

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Ivica Gavranić

**PROCJENA RIZIKA
PRIMJENE ELEKTROMOTORNIH POGONA
U PROSTORIMA UGROŽENIM
EKSPLOZIVNOM ATMOSFEROM**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Zagreb, 2010.

Doktorska disertacija je izrađena u Zavodu za elektrostrojarstvo i automatizaciju Fakulteta elektrotehnike i računarstva u Zagrebu i u Agenciji za prostore ugrožene eksplozivnom atmosferom (Ex-Agencija) u Zagrebu.

Mentor: **Prof. dr. sc. Drago Ban**

Doktorska disertacija ima: 149 stranica i 34 stranice priloga i dodataka

Rad br.:

Povjerenstvo za ocjenu doktorske disertacije:

1. Dr. sc. Vladimir Mikuličić, redoviti profesor
Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva
2. Dr. sc. Drago Ban, redoviti profesor
Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva
3. Dr. sc. Igor Zorić, izvanredni profesor
Sveučilište u Zagrebu Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Povjerenstvo za obranu doktorske disertacije:

1. Dr. sc. Vladimir Mikuličić, redoviti profesor
Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva
2. Dr. sc. Drago Ban, redoviti profesor
Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva
3. Dr. sc. Igor Zorić, izvanredni profesor
Sveučilište u Zagrebu Rudarsko-geološko-naftni fakultet
4. Dr. sc. Ivan Gašparac, redoviti profesor
Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva
5. Dr. sc. Luka Korkut, izvanredni profesor
Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva

Datum obrane disertacije: 26. ožujka 2010. godine

Posvećujem svojim roditeljima
Mari i Juri ...

Hvala vam,
Ivica

ZAHVALA

Ovom je doktorskom disertacijom zaokruženo jedno važno razdoblje u mom životu. Zahvala za pomoć u izradi ove disertacije pripada mnogim ljudima. Teško ih je sve nabrojati, ali svima se najljepše zahvaljujem.

Veliko hvala mojem mentoru prof. dr. sc. Dragi Banu za sve sugestije, znanstvenu i stručni potporu, a posebice za poticaje da se disertacija dovede do kraja. Sretan sam i ponosan što sam cijelu svoju znanstvenu karijeru, od izrade diplomskog i magistarskog rada te na kraju i kroz izradu ove disertacije, gradio pod mentorstvom prof. dr. sc. Drage Bana.

Zahvaljujem članovima povjerenstva za ocjenu i obranu doktorske disertacije prof. dr. sc. Vladimiru Mikuličiću, prof. dr. sc. Igoru Zoriću, prof. dr. sc. Ivanu Gašparcu i prof. dr. sc. Luki Korkutu na dobronamjernim primjedbama i sugestijama koje su doprinijele podizanju znanstvene i stilske razine disertacije.

Hvala ravnatelju Ex-Agencije Ivanu Renduliću, dipl. oecc., na materijalnoj podršci kao i na podstreku za privođenje disertacije kraju.

Želim se zahvaliti i svim kolegicama i kolegama iz Ex-Agencije koji su pružali potporu izradi ove disertacije. Posebno hvala kolegi i prijatelju Stipi Dereku, dipl. ing. na nebrojenim i dugim diskusijama.

Posebno se zahvaljujem i prof. dr. sc. Nenadu Marinoviću čiji su savjeti i podrška tijekom cijele moje znanstvene i poslovne karijere bili poseban motiv.

Prof. dr. sc. Ljubi Maranguniću hvala na korisnim diskusijama i sugestijama.

Tvrtci Mato-el-d d.o.o i gosp. Mati Duvnjaku hvala na pruženoj tehničkoj potpori kod provedbe laboratorijskih ispitivanja.

Hvala mojim roditeljima Mari i Juri za njihovu ljubav, trud i odricanje tijekom cijelog mog obrazovanja, od prvoškolske klupe do doktorske disertacije.

I na kraju, najveća hvala dragoj Romani na bezgraničnoj potpori i ljubavi koju mi je pružala tijekom izrade ove disertacije.

Ivica Gavranić

PREDGOVOR

Strahovi od neželjenih pojava, kao što su npr. smrtna stradavanja, ozljede i gubici materijalnih vrijednosti te predviđanje mogućnosti da se iste dogode i poduzimanje aktivnosti za njihovo sprječavanje ili ublažavanje zasigurno spadaju u najstarija čovjekova iskustva. Od davnina su to bili pojmovi za koje se smatralo da ih određuje sudbina, bogovi ili nešto treće, nešto čovjeku nedokučivo. Danas se to naziva rizicima i njihova se pojavnost predviđa analizom vjerojatnosti. Čovjek je u svom životu neprestano izložen rizicima na koje može, manje ili više, utjecati i na taj ih način uspješno ili neuspješno izbjegavati, odnosno sprječavati neželjene posljedice. Ponekad je, u ljudskoj naravi, prisutna i želja za namjernim suočavanjem s rizikom, kao što je npr. uživanje u ekstremnim aktivnostima i sportovima ili drevna strast za kockanjem.

Proučavanje, analiza i procjena rizika ima svoju dugu kronologiju nastanka. Jedan od ranih i često citiranih radova je rad Van Bortkiewicza iz 19. stoljeća u kojemu on proučava broj Pruskih vojnika iz sastava konjice koji godišnje pogibaju od udarca konja kopitom [118]. Svoj ozbiljniji razvoj kvantitativne metode procjene rizika doživljavaju četrdesetih godina prošlog stoljeća kroz primjenu u zrakoplovnoj industriji, a potom i šezdesetih godina kroz Apollo program. Najsnažniji poticaji razvoju metoda i primjeni procjene rizika dolazili su iz nesreća koje se događaju i njihovih tragičnih posljedica. Početkom osamdesetih godina prošlog stoljeća javlja se veliki interes stručne i znanstvene javnosti za kvantitativnim metodama procjene rizika, dok se u devedesetim u najširoj javnosti rađaju velika očekivanja kako će primjena kvantitativnih metoda procjene rizika moći precizno i pouzdano odgovoriti na izazove i nesigurnosti vezane uz tehnološke rizike. U kojoj je mjeri kvantitativna procjena rizika odgovorila na postavljene izazove teško je procijeniti, ali je sigurno da je postala nezaobilazna znanstvena disciplina u svim procesima i poljima ljudske djelatnosti kod donošenja raznih ocjena, predviđanja i u konačnici kod donošenja odluka.

Tehnički su rizici jedna od vrsta rizika kojima su čovjek i njegov okoliš često izloženi. Dobra je strana ovih rizika što ih se, u pravilu, može predvidjeti odnosno prepoznati, ocijeniti vjerojatnost njihovog nastanka te procijeniti moguće posljedice. Težnja za prepoznavanjem i predviđanjem tehničkih pojava i stanja koji mogu dovesti do neželjenih posljedica (npr. do nastanka eksplozije), kao i definiranje mjera za njihovo izbjegavanje, ublažavanje i/ili sprječavanje, bili su glavna pokretačka snaga pri izradi ove doktorske disertacije.

U tehničkim je postrojenjima velik broj mogućih izvora rizika odnosno neželjenih događaja. Primjena elektromotornih pogona (EMP) u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom (npr. eksploatacija i prerada nafte i plina, kemijska i farmaceutska industrija) jedan je od mogućih uzroka pojave eksplozije odnosno izvora rizika. Upravo je analiza ovog rizika glavna tema ovog rada.

Dugogodišnji rad na području protueksplozijske zaštite, izrada magistarskog rada pod naslovom „Dijagnostika protueksplozijski zaštićenih elektromotornih pogona“, objava članaka i rezultata istraživanja iz ovog područja, na domaćim i međunarodnim konferencijama, te sudjelovanje u međunarodnoj normizaciji iz područja protueksplozijske zaštite dali su mi inicijalni poticaj i povod za daljnje istraživanje u ovom području. Ova je disertacija primarno usmjerena na prepoznavanje kvarova asinkronog elektromotora, na vjerojatnosnu analizu pojave takvih kvarova i mogućnosti istovremene pojave eksplozivne atmosfere, a što za konačni cilj ima provedbu procjene rizika od pojave eksplozije. Važna je vodilja ove disertacije i težnja za objedinjavanjem znanja i alata iz područja dijagnostike elektromotora i iz područja procjene rizika, u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom i s ciljem izbjegavanja najgoreg scenarija - eksplozije.

Procjena rizika, u okviru ove disertacije, temelji se na primjeni teorije vjerojatnosti. Gotovo sve primjene teorije vjerojatnosti polaze od toga da poznavanje prethodnih događaja može koristiti u predviđanju budućnosti. Iskustva u prepoznavanju odnosno detektiranju kvarova rotora elektromotora iskorištena su za predviđanja mogućih kvarova u budućnosti. Sposobnosti pojedinih vrsta i razina kvarova, detektiranih primjenom temeljnih i specijalističkih dijagnostičkih ispitivanja, da postanu učinkoviti uzročnici paljenja eksplozivne atmosfere istraženi su i utvrđeni u laboratorijskim uvjetima u eksplozivnoj atmosferi. Procjena rizika pojave eksplozivne atmosfere je provedena primjenom kvalitativnih i kvantitativnih metoda.

Ograničenost uzoraka za ispitivanje ili ograničenost iskustva odnosno statistike ne smiju biti uzrok za odbacivanje opće primjene procjene rizika temeljene na primjeni teorije vjerojatnosti. Ispitivanje novih modela zrakoplova (jednog uzorka/prototipa), u uvjetima nepostojanja statističkih podataka o pojavnosti opasnih kvarova na istima, nije prepreka u njihovu razvoju i analizama procjene rizika i vjerojatnosti da se na zrakoplovu dogodi opasan kvar. Jasno je da teorija vjerojatnosti može koji put dati bolje, a koji put lošije rezultate. Procjena rizika temeljem ograničenih podataka, a kakvi su nažalost podaci svojstveni primjeni elektromotornih pogona u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom, ne smije biti razlog za odustajanje od procjene rizika nego povod za usavršavanje metoda procjene rizika. Poznati je futurolog Alvin Toffler napisao da je putovanje u nepoznato bolje s djelomičnom i grubom kartom nego bez nje.

Glavna je zadaća provedbe procjene tehnoloških rizika odrediti mjere za sprječavanje ili barem ublažavanje posljedica neželjenih događaja. Rezultati procjene rizika nezaobilazni su ulazni parametri i kod planiranja aktivnosti održavanja, kod izrade polica osiguranja, kod planiranja investicija i sl. Konačni je cilj ove disertacije otvaranje mogućnosti poboljšanja sigurnosti i pouzdanosti rada elektromotornog pogona u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom, tijekom cijelog životnog vijeka postrojenja, uz optimiranje i smanjivanje troškova. Primjena ovim radom predložene metode procjene rizika, oslonjene na dijagnostička ispitivanja, jedan je od načina ostvarenja zadanog cilja.

Poseban je poticaj ovom radu bila i činjenica da su spoznaje i istraživanja iz ovog područja (ujedinjena tehnička dijagnostika kvarova i procjena rizika primjene elektromotora u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom) tek u početnoj fazi razvoja, a raspoloživa literatura i stručno-znanstveni radovi vrlo ograničeni.

Ova je doktorska disertacija nastala kao rezultat mog profesionalnog rada i istraživanja u Ex-Agenciji i na Fakultetu elektrotehnike i računarstva (FER) u Zagrebu. Veliku je materijalnu potporu izradi ove disertacije dala Ex-Agencija.

SADRŽAJ

Popis slika	VIII
Popis tablica	XI
1. UVODNA RAZMATRANJA	1
1.1. Analiza i procjena rizika	1
1.1.1. <i>Temeljni pojmovi i definicije teorije rizika</i>	2
1.1.2. <i>Struktura postupka procjene rizika</i>	4
1.2. Dijagnostička ispitivanja i stanja elektromotora	7
1.2.1. <i>Kvarovi elektromotora kao uzročnici paljenja eksplozivne atmosfere</i>	7
1.2.2. <i>Metode tehničke dijagnostike kvarova asinkronih elektromotora</i>	9
2. OPIS I DEFINICIJA PROBLEMA	11
2.1. Hipoteza	11
2.2. EMP u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom	12
2.3. Uzročnici paljenja i dijagnostika kvarova elektromotora	13
2.4. Procjena rizika primjene EMP-a	13
3. RIZICI PRIMJENE ELEKTROMOTORNIM POGONIMA U PROSTORIMA UGROŽENIM EKSPLOZIVNOM ATMOSFEROM	16
3.1. Eksplozivne atmosfere	17
3.1.1. <i>Energija paljenja i razvrstavanje plinova i para u skupine</i>	21
3.1.2. <i>Temperatura paljenja i razvrstavanje plinova i para u temperaturne razrede</i>	25
3.1.3. <i>Logički dijagram eksplozije</i>	26
3.2. Klasifikacija prostora i određivanje zona opasnosti	27
3.2.1. <i>Izvori ispuštanja i vjerojatnost pojave eksplozivne atmosfere</i>	28
3.2.2. <i>Proračun ventilacije i ocjena zona opasnosti</i>	29
3.3. EMP u eksplozivnoj atmosferi i rizik nastanka eksplozije	34
3.3.1. <i>Uzročnici paljenja unutar EMP-a</i>	34
3.3.2. <i>Statistička učestalost uzročnika paljenja</i>	36
3.4. Tradicionalni pristup osiguranja protueksplozijske zaštite i procjena rizika	39
3.4.1. <i>Razine sigurnosti opreme (EPL) i kategorije - tradicionalni pristup</i>	39
3.4.2. <i>Uvođenje procjene rizika u protueksplozijsku zaštitu</i>	40
4. TEMELJNA ISPITIVANJA PROTUEKSPLOZIJSKI ZAŠTIĆENIH ASINKRONIH MOTORA	43
4.1. Temeljna ispitivanja motora u vrsti zaštite povećana sigurnost („Ex e“) u svjetlu današnjih zakonskih i normativnih dokumenta	43
4.1.1. <i>Ispitivanja i provjere za smanjenje rizika od pojave električne iskre</i>	45

4.1.2. Faktori rizika kaveznih rotora i potencijalno iskrenje	48
4.1.3. Procjena rizika izboja statorskog namota motora iznad 1 kV	49
4.1.4. Ispitivanje zagrijavanja „Ex e“ asinkronog elektromotora	50
4.2. Elektromotori u vrsti zaštite oklapanje („Ex d“) i nadtlak („Ex p“)	58
4.3. Manjkavosti temeljnih ispitivanja s naslova procjene rizika	59
 5. UVOĐENJE DIJAGNOSTIČKIH METODA U PROCJENU RIZIKA	
PRIMJENE ASINKRONIH MOTORA	62
5.1. Analiza spektra linijske struje namota statora	63
5.1.1. Principijelna shema i osnovna ideja	63
5.1.2. Kvarovi kaveza rotora	65
5.1.2.1. Detekcija nesimetrije kaveza rotora analizom spektra struje statora	66
5.1.3. Rezultati primjene analize spektra linijske struje namota statora	72
5.1.4. Ocjena dijagnostike motora temeljene na analizi spektra linijske struje statora	76
5.2. Metoda mjerenja vodljivosti štapova i prstena	77
5.2.1. Opis mjerne metode i mjerna oprema	77
5.2.2. Rezultati mjerenja vodljivosti štapova i prstena	79
5.3. Dijagnostička metoda temeljena na analizi odziva na udarni napon	80
5.3.1. Kratki prikaz mjerne metode	80
5.3.2. Rezultati ispitivanja udarnim naponom	82
5.4. Primjena dijagnostičkih ispitivanja u procjeni rizika	83
 6. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA POJAVE UZROČNIKA	
PALJENJA USLIJED KVAROVA KAVEZA ROTORA	84
6.1. Cilj provedbe eksperimentalnih istraživanja	84
6.2. Odabir motora i opis eksperimentalnih istraživanja	84
6.2.1. Priprema motora za ispitivanje	85
6.3. Ispitivanje zagrijavanja elektromotora	86
6.3.1. Ispitna oprema za mjerenje zagrijavanja	86
6.3.2. Rezultati ispitivanja zagrijavanja ispravnog motora	87
6.3.3. Rezultati ispitivanja zagrijavanja I razine oštećenja kaveza rotora	88
6.3.4. Rezultati ispitivanja zagrijavanja II razine oštećenja kaveza rotora	90
6.3.5. Rezultati ispitivanja zagrijavanja III razine oštećenja kaveza rotora	91
6.3.6. Rezultati ispitivanja zagrijavanja IV razine oštećenja kaveza rotora	93
6.4. Analiza rezultata ispitivanja zagrijavanja elektromotora i potencijalni uzročnici paljenja	96
6.5. Istraživanja djelotvornosti zagrijavanja kao uzročnika paljenja	98
6.5.1. Opis istraživanja i ispitna oprema	98
6.5.2. Rezultati ispitivanja djelotvornosti uzročnika paljenja i nastanka eksplozije	99
6.6. Analiza rezultata istraživanja djelotvornosti zagrijavanja kao uzročnika paljenja i nastanka eksplozije	102
6.7. Električna iskra kao potencijalni uzročnik paljenja	105

7. NOVA METODA PROCJENE RIZIKA PRIMJENE EMP-a U PROSTORIMA UGROŽENIM EKSPLOZIVNOM ATMOSFEROM	107
7.1. Konceptcija modela procjene rizika i definiranje neželjenog scenarija	107
7.2. Predviđanje nastanka neželjenog scenarija (eksplozije)	108
7.3. Analiza vjerojatnosti pojave eksplozivne atmosfere (P_{exat}) za odabrani neželjeni scenarij	110
7.4. Analiza vjerojatnosti nastanka djelotvornog uzročnika paljenja (P_{exup}) za odabrani neželjeni scenarij	112
7.4.1. Vjerojatnost nastanka P_{exupr}	112
7.4.2. Vjerojatnost nastanka P_{exups}	113
7.4.3. Dijagnosticiranje kvara i ocjena djelotvornosti uzročnika paljenja	115
7.5. Model rizika primjene EMP-a u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom	115
7.5.1. Model vjerojatnosti kvara komponente sustava	116
7.5.2. Analiza pouzdanosti i kvara sustava s neovisnim, nepopravljivim i nezamjenjivim komponentama	123
7.6. Procjena rizika primjene EMP-a u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom	126
7.6.1. Dijagnostičke metode i detektiranje stanja kvara	126
7.6.2. Odabrani neželjeni scenarij i procjena rizika	128
7.6.3. Zaključna procjena i ocjena rizika primjene EMP-a u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom	129
8. ZAKLJUČAK	132
NAPOMENE	135
LITERATURA	139
POPIS OZNAKA	XIII
POPIS KRATICA	XVIII
PRILOZI	XIX
Prilog A: Protueksplozijski zaštićeni elektromotorni pogoni u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom	XIX
Prilog B: Konstrukcijski podaci ispitivanog „Ex e“ elektromotora	XX
Prilog C: Potencijalno iskrenje u zračnom rasporu i procjena faktora rizika kaveznih rotora (prema IEC 60079-7)	XXI
Prilog D: Procjena faktora rizika potencijalnog izboja statorskog namota motora nazivnog napona iznad 1 kV (prema IEC 60079-7)	XXII
Prilog E: Teški kvarovi kaveza rotora	XXIII

Prilog F: Korištena oprema kod specijalističkih dijagnostičkih ispitivanja	XXIV
Prilog G: Stanja kaveza rotora pri ispitivanju	XXV
Prilog H: Korištena oprema kod ispitivanja djelotvornosti zagrijavanja kao uzročnika paljenja	XXVI
Prilog I: Kromatografski izvještaji o sastavu korištenih ispitnih smjesa (vodik/zrak, acetilen/zrak i propan/zrak)	XXVII
SAŽETAK	XXX
SUMMARY	XXXI
KLJUČNE RIJEČI - KEY WORDS	XXXII
ŽIVOTOPIS	XXXIII
BIOGRAPHY	XXXIV

Popis slika

Slika:	Opis:	Str.
Slika 1.1	Grafički (kvalitativni) prikaz krivulje rizika	4
Slika 1.2	Osnovna struktura postupka procjene rizika	5
Slika 1.3	Krivulja pojave kvara	6
Slika 1.4	Konstrukcija suvremenog asinkronog kaveznog motora	7
Slika 2.1	Struktura elektromotornog pogona u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom (zona 1)	12
Slika 2.2	Struktura postupka procjene rizika za prostore ugrožene eksplozivnom atmosferom	14
Slika 3.1	Trokut eksplozije	17
Slika 3.2	Vremenski tijek procesa eksplozije	18
Slika 3.3	Obujamske koncentracije eksplozivnosti kod zapaljivih plinova	18
Slika 3.4	Granice eksplozivnosti smjese metana (CH_4) i zraka	19
Slika 3.5	Granice eksplozivnosti smjese vodika (H_2) i zraka	19
Slika 3.6	Utjecaj tlaka smjese na promjenu obujamskih granica eksplozivnosti metana	20
Slika 3.7	Utjecaj temperature smjese na promjenu obujamskih granica eksplozivnosti metana	20
Slika 3.8	Mjerni uređaj za utvrđivanje NPSR probojnog paljenja	22
Slika 3.9	Uređaj za ispitivanje paljenja iskrom i utvrđivanje NSP	23
Slika 3.10	Usporedba razvrstavanja plinova i para prema NSP i NPSR	24
Slika 3.11	Uređaj za mjerenja temperature paljenja nekih zapaljivih plinova i para	25
Slika 3.12	Logički dijagram nastanka eksplozije	27
Slika 3.13	Pojednostavljena logička shema postupka određivanja (procjene) zona opasnosti	32
Slika 3.14	Vremenski kriteriji za podjelu prostora ugroženih eksplozivnom atmosferom u zone opasnosti	33
Slika 3.15	EMP u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom	34
Slika 3.16	Kvalitativni odnos energije i temperature uzročnika paljenja za paljenje eksplozivne atmosfere	36
Slika 3.17	Učestalost uzročnika paljenja u eksplozijama plinova i para [146] [153]	36
Slika 3.18	Učestalost uzročnika paljenja [154]	37
Slika 3.19	Učestalost uzročnika paljenja u procesnim postrojenjima na kopnu [155]	37
Slika 3.20	Učestalost kvarova asinkronog elektromotora [34][73][74]	38

Slika 3.21	Učestalost kvarova asinkronog elektromotora [78]	38
Slika 3.22	Vjerojatnost pojave eksplozivne atmosfere i uzročnika paljenja	41
Slika 4.1	Mjerna oprema za ispitivanje dielektričke čvrstoće asinkronog „Ex e“ motora (380 V, 47 kW)	46
Slika 4.2	Prikaz provodnih staza i zračnih razmaka	47
Slika 4.3	Kavez rotora elektromotora (380 V, 47 kW, Ex e II T1/T2/T3)	49
Slika 4.4	Elektromotor u vrsti zaštite povećana sigurnost („Ex e II T3“) u sustavu transporta nafte	50
Slika 4.5	Zagrijavanje i vrijeme t_E kod „Ex e“ elektromotora	52
Slika 4.6	Zagrijavanje rotora i statora u kratkom spoju	57
Slika 5.1	Principijelna shema i mjerna oprema za analizu spektra statorske struje	64
Slika 5.2.a	Dodatne struje u kavezu pri prekidu štapa - neparni broj štapova	68
Slika 5.2.b	Dodatne struje u kavezu pri prekidu štapa - parni broj štapova	68
Slika 5.2.c	Model kaveza rotora	68
Slika 5.3	Dodatne struje u štapovima pri prekidu jednog štapa	69
Slika 5.4	Amplitude induciranih struja u štapovima rotora	71
Slika 5.5	Spektar struje statora u okolini frekvencije 50 Hz (ispravan/neoštećen kavez rotora)	73
Slika 5.6	Spektar struje statora u okolini frekvencije 50 Hz (razina oštećenja I)	74
Slika 5.7	Spektar struje statora u okolini frekvencije 50 Hz (razina oštećenja II)	75
Slika 5.8	Spektar struje statora u okolini frekvencije 50 Hz (razina oštećenja III)	75
Slika 5.9	Spektar struje statora u okolini frekvencije 50 Hz (razina oštećenja IV)	76
Slika 5.10	Mjerenje vodljivosti rotorskih štapova	77
Slika 5.11	Rezultati mjerenja vodljivosti rotorskih štapova	80
Slika 5.12	Generator udarnog napona s dvostrukim udarnim krugom	81
Slika 5.13	Rezultati ispitivanja udarnim naponom	82
Slika 6.1	Ispitni sustav za ispitivanje elektromotora	85
Slika 6.2	Ispitna oprema za mjerenje zagrijavanja elektromotora	86
Slika 6.3	Zagrijavanje ispravnog (neoštećenog) motora	87
Slika 6.4	Položaj termoparova za ispitivanje zagrijavanja	88
Slika 6.5	Zagrijavanje motora pri razini I oštećenja kaveza rotora	89
Slika 6.6	Zagrijavanje motora pri razini II oštećenja kaveza rotora	90
Slika 6.7	Zagrijavanje motora pri razini III oštećenja kaveza rotora i pri struji kratkog spoja 140 A	91
Slika 6.8	Zagrijavanje motora pri razini III oštećenja kaveza rotora i pri struji kratkog spoja 250 A	92
Slika 6.9	Zagrijavanje motora pri razini IV oštećenja kaveza rotora i pri struji kratkog spoja 140 A	94

Slika 6.10	Zagrijavanje motora pri razini IV oštećenja kaveza rotora i pri struji kratkog spoja 250 A	95
Slika 6.11	Ispitni sustav za ispitivanje nastanka (pojavnosti) eksplozije	99
Slika 6.12	Eksplozija smjese acetilen/zrak izazvana kvarom kaveza rotora	101
Slika 7.1	Zone opasnosti postrojenja za proizvodnju acetilena	111
Slika 7.2	Funkcija pouzdanosti $R_p(t)$ i funkcija razdiobe kvara $Q(t)$	117
Slika 7.3	Empirijska funkcija pouzdanosti $R_{pN}(t)$ i empirijska funkcija razdiobe kvara $Q_N(t)$	119
Slika 7.4	Funkcija $q(t)$: funkcija gustoće vjerojatnosti kvara komponente	119
Slika 7.5	Funkcija $q_N(t)$: empirijska funkcija gustoće vjerojatnosti kvara komponente	120
Slika 7.6	Empirijska funkcija učestalosti kvara $z_N(t)$	121
Slika 7.7	Aproksimacija funkcije učestalosti kvara $z(t)$	123
Slika 7.8	Serijsko - paralelni model rizika pojave kvara EMP-a u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom	123
Slika 7.9	Funkcija učestalosti kvara $z(t)$ u EMP-u u kojemu se provode periodička dijagnostička ispitivanja i servisne aktivnosti	127
Slika A.1	„Ex e II T3“ motor, 6 kV, 500 kW	XIX
Slika A.2	„Ex e II T3“ motor, 6 kV, 1,9 MW	XIX
Slika A.3	„Ex de IIA T3“ motor, 6 kV, 370 kW	XIX
Slika A.4	„Ex ped IIB T3“ motor, 6,6 kV, 1,7 MW	XIX
Slika B.1	Ispitivani „Ex e“ motor	XX
Slika E.1	Oštećenje spoja štapova i prstena	XXIII
Slika E.2	Oštećenje lijevanog aluminijskog kaveza	XXIII
Slika E.3	Tipični kvar zbog loše izrade, erozija	XXIII
Slika F.1	Oprema za A/D pretvorbu i pohranu signala statorske struje te spektralni analizator HP Dynamic Signal Analyzer	XXIV
Slika F.2	Ispitni uređaj za ispitivanje udarnim naponom Risatti H22/CPS	XXIV
Slika G.1	Ispravan (servisiran) kavez rotora	XXV
Slika G.2	Razina I oštećenja kaveza rotora	XXV
Slika G.3	Razina II oštećenja kaveza rotora	XXV
Slika G.4	Razina III oštećenja kaveza rotora	XXV
Slika G.5	Razina IV oštećenja kaveza rotora	XXV
Slika H.1	Miješalica za namješavanje eksplozivne smjese L & T	XXVI
Slika H.2	Kromatograf za kontrolu sastava eksplozivne smjese P. ELMER ...	XXVI
Slika H.3	Davači (pretvornici) tlaka i sustav/uređaj za mjerenje tlaka eksplozije KISTLER	XXVI
Slika I.1	Kromatografski izvještaj za ispitnu smjesu propan/zrak	XXVII
Slika I.2	Kromatografski izvještaj za ispitnu smjesu acetilen/zrak	XXVIII
Slika I.3	Kromatografski izvještaj za ispitnu smjesu vodik/zrak	XXIX

Popis tablica

Tablica:	Opis:	Str.
Tablica 1.1	Tri pitanja za analizu i određivanje rizika	2
Tablica 1.2	Pojave i uzročnici paljenja eksplozivne atmosfere	5
Tablica 1.3	Statistika kvarova asinkronih elektromotora [38]	8
Tablica 1.4	Statistika kvarova asinkronih elektromotora [34][74]	8
Tablica 1.5	Statistika kvarova asinkronih elektromotora [78]	9
Tablica 1.6	ON-LINE metode tehničke dijagnostike	9
Tablica 1.7	OFF-LINE metode tehničke dijagnostike	9
Tablica 1.8	Temeljna ispitivanja protueksplozijski zaštićenih elektromotora	10
Tablica 2.1	Klasifikacija neželjenih scenarija	14
Tablica 3.1	Najmanje energije paljenja eksplozivnih smjesa plinova sa zrakom	21
Tablica 3.2	Razvrstavanje plinova i para u skupine (prema NPSR)	22
Tablica 3.3	Vrijednosti NPSR za neke plinove i razvrstavanje u skupine	23
Tablica 3.4	Razvrstavanje plinova i para u skupine prema NSP omjeru (NSP/NSP za CH ₄)	23
Tablica 3.5	Vrijednosti NSP omjera (NSP/NSP za CH ₄) za neke plinove i razvrstavanje u skupine	24
Tablica 3.6	Temperature paljenja plinova	26
Tablica 3.7	Razvrstavanje plinova i para te uređaja u temperaturne razrede	26
Tablica 3.8	Određenje zona opasnosti u odnosu na stupanj ispuštanja i značajke ventilacije	29
Tablica 3.9	Najučestaliji potencijalni uzročnici paljenja unutar asinkronog elektromotora	35
Tablica 3.10	Razine zaštite (sigurnosti) protueksplozijski zaštićenih elektromotora	39
Tablica 3.11	Dopušteni EPL i kategorije elektromotora ovisno o zonama opasnosti	39
Tablica 3.12	Primjer mreže za kvalitativnu ocjenu rizika u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom	40
Tablica 3.13	Vjerojatnost pojave eksplozivne atmosfere i uzročnika paljenja	41
Tablica 3.14	Primjer veze kvantitativne i kvalitativne ocjene rizika	42
Tablica 4.1	Najviše dopuštene temperature za izolirane namote u nazivnom radu	45
Tablica 4.2	Najviše dopuštene temperature za izolirane namote nakon vremena t_E	45
Tablica 4.3	Rezultati ispitivanja dielektričke čvrstoće asinkronog „Ex e“ motora (380 V, 47 kW)	46

Tablica 4.4	Rezultati mjerenja (provjere) provodnih staza asinkronog „Ex e“ motora (380 V, 47 kW)	47
Tablica 4.5	Rezultati mjerenja (provjere) zračnih razmaka asinkronog „Ex e“ motora (380 V, 47 kW)	47
Tablica 4.6	Osnovni podaci elektromotora	50
Tablica 4.7	Rezultati mjerenja najviših nadtemperatura (elektromotor 47 kW, 380 V, Ex e II T1/T2/T3)	51
Tablica 4.8	Razultati ispitivanja zagrijavanja u kratkom spoju motora 47 kW, 380 V, Ex e II T1/T2/T3	57
Tablica 4.9	Određivanje temperaturnog razreda elektromotora u vrsti protueksplozijske zaštite „Ex e“	57
Tablica 5.1	Dodatne fazne struje statora pri prekidu jednog štapa (motor 22 kW)	71
Tablica 5.2	Opis ispitivanih razina oštećenja kaveza rotora	73
Tablica 5.3	Kriteriji za ocjenu stanja štapova rotora na temelju relativne vodljivosti	79
Tablica 6.1	Temperaturni razred i pojava nedopuštenih zagrijavanja (potencijalnih uzročnika paljenja)	96
Tablica 6.2	Normirane temperature paljenja nekih plinova i para tekućina (prema 31/769/CDV (IEC 60079-20-1):2008)	97
Tablica 6.3	Eksperimentalne temperature paljenja vrućom površinom zakočenog rotora u odnosu na AIT [12]	98
Tablica 6.4	Rezultati ispitivanja motora u eksplozivnoj atmosferi (istraživanje djelotvornosti zagrijavanja kao uzročnika paljenja)	100
Tablica 6.5	Rezultati ispitivanja i preračunavanja zagrijavanja oštećenog štapa br. 7. kaveza rotora u kratkom spoju pri različitim naponima kratkog spoja	103
Tablica 6.6	Usporedba izmjerenih nadtemperatura na mjestu oštećenja štapa 7 pri različitim naponima (strujama) kratkog spoja uz različite razine oštećenja kaveza rotora	104
Tablica 7.1	Značajke izvora ispuštanja i ventilacije	110
Tablica 7.2	Podaci o trajanju eksplozivne atmosfere	111
Tablica 7.3	Vjerojatnost pojave eksplozivne atmosfere	111
Tablica 7.4	Statistička učestalost i vjerojatnost nastanka kvara kaveza rotora	113
Tablica 7.5	Statistička učestalost i vjerojatnost nastanka kvara izolacijskog sustava namota statora	114
Tablica 7.6	Odabir dijagnostičkih metoda za utvrđivanje stanja elektromotora	126
Tablica 7.7	Rezultati provedene procjene rizika za odabrani neželjeni scenarij	128
Tablica 7.8	Ocjena rizika primjene EMP-a u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom za razne vrijednosti parametara ocjene P_{exat} i P_{exup}	129
Tablica 7.9	„Kvalitativne poruke“ o riziku primjene EMP-a u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom	130

1. UVODNA RAZMATRANJA

Ugroženost eksplozivnom atmosferom česta je odrednica suvremenih tehnologija i postrojenja (npr. eksploatacija i prerada nafte i plina, kemijska, prehrambena i farmaceutska industrija i sl.). Takva su postrojenja sve opremljenija novim blagodatima razvijenih tehnologija, ali istodobno su, iako toga često nismo ni svjesni, sve osjetljivija na moguće neželjene prateće pojave primjene tih tehnologija. Opasnosti i rizici od pojave ozljeda i negativnih utjecaja na zdravlje i okoliš česti su pratilci ovakvih postrojenja.

Na postrojenja predviđena za rad u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom postavljaju se visoki sigurnosni zahtjevi koji istodobno mogu značiti i smanjenje koristi primjene suvremenih tehničkih rješenja i značajna poskupljenja rada istih. Suprotstavljenost sigurnosnih i tehnoloških zahtjeva moguće je, u manjoj ili većoj mjeri, pomiriti provedbom procjene tehnoloških rizika. Analiza i procjena rizika mora prepoznati i analizirati svaku opasnost ili mogući događaj koji se može dogoditi u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom i koji za posljedicu može imati stvaranje uzročnika paljenja i/ili pojavu eksplozivne atmosfere, a što u konačnici može dovesti do eksplozije. Provedbi analize rizika, u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom, koja uvelike doprinosi poboljšanju sigurnosti i bez čije primjene osiguranje protueksplozijske zaštite nije cjelovito, nužno je posvetiti punu pozornost. Istovremeno treba imati na umu da analiza i procjena rizika mora kritički razmotriti, uz tehničku, i ekonomsku opravdanost primjene sigurnosnih mjera.

Provedbu analize i procjene rizika u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom nužno je promatrati u pridruženju zahtjevima ATEX Direktiva [63] [64] koje u Europi pravno i tehnički uređuju područje protueksplozijske zaštite. Zahtjevi europskih ATEX Direktiva su, kroz odgovarajuće Pravilnike [132] [133], preneseni i u zakonodavstvo Republike Hrvatske.

1.1. Analiza i procjena rizika

Suvremena se analiza protueksplozijske zaštite temelji na sustavnom i sveobuhvatnom promatranju i analiziranju procesa, materijala i tvari te uzročnika paljenja koji u određenim interakcijskim odnosima mogu dovesti do neželjene pojave eksplozije. Prevenciju od nastajanja eksplozije, uz primjenu tradicionalnih tehničkih mjera zaštite, nužno je provoditi i prepoznavanjem opasnosti, procjenom rizika te smanjivanjem ili uklanjanjem uzroka i mogućih posljedica rizika.

Polazno je načelo u analizi i projektiranju protueksplozijske zaštite postrojenja, kao i elektromotornih pogona (EMP) u istima, da su svi uređaji (električni i neelektrični) s potencijalnim uzročnicima paljenja, a koji su instalirani u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom, projektirani, proizvedeni, instalirani i ispitani na način koji osigurava da isti ne predstavljaju uzročnik paljenja eventualno prisutne eksplozivne

atmosfere. Kod postrojenja koja su u eksploataciji dugi niz godina, uslijed prisutnosti agresivnih medija, manjkavog održavanja, zamora materijala i sl., moguće je i nastajanje povećanih ispuštanja zapaljivih medija, nastajanje novih izvora ispuštanja te je moguća pojava električnih i neelektričnih uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere koji nisu bili razmatrani i procijenjeni prilikom projektiranja i izgradnje postrojenja odnosno prilikom ispitivanja i potvrđivanja (certifikacije) novougrađene opreme. Primjena elektromotornih pogona (EMP) i pojava kvarova u istima, kao što su npr. oštećenja kaveza rotora ili namota statora asinkronih elektromotora, jedan je od značajnijih potencijalnih uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere, odnosno jedan je od izvora rizika i neželjenih događaja. Vjerojatnost odnosno učestalost istovremene pojave eksplozivne atmosfere i kvara kaveza rotora, odnosno nastanka neželjenog događaja (eksplozije) kao i razmjere mogućih posljedica nužno je analizirati i ocijeniti primjenom procjene rizika.

Pri tome je od presudne važnosti i primjena dijagnostičkih ispitivanja te postupaka kojima se analizira sposobnost pojedine vrste i razine kvara da postanu učinkoviti uzročnici paljenja eksplozivne atmosfere. U okviru ovog rada težište je na kvarovima rotora.

1.1.1. Temeljni pojmovi i definicije teorije rizika

U literaturi, različitim analizama i istraživanjima tehnoloških rizika uočljiva je poprilična nedosljednost u smislu nazivlja i definicija. Tako se pojmovi kao što su rizik, opasnost i hazard ponekad pojavljuju kao sinonimi, dok su koji put autori skloni među tim pojmovima nalaziti veću ili manju razliku¹. Slična se nedosljednost uočava i kod definiranja pojmova kao što su pouzdanost, procjena rizika, ocjena rizika, šteta i sl.² [5][6][8][19][48][60].

Iako postoji veliki broj definicija termina rizik većini je zajedničko to da povezuju vjerojatnost pojave neželjenog događaja tj. scenarija³ i moguće posljedice koje takav scenarij, ukoliko se pojavi, može izazvati. Vjerojatnosna analiza rizika provodi se odgovaranjem na tri temeljna pitanja, prikazana u tablici 1.1.

Tablica 1.1. Tri pitanja za analizu i određivanje rizika

Pitanje:	Oznaka:
Koji su to mogući neželjeni događaji (scenariji) ?	S
Kolika je vjerojatnost pojave neželjenih događaja ?	pS
Koje su i kolike su potencijalne posljedice (štete i vjerojatnost) ?	cS

Kako je vidljivo iz tablice 1.1. oznakom S označen je neželjeni događaj, sa pS označena je vjerojatnost njegove pojave, a sa cS posljedice njegove realizacije. Ukoliko su S , pS i cS poznati tada se uređena trojka (S, pS, cS) može smatrati jednim od mogućih odgovora na postavljena tri temeljna pitanja. Ukoliko je skup trojki kompletan tj. ukoliko uključuje cjelovitu analizu svih mogućih neželjenih događaja, vjerojatnost njihove pojave i potencijalne posljedice njihove realizacije, tada se taj skup može smatrati potpunim odgovorom na prethodno postavljena tri pitanja.

Temeljem navedenog formalna se definicija rizika može napisati na slijedeći način⁴ [6][136]:

$$R = \{(S_i, pS_i, cS_i)\} \quad i = 1, 2, 3 \dots n \quad (1.1)$$

Važno je uočiti da izraz (1.1) razmatra samo neželjene scenarije odnosno neželjene učinke. Činjenica da svaki scenarij može rezultirati i ishodom koji nema neželjene učinke, s naslova tehničke primjene nije posebno značajna, te će u ovom radu biti zanemarena.

Izraz „sigurnost“ često je korišten pojam u tehničkim procesima. Tako se npr. zahtijeva da elektromotorni pogoni u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom rade „na siguran način“. Sigurnost i rizik komplementarni su pojmovi, manji rizik znači veći stupanj sigurnosti. U analizama rizika sigurnost se često definira kao mjera prihvatljivog rizika. Odnos sigurnosti i rizika može se prikazati izrazom (1.2).

$$\text{sigurnost} = 1 - pr \cdot \text{rizik} \quad (1.2)$$

gdje je *pr* percepcija rizika. Percepcija odnosno prihvatljivost rizika iznimno je složena i važna komponenta u procesu određivanja rizika, te kasnije kod upravljanja rizikom. Prihvatljivost rizika se više temelji na iracionalnim odrednicama (npr. sociološkim i psihološkim) nego na racionalnim (tehničkim). Za najjednostavniji slučaj, odnosno kada je percepcija rizika neutralna (*pr* = 1), sigurnost može biti prikazana izrazom (1.3).

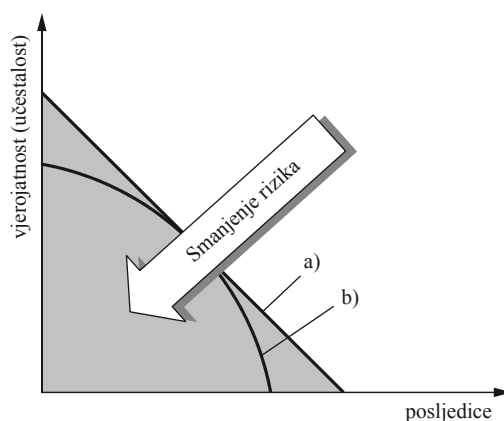
$$\text{sigurnost} = 1 - \text{rizik} \quad (1.3)$$

Procjena rizika, sigurnosti, opasnosti i pouzdanosti, u osnovi, može biti kvalitativna i kvantitativna. U kvantitativnim (matematičkim) procjenama [8] pouzdanost je „matematička“ vjerojatnost zadovoljavajućeg ponašanja (rada, djelovanja, funkcioniranja), uz definirane radne uvjete, tijekom predviđenog vremena, dok se rizik može definirati kao „mjera povezanosti vjerojatnosti zbivanja neželjenog događaja (događanja, opasnosti) i posljedice takvog neželjenog događaja (događanja, opasnosti)“⁵. Općenito, inženjerska definicija rizika glasi:

$$\text{RIZIK [očekivani gubitak / vrijeme]} = \text{VJEROJATNOST [neželjeni događaj / vrijeme]} \\ \times \text{POSLJEDICA [očekivani gubitak / neželjeni događaj]}$$

Za vjerojatnost iz prethodne definicije obično koristimo sintagmu (nije pleonazam) „matematička vjerojatnost“, matematička iz razloga jer je nužno izračunati tu vjerojatnost, a ne samo procijeniti je, a „vjerojatnost“ jer je očekivanje povezano s budućnošću, budućnost pak s neizvjesnošću i neodređenošću, a ova zadnja pak s vjerojatnošću. Vjerojatnost je, najjednostavnije rečeno, mjera ostvarivosti slučajnog događaja.

Ako za određeni sustav definiramo prihvatljivi rizik (područje prihvatljivog rizika) tada se može dati i grafički prikaz rizika [56][68], kako je prikazano na slici 1.1.



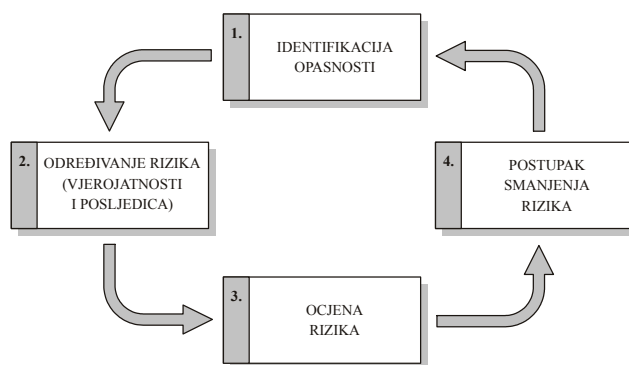
Slika 1.1. Grafički (kvalitativni) prikaz krivulje rizika

Zasjenjeno područje na slici predstavlja područje prihvatljivog rizika. Pravac a) grafički je prikaz linearizacije rizika koji je jednak sumi produkata vjerojatnosti i posljedica za svaki pojedinačni scenarij, dok se za krivulju b) općenito smatra da svojim konkavnim oblikom bolje aproksimira rizik⁶. Egzaktan prikaz krivulje je hiperbola.

1.1.2. Struktura postupka procjene rizika

Težnja da se odgovori na pitanja *Koliko je nešto sigurno?*, *Koliko sigurno je dovoljno sigurno?* i sl. je razvila novu znanstveno-tehničku disciplinu nazvanu *procjena rizika* (*Risk Assessment*). Procjena rizika je svojim kvalitativnim i kvantitativnim procedurama omogućila objektivizaciju različitih vrsta opasnosti i subjektivne percepcije istih. Cilj je procjene rizika osigurati vezu između vjerojatnosti/učestalosti/frekvencije pojave neželjenog događaja i posljedica očekivanih gubitaka, a u svrhu postizanja zahtijevane razine sigurnosti, sukladno stanju tehnike, tehničkim i ekonomskim zahtjevima i sl. Procjena rizika, manje ili više uspješno, objedinjuje postupke identifikacije opasnosti, analiza opasnosti i ocjene (proračuna) rizika, a sve s ciljem dovođenja rizika u područje prihvatljivosti, uzimajući pri tome u obzir gospodarske, psihosocijalne i druge aspekte. Identifikacija (prepoznavanje) potencijalnih opasnosti (*Hazard Identification*) podrazumijeva izradu popisa svih mogućih neželjenih scenarija. Danas je razvijen cijeli niz tehnika za strukturiranje i kategorizaciju neželjenih scenarija. Jedna od raširenih metoda je Metoda provjere (*Checklist*) koja je opisana i u "Uputi dobre prakse" za provedbu Europske Direktive 1999/92/EC (ATEX 137), za prostore ugrožene eksplozivnom atmosferom. U ostale metode se mogu ubrojiti²⁸ HAZOP analizu (*Hazard Operability Analysis*), FMEA postupak (*Failure Mode and Effect Analysis*), „što-ako“ analizu (*What-if-Analysis*), Stablo kvara i Stablo događaja (*Fault Tree and Event Tree Analysis*) i sl. Određivanje rizika (*Risk Estimation*) je utvrđivanje učestalosti (vjerojatnosti) s kojom može biti ostvarena prepoznata opasnost, koja će prouzročiti neželjenu posljedicu (žestinu/oštrinu štete). Ocjena rizika (*Risk Evaluation*) uspoređuje rizike s određenim kriterijima prihvatljivosti. Postupak smanjenja rizika definira nužne mjere za svođenje rizika u područje prihvatljivosti. Osnovnu strukturu odnosno osnovni tijek

postupka procjene rizika se može prikazati slikom 1.2. [50][53][60]. Procjena rizika iterativan je postupak.



Slika 1.2. Osnovna struktura postupka procjene rizika

Prepoznavanje potencijalnih opasnosti (*Hazard Identification*) podrazumijeva izradu popisa svih mogućih neželjenih scenarija što nije nimalo jednostavan posao. Za prostore ugrožene eksplozivnom atmosferom od posebne je važnosti prepoznavanje pojava i mehanizama (uzročnika) u njima koji mogu dovesti do neželjenih scenarija i pojave eksplozije. Tablica 1.2. [53][65][141] prikazuje najznačajnije odnosno najučestalije pojave i potencijalne uzročnike paljenja eksplozivne atmosfere u njima.

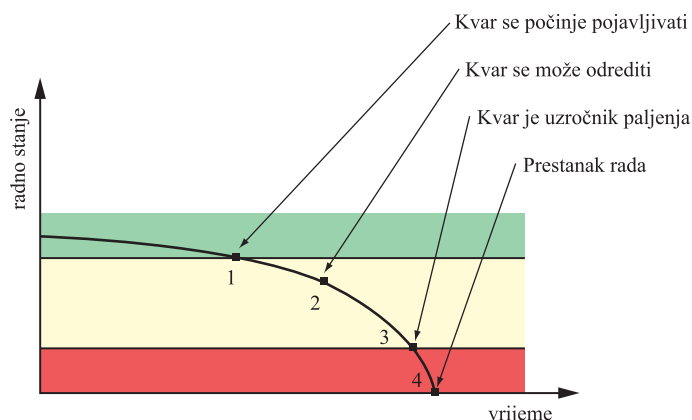
Tablica 1.2. Pojave i uzročnici paljenja eksplozivne atmosfere

Pojava	Mehanizam (uzročnik) paljenja
Vruće površine	$> T, \gg T$
Električne i mehanički generirane iskre	$\gg T, \gg U$
Statički elektricitet	$\gg U$
Munja	$\gg U, \gg I$
Elektromagnetska zračenja	$> U, \Delta U$
Adijabatska kompresija i udarni valovi	Δp

gdje „>“ znači visoke, a „>>“ jako visoke: T - temperature; I - električne struje; U - električne napone, ΔU označava mogućnost pojave neizjednačenih električnih potencijala, a Δp označava mogućnost pojave razlike tlakova. Uz prepoznavanje potencijalnih uzročnika paljenja važno je prepoznati i sve pojave odnosno neželjene događaje koji mogu dovesti do pojave eksplozivne atmosfere (npr. puknuća cjevovoda i/ili brtvi, prorada sigurnosnih ventila i sl.).

Za prostore ugrožene eksplozivnom atmosferom od posebne je važnosti praćenje i nadziranje stanja opreme (npr. elektromotornog pogona) s ciljem dijagnosticiranja kvarova koji mogu dovesti do pojave uzročnika paljenja. Takve je kvarove nužno otkriti u samoj početnoj fazi nastanka, a najkasnije prije prelaska potencijalnog u djelotvorni uzročnik paljenja. Slika 1.3. [57] prikazuje krivulju pojave kvara iz koje je vidljiv tijek nastanka kvara u opremi, npr. električnoj i neelektričnoj. U normalnom radu (zeleno područje) oprema je u okviru svojih projektiranih parametara i radi na siguran i funkcionalno ispravan način. U

inicijalnoj fazi nastanka kvara dolazi do pada radne i/ili sigurnosne sposobnosti (točka 1). Tako nastali kvar je nužno dijagnosticirati (točka 2), te je potrebno provesti aktivnosti za njegovo otklanjanje. Navedeno je potrebno provesti prije prelaska potencijalnog u djelotvorni uzročnik paljenja (žuto područje). Važno je naglasiti da pojava djelotvornog uzročnika paljenja (točka 3) ne mora dovesti do uočljivih funkcionalnih nepravilnosti, koje se mogu javiti npr. tek u točki 4, što takve kvarove čini „skrivenim“ i vrlo opasnim.



Slika 1.3. Krivulja pojave kvara

Određivanje rizika (*Risk Estimation*) odnosno tumačenje vjerojatnosti⁷ pojave nekog neželjenog scenarija još uvijek, u znanstvenim i stručnim krugovima, nema jedinstveni pristup. Dva su najznačajnija/dominantna pogleda odnosno pristupa pojmu vjerojatnosti. Objektivisti vjerojatnost definiraju kao eksperimentalnu ili statističku vrijednost. Za njih određivanje vjerojatnosti pretpostavlja postojanje stvarne vrijednosti, vjerojatnost je rezultat eksperimenta koji se bez većih poteškoća može ponoviti nebrojeno puta. Oni rezultat nazivaju frekvencijom [5][137]. Prema ovom pristupu vjerojatnost egzistira u realnom svijetu i mjerljiva je dovoljnim uzorkovanjem i statističkom analizom. Ova se interpretacija vjerojatnosti često naziva statističkom ili objektivističkom.

Nasuprot ovoj teoriji subjektivisti o vjerojatnosti govore kao o pojmu koji odražava stanje znanja odnosno razinu uvjerenosti o problemu koji se analizira. Prema ovom pristupu subjektivizam se ogleda u stanju znanja, a ne izražava individualnost razmišljanja. Vjerojatnost, prema ovom pogledu, nije samo funkcija slučajne varijable kao takve nego i količine i kvalitete raspoloživih informacija o njoj, kojima raspolaže analitičar [6][138]. Ovaj se pristup uobičajeno naziva Bayesovim ili subjektivističkim.

I jedna i druga teorija imaju svoju opravdanost i utemeljenost. Objektivistička teorija govori o frekvenciji. Frekvencija je objektivna i mjerljiva i u određenim slučajevima aproksimira vjerojatnost na sasvim zadovoljavajući način. Vjerojatnost je, s druge strane, subjektivna i teško mjerljiva. U tom smislu potrebno je raditi razliku između pojmova statistike i teorije vjerojatnosti. Načelno i općenito, statistika bi bila vještina korištenja podataka, dok bi teorija vjerojatnosti bila umijeće logičkog zaključivanja u uvjetima nedostupnosti podataka.

Lako je zaključiti da primjena Bayesovog odnosno subjektivističkog pristupa ima neupitnu vrijednost u situacijama kada se promatraju i analiziraju pojave o kojima raspolažemo s malim brojem podataka i informacija.

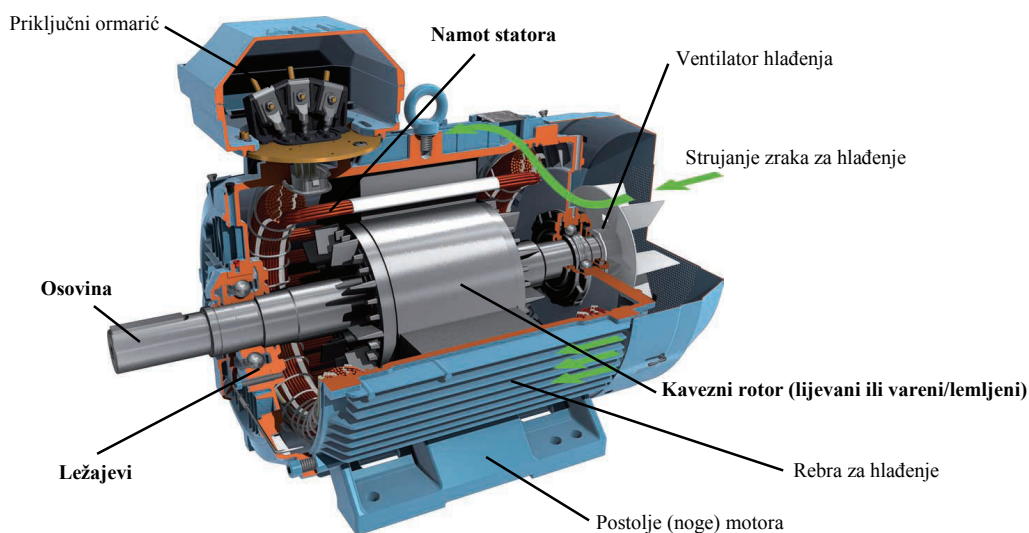
Ocjena rizika (*Risk Evaluation*) i s njom povezani postupci za smanjenje rizika subjektivistička su kategorija i ovise o sociološkim, tehničkim, financijskim i sl. uvjetima. Ocjena rizika je usporedba rizika s određenim kriterijima prihvatljivosti, koji mogu biti manje ili više definirani i/ili regulirani.

1.2. Dijagnostička ispitivanja i stanja elektromotora

1.2.1. Kvarovi elektromotora kao uzročnici paljenja eksplozivne atmosfere

Kako je ranije navedeno, za prostore ugrožene eksplozivnom atmosferom, od posebne je važnosti, pri provedbi procjene rizika, dijagnosticiranje stanja odnosno kvarova koji mogu dovesti do pojave djelotvornih uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere.

Centralno mjesto, u ovom radu, zauzima procjena rizika primjene elektromotornih pogona (EMP) u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom. Posebno je razmatrano kako dijagnosticirati i ocijeniti (procijeniti) kvarove rotora trofaznog kaveznog asinkronog elektromotora, čiji su osnovni konstrukcijski dijelovi prikazani na slici 1.4 [159], kao moguće djelotvorne i „skriven“ uzročnike paljenja.



Slika 1.4. Konstrukcija suvremenog asinkronog kaveznog motora

Kvarovi na elektromotorima, u zonama opasnosti od eksplozije, mogu biti opasni uzročnici paljenja prisutne eksplozivne atmosfere s nesagledivim posljedicama eksplozije. Stoga je praćenje stanja elektromotora i pravovremeno otkrivanje nedostataka i kvarova jedna od najvažnijih zadataka u sustavu postizanja sigurnog i pouzdanog rada EMP-a.

Dijagnostičke aktivnosti otkrivanja spomenutih stanja i kvarova se mogu podijeliti u dvije skupine. Prvu skupinu čini niz provjera temeljne protueksplozijske zaštite i ovisan je o samoj izvedbi protueksplozijske zaštite elektromotora. Ova mjerenja i ispitivanja, u pravilu, provodi certifikacijska ustanova za protueksplozijsku zaštitu pri postupku certifikacije, a kasnije se stanje elektromotora periodički provjerava tijekom uporabe, u dijagnostičke svrhe.

Da bi se sa sigurnošću utvrdila primjenjivost elektromotora i nakon višegodišnje uporabe u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom, nužno je detaljno ispitati stanje elektromotora. Uz ispitivanja temeljnih mjera protueksplozijske zaštite (prva skupina ispitivanja) nužno je provesti i specijalistička ispitivanja na elektromotoru. U tu drugu skupinu ispitivanja koja je jednako važna kao i prva, mogu se ubrojiti dijagnostika stanja kaveza rotora, namota statora, zračnih raspora, ležajeva i sl. Upravo ovim dijagnostičkim postupcima se otkrivaju kvarovi u elektromotoru koji mogu biti djelotvorni uzročnici paljenja eksplozivne atmosfere. Samo provedba ispitivanja i dijagnostičkih radnji, i iz prve i iz druge skupine, osigurava realnu i kompletnu sliku stanja asinkronog elektromotora temeljem koje se može provesti procjena rizika daljnje primjenjivosti istog u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom.

Rezultati nekih istraživanja udjela pojedinih kvarova u ukupnim kvarovima asinkronih elektromotora prikazani su u tablicama 1.3., 1.4. i 1.5. Istraživanje kvarova [38] asinkronih elektromotora srednjih i većih snaga (ispitna grupa 180 elektromotora) je dalo rezultate prikazane u tablici 1.3

Tablica 1.3. Statistika kvarova asinkronih elektromotora [38]

Vrsta kvara	% ukupnih kvarova
Kvarovi namota statora	26,50
Kvarovi namota rotora	31,65
Kvarovi paketa statora	9,34
Kvarovi paketa rotora	13,25
Kvarovi vratila i ležaja	12,94
Ostali kvarovi	6,32

Tablica 1.4 prikazuje [34][74][127] statistiku kvarova dijagnosticiranih kod ispitnog uzorka od 6000 asinkronih kaveznih motora⁸. Rezultati istraživanja⁹ provedenih u Velikoj Britaniji, Finskoj i SAD-u [78] dani su tablici 1.5.

