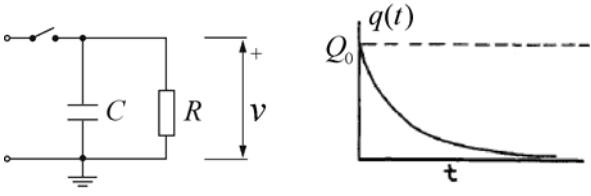


7.5. Razilaženje (relaksacija) naelektrisanja

Naelektrisanje se može akumulirati na površi neuzemljenog provodnika, na površi izolatora ili po zapremini izolatora. Nakon akumulacije naelektrisanja, počinje njihovo razilaženje.

Kada se naelektrisanje akumulira na neuzemljenom provodnom objektu, neuzemljeni objekat može se modelovati kao kondenzator koji se puni.

	Ako se naelektrisano provodno telo uzemlji, električno kolo koje modeluje razilaženje naelektrisanja prikazano je na slici. Naelektrisanje opada po eksponencijalnom zakonu $q(t) = Q_0 e^{-t/\tau}$ $q(t)$ naelektrisanje u trenutku t (C), Q_0 naelektrisanje u početnom trenutku (C), t vreme (s), τ vreme relaksacije (s).												
$\tau = RC$ τ ≡ Time constant, s R ≡ Resistance, Ω C ≡ Capacitance, F	Vreme relaksacije τ određeno je kapacitivnošću provodnog tela i otpornošću puta prema zemlji. Naelektrisanje na provodnom telu će se lako raziti pod uslovom da postoji provodni put prema zemlji (malo R). Ako tog provodnog puta nema (veliko R), vreme potrebno da se naelektrisanje razide je više redova veličine veće.												
<table border="1" data-bbox="352 1055 667 1301"> <thead> <tr> <th>Time Constants</th><th>Charge Remaining</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0.368</td></tr> <tr><td>2</td><td>0.135</td></tr> <tr><td>3</td><td>0.050</td></tr> <tr><td>4</td><td>0.018</td></tr> <tr><td>5</td><td>0.007</td></tr> </tbody> </table>	Time Constants	Charge Remaining	1	0.368	2	0.135	3	0.050	4	0.018	5	0.007	Nakon vremena τ naelektrisanje opadne na 0,368 (1/e) početne vrednosti (pamtiti kao malo više od 1/3). Nakon 3τ može se smatrati da je naelektrisanje praktično iščezlo (5%), a nakon 5τ da je potpuno iščezlo (<1%).
Time Constants	Charge Remaining												
1	0.368												
2	0.135												
3	0.050												
4	0.018												
5	0.007												

Kao primer, razmotrimo osobu koja ima kapacitivnost $C = 200 \text{ pF}$ i otpornost puta prema zemlji $R = 10^{11} \Omega$. Ako je potencijal osobe u početnom trenutku $V_0 = 3 \text{ kV}$, naelektrisanje u početnom trenutku iznosi

$$Q_0 = CV_0 = 200 \cdot 10^{-12} \cdot 3 \cdot 10^3 \text{ C} = 600 \cdot 10^{-9} \text{ C} = 0,6 \mu\text{C}.$$

Kada se izvor isključi, naelektrisanje počinje da se razilazi. Vreme relaksacije je

$$\tau = RC = 10^{11} \cdot 200 \cdot 10^{-12} \text{ s} = 20 \text{ s}.$$

Naelektrisanje u proizvoljnom trenutku može se izračunati iz

$$q(t) = Q_0 e^{-t/\tau} = 0,6 e^{-t/20} \mu\text{C}.$$

Potencijal u proizvoljnom trenutku određuje se kao

$$v(t) = V_0 e^{-t/\tau} = 3000 e^{-t/20} \text{ V}.$$

Npr. posle 10 s, $q(10 \text{ s}) = 0,6 e^{-10/20} \mu\text{C} = 0,36 \mu\text{C}$ i $v(10 \text{ s}) = 3000 e^{-10/20} \text{ V} = 1800 \text{ V}$.

Posle $t = \tau = 20 \text{ s}$, i naelektrisanje i potencijal opali su na 36,8% početne vrednosti: $q(\tau) = 0,368 \cdot Q_0 = 0,368 \cdot 0,6 \mu\text{C} = 0,22 \mu\text{C}$ i $v(\tau) = 0,368 \cdot V_0 = 0,368 \cdot 3000 \text{ V} = 1100 \text{ V}$.

Nakon $3\tau = 60 \text{ s}$, i naelektrisanje i potencijal opali su na 5% početne vrednosti: $q(3\tau) = 0,050 \cdot 0,6 \mu\text{C} = 0,03 \mu\text{C}$ i $v(3\tau) = 0,050 \cdot 3000 \text{ V} = 150 \text{ V}$.

