

S. Rumbak\*

# LEŽAJ - UZROČNIK PALJENJA U PROSTORIMA UGROŽENIM EKSPLOZIVNOM ATMOSFEROM

UDK 614.838:621.82  
PRIMLJENO: 23.9.2010.  
PRIHVAĆENO: 8.9.2011.

*SAŽETAK: Članak analizira ležajeve kao najučestalije uzroke kvarova u rotacijskoj, strojarskoj i električnoj opremi te kao uzroke eksplozija u industrijskim postrojenjima u kojima se pojavljuje eksplozivna atmosfera plinova, para i prašine. Prikazane su razdiobe učestalosti kvarova u rotacijskoj opremi i razdiobe učestalosti eksplozija, odnosno uzroka paljenja eksplozivne atmosfere u kontekstu kritičkog ispitivanja današnje metodologije protueksplozijske zaštite. Prezentirane razdiobe učestalosti kvarova u strojarskoj i električnoj opremi te uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere temelje se na podacima prikupljenim u raznim industrijskim postrojenjima s eksplozivnom atmosferom.*

**Ključne riječi:** ležaj, eksplozivna atmosfera, uzročnik paljenja, kvar, razdiobe učestalosti

## UVOD

U literaturi, posebice hrvatskoj, vrlo se teško mogu pronaći rezultati raznih istraživanja i analiza kvarova u opremi te razdiobe učestalosti uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere, odnosno eksplozija. O aktualnosti teme govore podaci i informacije koje svakodnevno dobivamo o eksplozijama u industrijskim postrojenjima u našoj zemlji i iz svijeta. Svjedoci smo brojnih nesreća povezanih s eksplozijama vezanih za proizvodnju, skladištenje, transport i upotrebu zapaljivih tvari u raznim industrijskim postrojenjima na kopnu ili na moru. Važnost protueksplozijske zaštite je nesporna i leži u činjenici da su u našoj zemlji mnoga industrijska postrojenja i tehnološki procesi zastarjeli, ili se pak održavaju i popravljaju na neprikladan način, pa je samim tim povećana opasnost od nastanka eksplozija. Analizom poda-

taka o učestalostima iz priznatih i mjerodavnih izvora o uzrocima eksplozija u industrijskim postrojenjima uočljivo je da se određeni strojarski elementi učestalo pojavljuju u relativno značajnom broju slučajeva te se identificiraju kao značajni uzročnik nastanka eksplozija.

## EKSPLOZIVNA ATMOSFERA

Eksplozivna atmosfera nastaje pojavom zapaljivih tvari uz određenu prisutnost zraka (kisika). Zapaljive tvari mogu biti u obliku zapaljivih plinova, para i prašina. Paljenje eksplozivne atmosfere ili jednostavnije rečeno eksplozija u industrijskim postrojenjima može se dogoditi zbog istovremenog pojavljivanja zapaljive tvari, uzročnika paljenja i zraka (kisika). Eksplozija može nastati pojavom zapaljive tvari u zraku samo u određenom rasponu obujma (koncentraciji), odnosno između donje (DGE) i gornje granice eksplozivnosti (GGE) po obujmnim omjerima, a koje su svojstvene za svaki plin. Tako za metan CH<sub>4</sub>, DGE iznosi 4,4%, a GGE je 17%, za

\*Dr. sc. Slavko Rumbak, dipl. ing. stroj., (s.rumbak@ex-agencija.hr), Agencija za prostore ugrožene eksplozivnom atmosferom, Ex-Agencija, Baštijanova bb, 10001 Zagreb, p.p. 304.

vodik su područje stvaranja eksplozivne atmosfere i mogućnosti paljenja između 4% i 77%.

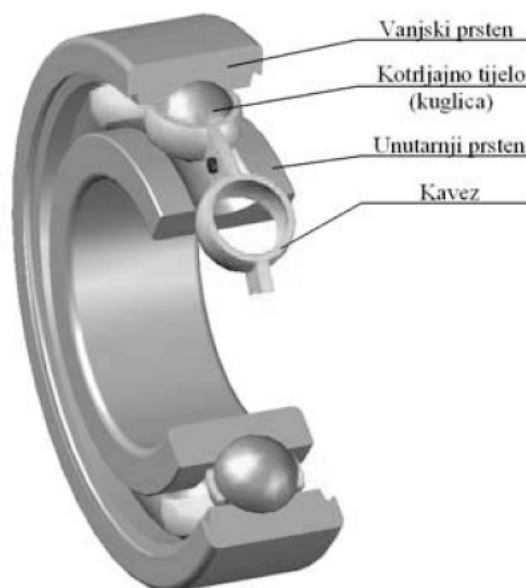
U industrijskim postrojenjima kao što su rafinerije, plinske platforme, petrokemijska industrija, termoelektrane, kemijska i farmaceutska industrija, kotlovnice, lakirnice, postaje tekućih goriva (PTG-benzinske postaje) koje u tehnološkom procesu upotrebljavaju zapaljive tvari ili gdje one nastaju u radnom procesu, pojavljuje se eksplozivna atmosfera. Prostori ugroženi eksplozivnom atmosferom plinova i para u industriji klasificiraju se u zone opasnosti sukladno normi HRN EN 60079-10-1, a prašina prema HRN EN 60079-10-2. U industrijskim postrojenjima neizostavno dio tehnologije rada je rotacijska, strojarska i električna oprema, odnosno rotacijska oprema koja barem u jednom svojem dijelu upotrebljava rotaciju kao gibanje, a to su od strojarske (neelektrične) rotacijske opreme pumpe, kompresori, ventilatori, reduktori, elevatori, pužni i trakasti transporteri i dr., a od električne elektromotori.

Uz eksplozivne atmosfere plinova i para, sljedeća opasnost u kojoj se mogu pojaviti rotacijska oprema, a ima različiti karakter od eksplozije plinova i para je eksplozivna atmosfera zapaljive prašine. Eksplozije prašina mogu se očekivati u farmaceutskoj, kemijskoj i prehrambenoj industriji, obradi drva, silosima, proizvodnji pića, metalurgiji, termoelektranama, određenim rafinerijskim sektorima (koks), rudarstvu i drugdje. Više od 70% prašina koje se pojavljuju u industriji su zapaljive. Sve čestice manje od 500  $\mu\text{m}$  smatraju se prašinom. Što su čestice zapaljive prašine manje, potrebna je i manja inicijalna energija za paljenje. Postoje dva tipa zapaljive prašine iz koje se može razviti eksplozivna atmosfera. Prvi je tip uzvitlana prašina (oblak) u zraku koja može činiti eksplozivnu atmosferu koja se ponaša približno jednako kao i atmosfera zapaljivih plinova i zraka. Drugi tip zapaljive prašine iz kojeg se može razviti eksplozivna atmosfera je nataložena prašina (sloj) koja se može na bilo koji način uzvitlati i stvoriti eksplozivnu atmosferu. Osim toga, i prašina nataložena na zagrijanu (vruću) površinu može se zapaliti ako je temperatura zagrijane površine iznad temperature tinjanja sloja nataložene prašine, čije paljenje

može također uzrokovati vitlanje preostale prašine i kao daljnju posljedicu izazvati eksploziju oblaka prašine.