Tablica 1.4. Statistika kvarova asinkronih elektromotora [34][74]

Vrsta kvara	% ukupnih kvarova
Kvarovi ležaja	41
Kvarovi statora	37
Kvarovi rotora	10
Ostali kvarovi	12

Tablica 1.5. Statistika kvarova asinkronih elektromotora [78]

Vrsta kvara	% ukupnih kvarova
Kvarovi uslijed pregrijavanja	30
Kvarovi uslijed utjecaja okoliša	19
Kvarovi namota (faza) statora	14
Kvarovi rotora	13
Kvarovi ležajeva	5
Ostali kvarovi	19

Iako se podaci o udjelu kvarova rotora u ukupnim kvarovima elektromotora kod prikazanih istraživanja manje ili više razlikuju, jasno je vidljiv značajan udio kvarova rotora u ukupnim kvarovima asinkronog elektromotora. Prikazani podaci ukazuju na važnost provedbe dijagnostičkih ispitivanja rotora asinkronog elektromotora i upućuju na nužnost procjene rizika primjene asinkronih motora u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom. Jasno je da niti ostali kvarovi ne smiju biti zanemareni u cjelovitoj procjeni rizika. Pretpostavka je i procjena ovog rada da se kvarovi statora, ležajeva i sl. lakše dijagnosticiraju i u praksi češće na vrijeme otkrivaju. Kvarovi namota statora su već prepoznati kao mogući učinkoviti uzročnici paljenja, o čemu govore radovi kao npr. [85]¹⁰. Kvarovi ležajeva, kao neelektrični uzročnici paljenja, su također prepoznati i istraženi [146]¹⁰. Ovim radom su, u procjeni rizika, razmatrani i kvarovi namota statora motora.

1.2.2. Metode tehničke dijagnostike kvarova asinkronih elektromotora

Danas je u svijetu razvijen cijeli niz metoda tehničke dijagnostike pomoću kojih je moguće provoditi ispitivanje asinkronih elektromotora. U tablicama 1.6 i 1.7 [30][35][36][37][41][45] su navedene neke od ON-LINE i OFF-LINE metoda tehničke dijagnostike.

Tablica 1.6. ON-LINE metode tehničke dijagnostike

ON-LINE
Analiza spektra linijske struje namota statora.
Mjerenje i analiza vibracija.
Mjerenje rasipnih magnetskih tokova.
Snimanje fluktuacije brzine vrtnje.
Promatranje titranja kazaljke ampermetra na statorskoj strani.

Tablica 1.7. OFF-LINE metode tehničke dijagnostike

OFF-LINE
Analiza odziva na udarni napon.
Mjerenje vodljivosti štapova i prstena.
Primjena penetranata.
Ultrazvučna metoda.

Uz provedbu metoda tehničke dijagnostike nužna je i provedba temeljnih ispitivanja protueksplozijske zaštite. Današnji normativni dokumenti iz područja protueksplozijske zaštite precizno definiraju temeljna ispitivanja koja je potrebno provesti pri postupku

certifikacije protueksplozijski zaštićenih elektromotora, što je prikazano u tablici 1.8. [15] [46][139].

Tablica 1.8. Temeljna ispitivanja protueksplozijski zaštićenih elektromotora

Vrsta zaštite motora	Ispitivanje
Ex d	Ispitivanje kućišta na referentni tlak.
	Ispitivanje povećanim tlakom.
	Ispitivanje probojnog paljenja.
	Mjerenja zaštitnih sastava/raspora
Ex e	Utvrđivanje vremena t_E .
	Kontrola zračnih razmaka i provodnih staza.
	Ispitivanje otpornosti na udar.
Ex d Ex e	Mjerenja temperatura (zagrijavanja).
	Provjera izolacijskog sustava.
	Ispitivanja u praznom hodu i kratkom spoju.
	Provjera mehaničke (IP) zaštite.

Tablica 1.8., za ilustraciju, prikazuje neka najznačajnija ispitivanja koja se provode kod kaveznih elektromotora u vrsti zaštite „Ex d“ - oklapanje i „Ex e“ - povećana sigurnost. Navedena se ispitivanja provode i kod utvrđivanja trenutnog stanja elektromotora tijekom cijelog životnog vijeka što predstavlja, uz primjenu tehničke dijagnostike, podlogu za provedbu procjene rizika daljnje primjenjivosti elektromotora u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom.

Glavna je težnja i cilj, a istovremeno i izazov, ovog rada ustrojiti novi pristup procjeni rizika primjene elektromotora i EMP-a u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom. Novi bi pristup trebao objedinjavati opća načela i metodologiju procjene rizika kao znanstvene discipline, temeljna (tradicionalna) ispitivanja protueksplozijske zaštite i suvremene metode tehničke dijagnostike elektromotora.

Primjeri elektromotornih pogona u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom prikazani su na slikama u prilogu A ovog rada¹¹.

2. OPIS I DEFINICIJA PROBLEMA

Ugroženost opasnostima nastanka tehnoloških eksplozija značajka je velikog broja tehnologija i postrojenja (npr. eksploatacija, prerada i transport nafte i plina, kemijska industrija i sl.). Moguće ljudske žrtve i veliki materijalni gubici, koji mogu nastati u slučaju eksplozije, zahtijevaju provedbu analiza i procjene rizika koji se mogu pojaviti te poduzimanje mjera za njihovo uklanjanje ili smanjivanje.

Prepoznavanje i upravljanje rizicima, od tehnoloških eksplozija, je područje koje zahtijeva primjenu sveobuhvatnih metoda za iznalaženje opasnih događaja, kao i implementaciju metoda tehničke dijagnostike kojima se mogu prepoznati stanja (kvarovi) u procesu ili opremi koja prethode opasnom događaju (scenariju). Temeljem tih rezultata moguće je provesti procjenu rizika i definirati mjere za upravljanje istim. Kako provesti procjenu rizika primjene elektromotornog pogona (EMP), s posebnim osvrtom na kavez rotora asinkronog elektromotora, centralno je pitanje koje se razmatra u ovom radu.

2.1. Hipoteza

Elektromotorni pogon u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom jedan je od ozbiljnih i mogućih djelotvornih uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere, odnosno uzroka nastanka eksplozije.

Oštećenja kaveza rotora i namota statora asinkronog elektromotora potencijalni su djelotvorni uzročnici paljenja eksplozivne atmosfere. Ovakva se oštećenja javljaju uslijed djelovanja eksploatacije i okoliša (npr. teški pogoni, upadi stranih tijela, atmosferska djelovanja i sl.), kao posljedica mehaničkih i električnih naprezanja, dotrajalosti, grešaka u materijalu i izradi, nedostatnog održavanja i sl.

Pojava povećanih zagrijavanja i vrućih površina, kao mogućih uzročnika paljenja, kod kaveza rotora posljedica su ovakvih stanja motora. Oštećenja kaveza rotora je teško primijetiti u normalnom radu motora, posebice ona u ranoj fazi nastanka. Ista se, u pravilu, ne otkrivaju niti uobičajenim i zahtijevanim pregledima protueksplozijski zaštićenih elektromotora. Sve navedeno dovodi do rizika da "skrivena" oštećenja kaveza rotora mogu dovesti do pojave djelotvornih uzročnika paljenja

Pojava ovakvih oštećenja, u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom, može izazvati eksploziju. Izbjegavanje/smanjivanje navedenog rizika je moguće postići primjenom suvremenih metoda dijagnostičkih ispitivanja stanja elektromotora. Takvim je ispitivanjima moguće, u ranoj fazi nastanka, otkriti kvarove rotora koji bi mogli daljnjim razvijanjem uzrokovati pojavu djelotvornih uzročnika paljenja.

Analizom vjerojatnosti pojave eksplozivne atmosfere i nastanka kvarova kaveza rotora, koji mogu biti djelotvorni uzročnici paljenja, uzimajući u obzir izvedbu kaveza, pogonska stanja i sl., moguće je procijeniti i kategorizirati rizike takve primjene motora.

Pojavu kvarova je moguće utvrditi primjenom suvremenih metoda dijagnostičkih ispitivanja, a njihovu sposobnost da postanu učinkoviti uzročnici paljenja je moguće potvrditi laboratorijskim ispitivanjima u stvarnim uvjetima prisutnosti eksplozivne smjese.

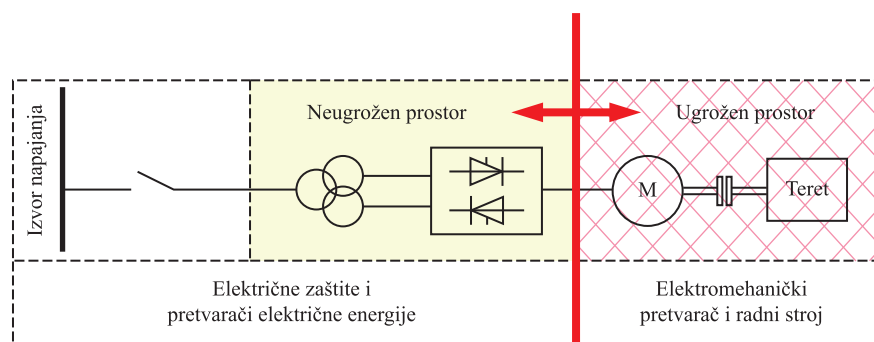
Kategorizacija rizika temelj je za definiranje aktivnosti za svođenje istog na, tehnički i financijski, opravdanu i prihvatljivu razinu. Primjenom ovog pristupa procjene rizika moguće je postići višu razinu sigurnosti, u uvjetima kvara kaveza motora koji radi u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom, od one koju osiguravaju mjere predviđene današnjim normativnim dokumenatima iz područja protueksplozijske zaštite.

Propisi i norme ne razmatraju, u dovoljnoj mjeri, stanja kvarova uređaja koji rade u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom. Takvi kvarovi, posebice oni „skriveni“, često ostaju izvan opsega razmatranja koja se danas provode za analizu uzročnika paljenja u spomenutim prostorima. Oštećenja kaveza rotora mogu činiti takve kvarove i realna su pojava u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom.

Prepoznavanje i procjena opasnosti i rizika koji mogu nastati u EMP-u i ustroj sveobuhvatne metode za upravljanje rizikom i sprječavanje nastanka eksplozije neizbježna je obveza i zadaća. Navedeno je važno, kako s naslova sigurnosti i zdravlja ljudi, tako i u smislu očuvanja postrojenja i zaštite životne i radne sredine.

2.2. EMP u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom

Slika 2.1 [13] prikazuje, u okviru ovog rada postavljenu i analiziranu, strukturu elektromotornog pogona za prostore ugrožene eksplozivnom atmosferom. Polazna je točka daljnjih razmatranja da su komponente elektromotornog pogona kao što su: izvor napajanja, električne zaštite, pretvarači električne energije i sl., instalirani izvan prostora ugroženog eksplozivnom atmosferom. Elektromehanički pretvarač (elektromotor) i radni stroj jedine su komponenta EMP-a u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom.



Slika 2.1. Struktura elektromotornog pogona u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom (zona 1)

Iz spomenih su razloga upravo elektromotor, odnosno primjenjene mjere protueksplozijske zaštite istog, temeljni dio ovog rada. Radni stroj, iako instaliran u zoni opasnosti, nije predmet daljnjih analiza.

Opasnosti i rizici od nastanka eksplozije biti će analizirani kroz procjenu vjerojatnosti istovremene pojave eksplozivne atmosfere i djelotvornog uzročnika paljenja.

Prepoznavanje potencijalnih opasnosti, unutar EMP-a u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom, biti će provedeno kroz dva dijela. U prvom dijelu se analizira mogućnost pojave eksplozivne atmosfere, uslijed očekivanih i neočekivanih kvarova u pogonu/postrojenju koji mogu dovesti do ispuštanja zapaljivih medija. Posebno se određuje vjerojatnost nastanka takvih stanja u postrojenju. Drugi dio prepoznavanja potencijalnih opasnosti se provodi kroz analizu vjerojatnosti nastanka kvara elektromotora. Objedinjavanjem ovih dvaju dijelova (do eksplozije dolazi samo u uvjetima istodobne pojave eksplozivne atmosfere i djelotvornog uzročnika paljenja) provodi se konačna i cjelovita analiza i procjena rizika primjene EMP-a u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom.

U okviru ovog rada ocjena rizika se svodi na binarni kriterij odnosno dvojbu dolazi li do eksplozije ili ne. Svi scenariji odnosno stanja koja dovode do eksplozije se smatraju/ocjenjuju neprihvatljivim (fatalnim) i ne provode se daljnje analize i ocjene mogućih posljedica.

2.3. Uzročnici paljenja i dijagnostika kvarova elektromotora

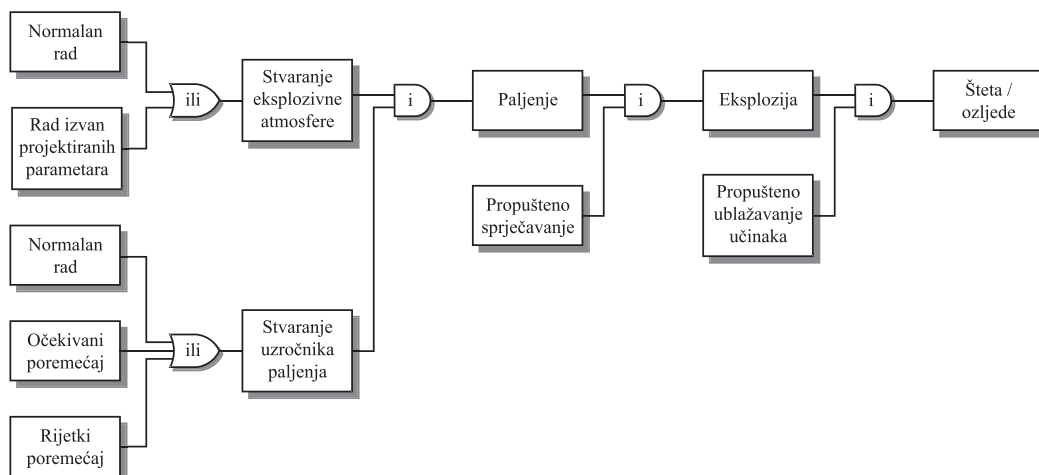
Analiza i ocjena vjerojatnosti pojave kvarova elektromotora, u ovom radu, temelji se na raspoloživim podacima (povijesnim kartama) o pojavnosti takvih stanja u realnim uvjetima i postrojenjima/pogonima.

Posebna pažnja u ovom radu posvećena je iznalaženju odgovora na pitanje *Koji kvarovi rotora su djelotvorni uzročnici paljenja?* Odgovor na ovo pitanje moguće je, manje ili više pouzdano odnosno manje ili više cjelovito i generalno primjenjivo, dobiti laboratorijskim ispitivanjima rotora kojemu je dijagnosticiran kvar i to u uvjetima stvarne prisutnosti eksplozivne smjese. U tu je svrhu potrebno provoditi namjerna i ciljana oštećenja kaveza rotora, kakva se javljaju i u stvarnim pogonskim uvjetima, te uz prisutnost različitih eksplozivnih atmosfera istražiti djelotvornost istih kao uzročnika paljenja. Posebno je važno ustanoviti/potvrditi vezu rezultata dijagnostičkih ispitivanja kaveza rotora i (poznatih) namjerno izazvanih kvarova, s ciljem pouzdanije primjene dijagnostičkih metoda u stvarnim uvjetima (nepoznatih) kvarova.

2.4. Procjena rizika primjene EMP-a

Procjena rizika se, kako je već ranije rečeno, sastoji od identifikacije opasnosti, određivanja rizika (u ovom radu samo se analizira vjerojatnost nastanka neželjenog događaja ali ne i njegove posljedice), ocjene rizika i postupka smanjenja rizika. U ovom je radu korištena struktura postupka procjene rizika za prostore ugrožene eksplozivnom atmosferom

prikazana na slici 2.2. [60][68][116]. Spomenuta se struktura temelji (u smislu iznalaženja neželjenih scenarija odnosno identifikacije opasnosti) na metodi stabla kvara [4][106].



Slika 2.2. Struktura postupka procjene rizika za prostore ugrožene eksplozivnom atmosferom

Ovaj se rad bavi isključivo prepoznavanjem stanja (neželjenih scenarija) koja za posljedicu imaju stvaranje eksplozivne atmosfere i/ili djelotvornih uzročnika paljenja, odnosno analizira vjerojatnost nastanka paljenja i eksplozije. Mjere za sprječavanje i ublažavanje učinaka eksplozije kao i ocjena posljedica su poseban problem kojim se ovaj rad ne bavi.

Utvrđivanje relevantnih scenarija za analizu i procjenu rizika odnosno opasnosti kod primjene elektromotornih pogona u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom jedan je od prvih koraka koji se, kako je navedeno u poglavlju 1.1.2., provodi unutar postupka identifikacije opasnosti i predstavlja kvalitativni dio procjene rizika. Neželjeni se scenariji u slučaju takvih tehnoloških postrojenja kao što su elektromotorni pogoni u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom mogu klasificirati npr. obzirom na kriterije prikazane u tablici 2.1.

Tablica 2.1. Klasifikacija neželjenih scenarija

Kriterij	Klasifikacija
Uvjeti nastanka neželjenog scenarija	Normalan rad i očekivani poremećaji.
	Neočekivani poremećaji.
Uzrok odnosno inicijalni događaj	Scenarij čiji je uzrok tehnološki/tehnički kvar.
	Scenarij antropogenog uzroka.
Djelotvornost neželjenog događaja	Pojava ispuštanja zapaljivog medija koja ne stvara eksplozivnu atmosferu (izvan granica eksplozivnosti).
	Pojava ispuštanja zapaljivog medija koja stvara eksplozivnu atmosferu (unutar granica eksplozivnosti).
	Nastanak nedjelotvornog uzročnika paljenja.
	Nastanak djelotvornog uzročnika paljenja.
Sprječavanje eksplozije	Uspješno.
	Neuspješno (propušteno).
Vrste šteta/posljedica	Ljudske žrtve.
	Materijalni gubici.

Temeljem ovako, ili slično, postavljenih klasifikacijskih kriterija moguće je strukturirati čitave serije različitih neželjenih scenarija koji mogu opisati rizike primjene elektromotornih pogona u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom.

U okviru ovog rada odabran je i promatran slijedeći neželjeni scenarij:

- Ispuštanje zapaljivog medija, plina acetilena i to kod očekivanog, prorada sigurnosnog ventila, ili kod neočekivanog poremećaja, puknuće brtve.
- Uzrok ispuštanja je tehnološki poremećaj.
- Uslijed ispuštanja došlo je do pojave eksplozivne atmosfere.
- Nastao je djelotvoran uzročnik paljenja, kvar kaveza rotora ili kvar izolacijskog sustava statorskog namota asinkronog motora elektromotornog pogona kompresora.

Analiza mogućeg sprječavanja i ublažavanja učinaka eksplozije i ocjena posljedica, kao i ostali mogući scenariji, nisu predmet ovog rada. Nastanak eksplozije se, u okviru ovog rada, smatra neprihvatljivim (fatalnim), te se u tom smislu ne provodi analiza i određivanje kriterija prihvatljivosti.

3. RIZICI PRIMJENE ELEKTROMOTORNIH POGONA U PROSTORIMA UGROŽENIM EKSPLOZIVNOM ATMOSFEROM

Pred elektromotorne se pogone u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom kao što su naftne i plinske platforme, naftovodi i plinovodi, rafinerijska postrojenja za preradu nafte i plina, kemijska industrija i sl. postavljaju, s naslova protueksplozijske zaštite, posebni zahtjevi pri projektiranju, izvedbi, ispitivanju, održavanju i sl. Udovoljenje spomenutim zahtjevima smanjuje rizike primjene EMP-a u ovakvim prostorima, odnosno čini ih prikladnim za takvu primjenu.

Posebnosti primjene električnih i neelektričnih uređaja i instalacija (time i EMP-a) u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom su definirane i zakonski uređene ATEX Direktivama ATEX 95 i ATEX 137 [63][64] koje, u Europi, pravno i tehnički uređuju područje protueksplozijske zaštite. Zahtjevi europskih ATEX Direktiva su, kroz odgovarajuće Pravilnike [132][133], preneseni i u zakonodavstvo Republike Hrvatske. Veliki je broj normativnih dokumenta koji opisuju ovo područje od kojih je posebno bitno istaknuti normu IEC 1127-1 [65], te norme niza IEC/EN/HRN 60079 [139].

Suvremeni se elektromotorni pogon, kao sustav za pretvorbu električne energije u mehaničku, u pravilu sastoji od izvora napajanja, pretvarača, zaštitnih elemenata, sustava upravljanja, elektromotora, prijenosnog elementa i radnog stroja. Većina spomenutih elemenata EMP-a, namijenjenog za rad u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom, mora biti na poseban način izrađena, ispitana, instalirana i održavana. U okviru ovog rada analiziraju se mjere protueksplozijske zaštite elektromotora koji je instaliran u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom - zoni opasnosti. Ostali elementi EMP-a su, uobičajeno, izvan zona opasnosti i nisu predmet analiza u okviru ovog rada. Radni stroj, iako instaliran u zoni opasnosti, također nije posebno razmatran ovim radom.

Posebni zahtjevi odnosno mjere, koji se postavljaju pred EMP u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom temeljno ovise o eksplozijskim značajkama takvih prostora. U tom smislu nužno je provesti klasifikaciju prostora ugroženog eksplozivnom atmosferom.

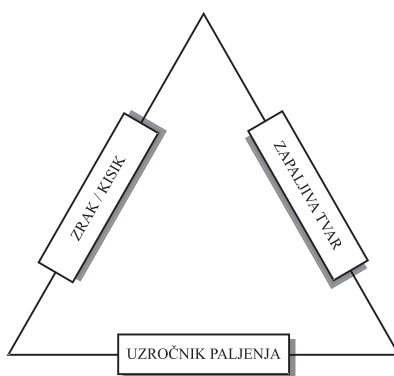
Kako bi bilo moguće jednostavnije objasniti posebne zahtjeve koji se traže te uočiti i definirati pojave i mehanizme koji mogu dovesti do stvaranja uzročnika paljenja (npr. električne iskre i vruće površine unutar asinkronog motora) i procijeniti rizike njihove pojavnosti i djelotvornosti, što je centralni dio ovog rada, nužno je ukratko prikazati osnovne pojmove i fizikalne principe vezane uz nastanak eksplozivne atmosfere, mehanizme paljenja, razvrstavanje zapaljivih tvari, klasifikaciju prostora i sl. Navedeno je ukratko prikazano u ovom dijelu rada.

3.1. Eksplozivne atmosfere

Svaka zapaljiva tvar u obliku plina, pare, vlaknaca ili prašine uz prisutnost zraka odnosno dovoljne količine kisika može dovesti do procesa gorenja pri čemu dolazi do spajanja zapaljive tvari s kisikom iz zraka i oslobađanja odgovarajuće količine topline. O omjeru zapaljive tvari i zraka ovisit će hoće li doći do postupnog izgaranja u obliku požara ili lančanog brzog izgaranja u vidu eksplozije. Prema definiciji [139] eksplozivna atmosfera je smjesa zapaljive tvari u obliku plinova, para i maglica ili prašina, vlaknaca i krpica sa zrakom, u atmosferskim uvjetima, u kojoj se nakon paljenja izgaranje širi cijelom nepotrošenom smjesom.

Ovaj se rad, u smislu opasnosti paljenja uslijed nastanka oštećenja kaveza rotora, bavi samo prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom plinova i para.

Nužni uvjet za pojavu eksplozije je istovremena pojava eksplozivne atmosfere (zapaljive tvari i zraka/kisika čijim se paljenjem izgaranje širi cijelom nepotrošenom smjesom) i uzročnika paljenja. Navedeno je moguće ilustrirati i trokutom eksplozije prikazanim na sl. 3.1 [156].



Slika 3.1. Trokut eksplozije

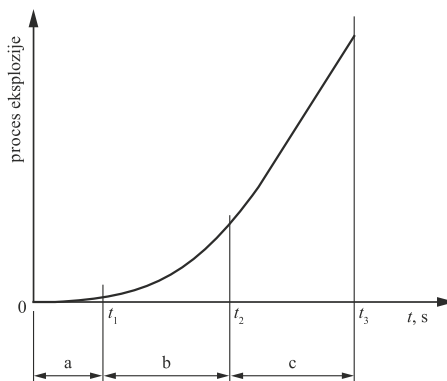
Zapaljive tvari i zrak/kisik tvore eksplozivnu smjesu samo u određenom rasponu obujamskog omjera odnosno koncentracije. Ispod donje granice eksplozivnosti (*DGE*) eksplozivna je smjesa „presiromašna“ dok je iznad gornje granice eksplozivnosti (*GGE*) smjesa „prebogata“. Razvoj eksplozije nakon inicijalnog paljenja, čiji uzročnik može biti npr. kvar kaveza rotora, ovisi o sastavu eksplozivne smjese.

Obujamski omjer zapaljive tvari i zraka kod kojeg nakon paljenja dolazi do potpunog izgaranja, bez ostatka zapaljive tvari i kisika, se naziva stehiometrijska smjesa (koncentracija). Prilikom paljenja stehiometrijske smjese (*SM*) dolazi do najintenzivnije eksplozije.

Najveći obujamski omjer zapaljive tvari i zraka ispod stehiometrijske koncentracije, kod kojeg još ne dolazi do eksplozije nakon inicijalnog paljenja, naziva se donja granica eksplozivnosti (*DGE*). Najmanji obujamski omjer zapaljive tvari i zraka iznad stehiometrijske koncentracije, kod kojeg više ne dolazi do eksplozije nakon inicijalnog paljenja, naziva se gornja granica eksplozivnosti (*GGE*).

Na obujamski omjer zapaljive tvari i zraka u smislu granice eksplozivnosti smjese presudan utjecaj imaju i tlak te temperatura smjese.

Sam vremenski tijek procesa eksplozije je moguće podijeliti na tri dijela, kako je prikazano na slici 3.2. [156].

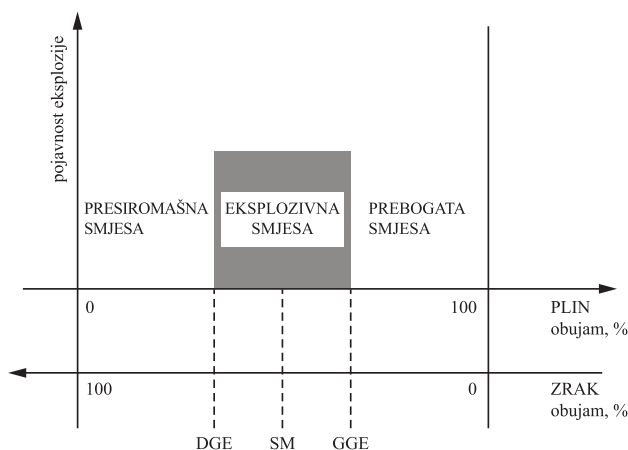


Slika 3.2. Vremenski tijek procesa eksplozije

Razdoblje a (do vremena t_1) predstavlja iniciranje odnosno početak paljenja. Između vremena t_1 i t_2 (razdoblje b) dolazi do početnog razvijanja lančanog procesa eksplozije i stabilizacije. U razdoblju c (od vremena t_2 do t_3) odvija se proces stabilnog i brzog izgaranja kojega nazivamo eksplozijom. Pod pojmom procesa eksplozije se smatra jačina, žestina i razvijeni tlakovi eksplozije.

Primjena elektromotornih pogona u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom zapaljivih plinova vrlo je česta. Iz navedenog razloga eksperimentalna istraživanja kvarova rotora kao potencijalnih uzročnika paljenja, provedena u okviru ovog rada, su provedena upravo u realnim uvjetima prisutnosti smjese zapaljivih plinova i zraka.

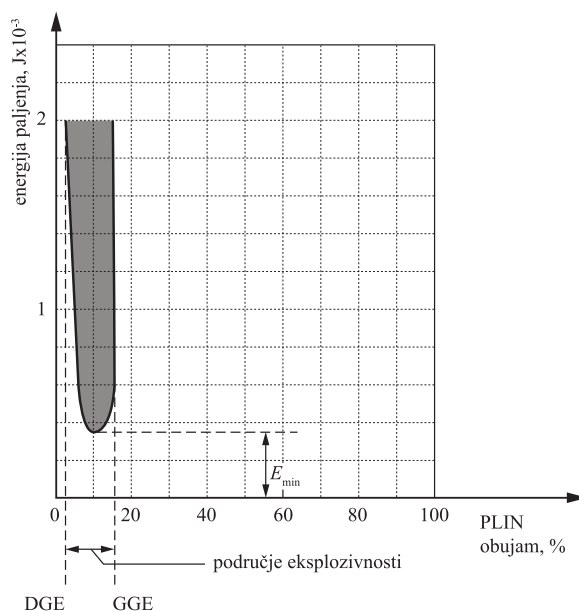
Dakle, eksplozivna atmosfera plinova postoji samo između donje i gornje granice eksplozivnosti po obujamskim omjerima, odnosno pojava eksplozije je moguća samo unutar tih granica (slika 3.3.).



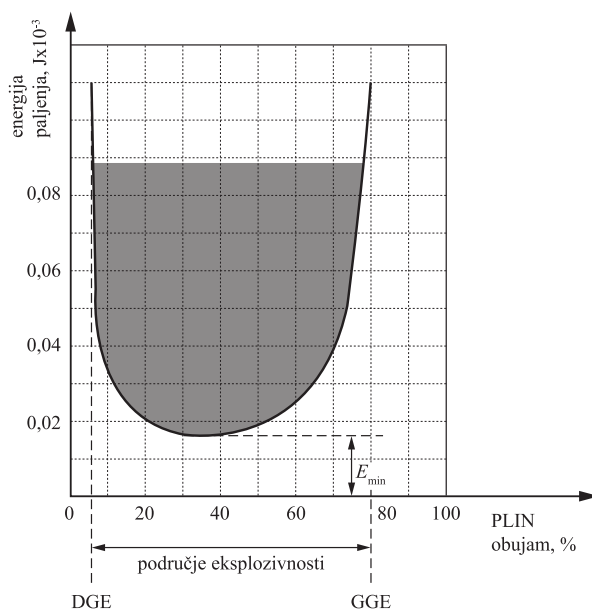
Slika 3.3. Obujamske koncentracije eksplozivnosti kod zapaljivih plinova

Nužni je preduvjet za nastanak eksplozije da je temperatura uzročnika paljenja iznad temperature paljenja plina te da uzročnik paljenja posjeduje energiju veću od najmanje energije potrebne za paljenje eksplozivne atmosfere, kako je prikazano na slikama 3.4. i 3.5.

Slike 3.4. i 3.5. [156] prikazuju granice eksplozivnosti smjese metana/zrak i vodik/zrak iskazane obujamskim omjerima koncentracija. Iste slike daju i prikaz potrebnih energija paljenja.



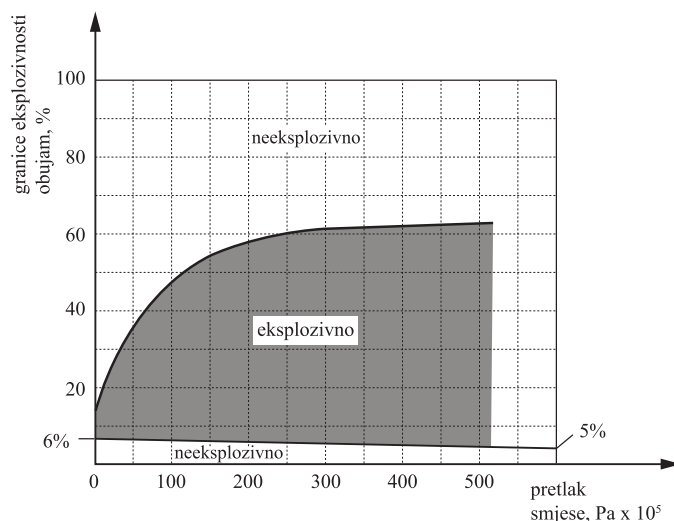
Slika 3.4. Granice eksplozivnosti smjese metana (CH_4) i zraka



Slika 3.5. Granice eksplozivnosti smjese vodika (H_2) i zraka

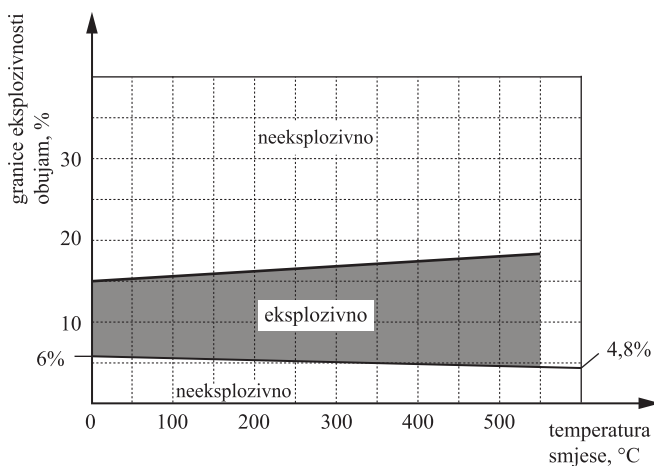
Smjesu koja može dovesti do pojave eksplozije čini područje označeno sivom bojom na slikama 3.4. i 3.5. Vrijednosti najmanjih energija paljenja $E_{\min}$ ovise o tlaku i temperaturi

smjese. To znači da se, uz zadovoljene uvjete energije i temperature uzročnika paljenja, granice eksplozivnosti iskazane obujamskim omjerima mijenjaju ovisno o tlaku i temperaturi smjese. Na slici 3.6. prikazan je utjecaj tlaka smjese na promjenu obujamskih granica eksplozivnosti metana. Slika prikazuje obujamske granice eksplozivnosti za temperaturu smjese od 20 °C. Granice eksplozivnosti zapaljivih plinova i para u zraku se prema definiciji daju za atmosferski tlak (101325 Pa) i temperaturu od 20 °C.



Slika 3.6. Utjecaj tlaka smjese na promjenu obujamskih granica eksplozivnosti metana

Granice eksplozivnosti metana (pri tlaku 101325 Pa i temperaturi 20 °C), prema 31/769/CDV (IEC 60079-20-1), iznose od 4,4 % do 17 % obujma. Prema [25] te granice iznose od 6 % do 15 %. Vidljivo je, prema slici 3.6. [25], da je utjecaj tlaka smjese na *GGE* (povećanje sa 15 % pri atmosferskom tlaku na približno 60 % pri pretlaku od 25 MPa) bitno izraženiji nego utjecaj tlaka smjese na *DGE* (promjena sa 6% pri atmosferskom tlaku na približno 5 % pri pretlaku od 50 MPa). Slika 3.7. [25] prikazuje utjecaj temperature smjese na promjenu obujamskih granica eksplozivnosti metana. Slika prikazuje obujamske granice eksplozivnosti za tlak smjese od 101325 Pa.



Slika 3.7. Utjecaj temperature smjese na promjenu obujamskih granica eksplozivnosti metana

Općenito, širina područja eksplozivnosti raste s porastom temperature. Za eksplozivne smjese *GGE* raste, dok *DGE* opada. Utjecaju tlaka i temperature na granice eksplozivnosti treba posvetiti posebnu pažnju. U specifičnim uvjetima tlaka i temperature granice eksplozivnosti (npr. prema 31/769/CDV (IEC 60079-20-1)) više ne vrijede.

U tom smislu je u normi IEC 60079-10-1:2008 naglašeno da sve analize eksplozivnih atmosfera i određenje zona opasnosti vrijede samo uz tlak smjese blizak normalnom atmosferskom tlaku (101325 Pa) i temperaturu smjese od oko 20 °C.

Pare zapaljivih tekućina (kapljevin) ¹², u smjesi sa zrakom, također mogu stvarati eksplozivnu atmosferu (npr. pri skladištenju i transportu tekućih goriva). Zapaljive tekućine su tvari koje su pri atmosferskom tlaku (od 85000 Pa do 101325 Pa) i uobičajenoj temperaturi okoliša od -20 °C do +40 °C u tekućem (kapljevitom) agregatnom stanju. S naslova mogućnosti nastanka eksplozivne atmosfere, kod zapaljivih tekućina, od posebnog je značaja plamište zapaljive tekućine. Plamište zapaljive tekućine je [139] najniža temperatura tekućine pri kojoj, u određenim normiranim uvjetima, tekućina hlapi u količini dostatnoj za stvaranje zapaljive smjese para sa zrakom. U teorijskom smislu zapaljive će tekućine početi hlapiti čim se tvar pojavi u tekućem stanju. Brzina hlapljenja ovisi o razlici parcijalnog tlaka para neposredno iznad zapaljive tekućine i parcijalnog tlaka u okolnoj atmosferi podalje od površine tekućine (Daltonov zakon hlapljenja). Kod temperature plamišta, i uz normalni atmosferski tlak (101325 Pa), na površini tekućine nastaje takav parcijalni tlak koji uzrokuje hlapljenje koncentracije iznad *DGE*.

Na temperaturama manjim od plamišta koncentracija zapaljivih para je manja od *DGE* i nema mogućnosti formiranja eksplozivne atmosfere. S porastom temperature tekućine hlapljenje je sve intenzivnije ¹³.

3.1.1. Energija paljenja i razvrstavanje plinova i para u skupine

Kako je već ranije nevedeno, nužni je preduvjet za nastanak eksplozije da uzročnik paljenja posjeduje energiju veću od najmanje energije potrebne za paljenje eksplozivne atmosfere, kako je prikazano na slikama 3.4. i 3.5. Ako uzročnik paljenja ima energiju manju od najmanje energije paljenja tada on ne može zapaliti eksplozivnu atmosferu. Najmanje energije paljenja, za neke plinove, prikazane su u tablici 3.1 [25]. Također su prikazane i njihove kemijske formule te obujamske granice eksplozivnosti kod atmosferskog tlaka smjese (101325 Pa) i temperature smjese od 20 °C (prema 31/769/CDV (IEC 60079-20-1)).

Tablica 3.1. Najmanje energije paljenja eksplozivnih smjesa plinova sa zrakom

Zapaljivi plin	Kemijska formula	Obujamske granice eksplozivnosti, %	Najmanja energija paljenja, mJ
propan	C ₃ H ₈	1,7 - 10,9	0,26
metan	CH ₄	4,4 - 17	0,28
vodik	H ₂	4 - 77	0,019
acetilen	C ₂ H ₂	2,3 - 100	0,019

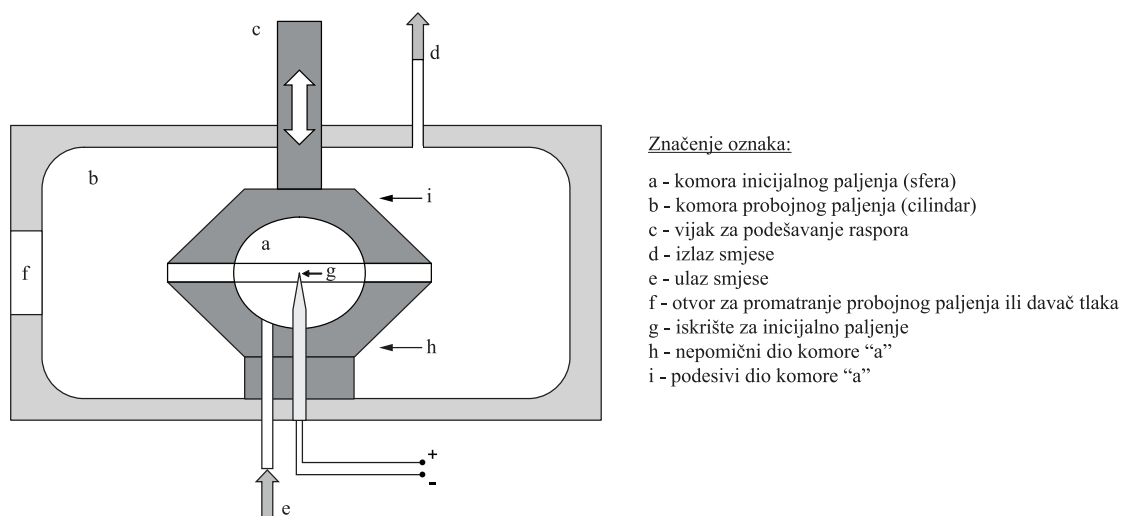
Najmanje energije paljenja, prikazane u tablici 3.1. određene su metodom ispitivanja energije električne iskre koja je sposobna zapaliti eksplozivnu smjesu.

Važno je naglasiti da podaci o najmanjoj energiji paljenja nisu uvijek jednoznačni niti normirani budući da bitno ovise o mjernoj metodi i mjernim uređajima, koji kao takvi također nisu normirani.

Upravo radi nejednoznačnosti i nenormiranosti energija paljenja nije mogla postati ishodište razvrstavanja zapaljivih plinova i para. Spomenuti su razlozi doveli do razvoja praktično primjenjivih metoda, fizikalno bližih koncepciji protueksplozijske zaštite, za određivanje ekvivalentne energije paljenja i razvrstavanje zapaljivih plinova i para od kojih su najznačajniju primjenu danas našle:

- metoda probojnog paljenja i
- metoda struje paljenja u realnim strujnim krugovima.

Razvrstavanje plinova i para u skupine prema najvećem pokusnom sigurnosnom rasporu (NPSR)¹⁴, mjenom na uređaju za utvrđivanje NPSR probojnog paljenja prikazanom na slici 3.8. (prema 31/769/CDV (IEC 60079-20-1), dano je u tablici 3.2.



Slika 3.8. Mjerni uređaj za utvrđivanje NPSR probojnog paljenja

Tablica 3.2 prikazuje razvrstavanje plinova i para u skupine za područje primjene u industriji i na ostalim mjestima uporabe osim rudnika (područje primjene II). Primjena u rudnicima (područje primjene I) u okviru ovog rada nije razmatrana.

Tablica 3.2. Razvrstavanje plinova i para u skupine (prema NPSR)

NPSR, mm	Skupina
$\geq 0,9$	IIA
od 0,5 do 0,9	IIB
$\leq 0,5$	IIC

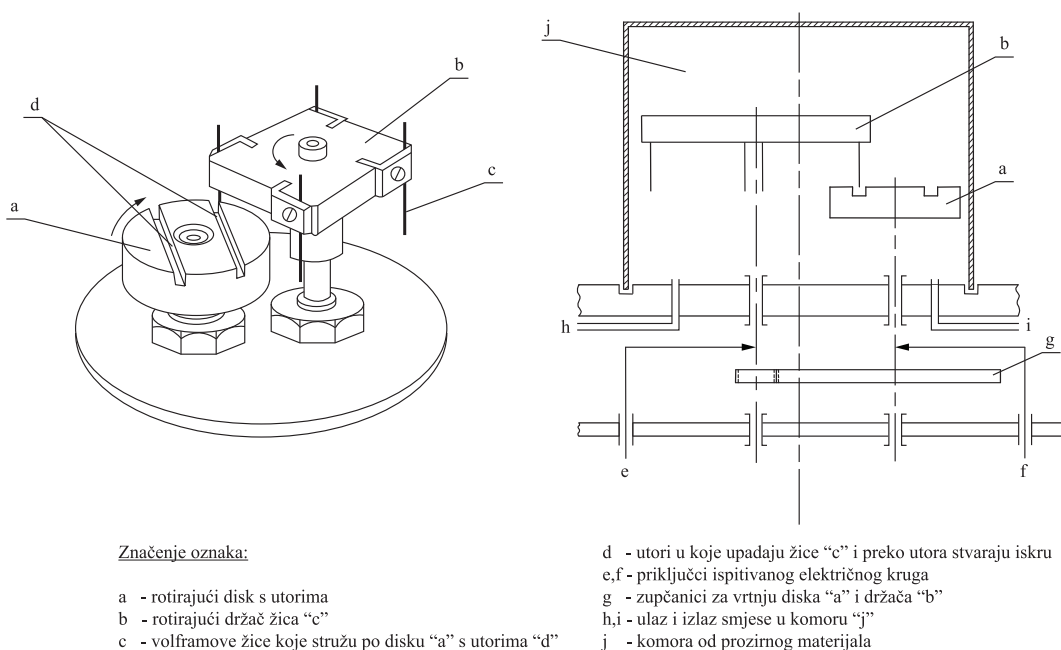
Vrijednosti NPSR, za neke plinove (koji su korišteni u eksperimentalnim istraživanjima u ovom radu), te njihovo razvrstavanje u skupine prikazano je u tablici 3.3.

Tablica 3.3. Vrijednosti NPSR za neke plinove i razvrstavanje u skupine

Zapaljivi plin	NPSR, mm	Skupina
propan	0,92	IIA
metan	1,14	IIA
vodik	0,29	IIC
acetilen	0,37	IIC

Najmanja struja paljenja (NSP)¹⁵ je također [25][150] ekvivalent energiji paljenja i koristi se za razvrstavanje plinova i para u skupine. Uobičajeno se, radi jednostavnijeg uspoređivanja, najmanja struja paljenja (NSP) ne iskazuje u mA, nego kao omjer struje paljenja dotičnog plina i najmanje struje paljenja (NSP) laboratorijskog metana (CH₄) koja iznosi 110 mA. U tom se smislu govori o tzv. NSP omjeru (eng. *MIC ratio*).

Razvrstavanje plinova i para u skupine prema NSP omjeru provodi se na uređaju za ispitivanje paljenja iskrom prikazanom na slici 3.9.



Slika 3.9. Uređaj za ispitivanje paljenja iskrom i utvrđivanje NSP

Rezultati razvrstavanja (prema HRN IEC 60079-11) dani su u tablici 3.4.

Tablica 3.4. Razvrstavanje plinova i para u skupine prema NSP omjeru (NSP/NSP za CH₄)

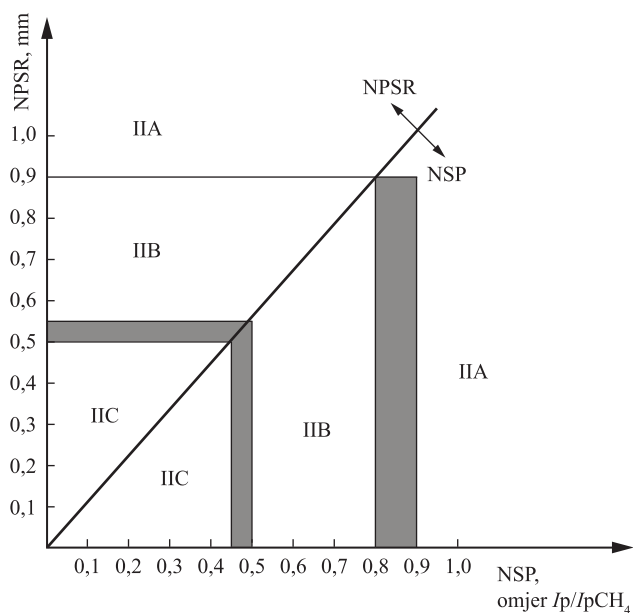
NSP omjer	Skupina
NSP omjer > 0,8	IIA
$0,45 \leq \text{NSP omjer} \leq 0,8$	IIB
NSP omjer < 0,45	IIC

Vrijednosti NSP omjera, za neke plinove koji su korišteni u eksperimentalnim istraživanjima u ovom radu - za utvrđivanje djelotvornosti uzročnika paljenja nastalih usljed oštećenja kaveza rotora asinkronog motora, te njihovo razvrstavanje u skupine prikazano je u tablici 3.5.

Tablica 3.5. Vrijednosti NSP omjera (NSP/NSP za CH_4) za neke plinove i razvrstavanje u skupine

Zapaljivi plin	NSP omjer	Skupina
propan	0,82	IIA
metan	1,00	IIA
vodik	0,25	IIC
acetilen	0,28	IIC

Mjerenje najmanje struje paljenja (NSP) pokazuje jednaku razdiobu plinova i para u skupine kao i mjerenje najvećeg pokusnog sigurnosnog raspora (NPSR). Ti su odnosi prikazani na slici 3.10. [25] i pokazuju da vrijednosti NSP linearno prate NPSR. Iz navedenog proizilazi bitan zaključak da je razvrstavanje plinova i para u skupine temeljem NSP ekvivalentno razvrstavanju na temelju NPSR, što upućuje na opravdanost tvrdnje da oba načina razvrstavanja imaju istu fizikalnost zasnovanu na energiji paljenja eksplozivne smjese plinova i para.



Slika 3.10. Usporedba razvrstavanja plinova i para prema NSP i NPSR

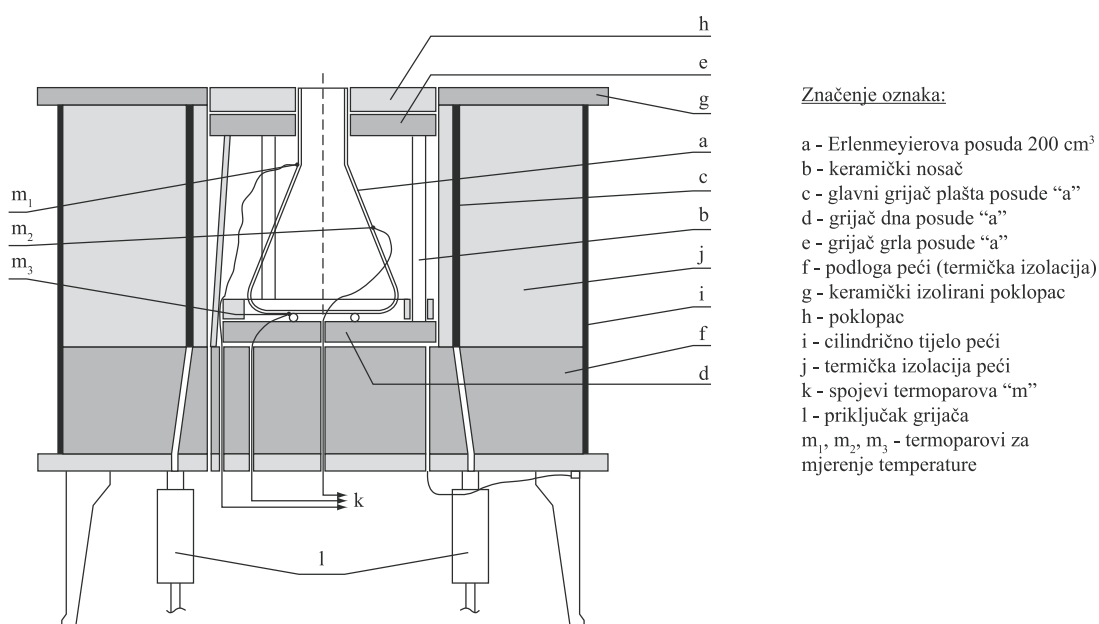
Za granična područja, sivo označena na slici 3.10., treba provesti obje analize razvrstavanja, prema NSP i prema NPSR.

3.1.2. Temperatura paljenja i razvrstavanje plinova i para u temperaturne razrede

U dosadašnjim razmatranjima energije paljenja, u ovom radu, nije razmatran utjecaj temperature uzročnika paljenja budući da je razmatrana energija paljenja električnom iskrom (kod NSP) i plamenom eksplozije (kod NPSR) čije su temperature najmanje 1000 K, odnosno sigurno su iznad temperature paljenja svih poznatih zapaljivih plinova i para. Temperatura paljenja (samozapaljenja) definirana je [149] kao najniža temperatura koja će neku cjelokupnu smjesu zapaljive tvari i oksidansa dovesti do spontanog paljenja.

Temeljem navedenog postaje jasno da uz električnu iskru kao mogući uzročnik paljenja, npr. stvorenu kvarovima kaveza rotora asinkronog motora, postoje i drugi uzročnici paljenja koji se mogu javiti u obliku „vrućih površina“, a koji mogu nastati npr. usljed preopterećenja ili kvara kod elektromotora. Takav uzročnik paljenja ima dovoljno toplinske energije, kao što i električna iskra ima dovoljno visoku temperaturu da izazove paljenje. Logično se postavlja pitanje kolika je najniža temperatura potrebna da izazove paljenje eksplozivne smjese. Dogovoreno je da je to temperatura na koju je potrebno dovesti sve molekule eksplozivne smjese i pri kojoj će doći do eksplozije bez posebnog uzročnika [156]. Povišenjem temperature eksplozivnoj stehiometrijskoj smjesi plina ili pare, uz normalni atmosferski tlak, po kinetičkoj teoriji plinova dolazi do ubrzanog kretanja molekula i njihovog međusobnog sudaranja pri čemu se oslobađa dovoljna energija da dođe do eksplozije u cijeloj zagrijanoj smjesi.

Izmjerene temperature paljenja nekih plinova, mjerene na uređaju za mjerenje temperature paljenja¹⁶ prikazanom na slici 3.11. (prema HRN IEC 60079-4 odnosno 31/769/CDV (IEC 60079-20-1)), dane su u tablici 3.6.



Slika 3.11. Uređaj za mjerenje temperature paljenja nekih zapaljivih plinova i para

Tablica 3.6. Temperature paljenja plinova

Zapaljivi plin	Izmjerene temperature paljenja, °C
propan	450
metan	595
vodik	560
acetilen	305

Uređaji, električni i neelektrični, namijenjeni uporabi u eksplozivnoj atmosferi plinova i para razvrstani su u šest temperaturnih razreda, prikazanih u tablici 3.7. Spomenuta tablica također razvrstava i plinove i para u odgovarajuće temperaturne razrede sukladno njihovoj temperaturi paljenja. U prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom zapaljivog plina ili pare svrstanog u odgovarajući temperaturni razred, smiju se koristiti samo uređaji čija najviša dopuštena temperatura ne prelazi temperaturu paljenja dotičnog plina ili pare. Tablica 3.7., prema [139], prikazuje razvrstavanje plinova i para te uređaja u temperaturne razrede (za područje II).

Tablica 3.7. Razvrstavanje plinova i para te uređaja u temperaturne razrede

Temperaturni razred	Najviša dopuštena temperatura uređaja, °C	Temperatura paljenja plina ili pare, °C
T1	450	> 450
T2	300	> 300 - 450
T3	200	> 200 - 300
T4	135	> 135 - 200
T5	100	> 100 - 135
T6	85	> 85 - 100

3.1.3. Logički dijagram eksplozije

Mogućnost nastanka eksplozije moguće je prikazati logičkim dijagramom prikazanim na slici 3.12. Dva su nužna uvjeta za nastanak eksplozije:

- eksplozivna smjesa (atmosfera) i
- djelotvoran uzročnik paljenja.

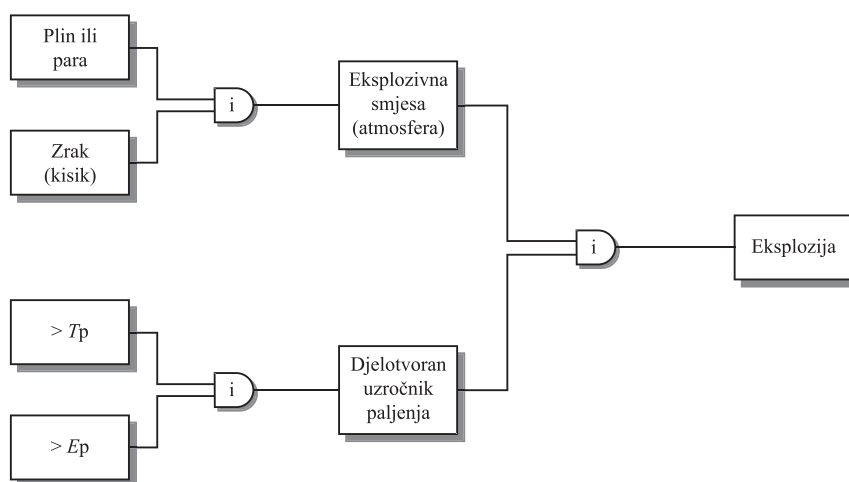
Pri tome se eksplozivnom smjesom smatra u odgovarajućem omjeru, između *DGE* i *GGE*, istodobna prisutnost:

- zapaljivog plina ili pare i
- zraka (kisika).

Da bi uzročnik paljenja, npr. električna ili mehanička iskra ili „vruća površina“ unutar kaveznog asinkronog elektromotora, bio djelotvoran isti mora imati [25]:

- dovoljnu temperaturu za paljenje eksplozivne smjese - T_p i
- energiju koja će osigurati dovoljnu temperaturu uzročnika paljenja - E_p .

Iz dijagrama na slici 3.12. je vidljivo da se onemogućavanje nastanka eksplozije ostvaruje na dva načina. Kada se odgovarajućim mjerama sprječava nastanak eksplozivne atmosfere unutar granica eksplozivnosti govori se primarnim mjerama protueksplozijske zaštite. Ukoliko je nastanak eksplozije onemogućen sprječavanjem nastanka djelotvornog uzročnika paljenja govori se o sekundarnim mjerama protueksplozijske zaštite. I jedna i druga mjera imaju svoja ograničenja u primjeni, no njihovom je kombinacijom moguće postići prihvatljivu razinu rizika od pojave eksplozije.



Slika 3.12. Logički dijagram nastanka eksplozije

Uz pojavu uzročnika paljenja koji ima dovoljnu temperaturu i energiju za paljenje eksplozivne atmosfere nužno je utvrditi ili ocijeniti mogućnost odnosno vjerojatnost pojave eksplozivne atmosfere.

Temelj za utvrđivanje navedenog predstavlja (tradicionalni) postupak klasifikacije prostora i određivanje zona opasnosti. No, moguće je, uvođenjem metodologije zasnovane na procjeni rizika, odrediti vjerojatnost pojave eksplozivne atmosfere - u smislu njene učestalosti i duljine trajanja.

3.2. Klasifikacija prostora i određivanje zona opasnosti

Tradicionalna metoda određivanja zona opasnosti temelji se na čvrsto definiranim pojmovima i definicijama koji su određeni međunarodnim i europskim normama. Za prostore ugrožene zapaljivim plinovima i parama, koji i predstavljaju okruženje analizirano u okviru ovog rada, metodologija određivanja zona opasnosti je definirana normom IEC 60079-10-1 [139]. Klasifikacija prostora ugroženih zapaljivim prašinama nije predmet ovog rada i za njenu detaljniju provedbu se može vidjeti npr. norma IEC 60079-10-2, ili u [24].

Provedba klasifikacije prostora i određivanje zona opasnosti se temelji na značajkama zapaljivih tvari i izvora ispuštanja te na djelotvornosti ventilacije.

3.2.1. Izvori ispuštanja i vjerojatnost pojave eksplozivne atmosfere

Nužni uvjet za pojavu paljenja odnosno nastanak eksplozije je istodobna prisutnost eksplozivne atmosfere i djelotvornog uzročnika paljenja. Često nije moguće spriječiti nastanak i pojavu zapaljive tvari odnosno eksplozivne atmosfere, te je u takvim uvjetima nužno primijeniti posebne mjere protueksplozijske zaštite koje će onemogućiti pojavu djelotvornih uzročnika paljenja.