Nakon $5\tau = 100 \text{ s}$, i naelektrisanje i potencijal opali su na 5% početne vrednosti: $q(5\tau) = 0,007 \cdot 0,6 \mu\text{C} = 0,004 \mu\text{C}$ i $v(5\tau) = 0,007 \cdot 3000 \text{ V} = 21 \text{ V}$.

Kada postoji naelektrisanje u dielektriku, vreme relaksacije određeno je specifičnom otpornošću i permitivnošću:

$$\tau = \rho \varepsilon_r \varepsilon_0$$

τ vreme relaksacije (s),

ρ specifična otpornost (Ωm),

ε_r relativna permitivnost (neimenovan broj),

$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ permitivnost vakuuma.

Ako je sredina loš provodnik, naelektrisanje ne može lako otići u zemlju. Specifična otpornost (specifična provodnost sredine je veoma važna u određivanju da li će se akumulirati značajne količine naelektrisanja.

Umesto specifične otpornosti može se koristiti specifična provodnost, $\sigma = 1/\rho$. Jedinica za specifični provodnost je S/m.

Kao prvi primer, odredimo vreme relaksacije pleksiglasa. Specifična otpornost pleksiglasa je $\rho = 10^{13} \Omega\text{m}$, a relativna permitivnost $\varepsilon_r = 3,4$. Na osnovu specifične otpornosti vidi se da je pleksiglas izolator. Vreme relaksacije je

$$\tau = \rho \varepsilon_r \varepsilon_0 = 10^{13} \cdot 3,4 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ s} = 300 \text{ s}.$$

Na vreme relaksacije utiče i vrednost relativne permitivnosti. Zamislamo material iste specifične otpornosti, ali dvostruko veće relativne permitivnosti. U tom slučaju vreme relaksacije biće takođe dvostruko veće.

Kao drugi primer, za tečni ugljovodonik sa specifičnom provodnošću 1 pS/m i $\varepsilon_r = 2,3$ (tipično za ugljovodonike) vreme relaksacije je

$$\tau = \rho \varepsilon_r \varepsilon_0 = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0}{\sigma} = \frac{2,3 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12}}{10^{-12}} = 2,3 \cdot 8,854 = 20 \text{ s}.$$

Za tečnosti se smatra da je 100s uvek dovoljno da se naelektrisanje razide.

Kada je specifična provodnost tečnosti veća od 1000 pS/m tečnost se smatra provodnom i u njoj se ne akumulira naelektrisanje, pod uslovom da postoji provodni put prema zemlji. Specifične provodnosti poluprovodnih tečnosti su u rasponu od 50 pS/m do 1000 pS/m . Neprovodne tečnosti su one čija je specifična provodnost manja od 50 pS/m . Brojni primeri specifičnih provodnosti tečnosti: avionsko gorivo i dizel $\sigma = 0,5 - 50 \text{ pS/m}$, benzin $\sigma = 10 - 3000 \text{ pS/m}$, sirova nafta $\sigma > 1000 \text{ pS/m}$.

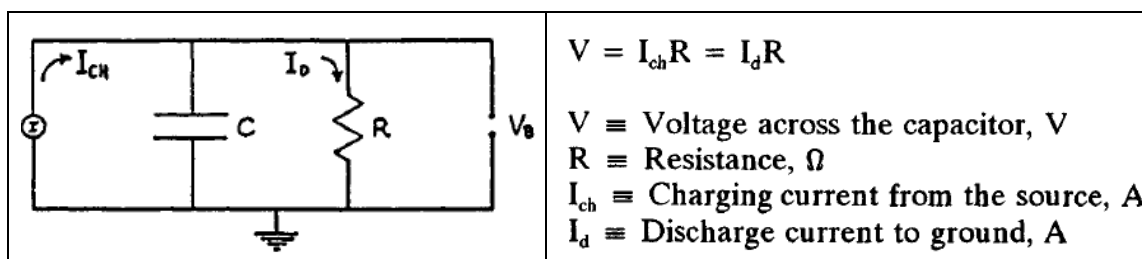
U uzemljenom provodnom rezervoaru, brzina razilaženja naelektrisanja zavisi od specifične provodnosti tečnosti. U uzemljenom provodnom rezervoaru sa tečnosti čija je specifična provodnost veća od 50 pS/m (provodne i poluprovodne tečnosti) neće doći do akumulacije naelektrisanja. U ovom slučaju tečnost se smatra sigurnom sa stanovišta elektrostatičke opasnosti.

Ako je rezervoar od izolatora (npr. plastike) ili ako je provodan ali nije uzemljen, do akumulacije naelektrisanja dolazi bez obzira na specifičnu provodnost tečnosti.

1.1. Razdvajanje i razilaženje naelektrisanja

Pri analizi elektrostatičkog naelektrisanja potrebno je voditi računa o dva mehanizma: razdvajanju naelektrisanja i razilaženju naelektrisanja.

