici 3. glasi:

$$V = I_g \times R \times [1 - \exp (- t / R \times C)] \quad (1)$$

gde su:

V - električni potencijal objekta (V)

I_g - struja generisanja (A)

I_d - struja disipacije (A)

R - otpornost disipacije naelektrisanja, tj. Otpornost prema zemlji (Ω)

C - kapacitet objekta (F)

t - vreme procesa generisanja (s).

Iz izraza (1) vidljivo je da se maksimalni potencijal na objektu - $V_{max} = I_g \times R$ postiže nakon dovoljnog protoka vremena generisanja (vrednost t velika).

Analizirajući sliku 3., dolazi se do zaključaka:

$I_g = 0 \rightarrow$ nema generisanja naelektrisanja

$I_d = 0 (R \gg \infty) \rightarrow$ nema disipacije naelektrisanja

$I_g = I_d (R \ll \infty) \rightarrow$ ima generisanja, nema akumulacije naelektrisanja

$I_g > I_d \rightarrow$ ima generisanja i akumulacije naelektrisanja.

$R \times C$ iz izraza (1) predstavlja vreme potrebno za disipaciju naelektrisanja objekta (pod pretpostavkom da više nema generisanja naelektrisanja).

Primer izračunavanja vremena disipacije ljudskog tela prema izrazu (1):

$C = 100 - 200 \text{ pF}$ prema (1)

$R =$ maks. dopušteno 108Ω u Ex-prostoru (otpornostobuće i poda prema zemlji) (1)

$R \times C = 0,02-0,04$ sekunde

Dakle, akumulacija elektrostatickog naelektrisanja na nekom objektu bitno zavisi od kapaciteta objekta i elektroprovodnosti fizičke veze objekta sa zemljom.

Akumulacije naelektrisanja u tečnostima zavisi od odnosa mere generisanja i relaksacije naelektrisanja koja se odvija po eksponencijalnom zakonu:

$$Q_t = Q_0 \exp(-t/\tau) \quad (2)$$

T je vreme relaksacije naelektrisanja za koje je:

$$\tau = \epsilon_r \times \epsilon_0 / \gamma$$

Gde su:

Q_t - preostala količina naelektrisanja nakon određenog vremena (C)

Q_0 - početni generisani naelektrisanja (C)

τ - vreme relaksacije naelektrisanja (s)

ϵ_r - relativna permeabilnost tečnosti

ϵ_0 - relativna permeabilnost vakuuma ($8,85 \times 10^{12} \text{ F/m}$)

γ - elektroprovodnost vode (S/m).

Iz eksponencijalnog zakona: količina akumuliranog naelektrisanja u tečnosti nakon isteka vremena τ (pod uslovom da više nema generisanjanja) spustiće se na 37% početne vrednosti, dok će nakon isteka $0,7 \tau$ pasti na 50% početne vrednosti.

Iz izraza (2) vidljivo je da je vreme potrebno za relaksaciju naelektrisanja elektrostatički naelektrisane tečnosti obrnuto proporcionalno električnoj provodnosti tečnosti.

Primer proračuna vremena relaksacije naelektrisanja dizel goriva (2):

$$\epsilon r = 2 \text{ (oko 2 je za sve tečne ugljikovodike)}$$

$$\epsilon o = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$\gamma = 25 \text{ pS/m}$$

$$\tau = 0,7 \text{ s}$$

Stepen do kojeg će se generisati elektrostatičko naelektrisanje u tečnim ugljovodonicima zavisi uglavnom od brzine protoka u cevovodu i materijala cevi i kontaktne površine dok tendencija akumulacije naelektrisanja u tečnim ugljovodonicima zavisi o električne provodnosti tečnosti, vreme relaksacije generisanog naelektrisanja u tečnosti relativna propusljivost tečnosti.

Tečni ugljovodnici se iz tog razloga dele prema parametru provodnosti kako prikazuje tabela 1.

Tabela 1. Podela tečnih ugljovodnika prema provodnosti

| Podela tečnih ugljovodnika | γ | τ |
|---|--------------|-----------------|
| Visokoprovodni (npr. benzin s 10% etanola) | > 10000 pS/m | < 0,0017 s |
| Srednje provodni (npr. benzin s aditivima ili 5% etanola) | > 10000 pS/m | 0,0017 - 0,35 s |
| Slabo provodni (npr. benzin, dizel, kerozin) | < 50 pS/m | > 0,35 s |

Jednostavno je zaključiti da su slabo provodne tečnosti najsklonije akumulaciji elektrostatičkog naelektrisanja.

2.3. Pražnjenje statičkog naelektrisanja

Prenos akumulisanog električnog naelektrisanja između objekata različitog električnog potencijala naziva se elektrostatičko pražnjenje.

Više je vrsta elektrostatičkog pražnjenja, međutim za ovaj članak relevantne su dve koje su i u praksi daleko najčešće:

- ELEKTROSTATIČKA VARNICA (eng. *spark*)

- ČETKASTA PRAŽNENJA (eng. *brushdischarge*)

Pražnjenja između provodnih objekata (tečnosti) od kojih je jedan uzemljen, naziva se elektrostatička varnica. Nastaje kada je snaga električnog polja između provodnih objekata premaši dielektričnu čvrstoću vazduha između njih (3 MV/m pri normalnim atmosferskim uslovima), što dovodi do jonizacije vazduha. Tada prostor između takvih objekata nastaje provodnik pa dolazi do toka naelektrisanja, tj. struje. energija takvog pražnjenja računa se prema izrazu:

$$W = 0,5 \times Q \times V = 0,5 \times C \times V^2 \quad (3)$$

Gde su:

W = energija pražnjenja (J)

Q = količina naelektrisanja koji se prenosi (C)

V = električni potencijal objekta (V)

C = kapacitet objekta (F).