## UČESTALOSTI KVAROVA U OPREMI

Kvarovi su u električnoj ili strojarskoj opremi glavni uzroci pojave uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere, a njihova pojava je posljedica normalnog rada (eksploatacije) same opreme. Više od 80% svih grešaka koje se pojavljuju u opremi vode u stanje kvara (*Thorsen, Dalva, 2008.*). Toplina generirana u opremi opasna je ako uzrokuje temperature više od temperature paljenja plinova, para i prašine. Jedan od temeljnih elemenata svake rotacijske, strojarske i električne opreme u kojem se generira, u normalnom radu ali i u kvaru, znatna toplinska energija su ležajevi (slika 1). Ležajevi, ali i ostali elementi (npr. brtvenice) u rotacijskoj opremi koja se nalaze u eksplozivnoj atmosferi čine potencijalne uzročnike paljenja i to djelovanjem vrućih površina, mehaničkih iskri, vrućih čestica i drugog (*Thorsen, Dalva, 1999., Rumbak, 2009., Rumbak et al., 2010.*). Uzročnici paljenja eksplozivne atmosfere plinova, para i prašine definirani su normom HRN EN 1127-1.

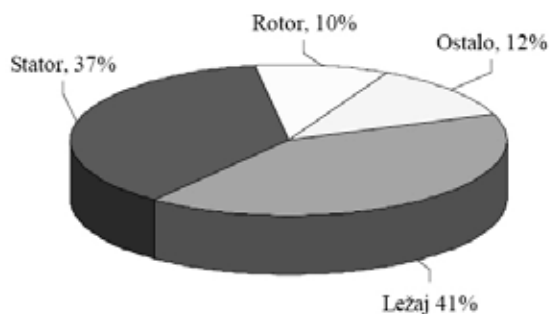


Slika 1. Radijalni kotrljajni kuglični ležaj  
Figure 1. Radial ball bearing

U industrijskih postrojenja u kojima se pojavljuje eksplozivna atmosfera (zone opasnosti) od posebne je važnosti, pri provedbi analizi predviđenih mjera protueksplozijske zaštite, dijagnosticiranje stanja, odnosno kvarova koji mogu izazvati pojavu djelotvornih uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere. Nužno je nadzirati promjene stanja opreme ili njezinih dijelova, posebice u cilju otkrivanja kvara u samoj početnoj fazi nastanka prije pojave djelotvornog uzročnika paljenja. Kvarovi ležaja u strojarskoj ili električnoj opremi su vrlo kritični jer uvijek uzrokuju oštećenja i pojavu uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere (Rumbak, 2009.).

### Učestalosti kvarova u rotacijskoj električnoj opremi

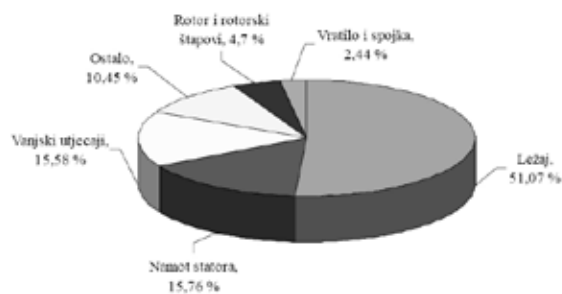
Elektromotori čine veći dio rotacijske električne opreme u industriji s eksplozivnom atmosferom. Veliki broj istraživanja i studija provedeni su zbog analize kvarova elektromotora prema vrstama i učestalosti kvarova. Jedno od najvećih istraživanja provela je tvrtka „General Electric Company”, a zabilježena su u EPRI studijama (eng. *Electric Power Research Institute*). EPRI studije (EPRI, 1982.) obuhvaćaju analize preko 5000 elektromotora, od čega je otprilike 97% trofaznih kaveznih elektromotora. EPRI studije (slika 2); (EPRI, 1982, Thornton, Armintor, 2003.) prikazuju učestalosti razdiobe kvarova po komponentama elektromotora koji rade u različitim primjenama i u nekoliko različitih grana industrije (plinska, petrokemijska i rafinerijska) s eksplozivnom atmosferom.



Slika 2. Učestalost kvarova komponentata u elektromotoru

Figure 2. Incidence of failure in electro motor components

Analizom 483 visokonaponskih asinkronih elektromotora u petrokemijskoj industriji s eksplozivnom atmosferom dobivena je razdioba učestalosti kvarova prikazana na slici 3. Učestalost kvarova komponenti elektromotora koji rade u težim uvjetima okoliša (vlaga, temperatura, vibracije i dr.) i koji se nalaze na otvorenom prostoru (u kopnenim i pomorskim postrojenjima) može biti 2,5 puta veća od stope učestalosti kvarova za elektromotore koji se nalaze u zatvorenom prostoru (Thorsen, Dalva, 1999.). Uspoređujući razdiobe učestalosti kvarova komponentata kod elektromotora prikazane slikom 3 (Thorsen, Dalva, 1999., 2008.) s onima koji su dobiveni EPRI studijom (slika 2), postaje jasno da nastanak određene vrste kvara ovisi o specifičnoj primjeni i okolišu u kojem uređaj radi, ali s neznatnim razlikama u redosljedju i udjelima u učestalosti. Razdiobe na slikama 2 i 3 ukazuju na ležaj kao element kod elektromotora u kojem se pojavljuje najviša učestalost kvarova.

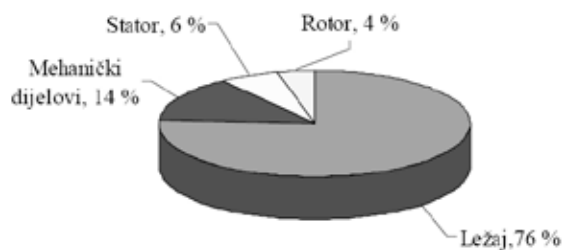


Slika 3. Razdioba učestalosti kvarova komponentata u elektromotorima u petrokemijskoj, naftnoj i plinskoj industriji te plinskim platformama

Figure 3. Incidence of failure in electro motor components, petrochemical, oil and gas industry and on gas platforms

Mnoga druga istraživanja, također, analiziraju kvarove koji se pojavljuju u elektromotorima te navode ležajeve i mehaničke kvarove kao najučestalije od svih kvarova. Istraživanja koje je provedeno na 6.000 elektromotora (Thornten, Armintor, 2003.) ukazalo je da mehanički kvar u elektromotoru sudjeluje s visokih 53%, a ležaj pojedinačno s 41% (slika 2). Kotrljajni ležaj (slika 1) u elektromotorima od

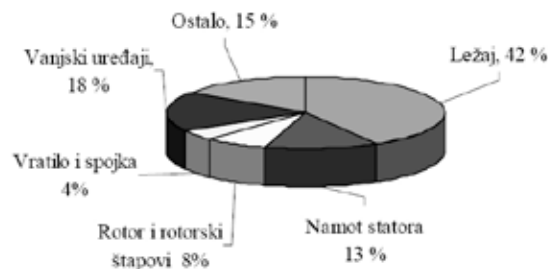
svih kvarovima sudjeluje najučestalije, a prema mnogobrojnim izvorima i s više od 50%. Kod elektromotora male i srednje snage do 150 kW koji su najzastupljeniji u industrijskim postrojenjima s eksplozivnom atmosferom uobičajeno se upotrebljavaju kotrljajni ležajevi (Rumbak, 2009.). Također mnogi članci navode ležaj kao pojedinačni element s najvećom učestalošću pojave koja iznosi od 40% do 50% svih kvarova u elektromotoru. Studije su pokazale da se kvarovi ležaja oko 12 puta učestalije pojavljuju u elektromotorima pogonjenim preko frekvencijskih pretvarača nego onih direktno pogonjenih (Kerszenbaum, 1992., Burbidge, 1993.). Istraživanja provedena u postrojenjima kemijskih tvornica „BASF AG“ i „Hüls AG“ u kojima se pojavljuje eksplozivna atmosfera pokazala su da kvarovi ležaja imaju iznimno visoku učestalost pojave kvarova i to od čak 76%, slijede ostali mehanički dijelovi 14%, namot statora 6% i kvarovi namota rotora 4% (Bieniek, 1998., EPRI, 1982.); (slika 4). Naftna kompanija „Shell“ navodi da je u njihovim rafinerijama 91% svih problema i kvarova s elektromotorima uzrokovano ležajevima. Prema razdiobama učestalosti koje navode korisnici petrokemijskih i rafinerijskih postrojenja u SAD-u pokazuju da oko 60% svih kvarova elektromotora potječu od ležaja (Bloch, 2004.). To se i slaže s učestalošću kvarova ležaja kod elektromotora prema uglednim i mjerodavnim institucijama i konferencijama u SAD-u (Tablica 2).