Elektrostatički sistem se može predstaviti jednostavnim električnim ekvivalentnim kolom prikazanim na slici. Ono se sastoji od samo četiri elementa. Prvi je strujni generator koji predstavlja mehanizam nastajanja naelektrisanja; u tipičnom proizvodnom procesu, nastajanje naelektrisanja će biti kontinualan proces (npr. protok tečnosti kroz cevi). Drugi element je kondenzator na kome se naelektrisanje nagomilava (površina od izolacionog materijala, izolovani metalni delovi). Treći element je otpornost, koja predstavlja mehanizam razilaženja naelektrisanja. Proces razilaženja naelektrisanja će obično biti tok male struje ili kroz zapreminu izolatora ili duž njegove površine. Konačno, uključen je i procep za varnicu koji ograničava maksimalan napon koji može biti dostignut u sistemu.

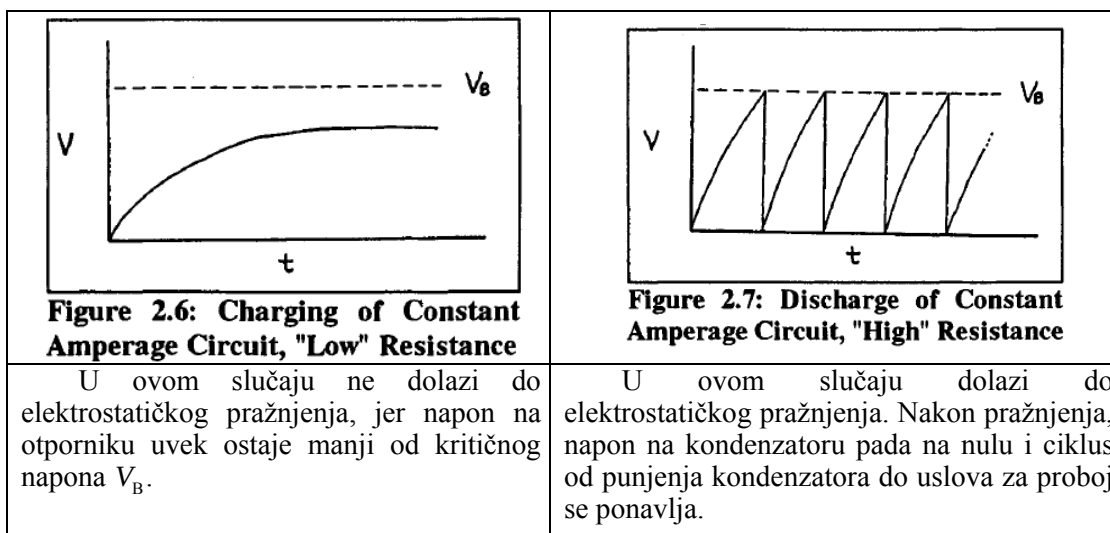


Na početku procesa može se pretpostaviti da je kondenzator prazan. Struja generatora će u početku puniti kondenzator izazivajući da se napon na njemu povećava. Kako napon raste, deo struje će početi da teče kroz otpornik. Sa povećanjem napona, proporcionalno, sve veći deo struje će proticati kroz otpornik. Ako ne dolazi do pražnjenja, sistem će nakon nekog vremena dostići ravnotežno stanje, kada sva nastala struja teče u zemlju kroz otpornik R , tj. kada je $I_d = I_{ch}$. Napon na otporniku u stacionarnom stanju jednak je

$$V = RI_{ch}.$$

Tipične vrednosti za I_{ch} su od 10^{-11} A do 10^{-4} A (10pA–100μA).

Da li će sistem dovesti do značajnih elektrostatičkih efekata zavisi od veličine napona $V = RI_{ch}$ i posebno od veličine nastalog električnog polja u izolatoru na kojem se javlja ovaj napon. Postoje dve mogućnosti koje su ilustrovane na slikama.



Kao prvi primer, razmotrimo industrijski proces koji stvara struju naelektrisanja od 1nA. Ako je otpornost sistema prema zemlji $10^{14} \Omega$ (što je moguće sa današnjim izolatorima), tada se u sistemu može javiti napon od

$$V = RI_{ch} = 10^{14} \cdot 10^{-9} = 10^5 \text{ V} = 100 \text{ kV}.$$

Ako je električno polje povezano sa ovim naponom dovoljno veliko da dovede do proboja vazduha, doći će do pojave varnice. Ovaj efekat je predstavljen procepom za varnicu u ekvivalentnom električnom kolu.

Kao drugi primer, pretpostavimo da je kapacitivnost sistema 10pF i da se proboj javlja kada potencijal u sistemu dostigne 100kV. Energija oslobođena pri pražnjenju iznosila bi

$$W = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \cdot 10 \cdot 10^{-12} \cdot (10^5)^2 = 5 \cdot 10^{-2} \text{ J} = 50 \text{ mJ}.$$

To je više nego dovoljno da izazove paljenje gasova i para zapaljivih tečnosti.

7.6. Merenja

Za merenja se koriste elektrometri koji mogu da mere mnogo manje struje i mnogo veće otpornosti u odnosu na one koje se mogu izmeriti običnim multimetrima.