Promoću elektrostatičke varnice dolazi do pražnjenja kompletne akumulacije elektrostatičke energije te se električni potencijal objekta izjednači sa potencijalom zemlje u vrlo kratkom vremenu.

Primer izračunavanja energije elektrostatičke varnice ljudskog tela prema izrazu (3):

$$C = 100 - 200 \text{ pF}$$

$$V = 1 - 20 \text{ kV}$$

$$W = 0,1 - 40 \text{ mJ}$$

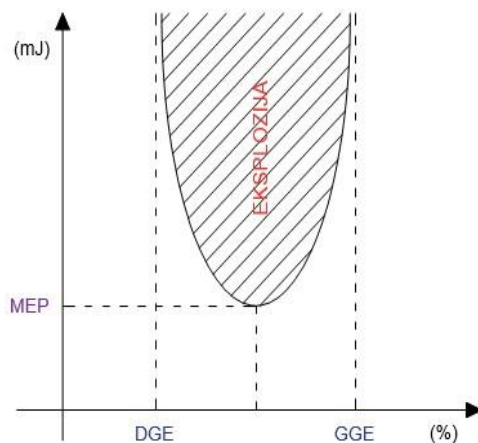
Četkasto pražnjenje je prenos naelektrisanja, tj. prenos energije sa elektrostatički naelektrisanog neprovodnog objekta (npr. plastične površine ili slabo provodne tečnosti) na uzemljeni provodnik te se prenos sprovodi kroz više kanala kroz vazduh, stoga i naziv četkasto.

Za razliku od varnice, prazni se samo deo elektrostatičke energije. Energija pražnjenja zavisi od niza činjenica (npr. površina neprovodnog objekta). Prema [1] eksperimentalno je potvrđeno paljenje eksplozivne atmosfere pojedinih zapaljivih tečnosti u određenim uslovima s energijom $W = 3,6$ mJ, teorijski maksimum četkastog izbijanja iznosi $W = 4$ mJ. No, kod ove vrste izbijanja nije važna samo količina energije nego i polaritet naelektrisanog objekta, maksimalna vrednost struje pražnjenja, oblik krive struje pražnjenja količina prenesenog naelektrisanja pri pražnjenju.

2.4. Elektrostatičko paljenje eksplozivne atmosfere zapaljivih tečnosti

Ako u nekom prostoru postoji zapaljiva tečnost iako se stvore povoljni uslovi za isparavanje te tečnosti, mešanjem para u određenom prostoru (između donje granice eksplozivnosti i gornje granice eksplozivnosti) sa vazduhom, nastaje eksplozivna atmosfera. Ako istovremeno s postojanjem takve eksplozivne atmosfere dođe do elektrostatičkog pražnjenja, može se zapaliti eksplozivna atmosfera, tj. dogoditi eksplozija, zavisno od količine energije oslobođene prilikom pražnjenja. Dakle, da bi se navedeno paljenje dogodilo, trebaju istovremeno biti zadovoljena sledeća dva uslova (slika4.):

- Dovoljna koncentracija para zapaljive tečnosti u vazduhu (između donje granice eksplozivnosti - DGE i gornje granice eksplozivnosti - GGE)
- Elektrostatičko pražnjenje dovoljne energije ($W >$ minimalne energije paljenja - MEP)



Slika 4. Prikaz tipičnog odnosa koncentracije para zapaljivih tečnosti u vazduhu i elektrostatičke energije paljenja

Potrebno je napomenuti da zapaljivost tečnih goriva zavisi od količine kiseonika u vazduhu.

Opšte se navodi u [1] da pri normalnim atmosferskim uslovima (koncentraciji kiseonika u vazduh manje od 21%, i temperaturi vazduha -20/60°C i atmosferskom pritisku 0,8-1,1 bar) raspon DGE-GGE koncentracije para zapaljivih tečnosti iznosi 1-15%. Kako se vidi na slici 4., donji ekstrem krive koji predstavlja najpovoljniju koncentraciju zapaljivih tečnosti za koju je potrebna minimalna energija paljenja nalazi otprilike u sredini između vrednosti DGE i GGE. U tabeli 2. navedene su pojedine vrednosti parametara zapaljivosti pojedinih tečnih goriva, međutim potrebno je naglasiti da u literaturi postoje odstupanja navedenih parametara zbog različitih uslova i metoda ispitivanja te različite čistoće ispitivanih uzoraka goriva. Stoga smisao tablice nije navesti granične vrednosti kojih se treba fiksno pridržavati, već prikazati odnos nužnih preduslova paljenja eksplozivne atmosfere.