Slika 4. Razdioba učestalosti kvarova komponentata elektromotora u tvrtkama „BASF AG“ i „Hüls AG“

Figure 4. Incidence of electro motor failure in companies 'BASF AG' and 'Hüls AG'

Opsežna studija analizira učestalosti kvarova na velikom uzorku (25.652 kom.) elektromotora ugrađenih na plinskim platformama, petrokemijskoj industriji i rafinerijama (Thorsen, Dalva, 2008.). Prema toj studiji najučestaliji kvarovi pojavljuju se u ležajevima 51,07%, slijede kvarovi u statorskom namotu s 15,76% (slika 3). Studija Thorsena i Dalve (2008.) analizira i učestalost kvarova na većem broju (434 kom.) visokonaponskih elektromotora (od 5001 V do 15000 V); (slika 5 - Thorsen, Dalva, 2008.).



Slika 5. Razdioba učestalosti kvarova kod visokonaponskih elektromotora

Figure 5. Incidence of failure in high-voltage electro motors

Rezultati istraživanja prikazuju da kod visokonaponskih elektromotora nema značajnije razlike u redosljedu i učestalosti kvarova u odnosu na ostale prikazane razdiobe (IEEE, EPRI, i dr.); (*Donnell, 1985., Thorsen, Dalva, 2008.*). Uspoređujući mjerodavne i višegodišnje analize razdioba učestalosti kvarova u elektromotorima uočava se neznatna razlika u njihovoj učestalosti dok je u njima svima ležaj najučestaliji uzrok kvarova (Tablica 1).

### Učestalosti kvarova u rotacijskoj strojarskoj opremi

Kod strojarske rotacijske opreme prvi po učestalosti kvarova su kvarovi ležaja, slijede neuravnoteženost i ekscentričnost rotora (*Girdhar, Moniz, 2005.*). Istraživanjem kvarova u crpkama (*EPRI, 1978.*) prvi po učestalosti sa 49% su mehanički kvarovi koji uključuju brtvenicu i ležajeve, od toga kvarovi ležajeva iznose 22%.

**Tablica 1. Usporedba učestalosti razdioba kvarova u elektromotorima prema različitim izvorima**

**Table 1. Comparative incidence of failures in electro motors according to different sources**

Komponenta elektromotora	Izvor:					
	( <i>Edward et al., 2003.</i> )	( <i>Donnell, 1985.</i> )	IEEE, ( <i>EPRI, 1985.</i> )	EPRI, ( <i>EPRI, 1982.</i> )	( <i>Curtis, 2002.</i> )	( <i>Thorsen, Dalva, 1995., 1997., 1999., 2008.</i> )
Ležaj	41%	45÷50%	44%	42%	45÷55%	51,07%
Stator	37%	30÷40%	26%	37%	26÷36%	15,76%
Rotor	10%	8÷12%	8%	10%	-	4,7%
Ostalo	12%	-	22%	12%	-	28,47%

**Tablica 2. Učestalosti kvarova ležaja kod elektromotora u SAD-u**

**Table 2. Incidence of bearing failure in electro motors in the USA**

Mjerodavne institucije i konferencije u SAD-u koje su provele istraživanja kvarova u elektromotorima	Učestalost kvarova ležaja
National Plant Engineering and Maintenance Conference	50%
IEEE Large Motor Reliability Survey	75%
Southwestern Electrical Repair Center	75%
EI Edison Electrical Institute	66%
Petrochemical Industry	75%
EPRI Electric Power Research Institute	66%
IEEE Technical Conference	84%
<b>Prosjek:</b>	<b>69%</b>

Istraživanje kvarova asinkronih strojeva (uzorak od 180 kom.); (*Ban et al., 1993.*) prikazalo je u potpunosti drugačiji redosljed i razdiobu učestalosti kvarova od svih koje se u ovom članku navode u referencama. Određeni radovi u RH pozivaju se u svojim istraživanjima i na tu razdiobu učestalosti kvarova (*Gavranić, 2010.*).

Budući da se više od polovice (57%) ležajeva upotrebljava u nekoj industrijskoj izvedbi, u SAD-u godišnji trošak ležajeva iznosi 1.3 milijarde dolara. Međutim, to ne uzima u obzir gubitak u proizvodnji, održavanju ili indirektnu štetu na drugim komponentama ili uređajima. Ležajevi su i vodeći uzročnik kvarova kod ventilatora (*EPRI, 1983.*) i kod parnih turbina (*EPRI, 1986.*).

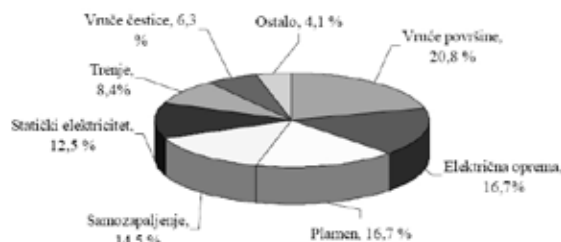
U istraživanju Rumbaka (2009.) je prikazano da oštećenje u ležaju koje nastaje već kod 2% vijeka trajanja izaziva pojavu uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere plinova i para svih skupina i temperaturnih razreda, kao i oblaka i naslaga prašina ugljena i pšeničnog brašna s visokim temperaturama paljenja. U istraživanju Henga i sur. (2009.) zaključeno je kako 85% kvarova ležaja nastupa unutar prvih 20% vijeka trajanja. U Republici Hrvatskoj kroz dosadašnja provedena istraživanja (Rumbak, 2009., Ranilović, 2006.) koja se odnose na industrijska postrojenja s eksplozivnom atmosferom vidljivo je da su mehanički uzročnici (ležajevi i brtvenice) prvi po učestalosti kvarova i prvi po duljini trajanja zastoja, što uzrokuje i najviše financijske troškove. Istraživanje Ranilovića (2006.) detaljno analizira nastanak kvarova u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom Rafinerije nafte Sisak. Analizom prikupljenih podataka u tom istraživanju u razdoblju od 1999. do 2005 godine (7 godina) u Rafineriji nafte Sisak najučestaliji kvarovi su kvarovi ležaja i brtvenica (Ranilović, 2006.).