7.7. Mere

Inženjerski pristup je da se spreči akumulacija naelektrisanja, tako što se obezbedi put za njihovo razilaženje.

Za elektrostatičko uzemljenje dovoljna je otpornost manja od $10^6 \Omega$ ($1\text{M}\Omega$), a u mnogim slučajevima dovoljna je i otpornost manja od $10^8 \Omega$ ($100\text{M}\Omega$). Do ovog kriterijuma došlo se na osnovu iskustva. U normalnim industrijskim uslovima smatra se da tek pri naponima većim od 300 V može doći do pražnjenja koje može uzrokovati paljenje. Za eksplozive taj napon je manji i iznosi 100 V. Poznato je da je struja naelektrisanja u industrijskim operacijama ne prelazi $100\mu\text{A}$. Iz ovih podataka i Omovog zakona, za $R=10^6 \Omega$ i $I=100\mu\text{A}$ dobija se $U=RI=100\text{V}$. U mnogim industrijskim procesima, struja naelektrisanja ne prelazi $1\mu\text{A}$, u kom slučaju je otpornost od $10^8 \Omega$ prema zemlji odgovarajuća.

Kada se uzemljenje i povezivanje provodnika realizuje preko metalnih delova, zahteva se da otpornost ne bude veća od 10Ω u vreme instalacije ili održavanja. To je zbog toga što otpornost veća od 10Ω ukazuje da metalni delovi nisu dobro povezani zbog korozije ili prekida veze. Kriterijum od 10Ω pri instalaciji obezbeđuje da otpornost pri radu nikada neće biti veća od $10^6 \Omega$.

Ako materijal ima dovoljno veliku provodnost, naelektrisanje se može prilično brzo razići pod uslovom da postoji provodni put ka zemlji. Ako je materijal izolovan od zemlje na njemu će se akumulirati naelektrisanje, zato što će u ovom slučaju vreme relaksacije zavisiti od specifične provodnosti izolatora.

Potrebno je izbeći postavljanje nepovezanih provodnih objekata, jer se oni mogu naelektrisati ili direktnim kontaktom ili elektrostatičkom indukcijom, zbog čega mogu biti uzročnici varnica. Uzrok pojave pražnjenja (jedne elektrode) mogu biti i uzemljeni provodni objekti koji se nađu u električnom polju.

U slučajevima kada dolazi do akumulacije naelektrisanja, potrebno je sačekati da se naelektrisanje razide i tek nakon toga preći na sledeći korak. Postoje preporuke o kojim vremenskim intervalima se radi. Standardi zahtevaju da se nakon punjenja rezervoara u periodu od 30 minuta ne sprovodi nikakva akcija (merenja, uzorkovanja, itd). Iskustvo je pokazalo da je ova mera neophodna da bi se izbeglo čestasto pražnjenje. Nakon pranja rezervoara, preporuka je da se sačeka 5 sati.

7.7.1. Procena opasnosti od elektrostatičkog pražnjenja

Procena opasnosti od elektrostatičkog pražnjenja obuhvata sledeće korake u analizi:

- da li zapaljiva smeša može biti stvorena,
- da li se statički elektricitet može generisati dovoljno brzo da se akumulira,
- koji tipovi elektrostatičkih pražnjenja se mogu pojaviti,
- da li ovo pražnjenje može osloboditi energiju dovoljnu da uzrokuje paljenje zapaljive atmosfere.

Preporučuje se da se prvo proceni zapaljivost smeše, jer je najsigurnije rešenje da se izbegne stvaranje zapaljive smeše. Ako zapaljiva atmosfera ne može biti izbegnuta, potrebno je sistem dizajnirati tako da se minimizuju i verovatnoća i posledice paljenja.

7.8. Primeri aproksimativnog proračuna

7.8.1. Minimalna kapacitivnost koja može da dovede do zapaljivog pražnjenja

Koliko veliki treba da je provodni objekat da bi mogla da se pojavi varnica dovoljne energije da dovede do paljenja? Pitanje je da li npr. izolovani zavrtanj može da akumulira dovoljno energije i da dovede do paljenja. Neki objekti su previše mali (imaju previše malu kapacitivnost) da bi mogli da naprave problem opisanog tipa. Zato ćemo razmotriti neke teorijske granice.

Naelektrisanje se može akumulirati na metalnim telima i može doći do pojave varnice. Ako se razmatra tipičan ugljovodoničnik sa minimalnom energijom paljenja od 0,25 mJ, kapacitivnost metalnog objekta mora biti dovoljno velika da može da uskladišti ovu energiju.