Tabela 2. Parametri zapaljivosti pojedinih tečnih goriva

| Gorivo | Ognjište | DGE-GGE | MER |
|--------------|------------|-----------------------|--------------------|
| Benzin | -20 °C | 1,4-7,6% | 0,24 mJ |
| Dizel | > 55 °C | 0,6-7,5% | 20 mJ |
| Propan Butan | (gas)-20°C | 2,1- 10,1% 1,68,4% | 0,25 mJ 0,25 mJ |

U daljnjem tekstu bit će navedeni konkretni mehanizmi generisanjanja elektrostatskog naelektrisanja prilikom pretakanja goriva, što će upozoriti na realnu opasnost elektrostatičkog pražnjenja u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom.

3. MERE ZAŠTITE OD STATIČKOG ELEKTRICITETA

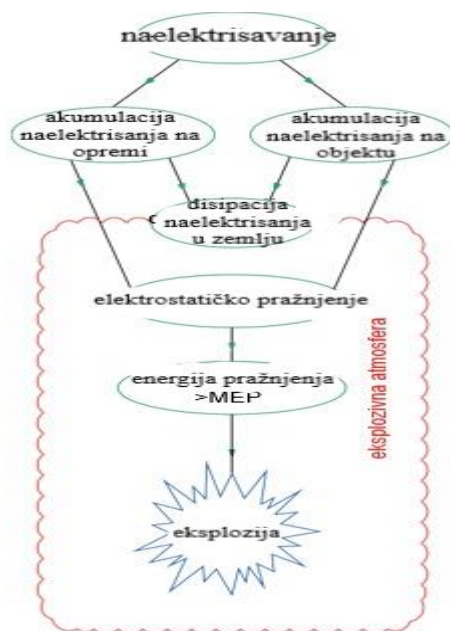
Ako se ne može sprečiti nastanak eksplozivne atmosfere u nekom prostoru, potrebno je onemogućiti da pojava statičkog elektriciteta u tom prostoru bude potencijalni uzrok paljenja u obliku elektrostatičkog pražnjenja. Slika 5. prikazuje proces paljenja eksplozivne atmosfere elektrostatičkim pražnjenjem.

S obzirom na to da je pojave i mehanizme vezane uz statički elektricitet gotovo nemoguće potpuno anulirati, potrebno ih je kontrolisati tako da količina

naelektrisanja, tj. energije koja se pojavljuje ne bude dovoljna da izazove paljenje (iznos energije potrebne za paljenje ispod MEP-a na slici 4.). Kontrola se postiže na jedan od sljedećih načina:

- uticati na smanjenje generisanja neelektrisanja (npr. smanjenjem procesnih brzina ili brzina protoka medija)

- uticati na smanjenje akumulacije naelektrisanja, tj. postići dovoljnu disipaciju/relaksaciju naelektrisanja (npr. upotrebom odgovarajućih materijala, dodavanjem aditiva medijima i materijalima te uzemljenjem i izjednačenjem potencijala)



Slika 5. Proces elektrostatičkog paljenja eksplozivne atmosfere

Osnovna mera zaštite kod procesa i radnji gde se ne može izbeći generisanje elektrostatičkog naelektrisanja jeste UZEMLJENJE i IZJEDNAČENJE POTENCIJALA. Na taj se način višak naelektrisanja neutralizuje, tj. osigurava se da mera disipacije naelektrisanja na nekom objektu/tečnosti prevlada meru generisanja naelektrisanja te tako ne može doći do

akumulisanja dovoljne količine naelektrisanja, tj. elektrostatičkog potencijala koji može prouzrokovati paljenje eksplozivne atmosfere.

Smatra se da tipične radnje i procesi na industrijskim postrojenjima i objektima uobičajeno generišu potencijale u rasponu 300-1000 V (prema [1]). Uzimajući u obzir navedeni raspon, za dogovorno određeni dopušteni potencijal do 100 V (prema [1]) smatra se da je osigurana dovoljna disipacija elektrostatičkog naelektrisanja većine procesa i radnji. Iz navedene sigurnosne granice proizlazi izraz za meru uzemljenosti nekog objekta kao mere zaštite od statičkog elektriciteta:

$$R = 100/I \quad (4)$$

Gde su:

R – ukupni otpornost uzemljenja objekta (Ω)

100 – dogovorno maksimalno dopušteni električni potencijal objekta kao mera sigurne disipacije elektrostatičkog naelektrisanja (V)

I – struja naelektrisanja (A)

Da bi se iz (4) odredio otpornost uzemljenja kojim će se postići da generisati električni potencijal na nekom objektu ne pređe iznos od 100 V, potrebno je znati struje generisanja u nekom procesu. S obzirom na to da struje koja generiše naelektrisanja iznosi 10 pA - 100 μ A (prema[1]),iz izraza (4) proizilaze gornje dopuštene vrednosti otpora uzemljenja 1 M Ω - 10 T Ω , što znači da je granična vrednost od 1 M Ω garancija osigurne disipacije za većinu procesa.