## UČESTALOSTI UZROKA EKSPLOZIJA U INDUSTRIJSKIM POSTROJENJIMA

U današnje vrijeme iz različitih informativnih sredstava saznajemo informacije o raznim eksplozijama u industrijskim postrojenjima. Međutim, vrlo rijetko dobivamo informacije što je uistinu djelovalo kao uzročnik paljenja eksplozivne atmosfere. Tako se vrlo često miješaju pojmovi požar i eksplozija. Razdioba učestalosti uzročnika paljenja dobivena na temelju 25.000 požara pokazuje da su mehanički uzročnici paljenja (vruće površine, mehaničke iskre, trenje i ležajevi) najučestaliji s učestalosti od 30%, slijede električna oprema sa 23%, zatim plamen sa 7%, statički elektricitet sa 1%, a 30% je ostalo (Crowl, 2003.). Potrebno je istaknuti da je ova razdioba uzročnika paljenja vrlo slična s razdiobama uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere, ali se ona odnosi na požar, a

ne na eksplozije. Nadalje, u kućanstvima ili u industriji u kojoj se ne pojavljuje eksplozivna atmosfera razdioba učestalosti uzročnika paljenja koji dovode do požara imaju u potpunosti drugačije učestalosti i razlikuju se u odnosu na učestalosti uzročnika paljenja kod industrije s eksplozivnom atmosferom. Ta činjenica svakako u mnogim slučajevima daje krivu predodžbu i mnogi ju svjesno ili nesvjesno preslikavaju u industriju s eksplozivnom atmosferom.

Istraživanjima Coxa i sur. (1990.), Hughesa, (2000.) i Nolana (1996.) dobivena je razdioba učestalosti uzročnika paljenja u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom (zonom opasnosti) zapaljivih plinova i para (slika 6 - Cox, et al, 1990., tablice 3 i 4). Na slici 6 razdioba učestalosti dobivena je na temelju uklanjanja nepoznatih uzročnika paljenja.



Slika 6. Učestalosti uzroka eksplozija plinova i para  
Figure 6. Incidence of the causes of gas and vapour explosions

Tablica 3. Učestalosti uzroka eksplozija plinova i para  
Table 3. Incidence of the causes of gas and vapours explosion

Uzročnik paljenja	Učestalost, %
Mehanički	36,6
Ljudski čimbenik	24,2
Vanjski uzročnik	14,0
Kombinirani uzročnici	12,5
Udari	5,7
Kemijske reakcije	4,2
Električni	1,1
Ostalo	1,8

Izvor: Hughes, 2000.

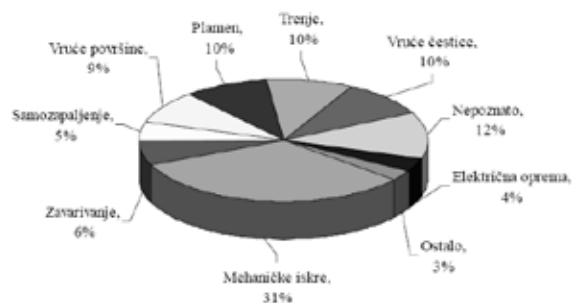
**Tablica 4. Učestalosti uzroka nesreća (s uzročnicima paljenja) eksplozivne atmosfere na „offshore“ postrojenjima u Meksičkom zaljevu**

**Table 4. Incidence of explosive atmosphere accidents (with source of ignition) at offshore plants operating in the Gulf of Mexico**

Uzrok paljenja/nesreće	Učestalost, %
Ispuštanje plina	22,2
Vruće površine	12,2
Mehanički kvar	9,8
Ispuštanje kapljevine	9,5
Električni uređaj	9,1
Istjecanje ulja iz motora ili prijenosnih kutija	3,7
Ispušni plinovi	2,4
Atmosferska pražnjenja	2,0
Otvoreni plamen	1,8
Mehanički udari	1,1
Statički elektricitet	0,5
Ostalo	25,7

Izvor: Nolan, 1996.

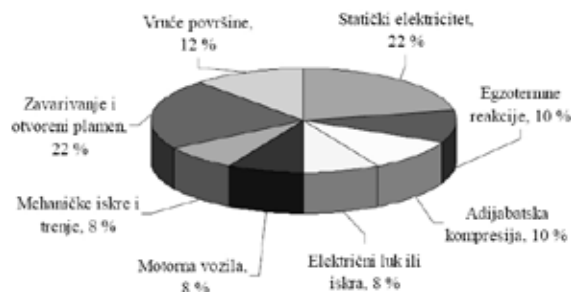
Vrlo su rijetke razdiobe učestalosti uzročnika paljenja plinova i para koje bi bile definirane od proizvođača opreme. Jedna od rijetkih prikazana je za tvrtku „Ecom instruments GmbH“ koja proizvodi raznu električnu opremu za eksplozivnu atmosferu (slika 7). Prema toj razdiobi također su mehanički uzročnici paljenja plinova i para najučestaliji.



*Slika 7. Razdioba učestalosti uzročnika paljenja plinova i para (eksplozija) prema proizvođaču električne opreme „Ecom instruments GmbH“*

*Figure 7. Incidence of the causes of gas and vapour combustion (explosion) according to 'Ecom instruments GmbH' manufacturer of electrical equipment*

Istraživanjem Plumba (2010.) dobivena je razdioba učestalosti uzročnika paljenja za opremu instaliranu u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom zapaljivih plinova i para (slika 8); (Plumb, 2010.).



*Slika 8. Učestalost razdiobe uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere (eksplozija) zapaljivih plinova i para*

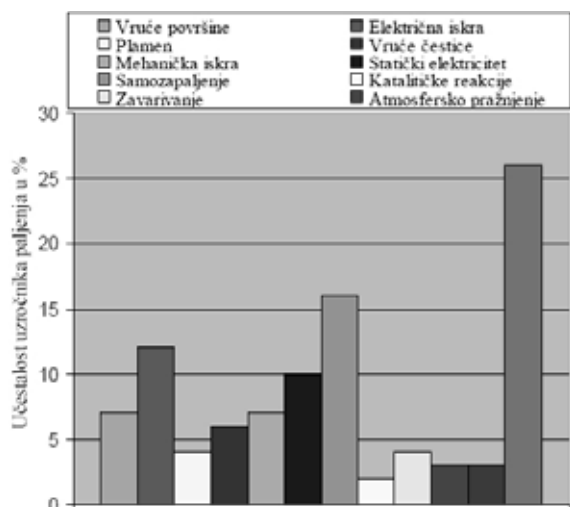
*Figure 8. Incidence of the causes of explosive atmosphere combustion (explosion) for flammable gases and vapours*

Uzroci eksplozija u postrojenjima koja procesiraju ugljikovodike dobiveni na temelju 30 godišnje analize prikazani su na slici 9 (M&M, 1992.), a vodika na slici 10 (Tersmette, 2005.).



*Slika 9. Uzroci eksplozija u postrojenjima koja procesiraju ugljikovodike na temelju 30-godišnjeg pregleda*

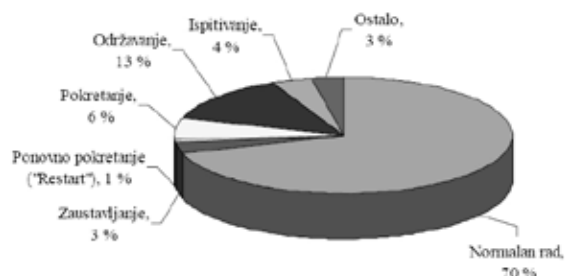
*Figure 9. Causes of explosion in hydrocarbon processing plants over 30 years*



Slika 10. Razdioba učestalosti uzroka eksplozija na postrojenjima s vodikom u razdoblju 1961.-1997.

Figure 10. Incidence of the causes of explosion in hydrogen plants from 1961 to 1997

Jedan od najvećih sustava izvješćivanja o najvećim nesrećama, sustav MARS (eng. Major Accident Reporting System); (Drogaris, 1991.) opisuje nastanak i razvoj paljenja eksplozivne atmosfere u ovisnosti o stanju rada postrojenja (slika 11 - Drogaris, 1991.).