Prostori ugroženi eksplozivnom atmosferom plinova i para klasificiraju se u zone 0, 1 ili 2 na temelju učestalosti pojave eksplozivne atmosfere i trajanja prisutnosti eksplozivne atmosfere. Tako se zona 0 definira kao prostor u kojemu je eksplozivna atmosfera prisutna trajno, učestalo ili kroz dugi period, u zoni 1 vjerojatnost pojave eksplozivne atmosfere u normalnom radu je „povremena“ dok se u zoni 2 pojava eksplozivne atmosfere ne očekuje, a ako se i pojavi trajati će kratko. Precizan opis i definicije zona opasnosti se mogu vidjeti u literaturi kao npr. [14][24][139]. Kod klasifikacije prostora posebnu važnost imaju značajke izvora ispuštanja zapaljive tvari, posebice u smislu učestalosti odnosno vjerojatnosti pojave eksplozivne atmosfere, kao što su:

- stupanj ispuštanja (trajni-T, primarni-P ili sekundarni-S),
- radna tlak i temperatura i
- intenzitet (jačina) izvora ispuštanja - dG/dt .

Današnji normativni pristup određivanja zona opasnosti se, u smislu definiranja stupnja odnosno učestalosti ispuštanja, oslanja na kvalitativne ocjene (kao npr. ispuštanje se očekuje trajno, učestalo u normalnom radu, rijetko u normalnom radu i sl.). Kako je ranije rečeno, prepoznavanje potencijalnih opasnosti (*Hazard Identification*) unutar EMP-a u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom, između ostalog analizira i mogućnost pojave eksplozivne atmosfere, uslijed očekivanih i neočekivanih kvarova u pogonu/postrojenju koji mogu dovesti do ispuštanja zapaljivih tvari. Posebno se određuje vjerojatnost nastanka takvih stanja u postrojenju.

Procjena rizika, prikazana u ovom radu, kod određivanja vjerojatnosti pojave eksplozivne atmosfere uvažava i uzima u obzir tradicionalne kvalitativne metode, ali također uvodi i primjenjuje kvantitativne („matematičke“) metode analize vjerojatnosti pojave eksplozivne atmosfere, a sve u cilju provedbe konačne i sveobuhvatne procjene rizika od nastanka eksplozije. Opisano je detaljno razrađeno i prikazano u poglavljima ovoga rada koja slijede.

Na trajanje prisutnosti eksplozivne atmosfere od presudne su važnosti značajke ventilacije kao što su:

- intenzitet,
- vrsta (prirodna ili prisilna) i
- raspoloživost (dobra-D, osrednja-O ili loša-L).

Utjecaj stupnja ispuštanja izvora i ocijenjenih značajki ventilacije na određenje zona opasnosti, prema tradicionalnom pristupu, prikazan je u tablici 3.8. Oznaka NP u tablici označava neugroženi prostor.

Tablica 3.8. Određenje zona opasnosti u odnosu na stupanj ispuštanja i značajke ventilacije

Stupanj spuštanja izvora	Vrsta ventilacije		
	Slaba ventilacija (SLV)	Srednja ventilacija (SRV)	Jaka ventilacija (JAV)
Trajni	zona 0	zona 0 i zona 1 ili 2	zona 1 ili 2 ili NP
Primarni	zona 1 ili 0	zona 1 i zona 2	zona 2 ili NP
Sekundarni	zona 2 ili 1 ili 0	zona 2	NP ili zona 2

Današnja se metodologija analiza izvora ispuštanja, te učestalosti i trajanja pojave eksplozivne atmosfere temelji na ranije spomenutim normativnim dokumentima. Ograničenje i nedostatak ovog pristupa, odnosno normativnih dokumenata, se ogleda u neanaliziranju svih stanja koja se mogu javiti u pogonu [142] (npr. rad izvan projektiranih parametara, katastrofalni kvarovi, uvjeti okoliša izvan normalnih atmosferskih značajki, nestabilne tvari i oksidansi, mehanička oštećenja i sl.), a koja za posljedicu mogu imati nastanak eksplozivne atmosfere. Sveobuhvatna provedba procjene rizika može i mora nadomjestiti ova normativna ograničenja i nedostatke.

3.2.2. Proračun ventilacije i ocjena zona opasnosti

Na temelju parametara, definiranih u poglavlju 3.2.1., potrebno je provesti ocjenu odnosno procjenu ventilacije, te provjeru određenja zona opasnosti prema kriterijima iz tablice 3.8. Jednadžbe koje povezuju veličine bitne za ocjenu ventilacije odnosno provjeru zona opasnosti prikazane su u tekstu koji slijedi [139]:

$$(dV/dt)_{\min} = \frac{(dG/dt)_{\max}}{k \cdot DGE} \cdot \frac{T}{293} \quad (3.1)$$

gdje je:

- $(dV/dt)_{\min}$ - najniži obujamski protok svježeg zraka,
- $(dG/dt)_{\max}$ - najveći intenzitet ispuštanja izvora zapaljive tvari,
- DGE - donja granica eksplozivnosti,
- k - odabrani faktor sigurnosti i
- T - temperatura okoline.

Uz poznat broj C izmjena zraka moguće je procijeniti pretpostavljeni obujam V_z potencijalno eksplozivne atmosfere pomoću izraza (3.2):

$$V_z = \frac{f \cdot (dV/dt)_{\min}}{C} \quad (3.2)$$

gdje je:

V_Z - pretpostavljeni obujam potencijalno eksplozivne atmosfere,

C - broj izmjena svježeg zraka u jedinici vremena i

f - mjera djelotvornosti ventilacije.

Pretpostavljeni obujam V_Z predstavlja zapravo prostor u kojemu je prosječna koncentracija zapaljivog plina ili pare $0,25 \cdot DGE$ ili $0,5 \cdot DGE$, ovisno o vrijednosti faktora k u izrazu (3.1). Navedeno praktično znači da je na rubu i izvan tog prostora koncentracija zapaljivog plina ili pare znatno manja od donje granice eksplozivnosti.

Ocjena stupnja ventilacije se temelji na odnosu pretpostavljenog obujma V_Z i obujma V_0 . Obujam V_0 predstavlja ukupni ventilirani obujam koji pripada promatranom prostoru i koji opslužuje dotična ventilacija. U zatvorenom prostoru V_0 će u pravilu biti obujam promatrane prostorije. Veza između C , dV_0/dt i V_0 prikazana je izrazom (3.3).

$$C = \frac{dV_0 / dt}{V_0} \quad (3.3)$$

gdje je:

dV_0/dt - ukupni protok svježeg zraka kroz promatrani obujam,

C - broj izmjena svježeg zraka u jedinici vremena i

V_0 - ukupni ventilirani obujam koji pripada promatranom prostoru i koji opslužuje dotična ventilacija.

Ukoliko je V_Z veći od V_0 ventilacija se ocjenjuje kao slaba. Za V_Z manji ili jednak od V_0 , ali veći ili jednak od 1% od V_0 ili veći ili jednak od $0,1 \text{ m}^3$, ventilacija se smatra srednjom, dok se za V_Z manji od $0,1 \text{ m}^3$ ili manji od 1% od V_0 ventilacija određuje kao jaka.

Za odabir električnih uređaja i provedbu procjene rizika njihove primjene u prostorima potencijalno ugroženim eksplozivnom atmosferom, uz poznavanje veličine ugroženog prostora (o čemu govori procjena obujma V_Z), važno je i poznavanje vremena t trajanja koncentracije, što dovodi do konačnog određenja zone opasnosti. Vrijeme trajanja koncentracije t je vrijeme potrebno da prosječna koncentracija padne s početne vrijednosti X_0 na $k \cdot DGE$ nakon završetka ispuštanja.

Navedeno vrijeme se može procijeniti pomoću izraza (3.4).

$$t = -\frac{f}{C} \ln \frac{k \cdot DGE}{X_0} \quad (3.4)$$

gdje je:

t - vrijeme potrebno da prosječna koncentracija padne sa X_0 na $k \cdot DGE$ i

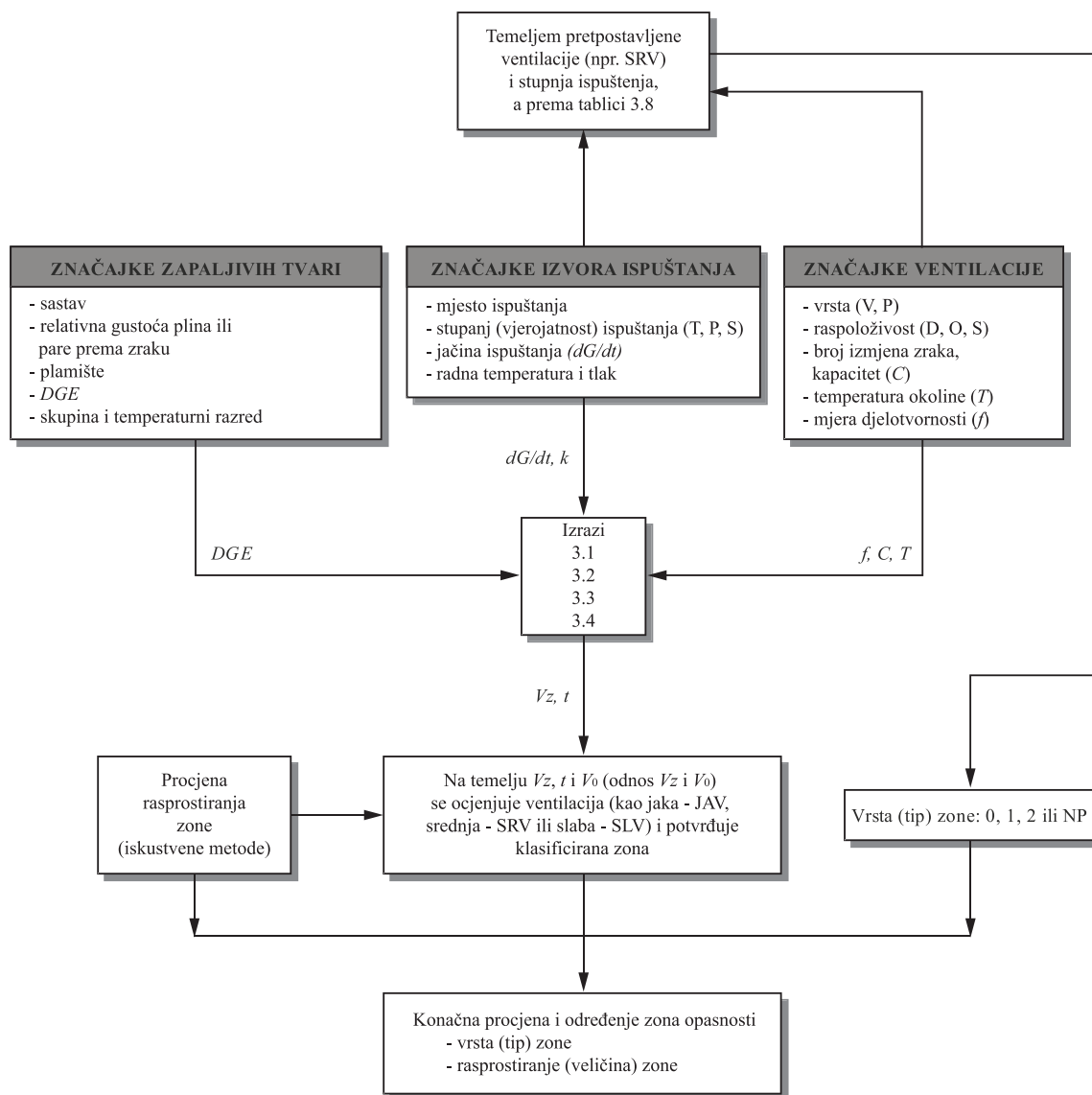
X_0 - početna koncentracija zapaljive tvari.

Uočljiva je, u ranijem opisu i definiranju zona opasnosti, česta uporaba izraza "ocijeniti", "procijeniti", "pretpostaviti" i sl., u čemu se lako može prepoznati terminologija svojstvena postupcima procjene rizika. Korijeni ove terminologije i samog pristupa leže u činjenici da se godinama u svjetskoj normizaciji i praktičnoj primjeni pokušava postaviti formula za proračun određenja tipa i rasprostiranja zona opasnosti no niti jedan dosadašnji pokušaj još nije postigao konsenzus. Proračuni prikazani u ovom poglavlju rada koriste se samo za ilustraciju ocjene ventilacije na čemu se, i uz ranije opisane elemente, temelji kvalitativno-kvantitativno određivanje zona opasnosti odnosno klasifikacija prostora prema tradicionalnom pristupu i normativnim dokumentima.

Provedba klasifikacije prostora odnosno određivanja zona opasnosti zahtjevan je i složen posao koji zahtjeva precizno poznavanje tehnologije postrojenja, uvjeta ventilacije, stanja opreme i slično. Nažalost, neki od parametara na kojima se temelji određivanje zona opasnosti, teško su dostupni (npr. kapacitet izvora ispuštanja, učestalost/vjerojatnost pojave ispuštanja i sl.). Kriteriji za ocjenu dobivenih rezultat također nisu jednoznačni, te je potrebno veliko iskustvo u određivanju zona opasnosti.

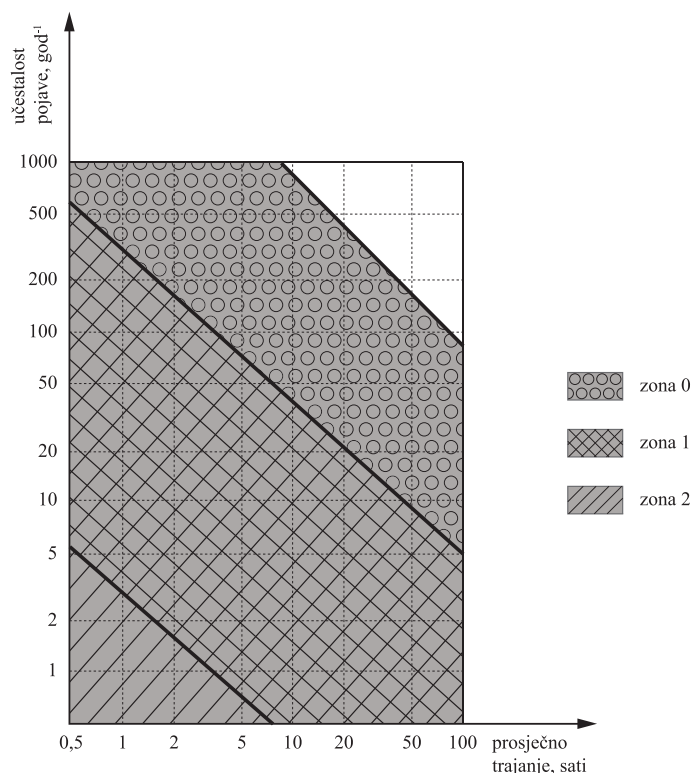
Na slici 3.13 prikazana je moguća pojednostavljena logička shema postupka određivanja zona opasnosti iz koje je vidljiv odnos ulaznih i izlaznih parametara koji sudjeluju u postupku klasifikacije prostora. Slika opisuje samo postupak za zapaljive plinove i pare. Radi jednostavnosti utjecaj otvora među prostorima ovdje nije razmatran.

Slika 3.13 pokazuje da je stupanj odnosno vjerojatnost ispuštanja zapaljive tvari najbitniji, no ne i jedini, čimbenik kod definiranja tipa zone (0, 1 ili 2), dok su značajke ventilacije presudne za određivanje rasprostiranja (veličine/dimenzije) zona opasnosti. Postupak određenja zona opasnosti, temeljen na tradicionalnoj metodologiji (prema IEC 60079-10-1), pokazuje da se klasifikacija prostora temelji na iskustvenim podacima, a ranije spomenutim proračunima ventilacije se provjerava prikladnost pretpostavljene ventilacije.



Slika 3.13. Pojednostavljena logička shema postupka određivanja (procjene) zona opasnosti

Obzirom da su kriteriji temeljeni na pojmovima „učestalo“, „rijetko“, „kratko“ i sl., a koji su proizašli iz normativnih definicija zona opasnosti, prilično neodređeni za realnu primjenu, čini se opravdanim dati preciznije „vremenske“ kriterije za podjelu ugroženih prostora na zone opasnosti, kao što su to npr. kriteriji prikazani na slici 3.14. [25][75][76][145], a koji se također temelje na učestalosti pojave i prosječnom trajanju eksplozivne atmosfere.



Slika 3.14. Vremenski kriteriji za podjelu prostora ugroženih eksplozivnom atmosferom u zone opasnosti

Osnovna težnja kod projektiranja, izgradnje i održavanja postrojenja, koje za posljedicu mogu imati ispuštanje zapaljivih tvari, mora biti smanjenje vjerojatnosti pojave eksplozivne atmosfere odnosno zona opasnosti. Krajnji cilj treba biti „ublažavanje“ tipa zone opasnosti (npr. tehnološkim zahvatima koji pretvaraju trajne u primarne izvore ispuštanja čime zona 0 može postati manje opasna zona 1), te smanjenje rasprostiranja (npr. poboljšanjem prirodne ventilacije ili uvođenjem prisilne). Sve ove mjere vode ublažavanju zahtjeva koji se postavljaju na električnu i ostalu opremu koja je primjenjena u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom i unutar koje je moguća pojava djelotvornih uzročnika paljenja.

Projektiranje, izvedba, održavanje, ispitivanje i dijagnostika elektromotornih pogona (EMP) primjenjenih u ovakvim prostorima, kao i rizici koji proizilaze iz njihove primjene, uvelike i bitno ovise o eksplozijskim značajkama tih prostora. Iz navedenih je razloga u ovom poglavlju rada dan kratki prikaz tih značajki. Detaljno se o pojavi eksplozivne atmosfere i klasifikaciji prostora ugroženih eksplozivnom atmosferom plinova i para može vidjeti npr. u [22][24][25][113][139][142].

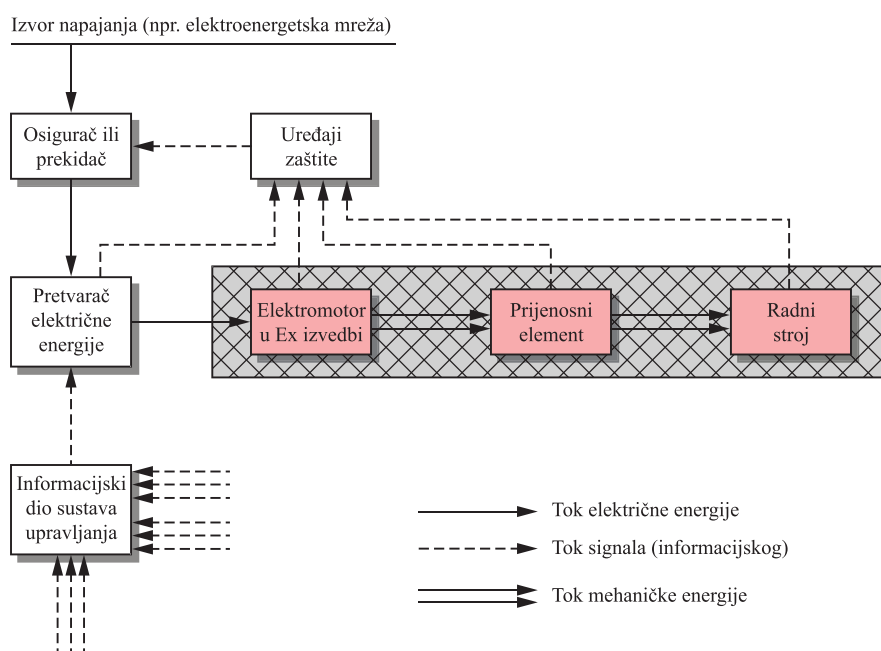
Pojava uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere drugi je, uz postojanje eksplozivne atmosfere, nužni uvjet za nastanak eksplozije. Kvarovi unutar EMP-a, u ovom radu se razmatraju kvarovi asinkronog motora, su mogući djelotvorni uzročnici paljenja te je rizicima koji iz toga proizilaze potrebno posvetiti posebnu pažnju.

3.3. EMP u eksplozivnoj atmosferi i rizik nastanka eksplozije

Analizu potencijalnih opasnosti primjene elektromotornih pogona (EMP) u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom je, kako je već ranije rečeno, moguće podijeliti u dva dijela. Prvi dio, vezan uz vjerojatnost pojave eksplozivne atmosfere, je opisan u poglavlju 3.2. ovog rada. Drugi se dio analiza odnosi na prepoznavanje stanja, u normalnom radu i u uvjetima kvara, koja mogu dovesti do pojave djelotvornih uzročnika paljenja. U okviru ovog rada, kao mogući uzročnik paljenja, primarno se razmatra asinkroni elektromotor. Združivanjem rezultata ovih dvaju dijelova, budući da do eksplozije može doći samo u uvjetima istodobne pojave eksplozivne atmosfere i djelotvornog uzročnika paljenja, moguće je procijeniti rizik primjene EMP-a u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom.

3.3.1. Uzročnici paljenja unutar EMP-a

Pretpostavljena, i u okviru ovog rada analizirana, struktura EMP-a prikazana je na slici 3.15. Iz iste je vidljivo da su elektromotor, prijenosni element i radni stroj jedine komponente EMP-a instalirane u dijelu/prostoru koji je određen kao zona opasnosti.



Slika 3.15. EMP u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom

Iz spomenih su razloga elektromotor, odnosno primjenjene mjere protueksplozijske zaštite istog, temeljni dio ovog rada.

Unutar elektromotora moguća je, uslijed očekivanih i neočekivanih kvarova, nedostatnog održavanja i sl., pojava djelotvornih uzročnika paljenja (npr. uslijed oštećenja namota statora, kvarovi kaveza rotora, oštećenja ležaja i pojava ekscentričnosti i sl.). Tablica 3.9. prikazuje najznačajnije odnosno najučestalije pojave i potencijalne uzročnike paljenja unutar asinkronog elektromotora. Ove je uzročnike paljenja moguće podijeliti u dvije

skupine. Prvu skupinu čine očekivani kvarovi koji su prepoznati i razmatrani tradicionalnim mjerama protueksplozijske zaštite i čija su ispitivanja, ovisno o vrsti primjenjene protueksplozijske zaštite, definirana normativnim dokumentima. Ova temeljna odnosno rutinska ispitivanja protueksplozijske zaštite asinkronog elektromotora, su prikazana u poglavlju 4. ovog rada. Temeljna se ispitivanja provode kod postupka potvrđivanja i certifikacije protueksplozijski zaštićenih motora, te kod provjere istih tijekom eksploatacije.

Tablica 3.9. Najučestaliji potencijalni uzročnici paljenja unutar asinkronog elektromotora

Pojava (uzročnik paljenja)	Mogući uzrok
Vruća površina	Oštećenja/kvarovi kaveza rotora, preopterećenje, kratki spoj i sl.
Električne i mehanički generirane iskre	Oštećenja/kvarovi kaveza rotora, kratki spoj, oštećenje izolacijskog sustava namota statora, kvarovi ležaja, narušavanje zračnih razmaka i provodnih staza, narušavanje mehaničke (IP) zaštite i sl.

U drugu skupinu ispitivanja se mogu ubrojiti specijalistička dijagnostička ispitivanja kao što su dijagnostika stanja kaveza rotora, namota statora, zračnih raspora, ležajeva i sl. Upravo ovim dijagnostičkim ispitivanjima je moguće otkriti kvarove u elektromotoru koji mogu biti ozbiljni uzročnici paljenja eksplozivne atmosfere, a koji nisu predmet temeljnih ispitivanja. Specijalistička dijagnostička ispitivanja asinkronog elektromotora prikazana su u poglavljima 5. i 6. ovog rada. Ova je ispitivanja moguće i nužno provoditi tijekom cijelog životnog vijeka elektromotora kako bi se trajno potvrđivalo da isti ne sadrži djelotvorne uzročnike paljenja. Upravo je tehnička dijagnostika ovakvih kvarova kaveza rotora i procjena rizika da isti dovedu do pojave eksplozije centralni dio ovog rada.

Kako je ranije rečeno, svaki uzročnik paljenja mora imati dovoljnu temperaturu (T) i dovoljnu energiju (E) paljenja da bi mogao izazvati paljenje, što se može prikazati i izrazima (3.5) odnosno (3.6).

$$T > T_p \quad (3.5)$$

$$E > E_p \quad (3.6)$$

gdje je:

T_p - temperatura paljenja (za $E > E_p$) i

E_p - energija paljenja (za $T > T_p$).

Ako je ispunjen samo jedan od uvjeta, sigurno neće doći do eksplozije ma koliki bio drugi parametar odnosno do paljenja ne može doći uz:

$$T < T_{p \min} \quad (3.7)$$

ili

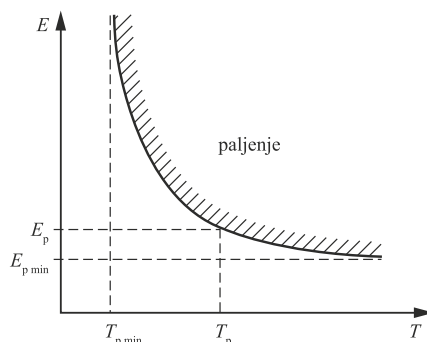
$$E < E_{p \min} \quad (3.8)$$

gdje je:

$T_{p \min}$ - najniža temperatura paljenja i

$E_{p \min}$ - najniža energija paljenja.

Na slici 3.16. prikazana je kvalitativna međusobna ovisnost energije i temperature paljenja koje mora sadržavati uzročnik paljenja da bi postao djelotvoran odnosno da bi mogao izazvati inicijalno paljenja eksplozivne atmosfere

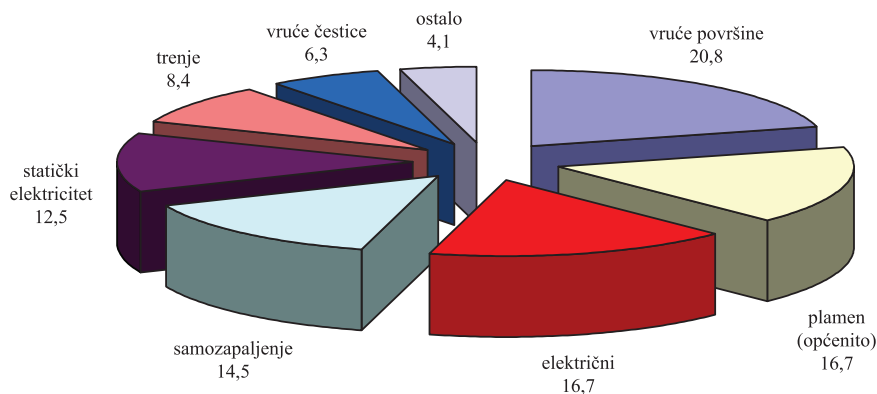


Slika 3.16. Kvalitativni odnos energije i temperature uzročnika paljenja za paljenje eksplozivne atmosfere

Uz prikazanu ovisnost T_p i E_p važno je napomenuti da je za inicijalno paljenje bitna temperatura uzročnika. Energija je neophodna kao podrška da se održi temperatura, tijekom procesa inicijalnog paljenja, na potrebnoj najmanjoj vrijednosti.

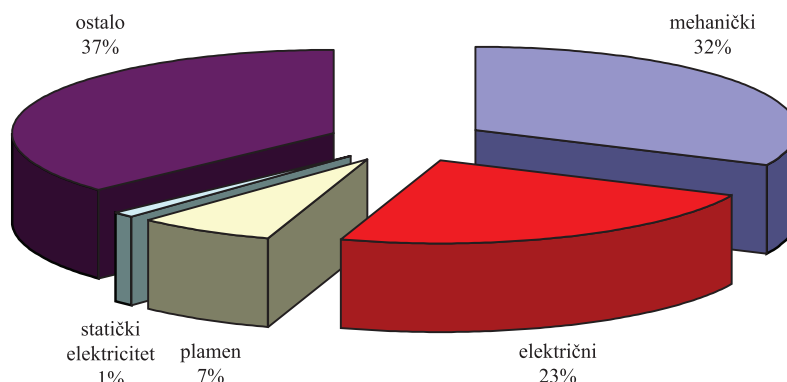
3.3.2. Statistička učestalost uzročnika paljenja

Podaci o pojavnosti uzročnika paljenja, temeljeni na statističkoj raspodjeli, jasan su pokazatelj kojim uzročnicima paljenja treba posvetiti posebnu pozornost²⁷. Učestalost uzročnika paljenja u eksplozijama plinova i para [146][153] prikazana je na slici 3.17. iz koje je vidljivo da su vruće površine bile, u tom istraživanju, najučestaliji uzročnik paljenja. Učestalost prikazana na slici 3.17. je dobivena odbacivanjem nepoznatih uzročnika paljenja.



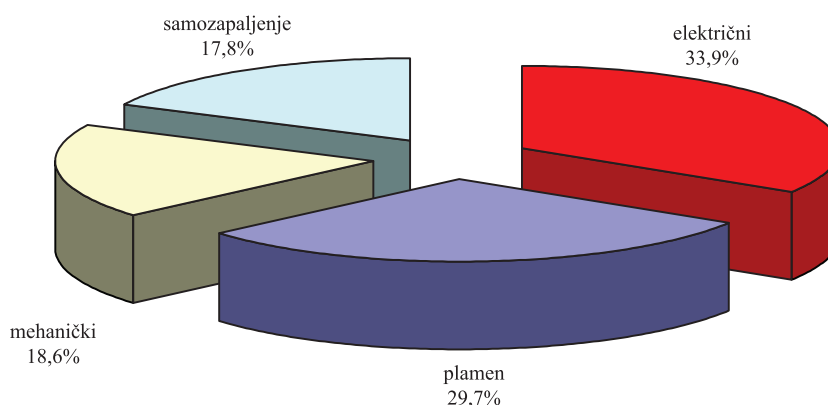
Slika 3.17. Učestalost uzročnika paljenja u eksplozijama plinova i para [146] [153]

Statistička učestalost uzročnika paljenja, dobivena na temelju analize 25000 požara prikazana je na slici 3.18 [154]. Rezultati dobiveni kod ovih istraživanja ukazuju na značajan udio mehaničkih kvarova pri kojima se javljaju mehaničke iskre i vruće površine, u ukupnom broju uzročnika paljenja te također ukazuju na značajan udio električnih uzročnika paljenja.



Slika 3.18. Učestalost uzročnika paljenja [154]

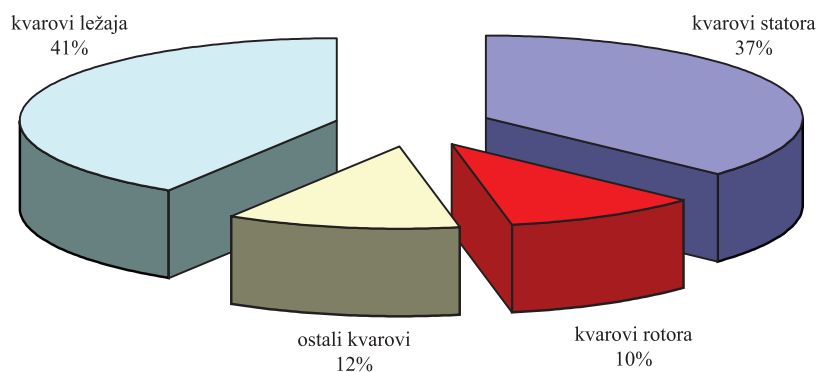
Na slici 3.19 [155] prikazani su rezultati studije učestalosti uzročnika paljenja u procesnim postrojenjima na kopnu. Iz slike je uočljivo da su električni uzročnici paljenja bili najučestaliji. Važno je napomenuti da spomenuta studija navodi da se prikazani podaci odnose na Veliku Britaniju i da su odstupanja u odnosu na raspoložive podatke u Sjedinjenim Američkim Državama vrlo mala, gotovo zanemariva.



Slika 3.19. Učestalost uzročnika paljenja u procesnim postrojenjima na kopnu [155]

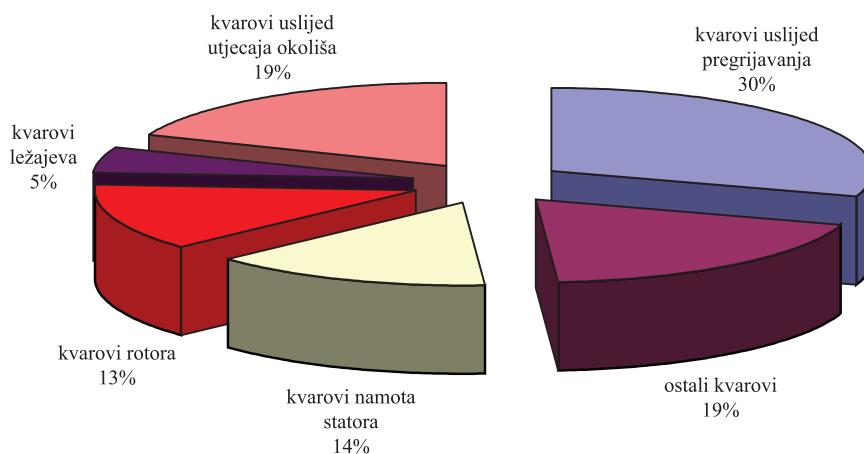
Prikazana učestalost odnosno statistička razdioba pojavnosti uzročnika paljenja je dana s ciljem da ukaže na značaj rizika od pojave uzročnika paljenja, a koji u pravilu nastaju kao posljedica kvarova. Kvarovi unutar elektromotora mogu, npr. kroz pojavu vrućih površina, električnu i mehaničku iskra, postati potencijalni uzročnici paljenja.

Na slici 3.20 [34][73][74] prikazani su rezultati istraživanja provedenog na 6000 kaveznih asinkronih elektromotora. Slika prikazuje učestalost pojedinih kvarova u ukupnim kvarovima elektromotora.



Slika 3.20. Učestalost kvarova asinkronog elektromotora [34][73][74]

Rezultati istraživanja gotovo 10000 kvarova elektromotora [78] prikazani su na slici 3.21. Prema [38] kvarovi kaveza rotora u ukupnim kvarovima asinkronog motora sudjeluju s čak 31,6 %.



Slika 3.21. Učestalost kvarova asinkronog elektromotora [78]

Svakako je važno napomenuti da svaki kvar elektromotora ne znači odmah i pojavu uzročnika paljenja, ali se svakako mora razmotriti kao potencijalni uzročnik paljenja eksplozivne atmosfere.

Kvarovi kaveza rotora, kao mogući uzročnici paljenja eksplozivne atmosfere, temeljni su dio ovog rada. Isti su značajni, kako radi svog udjela u ukupnim kvarovima asinkronog motora, tako i radi činjenice da se u praksi teže dijagnosticiraju od npr. kvarova namota statora ili kvarova ležaja. Kvarovi namota statora i ležajeva su već prepoznati kao mogući uzročnici paljenja [85]¹⁰.

3.4 Tradicionalni pristup osiguranja protueksplozijske zaštite i procjena rizika

3.4.1. Razine sigurnosti opreme (EPL) i kategorije - tradicionalni pristup

Vođena idejom izbjegavanja i/ili smanjivanja rizika od nastanka eksplozije, sprječavanjem istovremene pojave eksplozivne atmosfere i uzročnika paljenja, današnja se metodologija osiguranja protueksplozijske zaštite u elektromotornim pogonima ugroženim eksplozivnom atmosferom temelji na primjeni električnih i neelektričnih uređaja posebno projektiranih i potvrđenih za uporabu u prostorima u kojima je moguća pojava eksplozivne atmosfere. Ovaj se pristup u Europi, između ostalog, temelji na primjeni elektromotora koji osiguravaju određenu razinu sigurnosti opreme (*Equipment Protection Levels*) - EPL Ga, Gb ili Gc, odnosno udovoljavaju određenoj kategoriji (*Category*) - 1, 2 ili 3. Udovoljavanje elektromotora traženoj kategoriji odnosno zahtijevanoj razini sigurnosti opreme se postiže izvedbom istog u određenoj vrsti protueksplozijske zaštite (sukladno IEC i EN normama).

Razina sigurnosti elektromotora i kategorija pojmovi su koji, prema tradicionalnom pristupu, definiraju primjenjivost istog u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom. Razine sigurnosti koje pružaju elektromotori određenog EPL-a odnosno određene kategorije moguće je načelno prikazati prema tablici 3.10. [76][139]. Uobičajeno se elektromotori ne primjenjuju u zoni opasnosti 0 i ne proizvode u kategoriji 1 odnosno EPL-u Ga, te ta razina sigurnosti nije, s naslova ovog rada, značajna. Dopušteni izbor elektromotora ovisno o zonama opasnosti i zahtijevanom EPL-u, odnosno kategoriji, prikazan je u tablici 3.11. [84][131].

Sukladnost protueksplozijske zaštite elektromotora, projektiranog za primjenu u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom, sa zahtjevima tražene razine sigurnosti se potvrđuje postupkom ispitivanja i certifikacije elektromotora.

Tablica 3.10. Razine zaštite (sigurnosti) protueksplozijski zaštićenih elektromotora

EPL (Kategorija)	Razina zaštite (sigurnosti)	Mogući uzročnik paljenja
Ga (1)	Vrlo visoka	Nije uzročnik paljenja niti u normalnom radu niti kod mogućih očekivanih i rijetkih kvarova.
Gb (2)	Visoka	Nije uzročnik paljenja niti u normalnom radu niti kod očekivanih kvarova koji su posebno razmotreni.
Gc (3)	Povećana	Nije uzročnik paljenja u normalnom radu.

Tablica 3.11. Dopušteni EPL i kategorije elektromotora ovisno o zonama opasnosti

Zona opasnosti	Dopušteni (zahtijevani) EPL (Kategorija)	Dopuštena (zahtijevana) vrsta protueksplozijske zaštite elektromotora
0	Ga (1)	Teoretski: Dvije nezavisne vrste zaštite (npr. „Ex e“ + „Ex d“)
1	Ga (1) ili Gb (2)	„Ex d“, „Ex e“, „Ex px“, „Ex py“
2	Ga (1), Gb (2) ili Gc (3)	„Ex d“, „Ex e“, „Ex px“, „Ex py“, „Ex pz“, „Ex n“

Oznake dopuštene vrste protueksplozijske zaštite elektromotora u tablici 3.11. imaju sljedeće značenje:

- „Ex d“ - vrsta zaštite „oklapanje“,
- „Ex e“ - vrsta zaštite „povećana sigurnost“,
- „Ex px“ - vrsta zaštite „nadtak“ za zonu 1 (tipa „px“),
- „Ex py“ - vrsta zaštite „nadtak“ za zonu 1 (tipa „py“),
- „Ex pz“ - vrsta zaštite „nadtak“ za zonu 2 (tipa „pz“) i
- „Ex n“ - „n“ vrsta zaštite.

3.4.2. Uvođenje procjene rizika u protueksplozijsku zaštitu

Kroz prikaz i razmatranja vezana uz klasifikaciju prostora i određenje zona opasnosti kao i kod analiza pojave uzročnika paljenja uočljivo je često korištenje izraza kao „vjerojatno“, „očekivano“, „visoka/vrlo visoka razina sigurnosti“ i sl. Svi ovi pojmovi ukazuju na neegzaktnost navedenih opisa te su se, zadnjih godina, počele razvijati različite teorije (pristupi) kod numeričkog/vjerojatnosnog odnosno kvantitativnog te kvalitativnog definiranja događaja čija koincidencija može dovesti do eksplozije.

Kada je riječ o kvalitativnoj procjeni rizika razni autori daju svoja viđenja kategorizacije rizika i sl. (npr. [60]) sa manjom ili većom gustoćom polja mreže različitih rizika. Tablica 3.12. prikazuje jednu od mogućih mreža za kvalitativnu ocjenu rizika, u ovisnosti o vjerojatnosti nastanka neželjenog događaja i posljedicama očekivanih gubitaka, za prostore ugrožene eksplozivnom atmosferom. U tablici 3.12. rizici rada postrojenja u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom su kvalitativno procijenjeni (ocijenjeni) kao:

- | | |
|-------------------------|----------------------------|
| IO - izravna opasnost, | NPR - neprihvatljiv rizik, |
| PO - podnošljiv rizik i | PR - prihvatljiv rizik. |

Tablica 3.12. Primjer mreže za kvalitativnu ocjenu rizika u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom

Vjerojatnost (učestalost) nastanka neželjenog događaja (eksplozije)	Posljedice očekivanih gubitaka			
	Katastrofa (eksplozija koja ugrožava široko okolno područje)	Velika šteta (eksplozija unutar postrojenja)	Mala šteta (oštećenje opreme postrojenja)	Neznatna šteta (zastoj u radu postrojenja)
Vrlo učestalo (trajno)	IO	IO	NPR	PO
Vjerojatno (2-3 puta u 2 godine)	IO	IO	NPR	PO
Rijetko (1-2 puta u 20 godina)	IO	NPR	PO	PR
Zanemarivo (teoretski moguće ali izuzetno malo vjerojatno)	NPR	NPR	PO	PR

Danas postoje i kvantitativni pristupi analizi opasnosti u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom. Prema jednom od pristupa [25] se smatra da umnožak vjerojatnosti, prikazan izrazom (3.9), postojanja eksplozivne atmosfere i uzročnika paljenja manji ili jednak od 10^{-8} predstavlja općenito prihvatljiv rizik,

$$p_{ex} = p_{es} \cdot p_{up} \leq 10^{-8} \quad (3.9)$$

gdje je:

p_{es} - vjerojatnost pojave eksplozivne atmosfere,

p_{up} - vjerojatnost pojave uzročnika paljenja i

p_{ex} - vjerojatnost nastanka eksplozije.

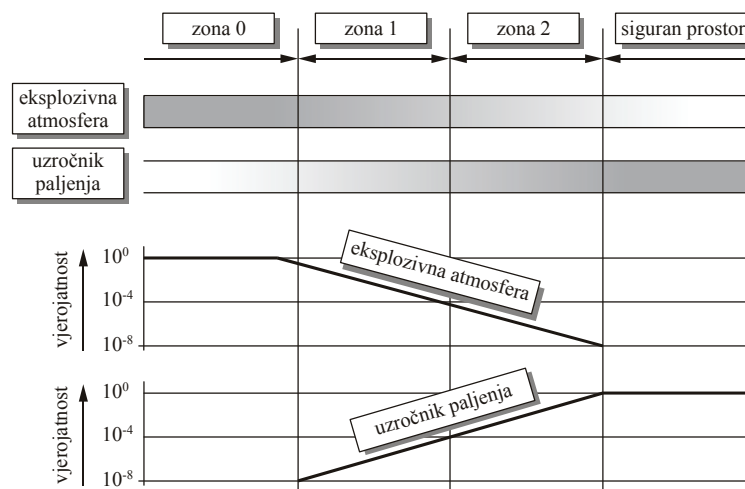
Općenito se [25] za vjerojatnost pojave/postojanja eksplozivne atmosfere mogu uzeti vrijednosti prikazane u tablici 3.13. (drugi stupac).

Tablica 3.13. Vjerojatnost pojave eksplozivne atmosfere i uzročnika paljenja

Zona opasnosti	Vjerojatnost pojave eksplozivne atmosfere (P_{exat})	Najveća dopuštena vjerojatnost pojave uzročnika paljenja (P_{exup})
0	$10^{-2} < P_{exat} \leq 10^0$	$P_{exup} \leq 10^{-8}$
1	$10^{-4} < P_{exat} \leq 10^{-2}$	$P_{exup} \leq 10^{-6}$
2	$P_{exat} \leq 10^{-4}$	$P_{exup} \leq 10^{-4}$

Uzimajući u obzir zahtjeve izraza (3.9) za prihvatljivi rizik, proizilaze dopuštene vjerojatnosti pojave uzročnika paljenja, što je prikazano u trećem stupcu tablice 3.13.

Iz navedenog je vidljivo da se koncepcija protueksplozijske zaštite ne temelji na nepostojanju eksplozivne atmosfere i uzročnika paljenja nego na prihvatljivo maloj vrijednosti njihove koincidencije, što je po definiciji procjena rizika. Navedeno je moguće, prikazati i grafički, kako je prikazano na slici 3.22.



Slika 3.22. Vjerojatnost pojave eksplozivne atmosfere i uzročnika paljenja

Rezultati navedenog pristupa i prikazanih analiza se mogu primjeniti kod provedbe kombinirane (kvantitativno/kvalitativne) ocjene rizika za prostore ugrožene eksplozivnom atmosferom.

Za ilustraciju je prikazana i tablica 3.14. koja daje, kao primjer, jednu moguću vezu između kvantitativne i kvalitativne ocjene rizika.

Tablica 3.14. Primjer veze kvantitativne i kvalitativne ocjene rizika

Oznaka rizika	Kvalitativna ocjena rizika	Kvantitativna (vjerojatnosna) ocjena rizika
IO	Izravna opasnost	$10^{-4} < p_{ex}$
NPR	Neprihvatljiv rizik	$10^{-6} < p_{ex} \leq 10^{-4}$
PO	Podnošljiv rizik	$10^{-8} < p_{ex} \leq 10^{-6}$
PR	Prihvatljiv rizik	$p_{ex} \leq 10^{-8}$

U uvodnom dijelu ovog rada (opis i definicija problema) je navedeno da ocjena posljedica eksplozije nije predmet razmatranja. Nastanak eksplozije se, u okviru ovog rada, smatra neprihvatljivim (fatalnim), te se u tom smislu ne provodi analiza i određivanje kriterija prihvatljivosti. Iz navedenih razloga ovdje prikazani osnovni pojmovi vezani uz ocjenu i kategorizaciju rizika (posebice s naslova očekivanih posljedica) dalje neće, u okviru ovog rada, biti razrađivani. To nikako ne ukazuje na nevažnost ocjene i kategorizacije mogućih neželjenih posljedica. Ovaj se rad bavi analizama vjerojatnosti pojave odnosno nastanka eksplozije, a sve posljedice eksplozije smatra „izravnom opasnošću“ odnosno katastrofom, te u tom smislu analizira mjere kojima se sprječava nastanak eksplozije, npr. uvođenjem dijagnostičkih ispitivanja kojima se detektiraju kvarovi motora prije nego isti postanu djelotvorni uzročnici paljenja.

Uvođenje procjene rizika, koja kritički ocjenjuje zahtjeve današnje regulative, omogućava primjenu novih rješenja koja su često prikladnija i jeftinija od tradicionalnih. Procjeni rizika, kao novom pristupu u analizama protueksplozijske zaštite postrojenja ugroženim eksplozivnom atmosferom, treba posvetiti iznimnu važnost, no pristup mora svakako biti kritički, a granice i uvjeti provedbe procjene rizika potpuno jasni.

4. TEMELJNA ISPITIVANJA PROTUEKSPLOZIJSKI ZAŠTIĆENIH ASINKRONIH MOTORA

U analizama i procjenama rizika primjene elektromotora u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom važno mjesto zauzima utvrđivanje stanja protueksplozijske zaštite elektromotora. Ovaj rad posebno istražuje kako prepoznati kvarove asinkronog elektromotora, naročito one vezane uz kavez rotora, te kako procijeniti njihovu sposobnost da postanu učinkoviti uzročnici paljenja eksplozivne atmosfere. Ispitivanja i aktivnosti vezane uz otkrivanje kvarova asinkronog motora su, u okviru ovog rada, podijeljeni u dvije skupine.

Prvu skupinu čine temeljna ispitivanja protueksplozijske zaštite i ovisna su o vrsti protueksplozijske zaštite motora. Ova se ispitivanja provode, od strane certifikacijske ustanove, tijekom postupka certifikacije motora. Temeljna su ispitivanja također od posebne važnosti i kod periodičkih provjera stanja motora, kojima se otkrivaju mogući kvarovi i narušavanje protueksplozijske zaštite tijekom uporabe. Europske Direktive [63][64], te norme iz područja protueksplozijske zaštite [139] propisuju i definiraju spomenuta temeljna ispitivanja.

Jedan od najznačajnijih ciljeva ovog rada je ukazati da provedba samo temeljnih ispitivanja može biti nedovoljna i manjkava u otkrivanju kvarova koji se, tijekom eksploatacije motora, mogu pojaviti i koji mogu postati uzročnici paljenja.

Da bi se utvrdili rizici primjene elektromotora nakon višegodišnje uporabe u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom, nužno je uz temeljna ispitivanja provesti i specijalistička ispitivanja elektromotora. U ovu skupinu ispitivanja, možemo ubrojiti dijagnostiku stanja kaveza rotora, namota statora, zračnih raspورا, ležajeva i sl.

Samo provedba ispitivanja i dijagnostike, i iz prve i iz druge skupine, daje cjelovitu sliku stanja elektromotora temeljem koje se može provesti sveobuhvatna procjena rizika daljnje primjene istog u okruženju u kojemu se može pojaviti eksplozivna atmosfera. Temeljem provedene procjene rizika moguće je definirati i eventualne potrebne mjere kako bi se rizik od eksplozije sveo na prihvatljivu razinu.

4.1. Temeljna ispitivanja motora u vrsti zaštite povećana sigurnost („Ex e“) u svjetlu današnjih zakonskih i normativnih dokumenata

Primjena elektromotora u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom ne smije dovesti do pojave djelotvornih uzročnika paljenja, što se u pravilu osigurava izvedbom motora u jednoj od vrsta protueksplozijske zaštite. Vrsta protueksplozijske zaštite motora „povećana sigurnost“ („Ex e“) jedna je od najčešće primjenjivanih. Povećana sigurnost je vrsta zaštite električnih uređaja i komponenti u kojoj su primijenjene dodatne mjere kojima

se postiže povećana sigurnost u smislu onemogućavanja nastanka nedopušteno visokih temperatura i električnog luka i iskri u normalnom radu i određenim uvjetima koji ne spadaju u normalni rad.

Obzirom da su „Ex e“ motori jedni od najčešće korištenih u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom te uvažavajući činjenicu da su rizici pojave djelotvornih uzročnika paljenja usljed kvarova asinkronog elektromotora posebno izraženi kod ove vrste protueksplozijske zaštite, npr. u odnosu na motore izvedene u vrsti protueksplozijske zaštite „Oklapanje“ („Ex d), isti su odabrani za istraživanja u ovom radu.

Glavni je razlog široke primjene ove vrste protueksplozijski zaštićenih asinkronih elektromotora niska cijena u odnosu na druge vrste protueksplozijske zaštite. Ova je vrsta protueksplozijske zaštite primjenjiva na uređaje koji u normalnom radu ne iskre i koji imaju ograničeno zagrijavanje, a izvedeni su tako da je rizik od pojave kvara koji bi iskrom, lukom ili pregrijavanjem mogao zapaliti eksplozivnu smjesu na prihvatljivoj razini. Udovoljenjem normativnim zahtjevima za ovu vrstu zaštite se, po definiciji, rizik od nastanka uzročnika paljenja u uvjetima normalnog rada i u slučaju očekivanih kvarova smatra prihvatljivim, za primjenu u zoni opasnosti 1 i 2. Zahtjevi na projektiranje, izvedbu i ispitivanje motora u vrsti zaštite povećana sigurnost su temeljno definirani normom IEC 60079-7, ali i velikim brojem drugih normativnih dokumenta [139]. Normativni dokumenti vezani za električne uređaje namijenjene za rad u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom se izrađuju u okviru međunarodnog tehničkog odbora IEC TC 31.

U ovom je dijelu rada dan sažeti prikaz, u svjetlu današnjih zakonskih i normativnih dokumenta iz protueksplozijske zaštite, najvažnijih zahtjeva na izvedbu „Ex e“ motora te temeljnih ispitivanja koja je potrebno provoditi s ciljem otkrivanja stanja koja odstupaju od spomenutih zahtjeva i koja mogu postati uzročnici paljenja. Rezultati ovih ispitivanja jedni su od nužnih ulaznih podataka za provedbu procjene rizika primjene elektromotora, nakon višegodišnje uporabe, u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom.

Ispitivanja su provedena, u laboratoriju Ex-Agencije i kod proizvođača, na elektromotoru čiji su konstrukcijski podaci prikazani u prilogu B.

Vrsta protueksplozijske zaštite povećana sigurnost primjenjiva na asinkrone motore sastoji se od:

- mehaničke (IP) zaštite aktivnih dijelova motora pod naponom od negativnih utjecaja vode, prašine i drugih utjecaja okoliša,
- pouzdanije električne izolacije i električnih spojeva, u odnosu na motore opće namjene, čime se smanjuje rizik od pojave iskre i
- ograničenog zagrijavanja.

Mehanička zaštita se osigurava kućištem i odgovarajućim zatvaranjem te spojnim elementima (vijci i matice, klinovi, prstenovi i sl.) koji moraju biti osigurani od popuštanja i normalno pritegnuti. Kućište električnih rotacijskih strojeva (osim za priključnu kutiju i neizolirane vodljive dijelove) mora pružati najmanje IP 20 zaštitu za primjenu u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom područja primjene II. Priključna kutija, budući da

sadrži i neizolirane vodljive dijelove pod naponom, mora pružati mehaničku zaštitu najmanje IP 54. Provjera mehaničke (IP) zaštite nema posebnosti u odnosu na provjere kod motora opće namjene te u okviru ovog rada neće biti dalje analizirana.

4.1.1. Ispitivanja i provjere za smanjenje rizika od pojave električne iskre

Električna je iskra jedan od mogućih uzročnika paljenja unutar elektromotora u vrsti zaštite povećana sigurnost te su mjere za sprječavanje njene pojave od posebne važnosti. Ove se mjere primarno ogledaju u osiguranju pouzdanosti električne izolacije i električnih spojeva. Tako se s ciljem očuvanja pouzdanosti električne izolacije i sprječavanja pojava i stanja koja dovode do njenog slabljenja, kod „Ex e“ elektromotora postavljaju stroga ograničenja na najviše dopuštene temperature izolacijskih materijala (npr. izolacije namota). Najviše dopuštene temperature za izolirane namote statora „Ex e“ elektromotora u nazivnom radu prikazane su, prema IEC 60079-7 [139], u tablici 4.1. Iz tablice je vidljivo da su najviše dopuštene temperature umanjene u odnosu na temperature definirane izolacijskom klasom namota prema IEC 60085 (npr. 155 °C za izolacijsku klasu F).

Tablica 4.1. Najviše dopuštene temperature za izolirane namote u nazivnom radu

Vrsta namota	Metoda mjerenja temperature	Toplinski razred izolacijskog materijala (prema IEC 60085)				
		105 (A)	120 (E)	130 (B)	155 (F)	180 (H)
		Granična temperatura u nazivnom radu, °C				
jednoslojno izolirani namot	R ili T	95	110	120	130	155
ostali izolirani namoti	R	90	105	110	130	155
	T	80	95	100	115	135

R = mjerenjem električnog otpora
T = metoda mjerenja termometrom (dopušteno samo kad je mjerenje pomoću otpora nemoguće)
Prikazane vrijednosti graničnih temperatura su rezultat temperature okoline i temperature u nazivnom radu.

U tablici 4.2 prikazane su najviše dopuštene temperature za izolirane namote statora „Ex e“ elektromotora nakon vremena t_E . Vrijeme t_E je vrijeme potrebno da statorski ili rotorski namot izmjenične struje, kada kroz njega teče početna struja pokretanja I_A , kod najviše temperature okoline bude zagrijan od temperature normalnog rada do granične temperature [139].

Tablica 4.2. Najviše dopuštene temperature za izolirane namote nakon vremena t_E

Metoda mjerenja temperature nakon vremena t_E	Toplinski razred izolacijskog materijala (prema IEC 60085)				
	105 (A)	120 (E)	130 (B)	155 (F)	180 (H)
	Granična temperatura nakon vremena t_E , °C				
mjerenjem električnog otpora	160	175	185	210	235

Prikazane vrijednosti graničnih temperatura su rezultat temperature okoline, temperature u nazivnom radu i porasta temperature u vremenu t_E .

Dodatne mjere u smislu osiguranja kvalitete električne izolacije se ogledaju u zahtjevima na izvedbu izolacije vodiča namota i u uvjetima impregnacije¹⁸. Kod

elektromotora u vrsti zaštite „Ex e“ promjer okruglih vodiča ili najmanja dimenzija kod profilnih vodiča namota ne smije biti manja od 0,25 mm.

Načini ostvarenja električnih spojeva, unutrašnjih i s vanjskim strujnim krugovima, u smislu izvedbe priključnih stezaljki, tehnika spajanja i sl., su za „Ex e“ motore detaljno propisani [139]. U tom je smislu nužno, tijekom periodičkih ispitivanja i procjene rizika daljnje primjenjivosti motora, provesti provjere električnih spojeva¹⁹.

Jedno od značajnijih propisanih mjerenja koje se provodi na novim „Ex e“ elektromotorima, ali i tijekom uporabe u svrhe ocjene stanja električne izolacije, je i ispitivanje dielektričke čvrstoće. Prema IEC 60079-7 [139] navedeno mjerenje se provodi u trajanju od najmanje 1 minute slijedećim naponima:

- za motore s naponom napajanja s vršnom vrijednošću koja ne prelazi 90 V sa 500 V
- za motore s naponom napajanja čija vršna vrijednost prelazi 90 V sa $(2U_n + 1000)$ V ili 1500 V, s tim da je mjerodavna veća vrijednost, U_n je nazivni napon elektromotora.

Procjena rizika primjene asinkronih elektromotora u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom je u okviru ovog rada istraživana na elektromotoru (380 V, 47 kW) čiji su konstrukcijski podaci prikazani u prilogu B. Na ovom su motoru, u okviru provedbe temeljnih ispitivanja protueksplozijske zaštite, provedena i ispitivanja dielektričke čvrstoće namota statora, opremom prikazanom na slici 4.1.



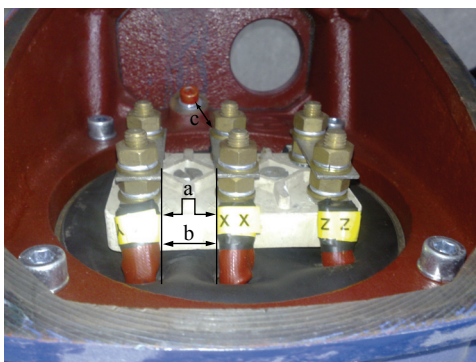
Slika 4.1. Mjerna oprema za ispitivanje dielektričke čvrstoće asinkronog „Ex e“ motora (380 V, 47 kW)

Ispitivanje je provedeno mjernim uređajem za ispitivanje izolacije *Risatti H22/CPS* u laboratoriju Ex-Agencije. Rezultati ispitivanja su prikazani u tablici 4.3.

Tablica 4.3. Rezultati ispitivanja dielektričke čvrstoće asinkronog „Ex e“ motora (380 V, 47 kW)

Nazivni napon elektromotora, V	Ispitni napon $(2U_n + 1000)$, V	Trajanje ispitivanja, min	Rezultat
380	1760	1	Zadovoljava

Provodne staze i zračni razmaci su bitni elementi o kojima ovisi protueksplozijska zaštita „Ex e“ motora. Provodna staza je najkraći razmak po površini izolacijskog materijala između dva vodljiva dijela. Zračni je razmak najkraći razmak kroz zrak između dva vodljiva dijela. Provodne staze i zračni razmaci ispitivanog motora prikazani su slikom 4.2. Najmanji razmak po površini između dijelova pod naponom prikazan je oznakom „a“ na slici 4.2. Najmanji zračni razmak između dijelova pod naponom prikazan je oznakom „b“ na slici 4.2., dok je najmanji zračni razmak prema masi prikazan oznakom „c“.



Slika 4.2. Prikaz provodnih staza i zračnih razmaka

Za ispitivani elektromotor nisu dostupni podaci o električkom izolacijskom materijalu te je pretpostavljen najnepovoljniji slučaj odnosno skupina IIIa ($175 \leq \text{Comparativ Tracking Index (CTI)} < 400$). Rezultati provedenih mjerenja provodnih staza i zračnih razmaka, na predmetnom motoru, te zahtjevi norme IEC 60079-7 [139] su prikazani u tablicama 4.4 i 4.5.