Tabela 3. Klasifikacija čvrstih predmeta

| Predmet | Jedinica | Provodni | Disipativan | Izolator |
|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---|----------------------------|
| Kruti materijal | Zapeminska otpornost (Ωm) | $< 100 \text{ k}\Omega m$ | $100 \text{ k}\Omega m \leftrightarrow 1 \text{ G}\Omega m$ | $\geq 1 \text{ G}\Omega m$ |
| Kućiče | Površinski otpornost (Ω) | $< 10 \text{ k}\Omega$ | $10 \text{ k}\Omega \leftrightarrow 100 \text{ G}\Omega m$ | $\geq 100 \text{ G}\Omega$ |
| | Površinska otpornost (Ω) | $< 100 \text{ k}\Omega$ | $100 \text{ k}\Omega \leftrightarrow 1 \text{ T}\Omega$ | $\geq 1 \text{ T}\Omega$ |
| Odeća | Površinska otpornost (Ω) | / | $< 2,5 \text{ G}\Omega$ | $\geq 2,5 \text{ G}\Omega$ |
| Obuća | Otpornost disipacije (Ω) | $< 100 \text{ k}\Omega$ | $100 \text{ k}\Omega \leftrightarrow 100 \text{ M}\Omega$ | $\geq 100 \text{ M}\Omega$ |
| Rukavice | Otpornost disipacije (Ω) | $< 100 \text{ k}\Omega$ | $100 \text{ k}\Omega \leftrightarrow 100 \text{ M}\Omega$ | $\geq 100 \text{ M}\Omega$ |
| Pod | Otpornost disipacije (Ω) | $< 100 \text{ k}\Omega$ | $100 \text{ k}\Omega \leftrightarrow 100 \text{ M}\Omega$ | $\geq 100 \text{ M}\Omega$ |
| Cevi | Otpornost po dužini (Ω/m) | $< 1 \text{ k}\Omega/m$ | $1 \text{ k}\Omega/m \leftrightarrow 1 \text{ M}\Omega/m$ | $\geq 1 \text{ M}\Omega/m$ |
| Fleksibilna cev sa priključcima | Otpornost spoja (Ω) | $< 1 \text{ k}\Omega$ | $1 \text{ k}\Omega \leftrightarrow 1 \text{ M}\Omega$ | $\geq 1 \text{ M}\Omega$ |

Dodatno se smatra da većina procesa ne generiše struju veću od $1 \mu\text{A}$ (prema [1]), a kapacitet izolovanih provodnih objekata retko ko prelazi 100 pF te se opšte smatra da je otporu zemlje na od $100 \text{ M}\Omega$ adekvatan, što predstavlja ublaženje u odnosu na $1 \text{ M}\Omega$. Ako struje generisanja naelektrisanja pojedinih procesa zbog prirode mehanizama generisanja naelektrisanja ili specifičnih okolnosti bitno odstupaju od navedenih, potrebno je sprovesti dodatne analize i primeniti dodatne mere zaštite. U nekim slučajevima moguća i smanjenja zahtevanih graničnih otpornosti uzemljenja (npr. 10Ω kod uzemljenja metalnih struktura, što će biti obrađeno posle u radu).

Proces i pri manipulaciji ugljovodonicima koji su ugroženi pojavom statičkog elektriciteta upravo su oni u kojima učestvuju ljudi, a to su :

- punjenje/praznjenje malih boca tečnog naftnog gasa
- punjenje malih i srednjih plastičnih rezervoara
- transfer ugljovodonika iz automobila / auto-cisterni u nadzemne/podzemne rezervoare.
- punjenje ugljovodonika, tj. goriva u rezervoare motornih vozila.

Specifičnosti ljudi vezano za statički elektricitet su:

- ljudsko telo se uopšte smatra provodnikom
- ljudi su uobičajeno izolovani od zemlje (priroda materijala obuće)
- mobilni su
- izvode veliki broj radnji različite prirode
- nose različite vrste materijala na telu (odjeća, obuća)
- u kontaktu su sa raznim objektima i materijalima.

Tabela 3. prikazuje klasifikaciju krutih predmeta prema raznim vrstama otpora i otpornosti - na provodne, disipativne i izolatore ili provodnike [1].

Mehanizmi generisanja elektrostatičkog naelektrisanja na ljudima su:

- kretanje po podlozi
- interakcija sa decom
- interakcija odeće na ljudima s objektima (npr. stolica)
- skidanje odeće
- rukovanje neprovodnim objektima/materijalima
- interakcija s neprovodnim predmetima
- stajanje u blizini elektrostatički visoko naelektrisanih predmeta (npr. rotirajući neprovodni remen) → indukcija.
- smatra se uopšteno da se ljudi mogu elektrostatički naelektrisati na potencijal do $20kV$
- prosečni kapacitet ljudskog tijela iznosi oko $150pF$
- iz izraza (c) sledi maksimalna akumulisana energija $30mJ$
- s obzirom na visoku omsku otpornost ljudske kože, $2/3$ akumulisane energije se smanjuju.

Uzemljenje ljudi u Ex-prostoru uglavnom se postiže postavljanjem disipativne podne podloge u kombinaciji s nošenjem disipativne obuće. Beton se uopšte smatra disipativnom podlogom (otpornostdisipacije $< 100 M\Omega$).