Pretpostavimo da je objekat u obliku sfere poluprečnika a i odredimo minimalni poluprečnik sfere koja može da uskladišti 0,25 mJ energije. Maksimalna količina naelektrisanja na objektu određena je maksimalnom jačinom električnog polja na njegovoj površini,

$$Q_{\max} = 4\pi\epsilon_r\epsilon_0 a^2 E_{\max}.$$

Maksimalna energija je povezana je sa maksimalnom količinom naelektrisanja na telu,

$$W_{\max} = \frac{Q_{\max}^2}{2C}.$$

Uvrštavanjem $Q_{\max} = 4\pi\epsilon_r\epsilon_0 a^2 E_{\max}$ i $C = 4\pi\epsilon_r\epsilon_0 a$ (kapacitivnost sfere poluprečnika a) dobija se

$$W_{\max} = \frac{(4\pi\epsilon_r\epsilon_0 a^2 E_{\max})^2}{2 \cdot 4\pi\epsilon_r\epsilon_0 a},$$

odakle je

$$a^3 = \frac{2W_{\max}}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0 E_{\max}^2}.$$

Poluprečnik sfere jednak je

$$a = \sqrt[3]{\frac{2W_{\max}}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0 E_{\max}^2}}.$$

Električna čvrstina vazduha iznosi $E_{\max} = 3 \text{ MV/m}$, permitivnost vazduha jednaka je $\epsilon_r\epsilon_0 = \epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$. Za $W_{\max} = 0,25 \text{ mJ}$ iz prethodne relacije dobija se

$$a = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (3 \cdot 10^6)^2}} = \sqrt[3]{0,5 \cdot 10^{-6}} = \sqrt[3]{0,5 \cdot 10^{-2}} = 0,8 \cdot 10^{-2} \text{ m} = 8 \text{ mm}.$$

Kapacitivnost sfere ovog poluprečnika je $C = 4\pi\epsilon_0 a = 4\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 8 \cdot 10^{-3} \approx 0,9 \text{ pF}$.

Ovaj teorijski rezultat ukazuje na to da ne može doći do zapaljivog pražnjenja na sfernom objektu čiji je poluprečnik manji od 8 mm. U stvarnosti objekti mogu imati oštre ivice u kom slučaju se može pojaviti korona. Pri izvođenju je pretpostavljena maksimalna gustina površinskog naelektrisanja, kapacitivnost stvarnog objekta je drugačija, i objekti uvek imaju neku otpornost prema zemlji. U stvarnosti, objekat veličine krigle je dovoljno velik da akumulira dovoljno naelektrisanja i da dovede do pražnjenja koje može dovesti do paljenje tipičnog ugljovodoničnika sa minimalnom energijom paljenja od 0,25 mJ.

U praksi se uzemljuju svi objekti čija je kapacitivnost veća od 3 pF.

7.8.2. Incident pri sipanju goriva u automobil

Na pumpi, vozač je stavio pištolj za punjenje u rezervoar automobila i za vreme punjenja se vratio na vozačevo sedište. Zatim je brzo skliznuo sa sedišta, izašao iz automobila i ponovo dotakao pištolj za punjenje. Kada je dotakao pištolj, pojavila se varnica i isparenja su se zapalila.

Analiza incidenta.

U ovom slučaju naelektrisanje se akumuliralo na čoveku i varnica se pojavila između čoveka i uzemljenog pištolja za punjenje, pri čemu su se zapalila isparenja koja postoje oko pištolja i otvora rezervoara.

Razmotrimo prvo naelektrisanje koje se akumuliralo na vozaču. Pretpostavimo da je površina pantalona koja je došla u kontakt sa sedištem $0,1\text{m}^2$ ($33\text{cm} \times 33\text{cm}$). Kada je vlažnost vazduha mala, može čak da se čuje i pucketanje kad se sklizne preko sedišta. To pokazuje da se akumulirala maksimalna površinska gustina naelektrisanja koja može da postoji u vazduhu $\sigma_{\max} = 27\mu\text{C}/\text{m}^2$. To odgovara količini naelektrisanja na čoveku od

$$Q_{\max} = \sigma_{\max} S = 27 \cdot 10^{-6} \cdot 0,1 = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{C} = 2,7\mu\text{C}.$$

Ovo je velika količina naelektrisanja, ali može da se razmatra kao gornja granica.

Naelektrisanje koje smo odredili je akumulirano naelektrisanje u trenutku kada je čovek ustao. Naelektrisanje je nakon toga počelo da se razilazi kroz cipele, a brzina razilaženja zavisi od otpornosti obuće prema zemlji.