Slika 11. Učestalosti neželjenog događaja prema stanju rada postrojenja

Figure 11. Unwanted event incidence according to the state of plant operation

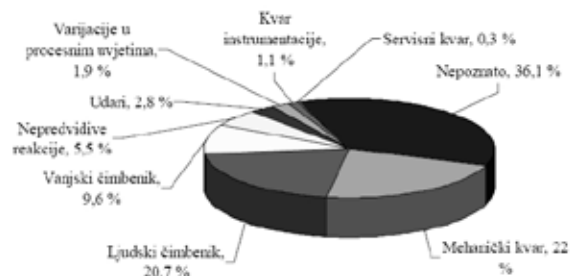
Općenito se može zaključiti da su mehanički uzročnici paljenja po svojoj učestalosti daleko najučestaliji uzročnici paljenja eksplozivne atmosfere plinova i para (Cox, et al., 1990., Hughes, 2000., Nolan, 1996., Tersmette, 2005.).

U Republici Hrvatskoj jedni od rijetkih radova koji su svoja istraživanja paljenja eksplozivne atmosfere temeljili na razdiobama učestalosti

uzročnika paljenja su Rumbak (2009.) i Gavranic (2010.). U godišnjim izvještajima tvrtke INA-Industrija nafte navodi se broj eksplozija koje su nastale od 1999. do 2005. u postrojenjima INA-e, a učestalosti se kreću u rasponu od 2 u 2004. godini do najviše 12 u 2001. godini (INA, 2005.).

### Uzroci eksplozija pri manipulaciji i prijevozu zapaljivih tvari

U istraživanjima provedenima na 5.325 nesreća utvrđeno je da se 8% svih nesreća dogodilo tijekom punjenja ili pražnjenja spremnika (Vi'chez et al., 1995., Planas-Cuchi et al., 1999.). Od toga jedan značajan udio i to od 20%, odnosno se na eksplozije, ostali čimbenici bili su ispuštanje zapaljive tvari sa 44% ali bez paljenja, požar sa 22% i ostalo. Razdioba uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere pri punjenju ili pražnjenju spremnika sa zapaljivim tvarima prikazani su na slici 12 (Planas-Cuchi et al., 1999.).



Slika 12. Uzroci eksplozija pri punjenju ili pražnjenju spremnika sa zapaljivim tvarima

Figure 12. Causes of explosion during filling and emptying of storage containers with flammable substances

U radu Oggera i sur. (2006.) prikazuju se uzroci nesreća pri prijevozu zapaljivih tvari s vrlo velikim uzrokom (12.369 nesreća) iz baze podataka MHIDAS (eng. Major Hazard Incident Data Service). Razdoblje koje je korišteno u istraživanju su pojedinačne dekade od 1930. do 2000. godine (Oggero et al., 2006.). Više od polovice nesreća dogodilo se na cesti (63%), a ostatak na željeznici (37%). Najčešće nesreće su ispuštanje zapaljive tvari (78%), slijede požari (28%), eksplozije (14%) i stvaranje oblaka zapaljivog plina ili pare (6%). U dekadama od 1981. do 1990. i od 1991. do 2000. vidi se značajan porast broja nesreća.



Na motornom vozilu za prijevoz zapaljivih tvari (autocisterna, vagon cisterna i lokomotiva) nalazi se veliki broj uređaja koji imaju uzročnike paljenja. Od strojarske opreme to su: motor, ispušni sustav, turbopuhalo, kočnice, prijenosni sustav, ležajevi, gume (statički elektricitet) i dr., a od električne pokretač, svjetiljke, akumulator, punjač. Približno jedna od svakih 9,5 nesreća izaziva eksploziju, jedna od svakih 3,5 nesreća uzrokuje nastanak požara i jedna od svakih 15 nesreća i požar i eksploziju. Prema analizi, 73,5% nesreća u cestovnom i željezničkom prometu uzrokovane su sudarom i iskliznućem vozila (autocisterne ili vlaka). Zatim slijedi mehanički kvar s učestalosti od 18%, ostali uzročnici su učestalosti od 8,5%. U mehaničkom kvaru najučestalije sudjeluju kvarovi ventila sa 29%, zamor materijala sa 12,9%, pregrijavanje sa 7,5% i korozija sa 5,4%. U RH već su neki od objavljenih radova ukazivali na paljenje eksplozivne atmosfere vozilima koja posjeduju motore s unutrašnjim izgaranjem, a ulaze u zone opasnosti (Kekić, 2006.).

Posebice treba skrenuti pozornost na postaje za točenje tekućih goriva (PTG-benzinske postaje) koje su vrlo specifična postrojenja jer pripadaju u industrijska postrojenja koja su pod opsegom Pravilnika o opremi i zaštitnim sustavima namijenjenim za uporabu u potencijalno eksplozivnim atmosferama i Pravilnika o najmanjim zahtjevima sigurnosti i zaštite zdravlja radnika te tehničkom nadgledanju postrojenja, opreme, instalacija i uređaja u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom, a u njih ulaze motorna vozila te se s njima koriste građani, odnosno needucirano osoblje u smislu protueksplozijske zaštite što nije slučaj s drugim industrijskim postrojenjima. S toga naslova PTG imaju veći rizik i opasnost od paljenja mehaničkim uzročnicima eksplozivne atmosfere.

## UČESTALOSTI UZROKA EKSPLOZIJA ZAPALJIVE PRAŠINE

Eksplozije zapaljivih prašina pojavljivale su se tijekom povijesti najranije u rudarskoj industriji, a u literaturi je moguće pronaći njihove opise od 1785. godine (Eckhoff, 2003.). Međutim, sustavne i analizirane podatke moguće je pronaći

tek od početka 20. stoljeća. Jedne od najranijih eksplozija prašine koje su analizirane dogodila se u skladištu u Torinu, Italija, a opisao ju je Morozzo 1795. godine i dao detaljnu analizu (Abbasi, Abbasi, 2007.). Eksplozije zapaljive prašine predstavljaju veću i rašireniju opasnost od eksplozije u procesnoj industriji i to zajedno eksplozije oblaka pare VCE (eng. *Vapour Cloud Explosions*) i eksplozije para nastalih zagrijavanjem tekućine BLEVE (eng. *Boiling Liquid Expanding Vapour Explosions*); (Abbasi, Abbasi, 2007.). Jedna od najvećih baza podataka o eksplozijama zapaljive prašine je baza podataka MHIDAS (eng. *Major Hazard Incident Data Service*) koja sadrži zapise o 9.655 eksplozija i to samo do konca 1998. godine. Druge značajne analize i istraživanja učestalosti uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere zapaljive prašine navedene su u radovima Eckhafa (2003.) za razdoblje 1900.–1959., Lunna (1992.) za razdoblje 1958–1967., Jeskea (1989.) za razdoblje 1965.–1985., Abbasija (2007.) za razdoblje 1911.–2004. i Schoeffa (2006.) za razdoblje 1996.–2005. Sve one ukazuju na mehaničke uzročnike kao najznačajnije uzročnike paljenja eksplozivne atmosfere s učestalostima između 33% i 65%.

Istraživanja Abbotta (1990.) i Portera (1989.) analiziraju 303 eksplozije prašine koje su se dogodile u Velikoj Britaniji između 1979. i 1988. te otkrivaju da trenje i mehanički kvar imaju najveću učestalost kao uzroci eksplozija sa 18%, slijede pregrijavanje i samozapaljenje sa 17%, a zatim plamen sa 15%. Također Gummer i Lunn (2003.) u istraživanjima eksplozija prašine navode trenje i mehaničke iskre kao najučestaliji uzrok eksplozija prašine sa 26%, slijede tinjajuća gnijezda sa 11%, a zatim mehaničko zagrijavanje sa 9%.