S obzirom na to da su proces punjenja rezervoara za gorivo motornog vozila benzinom na maloprodajnim stanicama, kao i okolnosti punjenja specifični, poslužiće kao ilustrovani primer pojednostavljene analize i mera zaštite:

- podloga na kojoj stoji automobil tokom točenja goriva je beton
(disipativna podloga)

- automobilske gume mogu se smatrati disipativnim



1. AUTO UZEMLJEN

- pištolj za točenje goriva s fleksibilnom crevom čini
provodni ili disipativano kolo

- uređaj za točenje goriva je uzemljen



2. PIŠTOLJ UZEMLJEN

- vozač hvata ručicu vrata automobila

- vozač hvata pištolj



3. ELEKTROSTATIČKO PRAŽNENJE VOZAČA NEMA EX-ATMOSFERE

- vozač stavlja pištolj u otvor za punjenje rezervoara automobila i pokreće punjenje

- vozač pušta pištolj



4. EX-ATMOSFERA OKO OTVORA VOZAČ IZOLOVAN

- vozač se elektrostatički naelektriše dok traje punjenje (npr. sjedanjem u sjedalo
automobila ili kretanjem)

- vozač uzima pištolj nakon završetka punjenja



5. EX-ATMOSFERA OKO OTVORA ELEKTROSTATIČKOG PRAŽNENJE VOZAČA

| |
|-----------------------------|
| - energija pražnjenja > MEP |
|-----------------------------|

| |
|---|
| - odgovarajuća koncentracija benzinske pare u vazduhu |
|---|

4. PALJENJA EKSPLOZIVNE SMEŠE

Pri punjenju rezervoara automobila ne može se sprečiti pojava eksplozivne atmosfere te je potrebno spriječiti elektrostatičko pražnjenje dovoljne energije. Mere zaštite uzemljenjem do 3. koraka sprovedene su potpuno (uz pretpostavke navedene u tablici), međutim opasnost se krije između 4. i 5. koraka kad vozač može predstavljati izolovani vodič. Ako se istovremeno dogodi da je relativna vlažnost vazduha niska, dakle disipacija naelektrisanja vazduha niska (što je karakteristično za zimski period) te vozač sedne u automobil i prilikom interakcije odeće s materijalom sedišta elektrostatički se dovoljno naelektriše (prema [5] se navodi do 19 kV), može doći do pojave elektroističke varnice te zavisno o koncentraciji pare benzina u vazduhu oko otvora za punjenje, posledično može nastati eksplozija s katastrofalnim posledicama (slika5.).

O ozbiljnosti opisane potencijalne opasnosti govori niz incidenata zbog čega se u nekim zemljama na vidljivim mjestima oko uređaja za točenje postavlja pisano upozorenje otprilike sljedećeg sadržaja:

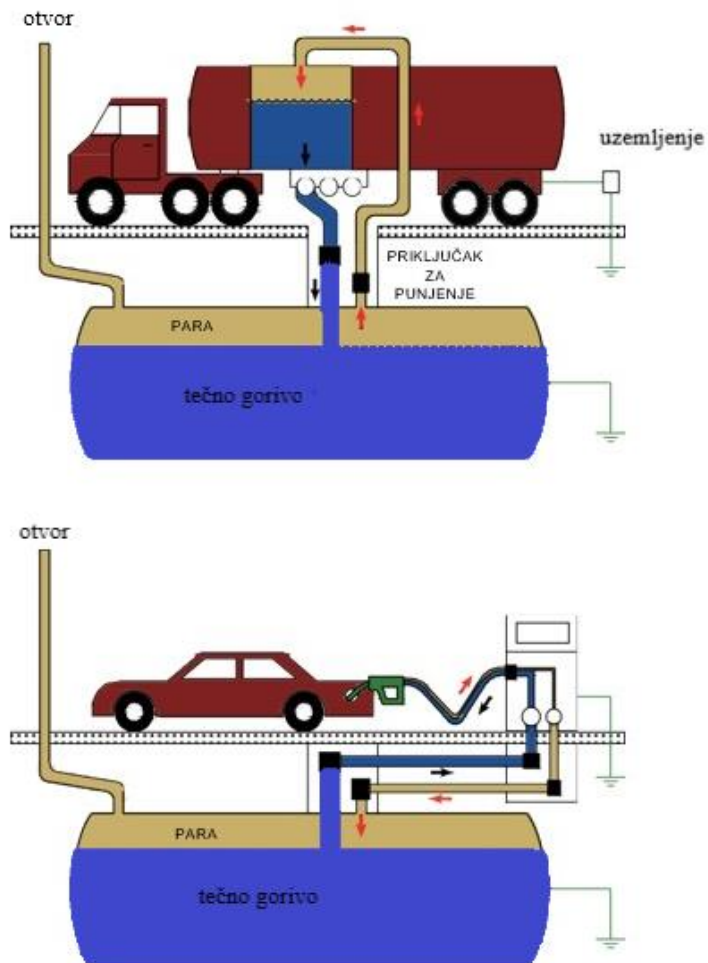
Molimo izbegavajte prilikom točenja goriva sedeti u motornim vozilima zbog opasnosti od statičkog elektriciteta. Ako ne možete izbeći sedanje u automobilima, molimo da pre završetka točenja ne dodirujete metalne delove automobila.



Slika 6. Eksplozija automobila prilikom točenja benzina [7]

Pojedini proizvođači automobila za izradu sedišta razmatraju primenu tkanina s disipativnim svojstvima, a moguća je i primena anti statičkih sprejeva za tkaninu auto sedišta. Iako je broj eksplozija/paljenja pri punjenju automobila gorivom na stanicama vrlo mali u odnosu na učestalost procesa na mnogobrojnim stanicama, navedeni odnos ne treba biti posmatran statistički jer je posledica opasnost za ljudske živote. Uzemljenje u pojedinim specifičnim slučajevima, pogotovo ovde gde su ljudi deo procesa, nije uvijek dovoljna zaštitna mjera. Iz navedene analize proizlazi važnost primene ljudskog faktora u jednačini zaštite od negativnog uticaja statičkog elektriciteta u Ex- prostorima. Od velike je važnosti podizanje svesti i tehničko-tehnološke discipline kroz usmeravanje pažnje, upozorenja i edukaciju ljudi.