Tablica 4.4. Rezultati mjerenja (provjere) provodnih staza asinkronog „Ex e“ motora (380 V, 47 kW)

Nazivni napon, V	Skupina izolacijskog materijala	Najmanji razmak po površini, mm			
		Između dijelova pod naponom		Prema masi	
		Dopušteno	Izmjereno	Dopušteno	Izmjereno
380	IIIa	12,5	40,1	12,5	32,6

Tablica 4.5. Rezultati mjerenja (provjere) zračnih razmaka asinkronog „Ex e“ motora (380 V, 47 kW)

Nazivni napon, V	Najmanji zračni razmak, mm			
	Između dijelova pod naponom		Prema masi	
	Dopušteno	Izmjereno	Dopušteno	Izmjereno
380	6	25,4	6	14,5

Kod motora u vrsti zaštite povećana sigurnost najmanji radijalni zračni raspor, između statora i rotora, u aktivnom dijelu, kada motor miruje ne smije biti manji od vrijednosti Z_R dane izrazom (4.1) [139]:

$$Z_R = \left[0,15 + \frac{D - 50}{780} \left(0,25 + \frac{0,75 \cdot n}{1000} \right) \right] \cdot r \cdot b \quad (4.1)$$

gdje je:

Z_R - radijalni zračni raspor,

D - promjer rotora,

n - nazivna brzina vrtnje i

b - koeficijent koji za klizne ležajeve iznosi 1.5, a za kotrljajne iznosi 1.0.

Vrijednost koeficijenta r se računa prema izrazu (4.2):

$$r = \frac{d}{1.75 \cdot D} \quad (4.2)$$

gdje je:

d - duljina željeza/jezgre.

Temeljem navedenih izraza se za ispitivani elektromotor, čiji su konstrukcijski podaci prikazani u prilogu B, te uzimajući u obzir da su primijenjeni kotrljajni ležajevi, za najmanji dopušteni radijalni zračni raspor dobije vrijednost 0,76 mm. Na ispitivanom je elektromotoru, u laboratoriju Ex-Agencije, izmjerena vrijednost 1,03 mm što zadovoljava. Ovim je mjerenjem potvrđeno da, uslijed dugogodišnjeg rada motora, provedenih servisnih aktivnosti, zamjene ležajeva, popravaka rotora i sl. nije došlo do narušavanja najmanjeg dopuštenog radijalnog zračnog raspora.

Sve su ove mjere predviđene i zahtijevane sa svrhom svođenja rizika od pojave električne iskre unutar „Ex e“ motora, kao uzročnika paljenja, na prihvatljivu razinu.

4.1.2. Faktori rizika kaveznih rotora i potencijalno iskrenje

Pojava iskrenja, kao mogućeg uzročnika paljenja, je posebice opasna kod pokretanja motora [85][139]. Štapovi kaveza rotora moraju biti tvrdo lemljeni ili zavareni na kratkospojne prstenove, osim ako štapovi i prstenovi kaveza nisu izvedeni kao jedan komad. Štapovi moraju čvrsto prijanjati u utore da bi se izbjeglo iskrenje između štapova i rotorske jezgre za vrijeme pokretanja²⁰.

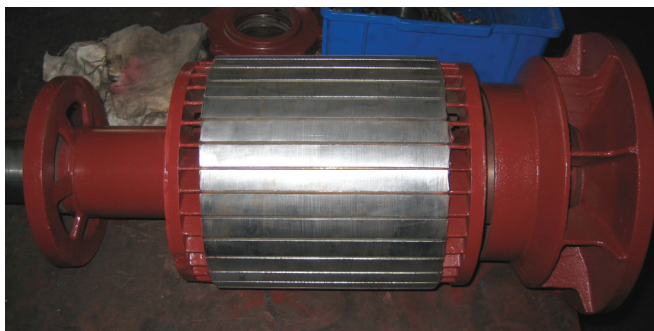
Prepoznavanjem rizika primjene kaveznih asinkronih motora u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom razvijali su se i zahtjevi na ocjenu konstrukcije rotora u odnosu na mogućnost nastanka opasnog iskrenja u zračnom rasporu. Kriteriji za ocjenu faktora rizika paljenjem uslijed iskrenja u zračnom rasporu prikazani su [85][121][139] u prilogu C.

Ukoliko je ukupni faktor rizika veći od 6, motor ili njegov ogledni uzorak mora biti ispitan u eksplozivnoj atmosferi ili mora biti osigurano i nadzirano da kućište motora ne sadrži eksplozivnu atmosferu u vrijeme pokretanja motora.

Ispitivanje u eksplozivnoj atmosferi se provodi nakon procesa starenja rotora koje obuhvaća najmanje 5 ispitivanja sa zakočenim rotorom. Motor se, nakon procesa starenja, puni eksplozivnom plinskom smjesom, koja se za najstrožiji slučaj sastoji od $(21 \pm 5)\%$ vodika u obujamskom odnosu sa zrakom. Nakon toga motor mora biti 10 puta pokrenut s

napajanjem direktno s mreže, bez tereta ili mora biti provedeno 10 ispitivanja sa zakočenim rotorom. Tijekom ispitivanja ne smije doći do eksplozije.

Ukupni faktor rizika rotorskog kaveza motora na kojemu su provedena istraživanja u okviru ovog rada, opisanog u prilogu B, iznosi 7 za T1/T2 odnosno 6 za T3 (vareni rotorski kavez, broj pari polova = 1, bez skošenja, bez radijalnih rashladnih kanala u rotoru, bez stršećih dijelova rotora). Rotor spomenutog motora prikazan je na slici 4.3.



Slika 4.3. Kavez rotora elektromotora (380 V, 47 kW, Ex e II T1/T2/T3)

Obzirom da na spomenutom motoru tijekom tipskih ispitivanja nisu provedena ispitivanja u eksplozivnoj atmosferi isti kod primjene za uvjete T1/T2 mora biti pokretan uz provjeru da kućište motora tijekom zaleta ne sadrži eksplozivnu atmosferu.

4.1.3. Procjena rizika izboja statorskog namota motora iznad 1 kV

Statorski namot asinkronog motora predstavlja, uz kavez rotora, jedan od najznačajnijih mogućih izvora pojave uzročnika paljenja. Stoga je nužno, za motore nazivnog napona iznad 1 kV, provesti procjenu rizika potencijalnog električnog izboja statorskog namota.

Kriteriji za procjenu rizika potencijalnog izboja statorskog namota prikazani su [49] [85][121][139] u prilogu D.

Za „Ex e“ motore nazivnog napona većeg od 1 kV nužno je provesti ispitivanja u eksplozivnoj smjesi i motor mora biti opremljen antikondenzacijskim grijačem. Ukoliko je ukupni faktor rizika veći od 6, dodatno mora biti osigurano i nadzirano da kućište motora ne sadrži eksplozivnu atmosferu u vrijeme pokretanja motora.

Ispitivanja u eksplozivnoj atmosferi se provode na samom motoru ili na odgovarajućem oglednom uzorku. Tijekom ispitivanja motor mora biti napunjen eksplozivnom plinskom smjesom, koja se za najstrožiji slučaj sastoji od $(21 \pm 5)\%$ vodika u obujamskom odnosu sa zrakom. Izolacijski sustav statorskog namota, zajedno s priključnim kablom, se ispituje sinusnim naponom 1,5 puta većim od nazivne efektivne vrijednosti linijskog napona u trajanju od najmanje 3 minute, pri čemu porast napona ne smije biti veći od 0,5 kV/s. Napon mora biti priključen između jedne faze i uzemljenja pri čemu ostale faze moraju biti uzemljene. Tijekom ispitivanja ne smije doći do eksplozije.

Izolacijski sustav statorskog namota također mora, u uvjetima prisutnosti jednake eksplozivne plinske smjese, biti ispitan naponskim impulsima (10 impulsa) s vršnom vrijednošću 3 puta većom od vršne vrijednosti faznog napona s tolerancijom od $\pm 3\%$ i s vremenom porasta napona između $0,2 \mu\text{s}$ i $0,5 \mu\text{s}$. Vrijeme u kojemu je napon impulsa barem pola njegove vrijednosti mora bit najmanje $20 \mu\text{s}$. Impulsi moraju biti primijenjeni na faze međusobno i odvojeno između faza i zemlje²¹. Tijekom ispitivanja ne smije doći do eksplozije.

Ilustrativna procjena rizika izboja statorskog namota provedena za motor u vrsti zaštite povećana sigurnost sustava transporta nafte prikazanog na slici 4.4. i čiji su osnovni podaci prikazani tablicom 4.6., pokazuje da je pokretanje ovog motora prihvatljivog rizika samo uz uvjet i provjeru neprisutnosti eksplozivne atmosfere unutar motora. Ukupni faktor rizika izboja statorskog namota za ovaj motor iznosi 7 (6 kV, broj pokretanja > 1/tjedno, vrijeme između detaljnih pregleda 3 godine, IP 44/54 i uvjeti čistog vanjskog prostora).



Slika 4.4. Elektromotor u vrsti zaštite povećana sigurnost („Ex e II T3“) u sustavu transporta nafte

Tablica 4.6. Osnovni podaci elektromotora

Tip	4AZsh 1127-2
Oznaka zaštite	Ex e II T3
Nazivna snaga	1900 kW
Nazivni napon	6000 V

Ovom ilustracijom procjene rizika izboja statorskog namota motora nazivnog napona 6 kV završava kratki prikaz mjera, ispitivanja i provjera kojima se analiziraju rizici paljenja eksplozivne atmosfere uslijed pojave električne iskre unutar „Ex e“ elektromotora.

4.1.4. Ispitivanje zagrijavanja „Ex e“ asinkronog elektromotora

Budući da se protueksplozijska zaštita elektromotora „povećana sigurnost“ temelji na ograničenju zagrijavanja potrebno je pažljivo i detaljno, posebice na elektromotorima koji su duži niz godina u uporabi, provesti mjerenja temperature. Pri tome je posebno važno

provjeriti i temperaturu rotora, kao kritičnog mjesta, što se mjeri npr. provlačenjem termoparova kroz osovinu elektromotora.

Mjerenja zagrijavanja nazivno opterećenog motora (380 V, 83 A), na kojemu se provode istraživanja u okviru ovog rada i čiji su konstrukcijski podaci prikazani u prilogu B, su provedena kod proizvođača (Končar d.d.). Rezultati provedenih mjerenja su prikazani u tablici 4.7. iz koje je vidljivo da motor udovoljava za deklarirani temperaturni razred (T1/T2/T3). Vrijednosti u tablici prikazuju stagnirane nadtemperature pri temperaturi okoline od 19 °C. Fizikalno utemeljenje, temperature paljenja zapaljivih plinova i para te ograničenja na temperaturu električnih uređaja opisani su u tč. 3.1.2 ovog rada.

Tablica 4.7. Rezultati mjerenja najviših nadtemperatura (elektromotor 47 kW, 380 V, Ex e II T1/T2/T3)

Temperatura okoline, °C	Najviša nadtemperatura, K			
	(1)	(2)	(3)	(4)
19	47,8	40,4	14,3	14,8

Mjerne točke u tablici 4.7. su definirane na slijedeći način:

- (1) - nadtemperatura namota statora,
- (2) - nadtemperatura štapa kaveza rotora,
- (3) - nadtemperatura vanjske stijenke kućišta i
- (4) - nadtemperatura ležaja (pogonska strana).

Najviša dopuštena temperatura prema deklariranom temperaturnom razreda T3 iznosi 200 °C. Najviša nadtemperatura elektromotora u nazivnom radu, utvrđena mjerenjem, iznosi 47,8 K. Najviša temperatura motora preračunata na temperaturu okoline od 40 °C (najviša očekivana vrijednost temperature okoline u kojoj je elektromotor instaliran) iznosi 87,8 °C što je manje od dopuštene temperature tj. udovoljeno je zahtjevima za temperaturni razred T1/T2/T3.

Uz utvrđivanje najviših temperatura nazivno opterećenog „Ex e“ motora od posebne je važnosti i ispitivanje i utvrđivanje vremena t_E odnosno najdužeg dozvoljenog vremena rada motora sa zakočenim rotorom pri kojemu temperatura istog ne prelazi dopuštenu temperaturu određenu izolacijskom klasom i temperaturnim razredom [130][139]. Pojava nedopuštenih zagrijavanja na bilo kojem dijelu „Ex e“ motora, uključujući i rotor, u uvjetima rada u eksplozivnoj atmosferi predstavlja rizik za nastanak eksplozije. Ograničenje zagrijavanja „Ex e“ motora, uz sprječavanje pojave iskre, predstavlja temeljni princip njihove protueksplozijske zaštite.

Nijedna površina elektromotora, uključujući i površine unutrašnjih dijelova elektromotora, do kojih može doprijeti eksplozivna atmosfera, ne smiju dostići temperaturu višu od temperature određene temperaturnim razredom i, za izolirane namote, izolacijskom klasom, prema tablici 3.7. odnosno tablicama 4.1. i 4.2.

Najviša dopuštena ukupna temperatura ϑ_{dop} [10][22][23][24][47][139] iznosi:

$$\vartheta_{\text{dop}} = \vartheta_o + \vartheta_{n\text{max}} + \vartheta_k \leq \vartheta_{\text{kl/tr}} \quad (4.3)$$

gdje je:

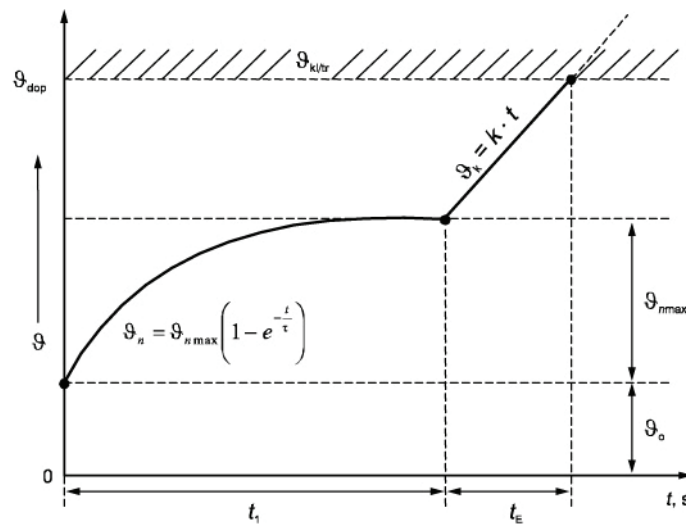
ϑ_o - najviša očekivana temperatura okoline, uobičajeno 40 °C,

$\vartheta_{n\text{max}}$ - najviša stagnirana nadtemperatura nazivno opterećenog motora,

ϑ_k - nadtemperatura zbog kvara, zakočeni rotor i

$\vartheta_{\text{kl/tr}}$ - najviša dopuštena ukupna temperatura izolacijske klase i temperaturnog razreda.

Prikaz dozvoljenog vremena t_E i zagrijavanja motora je dan na slici 4.5 [10][23][47][139].



Slika 4.5. Zagrijavanje i vrijeme t_E kod „Ex e“ elektromotora

Pretpostavlja se da je do zakočenja rotora došlo nakon uspostavljanja stacionarnog stanja nadtemperature nazivno opterećenog motora ($\vartheta_{n\text{max}}$), što predstavlja najnepovoljniji slučaj u smislu povećanih zagrijavanja. Proces zagrijavanja će zbog nazivne struje ili struje kvara započeti oslobađanjem topline ovisno o snazi koja se može iskazati općim izrazom snage [23][25][44][47][139]:

$$P = \rho \cdot j^2 \cdot S \cdot l \quad (4.4)$$

gdje je:

l - dužina vodiča,

P - snaga,

ρ - specifični električni otpor,

j - gustoća električne struje i

S - presjek vodiča.

Intenzitet razvijanja topline ovisi o snazi P dok količina oslobođene topline i temperatura ovise o trajanju snage P . Za količinu oslobođene topline Q se, u diferencijalu vremena, može pisati:

$$dQ = P \cdot dt \quad (4.5)$$

Od razvijene topline dio će biti odveden prijenosom na drugi medij dQ_1 , dok će ostatak dQ_2 djelovati na neposredno povišenje temperature odnosno zagrijavanje tako da vrijedi odnos:

$$dQ = dQ_1 + dQ_2 \quad (4.6)$$

Odvod topline (prijenosom) u vremenu dt iznosi:

$$dQ_1 = k_2 \cdot (\vartheta - \vartheta_o) \cdot dt \quad (4.7)$$

gdje je:

k_2 - koeficijent odvođenja topline (gubitaka) ovisno o površini, toplinskoj vodljivosti materijala i koeficijentu odvođenja topline po jedinici površine za 1 K,

ϑ - temperatura zagrijavanog tijela i

ϑ_o - temperatura okoline (medija) na koju se odvodi toplina dQ_1 .

Dio topline dQ_2 , prema (4.6),

$$dQ_2 = dQ - dQ_1 \quad (4.8)$$

izazvat će proporcionalni porast temperature $d\vartheta$ prema izrazu:

$$dQ_2 = m \cdot c \cdot d\vartheta \quad (4.9)$$

gdje je:

m - masa zagrijanog tijela (vodiča) i

c - specifična toplina (toplinski kapacitet) zagrijanog tijela (vodiča).

Iz dosadašnjih se izraza može postaviti diferencijalna jednadžba za fizikalni proces zagrijavanja kako slijedi:

$$P \cdot dt = k_2 \cdot (\vartheta - \vartheta_o) \cdot dt + m \cdot c \cdot d\vartheta \quad (4.10)$$

Stacionarno stanje će nastupiti kada temperatura zagrijanog tijela više ne raste, a kada će to nastupiti ovisi o vremenu prijelazne pojave i toku zagrijavanja za vrijeme prijelazne pojave. Riješena diferencijalna jednadžba (4.10) poprima oblik:

$$e^{-\frac{k_2}{m \cdot c} \cdot t} = 1 - \frac{k_2}{P} (\vartheta - \vartheta_o) \quad (4.11)$$

odakle zagrijavanje odnosno nadtemperatura iznosi:

$$\mathcal{G}_n = \mathcal{G} - \mathcal{G}_o = \frac{P}{k_2} - \frac{P}{k_2} \left(e^{-\frac{k_2}{m \cdot c} t} \right) = \frac{P}{k_2} \left(1 - e^{-\frac{k_2}{m \cdot c} t} \right) \quad (4.12)$$

ako se uvede pojam vremenske konstante zagrijavanja τ kao:

$$\tau = \frac{m \cdot c}{k_2} \quad (4.13)$$

konačni je izraz zagrijavanja u prijelaznom stanju:

$$\mathcal{G}_n = \mathcal{G}_{n \max} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (4.14)$$

pri čemu je korištena činjenica da stacionarno stanje nastupa kad temperatura zagrijanog tijela više ne raste tj. $dQ_2 = 0$, pri čemu nastaje maksimalna temperatura $\mathcal{G} = \mathcal{G}_{\max}$, normalnog pogona.

U tom slučaju iz izraza:

$$P \cdot dt = k_2 (\mathcal{G} - \mathcal{G}_o) dt \quad (4.15)$$

stacionarno stanje daje:

$$P = k_2 (\mathcal{G}_{\max} - \mathcal{G}_o) \quad (4.16)$$

tj. maksimalna temperatura iznosi:

$$\mathcal{G}_{\max} = \mathcal{G}_o + \frac{P}{k_2} \quad (4.17)$$

odnosno maksimalna nadtemperatura normalnog pogona će biti:

$$\mathcal{G}_{n \max} = \frac{P}{k_2} \quad (4.18)$$

Izraz (4.14) opisuje krivulju zagrijavanja, na slici 4.5, za područje normalnog pogona (područje t_1).

Prema izrazu (4.14) stacionarno stanje normalnog pogona nastupa asimptotski za $t \rightarrow \infty$ ali praktički se može reći da nastupa nakon 5τ . Kod praktičnih mjerenja se uzima da je stacionarno stanje nastupilo ako temperaturna promjena nije veća od 2 K/sat.

Važno je naglasiti da se procesi zagrijavanja i rotora i statora odvijaju po istim fizikalnim principima. Potrebno je odrediti stacionarnu nadtemperaturu normalnog rada i za rotor i za stator.

U svrhu određivanja vremena t_E potrebno je provesti analizu zagrijavanja, i rotora i statora, pri zakočenom motoru, uz pretpostavku da stanje zakočenog motora nastupa nakon postizanja stacionarne temperature normalnog pogona. Prirast temperature po vremenu namota statora pri zakočenom rotoru $\mathcal{G}_{ks}/t$ može se u prvoj aproksimaciji izračunati na osnovi adijabatskog zagrijavanja bakra iz gustoće struje u namotu [25][139]:

$$\frac{\mathcal{G}_{ks}}{t} = j^2 \cdot a \quad (4.19)$$

gdje je:

j - gustoća struje i

a - koeficijent za materijal koji se računa prema izrazu:

$$a = \frac{(1 + \alpha \cdot \Delta t)}{c \cdot \gamma \cdot k} \quad (4.20)$$

gdje je:

α - temperaturni koeficijent električne vodljivosti,

c - specifična toplina (toplinski kapacitet),

γ - gustoća materijala i

k - specifična električna vodljivost.

Za bakar se može uzeti, za područje temperatura oko 70 °C, da je $a_{Cu} = 0,0065$. Za praktičnu primjenu treba primijeniti i redukcijski faktor r koji uzima u obzir prelaz topline na okolinu u impregniranim namotima i iznosi 0,85.

Na taj način izraz (4.19) poprima konačni oblik za prirast temperature:

$$\frac{\mathcal{G}_{ks}}{t} = 0,0065 \cdot r \cdot j^2 \quad (4.21)$$

te uz uvođenje:

$$b = 0,0065 \cdot r \cdot j^2 \quad (4.22)$$

se dobije:

$$\frac{\mathcal{G}_{ks}}{t} = b \quad (4.23)$$

Na sličan način se može pokazati da prirast temperature štapa i prstena rotora po vremenu, uz pretpostavku adijabatskog procesa, iznosi:

$$\frac{\mathcal{G}_{kr}}{t} = j^2 \cdot a \cdot k_w \quad (4.24)$$

gdje je k_w redukcijski faktor kojemu nije moguće utvrditi jednoznačnu vrijednost budući se uvjeti prijenosa topline razlikuju ovisno o konstrukciji rotora (nejednolika raspodjela strujne gustoće).

Oštećenja štapa prstena ili spoja prsten-štap odnosno smanjenje aktivnog presjeka štapa ili spoja na mjestu kvara dovode do povećanja gustoće struje, a time i do povećanja prirasta temperature po vremenu u odnosu na stanje bez oštećenja što unosi rizike od nastanka eksplozije u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom.

Kod strojeva kod kojih su štapovi i prstenovi jednakomjerno opterećeni moguće je, pomoću gubitaka P_{cur} u njima, pretpostaviti linearnu ovisnost prirasta temperature prema izrazu:

$$\frac{\vartheta_{kr}}{t} = \frac{P_{cur}}{c \cdot m} \quad (4.25)$$

gdje je:

- P_{cur} - gubici u bakru štapa i prstena,
- m - masa kaveza (štapova i prstena) i
- c - specifična toplina.

Izrazi (4.23) i (4.25) opisuju krivulju prirasta temperature po vremenu statora i rotora pri zakočenom rotoru (vrijeme t_E prema slici 4.5).

Navedeni proračuni su vrlo korisni kod velikih asinkronih elektromotora jer je u nekim slučajevima moguće izbjeći skupa i teško provediva ispitivanja ili je ispitivanja moguće provesti uz sniženi napon.

Područje “ t_1 ” na slici 4.5. je vrijeme normalnog pogona dok je “ t_E ” vrijeme za koje se dostiže ϑ_{dop} , uz zakočen rotor, a nakon normalnog pogona. Pri postupku utvrđivanja vremena “ t_E ” analize se posebno provode za najtopliju točku rotora i posebno za najtopliju točku statora.

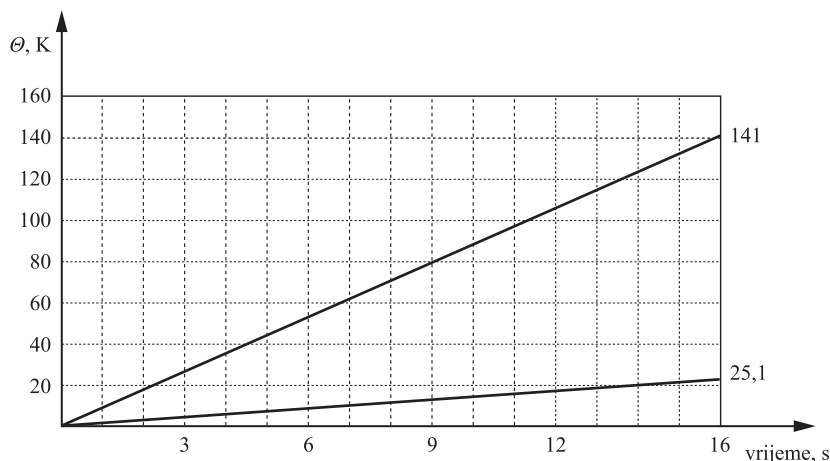
Zagrijavanje elektromotora, u trajnom radu pri nazivnom opterećenju ($\vartheta_0 + \vartheta_{nmax}$), provjereno je mjerenjem kod proizvođača. Temperatura okoline ϑ_0 je iznosila 19 °C, napon ispitivanja je iznosio 380 V, dok je struja iznosila 83 A. Vrsta pogona je bila S1. Zagrijavanje (nadtemperatura) rotora je mjereno termoelementom dok je nadtemperatura statora mjerena metodom mjerenja otpora. Rezultati mjerenja nadtemperatura kaveza rotora i namota statora, nazivno opterećenog motora, prikazani su u tablici 4.7.

Asinkronim elektromotorima s kaveznom rotorom moraju biti utvrđeni/potvrđeni odnos početne i nazivne struje I_A/I_N te vrijeme t_E . Odnos I_A/I_N i vrijeme t_E utvrđuju se proračunom i mjerenjem. Struja kratkog spoja predmetnog motora, izmjerena 5 s nakon uključanja zakočenog motora, pri nazivnom naponu i nazivnoj frekvenciji, je iznosila 498 A. Iz izmjerene struje kratkog spoja i nazivne struje elektromotora dobije se odnos $I_A/I_N = 498/83 = 6,0$. Rezultati ispitivanja zagrijavanja u kratkom spoju prikazani su u tablici 4.8 [157]

Tablica 4.8. Rezultati ispitivanja zagrijavanja u kratkom spoju motora 47 kW, 380 V, Ex e II T1/T2/T3

Vrijeme, s	3	6	9	12	16
Nadtemperatura štapa rotora θ_{rot} , °C	50	75	94	110	141
Nadtemperatura namota statora θ_{stat} , °C	-	-	-	-	25,1
Temperatura okoline, °C	18				

Zagrijavanje rotora i statora za vrijeme zakočenog motora odnosno kratkog spoja je prikazano i grafički na slici 4.6.



Slika 4.6. Zagrijavanje rotora i statora u kratkom spoju

Nakon provedbe ranije opisanih mjerenja, potrebno je, na temelju dobivenih podataka odrediti temperaturni razred predmetnog elektromotora, što čini jednu od temeljnih mjera protueksplozijske zaštite elektromotora povećana sigurnost. Navedeno određivanje temperaturnog razreda je prikazano u tablici 4.9.

Tablica 4.9. Određivanje temperaturnog razreda elektromotora u vrsti protueksplozijske zaštite „Ex e“

Temper. razred	Stator				Rotor			
	θ_{dop} , K	θ_{naz} , K	θ_{tE} , K	t_E , s	θ_{dop} , K	θ_{naz} , K	θ_{tE} , K	t_E , s
T1	145	51	94	> 16	410	42	368	> 16
T2	145	51	94	> 16	260	42	218	> 16
T3	145	51	94	> 16	160	42	118	13
T4	95	51	44	> 16	95	42	53	3
T5	60	51	9	6	60	42	18	–

Dopuštena nadtemperatura u kratkom spoju (θ_{dop}) statora za temperaturne razrede T1, T2 i T3 je dodatno ograničena izolacijskom klasom (za klasu izolacije B granična nadtemperatura u odnosu na 40 °C okoline, prema tablici 4.2. iznosi 145 K). Nadtemperature u nazivnom radu elektromotora (θ_{naz}) su preuzete iz tablice 4.7. i uvećane za sigurnosni faktor vezan uz točnost mjerenja ($\theta_{rot} = 40,4$ K, uzeto 42 K; $\theta_{stat} = 47,8$ K, uzeto 51 K). Dopušteno dodatno zagrijavanje u kratkom spoju (θ_{tE}) se dobije računski: $\theta_{tE} = \theta_{dop} - \theta_{naz}$.

Iz dijagrama na slici 4.6. i prema tablici 4.9. je vidljivo da stator elektromotora, po pitanju zagrijavanja u kratkom spoju, uz određeno vrijeme t_E iznosa 16 s, udovoljava za

temperатурне разреде T1, T2, T3 i T4. За температурни разред T5 допуштено је Θ_{tE} износа 9 K док се статор у времену t_E (16 s) додатно загрије за 25,1 K, дакле статор мотора не удовољава за T5 уз t_E износа 16 s. Из истог дијаграма и таблице је видљиво да ротор електромотора удовољава захтевима, уз одређено вријеме t_E износа 16 s, температурних разреда T1 i T2. Надаље је видљиво да предметни ротор удовољава за T3 уз вријеме t_E износа 13 s. Сва наведена одређења се темеље на резултатима добивеним током испитивања. Произвођач мотора је провео и прорачунско одређење времена t_E те је [157] за T1 добио вриједност од 36 s, за T2 вриједност 19,6 s i за T3 вриједност 8,1 s.

Темељем и једних и других података, те узимајући у обзир утицај истих на животни вијек и сигурности рада мотора, произвођач је одредио коначна времена t_E (за T1/T2 износа 16 s i за T3 износа 8,1 s).

Сукладно захтевима норме HRN IEC 60079-0 [139] проведено је на вентилаторској капи мотора i на прикључној кутији испитивање отпорности на удар. Испитивање је проведено у лабораторију Ex-Агенције.

Испитни елементи су подвргнути утичку испитне масе од 1 kg која пада окомито с висине од 0,7 m што одговара енергији од 7 J (тежи увјети). Утег има главу од челика у облику полукугле прмјера 25 mm. Наведеним испитивањем нису проузрочена оштећења која би нарушила протоексплозијску заштиту те се резултати сматрају задовољјавajuћим.

Како је речено i у уводном дијелу овог поглавља, стварно стање електромотора, у врсти заштите повећана сигурност, након вишегодишњег рада у погону, могуће је установити само provedбом оvdје описаних испитивања i додатних специјалистичких дијагностичких испитивања. Уз темељна испитивања протоексплозијске заштите, приказана у овом поглављу, на електромоторима у врсти заштите повећана сигурност се проводе i додатна темељна испитивања као што су снимање карактеристика празног хода, оптерећења, i кратког spoја. Наведена испитивања, која се проводе током поступка сертификарања, су важна ради провере декларираних података на којима се, кроз анализу загријавања, i темељи протоексплозијска заштита повећана сигурност. Ова се испитивања, у правилу, не проводе током употребе мотора.

Додатна i посебна испитивања електромотора напajаних преко претварача напона i фреквенције нису разматрана i приказана овим радом. Утицај напajања преко претварача на рад мотора, у увјетима нормалног рада i стања кvara, је анализиран i описан у доступној литератури²⁶ (нпр. [18][33][47][109][119][124][125][139]).

4.2. Електромотори у врсти заштите оклапање („Ex d“) i надтлак („Ex p“)

Оснолни принцип врсте протоексплозијске заштите електромотора оклапање („Ex d“) је заштита кућиштем које у случају унутарње експлозије, нпр. услјед електричне искре или прегријаног ротора електромотора, мора:

- издржати тлак експлозије без трајних деформација i

- spriječiti prijenos eksplozije iz kućišta na vanjski okolni prostor, odnosno pouzdano spriječiti probojno paljenje

Otpornost na unutarnji tlak eksplozije se postiže čvrstoćom kućišta dok se probojno paljenje sprječava posebnim oblicima i dimenzijama sastava kroz koji prolazi plamen eksplozije iz unutrašnjosti kućišta u okolni vanjski prostor. Osnovna je zadaća sastava da smanji energiju plamena iz kućišta elektromotora, kao uzročnika paljenja, kako bi ona bila manja od energije inicijalnog paljenja okolne eksplozivne atmosfere.

Temeljno načelo protueksplozijske zaštite elektromotora nadtlak („Ex p“) je u odvajanju dijelova elektromotora, koji mogu biti uzročnici paljenja, od okolne eksplozivne atmosfere zrakom ili inernim plinom pod nadtlakom. Ova se vrsta protueksplozijske zaštite najčešće primjenjuje kod kolektorskih elektromotora, koji u normalnom radu iskre, te kod visokonaponskih motora odnosno motora većih snaga.

Traženi nadtlak se može osigurati trajnom ventilacijom ili namirenjem gubitaka zraka ili inernog plina zatvorenog električnog uređaja u kućištu. Kod elektromotora se uobičajeno primjenjuje varijanta s trajnom ventilacijom.

Iz samog temeljnog načela zaštite nadtlak moglo bi se zaključiti da su unutar kućišta nadtlaka "dopušteni" svi kvarovi elektromotora budući da je izoliran od eksplozivne atmosfere. No, važno je voditi računa o uvjetima pri iznenadnom gubitku nadtlaka. Gubitak nadtlaka automatski zahtjeva isključenje elektromotora s napajanja, čime se eliminiraju iskra i električni luk kao uzročnici paljenja no temperatura elektromotora, koja se ne može trenutno sniziti, može u navedenim uvjetima gubitka nadtlaka postati uzročnik paljenja.

Temeljem iznesenih osnovnih principa protueksplozijske zaštite oklapanje i nadtlak može se zaključiti da su kvarovi kaveza rotora ovih motora manje značajni, s naslova rizika od nastanka eksplozije, nego kvarovi kaveza rotora motora u vrsti zaštite povećana sigurnost.

Navedeno se za motore u vrsti zaštite oklapanje temelji na činjenici da se eksplozija unutar motora, izazvana oštećenjima kaveza rotora, ne prenosi na okolni prostor. Kod vrste zaštite nadtlak ne može doći do eksplozije, čak niti u uvjetima nastanka kvarova rotora, budući da je spriječena prisutnost eksplozivne atmosfere unutar motora.

Iz navedenih je razloga, za istraživanja rizika pojave djelotvornih uzročnika paljenja nastalih uslijed kvarova kaveza rotora asinkronog motora, odabran motor u vrsti zaštite povećana sigurnost („Ex e“). Ispitivanja elektromotora u vrsti zaštite oklapanje i nadtlak nisu predmet ovog rada.

4.3. Manjkavosti temeljnih ispitivanja s naslova procjene rizika

Tijekom eksploatacije elektromotora dolazi do degradacije protueksplozijske zaštite što za posljedicu može imati pojavu djelotvornih uzročnika paljenja unutar istog, npr.

mehaničke i električne iskre, povišena zagrijavanja i sl., a koji nisu prisutni kod ispravnog elektromotora i pri stanju kakvo je bilo kod ispitivanja i certifikacije motora.

Trenutno važeća koncepcija/metodologija osiguranja protueksplozijske zaštite ne analizira, u dovoljnoj mjeri, mogućnosti pojave uzročnika paljenja koji mogu nastati tijekom eksploatacije elektromotora, npr. oštećenja kaveza rotora, slabljenje izolacijskog sustava namota statora i sl.. Današnja koncepcija pretpostavlja, za cijeli vijek primjene motora, stanje protueksplozijske zaštite kakvo je bilo kada je motor bio nov odnosno kada je bio certificiran. Na spomenutoj se pretpostavci temelji današnja protueksplozijska zaštita motora tijekom cijelog životnog vijeka. Ovaj se pristup, s naslova protueksplozijske zaštite, oslanja na „načelnu“ obvezu provedbe pregleda, ispitivanja i popravaka motora, s ciljem održavanja stanja kakvo je bilo kada je motor bio nov odnosno certificiran. Ispitivanja koja je pri tome potrebno, sukladno današnjem pristupu i važećim normativnim dokumentima [139], provesti pripadaju upravo temeljnim ispitivanjima opisanim u ovom poglavlju rada.

Rezultati provedenih temeljnih ispitivanja elektromotora, na kojemu su provedena istraživanja u okviru ovog rada, pokazuju da ista nisu dovoljna za otkrivanje kvarova kaveza rotora koji bi mogli postati djelotvorni uzročnici paljenja. Naime, većina zahtijevanih i provedenih temeljnih ispitivanja, npr. provjera IP zaštite, kontrola zračnih razmaka i provodnih staza, provjera izolacijskog sustava namota statora i ispitivanje otpornosti na udar, je dala rezultate temeljem kojih se stanje protueksplozijske zaštite motora može ocijeniti kao zadovoljavajuće, iako je u vrijeme ispitivanja kavez rotora bio oštećen.

Ispitivanja zagrijavanja rotora tijekom eksploatacije nisu zahtijevana današnjom koncepcijom/metodologijom protueksplozijske zaštite.

Današnja metodologija ne definira postupke za dijagnostiku mogućih kvarova (uzročnika paljenja), a naravno niti kriterije za ocjenu rezultata dijagnostike. Upravo rečeno predstavlja ozbiljnu manjkavost trenutno važeće koncepcije osiguranja protueksplozijske zaštite i ograničavajući je element kod provedbe realne i cjelovite procjene rizika.

Ova koncepcijska manjkavost posebice dolazi do izražaja, u praktičnoj primjeni, kroz nemogućnost ocjene stvarnog stanja protueksplozijske zaštite motora, posebice većih snaga. Jedan je od glavnih ciljeva ovog rada upravo ukazati na navedenu manjkavost.

Manjkavo i necjelovito ispitivanje protueksplozijske zaštite motora tijekom uporabe te na tome temeljena nemogućnost procjene opasnosti koje proizlaze iz primjene motora u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom glavni su nedostaci današnje metodologije.

Iz navedenih razloga ovaj rad daje prijedlog za uvođenje nove sveobuhvatne metodologije osiguranja protueksplozijske zaštite, tijekom cijelog životnog vijeka motora, temeljene na načelima procjene rizika i koja uzima u obzir ranije spomenuta temeljna ispitivanja, ali i uvodi primjenu suvremenih specijalističkih dijagnostičkih ispitivanja.

Zanemarenje spomenute manjkavosti odnosno nemogućnost otkrivanja uzročnika paljenja može, u uvjetima prisutnosti eksplozivne atmosfere, dovesti do pojave eksplozije. Navedeno je posebno značajno kod motora u vrsti zaštite povećana sigurnost. Uvođenje specijalističkih dijagnostičkih ispitivanja je važno upravo za otkrivanje „skrivenih“ kvarova kakvi mogu biti i kvarovi kaveza rotora.

Prijedlozi za uvođenje specijalističkih dijagnostičkih ispitivanja i ustroj nove metodologije ocjene primjenjivosti elektromotora u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom, temeljene na procjeni rizika, temeljni su dio ovog rada.

U poglavlju koje slijedi dan je kratki prikaz dijagnostičkih metoda korištenih u istraživanjima u okviru ovog rada, kao i rezultati primjene istih na asinkronom motoru u vrsti zaštite povećana sigurnost („Ex e“), 380 V, 47 kW.

5. UVOĐENJE DIJAGNOSTIČKIH METODA U PROCJENU RIZIKA PRIMJENE ASINKRONIH MOTORA

Metode tehničke dijagnostike odnosno ispitivanja asinkronih motora, ovisno o njihovom utjecaju na normalan rad pogona, se dijele na "OFF-LINE" i "ON-LINE". Temeljna odlika "OFF-LINE" metoda je potreba za određenim zahvatima i adaptacijama na elektromotoru, pa čak i demontažom elektromotora iz EMP-a što nužno znači kraće ili duže obustavljanje pogona. Za razliku od "OFF-LINE" metoda "ON-LINE" metode omogućavaju primjenu dijagnostike kvarova bez obustavljanja pogona. Iako i jedne i druge metode imaju svoje prednosti i nedostatke za praksu su svakako prihvatljivije "ON-LINE" metode.

Kvalitetna i pravovremena dijagnostika kvara od izuzetne je važnosti za elektromotorni pogon (EMP) u smislu smanjenja prekida rada, povećanja pouzdanosti pogona, smanjenja troškova održavanja, popravaka i sl. te posebice u smislu smanjenja rizika od pojave uzročnika paljenja odnosno nastanka tehnološke eksplozije.

Pravovremeno otkrivanje kvara na elektromotoru u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom može spriječiti nastanak većih kvarova koji mogu biti ozbiljan uzročnik paljenja eksplozivne atmosfere. U tom smislu je moguće spriječiti i kvarove na motoru koji pripadaju skupini teških kvarova, a koje nije moguće, u današnje vrijeme primjenjivanim postupcima ispitivanja motora tijekom uporabe, detektirati odnosno prepoznati. Takvi su kvarovi, kao npr. kvarovi kaveza rotora, realno mogući u EMP-u ugroženom eksplozivnom atmosferom.

U ovom je poglavlju dan prikaz metoda dijagnostičkih ispitivanja asinkronih elektromotora koje su korištene za prepoznavanje i potvrđivanje namjerno izazvanih oštećenja kaveza rotora, sličnih onima koja bi se prema iskustvu mogla pojaviti u nenormalnim pogonskim stanjima u EMP-u. Opisana je i metoda korištena za ispitivanje stanja namota statora. Ova je metoda korištena s ciljem trajnog potvrđivanja, kod svih razina oštećenja kaveza rotora, ispravnosti namota statora kako bi se dokazalo da namot statora nije bio uzročnik paljenja, budući da su ovim radom istraživani kvarovi kaveza rotora kao mogući uzročnici paljenja.

Također su prikazani rezultati spomenutih dijagnostičkih ispitivanja provedenih na, u ovom radu ispitivanom, elektromotoru čiji su podaci prikazani u prilogu B.

Rezultati ovih dijagnostičkih ispitivanja su korišteni kod ocjene daljnje primjenjivosti elektromotora u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom, u uvjetima nastanka kvarova kaveza rotora, temeljene na metodologiji procjene rizika.

5.1. Analiza spektra linijske struje namota statora

Prisutnost eksplozivne atmosfere u EMP-u može biti ograničavajući faktor za primjenu nekih dijagnostičkih metoda navedenih u uvodnim razmatranjima ovog rada.

Ugradnja mjerne opreme, bilo pri samoj izradi protueksplozijski zaštićenog motora, ili naknadno u EMP-u mora biti u skladu sa zahtjevima protueksplozijske zaštite odnosno mora udovoljavati uvjetima uporabe u prostorima ugroženim eksplozijom.

Stoga su kod dijagnostičkih ispitivanja asinkronih elektromotora u EMP-u ugroženom eksplozijom od posebne važnosti dijagnostičke metode kod kojih se sve ispitne radnje i aktivnosti obavljaju izvan prostora ugroženog eksplozijom. Jedna od takvih metoda je i analiza spektra linijske struje namota statora. Mjereni signal (statorska struja) se "snima" u upravljačkom ormaru, daleko od elektromotora, tj. izvan prostora ugroženog eksplozivnom atmosferom.

5.1.1. Principijelna shema i osnovna ideja

Analiza spektra linijske struje namota, kao dijagnostička „ON-LINE“ metoda ispitivanja asinkronih elektromotora, se temelji na pretvorbi signala (struje) iz vremenske u frekvencijsku domenu.

Ova metoda transformira vremenski signal u frekvencijsku domenu. Spektralni prikaz vremenskog signala je skup komponenti u frekvencijskoj domeni. Transformacija se provodi upotrebom Fourier-ove analize [43][47][79], gdje je svaki periodički signal periode T :

$$g(t) = g(t + T) \quad (5.1)$$

predstavljen podjednako razmaknutim frekvencijskim komponentama:

$$G(f_k) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} g(t) \cdot e^{-j \cdot 2\pi \cdot f_k \cdot t} dt \quad (5.2)$$

gdje k predstavlja k -ti harmonik osnovne frekvencije f . Vremenski signal se dobije inverznom funkcijom:

$$g(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} G(f_k) \cdot e^{+j \cdot 2\pi \cdot f_k \cdot t} \quad (5.3)$$

Vidljivo je da kontinuirana periodička funkcija može biti predstavljena kao diskretna serija u frekvencijskoj domeni. U matematici odnosno teoriji diskretnih i linearnih transformacija, se uobičajeno govori o domeni originala (vremenska domena) i domeni slike (frekvencijska domena). Prednost ovih transformacija je što se kontinuirani ulazni signal može približno prikazati, sa željenom točnošću, pomoću konačnog skupa elemenata. Vrlo često je potrebno, za potrebe daljnje obrade, digitalizirati signal iz pretvornika što podrazumijeva uzorkovanje u vremenu. Dakle sami kontinuirani vremenski signali su predstavljeni serijom diskretnih vrijednosti u jednakim vremenskim razmacima, na sličan

način kao što frekvencijska domena prikazuje kontinuirani vremenski signal. Pod navedenim uvjetima jednadžbe (5.2) i (5.3) poprimaju oblik (5.4) i (5.5) [43] [47]:

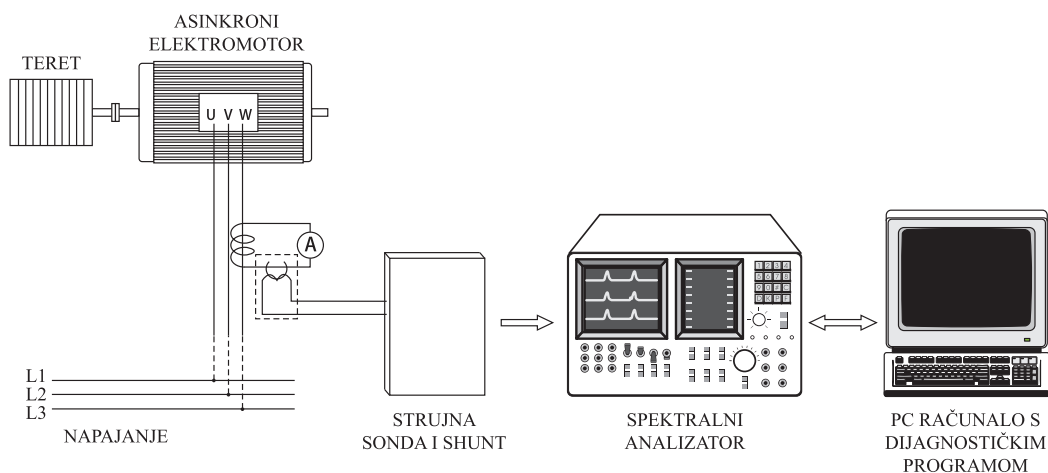
$$G(f_k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} g(t_n) \cdot e^{-j2\pi n \cdot k / N} \quad (5.4)$$

$$g(t_n) = \sum_{k=0}^{N-1} G(f_k) \cdot e^{+j2\pi n \cdot k / N} \quad (5.5)$$

U navedenim izrazima važno je uočiti da se pretvorba uzorkuje na diskretnim frekvencijama f_k , dok je vremenski signal uzorkovan u trenucima t_n . Ovom transformacijom imamo dakle predstavljanje diskretne vremenske funkcije $g(t_n)$ kroz skup diskretnih vrijednosti u frekvencijskoj domeni $G(f_k)$. Ova transformacija je poznata kao Diskretna Fourierova transformacija (DFT).

Na temelju iznosa pojedinih komponenti u frekvencijskom spektru statorske struje, i uz poznavanje konstrukcijskih svojstava elektromotora, moguće je donositi zaključke o vrsti i stupnju kvarova na asinkronom elektromotoru.

Principijelna shema i potrebna oprema za dijagnostiku asinkronog elektromotora primjenom metode analize spektra statorske struje, u pogonskim uvjetima, prikazana je na slici 5.1.



Slika 5.1. Principijelna shema i mjerna oprema za analizu spektra statorske struje

Različita vrsta kvara asinkronog elektromotora uzrokuje u spektru statorske struje porast određene frekvencijske komponente. Te komponente karakterističnih frekvencija i amplituda se koriste za ocjenu stanja elektromotora.

Danas su razvijeni dijagnostički programi koji na temelju spomenutih parametara daju ocjene stanja elektromotora. Iz frekvencijskog spektra statorske struje moguće je detektirati npr. slijedeće kvarove [31][40][47]:

- prekid ili oštećenja štapova kaveza rotora,
- prekid ili oštećenja kratkospojnih prstena,

- statičku i dinamičku ekscentričnost,
- eliptičnost kaveza rotora,
- istrošenost ležaja i
- oscilacije brzine vrtnje.

U ovom su radu provedena ispitivanja vezana uz oštećenja štapova i kratkospojnih prstena kaveza rotora.

Metoda dijagnostike analizom spektra struje statora (struje napajanja) se, ukratko rečeno, temelji na činjenici da kvarovi rotora, npr. puknuća štapova, oštećenja kratkospojnog prstena, tvrdi lemovi ili varovi, poroznost aluminijske i sl., stvaraju nesimetrije u strujama i ulančenim magnetskim tokovima u zračnom rasporu asinkronog elektromotora. Viši harmonici nesimetričnih magnetskih tokova induciraju u statorskom namotu napone i struje čijom se analizom spektra (usporedbom amplitude komponenti struja blizu frekvencije osnovnog harmonika s amplitudom osnovnog harmonika) može ocijeniti vrsta i stupanj kvara u rotoru. Uz poznavanje podataka s natpisne pločice elektromotora nužno je poznavati i neke podatke o rotoru, npr. broj štapova rotora i relativni iznos struje magnetiziranja u odnosu na nazivnu struju, ili ih barem dovoljno dobro pretpostaviti.

5.1.2. Kvarovi kaveza rotora

Kvarovi u kavezu rotora asinkronog motora nastaju zbog velikih mehaničkih i termičkih naprezanja i to učestalije kod motora u EMP-u s čestim pokretanjima ili reverziranjima, tzv. "teški pogoni".

Spomenuta naprezanja su posljedica djelovanja elektromagnetskih sila na štap kaveza rotora, centrifugalnih sila, dinamičkih sila uslijed neuravnoteženosti rotora, vibracija, nestacionarne temperature i sl. Izloženost ovim naprezanjima je izraženija kod elektromotora velikih snaga radi velikih mehaničkih i termičkih naprezanja te zbog zahtjevnijih dinamičkih procesa u EMP-u.

Oštećenja kaveza rotora, npr. lomovi štapova i prstena, u pravilu ne nastaju naglo, već započinju napuknućem na jednom mjestu što za posljedicu ima povećano lokalno zagrijavanje koje pogoduje novim lomovima, te se kvar postupno širi.

Kod manjih motora se koriste aluminijski kavezi dobiveni lijevanjem gdje je moguća pojava nepravilnosti pri samoj izradi (lijevanju) kada se eventualne greške pojavljuju na većem broju motora. Kod većih motora se primjenjuju tvrdo zalemljeni kavezi izrađeni od bakra ili aluminijske kod kojih su najčešće greške loši spojevi štapova i prstena te oštećenja i lomovi istih. Navedene nepravilnosti i kvarovi rotora dovode do nesimetrije otpora kaveza što uzrokuje nesimetrije magnetskog polja. Na slikama prikazanim u prilogu E dani su primjeri teških kvarova kaveza rotora (npr. prema [29]).

5.1.2.1. Detekcija nesimetrije kaveza rotora analizom spektra struje statora

Struje koje teku iz mreže u namote statora su zbog simetrije međusobno pomaknute u fazi, kao i naponi, za kut $2\pi/3$. Takve simetrične struje u simetričnom trofaznom namotu daju okretno protjecanje koje stvara u zračnom rasporu okretno polje magnetske indukcije B . Rotor asinkronog stroja ne napaja se iz vanjskog izvora. U njemu teku samo struje što ih inducira okretno polje stvoreno u zračnom rasporu.

Rotor s neoštećenim kavezom (simetričan rotor) proizvodi okretno polje koje ima jednak broj pari polova p kao i statorski namot. Okretno polje rotora rotira u smjeru vrtnje rotora klizanjem s prema rotoru, odnosno sinkronom brzinom n_s relativno prema statoru.

Navedeno je vidljivo iz činjenice da je, uz jednak broj pari polova p statora i rotora, brzina okretnog polja rotora prema statoru jednaka brzini okretnog protjecanja koje ga je proizvelo, što se može prikazati izrazima (5.6.a), (5.6.b) i (5.6.c) [44].

Brzina okretnog polja rotora prema rotoru je:

$$n_{2s} = \frac{60 \cdot f_2}{p} = \frac{60 \cdot f_1 \cdot s}{p} \quad (5.6.a)$$

dok je brzina rotora prema statoru:

$$n = n_s \cdot (1 - s) = \frac{60 \cdot f_1}{p} \cdot (1 - s) \quad (5.6.b)$$

što za brzinu okretnog polja rotora prema statoru daje:

$$n_{20} = n_{2s} + n = \frac{60 \cdot f_1 \cdot s}{p} + \frac{60 \cdot f_1 \cdot (1 - s)}{p} = n_s \quad (5.6.c)$$

gdje je:

- n_{20} - brzina okretnog polja rotora prema statoru,
- n - brzina vrtnje rotora,
- p - broj pari polova (rotora i statora),
- f_1 - frekvencija napona narinutog na stator,
- f_2 - frekvencija vrtnje okretnog polja prema vodičima rotora ,
- n_s - sinkrona brzina (brzina okretnog protjecanja),
- n_{2s} - brzina okretnog polja rotora prema rotoru i
- s - klizanje rotora.

Struje u štapovima rotora čine simetričan N-fazni sustav struja (N-broj štapova rotora) čiju frekvenciju određuje relativna brzina okretnog magnetskog polja u rasporu prema rotoru tj. [44]:

$$f_2 = \frac{(n_s - n) \cdot p}{60} \quad (5.7)$$

tj.:

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{n_s - n}{n_s} = s \quad (5.8)$$

Ukupno okretno protjecanje θ rezultanta je okretnog protjecanja θ_1 što ga stvaraju struje statora i okretnog protjecanja θ_2 koje uzrokuju struje rotora. Navedeno vrijedi i za ukupno magnetsko polje stvoreno ukupnim protjecanjem.

Narušavanje simetrije rotora, npr. puknućem štapa, dovodi do nesimetrije struje rotora odnosno okretnog polja rotora, koje sudjeluje u stvaranju ukupnog magnetskog polja u rasporu. Nesimetrija kaveza rotora ima za posljedicu nastanak dodatnih harmonika u frekvencijskom spektru ukupnog protjecanja u zračnom rasporu, kojih nema kod neoštećenog (simetričnog) rotora. Zbog malenog zračnog raspora kod asinkronih motora nesimetrija polja utječe [39] i na statorsku struju.

Upravo je utjecaj nesimetrije polja na statorsku struju iskorišten za dijagnostiku stanja rotora asinkronog motora pomoću "analize spektra linijske struje namota statora".

Pri provedbi analize spektra statorske struje s ciljem utvrđivanja stanja rotora, s dijagnostičkog stanovništva, najznačajnije su komponente koja se javlja na frekvenciji f_L odnosno f_D [31][39][127].

$$f_L = f_1 \cdot (1 - 2s) \quad (5.9)$$

$$f_D = f_1 \cdot (1 + 2s) \quad (5.10)$$

Amplituda ovih komponenti je ovisna o stupnju nesimetrije tj. omjeru broja prekinutih štapova i ukupnog broja štapova. Temeljem odnosa amplituda ovih komponenti i osnovne komponente (f_1) se zaključuje o stanju kaveza rotora.

Struja ili dio struje oštećenog štapa rotora se zatvara kroz ostale štapove i dijelove prstena kaveza. Time su "zdravi" štapovi opterećeni dodatnim strujama, kojih nema kod neoštećenog rotora, i na taj način izloženi većim termičkim i mehaničkim naprezanjima. Povećanje ovih naprezanja vodi ka oštećenju i "zdravih" štapova i time širenju kvara na sve veći broj štapova.

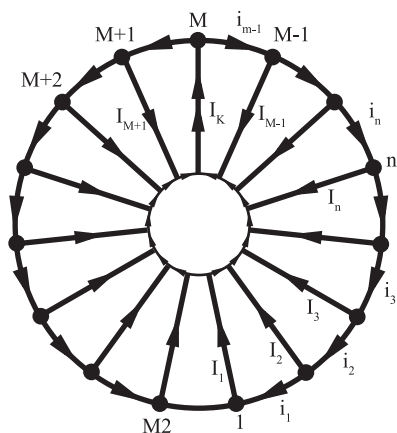
Rano otkrivanje ovih kvarova je relativno teško budući da u normalnom pogonu nije moguće mjeriti struje u rotoru. Kvar se uočava tek u "razvijenoj" fazi kada se manifestira kao gubitak snage motora, povećane vibracije, struganje rotora o stator, oštećenje ležajeva i sl. Iz navedenog je vidljiva važnost primjene dijagnostičkih metoda koje bi kvar otkrile u ranoj fazi nastanka.

U današnjoj literaturi i radovima²² česta je analiza koja struje nesimetričnog kaveza rotora razmatra kroz matricu u kojoj rotor ima broj petlji jednak broju štapova na njemu.

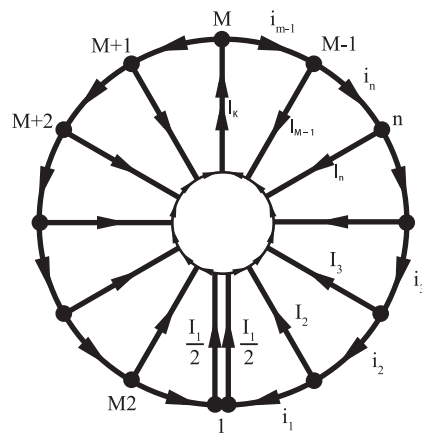
Analiza struja, pri prekidu jednog štapa rotora, se svodi na superponiranje dvaju sustava struja. Prvi sustav čini nepromijenjeni simetričan sustav koji je karakterističan i za ispravan kavez rotora. Drugi sustav, superponiran prvom, opisuje negativnu struju, koja bi

tekla u oštećenom štapu prije prekida, te struje u svim ostalim štapovima, koje pokazuju kako se dodatna struja iz oštećenog štapa zatvara kroz ostali dio kaveza. Problem se praktički svodi na proračun struja drugog sustava budući je prvi (simetrični) sustav dobro poznat i svojstven normalnom radu ispravnog motora.

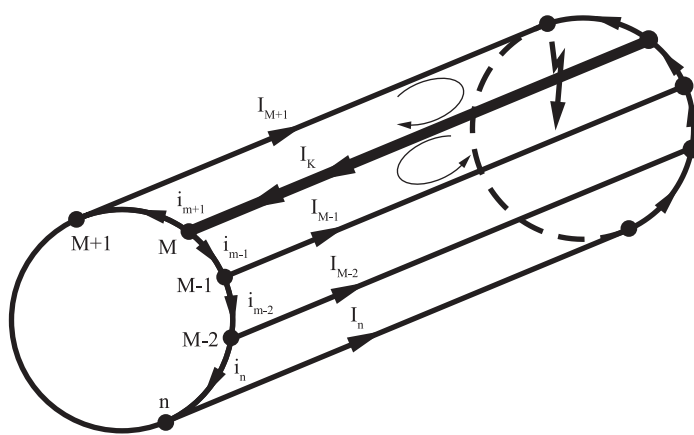
Raspored dodatnih struja u kavezu, pri prekidu jednog štapa, shematski je prikazan, u jednoj ravnini, za kavez s neparnim brojem štapova na slici 5.2.a, a za kavez s parnim brojem štapova na slici 5.2.b. Model kaveza rotora je prikazan na slici 5.2.c. Prekinuti (oštećeni) štap označen je sa M .