Razmotrimo obuću čoveka. Pretpostavimo da je podloga od betona i da je čovek imao cipele sa donom od neoprena (sintetičke gume) debljine 3mm. Tipična vrednost specifične otpornosti neoprena je $\rho = 10^{11}\Omega\text{m}$. Pretpostavimo da je površina đona $30\text{cm} \times 10\text{cm} = 0,03\text{m}^2$. Tada je otpornost đona cipele,

$$R = \rho \frac{l}{S} = 10^{11} \frac{3 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 10^{-2}} = 10^{10}\Omega = 10\text{G}\Omega.$$

Iz otpornosti čoveka prema zemlji $R = 10\text{G}\Omega$ i kapacitivnosti čoveka $C = 200\text{pF}$ može se odrediti vreme relaksacije naelektrisanja,

$$\tau_{10\text{G}\Omega} = RC = 10^{10} \cdot 200 \cdot 10^{-12} = 2\text{s}.$$

Pretpostavimo dalje da su čoveku bile potrebne $t = 2\text{s} = \tau_{10\text{G}\Omega}$ da dotakne pištolj za punjenje. Naelektrisanje u trenutku $t = \tau_{10\text{G}\Omega} = 2\text{s}$ na čoveku iznosi

$$Q_{10\text{G}\Omega} = 0,368 \cdot Q_{\max} = 0,368 \cdot 2,7 \cdot 10^{-6} = 1 \cdot 10^{-6} = 1\mu\text{C}.$$

Energija akumulirana u čoveku u trenutku kada je dotakao pištolj za benzin iznosi

$$W_{10\text{G}\Omega} = \frac{Q_{10\text{G}\Omega}^2}{2C} = \frac{(1 \cdot 10^{-6})^2}{2 \cdot 200 \cdot 10^{-12}} \approx 2,5\text{mJ}.$$

Ova energija je deset puta veća od MEP benzina koja iznosi oko 0,25mJ. Oslobođena energija može da dovede do incidenta.

Kao drugu pretpostavku usvojimo da je otpornost čoveka prema zemlji tri puta manja, odnosno da je jednaka $3,3\text{G}\Omega$. Tada je tri puta manje i vreme relaksacije, $\tau_{3,3\text{G}\Omega} = 0,67\text{s}$. U ovom slučaju naelektrisanje na čoveku posle $t = 2\text{s} = 3\tau_{3,3\text{G}\Omega}$ iznosilo bi

$$Q_{3,3\text{G}\Omega} = 0,05 \cdot Q_{\max} = 0,05 \cdot 2,7 \cdot 10^{-6} = 0,135 \cdot 10^{-6} = 0,135\mu\text{C}.$$

U ovom slučaju energija akumulirana u čoveku u trenutku kada je dotakao pištolj za benzin iznosi

$$W_{3,3\text{G}\Omega} = \frac{Q_{3,3\text{G}\Omega}^2}{2C} = \frac{(0,135 \cdot 10^{-6})^2}{2 \cdot 200 \cdot 10^{-12}} \approx 0,05\text{mJ},$$

što je manje od MEP benzina i do incidenta neće doći ako je podloga od betona (otpornost betona prema zemlji je reda $10^6\Omega$).

Iz prethodnog se može zaključiti da je specifična otpornost obuće bila manja, naelektrisanje bi se razilo pre kontakta sa pištoljem za punjenje benzina pod uslovom da je podloga od betona. Sa druge strane, ako je podloga od suvog asfalta, naelektrisanje se možda ne bi razilo (otpornost suvog asfalta prema zemlji je $\geq 10^8\Omega$).

Analiza incidenta se može uraditi i poređenjem količine naelektrisanja na čoveku u odnosu na količinu naelektrisanja koja odgovara MEP, $W_{\text{MEP}} = 0,25\text{mJ}$. Za ovu energiju nagomilana količina naelektrisanja na čoveku iznosi

$$Q_{\text{MEP}} = \sqrt{2W_{\text{MEP}}C} = \sqrt{2 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} \cdot 200 \cdot 10^{-12}} \approx 0,3\mu\text{C}.$$

Kada se uporede prethodno izračunate vrednosti sa $Q_{\text{MEP}} = 0,3\mu\text{C}$, u prvom slučaju dobija se $Q_{10\text{G}\Omega} > Q_{\text{MEP}}$ i do incidenta može doći, dok je u drugom slučaju $Q_{3,3\text{G}\Omega} < Q_{\text{MEP}}$ i do incidenta neće doći ako je podloga od betona.

7.8.3. Incident pri punjenju kante za benzin

Zabeleženo je nekoliko incidenta pri punjenju kante za benzin postavljene na držače od plastike u prtljažniku kamiona. Kad je kanta napunjena, isparenja su se zapalila u okolini otvora na kanti.

Analiza incidenta.

Elektrostatički scenario je da se naelektrisanje razdvojilo proticanjem benzina kroz crevo i akumuliralo se u izolovanoj kanti. Varnica se pojavila između otvora na kanti i uzemljenog pištolja. S obzirom da je bilo isparenja u okolini otvora kante, ta isparenja su se zapalila.

Razmotrimo prvo struju toka benzina. Ako je punjenje trajalo 20s, pri struji toka od $0,1\mu\text{A}$ akumuliralo se naelektrisanje od

$$Q = It = 0,1\mu\text{A} \cdot 20\text{s} = 2\mu\text{C}.$$

Ako je kapacitivnost kante 30pF, energija akumulirana u kanti jednaka

$$W = \frac{Q^2}{2C} = \frac{(2 \cdot 10^{-6})^2}{2 \cdot 30 \cdot 10^{-12}} \approx 67\text{mJ},$$

što je više nego dovoljno da se zapale benzinska isparenja sa MEP od 0,25mJ.