Tečni ugljovodonici dovoze se cisternama na stanice za točenje, iz njih se gravitacijski uz pomoć fleksibilnih cevi i fiksnih cevovoda presipaju u rezervoare. Iz rezervoara se kroz fiksne cevovode preko fleksibilnih cijevi uz pomoć pumpi u spoju sa uređajima za točenje presipaju u motorna vozila ili male rezervoare. Tehnološki prikaz procesa na stanici prikazuje slika 6.

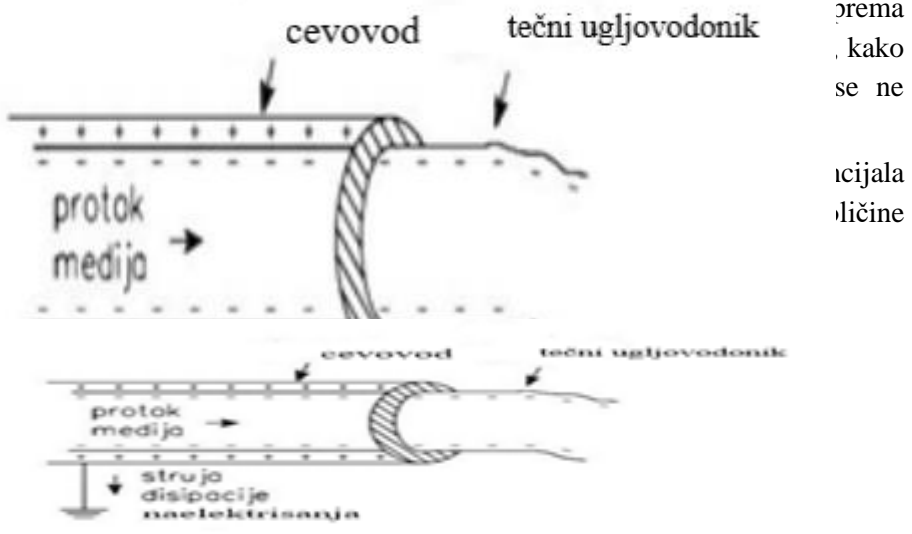


Slika 7. Tehnološki prikaz točenja goriva na stanicama

Eksplozivna atmosfera benzinskih para (kao ugljovodonik sa najnepovoljnijim značajem po fazama) u gornjim primerima je:

- a) cisterna
 - oko priključka na cisterni
 - oko fiksnih priključaka cevovoda
 - oko oduška rezervoara i auto cisterne
- b) automobile

- oko otvora za punjenje rezervoara automobila
- u kućištu uređaja za točenje
- oko fiksnih priključaka cevovoda



prema
kako
se ne
cijala
ličine

Slika 8. Prolaz kroz cev slabo provodne tečnosti

Danas se osim metalnih cevovoda ugrađuju i polietilenski, tj. plastični cevovodi. Metalni cevovodi su elektroprovodni te kad su uzemljeni, generisanje naelektrisanja protokom slabo provodne tečnosti i disipacija naelektrisanja su u balansu, tj. Nema akumulacije naelektrisanja. Plastični cevovodi električno su neprovodni i kod njih je generisanje naelektrisanja mnogo veće od disipacije te predstavljaju puno veći rizik od metalnih. S obzirom na to da elektrostatički naelektrisani plastični cevovod predstavlja naelektrisani neprovodni objekat, potencijalni je izvor četkastog elektrostatičkog pražnjenja. Prema [1], četkasto pražnjenje prouzrokovano potencijalom do 25 kV ne može zapaliti eksplozivnu atmosferu tečnih ugljovodonika, međutim prema [3] je u najgorim uslovima u laboratoriji postignuta vrijednost od 90 kV akumulisanog potencijala na neukopanom plastičnom cjevovodu protokom slaboprovodnog tečnog ugljikovodonika.

Elektrostatičku varnicu kod sistema plastičnih cevovoda mogu generisati izolirani metalni dijelovi sistema kao npr. metalni priključci na krajevima. Zbog navedene potencijalne opasnosti preporučuje se, i sve više primjenjuje, ugradnja plastičnih cevovoda s provodnim tankim slojem na unutrašnjoj strani cevovoda te se svi metalni dijelovi u liniji cjevovoda moraju galvanski povezati s provodnim slojem tako da se postigne neprekidnost provodne staze. Celi se sistem mora uzemljiti. Na taj se način sprečava akumulaciju naelektrisanja. U [4] se navodi izmerno generisanje potencijala od samo $100mV$ na dugim i neukopanim delovima takvih cevovoda. No, ako se upotrebljava mnogo nepovoljnija varijanta s neprovodnim plastičnim cevovodima, prema (1) je potrebno osigurati sledeće:

- dielektrična čvrstoća materijala cevovoda ne sme biti manja od $100 kV$ – zidovi polietilenskog cevovoda ne smeju biti tanje od $4 mm$ (da generisano električno polje ne bi prouzrokovalo deformaciju ili pucanje cevi)

- cevovodi moraju biti ukopani, neukopani delovi cevovoda moraju biti što kraći – svi metalni spoljni i završni dijelovi moraju biti uzemljeni

- ograničiti brzinu protoka goriva ($<2,8m/s$).