Slika 5.2.a Dodatne struje u kavezu pri prekidu štapa - neparni broj štapova



Slika 5.2.b Dodatne struje u kavezu pri prekidu štapa - parni broj štapova

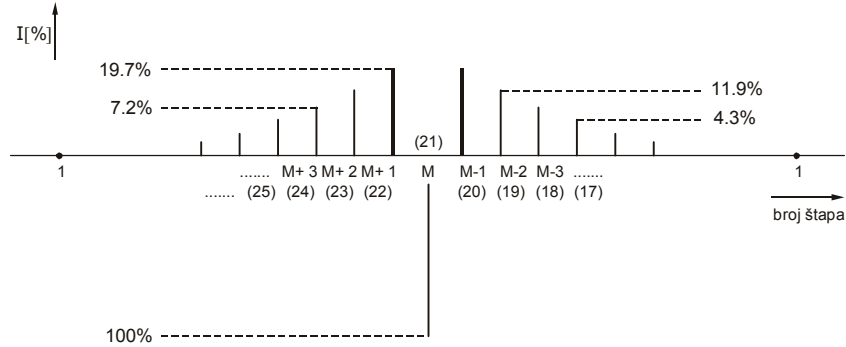


Slika 5.2.c Model kaveza rotora

Označeni raspored struja u štapovima i segmentima prstenova slijedi iz uvjeta potpune simetrije lijeve i desne grane struje na koje se dijeli dodatna struja oštećenog štapa M . Budući se struja oštećenog štapa I_k dijeli u dvije simetrične grane u kavezu, osnovni val protjecanja te struje je dvopolan, bez obzira na broj polova statorskog namota. Rotor s neoštećenim kavezom proizvodi okretno polje koje ima jednak broj polova $2p$ kao i statorski namot.

Problem se svodi na proračun raspodjele struja po štapovima budući da o tome ovisi spektar harmonijskih članova, na čemu se temelji ova dijagnostička metoda.

Na slici 5.3 [32], prikazan je, za ilustraciju, odnos dodatnih struja u štapovima pri prekidu jednog štapa za motor sa $M_2 = 40$ štapova i $2p = 4$. Prekinut je štap br. 21 ($M = 21$).



Slika 5.3. Dodatne struje u štapovima pri prekidu jednog štapa

U zračnom rasporu asinkronog motora nastaje jednofazno izmjenično pulzirajuće polje izazvano dodatnim strujama u štapovima. Komponente tog polja se mogu odrediti Fourierovom analizom. Polje pulsira frekvencijom f_p :

$$f_p = s \cdot f_1 = \frac{s \cdot n_s \cdot p}{60} \quad (5.11)$$

gdje je:

s - klizanje,

f_1 - frekvencija napona narinutog na stator,

n_s - sinkrona brzina vrtnje glavnog harmoničkog člana statorskog polja i

p - broj pari polova statorskog namota.

Takvo pulzirajuće polje može se rastaviti u dva okretna polja rastavljanjem svakog harmoničkog člana reda v posebno. Sa v je označen red harmoničkog razvoja pri kojem osnovni član ($v = 1$) pokriva čitav obod rotora. Ako se, međutim, uzme da osnovni harmonički član pokriva jedan par polova statora, a ne čitav obod, tada je red harmoničkog člana obzirom na stator:

$$v_p = \frac{v}{p} \quad (5.12)$$

Brzina vrtnje direktne komponente se dobiva zbrajanjem, a inverzne komponente oduzimanjem njihove brzine relativno prema rotoru i brzine rotora pri klizanju s . Frekvencija napona i struja, koje će inducirati komponenta reda v_p dodatnog polja u rasporu, u vodičima statora iznosi za direktnu komponentu:

$$f_{dvp} = \frac{\nu \cdot n_d}{60} = f_1 \cdot [\nu_p - s \cdot (\nu_p - 1)] \quad (5.13)$$

odnosno za inverznu:

$$f_{ivp} = \frac{\nu \cdot n_i}{60} = f_1 \cdot [\nu_p - s \cdot (\nu_p + 1)] \quad (5.14)$$

Direktna i inverzna komponenta polja, nastalog dodatnim strujama u štapovima rotora, inducira napone i struje u statorskom namotu. Upravo na tim induciranim strujama se i temelji dijagnostička metoda analize spektra struje statora. Ovih struja nema kod simetričnog (neoštećenog) rotora. Različiti broj polova dodatnog protjecanja rotora i statorskog namota ($2p$) isključit će velik broj harmoničkih članova iz daljnjih analiza. Parni članovi polja ne utječu na induciranu struju u statoru te je potrebno razmatrati samo članove sa $\nu_p = 1, 3, 5, 7 \dots$

Za dijagnostičku primjenu nužno je, uz poznavanje frekvencija struja statora koje će inducirati komponente reda $\nu = 1, 3, 5, 7 \dots$ dodatnog polja u rasporu, odrediti i njihove relativne odnose u odnosu na statorsku struju I_{1u} koja bi tekla pri struji nazivnog opterećenja u štapovima rotora (označene sa 100%).

Za konačne izraze direktne i inverzne komponente dodatne struje I_{ldvp} i I_{livp} u namotu statora se može pisati [32]:

$$I_{ldvp} = \frac{E_{dvp}}{2\pi \cdot f_{dvp} \cdot L_s} \quad (5.15)$$

$$I_{livp} = \frac{E_{ivp}}{2\pi \cdot f_{ivp} \cdot L_s}$$

gdje je:

E_{dvp} - direktna komponenta induciranog napona u statoru,

E_{ivp} - inverzna komponenta induciranog napona u statoru,

f_{dvp} - frekvencija direktne komponente reda ν_p ,

f_{ivp} - frekvencija inverzne komponente reda ν_p i

L_s - ukupni samoinduktivitet namota i mreže u strujnom krugu jedne faze.

Za ilustraciju su, u tablici 5.1 [32], prikazani rezultati računskih analiza za motor 22 kW, 40 štapova, dobiveni opisanom računskom metodom. Proračun dodatnih statorskih struja je proveden za slučaj prekida jednog štapa. Podaci o motoru su: 22 kW, 380 V, spoj trokut, $p = 2$, 1470 min^{-1} , stator 48 utora, 14+15 vodiča/utoru, korak 1-11, rotor kavezni s 40 utora, $k = 2 \cdot r/R = 0,2563$.

Tablica 5.1. Dodatne fazne struje statora pri prekidu jednog štapa (motor 22 kW)

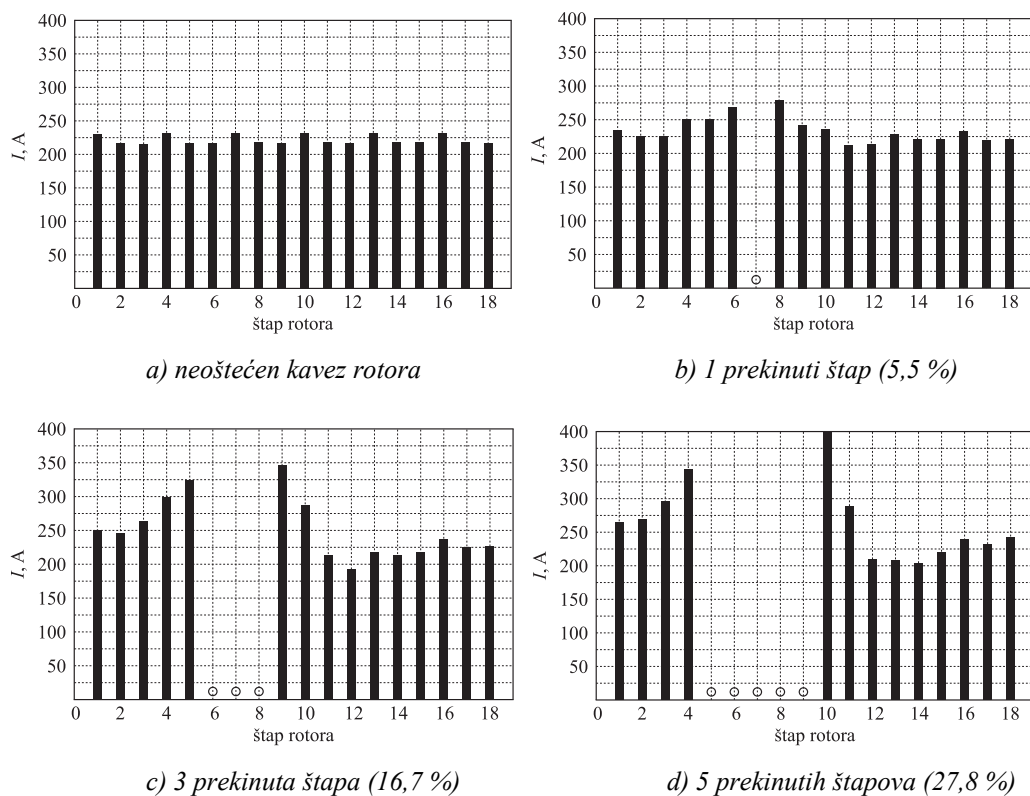
Red harmoničkog člana	rotora (v)	2	6	10	14	18	30
	statora (v_p)	1	3	5	7	9	15
Namotni faktor (f_{nvp})		0,925	0,462	0,053	0,041	0,191	0,191
Struja statora $i_{ldvp} = i_{livp}$, %		2,299	1,830	0,003	0,001	0,932	0,009
Frekvencija ($s = 0,002$)	direktna (f_{dvp})	50	148	246	344	442	736
	inverzna (f_{ivp})	48	146	244	342	440	734

Iz rezultata prikazanih u tablici 5.1 vidljiv je relativni iznosi dodatnih struja u statorskom namotu (i_{ldvp} i i_{livp}), u odnosu na struju opterećenja u statorskom namotu motora s ispravnim kavezom rotora, nastalih kao posljedica prekida jednog štapa rotora. Upravo su navedene komponente značajne za dijagnostičke svrhe.

Sa naslova protueksplozijske zaštite značajno je prikazati amplitude induciranih struja u štapovima rotora (pri oštećenju dijela štapova).

Dio rotorskih struja koji se ne može zatvoriti kroz prekinute štapove zatvara se kroz susjedne štapove. Povećane struje u "zdravim" štapovima uzrokuju lokalna pregrijavanja što dovodi do oštećenja i tih štapova. Navedeno je posebno opasno u prostorima ugroženim eksplozijom budući da može dovesti do paljenja eksplozivne atmosfere odnosno do eksplozije.

Na slici 5.4 [31] su prikazane amplitude induciranih struja u štapovima rotora nazivno opterećenog dvopolnog asinkronog elektromotora. Lagano odstupanja amplituda kod ispravnog rotora posljedica je nejednolikog zračnog rasporeda.



Slika 5.4. Amplitude induciranih struja u štapovima rotora

5.1.3. Rezultati primjene analize spektra linijske struje namota statora

U ovom dijelu rada prikazani su rezultati dijagnostičkih ispitivanja provedenih na asinkronim elektromotorima u vrsti protueksplozijske zaštite povećana sigurnost ("Ex e"), čiji su podaci prikazani u prilogu B.

Ispitivanja su provedena u laboratoriju Ex-Agencije u suradnji sa Zavodom za elektrostrojarstvo i automatizaciju Fakulteta elektrotehnike i računarstva Zagreb.

Pri dijagnostici je korišten programski paket pod nazivom "MOTORMONITOR" koji je razvila tvrtka ENTEK [70]. Podaci snimljeni uporabom programa "MOTORMONITOR" ostaju pohranjeni u računalu te je moguća usporedba rezultata iz više mjerenja. Na taj se način može promatrati trend stanja motora tj. rotora.

Prema principijelnoj shemi (slika 5.1), pri opterećenjima motora bliskim nazivnim, snimani su i u digitalnom obliku pohranjivani signali statorske struje. Obrada i analiza spomenutih signala je obavljena na Zavodu za elektrostrojarstvo i automatizaciju Fakulteta elektrotehnike i računarstva Zagreb, primjenom spektralnog analizatora *Hewlett Packard Dynamic Signal Analyzer 35665A CSA LR50254C* i ranije spomenutog programskog paketa „MOTORMONITOR“. Oprema za prikupljanje i obradu podataka prikazana je u prilogu F.

Ispitivanja su provedena kod ispravnog (neoštećenog) kaveza rotora te za četiri namjerno izazvane razine oštećenja kaveza rotora. Namjerno izazvana oštećenja u rotoru slična su onima koja se, prema iskustvu, pojavljuju u nenormalnim pogonskim stanjima. Oštećenja su, s ciljem što boljeg približavanja realnim pogonskim stanjima motora, provedena na način da simuliraju kvarove ispitivanog motora kakvi su se događali tijekom eksploatacije istog, odnosno koji su utvrđivani i otklanjani tijekom servisnih aktivnosti na ovom motoru.

Prije provedbe ispitivanja u okviru ovog rada motor je servisiran i doveden u ispravno stanje u ovlaštenoj radionici za ispitivanje i popravak protueksplozijski zaštićenih motora o čemu je izdano izvješće o pregledu [158]. Tijekom pregleda i spomenutih servisnih aktivnosti je uočen raniji popravak spoja štapa br. 7 i prstena kaveza rotora, vidljivo na slici G.1 u prilogu G, što upućuje da je tijekom eksploatacije motora došlo do oštećenja spoja štapa br. 7 i prstena kaveza. Namjerna oštećenja kaveza rotora su, u okviru ovog rada, provedena na način da simuliraju spomenuto oštećenje spoja štapa br. 7 i prstena. Daljnji je razvoj oštećenja provođen na način kakav se po iskustvu događa i očekuje u praksi - oštećenja štapova i prstena u blizini početnog/inicijalnog oštećenja.

Opis namjerno izazvanih oštećenja kaveza rotora, prikazanih u prilogu G, pri kojima su provedena ispitivanja je dan tablicom 5.2. Oštećenja svih štapova kaveza rotora su provedena u blizini prstena nepogonske strane motora.

Ispravnim (neoštećenim) stanjem kaveza rotora se, u okviru eksperimentalnog dijela ovog rada, smatra stanje nakon servisa istog provedenog na način kakav se uobičajeno primjenjuje u radionicama za ispitivanje i popravak protueksplozijski zaštićenih motora koje su pod tehničkim nadgledanjem Ex-Agencije, što predstavlja realnu situaciju u praksi i što odgovara stanju ispitivanog elektromotora. Važno je naglasiti da spomenuto ispravno stanje kaveza rotora nije nužno jednako onome kakvo je bilo kada je motor bio nov odnosno

onome kakvo je bilo pri certifikaciji motora, no stanje nakon servisa se može smatrati zadovoljavajućim s naslova opasnosti od pojave uzročnika paljenja, što je potvrđeno i ispitivanjima u eksplozivnoj atmosferi provedenim u okviru ovog rada.

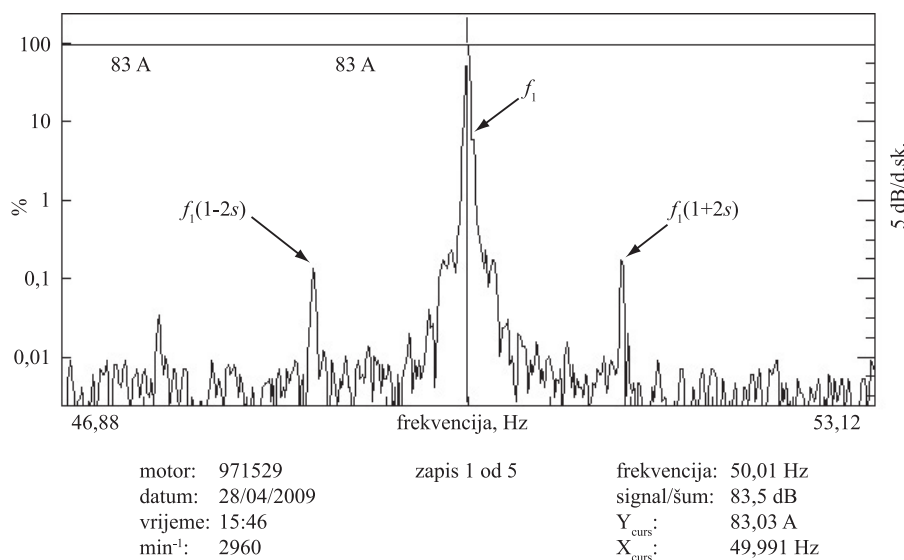
Tablica 5.2. Opis ispitivanih razina oštećenja kaveza rotora

Razina oštećenja	Opis oštećenja
I	Simulirano je napuknuće spoja štap br. 7 i prstena (potpunim rezanjem štapa u blizini prstena nakon čega je ponovno zavaren dio štapa sa prstenom (cca. 20% presjeka štapa).
II	Uz zadržano oštećenje razine I dodatno je potpuno prerezan (u blizini spoja s prstenom) štap br. 8 na način da nije bilo dodirivanja prerezanih dijelova.
III	Uz zadržano oštećenje razine II dodatno je potpuno prerezan (u blizini spoja s prstenom) štap br. 9 s tim da su i kod štapa br. 8 i štapa br. 9 prerezani dijelovi mehanički „priljubljeni“ gotovo cijelom površinom.
IV	Uz zadržano oštećenje razine III dodatno su prerezani štapovi br. 6, 10 i 11 s tim da su prerezani dijelovi štapova br. 6 i 11 dijelom (cca. 10%) bili točkasto mehanički „priljubljeni“ dok kod prerezanog štapa br. 10 nije bilo dodirivanja prerezanih dijelova.

Programski paket „MOTORMONITOR“ ocjenu stanja rotora daje mjerom zvanom "indeks kvara" (indeks stanja) čija je veličina definirana na slijedeći način:

- < 0,5 - bez oštećenja,
- 0,5 - 1,5 - još zadovoljavajuće stanje,
- 1,5 - 2,5 - potreban remont (servis) i
- > 2,5 - motor pred havarijom.

Na slici 5.5 [86] je prikazan spektar struje statora ispitivanog motora za ispravno stanje kaveza rotora. Ispitivanje je provedeno uz struju opterećenja iznosa 83 A. Nazivna struja motora iznosi 83 A. Dobiveni indeks stanja je iznosio 0,12.

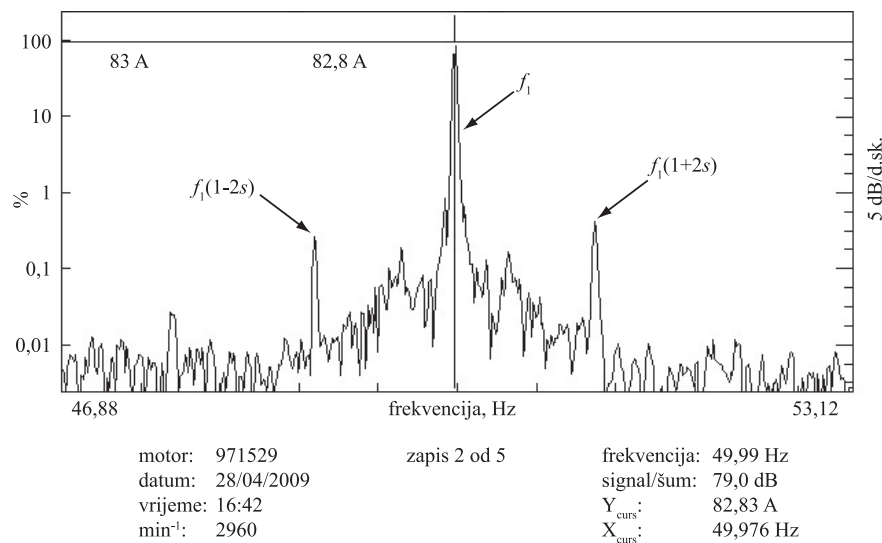


Slika 5.5. Spektar struje statora u okolini frekvencije 50 Hz (ispravan/neoštećen kavez rotora)

Dijagnostička ocjena korištenog programskog paketa za ovaj elektromotor je glasila: "Ovaj je rotorski namot u zdravom stanju i treba biti ponovno ispitan (provjeren) za 12 mjeseci od današnjeg dana ili nakon 200 zaleta, što prije prođe."

Iz slike 5.5. je vidljivo da su iznosi komponenti $f_1(1-2s)$ odnosno $f_1(1+2s)$ zanemarivi (približno 0,15 %) u odnosu na osnovnu komponentu f_1 , što potvrđuje ispravno stanje kaveza rotora.

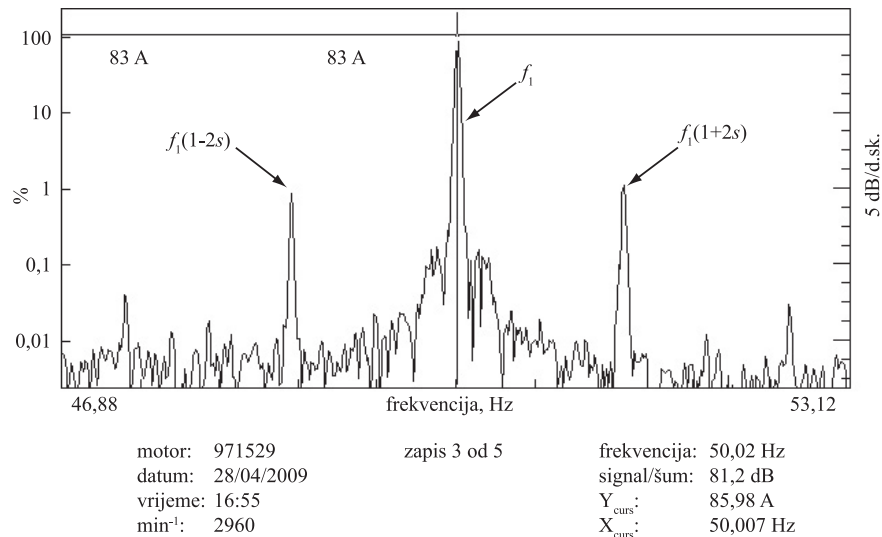
Slika 5.6 prikazuje spektar struje statora ispitivanog motora za razinu oštećenja I. Ispitivanje je provedeno uz struju opterećenja iznosa 82,8 A. Dobiveni indeks stanja je iznosio 0,30.



Slika 5.6. Spektar struje statora u okolini frekvencije 50 Hz (razina oštećenja I)

Dijagnostička ocjena korištenog programskog paketa za ovaj elektromotor je glasila: "U ovom rotorskom namotu pokazuju se slabi znaci visokootpornih spojeva. Rotor treba biti ponovno ispitan za 9 mjeseci od današnjeg dana. Ako je ovaj stroj u „teškom pogonu“ ponovno ispitivanje treba provesti nakon 6 mjeseci ili nakon 50 zaleta, što prije prođe."

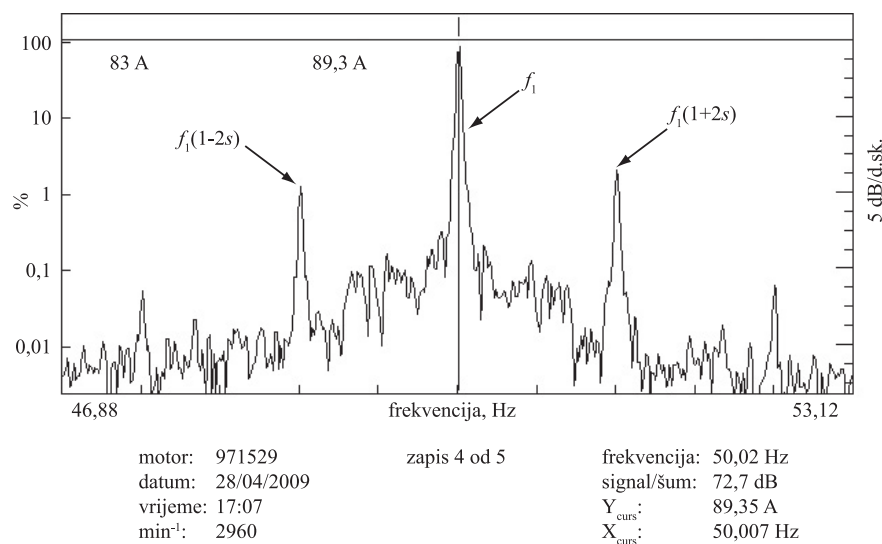
Slika 5.7 prikazuje spektar struje statora ispitivanog motora za razinu oštećenja II. Struja opterećenja pri ispitivanju je iznosila 83 A. Indeks stanja je iznosio 0,75.



Slika 5.7. Spektar struje statora u okolini frekvencije 50 Hz (razina oštećenja II)

Dijagnostička ocjena korištenog programskog paketa za ovaj elektromotor je glasila: "U ovom rotorskom namotu razvilo se više visokootpornih spojeva i namot treba biti ponovno ispitan u roku od 6 mjeseci od današnjeg dana. Ako je ovaj stroj u „teškom pogonu“ ponovno ispitivanje treba provesti nakon 3 mjeseci ili nakon 25 zaleta, što prije prođe."

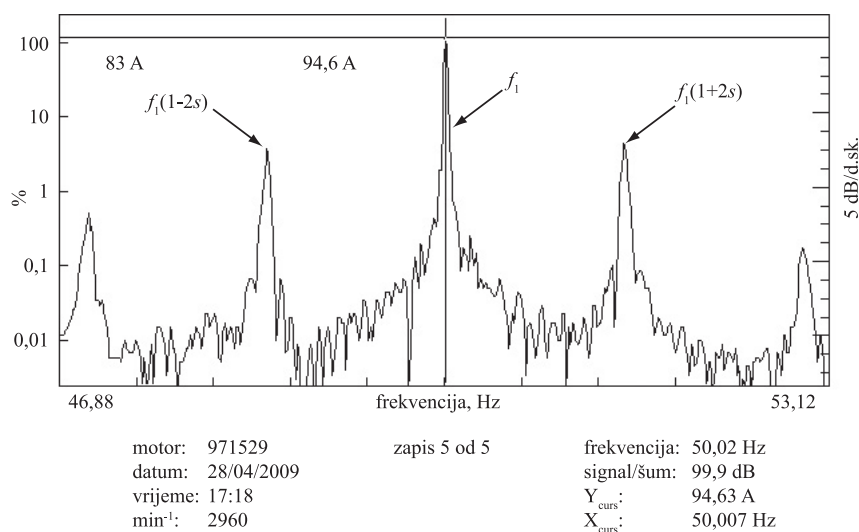
Spektar struje statora ispitivanog motora za razinu oštećenja III prikazan je na slici 5.8. Ispitivanje je provedeno uz struju opterećenja iznosa 89,3 A. Indeks stanja je iznosio 1,29.



Slika 5.8. Spektar struje statora u okolini frekvencije 50 Hz (razina oštećenja III)

Dijagnostička ocjena korištenog programskog paketa za ovaj elektromotor je glasila: "U ovom rotorskom namotu razvio se niz visokootpornih spojeva ili je jedan štap u prekidu. Ponovno ispitivanje treba poduzeti u roku od 6 tjedana od današnjeg dana. Ako je ovaj stroj u „teškom pogonu“ ponovno ispitivanje treba provesti nakon 3 tjedna ili nakon 20 zaleta, što prije prođe."

Spektar struje statora, za razinu oštećenja IV ispitivanog motora, prikazan je na slici 5.9. [86]. Ispitivanje je provedeno uz struju opterećenja iznosa 94,6 A. Indeks stanja je iznosio 2,6.



Slika 5.9. Spektar struje statora u okolici frekvencije 50 Hz (razina oštećenja IV)

Dijagnostička ocjena korištenog programskog paketa za ovaj elektromotor je glasila: "U ovom je rotorskom namotu više štapova u prekidu. Rizik sekundarnih oštećenja statorskog namota ili ostalih dijelova motora je neminovan. Preporuča se ovaj motor odmah isključiti iz pogona."

Iz slike 5.9. je vidljivo da su iznosi komponenti $f_1(1-2s)$ odnosno $f_1(1+2s)$ značajni (približno 8 %) u odnosu na osnovnu komponentu f_1 , što ukazuje na teže oštećenja kaveza rotora.

5.1.4. Ocjena dijagnostike motora temeljene na analizi spektra linijske struje statora

Ova suvremena „ON-LINE“ metoda dijagnostike je posebno interesantna za EMP-e u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom budući da se sva mjerenja, snimanja i obrada podataka provode izvan ugroženog prostora, te nema posebnih zahtjeva na izvedbu mjerne opreme s naslova protueksplozijske zaštite.

Prema ispitivanjima provedenim unutar ovog rada, te prema literaturi koja obrađuje ovu dijagnostičku metodu [31][38][43][39][40][32][47] može se zaključiti da je metoda vrlo primjenljiva i pouzdana, posebice kod značajnijih oštećenja kaveza rotora. Kod manjih oštećenja elektromotora (npr. oštećenje jednog štapa ili dijela prstena) teže je uočiti promjene u spektru struje izazvane ovim oštećenjima. Te promjene je teško prepoznati u mnoštvu izobličenja struje (šumovi) koja su u pravilu prisutni u postrojenju, a koja su manje izražena u uvjetima laboratorijskih ispitivanja.

Ispitivanja elektromotora primjenom ove dijagnostičke metode je potrebno provoditi pod opterećenjem što bliže nazivnom. Kod manjih opterećenja manje su struje rotora te je njihov utjecaj na ukupno protjecanje, odnosno ukupno magnetsko polje u rasporu stroja

manji, odnosno teže mjerljiv. Ponekad je, iz tehnoloških razloga u EMP-u, teško udovoljiti navedenom zahtjevu što je ograničavajući faktor primjene ove metode.

Kod ove dijagnostičke metode su potrebni spektralni analizatori s mogućnošću razlučivanja harmonika s razmakom jednakim dvostrukoj frekvenciji klizanja, koji može biti vrlo malen kod "manje" opterećenih motora ili kod velikih motora. Kod takvih motora se mogu javiti problemi oko nedovoljnog razlučivanja.

Kod ispravnog motora, radi nesavršene izrade, također se mogu javiti komponente u spektru struje statora na frekvencijama koje ukazuju na stanje kvara. Amplitude tih komponenti u pravilu nisu velike, no važno je pratiti trend porasta tih amplituda kako bi se one mogle isključiti kao indikator stanja kvara.

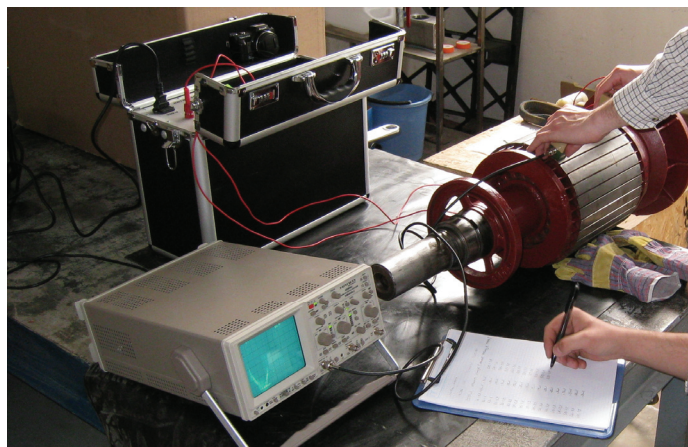
Uz sva ograničenja koja ima ova metoda, kao i sve druge metode, ona ostaje jedna od najznačajnijih dijagnostičkih metoda za ispitivanje elektromotora i u ovom je radu izabrana kao temeljna dijagnostička metoda za otkrivanje kvarova kaveza rotora asinkronih motora koji rade u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom.

5.2. Metoda mjerenja vodljivosti štapova i prstena

5.2.1. Opis mjerne metode i mjerna oprema

Ova se „OFF-LINE“ metoda ispitivanja kaveza rotora provodi primjenom uzбудnih senzora (US) i mjernih senzora (MS) te osciloskopa za mjerenje induciranih napona. Uzbudni senzor služi za induciranje napona u mjerenom (ispitivanom) štapu. Uzbudni senzor je napajan niskim izmjeničnim naponom frekvencije 50 ili 60 Hz. Uslijed djelovanja uzbudnog senzora kroz štap, zbog induciranih napona u štapu, teče struja. Za mjerenje spomenute struje se koristi mjerni (MS) senzor i osciloskop.

Položaj uzbudnog i mjernog senzora pri mjerenju vodljivosti rotorskih štapova kaveza rotora predmetnog motora te ostala korištena mjerna oprema su prikazani na slici 5.10.



Slika 5.10. Mjerenje vodljivosti rotorskih štapova

Inducirani napon u mjernom senzoru iznosi [9][11][28]:

$$U_{in} = \frac{k_s \cdot M_{um}}{l} \cdot Y = K \cdot Y \quad (5.16)$$

gdje je:

- U_{in} - inducirani napon u mjernom senzoru,
- k_s - faktor ovisan o primijenjenim senzorima,
- M_{um} - međuinduktivitet između uzbudnog i mjernog senzora,
- l - razmak između uzbudnog i mjernog senzora,
- Y - realna vodljivost kaveza i
- K - ukupni mjerni faktor.

Budući je međuinduktivitet M_{um} ovisan o razmaku l nužno je tijekom ispitivanja svih štapova jednog rotora razmak l držati nepromijenjenim. Realna impedancija kaveza Z je recipročna vrijednost realne vodljivosti kaveza Y . Impedancija se sastoji od serijskog spoja impedancije ispitivanog štapa, kontaktnih otpora štap-kratkospojni prsten i otpora serijsko-paralelnog spoja segmenta prstena i preostalih štapova, svih osim ispitivanog.

Veća izmjerena realna vodljivost ukazuje na ispravan štap dok je kod prekida štapa ili spoja štap-prsten ona blizu nule. Zbog poprečnih struja izmjereni napon U_{in} nije jednak nuli niti kod prekinutih štapova. Ocjena kvalitete pojedinih štapova se temelji na usporednoj metodi između vodljivosti svih štapova jednog rotora.

Izmjerene vrijednosti inducirano napona za pojedine štapove se uspoređuju sa srednjom vrijednošću induciranih napona svih štapova u rotoru. Srednja vrijednost induciranih napona U_{sr} se računa prema izrazu:

$$U_{sr} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N U_i \quad (5.17)$$

gdje je:

- N - broj rotorskih štapova i
- U_i - inducirani napon pojedinog štapa.

Ako se sa u_i označi relativna vrijednost inducirano napona (vodljivosti) pojedinog štapa:

$$u_i = \frac{U_i}{U_{sr}} \quad (5.18)$$

tada se kriteriji za ocjenu stanja pojedinih štapova rotora mogu prikazati tablicom 5.3 [9].

Tablica 5.3. Kriteriji za ocjenu stanja štapova rotora na temelju relativne vodljivosti

Iznos u_i	Ocjena ispravnosti (stanja) štapa
$u_i \leq 0,4$	Štap je neispravan.
$0,4 < u_i \leq 0,8$	Stanje štapa je slabo ali je štap još uvijek primjenjiv.
$0,8 < u_i \leq 1,3$	Štap je ispravan.
$u_i > 1,3$	Vrijednost nije mjerodavna (uzrok visoke vodljivosti je u nekom drugom oštećenju rotora, npr. neispravna izolacija među lamelama rotorskog paketa).

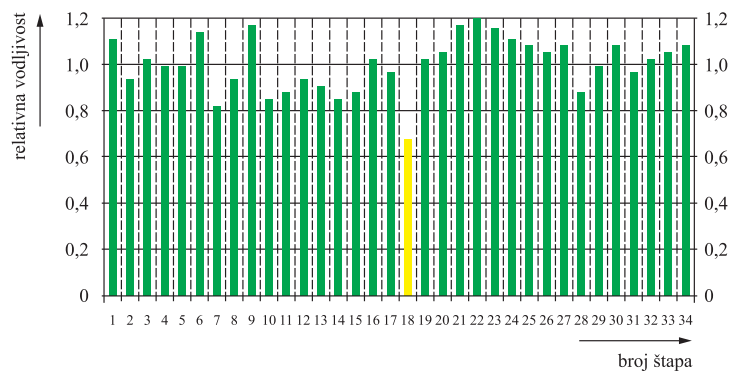
Na kraju opisa ove dijagnostičke metode treba naglasiti da je za konačnu ocjenu stanja kompletnog kaveza rotora mjerodavna razdioba vodljivosti pojedinih štapova po polovima.

Ukoliko je raspodjela induciranih napona po polovima ujednačena i kreće se u granicama do $\pm 10\%$ kavez rotora je vrlo dobar. U području između $\pm 10\%$ i $\pm 20\%$ rotor je slabije kvalitete ali je upotrebljiv, dok je pri razlikama većim od $\pm 20\%$ rotor neispravan.

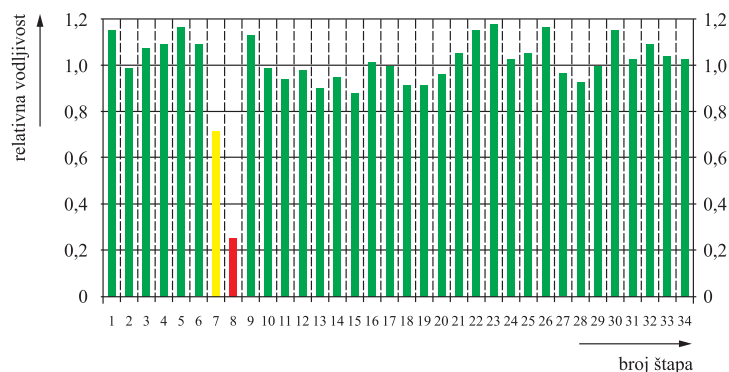
5.2.2. Rezultati mjerenja vodljivosti štapova i prstena

Na slici 5.11 prikazani su rezultati ispitivanja vodljivosti pojedinih štapova rotora asinkronog motora u vrsti zaštite "Ex e", čiji su podaci prikazani u prilogu B i to za ispravno stanje kaveza rotora te za razine oštećenja II, III i IV.

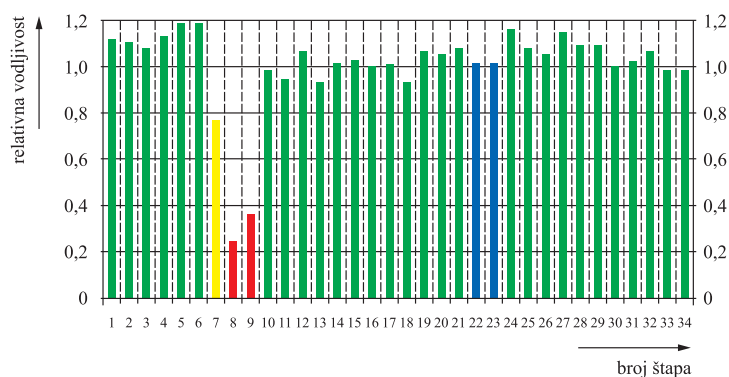
Ispitivanja su provedena u laboratoriju Ex-Agencije. Pri ispitivanju su korišteni mjerni i uzbudni senzor za ispitivanje rotora *Volta ESD i MSD*, *Rotor tester RTV* te osciloskop *Hameg HM404-2*.



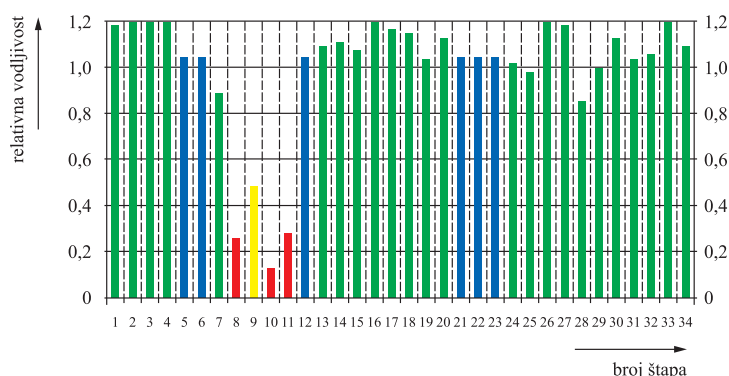
a) ispravan (neoštećen) rotor



b) razina oštećenja II



c) razina oštećenja III



d) razina oštećenja IV

Slika 5.11. Rezultati mjerenja vodljivosti rotorskih štapova

Metoda mjerenja vodljivosti štapova i prstena, temeljem provedenih ispitivanja, pokazuje dobru razinu pouzdanosti i svoj značaj nalazi kod ispitivanja tijekom servisnih aktivnosti budući da pripada OFF-LINE metodi i nužno je vađenje rotora iz motora. Kombinacija primjene ON-LINE analize spektra linijske struje namota statora i OFF-LINE metode mjerenja vodljivosti štapova i prstena osigurava zadovoljavajuću razinu pouzdanosti otkrivanja kvarova kaveza rotora. Slaganje ocjena stanja kaveza rotora primjenom ovih dviju metoda je dobro.

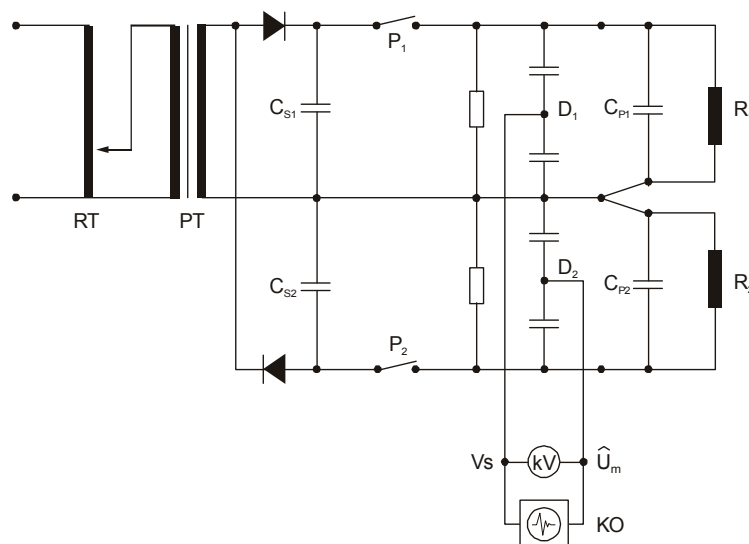
5.3. Dijagnostička metoda temeljena na analizi odziva na udarni napon

5.3.1. Kratki prikaz mjerne metode

Dijagnostika stanja namota statora asinkronih elektromotora temeljena na analizi odziva na udarni napon je jedna od najraširenijih "OFF-LINE" metoda dijagnostike. Osnovne prednosti ove metode su efikasnost i niska cijena ispitivanja u odnosu na cijenu protueksplozijski zaštićenog elektromotora. U Hrvatskoj je ova metoda našla značajnu primjenu kod dijagnostike protueksplozijski zaštićenih elektromotornih pogona u naftnoj industriji te u drvnoj i kemijskoj industriji.

Metoda udarnog napona se temelji na uspoređivanju odziva impulsa udarnog napona na dva ispitna objekta (namota, svitka, faze). Po pitanju ispitno-mjerne opreme metoda nije zahtjevna, no potrebno je veliko iskustvo u tumačenju dobivenih odziva.

Osnovna shema generatora udarnog napona s dvostrukim udarnim krugom, koji se koristi u ovoj dijagnostičkoj metodi prikazan je na slici 5.12 [42][47]



Slika 5.12. Generator udarnog napona s dvostrukim udarnim krugom

gdje je:

RT	- regulacijski transformator,	R_1, R_2	- otpori izolacije ispitivanog objekta,
P_1, P_2	- prekidači,	PT	- ispitni transformator,
$\hat{U}_m$	- vršna vrijednost ispitnog napona,	KO	- katodni osciloskop,
V_s	- voltmetar udarnog napona,	C_{s1}, C_{s2}	- udarni kondenzatori,
C_{p1}, C_{p2}	- kapaciteti ispitivanog objekta i	D_1, D_2	- kapacitivni djelitelji napona.

Pri ispitivanju udarnim naponom se u ispitivani objekt, npr. namot statora asinkronog elektromotora, šalje impuls dobiven pražnjenjem udarnog kondenzatora kapaciteta C_s . Svaki ispitivani objekt obzirom na vlastiti induktivitet L i kapacitet C_p na udarni napon odgovara različitim oblikom uzbuđenog titrajnog napona. Titrajni napon ima oblik prigušene oscilacije sa frekvencijom prema izrazu (5.19) [26][42].

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot (C_s + C_p)}} \quad (5.19)$$

Pri ispitivanju udarnim impulsnim naponom se stvara razlika napona između zavoja, svitaka i grupa svitaka koji su galvanski spojeni, za razliku od ispitivanja izmjeničnim "povišenim" naponom gdje su svi dijelovi namota pod istim naponom. Na taj način je

omogućeno, pri ispitivanju udarnim impulsnim naponom, provjeriti dielektričku čvrstoću izolacije galvanski spojenih dijelova namota - uzdužnu izolaciju.

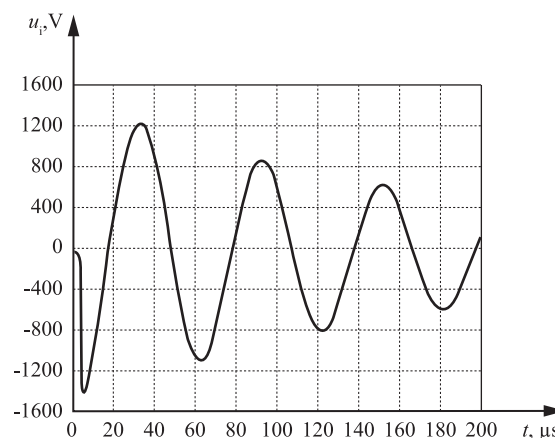
U slučaju kvara između zavoja svitka ili prema masi, dobije se uzbuđeni titrajni napon prigušene oscilacije s višom frekvencijom od one kod ispravnog namota. Uzrok je promjena induktiviteta i kapaciteta ispitivanog namota. Za analizu kvara bitna je amplituda i/ili frekvencija oscilacija. Pri uporabi uređaja udarnog napona s dvostrukim udarnim krugom mogu se na ekranu osciloskopa istovremeno promatrati karakteristični oblici krivulje titranja za dva objekta (npr. namota). Ako su oba namota bez greške i jednake impedancije, onda su obje slike titranja identične odnosno krivulje se preklapaju i na ekranu se vidi samo jedna krivulja. Međuzavojni kratki spoj smanjuje induktivitet neispravnog namota i vodi do više frekvencije titranja, i na ekranu se pojavljuju dvije različite krivulje.

5.3.2. Rezultati ispitivanja udarnim naponom

Ispitivanja namota statora predmetnog motora udarnim naponom su provedena za stanje ispravnog kaveza rotora te za razine oštećenja kaveza I, II, III i IV.

Ispitivanja su provedena u laboratoriju Ex-Agencije. Pri ispitivanju je korišten uređaj za ispitivanje *Risatti H22/CPS* prikazan u prilogu F. Ispitivanje je provedeno udarnim naponom iznosa 2000 V.

Obzirom da su sva mjerenja dala zadovoljavajuće rezultate na slici 5.13 je prikazan samo rezultat ispitivanja namota statora kod razine oštećenja rotora IV, odnosno na kraju svih ciklusa ispitivanja motora čime je potvrđena trajna ispravnost namota statora. Dobro preklapanje krivulja uzbuđenog titrajnog napona potvrđuje ispravnost namota statora. Induktivitet U-V je iznosio 3,626 mH, V-W 3,621 mH te U-W 3,652 mH.



Slika 5.13. Rezultati ispitivanja udarnim naponom

U okviru ovog rada ispitna metoda temeljena na analizi odziva na udarni napon je odabrana za utvrđivanje stanja međuzavojne izolacije svitaka namota, te je u kombinaciji s ispitivanjem namota statora povišenim izmjeničnim naponom odnosno provjerom dielektričke čvrstoće (opisanim u poglavlju 4 ovog rada) i mjerenjem otpora izolacije i

indeksa polarizacije [158] potvrđeno da u namotu statora predmetnog motora nije bilo kvarova za koje se očekuje da bi mogli biti djelotvorni uzročnici paljenja.

5.4. Primjena dijagnostičkih ispitivanja u procjeni rizika

Prepoznavanje i procjena opasnosti i rizika koji mogu nastati u EMP-u i ustroj sveobuhvatne metode za procjenu i upravljanje rizikom te sprječavanje nastanka eksplozije temeljni je cilj ovog rada.

U radu je razvijena metodologija procjene rizika u elektromotornim pogonima ugroženim eksplozivnom atmosferom, detaljno opisana u poglavlju 7. ovog rada, koja uz primjenu opće prihvaćenih i normativnim dokumentima definiranih, ali nedovoljnih, temeljnih (rutinskih) ispitivanja, uvodi i primjenu suvremenih specijalističkih dijagnostičkih metoda ispitivanja elektromotora.

Ove su dijagnostičke metode od presudne važnosti kod EMP-a (u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom) koji su dugi niz godina u radu.

Svrha je primjene takvih metoda otkrivanje kvarova, npr. kaveza rotora, u početnoj fazi nastanka, kako bi se spriječila daljnja oštećenja istog koja bi mogla dovesti do pojave djelotvornih uzročnika paljenja, npr. električne i mehaničke iskre, povećanje temperature i sl., a u konačnici i do nastanka eksplozije.

Iz navedenih su razloga istražene i analizirane raspoložive dijagnostičke metode ispitivanja kaveza rotora asinkronog motora te je proveden odabir najprikladnijih metoda za primjenu na elektromotorima koji rade u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom. Odabrana je kombinacija primjene ON-LINE analize spektra linijske struje namota statora i OFF-LINE metode mjerenja vodljivosti štapova i prstena.

Za provjeru izolacijskog sustava namota statora posebno je naglašena metoda analize odziva na udarni napon (za provjeru uzdužne izolacije). Ispitivanje izolacijskog sustava namota statora, dakako, pretpostavlja i primjenu drugih ispitivanja kao što su mjerenje otpora izolacije, mjerenje faktora absorpcije, mjerenje indeksa polarizacije, pokus visokim naponom i sl.

6. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA POJAVE UZROČNIKA PALJENJA USLIJED KVAROVA KAVEZA ROTORA

6.1. Cilj provedbe eksperimentalnih istraživanja

U prethodnim su poglavljima ovog rada analizirani rizici pojave kvarova unutar EMP-a, s posebnim naglaskom na kvarove kaveza rotora asinkronog elektromotora, te su istražene mogućnosti njihovog ranog otkrivanja primjenom temeljnih i specijalističkih dijagnostičkih ispitivanja. Kako je rečeno i u poglavlju 2 ovog rada (opis i definicija problema) takvi kvarovi, u uvjetima prisutnosti eksplozivne atmosfere, mogući su uzročnici paljenja odnosno nastanka eksplozije.

Statistička učestalost pojedinih vrsta kvarova u ukupnim kvarovima asinkronog motora je prikazana u poglavljima 1 i 3 ovog rada.

Pojavu spomenutih kvarova je moguće utvrditi primjenom temeljnih i dijagnostičkih ispitivanja, no ostaje otvoreno pitanje: *Koji kvarovi mogu biti djelotvorni uzročnici paljenja eksplozivne atmosfere?*

Sposobnost kvarova, npr. kaveza rotora asinkronog motora, da postanu djelotvorni uzročnici paljenja je moguće utvrditi eksperimentalnim laboratorijskim ispitivanjima u stvarnim uvjetima prisutnosti eksplozivne atmosfere odnosno smjese.

U ovom su poglavlju rada upravo opisani rezultati provedenih eksperimentalnih istraživanja pojave i djelotvornosti uzročnika paljenja nastalih uslijed kvarova kaveza rotora asinkronog motora u uvjetima prisutnosti eksplozivne atmosfere odnosno smjese.

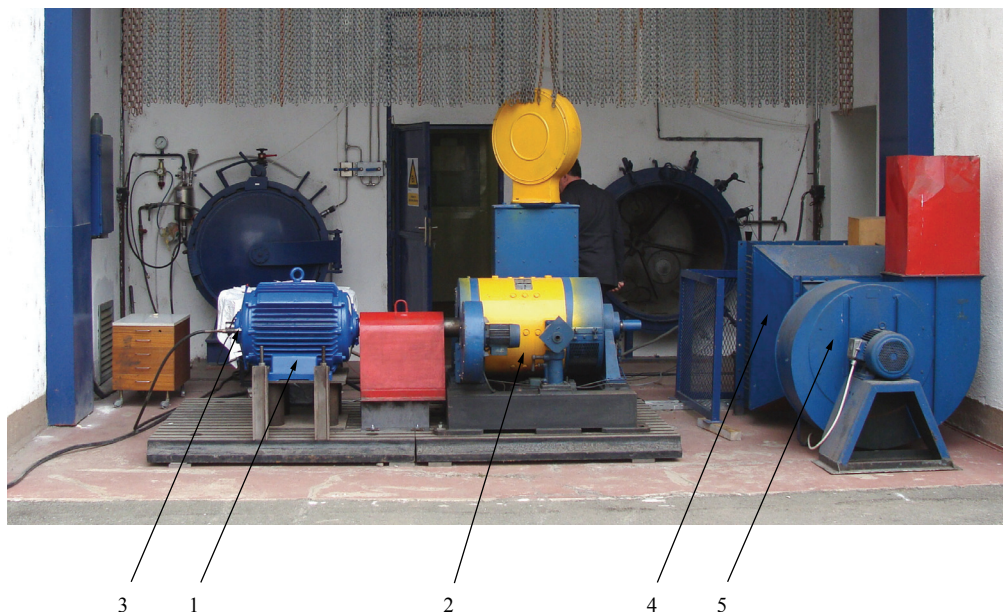
6.2. Odabir motora i opis eksperimentalnih istraživanja

Ispitni sustav za provedbu eksperimentalnih istraživanja je osmišljen i realiziran na temelju postavljene hipoteze da kvarovi kaveza rotora mogu biti djelotvorni uzročnici paljenja eksplozivne atmosfere.

Istraživanja djelotvornosti uzročnika paljenja, u stvarnim uvjetima prisutnosti zapaljivih medija, provedena su u laboratorijima Ex-Agencije u razdoblju od studenog 2008. god. do travnja 2009. god. na elektromotoru u vrsti protueksplozijske zaštite povećana sigurnost („Ex e“) snage 47 kW i nazivnog napona 380 V čiji su detaljni podaci prikazani u prilogu B ovog rada. Motor je starijeg dizajna, rotorski kavez je izrađen od bakrenih šipki spojenih s kratkospojnim prstenima tvrdim lemljenjem. Motor je dvopolni. Ovakva je konstrukcija kaveza, najlošija s aspekta protueksplozijske zaštite²³, stoga je i odabrana za ispitivanja.

Ispitni je sustav, prikazan na slici 6.1, izveden na način da omogući ispitivanja zagrijavanja motora u kratkom spoju i to kod različitih napona odnosno struja kratkog spoja.

Nadalje, ispitni je sustav omogućio ispitivanja mogućnosti nastanka eksplozije kod različitih razina kvarova kaveza rotora u uvjetima prisutnosti eksplozivne atmosfere.



Slika 6.1. Ispitni sustav za ispitivanje elektromotora
(1- ispitivani motor; 2-stroj za terećenje motora - dinamo vaga; 3-dovod ispitne eksplozivne smjese;
4-električni teret dinamo vage (grijači);5- ventilator hlađenja grijača)

6.2.1. Priprema motora za ispitivanje

U prvoj skupini ispitivanja provedenih u okviru ovog rada provedena su mjerenja zagrijavanja štapova i prstena ispravnog kaveza rotora te zagrijavanja štapova i prstena za četiri razine oštećenja kaveza rotora.

U okviru druge skupine ispitivanja proveden je niz ispitivanja elektromotora u uvjetima prisutnosti eksplozivne atmosfere kod neoštećenog kaveza rotora te pri različitim, namjerno izazvanim, razinama oštećenja kaveza rotora (za četiri razine oštećenja). Cilj ovih ispitivanja je bio istražiti pojavnost djelotvornog uzročnika paljenja i eksplozije čiji su uzroci kvarovi kaveza rotora. Ispitivanja su provedena u uvjetima zakočenog rotora sa sniženim naponom, pri zaletu motora preko regulacionog transformatora odnosno sa smanjenim naponom i strujom pokretanja te u vrtnji elektromotora pri različitim vrijednostima opterećenja.

Namjerno izazvana oštećenja u rotoru slična su onima koja bi se prema iskustvu mogla pojaviti u nenormalnim pogonskim stanjima.

Opis namjerno izazvanih oštećenja kaveza rotora, prikazanih u prilogu G, pri kojima su provedena ispitivanja je detaljno prikazan u petom poglavlju ovog rada i dan je tablicom 5.2.

6.3. Ispitivanja zagrijavanja elektromotora

6.3.1. Ispitna oprema za mjerenje zagrijavanja

Mjerenja zagrijavanja su provedena ispitnom opremom prikazanom na slici 6.2. Kao osjetila temperature su korišteni termoparovi tipa T (Cu/Cu-Ni) za mjerenje temperatura od -27°C do 400°C . Isti su bili spajani na kompatibilne uređaj za mjerenje i pohranu podataka *FLUKE* tip *Hidra Data Bucket* inv. br. Ex-Agencije 1 i tip *Hidra Series II* inv. br. Ex-Agencije 173/520. Postupak pričvršćivanja i uporabe termoparova te spajanje termoparova i mjernih uređaja *FLUKE* je obavljen prema dokumentima RU-048 i RU-049 koji čine dio akreditiranog postupka mjerenja temperature koji primjenjuje Ex-Agencija i sastavni su dio Priručnika kvalitete ispitnog laboratorija Ex-Agencije (PQI).



Slika 6.2. Ispitna oprema za mjerenje zagrijavanja elektromotora

Rezultati zagrijavanja motora su prikazivani u apsolutnim vrijednostima, u $^{\circ}\text{C}$, pri čemu je za svako mjerenje bilježena i temperatura okoline. Obzirom da je motor prije početka ispitivanja, koja su provedena u otvorenom dijelu laboratorija, pri utvrđenim temperaturama okoline, bio u zatvorenom dijelu laboratorija pri drugim temperaturama okoline, prve mjerne točke temperatura prikazane na krivuljama zagrijavanja predstavljaju stvarne početne temperature motora - utjecaj temperature okoline pri mjerenju i temperature postignute u zatvorenom dijelu laboratorija. Na temperaturu prvih mjernih točaka, kod provedbe više uzastopnih pokusa, je utjecalo i zagrijavanje motora prethodnih pokusa. Kako je temeljni cilj istraživanja zagrijavanja usporedba relativnih odnosa zagrijavanja oštećenih i neoštećenih štapova rotora navedeno nema utjecaj na bit ispitivanja.

Struja opterećenja motora je mjerena strujnim kliještima *FLUKE* tip *True RMS Clamp Meter 337* inv. br. Ex-Agencije 277. Napon na stezaljkama motora je mjereno multimetrom *FLUKE* tip *True Multimeter 189* inv. br. Ex-Agencije 276. Opterećenje motora, time i struja koju uzima iz mreže, je regulirano uzbudom dinamo vage *MEZ VSETIN* tip *MS 2821-4* (100 kW, 3000 min^{-1} , ser. br. 340870). Temperatura okoline je mjerena mjernim uređajem *Rotronic Hygrolog* inv. br. Ex-Agencije 180/2.

Sva ispitna (mjerna) oprema je umjerena o čemu evidenciju i dokaze čuva akreditirani laboratorij Ex-Agencije.