Razdioba eksplozija prašine u razdoblju od 1988. do 1997. nakon identificiranja uzročnika u 91% od 129 eksplozija prašine ukazuje da mehaničko trenje i ležajevi imaju učestalost od 25% te su najveći pojedinačni uzročnik paljenja (Schoeff, 1999.). U 426 eksplozija prašine u Republici Njemačkoj pokazuje da vruće površine, mehaničke iskre i trenje čine preko 40% svih uzročnika paljenja (Schoeff, 1999.). U rudnicima ugljena također najznačajniji uzročnik paljenja

eksplozivne atmosfere su mehanički uređaji i oprema sa 81%. Studija uvažene institucije za ispitivanja prašina, institut BIA (*BIA, 1997.*), navodi također mehaničke iskre i trenje s učestalosti od 32,7% kao najučestalije uzročnike paljenja eksplozivne atmosfere prašina (slika 13 - *BIA, 1997.*). Dosad se u RH već u radovima naših autora ukazivalo na najveću učestalost mehaničkih uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere prašina (*Rumbak, 2009., Mačković 2006.*).



Slika 13. Učestalosti uzroka eksplozija zapaljive prašine prema institutu BIA

Figure 13. Incidence of the causes of explosion of flammable dust according to BIA Institute

Usporedbe učestalosti uzročnika paljenja po mjestima (elevator, mlinovi) i načinima eksplozije (primarna eksplozija) u postrojenjima sa zapaljivim prašinama prikazane su u Tablici 5.

Tablica 5. Uzročnici paljenja u najznačajnijim eksplozijama prašine

Table 5. Source of ignition in the most serious dust explosions

Uzročnik paljenja		Učestalost, %		
		Primarna eksplozija (Spiegelman, 1981.)	Elevatori (Palmer, 1981.)	Mlinovi (Cross, 1982.)
Mehanički uzročnici	Zavarivanje	10	24,3	12
	Plamen	7,8	-*	12
	Trenje	8,5	-*	4
Električni		4,3	6	4
Munja		2,8	1,5	-*
Stat. elektricitet		4,5	1,5	-*
Nepoznato		60	25,7	34

\*Nema dostupnih zapisa.

Utvrđeno je da su mehaničke iskre najučestaliji uzročnici paljenja eksplozivne atmosfere zapaljivih prašina u silosima, mlinovima i postrojenjima za mljevenje (*Abbasi, Abbasi, 2007.*). Pražnjenje statičkog elektriciteta je najučestaliji uzročnik paljenja u postrojenjima s miješalicama koje sadrže eksplozivnu atmosferu zapaljive prašine polimernih materijala (*Abbasi, Abbasi, 2007.*). Od 269 eksplozija prašine koje su se dogodile u Japanu između 1952. i 1990. također je utvrđeno da su mehanički uzročnici i statički elektricitet prvi po učestalosti pojave. U kontekstu ovih opažanja u istraživanju Eckhoffa (*2006.*) iznijeto je razmišljanje da je revizija postojećih europskih direktiva 94/9/EC i 1999/92/EC (ATEX direktive) hitno potrebna kako bi se razjasnile važne temeljne razlike između paljenja zapaljivih prašina i plinova/para.

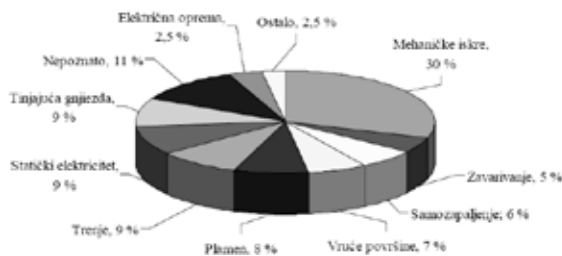
CSB (eng. *Chemical Safety and Hazard Investigation Board*) u SAD-u ima niz izvješća koja se bave istragama uzroka ozbiljnih incidenata eksplozija prašine koji su se dogodili u SAD-u tijekom posljednjih godina (*web stranica CSB-a*). Jedna od najvećih eksplozija prašine koje su se dogodile u posljednje vrijeme uzrokovana je ležajem (mekanički uzročnik) 7. veljače 2008. u tvrtki „Imperial Sugar Company“ u Port Wentworth, Georgia (slika 14). CSB je izradio izvješće, ali i videosimulaciju te eksplozije prašine koju je moguće vidjeti na internet stranici CSB-a.



Slika 14. Posljedice eksplozije uzrokovane ležajem u postrojenju tvrtke „Imperial Sugar Company“

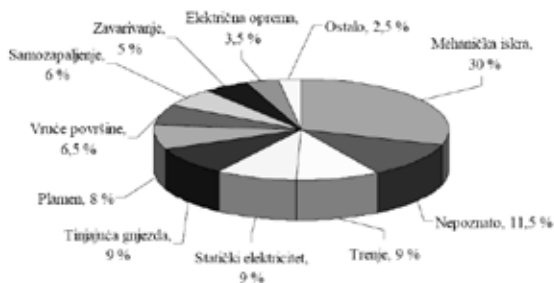
Figure 14. Consequences of the explosion caused by a bearing in a plant of the 'Imperial Sugar Company'

Proizvođači električne opreme „Stahl“ (slika 15) i „Bartec“ (slika 16) u svojim izvještajima i publikacijama prikazuju u potpunosti identične učestalosti kao i spomenute studije, navodeći mehaničke uzročnike (mehaničke iskre, vruće površine, trenje, plamen) kao najučestalije uzročnike paljenja eksplozivne atmosfere.



Slika 15. Razdioba uzroka eksplozija zapaljive prašine prema proizvođaču „Stahl“

Figure 15. Causes of dust explosion according to 'Stahl' manufacturer



Slika 16. Razdioba uzroka eksplozija zapaljive prašine prema proizvođaču „Bartec“

Figure 16. Causes of dust explosion according to 'Bartec' manufacturer

## ZAVRŠNI OSVRT

Strojarska oprema, mehanički uzročnici, trenje i vruće površine uz ležajeve predstavljaju najznačajnije i najučestalije uzroke eksplozija u industrijskim postrojenjima. Učestalost mehaničkih uzročnika kreće se od 40% do 80% od svih uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere plinova, para i prašine, a električna oprema sudjeluje kao uzrok eksplozija od 1% do 5%.