U [4] se za ukopane neprovodne plastične cevovode navode struje generisanja naelektrisanja $100 nA$ te se za sprečavanje potencijalne pojave opasnog četkastog pražnjenja (potencijal od $25 kV$ za ugljovodike) treba postići otpornostdisipacije prema zemlji od $0,25 \times 10^{12} \Omega$.

Verovatnoća paljenja prouzrokovana zbog upotrebe plastičnih neprovodnih cevovoda vrlo je mala uz osiguranje navedenih mera, međutim nije potpuno isključena. Iako se kao opšta granica dobrog otpora uzemljenja vezano za elektrostatiku smatra iznos od $1 M\Omega$, za određene metalne strukture/objekte (auto rezervoar, uređaj za točenje, metalni cevovodi, metalne cisterne itd.) zahteva se iznos otpora do 10Ω . Smatra se da veće vrednosti otpora kod takvih struktura mogu upozoravati na loše veze ili koroziju metalnih struktura, tj. Uzemljivača koji mogu dovesti do izolovane metalne strukture od zemlje. Ključno je da u eksplozivnoj atmosferi metalne strukture, kao i metalni delovi opreme koji nisu deo strukture, ne budu električno izolovani od zemlje.

Na cisternama, ako nisu sprovedene mere zaštite, mogu se prilikom dostave ili pretakanja goriva generisati potencijali od nekoliko desetina hiljada volti, npr. $30 kV$ na autocisterni za koju se prosečno smatra da ima kapacitet od $1000 pF$ prema zemlji, može se potencijalno generisati $450 mJ$ elektrostatičke energije. Uporedimo li navedeni podatak vrednosti minimalne energije paljenja iz tabele 2., vrlo se lako prepozna potencijalna opasnost koju predstavlja cisterna (akumulisana energija u ovom primeru ima 1800 puta veću vrednost od vrednosti potrebne za paljenje benzinskih gasova). Stoga je pouzdan o neutralizovanje statičkog elektriciteta

obvezatno, tj. Uzemljenje cisterne maksimalnog otpora uzemljenja 10Ω . Gume točkova cisterne izrađene su kao disipativne, međutim navedena činjenica se zbog naglašene potencijalne opasnosti ne uzima kao olakšavajuću okolnost kod radnji pretakanja. Obično se na stanicama uzemljenje cisterni sprovodi sa zaštitom protiv eksplozije predstave sa odgovarajućim kleštima za uzemljenje (slika 8.), gde osoba koja manipuliše pretakanjem vrši određeni niz tehničkih radnji prema uputstvima propisanih radnji:

- spoj cisterne s kleštima prekidača
- uključenje prekidača → s obzirom na to da je prekidač odgovarajuće protiveksplozivne izrade te su klešta sada uzemljena, elektrostatičko pražnjenje događa se u Ex-kućištu prekidača, cisterna je uzemljena
- spajanja fleksibilnih cevi na priključak za punjenje (preporučuje se metalnim završetkom jednog kraja navedenih cevi pre početka spajanja cevi na fiksni priključak rezervoara kratko spojeni neki deo sada uzemljene cisterne zbog neutralizovanja eventualno akumulisanog naelektrisanja na spojevima cevi)
- početak punjenja



Slika 9. Prekidač sa kleštima za uzemljenje cisterni

Na objektima gde se pretakanje izvodi pumpama ili kompresorima, uzemljenje cisterne može se izvesti i kontrola uzemljenja. Pri spajanju i punjenju iznos otpora uzemljenja ne sme biti veći od 10Ω . Ako dođe do prekoračenja otpornosti uzemljenja, uređaji ne dopuštaju punjenje ili prekidaju proces punjenja. Tehnička dokumentacija [1] uopšteno preporučuje kolo za uzemljenje s automatskom indikacijom, kao npr. uređaj na slici



Slika 10. Kontrolor uzemljenja cisterne

Fleksibilne cevi sa pridruženim vezama i pištoljem koriste se za spoj u cisterne s fiksnim priključkom za punjenje rezervoara (slika 10.) i za spoj uređaja za točenje s otvorom za punjenje rezervoara motornog vozila.



Slika 10. Spoj autocisterne na fiksne priključke

Ne smeju se koristiti električno neprovodna kola cevi-priključak (podela prema tabeli 5.) jer zbog protoka ugljovodonika kroz cevi dolazi do pojave statičkog elektriciteta te se treba osigurati dovoljna disipacija naelektrisanja u zemlji. Osim navedenog, takvi spojevi cevi služe i za galvansko povezivanje cisterne sa cisternama te ljudi i motornih vozila s uređajima za točenje goriva tabela 4. Prikazuje osnovnu podelu sklopova cev-priključak:

Tabela 4. Podela spojeva fleksibilnih cevi

| ISO 8031 | | IEC 60079-32-1 (tabela 3.) |
|----------|-------------------------------------|-------------------------------|
| Razred | Otpornost spojeva cevi | |
| M | $R < 100 \omega$ | provodan |
| Ω | $R < 1 m\omega$ | provodan/disipativan |
| Ω | $1 k\omega \leq r \leq 100 m\omega$ | provodan/izolirajući |

Razred M označava električno povezane krajeve spoja s dve metalne fleksibilne žice, dok Ω označavavali provodni spoj – žicom električno povezani krajevi spoja (drugi red tabele 4.) ili antistatički spoj (treći red tabele 4.). Kod antistatičkog spoja nema električnog povezivanja krajeva spoja, a za material fleksibilne cevi upotrebljava se provodna/disipativna guma ili plastični sloj.