Ako se pretpostavi deset puta manja struja toka od $0,01\mu\text{A}$, tada će se za isto vreme akumulirati $0,2\mu\text{C}$. U tom slučaju akumulirana energija je $W \approx 0,67\text{mJ}$, što je opet dovoljno da se zapale benzinska isparenja (akumulirana količina naelektrisanja je 10 puta manja, što daje 100 puta manju energiju).

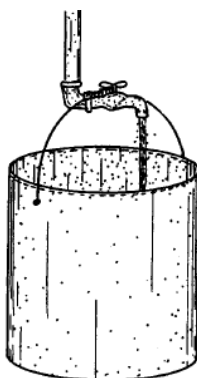
Druga strana koju je potrebno ispitati u ovom scenariju je otpornost kante za benzin prema zemlji. Procenjena otpornost kante prema zemlji je $R = 10^{14}\Omega$, dok je procenjena kapacitivnost kante $C = 20\text{pF}$. Vreme relaksacije naelektrisanja u kanti je

$$\tau = RC = 10^{14} \cdot 20 \cdot 10^{-12} = 2000\text{s} = 33\text{min}.$$

To je mnogo duže od vremena potrebnog da se napuni kanta, što ukazuje da se naelektrisanje neće razitići.

7.8.4. Incident pri točenju toluena

Vatra je počela za vreme punjenja kante toluenom iz rezervoara pod uticajem gravitacije. Korišćena je metalna kanta sa metalnom ručkom na kojoj se nalazi plastični držač. Plastični držač je izolovao kantu od metalne cevi rezervoara. Operater je otvorio slavinu i odmakao se od kante. Nakon kratkog vremena, toluen se upalio.



Slika 7.7. Punjenje neuzemljene provodne kante.

Analiza incidenta.

Osnovni podaci o toluenu: specifična provodnost $\sigma = 3000\text{pS/m}$ (provodna tečnost) relativna dielektrična konstanta $\epsilon_r = 2,4$, MEP 0,24mJ.

Podaci o kanti: poluprečnik kante 11,5cm, kapacitivnost $C = 20\text{pF}$, vreme punjenja 30s. Kanta nije bila uzemljena.

Pre incidenta osoblje je bilo udaljeno od kante, što pokazuje da uzrok paljenja nije bila varnica sa čoveka.

Prva pretpostavka je struja toka $I = 0,1\mu\text{A}$. U tom slučaju akumulirano naelektrisanje iznosi

$$Q = It = 0,1\mu\text{A} \cdot 30\text{s} = 3\mu\text{C}.$$

Akumulirana energija jednaka je

$$W = \frac{Q^2}{2C} = \frac{(3 \cdot 10^{-6})^2}{2 \cdot 20 \cdot 10^{-12}} \approx 225\text{mJ}.$$

Ova energija je znatno veća od MEP $0,24\text{mJ}$.

Potencijal kante određuje se kao

$$V = \frac{Q}{C} = \frac{3 \cdot 10^{-6}}{20 \cdot 10^{-12}} \approx 0,15 \cdot 10^6 = 0,15\text{MV}.$$

Dužina varnice može da se proceni polazeći od relacije $E_{\text{max}} = V/d$, odakle je $d = V/E_{\text{max}}$. Za električnu čvrstinu vazduha $E_{\text{max}} = 3\text{MV/m}$, procenjena dužina varnice iznosi

$$d \sim \frac{V}{E_{\text{max}}} = \frac{0,15 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^6} = 0,05\text{m} = 5\text{cm}.$$

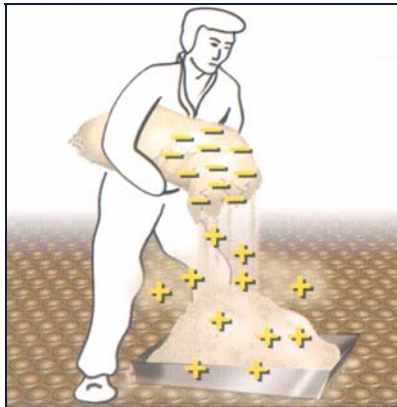
Varnica se može pojaviti i na nekoliko puta većim rastojanjima.

Incident bi bio izbegnut da su metalna cev i kanta bile povezane provodnikom pre i za vreme punjenja kante. Provodnik za povezivanje se sme ukloniti tek nakon završenog punjenja.

Ponoviti prethodni proračun pod pretpostavkom da je struja toka $I = 0,01\mu\text{A}$.