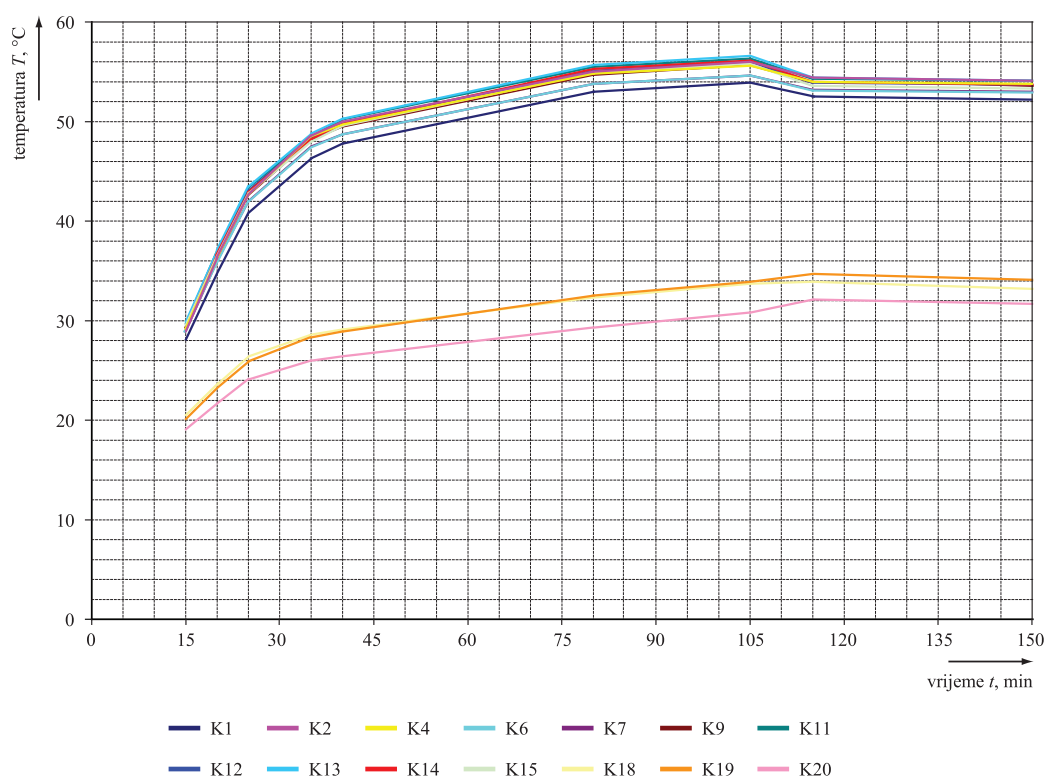
6.3.2. Rezultati ispitivanja zagrijavanja ispravnog motora

Ispitivanja zagrijavanja štapova ispravnog (neoštećenog) kaveza rotora te namota statora provedena su u kratkom spoju uz sniženi napon. Radi ubrzanja procesa zagrijavanja ispitivanje je započelo sniženim naponom iznosa 45,0 V i strujom iznosa 54,4 A koji su tijekom ispitivanja smanjivani do 21,6 V odnosno 25,6 A pri kojima je nastupila stagnacija temperature (postignuta promjena temperatura manja od 0,5 °C / sat).

Temperatura okoline (T_{okol}) tijekom mjerenja je iznosila od 13,6 °C do 17 °C. Ispitivanje zagrijavanja je započelo pri temperaturi okoline od 13,6 °C. Rezultati ispitivanja zagrijavanja ispravnog motora su prikazani na slici 6.3. Važno je napomenuti da slika 6.3. prikazuje zagrijavanje motora od vrijednosti temperatura izmjerenih 15 min. nakon početka zagrijavanja. Radi greške u sustavu pohranjivanja podataka vrijednosti temperatura od početka zagrijavanja do 15-te minute nisu zabilježene, što nema poseban značaj na bit i svrhu mjerenja.

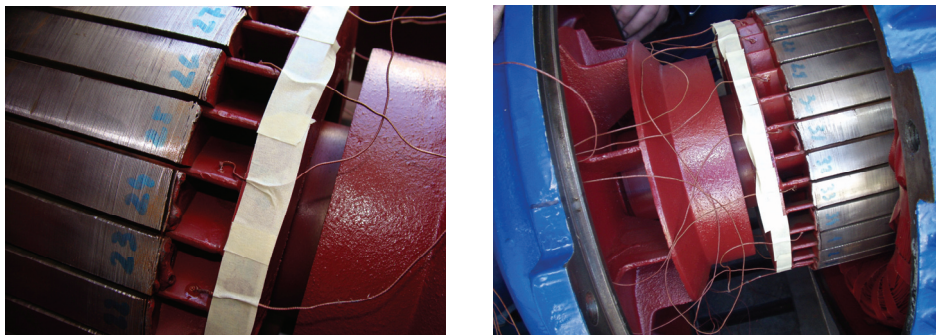
Temperature su mjerene na štapovima kaveza rotora i na namotu statora pri čemu oznake mjernih kanala (K) mjernog uređaja *FLUKE* označavaju mjerenje na slijedećim mjernim mjestima:

K1	- štap 1	K6	- štap 11	K11	- štap 21	K14	- štap 27	K19	- namot statora
K2	- štap 3	K7	- štap 13	K12	- štap 23	K15	- štap 29	K20	- namot statora
K4	- štap 7	K9	- štap 17	K13	- štap 25	K18	- namot statora		



Slika 6.3. Zagrijavanje ispravnog (neoštećenog) motora

Osjetila temperature (termoparovi) svih štapova rotora bili su postavljeni u blizini prstena nepogonske strane motora kako je prikazano na slici 6.4.



Slika 6.4. Položaj termoparova za ispitivanje zagrijavanja

Iz rezultata prikazanih na slici 6.3. je vidljivo ujednačeno zagrijavanje svih štapova ispravnog kaveza rotora, što je očekivani rezultat i čije je potvrđivanje bio glavni cilj ispitivanja zagrijavanja ispravnog motora.

Tijekom provedbe mjerenja temperature neoštećenog kaveza rotora pomoću umjerenih termoparova i mjernog uređaja *FLUKE* provođeno je i indikaciono mjerenje termovizijskom kamerom *FLUKE* tip *IR Fusion Ti 25*. Mjerenje je provođeno kroz posebno priređene otvore na ležajnom štitu i to s pogonske strane čime je mjerena temperatura na suprotnoj strani od one mjerene termoparovima. Utvrđeno je dobro slaganje dobivenih vrijednosti (razlike manje od 2 °C).

6.3.3. Rezultati ispitivanja zagrijavanja razine I oštećenja kaveza rotora

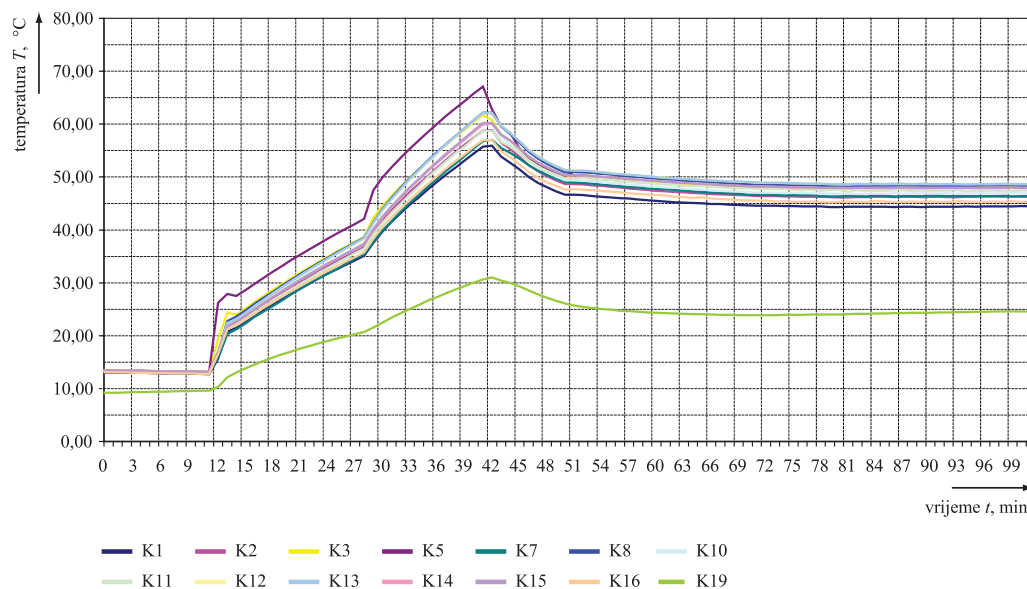
Zagrijavanja štapova razine I oštećenja kaveza rotora, uz neoštećen namot statora, provedena su u kratkom spoju uz sniženi napon. Radi ubrzanja procesa zagrijavanja ispitivanje je započelo sniženim naponom iznosa 47,2 V i strujom iznosa 55,0 A koji su tijekom ispitivanja povećavani do 59,0 V i 69,0 A te su na kraju ispitivanja smanjeni na 23,2 V odnosno 26,7 A pri kojima je nastupila stagnacija temperature (postignuta promjena temperatura manja od 0,3 °C / sat).

Temperatura okoline (T_{okol}) tijekom mjerenja je iznosila od 8,0 °C do 13,4 °C. Ispitivanje zagrijavanja je započelo pri temperaturi okoline od 8,0 °C. Rezultati ispitivanja zagrijavanja razine oštećenja I su prikazani na slici 6.5.

Temperature su mjerene na štapovima kaveza rotora i na namotu statora pri čemu oznake mjernih kanala (K) mjernog uređaja *FLUKE* označavaju mjerenje na slijedećim mjernim mjestima:

K1 - štap 1 (A)	K7 - štap 7 (D)	K12 - štap 11 (A)	K16 - štap 29 (A)
K2 - štap 3 (A)	K8 - štap 8 (A)	K13 - štap 13 (A)	K19 - namot statora
K3 - štap 7 (B)	K10 - štap 6 (A)	K14 - štap 17 (A)	
K5 - štap 7 (C)	K11 - štap 23 (D)	K15 - štap 23 (A)	

Osjetila temperature (termoparovi) štapova rotora, koji uz broj imaju oznaku (A) bili su postavljeni na dijelu štapa u blizini prstena nepogonske strane motora, dok su oni s oznakom (D) bili postavljeni na dijelu štapa u blizini prstena pogonske strane motora. Termoparovi štapova rotora koji uz broj imaju oznaku (B) bili su postavljeni na dijelu oštećenog štapa u blizini paketa rotora, oni koji imaju oznaku (C) postavljeni su na dijelu oštećenog štapa u blizini prstena nepogonske strane.



Slika 6.5. Zagrijavanje motora pri razini I oštećenja kaveza rotora

Veće zagrijavanje oštećenog štapa 7 u odnosu na zagrijavanja neoštećenih štapova, pri zakočenom rotoru, najznačajniji je zaključak rezultata prikazanih na slici 6.5. Povišenje temperature oštećenog štapa 7, pri sniženom naponu i struji kratkog spoja iznosa 11 % struje kratkog spoja pri punom naponu, u odnosu na povišenje srednje temperature ostalih neoštećenih štapova iznosi, neposredno nakon početka pokusa, oko 10 $^{\circ}\text{C}$. Spomenuto povećanje zagrijavanja štapa 7 je izraženije na mjestu mjerenja u blizini prstena nepogonske strane nego u blizini paketa rotora. Navedeno se može pripisati različitim utjecajima prijenosa (izjednačenja) topline susjednih štapova u blizini paketa rotora u odnosu na ona u blizini prstena.

Uočljivo je gotovo jednako zagrijavanje neoštećenog štapa 23 na oba kraja (mjerno mjesto na dijelu štapa u blizini prstena nepogonske strane motora i mjerno mjesto na dijelu štapa u blizini prstena pogonske strane motora).

Temperatura oštećenog štapa 7 na mjernom mjestu na dijelu štapa u blizini prstena pogonske strane motora je i do 10 $^{\circ}\text{C}$ niža od temperature na mjernom mjestu na dijelu štapa u blizini prstena nepogonske strane motora (u blizini oštećenja štapa 7).

6.3.4. Rezultati ispitivanja zagrijavanja razine II oštećenja kaveza rotora

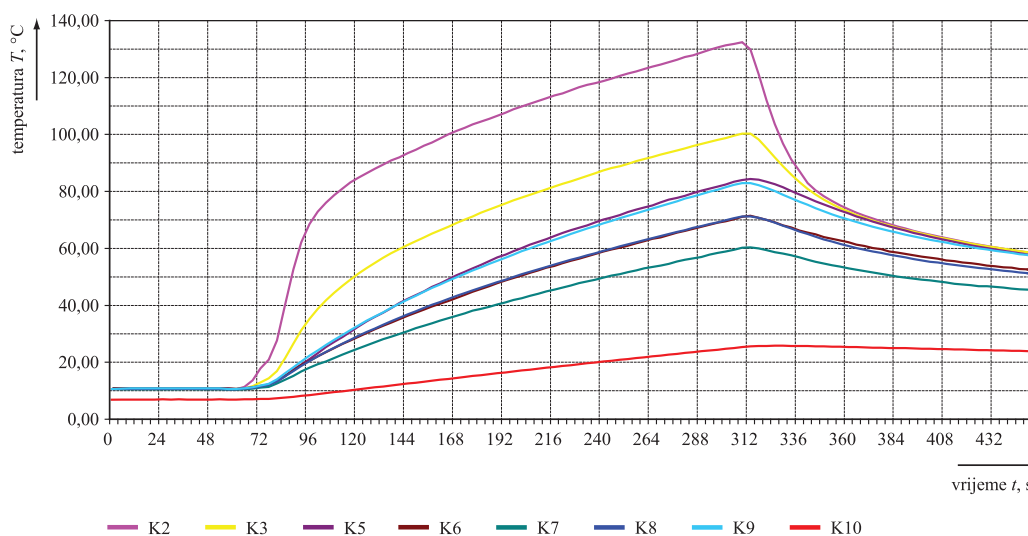
Ispitivanje zagrijavanja štapova razine II oštećenja kaveza provedeno je pokusom kratkog spoja uz sniženi napon iznosa 119,0 V i strujom 140,0 A.

Temperatura okoline (T_{okol}) tijekom mjerenja je iznosila 8,0 °C. Rezultati ispitivanja zagrijavanja razine oštećenja II su prikazani na slici 6.6.

Temperature su mjerene na štapovima kaveza rotora i na namotu statora pri čemu oznake mjernih kanala (K) mjernog uređaja *FLUKE* označavaju mjerenje na slijedećim mjernim mjestima²⁴:

K2	- štap 7 (C)	K6	- štap 13 (A)	K9	- štap 6 (A)
K3	- štap 7 (B)	K7	- štap 23 (A)	K10	- namot statora
K5	- štap 9 (A)	K8	- štap 1 (A)		

Osjetila temperature (termoparovi) štapova rotora, koji uz broj imaju oznaku (A) bili su postavljeni na dijelu štapa u blizini prstena nepogonske strane motora. Termoparovi štapova rotora koji uz broj imaju oznaku (B) bili su postavljeni na dijelu oštećenog štapa u blizini paketa rotora, oni koji imaju oznaku (C) postavljeni su na dijelu oštećenog štapa u blizini prstena nepogonske strane.



Slika 6.6. Zagrijavanje motora pri razini II oštećenja kaveza rotora

Kod ovog se mjerenja ponovno uočava, i to izraženije, povećano zagrijavanje oštećenog štapa 7 u odnosu na zagrijavanja neoštećenih štapova. Povišenje temperature oštećenog štapa 7, pri sniženom naponu i struji kratkog spoja iznosa 28 % struje kratkog spoja pri punom naponu, u odnosu na povišenje srednje temperature ostalih „udaljenijih“ neoštećenih štapova iznosi i do 65 °C. Spomenuto povišenje zagrijavanja štapa 7 je ponovno izraženije na mjestu mjerenja u blizini prstena nepogonske strane nego u blizini paketa rotora.

Posebno je značajno uočavanje povećanja zagrijavanja štapova 6 i 9, koji su susjedni oštećenim štapovima 7 i 8, a što je posljedica preuzimanja struje kako je navedeno i u

poglavlju 5 (tč. 5.1.2) ovog rada. Dio rotorskih struja koji se ne može zatvoriti kroz prekinute štapove zatvara se kroz susjedne „zdrave“ štapove. Povećane struje u "zdravim" štapovima uzrokuju povećana zagrijavanja tih štapova. Povećanje temperature štapova 6 i 9 u odnosu na povišenje temperature ostalih „udaljenijih“ neoštećenih štapova iznosi i do 20 °C.

6.3.5. Rezultati ispitivanja zagrijavanja razine III oštećenja kaveza rotora

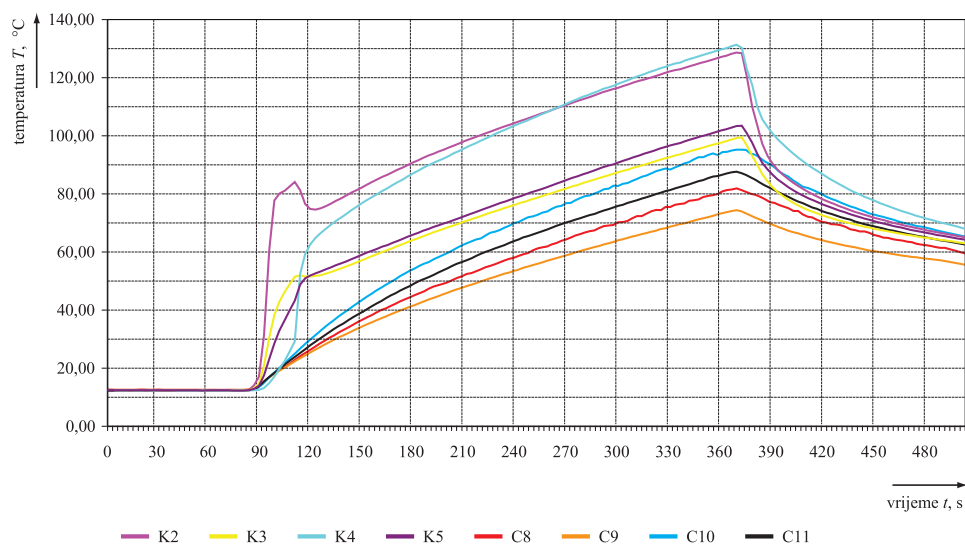
Ispitivanje zagrijavanja štapova razine III oštećenja kaveza provedeno je pokusom kratkog spoja uz sniženi napon iznosa 119,0 V i strujom 140 A te pokusom kratkog spoja uz sniženi napon iznosa 200,0 V i strujom 250 A.

Temperatura okoline (T_{okol}) tijekom mjerenja je iznosila 6,0 °C. Rezultati ispitivanja zagrijavanja razine oštećenja III pri struji 140 A su prikazani na slici 6.7., dok su rezultati ispitivanja pri struji 250 A prikazani na slici 6.8.

Temperature su mjerene na štapovima kaveza rotora pri čemu oznake mjernih kanala (K) mjernog uređaja *FLUKE* tip *Hidra Data Bucket* odnosno mjernih kanala (C) mjernog uređaja *FLUKE* tip *Hidra Series II* označavaju mjerenje na slijedećim mjernim mjestima²⁴:

K2	- štap 7 (C)	K5	- štap 8 (B)	C10	- štap 6 (A)
K3	- štap 7 (B)	C8	- štap 13 (A)	C11	- štap 1 (A)
K4	- štap 8 (C)	C9	- štap 23 (A)		

Osjetila temperature (termoparovi) štapova rotora, koji uz broj imaju oznaku (A) bili su postavljeni na dijelu štapa unutar rotorskog paketa (na rubu paketa bližeg nepogonskoj strani motora). Termoparovi štapova rotora koji uz broj imaju oznaku (B) bili su postavljeni na dijelu oštećenog štapa u blizini paketa rotora, oni koji imaju oznaku (C) postavljeni su na dijelu oštećenog štapa u blizini prstena nepogonske strane.



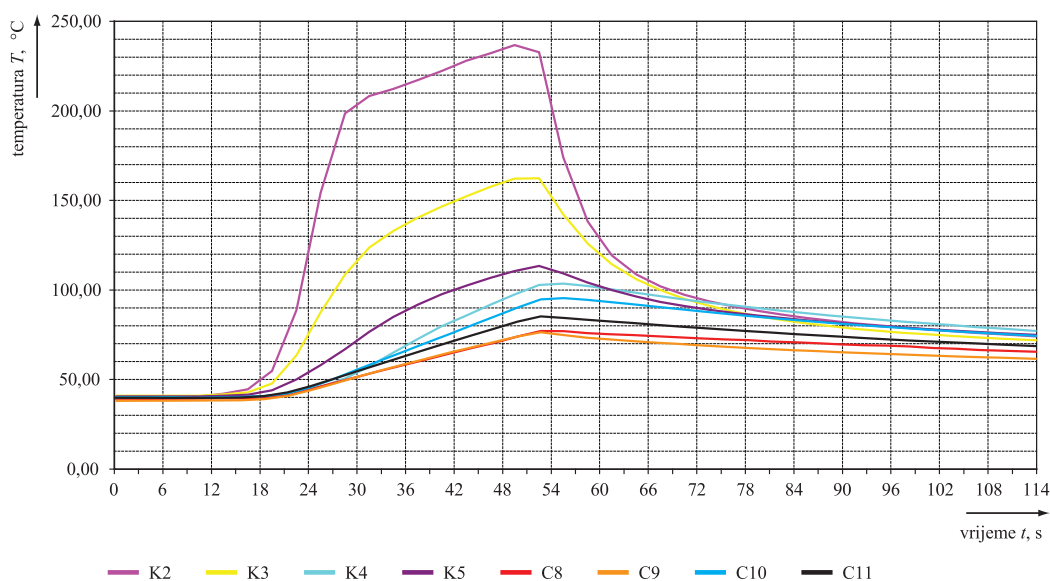
Slika 6.7. Zagrijavanje motora pri razini III oštećenja kaveza rotora i pri struji kratkog spoja 140

Kod mjerenja, pri struji kratkog spoja iznosa 140 A, ponovno se uočava povećano zagrijavanje oštećenog štapa 7 u odnosu na zagrijavanja neoštećenih štapova. Povišenje temperature oštećenog štapa 7, pri sniženom naponu i struji kratkog spoja iznosa 28 % struje kratkog spoja pri punom naponu, u odnosu na povišenje srednje temperature ostalih „udaljenijih“ neoštećenih štapova, neposredno nakon početka pokusa, iznosi i do 65 °C. Spomenuto povećanje zagrijavanja štapa 7 je ponovno izraženije na mjestu mjerenja u blizini prstena nepogonske strane nego u blizini paketa rotora.

Posebno je izraženo i zagrijavanje odnosno temperatura štapa 8 (koji je nakon potpunog rezanja mehanički „priljubljen“) u odnosu na povišenje srednje temperature ostalih „udaljenijih“ neoštećenih štapova, neposredno nakon početka pokusa. Spomenuta razlika iznosi i do 40 °C. I kod ovog je štapa povećanje zagrijavanja također izraženije na mjestu mjerenja u blizini prstena nepogonske strane nego u blizini paketa rotora.

Posebno je značajno ponovno uočavanje povećanja zagrijavanja štapa 6, koji je susjedni oštećenom štapu 7, a što je posljedica preuzimanja struje. Povišenje temperature štapa 6 u odnosu na povišenje temperature ostalih „udaljenijih“ neoštećenih štapova iznosi i do 20 °C.

Uočeno „sedlo“ na početnom dijelu krivulja je posljedica osciliranja podešenog napona i struje kratkog spoja. Tijekom mjerenja je, kratkotrajno, došlo do oscilacije napona i struje kratkog spoja radi osjetljivosti regulacije izvora napajanja.



Slika 6.8. Zagrijavanje motora pri razini III oštećenja kaveza rotora i pri struji kratkog spoja 250 A

Kod mjerenja, pri struji kratkog spoja iznosa 250 A, ponovno se uočava povećano zagrijavanje oštećenog štapa 7 u odnosu na zagrijavanja neoštećenih štapova. Povišenje temperature oštećenog štapa 7, pri sniženom naponu i struji kratkog spoja iznosa 50 % struje kratkog spoja pri punom naponu, u odnosu na povišenje srednje temperature ostalih „udaljenijih“ neoštećenih štapova iznosi i do 155 °C. Spomenuto povišenje zagrijavanja

štapa 7 je ponovno izraženije na mjestu mjerenja u blizini prstena nepogonske strane nego u blizini paketa rotora.

Posebno je značajno ponovno uočavanje povećanja zagrijavanja štapa 6, koji je susjedni oštećenom štapu 7, a što je posljedica preuzimanja struje. Povišenje temperature štapa 6 u odnosu na povišenje temperature ostalih „udaljenijih“ neoštećenih štapova iznosi i do 18 °C.

6.3.6. Rezultati ispitivanja zagrijavanja razine IV oštećenja kaveza rotora

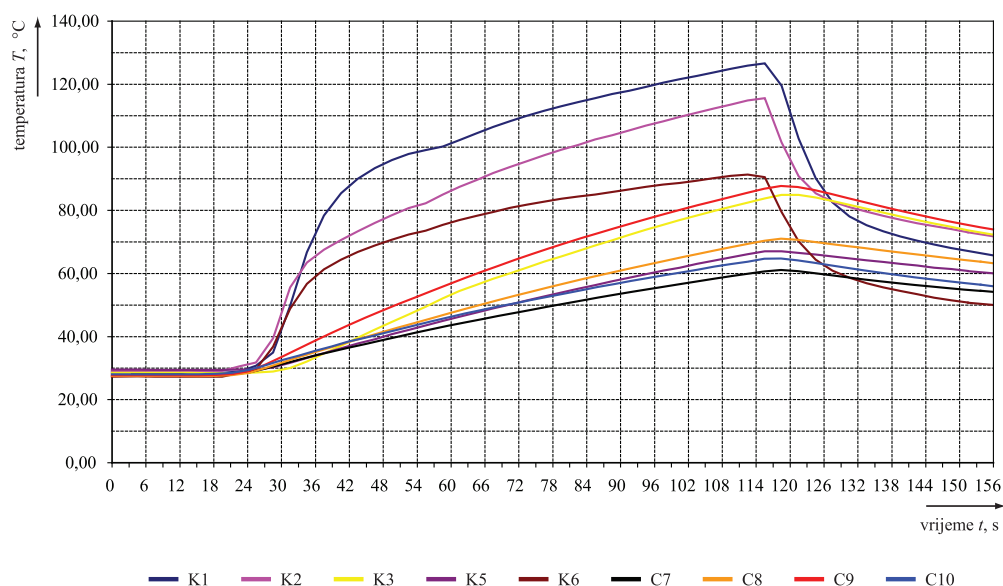
Ispitivanje zagrijavanja štapova razine IV oštećenja kaveza provedeno je pokusom kratkog spoja uz sniženi napon iznosa 117,0 V i strujom 140 A te pokusom kratkog spoja uz sniženi napon iznosa 200,0 V i strujom 250 A.

Temperatura okoline (T_{okol}) tijekom mjerenja je iznosila 11,0 °C. Rezultati ispitivanja zagrijavanja razine oštećenja IV pri struji 140 A su prikazani na slici 6.9., dok su rezultati ispitivanja pri struji 250 A prikazani na slici 6.10.

Temperature su mjerene na štapovima kaveza rotora i na prstenu nepogonske strane motora pri čemu oznake mjernih kanala (K) mjernog uređaja *FLUKE* tip *Hidra Data Bucket* odnosno mjernih kanala (C) mjernog uređaja *FLUKE* tip *Hidra Series II* označavaju mjerenje na slijedećim mjernim mjestima²⁴:

K1	- štap 7 (C)	K5	- štap 1 (A)	C8	- štap 13 (A)
K2	- štap 6 (C)	K6	- štap 6 (B)	C9	- prsten blizu štapa 7
K3	- štap 10 (C)	C7	- štap 23 (A)	C10	- prsten blizu štapa 23

Osjetila temperature (termoparovi) štapova rotora, koji uz broj imaju oznaku (A) bili su postavljeni na dijelu štapa u blizini prstena nepogonske strane motora. Termoparovi štapova rotora koji uz broj imaju oznaku (B) bili su postavljeni na dijelu oštećenog štapa u blizini paketa rotora, oni koji imaju oznaku (C) postavljeni su na dijelu oštećenog štapa u blizini prstena nepogonske strane.



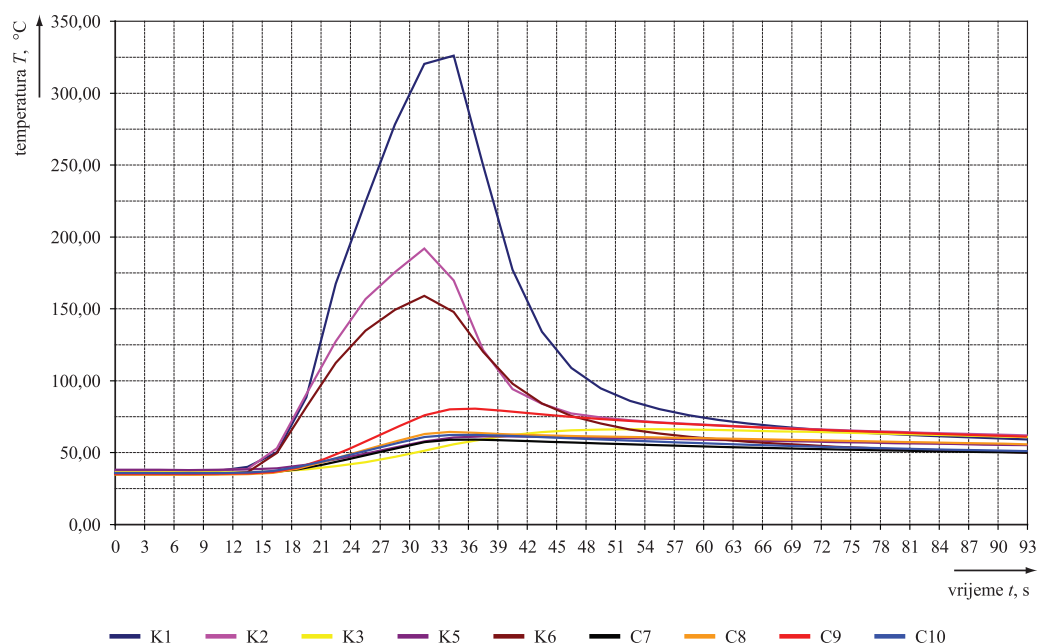
Slika 6.9. Zagrijavanje motora pri razini IV oštećenja kaveza rotora i pri struji kratkog spoja 140 A

Kod mjerenja, pri struji kratkog spoja iznosa 140 A, ponovno se uočava povećano zagrijavanje oštećenog štapa 7 u odnosu na zagrijavanja neoštećenih štapova. Povišenje temperature oštećenog štapa 7, pri sniženom naponu i struji kratkog spoja iznosa 28 % struje kratkog spoja pri punom naponu, u odnosu na povišenje srednje temperature ostalih „udaljenijih“ neoštećenih štapova iznosi i do 65 °C.

Povišenje temperature oštećenog štapa 6 (koji je nakon potpunog rezanja mehanički „priljubljen“) u odnosu na povišenje srednje temperature ostalih „udaljenijih“ neoštećenih štapova iznosi i do 55 °C. Spomenuto povećanje zagrijavanja štapa 6 je izraženije na mjestu mjerenja u blizini prstena nepogonske strane nego u blizini paketa rotora.

Temperatura potpuno prerezanog štapa 10 (mjereno na preostalom malom dijelu štapa uz prsten) bliska je temperaturi prstena u blizini mjesta kvara, što upućuje na izjednačavanje temperature ovog dijela štapa sa susjednima (preko prstena).

Temperatura prstena u području oštećenih štapova (mjereno u blizini štapa 7) pokazuje višu temperaturu i do 23 °C u odnosu na temperaturu prstena „daleko“ od područja oštećenja (mjereno u blizini štapa 23).



Slika 6.10. Zagrijavanje motora pri razini IV oštećenja kaveza rotora i pri struji kratkog spoja 250

Kod mjerenja, pri struji kratkog spoja iznosa 250 A, ponovno se uočava povećano zagrijavanje oštećenog štapa 7 u odnosu na zagrijavanja neoštećenih štapova. Povišenje temperature oštećenog štapa 7, pri sniženom naponu i struji kratkog spoja iznosa 50 % struje kratkog spoja pri punom naponu, u odnosu na povišenje srednje temperature ostalih „udaljenijih“ neoštećenih štapova iznosi do 270 °C. Najviša postignuta temperatura štapa 7 je iznosila 338,2 °C [86] i ista, radi ograničenja pri uzorkovanju nije zabilježena odnosno pohranjena (najviša zabilježena/pohranjena temperatura je bila 325,9 °C.). Temperatura 338,2 °C je zabilježena snimanjem, videokamerom, kontinuiranog pokazivanja zaslona uređaja za mjerenje i pohranjivanje podataka o temperaturi.

Povišenje temperature oštećenog štapa 6 (koji je nakon potpunog rezanja mehanički „priljubljen“) u odnosu na povišenje srednje temperature ostalih „udaljenijih“ neoštećenih štapova iznosi i do 125 °C. Spomenuto povećanje zagrijavanja štapa 6 je izraženije na mjestu mjerenja u blizini prstena nepogonske strane nego u blizini paketa rotora.

Temperatura potpuno prerezanog štapa 10 (mjereno na preostalom malom dijelu štapa uz prsten) je bila niža od temperature ostalih neoštećenih štapova i temperature prstena u blizini mjesta kvara, što upućuje da, radi brzine procesa zagrijavanja, nije došlo do prijenosa topline odnosno izjednačavanja temperatura susjednih štapova preko prstena.

Temperatura prstena u području oštećenih štapova, mjereno u blizini štapa 7, pokazuje višu temperaturu i do 18 °C u odnosu na temperaturu prstena „daleko“ od područja oštećenja (mjereno u blizini štapa 23).

U ovom je dijelu prikaza rezultata važno napomenuti da je kod rotora, nakon ispitivanja razine IV oštećenja pri 250 A (samo 50 % struje kratkog spoja pri punom naponu), uočeno zavarivanje mehanički „priljubljenih“ dijelova bakrenih štapova 6 i 11, što

upućuje na pojavu vrlo visokih lokalnih zagrijavanja. Vareni spoj štapa 7 je vidno crne nagorene boje. Na potpuno prerezanom štapu 10 nisu uočene nikakve promjene, što je očekivano obzirom da kroz taj štap nije bilo protjecanja struje.

6.4. Analiza rezultata ispitivanja zagrijavanja elektromotora i potencijalni uzročnici paljenja

Provedena ispitivanja zagrijavanja kaveza rotora pokazuju da je pri određenim razinama kvara rotora dosegnuta temperatura viša od temperature dopuštene temperaturnim razredom motora (T3). Navedeno je, ukratko, prikazano tablicom 6.1. Najviše izmjerene temperature na mjestu oštećenja su izmjerene u vremenima dužim od vremena t_E koje za ispitivani motor iznosi 8,1 s.

Iako su najviše izmjerene temperature na mjestu oštećenja izmjerene, npr. za razinu oštećenja IV najviša temperatura je izmjerena unutar 20 s nakon priključenja sniženog napona u kratkom spoju, u vremenima dužim od vremena t_E isto predstavlja izravnu opasnost budući da su struje kratkog spoja uz sniženi napon kratkog spoja bile bitno manje od struja kratkog spoja pri punom naponu prema kojima se podešava zaštita od preopterećenja (u smislu struje I_A i vremena t_E) te ne bi došlo do pravodobne prorade zaštite unutar vremena t_E .

Tablica 6.1. Temperaturni razred i pojava nedopuštenih zagrijavanja (potencijalnih uzročnika paljenja)

Stanje elektromotora (razina oštećenja)	Najviša izmjerena temperatura na mjestu oštećenja, °C	Najviša dopuštena temperatura za T3, °C
I	67,1	200
II	132,3	200
III	236,7	200
IV	338,2	200

Najznačajniji rezultat istraživanja zagrijavanja je saznanje da se u slučaju pretpostavljenih kvarova mogu pojaviti temperature koje prelaze normirane temperature paljenja nekih plinova i para (tablica 6.2.) u čijemu je okruženju moguć i dopušten rad ispitivanog motora. Pojava ovako visokih temperatura predstavlja rizik od eksplozije u uvjetima nastanka kvarova bliskih onima koji su bili namjerno izazvani.

Tablica 6.2. Normirane temperature paljenja nekih plinova i para tekućina
(prema 31/769/CDV (IEC 60079-20-1):2008)

Zapaljivi medij	Normirana temperatura paljenja, °C
Propan (plin)	450
Vodik (plin)	560
Acetilen (plin)	305
Benzini i nafte (para)	od 220 pa na više
Butan (plin)	372
n-Heksan (para)	240
Sumporvodik (plin)	270

Tablice 6.1. i 6.2. jasno pokazuju da elektromotor u vrsti zaštite povećana sigurnost ("Ex e") uz razinu oštećenja III i IV u uvjetima zakočenja rotora može predstavljati izravni uzročnik paljenja eksplozivne atmosfere, smjesa npr. pare benzina/zrak, što za posljedicu ima eksploziju u takvom okruženju. Namjerno izazvane razine oštećenja III i IV kaveza rotora, bez primjene specijalističkih dijagnostičkih ispitivanja, nisu uočljive u normalnom radu motora niti ih zahtijevane zaštite od preopterećenja "Ex e" motora moraju prepoznati. Neisključenje motora prije nego što rotor dosegne nedopustivu temperaturu potencijalni je uzročnik paljenja eksplozivne atmosfere.

Prema nekim istraživanjima, u praksi su često potrebne više temperature vruće površine od temperature samozapaljenja (AIT) da bi došlo do inicijalnog paljenja. Istraživanja su analizirala povišenje temperature koje dovodi do zapaljenja u odnosu na normiranu temperaturu paljenja (samozapaljenja) - AIT (eng. *Auto Ignition Temperature*), ovisno o geometriji vruće površine, uvjetima prijenosa topline, strujanjima zraka i sl.

Mogućnosti paljenja eksplozivne atmosfere vrućim površinama rotora u mirovanju (sa zakočenim rotorom) te određivanje temperatura paljenja istraživali su P. S. Hamer, B. M. Wood, R. L. Doughty i dr. [12] koji su ispitivali vruće površine rotora u eksplozivnim smjesama Diethyl Ether/zrak i Tetrafluoroethylene (TFE)/zrak. Ispitivanja su provedena na elektromotorima snage 2,2 kW (3 hp) i 14,9 kW (20 hp). Pokusi su provedeni na ispravnim elektromotorima na način da su isti u više uzastopnih puta puštani pod naponom sa zakočenim rotorom, sve dok nisu dosegli temperature koje su dovele do paljenja. Cilj je bio provjeriti normativno definirane AIT za ispitivane smjese u realnim uvjetima. Rezultati tih istraživanja prikazani su u tablici 6.3.

Iz tablice su jasno vidljiva odstupanja izmjerene temperature paljenja u odnosu na AIT, npr. kod ispitivanja motora snage 14,9 kW u eksplozivnoj smjesi TFE/zrak, utvrđeno je odstupanje temperature od 122 °C.

Tablica 6.3. Eksperimentalne temperature paljenja vrućom površinom zakočenog rotora u odnosu na AIT [12]

Eksplzivna smjesa	Normirana AIT temperatura, °C	Temperatura vruće površine zakočenog rotora pri kojoj je došlo do paljenja, °C
Diethyl Ether/zrak	160	180 (motor 2,2 kW)
Diethyl Ether/zrak	160	195 (motor 14,9 kW)
TFE/zrak (motor 2,2 kW)	218	290 (motor 2,2 kW)
TFE/zrak (motor 14,9 kW)	218	340 (motor 14,9 kW)

Slična su istraživanja, za zapaljivu paru kerozina koja struji preko vruće površine, proveli i D. G. Godal i R. Ingle [152]¹⁷.

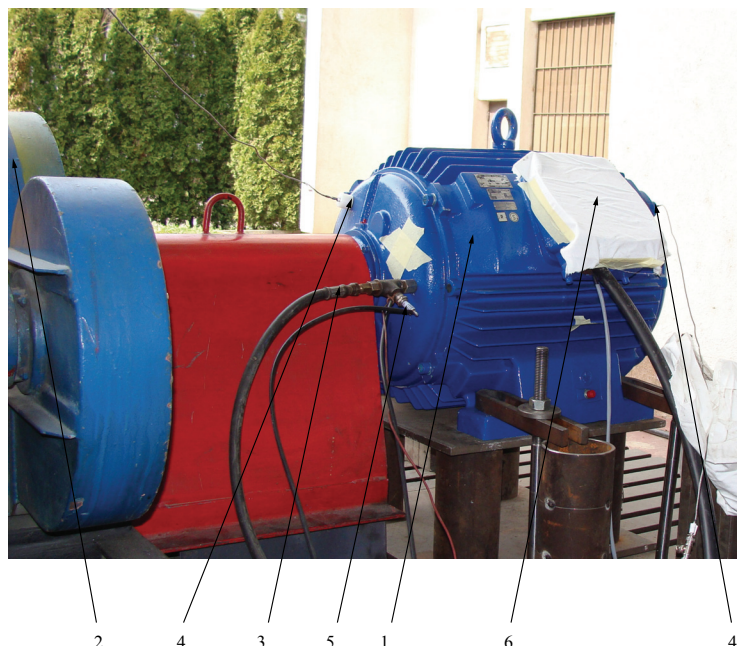
Zagrijavanja rotora ispravnog elektromotora, usljed višestrukih pokušaja pogona s zakočenim rotorom, u stvarnom pogonu nisu očekivana budući da ih primjenjene zaštite od preopterećenja prepoznaju i isključuju motor kod takvih stanja, no ova su istraživanja značajna radi utvrđivanja realnih temperatura paljenja nekih smjesa u odnosu na ATI. S naslova opasnosti od pojave vrućih površina kaveza rotora, kao mogućih uzročnika paljenja, najznačajnija su stanja, npr. kvara kaveza rotora, koja propisane i primjenjene zaštite ne prepoznaju i ne dovede do isključenja motora.

Obzirom na opisana odstupanja [12] temperatura kaveza rotora pri kojima je došlo do paljenja eksplozivne smjese u odnosu na normirane (AIT) temperature paljenja, provedena su, u okviru ovog rada, ispitivanja stvarne djelotvornosti vrućih površina kaveza rotora kao uzročnika paljenja. Ispitivanja su provedena u eksplozivnoj atmosferi odnosno u stvarnim uvjetima prisutnosti eksplozivne smjese.

6.5. Istraživanja djelotvornosti zagrijavanja kao uzročnika paljenja

6.5.1. Opis istraživanja i ispitna oprema

U svrhu utvrđivanja stvarne djelotvornosti vrućih površina kaveza rotora kao uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere provedena su istraživanja nastanka eksplozije, u motoru ispunjenom eksplozivnom smjesom zapaljivog plina i zraka. Opis namjerno izazvanih razina oštećenja kaveza rotora, prikazanih u prilogu G, pri kojima su provedena ispitivanja je detaljno dan u petom poglavlju ovog rada, tablicom 5.2. Ispitivanja su provedena na ispitnom sustavu prikazanom na slici 6.11. [86].



Slika 6.11. Ispitni sustav za ispitivanje nastanka (pojavnosti) eksplozije
 (1- ispitivani motor; 2-stroj za terećenje motora - dinamo vaga; 3-dovod ispitne eksplozivne smjese;
 4-davači (pretvornici) tlaka (detektori nastanka eksplozije); 5- iskrište (za provjeru
 zapaljivosti/eksplozivnosti smjese); 6-vizualna kontrola nastanka eksplozije (rasterećenje tlaka eksplozije)

U svrhu ispitivanja pojavnosti djelotvornog uzročnika paljenja odnosno nastanka eksplozije elektromotor je punjen eksplozivnom smjesom pripremljenom u miješalici plina i zraka *LUDEWIG & TILLMAN* tip *GM 4-7* inv. br. Ex-Agencije 53. Sastav smjese je provjeravan kromatografom *PERKIN ELMER* tip *Clarus 500* inv. br. Ex-Agencije 25. Pojava ili izostanak eksplozije je utvrđivana pomoću davača (pretvornika) tlaka *KISTLER* tip *7055 B* inv. br. Ex-Agencije 10/1 i 10/2 spojenih na mjerni sustav/uređaj za mjerenje tlaka (pojačalo naboja) *KISTLER* tip *5015 A* inv. br. Ex-Agencije 153/1 i 153/2. Pojava eksplozije je bila i vizualno uočljiva, izbijanje platnenog pokrova, na mjestu rasterećenja tlaka kroz priključnu kutiju motora. Provjera zapaljivosti/eksplozivnosti smjese je, nakon provedenih pokusa, provedena visokonaponskim iskrištem.

Sva ispitna (mjerna) oprema je umjerena o čemu evidenciju i dokaze čuva akreditirani laboratorij Ex-Agencije.

Miješalica za namješavanje eksplozivne smjese, kromatograf za kontrolu sastava iste te davači tlaka i sustav/uređaj za mjerenje tlaka eksplozije su prikazani u prilogu H.

6.5.2. Rezultati ispitivanja djelotvornosti uzročnika paljenja i nastanka eksplozije

Tablica 6.4. prikazuje rezultate ispitivanja u eksplozivnoj atmosferi za stanja rotora bez oštećenja i za razine oštećenja I, II, III i IV kod ispitivanja u kratkom spoju sa sniženim naponom, pri zaletu motora preko regulacionog transformatora odnosno sa smanjenim naponom i strujom pokretanja te u vrtnji elektromotora pri različitim opterećenjima.

Ispitivanje je provedeno na način da je elektromotor punjen smjesom propan/zrak (4,78 % propana i 95,22 % zraka) koja se koristi kod utvrđivanja referentnog tlaka za uređaje skupine IIA (slična se ispitna smjesa ($5,25 \pm 0,25$ % propana) koristi i za kalibraciju uređaja za ispitivanje paljenja iskrom kod samosigurnih strujnih krugova skupine IIA za faktor sigurnosti 1), smjesom vodik/zrak (54,95 % vodika i 45,05 % zraka) koja se koristi kod ispitivanja probojnog paljenja za uređaje skupine IIA (slična se ispitna smjesa ($48 \pm 0,5$ % vodika) koristi i za kalibraciju uređaja za ispitivanje paljenja iskrom kod samosigurnih strujnih krugova skupine IIA za faktor sigurnosti 1,5) te smjesom acetilen/zrak (7,48 % acetilena i 92,52 % zraka) koja se koristi kod ispitivanja probojnog paljenja za uređaje skupine IIC.

U prilogu I dani su kromatografski izvještaji o sastavu korištenih ispitnih smjesa. Temperatura ispitnih eksplozivnih smjesa je bila oko 18 °C dok je tlak smjesa bio blizak normalnom atmosferskom tlaku.

Kod ispitivanja redni broj 1 elektromotor je napunjen smjesom propan/zrak i ispitivanje je provedeno u kratkom spoju (u trajanju od 2 minute) uz sniženi napon iznosa 71,4 V i (nazivnom) strujom 83,0 A. Nije došlo do eksplozije. Nakon ovog ispitivanja zapaljivost/eksplozivnost ispitne smjese je provjerena paljenjem pomoću visokonaponskog iskrišta pri čemu je došlo do eksplozije što je zabilježeno na sustavu/uređaju za mjerenje tlaka koji je izmjerio tlak eksplozije od 2,5 bara čime je potvrđena prisutnost odgovarajuće koncentracije ispitne smjese i 15 minuta nakon ispitivanja što jamči da je smjesa bila eksplozivna i tijekom ispitivanja u kratkom spoju. Eksplozija je bila i vizualno vidljiva. Motor je ponovno napunjen smjesom propan/zrak i provedeno je ispitivanje pri zaletu motora preko regulacionog transformatora odnosno sa smanjenim naponom i strujom pokretanja i u vrtnji pod nazivnim opterećenjem (struja 83 A, napon 380 V) u trajanju od 2 minute. Ispitivanje je ponovljeno 5 puta. Nije došlo do eksplozije.

Ispitivanje redni broj 2 je provedeno na isti način kao ispitivanje redni broj 1 s time da je korištena ispitna smjesa vodik/zrak. Nije došlo do eksplozije.

*Tablica 6.4. Rezultati ispitivanja motora u eksplozivnoj atmosferi (smjesi)
(istraživanje djelotvornosti zagrijavanja kao uzročnika paljenja)*

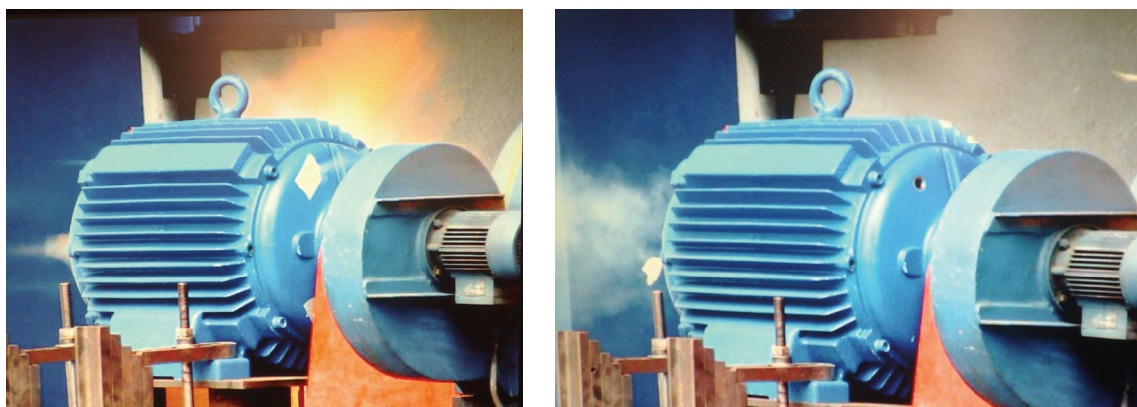
Redni broj ispitivanja	Stanje elektromotora (kaveza rotora)	Ispitna smjesa	Dogodila se eksplozija DA / NE	Tlak eksplozije, bar
1.	Neoštećen	propan/zrak	NE	---
2.		vodik/zrak	NE	---
3.	Razina oštećenja I	propan/zrak	NE	---
4.		vodik/zrak	NE	---
5.	Razina oštećenja II	propan/zrak	NE	---
6.		vodik/zrak	NE	---
7.	Razina oštećenja III	propan/zrak	NE	---
8.		vodik/zrak	NE	---
9.	Razina oštećenja IV	propan/zrak	NE	---
10.		vodik/zrak	NE	---
11.		acetilen/zrak	DA	1,23
12.		acetilen/zrak	DA	1,35

Ispitivanja redni broj 3 i 5 (smjesa propan/zrak) te redni broj 4 i 6 (smjesa vodik/zrak) su provedena na isti način kao ispitivanje redni broj 1 s time da nije, nakon ispitivanja, visokonaponskim iskrištem provjeravana zapaljivost/eksplozivnost ispitne smjese. Nije došlo do eksplozije. Provjera zapaljivosti/eksplozivnosti ispitne smjese nije provedena radi izbjegavanja eventualnih oštećenja motora uslijed eksplozija te uzimajući u obzir činjenicu da je kod ispitivanja redni broj 1 potvrđeno da ispitna smjesa ostaje eksplozivna najmanje 15 minuta nakon punjenja motora (navedeno je kasnije potvrđeno i kod ispitivanja redni broj 9 i redni broj 10).

Ispitivanja redni broj 7 (smjesa propan/zrak) i redni broj 8 (smjesa vodik/zrak) su provedena na isti način kao ispitivanja redni broj 3 odnosno 4, s time da je ispitivanje u kratkom spoju (u trajanju od 10 sekundi) započeto uz sniženi napon i strujom 200,0 A te je nastavljeno sa 71,4 V i (nazivnom) strujom 83,0 A (u trajanju od 2 minute). Nije došlo do eksplozije.

Ispitivanja redni broj 9 (smjesa propan/zrak) i redni broj 10 (smjesa vodik/zrak) su provedena na isti način kao ispitivanja redni broj 1 odnosno 2, s time da je ispitivanje u kratkom spoju (u trajanju od 10 sekundi) započeto uz sniženi napon iznosa 200,0 V i strujom 250,0 A te je nastavljeno sa 71,4 V i (nazivnom) strujom 83,0 A (u trajanju od 2 minute). Nije došlo do eksplozije. Nakon ispitivanja u kratkom spoju te nakon 5 uzastopnih zaleta i vrtnje pod nazivnim opterećenjem visokonaponskim je iskrištem provjerena eksplozivnost ispitnih smjesa. U oba je slučaja (za obje ispitne smjese) došlo do eksplozije čime je potvrđena prisutnost odgovarajuće koncentracije ispitne smjese.

Ispitivanje redni broj 11 (smjesa acetilen/zrak) je provedeno u kratkom spoju uz sniženi napon iznosa 200,0 V i strujom 250,0 A. Do eksplozije je došlo 6 sekundi nakon postizanja struje 250 A, dakle unutar vremena t_E čak i uvjetima sniženog napona kratkog spoja. Struja kratkog spoja je postigla vrijednost od 0 A do 250 A za 4 sekunde (regulirani izvor napajanja). Sustav/uređaj za mjerenje tlaka je izmjerio tlak eksplozije od 1,23 bara. Eksplozija je bila i vizualno vidljiva. Cijelo je ispitivanje snimano fotokamerom, a trenutak eksplozije je prikazan slikom 6.12.



Slika 6.12. Eksplozija smjese acetilen/zrak izazvana kvarom kaveza rotora

Ispitivanje u smjesi acetilen/zrak je ponovljeno (ispitivanje redni broj 12) i to na isti način kao ispitivanje redni broj 11. Do eksplozije je došlo 3 sekunde nakon postizanja struje 250 A, dakle unutar vremena t_E čak i uvjetima sniženog napona kratkog spoja. Sustav/uređaj za mjerenje tlaka je izmjerio tlak eksplozije od 1,35 bara. Eksplozija je bila i vizualno vidljiva.

6.6. Analiza rezultata istraživanja djelotvornosti zagrijavanja kao uzročnika paljenja i nastanka eksplozije

Provedena istraživanja djelotvornosti zagrijavanja kaveza rotora asinkronog motora kao uzročnika paljenja odnosno nastanka eksplozije potvrđuju, što je i očekivano, da elektromotor sa ispravnim rotorom i ispravnim namotom statora te uz osiguranje zahtijevane zaštite od preopterećenja za "Ex e" motore ne predstavlja djelotvoran uzročnik paljenja u kratkom spoju, pri zaletu i u vrtnji.

Iz tablice 6.4 je vidljivo da kod namjerno izazvanih oštećenja rotora (razina IV), sličnih onima koja bi se prema iskustvu mogla pojaviti u nenormalnim ali mogućim pogonskim stanjima u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom, zagrijavanje kaveza rotora čini djelotvoran uzročnik paljenja odnosno nastanka eksplozije kada motor radi u eksplozivnoj atmosferi acetilena, čak i uz osiguranje zahtijevane zaštite od preopterećenja za "Ex e" motore.

Ponovno je važno istaknuti da razina oštećenja rotora IV, bez primjene specijalističkih dijagnostičkih ispitivanja, nije uočljiva u normalnom radu motora niti ju zahtijevane zaštite od preopterećenja "Ex e" motora prepoznaju, što za posljedicu ima neisključenje motora u traženom vremenu t_E i pojavu eksplozije. Nastanak eksplozije je zabilježen, pri zakočenom rotoru razine oštećenja IV, u vremenima manjim od vremena t_E čak i uvjetima sniženog napona kratkog spoja, odnosno manje struje kratkog spoja, pri kojima ne bi ni došlo do pravodobne prorade zaštite unutar vremena t_E . Pojava takvih struja, većih od nazivne ali manjih od struje kratkog spoja pri punom naponu, je u realnom pogonu moguća kod stanja preopterećenja motora i u vrijeme zaleta.

Iz navedenog slijedi važni zaključak da razina IV oštećenja kaveza rotora predstavlja djelotvoran uzročnik paljenja odnosno nastanka eksplozije i pri određenim stanjima preopterećenja i zaleta motora, a ne samo kod zakočenog rotora.

Dobiveni eksperimentalni rezultati ispitivanja djelotvornosti zagrijavanja kao uzročnika paljenja pokazuju dobro slaganje s predviđenim ishodima temeljenim na tablicama 6.1 i 6.2. te se djelotvornost zagrijavanja kao uzročnika paljenja može izravno povezati s izmjerenim temperaturama i tablicama 6.1 i 6.2. Na navedenoj se vezi i temelji današnja koncepcija protueksplozijske zaštite.

Rezultati provedenih ispitivanja također upućuju na vrlo važnu činjenicu da rizik od paljenja eksplozivne atmosfere odnosno smjese postoji i kod nižih razina oštećenja kaveza

rotora u uvjetima zakočenog rotora uz puni napon. Ispitivanja sa zakočenim rotorom pri punom naponu nisu, u okviru ovog rada, provedena radi tehničkih ograničenja raspoložive ispitne opreme, izvora napajanja i sl.

Pri punom bi se naponu kratkog spoja javljala veća zagrijavanja što bi moglo dovesti do paljenja i smjesa koje imaju više temperature paljenja od acetilena, odnosno moglo bi dovesti do paljenja nekih smjesa i kod manjih razina oštećenja.

Prema dodatku A norme HRN IEC 60079-7;2006 kod ispitivanja zagrijavanja u kratkom spoju sa naponom kratkog spoja manjim od nazivnog napona, izmjerene vrijednosti nadtemperatura zagrijavanja treba preračunati prema izrazu (6.1).

$$\left(\frac{\Delta T_{pr}}{\Delta T_{iz}} \right) = \left(\frac{U_n}{U_{is}} \right)^2 \quad (6.1)$$

gdje je:

ΔT_{pr} - preračunata nadtemperatura zagrijavanja za puni napon kratkog spoja,

ΔT_{iz} - izmjerena nadtemperatura zagrijavanja pri sniženo naponu,

U_{is} - sniženi napon kratkog spoja pri ispitivanju zagrijavanja i

U_n - nazivni napon motora.

Opisani je princip preračunavanja, u okviru ovog rada, provjeren i ispitivanjima kod zagrijavanja razine oštećenja IV pri različitim naponima kratkog spoja. Rezultati ispitivanja su prikazani u tablici 6.5. Sve nadtemperature su mjerene na oštećenom štapu broj 7 i to 8 s odnosno 30 s nakon priključenja napona kratkog spoja.

Tablica 6.5. Rezultati ispitivanja i preračunavanja zagrijavanja oštećenog štapa br. 7. kaveza rotora u kratkom spoju pri različitim naponima kratkog spoja

U_{is} , V	ΔT_{iz} nakon 8 s, K	ΔT_{iz} nakon 30 s, K	ΔT_{pr} nakon 8 s, K	ΔT_{pr} nakon 30 s, K
47	5	14	326	915
119	36	70	367	738
200	120	287	433	1036

Izmjerene i proračunate vrijednosti (za tri vrijednosti napona kratkog spoja) pokazuju, za realnu tehničku primjenu, prihvatljivu razinu slaganja s izrazom (6.1) (razlike preračunatih vrijednosti nadtemperatura za tri mjerne točke temeljene na izmjerenim nadtemperaturama nakon 8 s je unutar 35 %, a nakon 30 s unutar 45 %). Bolje slaganje vrijednosti nakon 8 s u odnosu na 30 s je posljedica manjeg utjecaja odvođenja topline i izjednačenja temperature između štapova i prstena rotora. Za tehničku primjenu prihvatljivu razinu slaganja s izrazom (6.1) pokazuju i omjeri izmjerenih nadtemperatura u odnosu na omjere napona kratkog spoja pri kojima su provedena mjerenja (kako nakon 8 s tako i nakon 30 s).