Današnja metodologija protueksplozijske zaštite temelji se na primjeni zakonskih propisa u Republici Hrvatskoj (Pravilnika o opremi i zaštitnim sustavima namijenjenim za uporabu

u potencijalno eksplozivnim atmosferama i Pravilnika o najmanjim zahtjevima sigurnosti i zaštite zdravlja radnika te tehničkom nadgledanju postrojenja, opreme, instalacija i uređaja u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom), a u Europskoj uniji direktiva 94/9 EC i 1999/92 EC. Pokazalo se da dosadašnja tradicija i metodologija protueksplozijske zaštite u RH kao i u gospodarski razvijenim i uređenijim zemljama Europe i svijeta nisu jamstvo sigurnosti od raznih oblika paljenja eksplozivne atmosfere, odnosno eksplozija. U našoj zemlji i svijetu primjera je u zadnjih godina bilo na pretek, a svojim kobnim posljedicama ukazuju na što prije poboljšavanje postojećih i primjenu novih mjera za povećanje sigurnosti. To je nedvojbeno vidljivo iz velikog broja razdioba učestalosti, ali to i pouzdano pokazuju tvrtke koje se primarno bave proizvodnjom električne opreme. U bliskoj budućnosti i nadalje ignoriranje rješavanja strojarske (neelektrične) opreme i primjene novih mjera zaštite na one fizikalne veličine, elemente i komponente u uređajima u kojima se pojavljuju najučestalije uzročnici paljenja predstavlja našu stručnu i moralnu odgovornost za štetu na imovini i ljudskim životima što se ničim neće moći opravdati. Današnja metodologija protueksplozijske zaštite se temeljno oslanja na to da je opasnost u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom zbog uporabe opreme i njihovih instalacija otklonjena pravilnom konstrukcijom, certifikacijom i instalacijom uređaja. Takvo poimanje protueksplozijske zaštite koja se temeljno oslanja na ispunjavanje samo zahtjeva iz normativnih dokumenata treba dopuniti suvremenim znanstvenim spoznajama. Te spoznaje jednostavno se iščitavaju iz svih prikazanih razdioba učestalosti kvarova u opremi i uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere nastale na temelju eksplozija u zadnjih nekoliko desetljeća. Ono što posebice zabrinjava u današnjoj metodologiji protueksplozijske zaštite je različitost pristupa u zahtjevima normi za komponente i elemente koji su pojavljuju i koji su identični i u električnoj i strojarskoj opremi. Jedna od takvih komponenti su i ležajevi koji su prvi po učestalosti pojave kvarova u rotacijskoj, električnoj i strojarskoj opremi, kao i prema učestalosti pojave uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere plinova, pare i prašine.

Nužno je potreban sustavan i integralni pristup rješavanju ove tematike i stalno praćenje znanstvenih i stručnih istraživanja koji su temeljeni upravo na najnovijim iskustvima i razdobljima učestalosti uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere, uvažavajući istodobno sva dosadašnja pozitivna iskustva protueksplozijske zaštite. Praćenje i primjena znanstvenih i stručnih radova je nužna jer poznavajući činjenicu da za jedno novo izdanje norme u kojem se navode poboljšani koncepti i mjere zaštite treba proteći najmanje 5 godina. To ukazuje da izdavanjem normi na neki način već kasnimo približno 5 godina za tehničkim i tehnološkim spoznajama te mjerama zaštite (eng. *State of the Art*). Zakonski propisi u RH i EU obvezuju nas te posebno ističu primjenu novih znanja i rezultata istraživanja. To se posebno i navodi u prvoj točki bitnih zahtjeva Prilog II *Pravilnika o opremi i zaštitnim sustavima namijenjenim za uporabu u potencijalno eksplozivnim atmosferama* kod certifikacije uređaja i u članku 14 *Pravilnika o najmanjim zahtjevima sigurnosti i zaštite zdravlja radnika te tehničkom nadgledanju postrojenja, opreme, instalacija i uređaja u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom* kod provođenja tehničkog nadgledanja industrijskih postrojenja s eksplozivnom atmosferom. Svakako obveza primjene najnovijih znanja vezanih za strojarstvo (neelektričnu) opremu treba biti i u sklopu zahtjeva inspekcija ministarstva koje provode nadzor primjene navedenih pravilnika.

Svrha treba biti u najkraćem roku što prije neodgodivo iniciranje potrebe za promjenama postojećeg stanja u industriji s eksplozivnom atmosferom s primjenom suvremenih pristupa koje su rezultat novih znanstvenih spoznaja u protueksplozijskoj zaštiti u cilju podizanja sigurnosti sustava te zaštiti zdravlja i života radnika u industriji s eksplozivnom atmosferom.

## LITERATURA

- Abbasi, T., Abbasi, S.A.: Dust explosions—Cases, causes, consequences, and control, Review, *J. of Hazardous Materials*, no.140, 2007.
- Abbott, J. A.: *Prevention of Fires and Explosions in Dryers*, Institution of Chemical Engineers, Rugby, 1990.
- Ban, D., Wolf, R., Cettolo, M.: *Kompjuterizirana On-line dijagnostika stanja rotora asinkronih motora, IV međunarodni simpozij o novim tehnologijama*, EDZ, Pula, 1993.
- Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit (BIA)*: Report 11/97, Dokumentation Staubeexplosionen, Analyse und Einzelfalldarstellung, Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG), Dezember 1997.
- Bieniek: Energieverbrauch und Wirtschaftlichkeit bei elektrischen Antrieben in der verfahrenstechnischen Industrie – Cost of ownership von elektrischen Industrieantrieben*, VIK-Berichte 210, BASF AG, 1998.
- Bloch, H.: Lubrication Strategies for Electric Motor Bearings, *Machinery Lubrication Magazine*, January 2004.
- Burbidge, K.W.L.: Users view of variable speed drivers on petrochemical plant, *IEE Conf. Publ.*, 376, 1993., pp. 582-587.
- Cox, A.W., Lees, F. P., Ang, M. L.: *Classification of Hazardous Location Courtesy of Institution of Chemical Engineers*, IChem, London, UK, 1990.
- Cross, J.D.: *Farrer Dust Explosions*, Plenum Press, New York, 1982.
- Crowl, D.C.: *Understanding Explosion*, Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, New York, 2003.
- Curtis, L.: *Understanding the Tests that are Recommended for Electric Motor Predictive Maintenance*, Baker Instrument Company, Energy Publication, 2002.
- Donnell, P.O.: *Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations*, Part I and II. IEEE Trans. Indus.Applications, pp: 853-872, 1985.

Drogaris, G.: *MARS lessons learned from accidents notified*, Elsevier, Amsterdam, 1993.

Eckhoff, R.K.: *Dust Explosions in the Process Industries*, 3rd ed., Gulf Professional Publishing, USA, 2003.

Eckhoff, R.K.: Differences and similarities of gas and dust explosions: a critical evaluation of the European 'ATEX' directives in relation to dusts, *J. Loss Prevent. Process Ind.*, 19, 2006., 553–560.

Eckhoff, R.K.: *Dust Explosions in the Process Industries*, 3rd ed., Gulf Professional Publishing, Boston, USA, 2003.

Edward, J., Thornton, K., Armintor, J.: The fundamentals of AC Electrical Induction Motor Design and Application, *Proceeding of 20th International Pump Users Symposium*, Washington DC, 2003.

EPRI (Electric Power Research Institute): *Guidelines for Maintaining Steam Turbine Lubrication Systems*, Report CS-4555, July 1, 1986.

EPRI (Electric Power Research Institute): *Root-Cause Failure Analysis: Fossil-Fired Power Plant Draft Fans*, Report CS-3199, July 1983.

EPRI (Electric Power Research Institute): *Survey of Feed Pump Outages*, FP-754, April 1978.

EPRI: *Improved Motors for Utility Applications*, Publication EL-2678, Vol. 1, 1763-1, final report, October, 1982.

European Directive 1999/92 EC, Directive 1999/92/EC of the European Parliament and of the Council of December 16, 1999 on minimum requirements for improving the safety and health protection of workers potentially at risk from explosive atmospheres (15th individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC), 1999.

European Directive 94/9 EC, Directive 94/9/EC of the European Parliament and the Council, of March 23, 1994 on the approximation of the laws of the Member States concerning equi-

pmment and protective systems intended for use in potentially explosive atmospheres, 1994.

Gavranić, I.: *Procjena rizika primjene elektromotornih pogona u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom*, Doktorski rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb 2010.