Pri pretakanju tečnih zapaljivih ugljovodonika obavezno upotrebiti spojeve fleksibilnih cevi s otporom ne većim od $1 M\Omega$.

Za neke druge medije, zavisno o analizi, mogu se ublažiti zahtevi. Tako npr. ako su generisane struje manje od $10 \mu A$, zadovoljavajuća je otpornost kola do $100 M\Omega$, što je ublažavanje u odnosu na $1 M\Omega$.

Rezervoari za skladištenje naftnih derivata na stanicama za točenje izrađeni su od metala, a mogu biti ugrađeni podzemno ili nadzemno. Mere zaštite od elektrostatičkog pražnjenja su uzemljenje i izjednačenje potencijala rezervoara i cevovoda. Dakle, otpornost uzemljenja ne sme preći 10Ω , a spoj rezervoara i cevovoda (uključujući i odušni cevovod) mora činiti galvansku celinu, osim u slučaju neprovodnih cevovoda, gde se trebaju primeniti dodatne mere zaštite pre navedene u članku.

5. ZAKLJUČAK

Neretke eksplozije u objektima/postrojenjima/procesima gde je moguća pojava eksplozivne atmosfere pokazale su koliko je statički elektricitet specifična, nepredvidiva, realna te time i veoma opasna pojava sa gledišta protiv eksplozivne zaštite. S tim u skladu zaslužen mu se pridaje sve veća pažnja, što dokazuje i tehnički izveštaj IEC/TS 60079-32-1: *Explosive atmospheres - Part 32-1: Electrostatic hazards - Guidance*, izrađen 2013. Dve godine posle document prihvata Evropski odbor za elektro tehničke standarde (CENELEC) pod nazivom CLC/TR 60079-32-Čitajući članke i tehničke časopise na predmetnu temu, može se zaključiti da je svet protiveksplozijske zaštite kada je reč o elektrostatici i merama zaštite novim tehničkim izveštajem dobio univerzalan, unificiran, temelj i ti sveobuhvatan dokument koji može pomoći da po pitanju "Ex-elektrostatičke" veliki deo sveta govori istim jezikom. Kao ilustracija kompleksnosti elektrostatičke kao uzroka paljenja te sveobuhvatnosti mera zaštite obrađenih u novom tehničkom izveštaju može poslužiti činjenica da se sastoji od 177 stranica.

Osnovni je, dakle, zahtevi zaštite da mera odvođenja naelektrisanja ili disipacija bude veća od mere stvaranja ili generisanja elektrostatičkog naelektrisanja. Navedeno se postiže tako da se osigura dovoljno mali omski otpornost protoku generisanog elektrostatičkog naelektrisanja prema zemlji.

Dakle, opšte govoreći, osnov na mera zaštite od statičkog elektriciteta u većini slučajeva u Ex-prostoru prema navedenom tehničkom izvještaju je da otporu zemljenja objekata I medija ne bude veći od $1 M\Omega$, osim za cisterne i velike metalne strukture, gdje se traži iznos manji od 10Ω . Navedena filozofija zaštite zvuči jednostavno, međutim ubrzanje procesa u današnjoj industriji, učestalo uvođenje

novih materijala i medija u procese te ljudi kao neizostavan faktor, unose dodatne parametre koje treba uzeti u obzir. S tim u vezi postojeće mjere zaštite često je potrebno dodatno analizirati i prilagoditi proces u ili mediju, što može dovesti do dodatnih zahtjeva, postroživanja ili pojednostavnjenja mera zaštite. Ako se potvrdi subjektivni osećaj autora članka da je Ex-svet sa gledišta elektrostatike danas oprezniji te s toga i sigurniji, gore navedeni tehnički izvještaj potpuno opravdava svoj nastanak.

6. LITERATURA

- [1] Hrvatski tehnički izvještaj HRI CLC/TR 60079-32-1, Eksplozivne atmosfere – deo 32-1: Opasnost od elektrostatčkog naelektrisanja (IEC/TS 60079-32-1:2013; CLC/TR 60079-32-1:2015), prvo izdanje, li 2015.
- [2] National Fire Protection Association: NFPA 77 Recommended Practice on Static Electricity, 2000 Edition.
- [3] Electrostatic hazards with underground plastic pipes at petrol stations, Journal of Physics: Conference Series 301 (2011) 012038, H. L.Wamsley
- [4] Summary of risks with conductive and non-conductive plastic pipes at retail petrol stations, Harold Walmsley Electrostatics Ltd, 23. 1. 2010.
- [5] Charging of a person exiting a car seat, Journal of Physics: Conference Series 142 (2008) 012004, Birgitta Andersson, Lars Fast, Paul Holdstock, Diana Pirici
- [6] Ignition risks from static electricity - problems solved?, Journal of Physics: Conference Series 142 (2008) 012001, M. Glor
- [7] <http://www.urbanfiretraining.com/service-stations.html>