7.8.5. Incident pri pražnjenju metalnog kontejnera

U metalni kontejner u vidu kocke stranica dužine 1m može se uskladištiti oko 1000kg materijala u vidu praha. Pretpostavljeno vreme pražnjenja kontejnera je oko 30s. Dok se kontejner prazni, naelektrisanje jednog znaka napušta kontejner i ostavlja naelektrisanje suprotnog znaka na kontejneru. Procenjena vrednost kapacitivnosti kontejnera iznosi 100pF.



Slika 7.8. Presipanje materijala dovodi do razdvajanja naelektrisanja.

Analiza.

Prvi način. Najgori slučaj je da se pretpostavi da se na površini kontejnera pojavila najveća moguća površinska gustina naelektrisanja u vazduhu $\sigma_{\text{max}} = 27\mu\text{C/m}^2$. Površina kontejnera jednaka je 6m^2 i ukupno naelektrisanje kontejnera u ovom slučaju iznosilo bi,

$$Q_{\text{max}} = \sigma_{\text{max}} S = 27 \cdot 10^{-6} \cdot 6 = 162 \cdot 10^{-6}\text{C}.$$

Za kontejner kapacitivnosti 100pF, maksimalna akumulirana energija jednaka je

$$W_{\text{max}} = \frac{Q_{\text{max}}^2}{2C} = \frac{(162 \cdot 10^{-6})^2}{2 \cdot 100 \cdot 10^{-12}} \approx 130\text{J}.$$

Ovo je izuzetno velika energija koja može dovesti do šoka osoblja. Energija varnice bila bi dovoljna da izazove paljenje materijala u prahu.

Drugi način razmatranja je da se pretpostavi specifičnu gustinu naelektrisanja materijala u prahu. Smatra se da najveća specifična gustina naelektrisanja materijala u prahu iznosi oko

0,1 μ C/kg. Proizvod specifične gustine naelektrisanja i težine materijala u prahu jednak je ukupnoj količini naelektrisanja materijala. Za 1000 kg materijala, ukupno naelektrisanje iznosilo bi $Q = 0,1\mu\text{C}/\text{kg} \cdot 1000\text{ kg} = 100\mu\text{C}$. Pražnjenje kontejnera ostaviće istu količinu naelektrisanja suprotnog znaka na kontejneru. Za $Q = 100\mu\text{C}$ akumulisana energija u kontejneru iznosi

$$W = \frac{Q^2}{2C} = \frac{(100 \cdot 10^{-6})^2}{2 \cdot 100 \cdot 10^{-12}} \approx 50\text{ J}.$$

Energija od 50 J je takođe dovoljno velika da izazove šok i varnicu koja može da uzrokuje požar. U ovom slučaju naelektrisanje iznosi oko 60% od Q_{max} , tako da i površinska gustina naelektrisanja iznosi oko 60% od σ_{max} u vazduhu.

Treći način. Ako se ide obrnutim putem, i pretpostavi da je energija varnice jednaka 5 J (neki materijali u vidu praha imaju MEP od oko 5 J). Varnica od 5 J se može pojaviti ako je naelektrisanje kontejnera

$$Q_{\text{MEP}} = \sqrt{2W_{\text{MEP}}C} = \sqrt{2 \cdot 5 \cdot 100 \cdot 10^{-12}} \approx 30\mu\text{C}.$$

Ovih 30 μ C iznosi oko 20% od Q_{max} , pa i površinska gustina naelektrisanja iznosi oko 20% σ_{max} .

Iz prethodne analize sledi zaključak da do visokoenergetskih varnica može doći ako se metalni kontejneri koriste bez da su na odgovarajući način uzemljeni. Zato svi provodni objekti pri rukovanju materijalom uvek moraju biti uzemljeni.

7.9. Literatura

Institution of Chemical Engineers (IChemE), Hazards of Electricity and Static Electricity, 6th edition, BP Process Safety Series, 2006.

N. Jonassen Electrostatics, 2 edition, Springer 2002.

G. Luttgens and N. Wilson, Electrostatic Hazards, Reed Educational and Professional Publishing Ltd 1997.

T. H. Pratt, Electrostatic Ignitions of Fires and Explosions, USA, 2000.

K. L. Kaiser, Electrostatic discharge, Taylor & Francis, 2006.

M. Glor, Ignition hazards caused by electrostatic charges in industrial processes, Swiss Institute of Safety and Security Peter Thurnherr, thuba Ltd., Jan. 2010.

N. Dragović, Opasnosti izazvane statičkim elektricitetom u naftnoj industriji, diplomski rad, Univerzitet u Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet, Banja Luka, april 2011.

B. D. Popović, "Zbornik problema iz Elektromagnetike", Građevinska knjiga, Beograd, 1981.

A. R. Đorđević, D. I. Olćan, Ispitivanje elektromagnetske kompatibilnosti, Akademska misao, Beograd, 2012.

A. R. Đorđević, "Osnovi elektrotehnike, 1. deo - Elektrostatika", Akademska misao, Beograd, 2006.

CENELEC, Safety of machinery Guidance and recommendations for the avoidance of hazards due to static electricity R044-001, 1999.