Girdhar, P., Moniz, O.: *Practical Centrifugal Pumps Design, Operation and Maintenance*, Elsevier, Oxford, 2005.

Gummer, J., Lunn, G.A.: Ignitions of explosive dust clouds by smouldering and flaming agglomerates, *J. Loss Prevent. Process Ind.*, 16, 2003., 27–32.

Heng, A., Zhang, S., Tan, A.C.C., Mathew, J.: Rotating machinery prognostics: State of the art, challenges and opportunities, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23, 2009., 724–739.

Hughes, G., Hanif, S.: *A Comparison of Accident Experience With Quantitative Risk Assessment (QAR) Methodology*, Contract Research Report 293/2000, Det Norske Veritas Ltd, Stockport, 2000.

IEEE Committee Report: *Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations*, Part I and Part II, IEEE Trans. Ind. Applicat. Vol. IA-21, no.4, pp.853-872, July/Aug. 1985.

Godišnje izvješće o zaštiti zdravlja, sigurnosti i zaštiti okoliša za 2005. godinu, INA-Industrija nafte d.d., Zagreb, 2005. Dostupno na: [http://www.ina.hr/UserDocImages/g\\_izvjescia\\_pdf/HSE\\_GI\\_AR\\_2005.pdf](http://www.ina.hr/UserDocImages/g_izvjescia_pdf/HSE_GI_AR_2005.pdf). Pristupljeno: 20.9.2010.

Jeske, A., Beck, H.: Evaluation of dust explosions in the Federal Republic of Germany, *Euro-pEx Newslett.*, 9, 1989.

Kerszenbaum, I.: Shaft currents in electric machines fed by solid-state drives', *IEEE Conference on Industrial and Commercial Power Systems*, Pittsburgh-PA, USA, May 4-7, pp. 71-79., 1992.

Kekić, G.: Motori s unutarnjim izgaranjem u protueksplozijskoj zaštiti, *Ex-Bilten*, br. 1/2, 2007.

*Large property losses in the HC-chemical ind., a 30 year review*, 14th edition, M&M Protection Consultants, 1992.

Lunn, G.: *Dust Explosion Prevention and Protection*, Part 1. Venting, 3rd ed., Institution of Chemical Engineers, London, UK, 1992.

Mačković, M.: Fizikalni pokazatelji zapaljivih (eksplozivnih) prašina, *Ex-Bilten*, br. 2, 2006.

Nolan, D. P.: *Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles for Oil, Gas, Chemical and Related Facilities*, Noyes Publications, New Jersey, 1996.

Oggero, A., Darbra, R.M., Munoz, M., Planas, E., Casal, J.: A survey of accidents occurring during the transport of hazardous substances by road and rail, *Journal of Hazardous Material*, 133, 2006., 1-3, pp 1-7.

Palmer, K.N.: *Dust explosions: basic characteristics, ignition sources and methods of protection against explosions*, The Hazards of Industrial Explosion from Dusts, Oyez/IBC, London, 1981.

Planas-Cuchi, E., Viñchez, J.A., Casal, J.: Fire and explosion hazards during filling/emptying of tanks, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 12, 1999., 479-483.

Porter, B.: Industrial incidents, in: Paper Presented at Dust Explosions: *Assessment, Prevention and Protection*, London, November 24, 1989.

*Pravilnik o najmanjim zahtjevima sigurnosti i zaštite zdravlja radnika te tehničkom nadgledanju postrojenja, opreme, instalacija i uređaja u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom*, N.N., br. 39/06.

*Pravilnik o opremi i zaštitnim sustavima namijenjenim za uporabu u potencijalno eksplozivnim atmosferama*, N.N., br. 34/10.

*Priručnik tvrtke "Ecom instruments GmbH"*, Dostupno na: <http://www.ecom-ex.com/fileadmin/PDF/KatUK.pdf>, Pristupljeno: 20.9.2010.

Ranilović, M.: *Unapređenje gospodarenja tehničkim sustavima u rafineriji nafte, magistarski rad*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2006.

Rumbak, S., Mudronja, V., Šakić, N., Cajner, H., Bogut, M.: Analysis of ignition risk to ball bearings in rotating equipment in explosive atmospheres, *Petroleum and Chemical Industry Conference Europe*, PCIC Europe 2010, 15-17 June 2010, Oslo, Norway

Rumbak, S.: *Istraživanje učinaka oštećenja kotrljajnog ležaja u eksplozivnoj atmosferi*, Doktorska disertacija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.

Schoeff, R.W.: Case Study of Dust Explosion at DeBruce Grain Co. Terminal Elevator, Haysville, Kansas., *3rd Worldwide Seminar on the Explosion Phenomenon and on the Application of Explosion Protection Techniques in Practice*, Ghent – Belgium, 1999.

Spiegelman, A.: *Risk management from an insurer's standpoint*, The Hazards of Industrial Explosion from Dusts, Oyez/IBC, London, 1981.

Tersmette, W.: *Canadian Upstream Oil and Gas Industry Fire and Explosion Incident Analysis*, Based on the Investigative Work of the IRP18 Committee working with the University of Calgary Department of Chemical and Petroleum Engineering, 2005.

Thornten, E. J., Armintor, J. K.: *The Fundamentals of AC Electric Induction Motor Design And Application*, Turbomachinery Laboratory, Texas A&M University, College Station, 2003.

Thornton, E.J., Armintor, J.K.: The fundamentals of AC electric induction motor design and application, *Proceedings of the twentieth international pump users symposium*, 2003.

Thorsen, O. V., Dalva, M: Failure identification and analysis for high voltage induction motors in the petrochemical industry, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 35, 1999., 4, pp. 810-818.

Thorsen, V., Dalva M.: A Survey of Faults on Induction Motor sin Offshore Oil Industry, Petrochemical Industry, Gas Terminals, and Refineries, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 31, 1995., 5.

Thorsen, V., Dalva M.: Condition Monitoring Methods, Failure Identification nad Analysis for High Voltage Motors in Petrochemical Industry, *Proc 8th IEE Int. Conf. EMD 97*, University of Cambridge, No. 444, pp 109-113. 1997.

*U.S. Chemical Safety And Hazard Investigation Board*, Investigation Report, Report No. 2008-05-I-GA, September 2009, dostupno na: [http://www.csb.gov/assets/document/Imperial\\_Sugar\\_Report\\_Final\\_updated.pdf](http://www.csb.gov/assets/document/Imperial_Sugar_Report_Final_updated.pdf), pristupljeno: 20.9.2010.

Vílchez, J. A., Sevilla, S., Montiel, H., & Casal, J.: Historical analysis of accidents in chemical plants and in the transportation of hazardous materials, *Journal of Loss Prevention in the Process Industry*, 8, 1995., 2, 87-96.

### **BEARINGS – SOURCE OF IGNITION OF THE EXPLOSIVE ATMOSPHERES**

*SUMMARY: The paper studies bearings as the most common cause of failures in rotating, mechanical and electrical equipment and also the causes of explosions in industrial plants with explosive atmosphere made up of gases, vapours and dust particles. Presented is the incidence of failure in rotating equipment and the incidence of explosions, i.e. source of ignition in explosive atmosphere, in the context of a critical evaluation of the to-date methods of explosion protection. The presented incidence of failures in mechanical and electrical equipment and source of ignition in explosive atmosphere was arrived at by gathering relevant data in a number of industrial plants where explosive atmosphere is a threat.*

**Key words:** bearing, explosive atmosphere, source of ignition, failure, frequency distribution

*Subject review  
Received: 2010-09-23  
Accepted: 2011-09-08*