Usporedba, unutar vremena t_E izmjerenih, najviših nadtemperatura na mjestu oštećenja štapa 7 kaveza rotora pri različitim naponima (strujama) kratkog spoja, za različite razine

oštećenja je dala rezultate prikazane u tablici 6.6. Mjerenje nadtemperature za razinu oštećenja II pri struji kratkog spoja 250 A nije provedeno.

Korištenjem izraza (6.1) preračunate su najviše očekivane nadtemperature na mjestu oštećenja štapa 7 kaveza rotora unutar vremena t_E kod punog napona kratkog spoja (380 V). Nadtemperature su preračunavane temeljem mjerenja pri naponu kratkog spoja iznosa 119 V i 200 V. Navedeno je također prikazano u tablici 6.6.

Tablica 6.6. Usporedba izmjerenih nadtemperatura na mjestu oštećenja štapa 7 pri različitim naponima (strujama) kratkog spoja uz različite razine oštećenja kaveza rotora

Stanje elektromotora (razina oštećenja)	Najviša izmjerena nadtemperatura unutar vremena t_E , K		Preračunata najviša očekivana nadtemperatura unutar vremena t_E , K	
	napon, V / struja, A kratkog spoja		prema naponu kratkog spoja, V	
	119/140	200/250	119	200
II	25	---	255	---
III	48	110	489	397
IV	36	120	367	433

Nadtemperatura štapa ispravnog rotora u 9-toj sekundi kratkog spoja pri nazivnom napnu, kako je pokazano u tablici 4.8. ovog rada, iznosi 94 K. Motor je ispitan i certificiran uz uvjet da nadtemperatura rotora u kratkom spoju pri punom naponu ne prelazi cca. 90 K (za usvojeni $t_E = 8,1$ s i T3).

Oštećenja (napuknuća) štapa prstena ili spoja prsten-štap odnosno smanjenje aktivnog presjeka štapa ili spoja na mjestu kvara dovode do povećanja gustoće struje, a time i do povećanja prirasta zagrijavanja po vremenu u odnosu na stanje bez oštećenja što unosi rizike od nastanka eksplozije u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom.

Dobiveni rezultati, uzimajući u obzir i temperaturu okoline od, normama predviđenih, 40 °C te uzimajući u obzir i uočena odstupanja/rasipanja rezultata proračuna i izmjerenih vrijednosti vidljivih iz tablice 6.5., upućuju na važni zaključak da razine oštećenja III i IV kod zakočenog rotora uz priključeni nazivni napon, što se može očekivati u nenormalnim ali stvarnim stanjima realnog pogona, predstavljaju djelotvorne uzročnike paljenja eksplozivne atmosfere zapaljivih medija čija je temperatura paljenja i viša od deklariranog temperaturnog razreda T3 (200 °C) čak i u uvjetima osiguranja zahtijevane zaštite od preopterećenja za "Ex e" motore koja bi isključila zakočeni motor unutar vremena t_E .

U određenim uvjetima najviše temperature okoline i najviše nadtemperature nazivnog opterećenja i razina oštećenja II predstavlja djelotvoran uzročnik paljenja u opisanom slučaju.

Rezultati prikazani u tablici 6.6. također upućuju na još jedan posebno bitan zaključak. Iznos napona odnosno struje kratkog spoja dominantnog je utjecaja na zagrijavanje mjesta kvara. Iz tablice 6.6. je npr. uočljivo postizanje čak više nadtemperature štapa 7 unutar

vremena t_E , pri struji kratkog spoja iznosa 140 A, kod razine oštećenja III nego kod razine oštećenja IV.

Temeljem navedenog se može zaključiti da je iznos struje motora (pri normalnom pogonu, pri zaletu, u uvjetima preopterećenja i kratkog spoja) temeljni parametar za klasifikaciju rizika da oštećenje kaveza rotora postane djelotvoran uzročnik paljenja. Jasno, utjecaj razine kvara drugi je bitan parametar za klasifikaciju rizika.

Rezultatima eksperimentalnih istraživanja potvrđena je ranije postavljena hipoteza da oštećenja kaveza rotora, kroz pojavu povećanih zagrijavanja odnosno vrućih površina, mogu postati djelotvorni uzročnici paljenja eksplozivne atmosfere, odnosno da predstavljaju izravan rizik od nastanka eksplozije i svih pratećih neželjenih posljedica.

Oštećenja kaveza rotora je, kako je i ranije rečeno, teško “primijetiti” u normalnom radu motora, posebice ona u ranoj fazi nastanka. Ista se, u pravilu, ne otkrivaju niti uobičajenim i zahtijevanim pregledima protueksplozijski zaštićenih elektromotora. Sve navedeno dovodi do rizika da “skrivena” oštećenja kaveza rotora mogu dovesti do pojave djelotvornih uzročnika paljenja, što je potvrđeno i rezultatima ispitivanja prikazanim u ovom poglavlju rada.

Mjere za izbjegavanje/smanjivanje navedenog rizika se ogledaju u primjeni suvremenih metoda dijagnostičkih ispitivanja stanja elektromotora, kako je opisano u poglavlju 5 ovog rada. Takvim je ispitivanjima moguće u ranoj fazi nastanka otkriti kvarove, npr. kaveza rotora, koji bi mogli daljnjim razvijanjem uzrokovati pojavu djelotvornih uzročnika paljenja.

6.7. Električna iskra kao potencijalni uzročnik paljenja

Električna iskra kao potencijalni uzročnik paljenja eksplozivne atmosfere nije istraživana u okviru ovog rada. Provedena ispitivanja zagrijavanja u realnim uvjetima priutnosti eksplozivne smjese upućuju na zaključak da pri namjerno izazvanim razinama oštećenja štapova kaveza rotora nije došlo do pojave iskre koja bi imala dovoljnu energiju da zapali prisutne eksplozivne smjese.

Najmanje energije paljenja prikazane u tablici 3.1. ovog rada, a koje su određene metodom ispitivanja energije električne iskre koja je sposobna zapaliti eksplozivnu smjesu, i za vodik i za acetilen su istog iznosa (0,019 mJ). Kod razmatranja električne iskre kao uzročnika paljenja temeljno je pitanje postojanja dovoljne energije paljenja budući je temperatura električne iskre najmanje 1000 K, odnosno sigurno je iznad temperature paljenja svih poznatih zapaljivih plinova i para. Navedeno je detaljno opisano u poglavlju 3. ovog rada.

Obzirom da do pojave eksplozije, prilikom ispitivanja provedenih u eksplozivnoj atmosferi, nije dolazilo sve do postizanja temperature više od najmanje temperature paljenja acetilena (305 °C) može se zaključiti da je uzročnik paljenja bila vruća površina odnosno povećanje zagrijavanja. Najviša temperatura vruće površine oštećenog štapa kaveza rotora

(338,2 °C) bila je dovoljna za paljenje acetilena, ali nije bila dovoljna za paljenje vodika (čija je temperatura paljenja 560 °C)

Električna iskra kao uzročnik paljenja nije bila prisutna budući je došlo do paljenja acetilena, ali ne i paljenja vodika iako i acetilen i vodik imaju istu najmanju energiju paljenja električnom iskrom.

Prema istraživanjima koja je su proveli C. Petitfrere i C. Proust [69] mehanička iskra koja se evidentno javljala (u obliku „tuša“ iskri) u pokusu trenja odnosno brušenja metalnog diska po metalnoj površini nije potvrđena kao djelotvoran uzročnik paljenja eksplozivnih smjesa vodik/zrak i propan/zrak. Spomenuti rad daje zaključak da je pojava vrućih površina, kod opisanog pokusa, glavni i potvrđeni uzročnik paljenja eksplozivne smjese.

Pojava električne iskre unutar elektromotora i njena sposobnost da postane uzročnik paljenja je i predmet rada R. B. Barthelda²⁵.

7. NOVA METODA PROCJENE RIZIKA PRIMJENE EMP-a U PROSTORIMA UGROŽENIM EKSPLOZIVNOM ATMOSFEROM

7.1. Konceptcija modela procjene rizika i definiranje neželjenog scenarija

Opis i prikaz nove metode procjene rizika biti će, u ovom poglavlju, dan kroz analizu rizika nastanka eksplozije uslijed primjene elektromotornog pogona u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom i to za neželjeni događaj odabran i opisan u poglavlju 2. ovog rada.

Prema odabranom scenariju, koji predstavlja tipičnu i realno očekivanu situaciju u EMP-u instaliranom u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom, dolazi do pojave slijedećih neželjenih pojava:

- Ispuštanje zapaljivog medija, plina acetilena i to kod očekivanog, prorada sigurnosnog ventila, ili kod neočekivanog poremećaja, puknuće brtve.
- Uzrok ispuštanja je tehnološki poremećaj.
- Uslijed ispuštanja došlo je do pojave eksplozivne atmosfere.
- Nastao je djelotvoran uzročnik paljenja, kvar kaveza rotora ili kvar izolacijskog sustava statorskog namota asinkronog motora elektromotornog pogona kompresora.

Prema ovom konceptu rizici od nastanka eksplozije će biti analizirani kroz procjenu vjerojatnosti pojave eksplozivne atmosfere i procjenu vjerojatnosti pojave djelotvornog uzročnika paljenja. Do eksplozije dolazi samo u uvjetima istodobnog postojanja eksplozivne atmosfere i djelotvornog uzročnika paljenja.

U okviru ovog rada ocjena rizika se svodi na binarni kriterij, odnosno utvrđivanje dolazi li do eksplozije ili ne. Svi ishodi koji dovode do eksplozije se ocjenjuju fatalnim i ne provode se daljnje analize mogućih posljedica i njihove prihvatljivosti.

Formalna se i opća definicija rizika, prikazana izrazom (1.1) u poglavlju 1., za prostore ugrožene eksplozivnom atmosferom može zapisati na slijedeći način:

$$R_i = P_i \cdot S_i = P(A_i) \cdot S_i \quad i = 1, 2, 3 \dots n \quad (7.1)$$

gdje je:

R_i - rizik uslijed nastanka neželjenog događaja A_i

P_i - vjerojatnost nastanka neželjenog događaja A_i ,

S_i - posljedica neželjenog događaja A_i

A_i - neželjeni događaj

$i = 1, 2, 3 \dots n$ - skup brojeva.

Izraz (7.1) je moguće, uvažavajući strukturu postupka procjene rizika za prostore ugrožene eksplozivnom atmosferom prikazanu slikom 2.2. u poglavlju 2. ovoga rada, prikazati i slijedećim izrazom:

$$R_i = P_i \cdot S_i \cdot F_{SFi} \quad i = 1, 2, 3 \dots n \quad (7.2)$$

gdje je:

F_{SFi} - vjerojatnost kvara sigurnosnog sustava zaduženog za sprječavanje nastanka eksplozije nakon inicijalnog paljenja.

Vjerojatnost nastanka neželjenog događaja koji dovodi do eksplozije, za prostore ugrožene eksplozivnom atmosferom, moguće je prikazati na slijedeći način [58][71]:

$$P_i = P_{exati} \cdot P_{exupi} \quad i = 1, 2, 3 \dots n \quad (7.3)$$

gdje je:

P_{exati} - vjerojatnost pojave eksplozivne atmosfere i

P_{exupi} - vjerojatnost nastanka djelotvornog uzročnika paljenja,

tako da konačni izraz, u ovom dijelu rada svjesno ne ulazeći u njegova ograničenja odnosno uvedene pretpostavke uz koje vrijedi, za rizik pojave neželjenog događaja u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom ima oblik:

$$R_i = P_{exati} \cdot P_{exupi} \cdot S_i \cdot F_{SFi} \quad i = 1, 2, 3 \dots n \quad (7.4)$$

Spomenute i u ovom dijelu rada svjesno nenavedene pretpostavke i ograničenja za potvrđivanje i primjenu izraza (7.1) do (7.4) će biti detaljno pokazane u dijelu ovog rada koji prikazuje model analize pouzdanosti i kvara sustava s neovisnim i nepopravljivim komponentama.

Prihvatljivost rizika je tehničko-financijski-sociološka kategorija i nije ju moguće jednostavno i jednoznačno odrediti. Prema [25] nekim ocjenama prihvatljivosti rizika nastanka eksplozije u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom smatra se da ukupni rizik R_i manji ili jednak od 10^{-8} predstavlja općenito prihvatljiv rizik. Ovaj je pristup prihvaćen i primjenjen u okviru ovog rada.

7.2. Predviđanje nastanka neželjenog scenarija (eksplozije)

Predviđanje događaja moguće je provesti primjenom determinističkog ili probabilističkog pristupa. Deterministički se pristup u pravilu primjenjuje na pojedinačne događaje odnosno pojave i zahtijeva poznavanje zakonitosti po kojoj se taj događaj odnosno pojava zbiva. Ako se npr. kamen ispusti s vrha zgrade isti će, ukoliko nema prepreka, pasti

na tlo. Za ovo se gibanje kamena zna uzrok (djelovanje sile gravitacije), zna se zakon gibanja i taj se zakon može predložiti matematičkom formulom, te se zbog toga za svaki trenutak može odrediti položaj kamena. Može se, dakle, predvidjeti događaj.

Temeljem navedenog nameće se pitanje: Može li se za svaki događaj odrediti zakon po kojemu se zbiva odnosno zna li ga se predložiti matematičkom formulom? Odgovor je nažalost negativan. Pojava koja se zbiva često je posljedica ne jednog već mnoštva uzroka i tada se istu ne zna obuhvatiti jednom formulom po kojoj bi se određivalo njeno ponašanje u budućnosti. Navedeno se ne zna, ne zato što takvi događaji nemaju svoje uzroke, nego zato što su iznimno zamršeni. Iz spomenutih se razloga događajima koji nastaju uslijed prevelikog broja uzroka, kao što su npr. i kvarovi elektromotora, pripisuje karakter slučajnosti i naziva ih slučajnim događajima. Ne zna se, dakle, odrediti, izračunati i predvidjeti kako će se određeni slučajni događaj odvijati. Međutim ako se slučajne događaje promatra u velikom mnoštvu primijetiti će se da postoje određene pravilnosti, uočava se određena zakonitost. To vodi na zakon velikih brojeva. Pojave promatrane u mnoštvu „se mjere“ pomoću njihove vjerojatnosti i na taj način, pomoću pojma vjerojatnosti, rješava se problem slučajnih pojava kakvi su npr. kvarovi u tehničkim sustavima. Vjerojatnost pokazuje da su slučajne pojave, promatrane u mnoštvu, podvrgnute zakonitosti i stoga predvidive. Ovaj se pristup predviđanja odvijanja neke pojave naziva vjerojatnosni (probabilistički). Danas se, temeljeno na teoriji vjerojatnosti i statistici (povijesnim kartama), razvija teorija rizika koja omogućava, na osnovi poznavanja promatranih ili sličnih tehničkih sustava, predviđanje ponašanja istih u budućnosti. Opisana se metoda procjene rizika naziva „vjerojatnosna procjena rizika“. Temeljem tih predviđanja moguće je definirati mjere za povećanje pouzdanosti u svrhu smanjenja rizika na tehnički i ekonomski prihvatljivu razinu.

Upravo je ovaj probabilistički pristup primijenjen kod procjene nastanka kvarova rotora i statora motora EMP-a instaliranog u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom. Neće biti moguće precizno procijeniti za pojedinačni motor hoće li se na istom pojaviti kvar ili ne, ali će biti moguće predvidjeti ukupni broj kvarova unutar neke promatrane skupine.

Za predviđanje nastanka pojave eksplozivne atmosfere moguće je, za poznate tehnološke pojave kao što je npr. prorada sigurnosnog ventila pri točno poznatim uvjetima tlaka, primijeniti deterministički pristup. Za predviđanje pojave eksplozivne atmosfere uslijed slučajnog puknuća brtve primijenjen je vjerojatnosni pristup.

Vjerojatnosna se procjena rizika nastanka kvara elektromotora temelji na statističkim podacima o provedenim ispitivanjima kojima se utvrđuje pojavnost kvara. Broj ispitivanja na temelju kojih se dobiva procijenjena vjerojatnost egzaktna je mjera mogućnosti da se procijenjena vrijednost približi pravoj vrijednosti ali i njen je ograničavajući faktor. Npr. dijagnosticira li se za N ispitanih motora n kvarova čiju se vjerojatnost želi procijeniti, procijenjena je vjerojatnost nastanka kvara:

$$P_{pr} = \frac{n}{N} \quad (7.5)$$

dok je prava vjerojatnost određena limesom:

$$P = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{n}{N} \quad (7.6)$$

Navedeni izrazi ukazuju na važnu činjenicu da se, za mali broj pokusa (ispitivanja), procijenjena vjerojatnost može bitno razlikovati od prave vjerojatnosti te je takve rezultate nužno kritički i s oprezom prihvaćati.

7.3. Analiza vjerojatnosti pojave eksplozivne atmosfere (P_{exat}) za odabrani neželjeni scenarij

U razmatranom scenariju prorada sigurnosnog ventila, u zatvorenom prirodno ventiliranom prostoru postrojenja za proizvodnju acetilena, dovodi do pojave primarnog izvora ispuštanja, dok puknuće brtve uzrokuje pojavu sekundarnog izvora ispuštanja.

Značajke izvora ispuštanja i ventilacije su prikazani tablicom 7.1²⁹. U obzir su uzeti i podaci prema primjerima norme HRN EN 60079-10-1. Kod analiza kapaciteta izvora ispuštanja i pojavnosti kvarova uzeta su u obzir i istraživanja prema [140]³⁰.

Tablica 7.1. Značajke izvora ispuštanja i ventilacije

Značajka	Vrijednost	Značajka	Vrijednost
kapacitet primarnog izvora ispuštanja dG/dt , kg/s	$3,5 \cdot 10^{-5}$	kapacitet sekundarnog izvora ispuštanja dG/dt , kg/s	$1,0 \cdot 10^{-3}$
faktor sigurnosti k za primarni izvor	0,25	mjera djelotvornosti ventilacije f	1
faktor sigurnosti k za sekundarni izvor	0,5	temperatura okoline T , K	303
donja granica eksplozivnosti DGE	$0,024 \text{ kg/m}^3$ 2,3 %	broj izmjena svježeg zraka u jedinici vremena C , s^{-1}	$5,5 \cdot 10^{-3}$

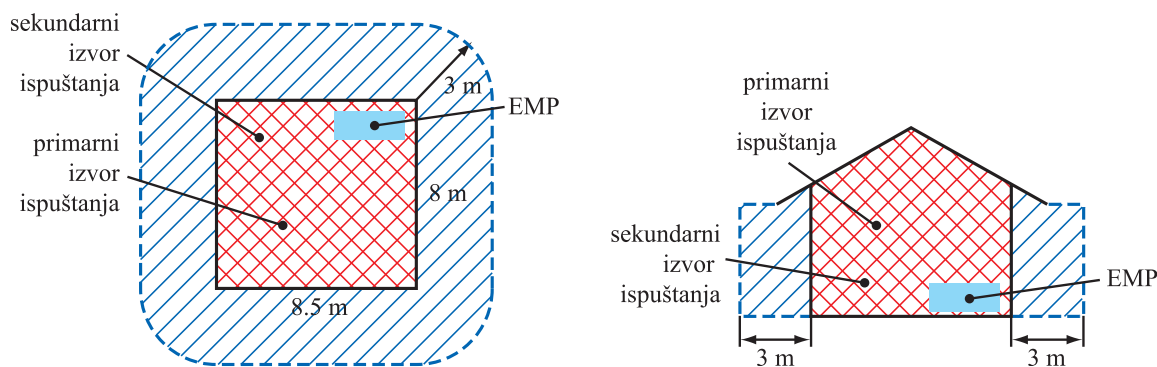
Koristeći metodologiju analiza izvora ispuštanja i određenja zona opasnosti odnosno trajanja eksplozivne atmosfere, opisanu u poglavlju 3.2 ovoga rada, može se odrediti i pretpostaviti trajanje eksplozivne atmosfere, a što je prikazano u tablici 7.2. Pri tome je uzeta u obzir činjenica da se prorada sigurnosnog ventila događa prosječno 1 put mjesečno, dok se puknuće brtve događa manje od 1 put godišnje. U analizama ovog rada pretpostavlja se jedno puknuće brtve godišnje. Trajanje eksplozivne atmosfere, prikazano u tablici 7.2., predstavlja ukupno vrijeme koje čini vrijeme u kojemu prosječna koncentracija padne s početne vrijednosti X_0 na $k \cdot DGE$ i vrijeme poznatog trajanja ispuštanja za primarni izvor te procijenjenog trajanja ispuštanja za sekundarni izvor. Trajanje eksplozivne atmosfere (u satima/godinu) prikazano u spomenutoj tablici predstavlja ukupno trajanje eksplozivne atmosfere nastalo uslijed ispuštanja primarnog odnosno sekundarnog izvora ispuštanja.

Tablica 7.2. Podaci o trajanju eksplozivne atmosfere

Izvor ispuštanja	Ukupno trajanje eksplozivne atmosfere, h/god
primarni	6,24
sekundarni	0,22

Na temelju navedenih trajanja prisutnosti eksplozivne atmosfere, prema tradicionalnom pristupu opisanom npr. slikom 3.14 ovog rada, primarni izvor ispuštanja stvara zonu opasnosti 1 a sekundarni zonu opasnosti 2.

Ukupni ventilirani obujam koji pripada promatranom prostoru i koji opslužuje dotična ventilacija V_0 iznosi 238 m^3 . Dimenzije prostorije su ($dx \times xv = 8,0 \text{ m} \times 8,5 \text{ m} \times 3,5 \text{ m}$). Obzirom na odnos V_Z ($1,1 \text{ m}^3$ za primarni izvor i $15,6 \text{ m}^3$ za sekundarni izvor) i V_0 ventilacija se, sukladno izrazu (3.3) smatra srednjom, iako bi mogla za zonu 1 biti određena čak i kao jaka, te bi prema tradicionalnom pristupu unutar prostorije za proizvodnju acetilena bila određena zona opasnosti 1. Oko prostorije, na udaljenosti od 3 m, bila bi određena zona opasnosti 2. Rasprostiranje zone 2 je konzervativno procijenjeno i na „sigurnoj“ je strani. Navedeno je grafički prikazano na slici 7.1., crvena šrafura je zona 1, a plava zona 2.



Slika 7.1. Zone opasnosti postrojenja za proizvodnju acetilena

Trajanje eksplozivne atmosfere, dobiveno provedbom postupka klasifikacije prostora, se može koristiti [25][58] za ocjenu vjerojatnosti pojave eksplozivne atmosfere. Moguća je primjena raznih algoritama povezivanja vremenskog trajanja eksplozivne atmosfere [h/god] i vjerojatnosti (učestalosti) pojave eksplozivne atmosfere u godini. Uzimajući u obzir trajanje eksplozivne atmosfere kroz godinu, za vjerojatnost pojave eksplozivne atmosfere (P_{exat}) se mogu [25] uzeti vrijednosti prikazane u tablici 7.3.

Tablica 7.3. Vjerojatnost pojave eksplozivne atmosfere

Izvor ispuštanja	Ukupno trajanje eksplozivne atmosfere, h/god	Vjerojatnost pojave eksplozivne atmosfere (P_{exat})
primarni	6,24	$7,1 \cdot 10^{-4}$
sekundarni	0,22	$2,5 \cdot 10^{-5}$

7.4. Analiza vjerojatnosti nastanka djelotvornog uzročnika paljenja (P_{exup}) za odabrani neželjeni scenarij

Vjerojatnost nastanka djelotvornog uzročnika paljenja unutar EMP-a biti će analizirana kroz vjerojatnost nastanka kvarova kaveza rotora i pojave kvara izolacijskog sustava statorskog namota asinkronog motora. Pojava drugih djelotvornih uzročnika paljenja npr. mehaničkih kao što su kvarovi ležaja, mehaničke iskre, vibracije te utjecaj ljudskog faktora nisu predmet ovih razmatranja.

Temeljem navedenog, vjerojatnost nastanka djelotvornog uzročnika paljenja (P_{exup}) unutar EMP-a se može, na ovom mjestu i na kolokvijalnoj razini svjesno zanemarujući ograničenja koja će biti kasnije detaljno opisana, prikazati na slijedeći način:

$$P_{\text{exup}} = P_{\text{exupr}} + P_{\text{exups}} \quad (7.7)$$

gdje je:

P_{exupr} - vjerojatnost nastanka djelotvornog uzročnika paljenja uslijed kvara kaveza rotora i

P_{exups} - vjerojatnost nastanka djelotvornog uzročnika paljenja uslijed kvara namota statora.

Određenje vjerojatnosti nastanka spomenutih djelotvornih uzročnika paljenja, u okviru ovog rada, temeljeno je na statističkoj učestalosti (povijesnim kartama).

7.4.1. Vjerojatnost nastanka P_{exupr}

Statistička učestalost i vjerojatnost pojave kvarova kaveza rotora, temeljene na istraživanjima [47][78][160][162][163][164] prikazane su u tablici 7.4.

Prema istraživanjima, provedenim na uzorku od cca. 10000 elektromotora [78], u elektromotornom pogonu, ovisno o industrijskom procesu i tipu pogona, događa se prosječno između 0,1 i 5 kvarova nekog elektromotora na godinu. Prema istom istraživanju udio kvarova rotora u ukupnim kvarovima elektromotora iznosi 13 %.

Istraživanje provedeno na uzorku od 26 visokonaponskih motora, među kojima su bili i elektromotori u protueksplozijski zaštićenoj izvedbi i koji su radili u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom, [162], je pokazalo da je za 6 motora utvrđeno stanje kvara kaveza rotora ili je iskazana sumnja na stanje kvara. Ovi su motori kontinuirano ispitivani od 1993. - 2008. god. Pretpostavka je ovog rada, radi neraspoloživosti rezultata prethodnih ispitivanja, da su ove detekcije kvara na 6 motora prve i jedine u razdoblju ispitivanja od 15 godina. Ova pretpostavka nažalost nije sasvim pouzdana, jer ne uzima u obzir eventualne druge kvarove čije postojanje nije zabilježeno.

Ispitivanja provedena na niskonaponskim motorima, među kojima su bili i elektromotori u protueksplozijski zaštićenoj izvedbi i koji su radili u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom [163], pokazuju da je u 2005 god. od 59 ispitanih motora utvrđen kvar kaveza rotora kod 1 motora, tijekom 2006 god. je kod 46 ispitanih motora također utvrđen kvar rotora kod 1 motora. Ispitivanja provedena u 2007 god. pokazuju 2 kvara

kaveza rotora kod 40 ispitanih motora, dok je tijekom 2008 god. kvar kaveza detektiran kod 6 motora od 112 ispitanih.

Na visokonaponskim elektromotorima u protueksplozijski zaštićenoj izvedbi i koji su radili u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom (transport nafte u Republici Hrvatskoj) provedena su dijagnostička ispitivanja s ciljem utvrđivanja stanja kaveza rotora [47][160][164]. Ispitivanja su provedena na 20 motora. Na 4 motora „Ex e“ i na 2 motora „Ex d“ je dijagnosticiran kvar kaveza rotora. Ispitivanja su provedena u razdoblju od 2002 do 2008. Motori su u pogonu od 1980 god. Pretpostavka je ovog rada da su ove detekcije kvara na 6 motora prve i jedine u razdoblju 29 godina primjene ovih motora. Ova pretpostavka nažalost nije sasvim pouzdana, jer ne uzima u obzir eventualne druge kvarove čije postojanje nije zabilježeno.

Tablica 7.4. Statistička učestalost i vjerojatnost nastanka kvara kaveza rotora

Izvor statističkih podataka - literatura	Statistička učestalost, kvar/broj motora/godina	Vjerojatnost nastanka kvara rotora promatranog motora (P_{exupr})
[78]	0,013 do 0,65/1/1	od 0,013 do 0,65
[162]	6/26/15	0,015
[163]	1/59/1	0,017
[163]	1/46/1	0,022
[163]	2/40/1	0,050
[163]	6/112/1	0,053
[47][160][164]	6/20/29	0,010

Temeljem statističkih podataka prikazanih u gornjoj tablici može se, za daljnje analize procjene rizika primjene EMP-a u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom, za vjerojatnost nastanka kvara kaveza rotora P_{exupr} nekog promatranog motora koristiti, ovisno o industrijskom procesu, uvjetima okoliša, održavanju, tipu pogona (npr. teški pogon, regulirani pogon, i sl.), vrijednost od 0,010 do 0,65. Rezultati statističkih podataka različitih izvora daju zadovoljavajuće slaganje za praktičnu primjenu. Posebno je bitno uočiti da su u različitim istraživanjima ispitivani različiti motori (niskonaponski i visokonaponski) ali su razlike u dobivenim vrijednostima vjerojatnosti nastanka kvara rotora, za tehničku primjenu, zanemarive.

7.4.2. Vjerojatnost nastanka P_{exups}

Učestalost, temeljena na statistici, te vjerojatnost pojave kvarova izolacijskog sustava namota statora, dobivena temeljem istraživanjima [78][160][164] je prikazana u tablici 7.5.

Prema istraživanjima, provedenim na uzorku od cca. 10000 elektromotora [78], u elektromotornom pogonu, ovisno o industrijskom procesu i tipu pogona, se događa prosječno između 0,1 i 5 kvarova nekog elektromotora na godinu. Prema istom istraživanju kvarovi namota statora u ukupnim kvarovima elektromotora iznose 14 %.

Na visokonaponskim elektromotorima u protueksplozijski zaštićenoj izvedbi i koji su radili u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom, transport nafte u Republici

Hrvatskoj, provedena su dijagnostička ispitivanja s ciljem utvrđivanja stanja izolacijskog sustava namota statora [160][164]. Ispitivanja su provedena na 20 motora. Na 6 motora u zaštiti „Ex e“ je dijagnosticiran kvar ili loše stanje izolacijskog sustava namota statora. Ispitivanja su provedena u razdoblju od 2002. do 2008. Motori su u pogonu od 1980. god. Pretpostavka je ovog rada da su ove detekcije kvara na 6 motora prve i jedine u razdoblju 29 godina primjene ovih motora. Ova pretpostavka, nažalost, nije sasvim pouzdana jer ne uzima u obzir eventualne nastale druge kvarove čije postojanje nije zabilježeno.

Tablica 7.5. Statistička učestalost i vjerojatnost nastanka kvara izolacijskog sustava namota statora

Izvor statističkih podataka - literatura	Statistička učestalost, kvar/broj motora/godina	Vjerojatnost nastanka kvara namota statora promatranog motora (P_{exups})
[78]	0,014 do 0,65/1/1	od 0,014 do 0,7
[160][164]	6/20/29	0,010

Temeljem statističkih podataka prikazanih u gornjoj tablici može se, za daljnje analize procjene rizika primjene EMP-a u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom, za vjerojatnost nastanka kvara namota statora P_{exups} nekog promatranog motora koristiti, ovisno o industrijskom procesu, uvjetima okoliša, održavanju, tipu pogona i sl., vjerojatnost od 0,010 do 0,7. Rezultati statističkih podataka različitih izvora daju zadovoljavajuće slaganje za praktičnu primjenu.

Uspoređujući rezultate prikazane u tablicama 7.4 i 7.5 te uzimajući u obzir udio kvarova kaveza rotora i namota statora u ukupnim kvarovima motora prema [38] (26,5 % kvarova namota statora i 31,6 % kvarova rotora) odnosno prema [78] (14 % kvarova namota statora i 13 % kvarova rotora) uočava se bitan zaključak da se za P_{exupr} i P_{exups} mogu, u praktičnoj primjeni, uzimati približno jednake vrijednosti.

Stvarne je i realne podatke za P_{exupr} i P_{exups} za konkretni EMP potrebno prikupljati periodičkim i sustavnim provođenjem dijagnostički ispitivanja stanja kaveza rotora i izolacijskog sustava namota statora.

U ovom je radu za vjerojatnost nastanka uzročnika paljenja P_{exupr} i P_{exups} pretpostavljena i korištena, kao jedina dostupna, statistička odnosno srednja/konstantna vjerojatnost nastanka kvara.

Uvjeti primjene statističkih podataka odnosno podataka za koje nije poznata vremenska raspodjela, npr. funkcija učestalosti kvara $z(t)$, su pojašnjeni u poglavlju 7.6.1 ovog rada.

Važno je također napomenuti da je kod procjene vjerojatnosti nastanka uzročnika paljenja potrebno razmotriti i specifičnosti EMP-a koje se npr. mogu ogledati u primjeni reguliranih pogona odnosno pretvarača frekvencije. Primjena U/f pretvarača može negativno djelovati na pojavu kvarova npr. kroz povećana zagrijavanja, pojavu vršnih napona (U_{peak}), pojavu osovinskih napona i ležajnih struja i sl. Ove je utjecaje svakako nužno uzeti u obzir kod provedbe procjene rizika.

7.4.3. Dijagnosticiranje kvara i ocjena djelotvornosti uzročnika paljenja

Važno pitanje koje se nameće kod procjene rizika primjene EMP-a u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom je: *Koji kvarovi kaveza rotora ili namota statora mogu biti djelotvorni uzročnici paljenja eksplozivne atmosfere?*

Djelotvornost kvarova kaveza rotora kao uzročnika paljenja je istražena i potvrđena laboratorijskim ispitivanjima čiji su rezultati prikazani u 6. poglavlju ovog rada.

Djelotvornost kvarova namota statora kao uzročnika paljenja je već ranije prepoznata i potvrđena o čemu govore radovi kao npr. [85]¹⁰. Djelotvornost kvarova namota statora kao uzročnika paljenja nije, radi ranije spomenutog, istraživana u okviru ovog rada. Također je pretpostavka i procjena ovog rada da se kvarovi namota statora lakše dijagnosticiraju i u praksi češće na vrijeme otkrivaju.

Uvažavajući navedeno te uzimajući u obzir fatalnost posljedica nastanka eksplozije sve je dijagnosticirane kvarove kaveza rotora i namota statora potrebno promatrati kao djelotvorne uzročnike paljenja. Navedena je koncepcija primijenjena u okviru ovog rada. Svaki bi drugi model procjene rizika primjene EMP-a u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom, sigurnost ljudi, postrojenja i okoliša mogao odvesti do manje sigurnih procjena.

Pri tome je posebno bitno naglasiti da su od najveće važnosti, s naslova sigurnosti te smanjenja i upravljanja rizikom, dijagnosticiranja stanja motora EMP-a koja nisu, po definiciji ili tehničkim kriterijima, stanja kvara (npr. povećanje otpora spoja štap-prsten ali u granicama čija vrijednost ukazuje da još nije došlo do značajnog oštećenja ili puknuća spoja, smanjenje otpora izolacije namota statora ali koji je još uvijek veći od najmanje zahtijevane odnosno prihvatljive vrijednosti). Otkrivanjem ovih stanja „predkvara“ moguće je na vrijeme odnosno u ranoj fazi predvidjeti i spriječiti nastanak kvarova koji su djelotvorni uzročnici paljenja. Stanja „predkvara“ se ne smatraju djelotvornim uzročnicima paljenja ali su od presudne važnosti u predviđanjima ponašanja i procjeni rizika primjene EMP-a u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom.

Opisani je pristup primijenjen u daljnjim analizama ocjene pouzdanosti EMP-a u ugroženom prostoru i analizama gubitka pouzdanosti što zapravo predstavlja rizik od nastanka kvara.

7.5. Model rizika primjene EMP-a u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom

Procjena rizika primjene EMP-a u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom mora objediniti različite znanstvene discipline temeljene na vjerojatnosnim i statističkim metodama kako bi mogla obaviti svoju zadaću. Zadaća je procjene rizika na temelju matematičkih modela, egzaktnih uz prihvaćanje određenih pretpostavki, izgraditi metode kvantitativne procjene rizika. Zadaća je procjene rizika da, na temelju poznavanja nekog tehničkog sustava, predvidi njegovo ponašanje i otkrije stanja koja mogu dovesti do

neprihvatljive razine rizika. Temeljem predviđanja takvih stanja procjena rizika treba dati prijedlog mjera za smanjenje rizika na tehnički i ekonomski opravdanu razinu.

Procjenu rizika nastanka neželjenog događaja moguće je promatrati kroz teoriju pouzdanosti. Pouzdanost se definira kao vjerojatnost ispravnog rada uređaja u promatranom vremenskom intervalu, dok je rizik vjerojatnost da u tom istom vremenskom intervalu nastupi kvar. U tom smislu rizik se može interpretirati i kao gubitak pouzdanosti.

Najčešće postavljana pitanja vezana uz pouzdanost odnosno uz gubitak pouzdanosti su:

- hoće li uređaj raditi bez kvara kada je to potrebno,
- hoće li uređaj raditi dostatno dugo da ispunji namijenjenu funkciju,
- mogu li se nastali kvarovi nadomjestiti nekim tehničkim mjerama,
- koje opasnosti odnosno rizici mogu proizaći iz pojave kvara i
- koje su posljedice nastanka kvara i mogućih opasnosti koji iz njega proizlaze.

Svaku je zakonitost, kako u prirodi tako i u tehničkom sustavu, potrebno i korisno izraziti matematičkim zakonima. Navedeno se naziva postavljanjem matematičkog modela za sustav iskustvenih činjenica. Istraživanje zakonitosti u tehničkom sustavu se može podijeliti u tri faze:

- modeliranje,
- uporabu teorije pouzdanosti i teorije rizika i
- tumačenje matematičkih rezultata pomoću fizikalnih načela.

Kod primjene kvantitativnog postupka procjene rizika odnosno gubitka pouzdanosti (koja se kod primjene EMP-a u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom ogleda u tehničkom kvaru koji dovodi do ispuštanja zapaljivog medija odnosno do pojave eksplozivne atmosfere i u tehničkom kvaru koji dovodi do pojave djelotvornog uzročnika paljenja) osnovni je problem traženje prikladnog matematičkog modela kojim će sustav biti opisan.

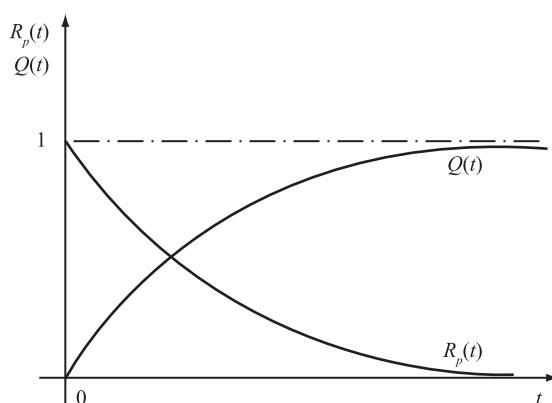
7.5.1. Model vjerojatnosti kvara komponente sustava

U teoriji rizika i teoriji pouzdanosti nekog tehničkog sustava danas se najčešće primjenjuje model promatranja sustava kroz analize pouzdanosti i nepouzdanosti njegovih sastavnih komponenti. U tom smislu je EMP u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom definiran, u okviru ovog rada, kao sustav sa slijedećim komponentama, bitnim s naslova procjene rizika nastanka eksplozije:

- komponenta 1: tehnološke jedinice postrojenja (npr. sigurnosni ventili i brtve) čiji očekivani i neočekivani poremećaj/kvar dovodi do pojave eksplozivne atmosfere,
- komponenta 2: rotor elektromotora čiji kvar dovodi do pojave uzročnika paljenja i
- komponenta 3: stator elektromotora čiji kvar dovodi do pojave uzročnika paljenja.

Kako je ranije rečeno, za predviđanje nastanka pojave ispuštanja zapaljivog medija odnosno pojave eksplozivne atmosfere moguće je, za poznate tehnološke pojave prorade sigurnosnog ventila pri točno poznatim uvjetima tlaka, primijeniti deterministički pristup odnosno moguće je za svaki pojedinačni slučaj točno proračunati trajanje eksplozivne atmosfere pri nastanku kvara. Za predviđanje pojave eksplozivne atmosfere uslijed slučajnog puknuća brtve primjenjuje se vjerojatnosni pristup, temeljen na statističkim podacima. Model vjerojatnosti za ovaj slučaj, u okviru ovog rada, neće biti detaljno prikazivan budući je konceptijski identičan modelu predviđanja kvara motora, a koji će biti prikazan detaljno.

Važni pojmovi u teoriji pouzdanosti i teoriji rizika kvara su funkcija pouzdanosti $R_p(t)$ i funkcija razdiobe kvara $Q(t)$. Tipičan oblik funkcija $R_p(t)$ i $Q(t)$ prikazan je na slici 7.2 [8].



Slika 7.2. Funkcija pouzdanosti $R_p(t)$ i funkcija razdiobe kvara $Q(t)$

Veza između $R_p(t)$ i $Q(t)$ dana je izrazom:

$$R_p(t) = 1 - Q(t) \quad (7.8)$$

Važno je pokazati kako empirijski odrediti funkciju pouzdanosti $R_p(t)$, dakle i funkciju razdiobe kvara $Q(t)$.

Pretpostavimo da se svaka pojedina komponenta sustava kvari s vjerojatnošću kvara $Q(t) = 1 - R_p(t)$, dakle da je vjerojatnost njenog ispravnog rada $R_p(t)$. Na kraju vremenski ograničenog pokusa pokazat će se da od ukupno N ispitanih komponenta ispravno radi n komponenta, dok su se ostale komponente u intervalu pokusa $[0, t]$ pokvarile. Očividno je veličina n diskretna slučajna varijabla koja poprima vrijednosti: 0, 1, 2, ..., N . Označimo tu slučajnu varijablu sa $M(t)$ i izračunajmo vjerojatnost $P\{M(t) = n\}$.

Ako se u nekom mogućem ishodu pokusa točno specificira n komponenta koje su ispravne (dakle $N-n$ komponenta koje su u kvaru), tada zbog nezavisnosti kvara i ispravnog rada vjerojatnost tog specificiranog ishoda iznosi:

$$R_p(t)^n [1 - R_p(t)]^{N-n} \quad (7.9)$$

Obzirom da postoji $\binom{N}{n}$ disjunktih nizova duljine N u kojima je broj ispravnih komponenata n , očividno je da slučajna varijabla $M(t)$ ima binomnu razdiobu, pri čemu je:

$$P\{M(t) = n\} = \binom{N}{n} R_p(t)^n [1 - R_p(t)]^{N-n} = \frac{N!}{n!(N-n)!} R_p(t)^n [1 - R_p(t)]^{N-n} \quad (7.10)$$

Dakle, broj komponenata koje rade u bilo koje vrijeme t slučajna je varijabla i nije određen. Međutim, može se izračunati matematičko očekivanje te slučajne varijable, odnosno očekivanje od $M(t)$:

$$n(t) = E[M(t)] = \sum_{n=0}^N n \frac{N!}{n!(N-n)!} R_p(t)^n [1 - R_p(t)]^{N-n} \quad (7.11)$$

Izluči li se N i $R_p(t)$ dobije se:

$$n(t) = NR_p(t) \sum_{n=1}^N \frac{(N-1)!}{(n-1)!(N-n)!} R_p(t)^{n-1} [1 - R_p(t)]^{N-n} \quad (7.12)$$

Uvedimo sada $s = n - 1$ u gornju sumu. Kada n prolazi vrijednosti od 1 do N , s prolazi vrijednosti od 0 do $N - 1$ te se može pisati:

$$\begin{aligned} n(t) &\equiv E[M(t)] = NR_p(t) \sum_{s=0}^{N-1} \frac{(N-1)!}{s!(N-1-s)!} R_p(t)^s [1 - R_p(t)]^{N-1-s} = \\ &= NR_p(t) \sum_{s=0}^{N-1} \binom{N-1}{s} R_p(t)^s [1 - R_p(t)]^{N-1-s} = NR_p(t) [1 - R_p(t) + R_p(t)]^{N-1} = N \cdot R_p(t) \end{aligned} \quad (7.13)$$

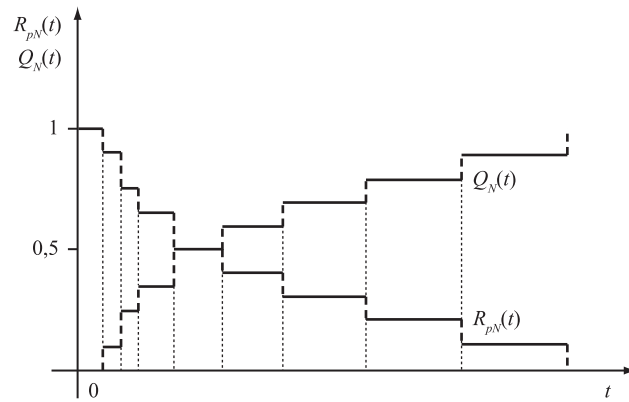
Iz (7.13) konačno slijedi:

$$R_p(t) = \frac{n(t)}{N} \quad (7.14)$$

Gornji izraz za $R_p(t)$ pokazuje da je pouzdanost neke komponente u vremenu t jednaka očekivanom broju komponenata koje još rade bez kvara u trenutku t , $(n(t))$, podijeljenom s ukupnim brojem komponenata. Uzimajući u obzir (7.8) može se zaključiti da je rizik od nastanka kvara u vremenu t jednak očekivanom broju komponenata koje su u stanju kvara u trenutku t , $(N - n(t))$, podijeljen s ukupnim brojem komponenata.

Izraz (7.14) pokazuje kako se funkcije $R_p(t)$ i $Q(t)$ mogu odrediti aproksimativno iz pokusa odnosno iz statističkih podataka. Ako se želi naći vrijednost funkcije $Q(t)$ (razdioba kvara) u trenutku $t = t_0$, tj. vjerojatnost pojave kvara za vrijeme trajanja intervala $(0, t_0)$, u tom će se slučaju u trenutku $t = 0$ staviti u rad N komponenata i u trenutku $t = t_0$ utvrditi broj komponenata koje su u kvaru. Sukladno izrazima (7.8) i (7.14) omjer $(N-n)/N$ će težiti prema $Q(t_0)$ kada $N \rightarrow \infty$. Postupak se nadalje provodi za razne vremenske intervale.

Omjer $R_{pN}(t) = n(t)/N$ se u teoriji pouzdanosti naziva empirijska funkcija pouzdanosti, pa je u skladu s tim funkcija $Q_N(t) = (N-n(t))/N$ empirijska funkcija razdiobe kvara. Navedene su empirijske funkcije prikazane na slici 7.3.



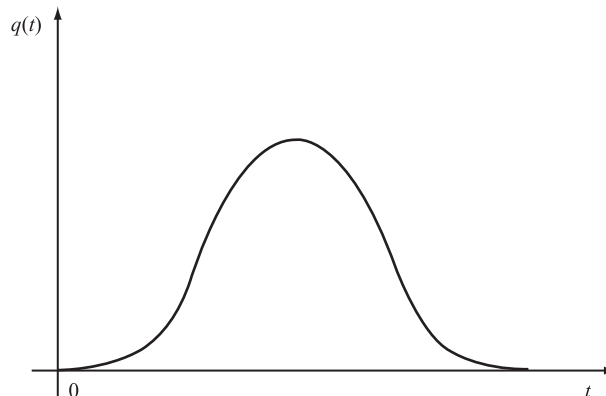
Slika 7.3. Empirijska funkcija pouzdanosti $R_{pN}(t)$ i empirijska funkcija razdiobe kvara $Q_N(t)$

S porastom N ove funkcije aproksimiraju funkcije $R_p(t)$ i $Q(t)$, pa za veliki N vrijedi:

$$R_{pN}(t) = \frac{n(t)}{N} \approx R(t) \quad (7.15)$$

$$Q_N(t) = \frac{N - n(t)}{N} \approx Q(t) \quad (7.16)$$

Slijedeći važni pojmovi koje treba odrediti su funkcija gustoće vjerojatnosti kvara komponente $q(t)$ i funkcija učestalosti kvara komponente $z(t)$. Funkcija gustoće vjerojatnosti kvara pridružena je funkciji razdiobe kvara $Q(t)$ izrazom $q(t) = dQ(t)/dt$. Slika 7.4. [8] prikazuje mogući graf funkcije $q(t)$ koji u pravilu ima jedan vrh.

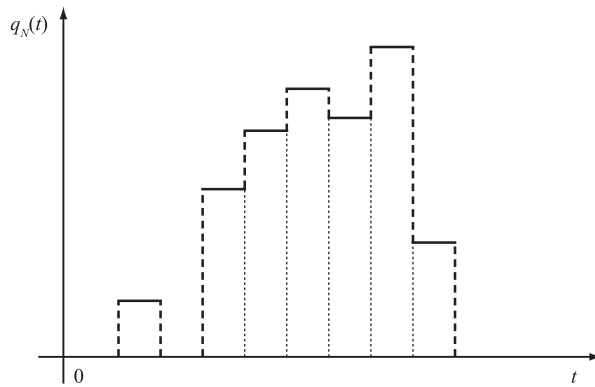


Slika 7.4. Funkcija $q(t)$: funkcija gustoće vjerojatnosti kvara komponente

Funkciju $q(t)$ moguće je ocijeniti empirijski. Koristi se izraz:

$$q(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = \frac{d}{dt} [1 - R_p(t)] = -\frac{dR_p(t)}{dt} = -\frac{1}{N} \frac{dn(t)}{dt} \equiv \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{n(t) - n(t + \Delta t)}{N \Delta t} \quad (7.17)$$

odnosno funkcija gustoće vjerojatnosti kvara neke komponente određena je kao omjer broja kvarova koji su se zbili u vremenskom intervalu Δt i produkta broja svih komponenti s duljinom vremenskog intervala. Empirijska funkcija gustoće vjerojatnosti kvara prikazana je na slici 7.5.



Slika 7.5. Funkcija $q_N(t)$: empirijska funkcija gustoće vjerojatnosti kvara komponente

U praktičnoj (inženjerskoj) terminologiji najčešće korišteni pojam je tzv. učestalost kvara $z(t)$. Produkt $z(t) \cdot \Delta t$ za maleni Δt možemo interpretirati kao vjerojatnost da će se komponenta koja je radila bez kvara do trenutka t pokvariti unutar intervala $(t, t + \Delta t)$. Izrazimo ovako definiranu veličinu preko poznatih funkcija $q(t)$ i $R_p(t)$. Neka je τ vrijeme ispravnog rada komponente. Definirali smo $R_p(t)$ kao vjerojatnost događaja $A \equiv \tau \geq t$, dakle da će komponenta ispravno raditi do trenutka t , i analogno $R_p(t_1)$ kao vjerojatnost $P(B \equiv \tau \geq t_1)$. Pretpostavimo da je $t_1 > t$ i izračunajmo vjerojatnost da komponenta radi ispravno u intervalu $[t, t_1)$. S obzirom da se oba događaja A i B istovremeno realiziraju $A \cdot B \equiv \tau \geq t_1$, korištenjem relacije $P(B|A) = \frac{P(A \cdot B)}{P(A)}$ se dobije:

$$P(B|A) = P(\tau \geq t_1 | \tau \geq t) = \frac{P(A \cdot B)}{P(A)} = \frac{P(\tau \geq t_1)}{P(\tau \geq t)} = \frac{R_p(t_1)}{R_p(t)} \quad (7.18)$$

Komplementarni događaj gore opisanom događaju je događaj kvara u intervalu $[t, t_1)$ uz pretpostavku da nije bilo kvara do trenutka t , dakle $\bar{B}|A \equiv t \leq \tau < t_1 | \tau \geq t$. Njegova je vjerojatnost dakle:

$$P(t \leq \tau < t_1 | \tau \geq t) = 1 - \frac{R_p(t_1)}{R_p(t)} = \frac{R_p(t) - R_p(t_1)}{R_p(t)} \quad (7.19)$$

Postavi li se $t_1 = t + \Delta t$ i izvede li se granični prijelaz $\Delta t \rightarrow 0$ dobije se:

$$P(t \leq \tau < t + dt | \tau \geq t) = \frac{R_p(t) - R_p(t + dt)}{R_p(t)} \quad (7.20)$$

U skladu s ranije navedenom fizikalno interpretiranom definicijom učestalosti kvara vidi se da je:

$$z(t) \cdot dt = P(t \leq \tau < t + dt | \tau \geq t) \quad (7.21)$$

Dakle:

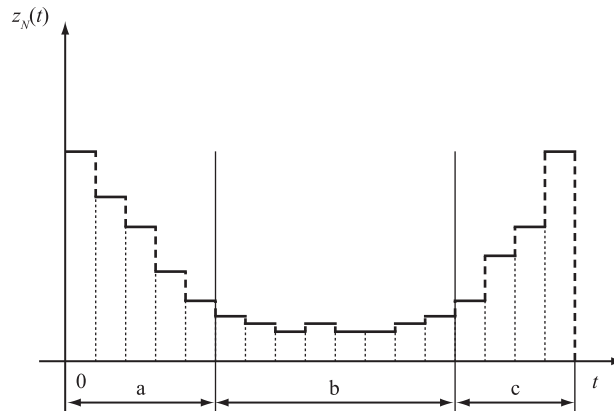
$$z(t) \cdot dt = \frac{R_p(t) - R_p(t + dt)}{R_p(t)} dt = \frac{-R_p'(t)}{R_p(t)} dt = \frac{q(t)}{R_p(t)} dt \quad (7.22)$$

Time je, ranije definirana funkcija učestalosti kvara, izražena preko funkcija $q(t)$ i $R_p(t)$:

$$z(t) = \frac{q(t)}{R_p(t)} \quad (7.23)$$

Također vrijedi da produkt $z(t) \cdot \Delta t$ predstavlja relativnu brzinu opadanja funkcije pouzdanosti u nekom promatranom trenutku t .

Brojna istraživanja pokazuju da za mnoge komponente funkcija $z_N(t)$ ima karakterističan oblik prikazan na slici 7.6. [8] te se nameće podjela vremenske osi u tri dijela. Prvi dio (područje *a*) karakteriziraju tzv. početni kvarovi, drugi je dio (područje *b*) razdoblje normalnog vijeka trajanja komponente, a treći je dio (područje *c*) razdoblje pojave kvarova uslijed istrošenosti odnosno dotrajalosti.



Slika 7.6. Empirijska funkcija učestalosti kvara $z_N(t)$

Definiranje odnosno crtanje funkcije učestalosti kvara, prikazane slikom 7.6., temelji se na iskustvenim podacima (pokusima ili statistikama o kvarovima sličnih komponenata). Iskustveni su podaci dostupni kao diskretne vrijednosti te je nužno, temeljem istih, izabrati kontinuiranu funkciju koja će zadovoljavati dobivene podatke. Budući da su podaci o kvarovima već dostupni navedeno se može činiti suvišnim. Riječ je, međutim, o mogućnosti zaključivanja o ponašanju sličnih komponenti (npr. motora) na osnovi podataka iz pokusa ili iz statistika, jer nisu raspoložive stvarne krivulje učestalosti kvarova već samo ograničen niz podataka o diskretnim vremenima zbivanja kvarova iz kojih se može aproksimirati kontinuirana funkcija.

Upravo se u navedenom ogleda glavni smisao matematičkog modeliranja sustava iskustvenih činjenica.

Prilikom prvog stavljanja u rad komponenata uočavaju se, kako je prikazano i slikom 7.6., veće vrijednosti učestalosti kvara od onih u razdoblju normalnog rada. Razlog su početni kvarovi komponenti (npr. pogreške u proizvodnji). Model kvara koji dobro opisuje ponašanja u području a je linearna silazna funkcija:

$$z(t) = A_0 - A_1 t \quad (7.24)$$

Integriranjem diferencijalne jednadžbe:

$$z(t)dt = -\frac{dR_p(t)}{R_p(t)} \quad (7.25)$$

dobije se:

$$\ln R_p(t) = -\int_0^t z(t)dt \quad (7.26)$$

pa se u promatranom slučaju lako dobije pouzdanost $R_p(t)$ u obliku:

$$R_p(t) = e^{-(A_0 t - A_1 t^2 / 2)} \quad (7.27)$$

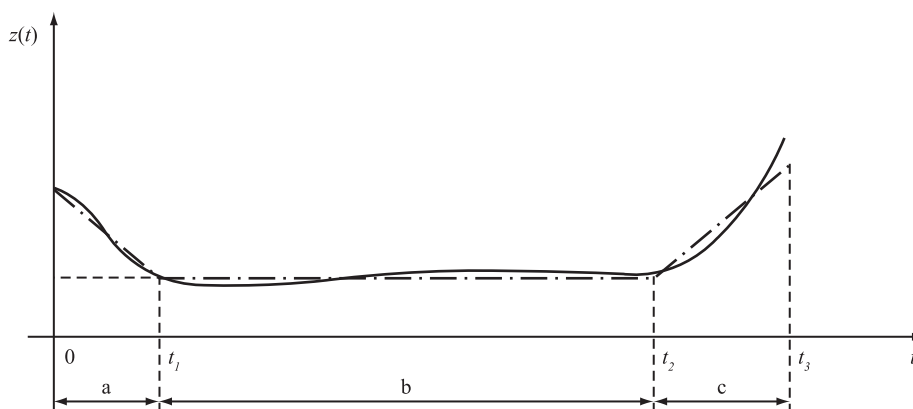
Područje normalnog vijeka trajanja komponente (područje b) je moguće aproksimirati konstantnom učestalošću kvara (slučajni kvarovi).

$$z(t) = \lambda = konst. \quad (7.28)$$

Pri starenju ili istrošenosti komponenti (područje c) vrijednost učestalosti kvara rast će s vremenom. Najjednostavniji model kvara je moguće tada prikazati s linearnom uzlaznom funkcijom:

$$z(t) = A \cdot t + B \quad (7.29)$$

Aproksimacija funkcije učestalosti kvara $z(t)$ prikazana je na slici 7.7

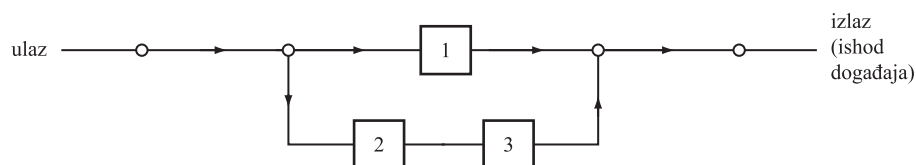
Slika 7.7. Aproksimacija funkcije učestalosti kvara $z(t)$

7.5.2. Analiza pouzdanosti i kvara sustava s neovisnim, nepopravljivim i nezamjenjivim komponentama

Analiza predviđanja pouzdanosti i rizika nekog sustava, npr. EMP-a u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom, se danas provodi u tri koraka. Prvi je korak analiza komponenti sustava što je prikazano u prethodnom poglavlju ovog rada (vjerojatnost kvara komponente sustava). Drugi se korak bavi „analizom pouzdanosti“ polazeći od poznate građe sustava i poznatih pouzdanosti odnosno nepouzdanosti komponenti. Treći korak donosi interpretaciju rezultata dobivenih analizom.

U okviru ovog rada promatran je sustav EMP-a u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom kojeg čine, kako je ranije opisano, 3 komponente. Spomenuti sustav ima slijedeće značajke. Do pojave neželjenog događaja odnosno eksplozije dolazi samo ako se dogodi istovremena pojava eksplozivne atmosfere (kvar komponente 1) i barem jednog od djelotvornih uzročnika paljenja (ili pojave uzročnika paljenja nastalog u rotoru (kvar komponente 2) ili pojave uzročnika paljenja nastalog u statoru (kvar komponente 3). Navedeno je moguće opisati i na slijedeći način. EMP u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom će raditi na siguran način (pozitivan ishod) ako je ispravna ili komponenta 1 ili ako su istovremeno ispravne i komponenta 2 i 3.

Navedeni se sustav (nepopravljivih i nezamjenjivih komponenti) može opisati serijsko-paralelnim modelom rizika pojave kvara, prikazanim na slici 7.8



Slika 7.8. Serijsko - paralelni model rizika pojave kvara EMP-a u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom

Za serijsku kombinaciju komponenata 2 i 3 (nužni je uvjet ispravan rad obiju komponenti - stanje bez kvara) kako bi ishod događaja bio pozitivan (ne dolazi do pojave

eksplozije) i to bez obzira na stanje komponente 1 (u kvaru ili ne). Ako se sa x_i označi uspješan rad i -te komponente a sa $\overline{x_i}$ kvar i -te komponente tada će vjerojatnost da će komponenta uspješno raditi biti njena pouzdanost $P(x_i)$ dok će vjerojatnost nastanka kvara te komponente biti njezina nepouzdanost $P(\overline{x_i})$. Vjerojatnost pouzdanog rada ovog serijskog sustava označena je sa $R_{ps}(t)$, dok će vjerojatnost nastanka kvara biti jednaka $Q_s = 1 - R_{ps}(t)$. Budući da serijski model pouzdanosti zahtijeva ispravan rad svih komponenti (bez kvara) sustava da bi i sustav uspješno radio, to će događaj koji predstavlja uspješan rad sustava (nema eksplozije) biti presjek događaja $x_1, x_2, \dots, x_n$. Za vjerojatnost tog uspješnog događaja može se pisati:

$$R_{ps}(t) = P(x_1 x_2 x_3 \dots x_n) \quad (7.30)$$

Naime, uspješan rad sustava s serijskim modelom pouzdanosti slučajni je događaja i uspješan je samo uz istodobni rad svih komponenata. Razvijanjem izraza (7.30) dobije se:

$$R_{ps}(t) = P(x_1)P(x_2 / x_1)P(x_3 / x_1 x_2) \dots P(x_n / x_1 x_2 \dots x_{n-1}) \quad (7.31)$$

Jednadžba (7.31) sadrži uvjetne vjerojatnosti (međusobno djelovanje komponenti).

Za slučaj da kvarovi komponenata nemaju međusobnog djelovanja (što se, u okviru ovog rada, pretpostavlja za kvarove rotora i statora) može se pisati:

$$R_{ps}(t) = P(x_1)P(x_2)P(x_3) \dots P(x_n) \quad (7.32)$$

Analizu je sustava moguće provesti i preko računanja vjerojatnosti kvara. Kako će do kvara sustava serijskog sustava doći ako se bilo koja komponenta pokvari, kvar će sustava biti unija događaja $\overline{x_1}, \overline{x_2}, \dots, \overline{x_n}$, odnosno:

$$Q_s(t) = P(\overline{x_1} + \overline{x_2} + \overline{x_3} + \dots \overline{x_n}) \quad (7.33)$$

Uz korištenje poznate Sylvesterove formule za razvoj desne strane gornje jednadžbe dobije se:

$$Q_s(t) = \sum_i P(\overline{x_i}) - \sum_i \sum_j P(\overline{x_i} \cdot \overline{x_j}) + \sum_i \sum_j \sum_k P(\overline{x_i} \cdot \overline{x_j} \cdot \overline{x_k}) - \dots \pm \dots P(\overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \dots \overline{x_n}) \quad (7.34)$$

Za slučaj da kvarovi komponenata nemaju međusobnog djelovanja (što se, u okviru ovog rada, pretpostavlja za kvarove rotora i statora), te uz pretpostavku da su vjerojatnosti nastanka kvara komponenti (rotora i statora) male, sumandi oblika:

$$P(\overline{x_i} \cdot \overline{x_j}) = P(\overline{x_i}) \cdot P(\overline{x_j} | \overline{x_i}) = P(\overline{x_i}) \cdot P(\overline{x_j}) \quad (7.35)$$

zanemarivo su mali u usporedbi sa svakim od faktora $P(\overline{x_i}), P(\overline{x_j})$, pa se u tom slučaju može pisati:

$$Q_s(t) = P(\overline{x_1}) + P(\overline{x_2}) + P(\overline{x_3}) + \dots P(\overline{x_n}) \quad (7.36)$$

Za paralelnu kombinaciju sustav će biti u kvaru budu li u kvaru svih njegovih n komponenata što u odabranom slučaju znači da u kvaru mora biti i komponenta 1 (pojava eksplozivne atmosfere) i u kvaru mora biti serijska kombinacija komponenata 2 i 3 (što znači da je u kvaru barem jedna od njih). Ako se sa y_i označi uspješan rad i -te komponente, onda se navedeno može, za sustave s neovisnim i nepopravljivim komponentama, općenito zapisati na slijedeći način:

$$Q_p(t) = P(\overline{y_1 y_2 \dots y_n}) \quad (7.37)$$

te za slučaj da kvarovi komponenti nemaju međusobnog djelovanja (što se pretpostavlja za kvarove rotora i statora u odnosu na kvar pojave eksplozivne atmosfere) može se općenito pisati:

$$Q_p(t) = P(\overline{y_1})P(\overline{y_2})\dots P(\overline{y_n}) \quad (7.38)$$

Konačno, za vjerojatnost nastanka kvara sustava opisanog slikom 7.8, uz uvažavanje ranije navedenih pretpostavki, može se pisati:

$$Q(t) = P(\overline{x_1})[P(\overline{x_2}) + P(\overline{x_3})] \quad (7.39)$$

gdje je:

$P(\overline{x_1})$ - vjerojatnost nastanka kvara komponente 1 (pojava eksplozivne atmosfere),

$P(\overline{x_2})$ - vjerojatnost nastanka kvara komponente 2 (kvar rotora) i

$P(\overline{x_3})$ - vjerojatnost nastanka kvara komponente 3 (kvar statora).

Izraz (7.39) predstavlja konačni izraz za rizik nastanka eksplozije kod primjene EMP-a u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom prema scenariju opisanom i obrađenom u ovom radu. Posebna je važnost ovog izraza i svih prethodnih u ovom poglavlju rada, što su isti općeniti, izvedeni na uspostavljenom modelu, i kao takvi primjenjivi i na ostale scenarije i konfiguracije sustava EMP-a.

Ovaj poopćeni matematički model naravno potvrđuje i ranije navedene izraze (7.3), (7.4) i (7.7) koji su, tamo, bili prikazani bez posebnog obrazloženja, ograničenja i dokaza.

Uvažavajući sve navedeno, izraz za rizik primjene EMP-a u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom može se, uvažavajući oznake iz izraza (7.4), prikazati na slijedeći način:

$$R_i = P_{exati} \cdot P_{exupi} \cdot S_i \cdot F_{SFi} = P_{exati} \cdot (P_{exupri} + P_{exupsi}) \cdot S_i \cdot F_{SFi} \quad (7.40)$$

Uzimajući nadalje u obzir ranije navedenu pretpostavku da se razmjeri posljedica neželjenog događaja S_i ne razmatraju u okviru ovog rada (odnosno smatraju se fatalnim), u

matematičkom smislu S_i poprima vrijednost 1. Sigurnosni sustavi F_{SFi} koji bi npr. prepoznali „skriven“ kvarove kaveza rotora i djelovali da isti ne postanu djelotvorni uzročnici paljenja, se u današnjim realnim elektromotornim pogonima ne primjenjuju budući da nisu zahtijevani tradicionalnom koncepcijom protueksplozijske zaštite.

Matematički gledano, navedeno se može opisati na način da je sigurnosni sustav trajno u kvaru, odnosno F_{SFi} također poprima vrijednost 1.

Uvažavajući sve navedeno konačni izraz za rizik primjena EMP-a u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom prema opisanom scenariju može se prikazati na slijedeći način:

$$R_i = P_{exati} \cdot P_{exupi} = P_{exati} \cdot (P_{exupri} + P_{exupsi}) \quad (7.41)$$

7.6. Procjena rizika primjene EMP-a u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom

7.6.1. Dijagnostičke metode i detektiranje stanja kvara

Sve do sada navedeno o procjeni rizika primjene EMP-a u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom jasno pokazuje da je procjena vjerojatnosti nastanka kvara motora (P_{exup}) od posebne važnosti.

Primjena dijagnostičkih ispitivanja važan je alat za otkrivanje kvarova čijom je statističkom obradom moguće odrediti vjerojatnost njihovog nastanka. Od posebne je važnosti i dijagnosticiranje stanja motora koja prethode kvarovima. U takva stanja „predkvara“ se mogu ubrojiti npr. povećanje otpora spoja štap-prsten, pad otpora izolacije namota statora i sl. Iako se ne smatraju djelotvornim uzročnicima paljenja, stanja „predkvara“ su od presudne važnosti u predviđanjima ponašanja i procjeni rizika primjene EMP-a u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom.

Pravovremenim dijagnosticiranjem i praćenjem stanja „predkvara“ moguće je također spriječiti pojavu kvarova koji su djelotvorni uzročnici paljenja, što je od presudne važnosti na smanjenje rizika i sigurnost.

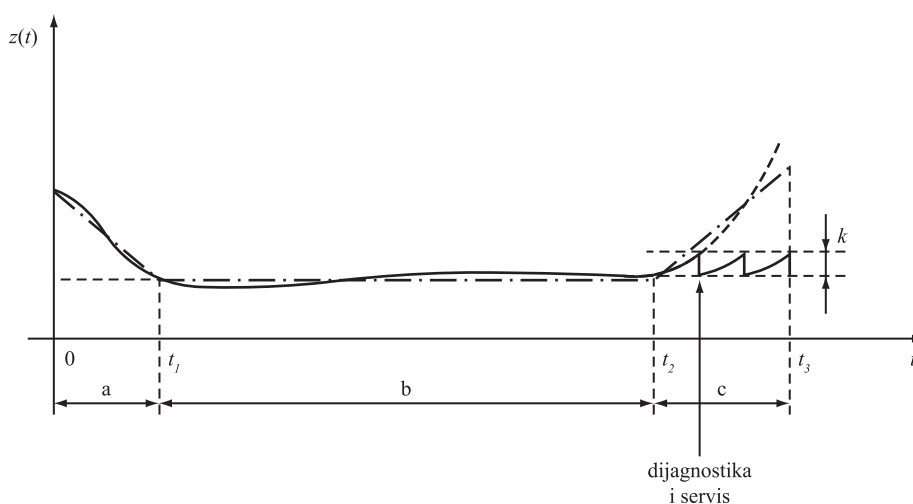
Kao posebno prikladne za dijagnosticiranje stanja kaveza rotora i izolacijskog sustava namota statora, ovim su radom analizirane, i u poglavlju 5 detaljno opisane, dijagnostičke metode prikazane tablicom 7.6.

Tablica 7.6. Odabir dijagnostičkih metoda za utvrđivanje stanja elektromotora

Dijagnostička metoda	Vrsta metode
Analiza spektra linijske struje namota statora	ON-LINE
Mjerenje vodljivosti štapova i prstena	OFF-LINE
Analiza odziva na udarni napon	OFF-LINE

Ovim radom prikazana metoda procjene rizika primjene EMP-a u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom se oslanja na vjerojatnosnu analizu pojave eksplozivne atmosfere i djelotvornog uzročnika paljenja. Dijagnostička su ispitivanja važan alat prikupljanja podataka za izračun i ocjenu vjerojatnosti nastanka kvarova motora odnosno djelotvornih uzročnik paljenja unutar EMP-a.

Pravovremeno je otkrivanje „predkvarova“ i kvarova posebno važno i s naslova smanjivanja učestalosti kvara u području starenja ili istrošenosti motora. Naime, kako je prikazano na slici 7.7., funkcija učestalosti kvara $z(t)$ pokazuje da je učestalost kvarova u području c , uslijed istrošenosti komponente, rastuća vremenom. Primjenom periodičkih dijagnostičkih ispitivanja je moguće potencijalne kvarove motora na vrijeme predvidjeti i po potrebi provesti servisne aktivnosti te time izbjeći nastanak kvarova. Na taj je način moguće djelovati na učestalost kvarova, odnosno funkciju je učestalosti kvara $z(t)$ moguće prikazati slikom 7.9.



Slika 7.9. Funkcija učestalosti kvara $z(t)$ u EMP-u u kojemu se provode periodička dijagnostička ispitivanja i servisne aktivnosti

Iz slike 7.9. je vidljivo da linearno ili eksponencijalno rastuća funkcija učestalost kvara u području c , može biti aproksimirana konstantnom srednjom vrijednošću koja je unutar intervala „ k “. Navedeno je bitno s dva aspekta.

Prvo, na taj je način smanjenja učestalost kvarova u vremenu starenja odnosno istrošenosti motora čime je smanjen rizik pojave uzročnika paljenja odnosno eksplozije.

Drugo, postizanje (s dovoljnom točnošću) konstantne učestalosti kvara $z(t) = \lambda = \text{konst.}$ u području normalnog vijeka trajanja (područje b) i u području starenja (područje c) omogućava primjenu jednostavnog, jednoparametarskog, neovisnog o vremenu, konstantnog modela kvara. Time je kvarove moguće promatrati kao slučajne i primijeniti teoriju vjerojatnosti. Navedeno, nadalje, omogućava primjenu, u praksi često jedino dostupnih, podataka o srednjoj učestalosti pojave kvarova u nekom vremenskom razdoblju (npr. 10

kvarova na 100 motora u 5 godina), odnosno podataka za koje nije poznata funkcija pojavnosti kvarova u promatranom vremenu. Opisano je primijenjeno u ovom radu.

Područje *a* odnosno područje početnih kvarova nije značajno s naslova procjene rizika budući se motori temeljito ispituju nakon proizvodnje čime se eliminira veliki broj početnih kvarova.

7.6.2. Odabrani neželjeni scenarij i procjena rizika

U ovom dijelu rada, u tablici 7.7, prikazani su konačni rezultati provedene procjene rizika primjene EMP-a u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom, a temeljeno na ranije opisanom fizikalno-matematičkom modelu te na ranije određenim vjerojatnostima nastanka eksplozivne atmosfere, pojave kvara kaveza rotora i namota statora. Spomenute su vjerojatnosti dijelom određene deterministički dok se dijelom temelje na statističkim podacima i teoriji vjerojatnosti. Vjerojatnosti nastanka kvara prikazane su u tablicama 7.3, 7.4 i 7.5. Kvalitativna je ocjena dana temeljem tablice 3.14.

Tablica 7.7. Rezultati provedene procjene rizika za odabrani neželjeni scenarij

Trajanje eksplozivne atmosfere, h/god	Vjerojatnost pojave eksplozivne atmosfere (P_{exat})	Vjerojatnost pojave uzročnika paljenja rotora (P_{exupr})	Vjerojatnost pojave uzročnika paljenja statora (P_{exups})	Kvantitativna ocjena rizika $R = P_{\text{exat}} \cdot (P_{\text{exupr}} + P_{\text{exups}})$	Kvalitativna ocjena rizika
sigurnosni ventil (zona 1): 6,24	$7,1 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	Neprihvatljiv
prirubnica (zona 2): 0,22	$2,5 \cdot 10^{-5}$			$9,0 \cdot 10^{-7}$	Podnošljiv

Za konkretno odabrani scenarij i za pretpostavljene vjerojatnosti pojave eksplozivne atmosfere i nastanka kvarova rotora i statora provedena analiza rizika daje zaključak da je rizik primjene predmetnog elektromotora (odnosno EMP-a) u zoni opasnosti 2 ovog tehnološkog postrojenja podnošljiv i nije nužno poduzimati mjere za njegovo smanjivanje, no obzirom na njegov iznos preporuča se provesti dijagnostička ispitivanja kaveza rotora i namota statora (tijekom prvog remonta) kako bi se potvrdilo da kvarovi rotora i statora, kao uzročnici paljenja, nisu prisutni u ovom motoru. Rizik primjene predmetnog elektromotora u zoni opasnosti 1 je neprihvatljiv te je nužno poduzeti mjere za njegovo smanjenje odnosno nužno je odmah provesti dijagnostička ispitivanja kaveza rotora i namota statora kako bi se potvrdilo da kvarovi rotora i statora nisu prisutni u ovom motoru.

U ovom dijelu rada naglasimo da je za postrojenja u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom koja sadrže više EMP-a odnosno elektromotora, za ukupnu vjerojatnost pojave uzročnika paljenja (kvarova rotora i statora svih motora) nužno, kako bi bila uzeta u obzir vjerojatnost nastanka kvara svih motora, primijeniti serijski model komponenti (za pojavu eksplozije, u uvjetima prisutnosti eksplozivne atmosfere, dovoljan je

kvar barem jednog motora) odnosno izraz (7.34). Više elektromotora u nekom promatranom postrojenju ugroženom eksplozivnom atmosferom, dakako, povećava rizik od nastanka eksplozije.

I ovdje je u određenim uvjetima, npr. za slučaj kada nema međusobnog djelovanja komponenti i uz pretpostavku da su vjerojatnosti nastanka kvarova komponenti odnosno rotora i statora pojedinog motora male vrijednosti, te za nevelik broj motora moguće, s nužnim oprezom, primijeniti i pojednostavljeni izraz (7.36). Važno je naglasiti da ove pretpostavke vode procjenu rizika u područje njegove prihvatljivosti.

7.6.3. Zaključna procjena i ocjena rizika primjene EMP-a u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom

Prema općoj strukturi postupka procjene rizika, koja je prikazana slikom 1.2, nakon identifikacije opasnosti te nakon određivanja rizika odnosno utvrđivanja vjerojatnosti njegovog nastanka i veličine neželjenih posljedica, preostaje još ocijeniti rizik i definirati postupke za upravljanjem istim.

Kako je i u uvodu rečeno, ocjena rizika je tehničko-financijski-sociološka kategorija i često ju nije moguće jednostavno i jednoznačno odrediti. U ovom je radu za ocjenu rizika primijenjen koncept [25] prema kojemu se smatra da ukupni rizik pojave eksplozije manji ili jednak 10^{-8} predstavlja prihvatljiv rizik za prostore ugrožene eksplozivnom atmosferom. Ostale razine ocjene rizika su određene iskustvenim spoznajama temeljenim na sigurnosnoj, tehničkoj i financijskoj opravdanosti. Takve, opće primjenjive, ocjene rizika primjene EMP-a u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom dane su tablicom 7.8.

Tablica 7.8. Ocjena rizika primjene EMP-a u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom za razne vrijednosti parametara ocjene P_{exat} i P_{exup}

Vjerojatnost pojave uzročnika paljenja (P_{exup})	Trajanje (t) eksplozivne atmosfere, h/ god		
	$t \leq 1$ (odgovara zoni 2)	$1 < t \leq 100$ (odgovara zoni 1)	$t > 100$ (odgovara zoni 0 gdje nije dopuštena primjena motora)
	Vjerojatnost pojave eksplozivne atmosfere (P_{exat})		
	$P_{\text{exat}} \leq 10^{-4}$	$10^{-4} < P_{\text{exat}} \leq 10^{-2}$	$10^{-2} < P_{\text{exat}} \leq 10^0$
$P_{\text{exup}} \leq 10^{-8}$	$R \leq 10^{-8}$	$R \leq 10^{-8}$	Nije primjenjivo za motore (kateg. 2 i 3)
$10^{-8} < P_{\text{exup}} \leq 10^{-6}$	$R \leq 10^{-8}$	$R \leq 10^{-8}$	Nije primjenjivo za motore (kateg. 2 i 3)
$10^{-6} < P_{\text{exup}} \leq 10^{-4}$	$R \leq 10^{-8}$	$R \leq 10^{-8}$ $10^{-8} < R \leq 10^{-6}$	Nije primjenjivo za motore (kateg. 2 i 3)
$10^{-4} < P_{\text{exup}} \leq 10^{-2}$	$10^{-8} < R \leq 10^{-6}$	$10^{-8} < R \leq 10^{-6}$ $10^{-6} < R \leq 10^{-4}$	Nije primjenjivo za motore (kateg. 2 i 3)
$10^{-2} < P_{\text{exup}} \leq 10^0$	$10^{-6} < R \leq 10^{-4}$	$10^{-6} < R \leq 10^{-4}$ $10^{-4} < R$	Nije primjenjivo za motore (kateg. 2 i 3)

Različitim razinama rizika su, prema tablici 7.8, pridijeljena i različite kvalitativne ocjene, opisane različitim bojama polja tablice. Boje imaju slijedeća značenja:

- zeleno: PR (prihvatljiv rizik),
- žuto: PO (podnošljiv rizik),
- narančasto: NPR (neprihvatljiv rizik) i
- crveno: IO (izravna opasnost).

Cilj je ovog uvođenja „kvalitativnih poruka“ o riziku rezultate provedene procjene rizika, koja je često mukotrpan i dugotrajan postupak, kako u smislu preciznog definiranja mogućih neželjenih scenarija tako i u smislu izračuna vjerojatnosti nastanka istih i sl., prikazati na jednostavan i opće razumljiv način iz koga će jasno proizaći i prijedlozi za zadnju fazu postupka procjene rizika, a to je definiranje mjera za njegova smanjenje na prihvatljivu razinu i upravljanje istim.

Ovim su radom ustrojenim, opće primjenjivim, razinama rizika primjene EMP-a u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom, te temeljem tablica 3.14 i 7.8, dodijeljene „kvalitativne poruke“ o riziku, prikazane u tablici 7.9. Jasno je da su, u skladu s temeljnim ciljem ovog rada, dijagnostičke poruke usmjerene na provođenje aktivnosti kojima se smanjuje odnosno nadzire vjerojatnost nastanka kvarova motora (P_{exup}) kao mogućih djelotvornih uzročnika paljenja. Na ukupni je rizik primjene EMP-a u ovakvim prostorima moguće djelovati i smanjenjem vjerojatnosti nastanka kvarova koji dovode do pojave eksplozivne atmosfere (P_{exat}), no navedeno nije predmet ovog rada.

Tablica 7.9. „Kvalitativne poruke“ o riziku primjene EMP-a u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom

Razina rizika	„Kvalitativna poruka“ o riziku
PR	Rizik je prihvatljiv i nije potrebno poduzimati nikakve mjere za njegovo smanjenje ili nadziranje. Nije nužno provoditi dijagnostička ispitivanja kaveza rotora niti namota statora.
PO	Rizik je podnošljiv i nije nužno poduzimati mjere za njegovo smanjenje ili nadziranje, no obzirom na njegov iznos preporuča se provesti dijagnostička ispitivanja kaveza rotora i namota statora (tijekom prvog remonta) kako bi se potvrdilo da kvarovi rotora i statora, kao uzročnici paljenja, u ovom motoru nisu prisutni.
NPR	Rizik je neprihvatljiv i nužno je poduzeti mjere za njegovo smanjenje odnosno nužno je odmah provesti dijagnostička ispitivanja kaveza rotora i namota statora kako bi se potvrdilo da kvarovi rotora i statora, kao uzročnici paljenja, u ovom motoru nisu prisutni.
IO	Razina rizika predstavlja izravnu opasnost i motor je nužno odmah isključiti iz pogona te je potrebno poduzeti mjere za svođenje rizika na prihvatljivu ili podnošljivu razinu.

„Kvalitativne poruke“ o riziku u skladu su s očekivanjima. U zoni 2 rizik rada EMP-a neće nikada predstavljati izravnu opasnost (radi male vjerojatnosti pojave eksplozivne atmosfere). U zoni 1 pojava izravne opasnosti je realno moguća.

„Kvalitativne poruke“ o riziku, prikazane u tablici 7.9, u sebi sadrže i prijedlog mjera za smanjenje rizika. No, jasno je da to nisu jedine moguće mjere.

Sve provedene analize i prikazi u ovom poglavlju za cilj su imale prikupljanje podataka i izračun vjerojatnosti nastanka eksplozivne atmosfere i uzročnika paljenja, što u konačnici omogućava kategorizaciju rizika primjene EMP-a u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom, temeljem čega je moguće definirati mjere za smanjenje i upravljanje istim.

8. ZAKLJUČAK

Elektromotorni pogoni u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom su potencijalni uzročnici paljenja te atmosfere i nastanka eksplozije. S toga se pred njih postavljaju visoki sigurnosni zahtjevi zbog kojih se može ograničiti primjena suvremenih tehničkih rješenja i dogoditi povećanje proizvodnih troškova.

Potreba za stalnim unapređivanjem postojećih metoda osiguranja protueksplozijske zaštite se zasniva na ATEX direktivama i na nastojanjima stručnih i inspekcijskih tijela da što bolje i preciznije ocijene sigurnost postrojenja ugroženih eksplozivnom atmosferom. Time se, na dalje, omogućava korisnicima takvih postrojenja da što bolje organiziraju ljudske i tehničke resurse kako bi projektiranjem, izvedbom i održavanjem navedenih postrojenja postigli što veću razinu sigurnosti uz što manje troškove.

U ovom je radu predložena jedna nova metodologija osiguranja protueksplozijske zaštite EMP-a temeljena na procjeni rizika. Primjena statističke učestalosti i teorije vjerojatnosti korišteni su kao podloga za razvijenu metodu. Ova metoda prevenciju od nastanka eksplozije temelji na prepoznavanju opasnosti pri čemu, uz primjenu propisanih ispitivanja protueksplozijske zaštite elektromotora, uvodi i dodatna suvremena dijagnostička ispitivanja, čijom je primjenom moguće otkriti i skrivena teško dostupna stanja kvara koja mogu postati djelotvorni uzročnici paljenja.

Teorijski i eksperimentalno su razmotreni mehanizmi nastanka eksplozivne atmosfere te mogućnosti pojave uzročnika paljenja unutar elektromotora, posebice kod kvarova kaveza rotora i namota statora, s posljedicama pregrijavanja i pojave električne iskre.

Proučeni su statistički podaci iz literature o učestalosti kvarova motora, posebice kaveza rotora, temeljem kojih je zaključeno da elektromotor može postati značajan potencijalni uzročnik paljenja eksplozivne atmosfere.

Ispitivanja stanja kaveza rotora su provedena primjenom dijagnostičke metode temeljene na analizi spektra linijske struje namota statora. Mjerenja su provedena, kod ispravnog kaveza rotora te za četiri namjerno izazvane razine oštećenja, primjenom računalnog programa MOTORMONITOR i odgovarajuće mjerne opreme.

Namjerno izazvana oštećenja u rotoru slična su onima koja bi se prema iskustvu mogla pojaviti u nenormalnim pogonskim stanjima. Ova suvremena „ON-LINE“ metoda dijagnostike je prepoznata kao posebno prikladna za EMP-e u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom budući da se sva mjerenja, snimanja i obrada podataka provode izvan ugroženog prostora, te nema posebnih zahtjeva na izvedbu mjerne opreme s naslova protueksplozijske zaštite.

Rezultati eksperimentalnih istraživanja pojave uzročnika paljenja uslijed kvarova kaveza rotora se mogu smatrati značajnim doprinosom ovog rada. Istraživanja djelotvornosti uzročnika paljenja, u stvarnim uvjetima prisutnosti zapaljivih medija, provedena su na protueksplozijski zaštićenom „Ex e“ elektromotoru 47 kW, 380 V. Različite razine oštećenja kaveza rotora su ispitivane u eksplozivnoj atmosferi zapaljivih plinova. Svrha istraživanja je bila odgovoriti na pitanje: *Mogu li neki kvarovi rotora biti djelotvorni uzročnici paljenja eksplozivne atmosfere?* Odgovor je da.

Najznačajniji rezultat istraživanja zagrijavanja je saznanje da se u slučaju pretpostavljenih kvarova kaveza rotora mogu pojaviti temperature koje prelaze normirane temperature paljenja nekih plinova i para u čijemu je okruženju moguć i dopušten rad ispitivanog motora. Pojava ovako visokih temperatura odnosno vrućih površina predstavlja izravan rizik od eksplozije u uvjetima nastanka kvarova bliskih onima koji su bili namjerno izazvani. Istraživane razine oštećenja nisu, ili su vrlo teško, uočljive u normalnom radu motora i nije ih moguće otkriti propisanim ispitivanjima. Sve namjerno izazvane razine oštećenja su pouzdano detektirane primjenom ranije spomenute dijagnostičke metode.

Posebno su važni rezultati utvrđivanja stvarne djelotvornosti vrućih površina kaveza rotora kao uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere, koji su dobiveni istraživanjem nastanka eksplozije, u motoru ispunjenom eksplozivnom smjesom zapaljivog plina i zraka. Utvrđen je nastanak eksplozije. Do eksplozije je došlo kod ispitivanja u kratkom spoju sa sniženim naponom, kod oštećenog kaveza rotora motora koji je radio u okruženju eksplozivne smjese acetilena i zraka, čak i uz osiguranje zahtijevane zaštite od preopterećenja za „Ex e“ motore.

Rezultatima eksperimentalnih istraživanja potvrđena je ranije postavljena hipoteza da oštećenja kaveza rotora, kroz pojavu povećanih zagrijavanja odnosno vrućih površina, mogu postati djelotvorni uzročnici paljenja eksplozivne atmosfere, odnosno da predstavljaju izravan rizik od nastanka eksplozije i svih pratećih neželjenih posljedica.

Temeljena na rezultatima dijagnostičkih ispitivanja stanja motora, statističkoj učestalosti pojave kvarova i teoriji vjerojatnosti ovim je radom ustrojena nova metoda procjene rizika primjene EMP-a u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom.

Osmišljen je model analize rizika primjene EMP-a u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom, koji se oslanja na teoriju vjerojatnosti kvara komponenti sustava analizirajuću funkciju razdiobe kvara $Q(t)$ i funkciju učestalosti kvara $z(t)$.

Za analizu rizika sustava, elektromotor u postrojenju u kojemu je prisutan zapaljivi medij, primijenjen je serijsko-paralelni model s neovisnim i nepopravljivim komponentama, pri čemu je dobiven konačni pojednostavljeni izraz za rizik u obliku $R = P_{\text{exat}} \cdot (P_{\text{exupr}} + P_{\text{exups}})$, gdje je P_{exat} vjerojatnost pojave eksplozivne atmosfere, P_{exupr} vjerojatnost nastanka kvara kaveza rotora i P_{exups} vjerojatnost nastanka kvara statora.

Provedena je ocjena dobivenih rezultata procjene rizika odnosno uvedena je poopćena kategorizacija rizika u četiri razine (prihvatljiv, podnošljiv, neprihvatljiv i izravna opasnost). Svako je kvantitativno određenoj razini rizika pridjeljena i „kvalitativna poruka“ o riziku uvažavajući, koliko je to bilo moguće, tehničko-financijski-sociološke kriterije. Praktična

primjena ove metode i prikaz rezultata ilustrirani su na realnom primjeru EMP-a u postrojenju za proizvodnju acetilena.

Temeljem tako određenih rizika predložene su mjere za nadzor i upravljanje istima. Spomenute se mjere, primarno, ogledaju u sustavnoj i periodičkoj primjeni dijagnostičkih ispitivanja.

Analize, rezultati i zaključci izvedeni u ovom radu otvaraju mogućnost poboljšanja sigurnosti i pouzdanosti rada EMP-a u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom, tijekom cijelog životnog vijeka postrojenja, uz optimiranje i smanjivanje troškova.

Uvođenje ove razvijene metode u rad stručnih ustanova, kao što je npr. Ex-Agencija Republike Hrvatske, kao i u rad Državnih inspeksijskih tijela, te njenu praktičnu primjenu se može valjano preporučiti i obrazložiti.

Kroz prijedlog uvođenja razvijene metode procjene rizika primjene EMP-a u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom, ukazuje se na niz dodatnih problema i daju sugestije i poticaji za daljnji rad u kojem bi trebalo istraživati i unaprijediti:

- Primjenu i uspoređivanje rezultata različitih dijagnostičkih metoda utvrđivanja kvarova te vrijednovanje istih. Od velikog broja dijagnostičkih metoda treba primjenjivati one koje su s aspekta protueksplozijske zaštite najsvrsishodnije.
- Potrebno je ustrojavati i analizirati baze podataka o kvarovima svih komponenti EMP-a čime bi se smanjila nepouzdanost statističkih ulaznih podataka odnosno povećala pouzdanost procjene rizika. Posebno bi koristilo prikupljanje svih podataka koji bi omogućili definiranje realne funkcije učestalosti kvarova $z(t)$.
- Rad na preciznijem određivanju kriterija prihvatljivosti rizika nastanka eksplozije jer se radi o tehničkim, financijskim i sociološkim kategorijama bez jasnih kriterija vrednovanja i/ili normiranja.
- Predloženu metodu procjene rizika je moguće, kroz rad u tehničkom odboru IEC 31, potvrditi i na međunarodnoj razini. Mogu li se rezultati ovog rada uključiti u normativne dokumente, čime bi se potaklo uvođenje dijagnostičkih metoda kao obveznih, potvrdit će interes i praktična primjena.

NAPOMENE

¹ Radi izbjegavanja nejasnoća u smislu nazivlja (terminologije) nužno je naglasiti da se pojmovi *opasnost* i *hazard* u ovom radu smatraju sinonimima. Utemeljenje navedenog se nalazi u objašnjenju [6][134] da riječ *hazard* znači *opasnost*, *smion pokušaj* i *pogibelj*. Nadalje, riječ *hazard* (također i *hasard*, *azard*, *asard*) arapskog je porijekla i izvedena je od riječi *az-zahr* što znači igru kockom. *Hazarder* je igrač na sreću, uopće čovjek koji stavlja sve na kocku. *Opasne stvari* (engl. *hazardous materials*) su stvari koje ugrožavaju zdravlje ljudi i okoliš [135]. Za izraz/pojam *rizik* (engl. *risk*) često se navodi da isti predstavlja kvantitativnu mjeru *opasnosti* [6].

² Kvalitativna razmatranja *pouzdanosti*, *sigurnosti* i *rizika* stara su gotovo koliko i ljudsko biće. Međutim, kvantitativna procjena spomenutih pojmova novija je znanstvena disciplina koji donosi (relativno) novi pristup određenju „starih“ pojmova i problema. Najvažnije pojmove iz područja analize i procjene rizika moguće je, prema [5][6][8][19][48][60], definirati na slijedeći način.

Pouzdan/pouzdanost je netko/nešto koji/što se ponaša prema našim očekivanjima. U suprotnom je nepouzdan/nepouzdanost. Rizik je potencijalna opasnost gubitka nečega što ima vrijednost (npr. zdravlja, života i materijalnih dobara). Rizik je također i šteta ili opasnost koja se, do stanovite mjere, može predvidjeti i može joj se odrediti jačina/težina. Često je primjenjivana i definicija prema kojoj je rizik kompozitna mjera vjerojatnosti pojave nekog neželjenog scenarija (slijeda niza uzajamno povezanih i/ili slučajnih neželjenih događaja koji mogu rezultirati nezgodom) i intenziteta neželjenih posljedica koje takav scenarij može uzrokovati odnosno rizik je funkcija žestine/oštine (moguća posljedica/šteta za razmatranu opasnost) i vjerojatnosti događanja štete (učestalost i vjerojatnost nastanka štetnog događaja). Nerijetke su dvojbe povezane s razlikovanjem *opasnosti* (engl. *hazard*) od *rizika* (engl. *risk*). Opasnost je potencijalni izvor štete. Opasnosti se vrednuju i rangiraju prema intenzitetu (jačini/težini) štete (zla) koje uzrokuju, no, to rangiranje ne uključuje vjerojatnost pojave opasnosti. Rizik je „potencijalna opasnost“, rizik uključuje na samo posljedice izloženosti opasnosti (npr. eksploziji) nego i vjerojatnost pojave opasnosti. *Šteta* (engl. *injury/damage*) je fizička ozljeda ili oštećenje zdravlja ili oštećenje imovine i okoliša.

Procjena rizika (engl. *risk assessment*) je niz logičnih koraka koji omogućuje, na sustavan način, prepoznavanje i procjenu opasnosti i mogućih posljedica te ocjenjuje vjerojatnost njihove pojave, odnosno procjena rizika je postupak prepoznavanja i analize opasnosti pridruženih različitim ljudskim djelatnostima te određivanje posljedica i vjerojatnosti nastanka šteta. *Identifikacija opasnosti* (engl. *hazard identification*) je sustavni postupak pronalaženja svih opasnosti koje su pridružene uređaju/sustavu (što, zašto i kako se nešto neželjeno može dogoditi). *Ocjena rizika* (engl. *risk evaluation*) je usporedba rizika s određenim kriterijima prihvatljivosti (rizik je prihvatljiv ili rizik nije prihvatljiv, te oprema i/ili zaštitni sustavi moraju biti promijenjeni s namjerom smanjenja rizika).

³ Scenarij se definira kao slijed uzajamno povezanih i/ili slučajnih neželjenih događaja koji mogu rezultirati nezgodom u postrojenju ili tehnološkom objektu.

⁴ Definiciju rizika, temeljenu na tzv. konceptu tripleta, u teoriju rizika uveli su Kaplan i Garrick [136]. U spomenutom/citiranom radu autori rizik definiraju kao omjer opasnosti i poduzetih mjera zaštite. Navedeno simbolički potkrepljuju slijedećim primjerom „Preploviti ocean predstavlja stanovitu opasnost. Međutim, odabere li se prekooceanski brod za taj pothvat tada je rizik neusporedivo niži nego ako se to pokuša ostvariti malenom drvenom brodicom“. Ovaj primjer sugerira dva bitna zaključka. Prvi, da opasnost treba tretirati kao izvor rizika, i drugi, da se rizik može po volji reducirati poduzimanjem odgovarajućih mjera zaštite. Činjenica je da se rizik ne može u potpunosti izbjeći, ali je moguće postići takve uvjete pod kojima ga se može zanemariti.

⁵ Uobičajeno se rizik, radi pojednostavljenja proračuna, prikazuje kao umnožak (produkt) vjerojatnosti zbivanja neželjenih događaja i njihovih posljedica. Primjerice pogine li godišnje 10 ljudi na naftnim platformama na kojima radi (u cijelom svijetu) 20 000 ljudi, tada pojedinačno izlaganje riziku od smrti za svakog radnika na naftnim platformama, u godini dana, iznosi 5×10^{-4} .

⁶ Za prikaz rizika vrijedi slijedeća relacija: $R = \sum pS_i \cdot cS_i^k$. Eksponent k u ovoj relaciji želi sugerirati nelinearnost rizika kao kvantitativne mjere. Ovim se parametrom pokušalo izraziti psihosocijalne implikacije koje rizik nosi sa sobom. Težnja je uvođenja ovog parametra bilo rješavanje, u teoriji rizika, poznatog problema odnosa

između visoke vjerojatnosti pojave neželjenog događaja i malih posljedica, i niske vjerojatnosti pojave neželjenog događaja i velikih posljedica. Za vrijednost eksponenta k , temeljeno na psihosociološkim istraživanjima, je bila predložena vrijednost $k = 1,2$, kojom se, međutim, nije moglo udovoljiti strogim znanstvenim kriterijima, te je ovaj pristup ubrzo napušten [6][95].

⁷ Prve spoznaje o postojanju zakonitosti i kod promatranja slučajnih događaja odnosno pojava stare su barem 7000 godina [2][3] i vezane su za igre na sreću. U grobnicama faraona nađene su „poštene“ kocke i one s namjerno pomaknutim težištem. Za početak razvoja teorije vjerojatnosti kao samostalne znanstvene discipline uzima se, ipak, 1654. godina kada je, na poticaj jednog francuskog plemića zainteresiranog za igre na sreću, započela razmjena pisama između B. Pascala (1623-1662) i P. Fermata (1601-1665). Veliki su doprinos utemeljenju ove, u to vrijeme nove, znanstvene discipline dali i nizozemski fizičar i matematičar C. Huygens (1629-1695), švicarski matematičar J. Bernoulli (1654-1705), P. S. Laplace (1749-1827), K. F. Gauss (1777-1855), S. D. Poisson (1781-1840) i drugi.

⁸ Istraživanje je provedeno na kaveznim asinkronim elektromotorima što je opisano u EPRI izvještaju „Improved Motors for Utility Applications, Industry Assessment Study“, Vol. 1, EPRI EL-2678, Vol. 1 1763-1, final report and EPRI EL-2678, Vol. 2, 1763-1, final report, October 1982. Prema [34] slična je statistika kvarova dobivena i kod ispitivanja visokonaponskih motora primijenjenih u petrokemijskoj industriji (prema O. V. Thorsen, M. Dalva, „Condition monitoring Methods, failure Identification and Analysis for High Voltage Motors in Petrochemical Industry“, Proc. 8th IEE Int. Conf. EMD, 1997, University of Cambridge, No. 444, pp 109-113).

⁹ Istraživanjem je bilo obuhvaćeno gotovo 10000 kvarova elektromotora. Istraživanje je [78] također pokazalo da je 25% kvarova dijagnosticirano kod motora snage preko 40 kW i da su troškovi njihovih popravaka iznosili oko 80% svih troškova popravaka pogona u kojima su bili instalirani.

¹⁰ J. Rautee, F. Lienesch i T. Liew u svom radu „Safety improvements of non-sparking and increased safety motors“ [85] iznose rezultate istraživanja o eksplozijama visokonaponskih protueksplozijski zaštićenih elektromotora u Velikoj Britaniji, u razdoblju od 1984. god. do 1992. god. Spomenuta istraživanja prepoznaju električne kvarove namota statora kao uzročnike paljenja. Elektromotori na kojima je dolazilo do eksplozija su korišteni za pogon kompresora plina.

S. Rumbak u svom radu „Istraživanje učinaka oštećenja kotrljajnog ležaja u eksplozivnoj atmosferi“ istražuje i pokazuje, na uzorcima ležaja SKF 6206, da kvarovi ležaja mogu postati djelotvorni uzročnici paljenja eksplozivne atmosfere.

¹¹ Slike prikazuju elektromotorne pogone u sustavu transporta nafte. Primijenjeni su u zoni opasnosti 2 s grupom plina IIA i temperaturnim razredom T3. Navedeno se odnosi na elektromotore u vrsti zaštite povećana sigurnost (Ex e) i oklapanje (Ex d). Slika elektromotora u temeljnoj vrsti zaštite nadtlak (Ex p) je snimljena u fazi ispitivanja i certifikacije elektromotora. Isti je predviđen za rad u zoni 1 ili 2 i to za grupu plina IIB i temperaturni razred T3.

¹² U okviru ovog rada pojam *tekućina* se odnosi na *kapljevinu* odnosno ovi pojmovi imaju isto značenje. Razlog je u činjenici da se u području protueksplozijske zaštite (npr. norme, Pravilnici i sl.) pod pojmom zapaljive *tekućine* podrazumijeva pojam zapaljive *kapljevine*.

¹³ Detaljnije se o teoriji ishlapljivanja, te mehanizmima stvaranja eksplozivne atmosfere zapaljivih tekućina (kapljevinu) može vidjeti npr. u [25] [147] i [148].

¹⁴ Metoda probojnog paljenja se temelji, prema HRN IEC 60079-1, na najvećem pokusnom sigurnosnom rasporu - NPSR (eng. *Maximum Experimental Safe Gap* - MESG). NPSR je najveća veličina raspore, čija je širina 25 mm, koji sprječava prijenos eksplozije u 10 pokusa pod uvjetima navedenim u HRN IEC 60079-1-1 odnosno 31/769/CDV (IEC 60079-20-1). Probojno paljenje je sposobnost eksplozivne smjese plina ili pare da plamenom eksplozije kroz uske raspore izazove paljenje eksplozivne smjese iza zaštitnih raspore, odnosno radi se o toplinskoj *energiji* plamena eksplozije sposobnog izazvati paljenje eksplozivne smjese. *Veličina raspore* je temelj ove metode za razvrstavanje plinova i para. Temperatura pri probajnom paljenju je [25] reda 2000 K i više te je prema tome znatno iznad *temperatura* paljenja svih zapaljivih plinova i para. Detalji o načinu utvrđivanja NPSR se mogu vidjeti u [25] te u HRN IEC 60079-1, HRN IEC 60079-1-1 i 31/769/CDV (IEC 60079-20-1).

¹⁵ Metoda struje paljenja se temelji, prema HRN IEC 60079-11, na najmanjoj struji paljenja - NSP (eng. *Minimum Ignition Current* - MIC). NSP je najmanja struja koja uzrokuje paljenje ispitne eksplozivne smjese, u otpornim i induktivnim strujnim krugovima, na uređaju za paljenje iskrom prema HRN IEC 60079-11. Kod električne je iskre vrlo teško eksplicitno govoriti o najmanjoj *energiji* paljenja jer je sam fizikalni mehanizam električne iskre i njen *toplinski* učinak teško definirati. Radi toga se razvrstavanju strujnih krugova i tome odgovarajućem razvrstavanju plinova i para prišlo na temelju *struje paljenja* uz određene parametre izvora i strujnog kruga na normiranom uređaju za ispitivanje prema HRN IEC 60079-11. Najmanjom strujom paljenja (NSP) smatra se [25] najmanja struja, uz istosmjerni napon 24 V i 95 mH induktiviteta u strujnom krugu koja kod 1000 okretaja elektrode na rotirajućem disku daje jedno paljenje najzapaljivije koncentracije eksplozivne smjese uz normalne atmosferske uvjete. Detalji o načinu utvrđivanja NSP se mogu vidjeti u [25][150] te u HRN IEC 60079-11 i 31/769/CDV (IEC 60079-20-1).

¹⁶ Temperatura paljenja (samozapaljenja) - TP (eng. *ignition/Auto Ignition Temperature* - AIT) se određuje prema normi HRN IEC 60079-4 odnosno prema 31/769/CDV (IEC 60079-20-1). Mjerenje se provodi u staklenoj posudi obujma 0.2 dm³, pri temperaturi okoliša (20±2) °C i pri tlaku (1013±0,02) kPa. Temperatura se mjeri termoparovima na unutarnjoj stijenci posude. Ostali detalji se mogu vidjeti u HRN IEC 60079-4 i 31/769/CDV (IEC 60079-20-1).

¹⁷ D. G. Godal i R. Ingle su proveli istraživanje djelovanja brzine strujanja pare kerozina, preko vruće površine, na temperaturu paljenja. Pokazali su da pri brzini strujanja pare od 0.3 m/s temperatura paljenja iznosi 405 °C dok pri brzini strujanja od 3,0 m/s temperatura paljenja iznosi 775 °C.

¹⁸ Prema IEC 60079-7 [139] vodiči namota moraju biti ili izolirani s najmanje dva sloja izolacije od kojih samo jedan sloj izolacije može biti lak ili lakirana okrugla žica mora udovoljiti ispitivanjima prema normama niza IEC 60317 (specifikacija posebnih tipova žice za namote). Nakon namatanja, a prije impregnacije odgovarajućim impregnacijskim sredstvom, namoti moraju biti osušeni radi otklanjanja vlage. Postupci umakanja i vakumske impregnacije se, u pravilu, smatraju prihvatljivim. Premazivanje ili prskanje ne smatra se prihvatljivom impregnacijom.

¹⁹ Sukladno zahtjevima norme IEC 60079-7 [139] stezaljke moraju biti pričvršćene na nosače bez mogućnosti samoodvrtanja, stezaljke ne smiju imati oštre rubove koji mogu oštetiti vodiče, stezaljke za vanjski priključak ne smiju biti izrađene od aluminijuma. Spojevi u električnim uređajima koji čine sastavni dio uređaja ne smiju biti izvrgnuti prekomjernim mehaničkim naprezanjima.

²⁰ Čvrsto prijanjanje u utorima se može postići [139] npr. lijevanjem aluminija pod tlakom, dodatnom ispunom utora u koje se umeću pojedini štapovi, utiskivanjem štapova ili stezanjem klinovima.

²¹ Ovo nije standardni valni oblik napona, ali se smatra da je neophodno koristiti kratko vrijeme porasta da bi se inicirao naboj s dovoljnim trajanjem i koji sadrži dovoljno energije za paljenje. Navedeno je temeljeno na rezultatima istraživanja provedenim od Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) u Njemačkoj.

²² Analiza i računanje struja u dijelovima kaveznog rotora je prikazano radovima [31][32][47] te neće biti detaljno iznošeni u ovom radu.

²³ Vareni i tvrdo lemljeni rotorski kavez su prepoznati, normom IEC 60079-7 (kako je prikazano i u prilogu C ovog rada) kao motori s najvećim faktorom rizika u smislu potencijalnog iskrenja u zračnom rasporu. Prema istom dokumentu dvopolni je motor također najkritičniji u smislu spomenutog rizika.

²⁴ Pri većim strujama kratkog spoja proces zagrijavanja je brži. S toga je mjerenje provedeno na manje mjernih mjesta odnosno s manje mjernih kanala kako bi brzina uzorkovanja bila dovoljno velika da se može pratiti promjena temperature. Brzina uzorkovanja obrnuto je proporcionalna broju korištenih kanala mjernih uređaja *HIDRA*.

²⁵ Prema radu R. B. Barthelda [118] pojava električne iskre unutar elektromotora je očekivana između štapa rotora i željezne jezgre rotorskog utora (nije očekivana kod lijevanih aluminijskih rotora). Prema spomenutom autoru napon između štapa rotora i željezne jezgre je tako mali da se može pretpostaviti da je energija iskre nedovoljna da dovede do paljenja eksplozivne atmosfere.

²⁶ Iako se izlazni valni oblik, kod suvremenih pretvarača napona i frekvencije, približava sinusnom valnom obliku isti ipak sadrži komponente koje u motoru generiraju dodatne gubitke i izravno doprinose povećanju

zagrijavanja. Tako npr. prema radu T. Lowerya i D. Petroa [109] porast temperature nazivnog opterećenja motora napajanog sinusnim naponom koji iznosi 62 K se, u uvjetima napajanja preko pretvarača napona i frekvencije, povećava na 73 K.

²⁷ Detaljne rezultate istraživanja pojavnosti kvarova u procesnim postrojenjima opisuje D. R. H. Jones, u zborniku „Failure Analysis Case Studies II“ [99]. Opsežnu analizu pojavnosti kvarova i njihovih uzroka za kemijsku industriju daje i R. K. Mobley, u knjizi „Root Cause Failure Analysis“ [100].

²⁸ J. Tixier, G. Dusserre, O. Salvi i B. Gaston u svom radu „Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants“ [72] daju popis 62 metode provedbe procjene rizika.

²⁹ Podaci prikazani za realno postrojenja za proizvodnju acetilena (J. Deškin, K. Cofek iste navode u svom radu „Drugo izdanje norme HRN EN 60079-10:2003 - Električni uređaji za eksplozivnu plinsku atmosferu - dio 10: Klasifikacija ugroženog prostora“, objavljenom 2003. god. u Biltenu agencije za prostore ugrožene eksplozivnom atmosferom).

³⁰ J. Crnković u svom radu „Ispuštanje ugljikovodika pri normalnom radu proizvodnih platformi naftnih i plinskih postrojenja“ [140] pokazuje da je kod 205397 ispitanih komponenti zabilježeno ispuštanje zapaljivog medija, značajno s naslova mogućnosti stvaranja eksplozivne atmosfere, kod njih 5303 odnosno da je ispuštanje zabilježeno kod svake 38-e komponente. Isti rad također navodi za kapacitete srednjih ispuštanja kod sigurnosnih ventila vrijednosti od $1,3 \cdot 10^{-8}$ kg/s do $8 \cdot 10^{-6}$ kg/s.

LITERATURA

- [1] D. C. Montgomery, *Introduction to Statistical Quality Control*, fourth edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2001.
- [2] D. Ugrin-Šparac, *Primjenjena teorija vjerovatnosti*, I dio, Sveučilišna naklada (02-236/1-1990, ISBN 86-329-0254-7), Zagreb, 1990.
- [3] D. Ugrin-Šparac, *Primjenjena teorija vjerovatnosti*, II dio, Sveučilišna naklada (02-237/1-1990, ISBN 86-329-0266-0), Zagreb, 1990.
- [4] Z. Šimić, *Određivanje pouzdanosti stablom kvara*, Magistarski rad, Elektrotehnički fakultet, Zagreb, 1994.
- [5] Z. Šimić, *Vjerojatnosna analiza sigurnosti pogonskih stanja nuklearne elektrane*, Doktorska disertacija, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2001.
- [6] D. Škanata, *Metoda procjene rizika za odlagalište radioaktivnog otpada*, Doktorska disertacija, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 1999.
- [7] Y. Y. Haimes, *Risk Modelling, Assessment and Management*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1998.
- [8] V. Mikuličić, Z. Šimić, *Modeli pouzdanosti, raspoloživosti i rizika u elektroenergetskom sustavu*, I dio, Kigen, Zagreb, 2008.
- [9] N. Srb, *Magnetski monitoring električnih rotacijskih strojeva*, Graphis, Zagreb, 2004.
- [10] N. Srb, *Elektromotori i elektromotorni pogoni*, Graphis, Zagreb, 2007.
- [11] N. Srb, *Servis elektromotora*, Graphis, Zagreb, 2008.
- [12] P. S. Hamer, B. M. Wood, R. L. Doughty, R. L. Gravell, R. C. Hasty, S. E. Wallace, J. P. Tsao, *Flammable vapor ignition initiated by hot rotor surfaces within an induction motor: reality or not*, Industry Applications, IEEE Volume 35, Pages 100-111, 1999.
- [13] I. Gavranić, D. Ban, D. Žarko, *Electrical Drives for Explosive Atmosphere - Motor Selection and Risk Assessment*, Proceedings of the 16th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics 1-7, The High Tatras, Slovakia, 2007.
- [14] I. Gavranić, D. Ban, D. Žarko, *Explosion Protected Electrical Drives - Risk Assessment and Technical Diagnostics*, 13th International Power Electronics and Motion Control Conference, 833-840, Poznan, Poland, 2008.
- [15] M. Kelava, I. Gavranić, J. Deškin, *Practical experience with inspection in plants at risk of explosive atmospheres*, Proceedings of the 5th Petroleum and Chemical Industry Conference Europe - Electrical and Instrumentation Applications, pp. 150-158, Weimar, 2008.

-
- [16] D. Ban, M. Cettolo, B. Miletić, *An improvement of electrical motor insulation condition testing*, Proceedings of the 10th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics 56-62, 1998.
- [17] D. Ban, T. Čorak, D. Grubić, *Automatizirano ispitivanje velikih asinkronih strojeva za termoelektrane*, V savjetovanje, Hrvatski komitet CIGRE 93-101, Zagreb, 2001.
- [18] F. Lienesch, C. Hermanowski, L. Matzkow, *Converter-fed motors for use in potentially explosive atmospheres*, 49th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference No. 49, 313-314, New Orleans, 2002. (Copyright material IEEE 0-7803-7384-7/02)
- [19] V. Mikuličić, Z. Šimić, I. Vrbanić, *Vjerojatnosna procjena tehničkih rizika*, Energija (2002) 2, str. 85-94.
- [20] I. Vuković, I. Vrbanić, Z. Šimić, V. Mikuličić, *Kvarovi sa zajedničkim uzrokom u vjerojatnosnim analizama sigurnosti tehničkih sustava*, Energija (2005) 54, str. 143-154.
- [21] A. McMillan, *Electrical installations in hazardous areas*, Butterworth Heineman, Boston, 1998.
- [22] N. Marinović, *Electrotechnology in Mining*, Elsevier, Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo, 1990.
- [23] B. Jurković, *Elektromotorni pogoni*, Školska knjiga, Zagreb, 1987.
- [24] N. Marinović, *Električni uređaji i instalacije za eksplozivnu atmosferu; priručnik za projektiranje, izradu, montažu, održavanje i popravak*, CIP, Zagreb, 1999.
- [25] N. Marinović, *Protueksplozijska zaštita za eksplozivnu atmosferu*, Etekon, Zagreb, 2005.
- [26] N. Srb, *Prediktivno ispitivanje izolacije udarnim naponom*, Elektro-stručni časopis za elektrotehniku, br. 2, str. 34-40, Zagreb, rujan/listopad 1997.
- [27] G. Bottrill, D. Cheyne, G. Vijayaraghavan, *Practical Electrical Equipment and Installations in Hazardous Areas*, Elsevier, Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo, 2005.
- [28] N. Srb, *Provjera kvalitete kaveznih rotora pri popravku i proizvodnji*, EDZ, EEDEEQ str.32-34, Zagreb, 2001.
- [29] N. Srb, *Kvarovi kaveznih rotora u pogonu*, EDZ, EEDEEQ str. 26-31, Zagreb, 2001.
- [30] M. Stegić, N. Vranković, *On-line Vibration Monitoring the Stator End-windings on Turbogenerators*, EEDEEQ str. 22-25, Zagreb, 2001.
- [31] R. Fišer, *Modeliranje in diagnostika napak v pogonih z asinhronskim motorji*, Doktorska disertacija, Fakultet za elektrotehniku, Ljubljana, 1998.
- [32] R. Wolf, D. Ban, M. Cettolo, Z. Kovačević, *Dijagnostička ispitivanja kaveza rotora asinkronog stroja*, Elektrotehnika, ELTHB 2, 34 (5), 1991.
-

-
- [33] F. Lienesch, *Testing of Converter - Fed Drives in the Type of Protection Increased Safety "e" and Special Problems*, Explosion Safety in Hazardous Areas, International Conference (Publication 469 IEE), London, 1999.
- [34] W. T. Thomson, *A Review of on-line Condition Monitoring Techniques for Three - Phase squirrel - cage Induction Motors - Past Present and Future*, IEE SDEMPED '99, Spain, Sept. 1999.
- [35] S. Nandi, H. A. Toliyat, *Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Machines - A Review*, IEEE Industry Applications Conference 1999, vol 1, pp 197-204.
- [36] D. Ban, R. Wolf, M. Cettolo, *Metode detekcije kvara kaveza rotora asinkronog motora*, Elektrotehnika vol. 34, br. 6, Zagreb, 1991.
- [37] F. Podnar, *Metoda mjerenja ekvivalentne električne vodljivosti kaveza rotora asinkronih motora i snimanje dijagrama popunjenosti utora legurom*, EEDEEQ str. 53-57, Rovinj, 1996.
- [38] D. Ban, R. Wolf, M. Cettolo, *Kompjuterizirana "ON-LINE" dijagnostika stanja rotora asinkronih motora*, IV međunarodni simpozij o novim tehnologijama, EDZ , Pula, 1993.
- [39] S. Štefanko, M. Bogut, D. Paljan, D. Krušelj, I. Kurtović, M. Momić, *Detekcija prekida kaveza rotora asinkronog motora*, Elektrotehnika br. 43, Zagreb, 2000.
- [40] M. E. H. Benbouzid, H. Nejari, *Induction Motor Faults Detection Using Advanced Spektral Analysis Technique*, University of Picardie - Jules Verne, Amiens, France, ICEM 98, vol 3.,1849-1854, 1998.
- [41] M. Stegić, *Vibracijska dijagnostika električnih strojeva*, I simpozij EEDEEQ, str. 69-77, Rovinj, 1996.
- [42] J. Galić, *Primjena udarnog napona u dijagnostici stanja rotacijskih električnih strojeva*, V savjetovanje CIGRE, str. 31-38, Cavtat, 2001.
- [43] P. J. Tavner, J. Penman, *Condition Monitoring of Electrical Machines*, Research studies press LTD, Letchworth, 1987.
- [44] R. Wolf, *Osnove električnih strojeva*, Školska knjiga, Zagreb, 1989.
- [45] Z. Lazarević, Ž. Janda, D. Petrović, S. Stojković, *The Advanced Method of Rotor Failure Detection in Large Induction Motors*, CIGRE 11-203, Paris, 2000.
- [46] A. J. Bouchard, *The Design of a Range of High Efficiency Exd(e) IICT4 AC Induction Motors*, Explosion Safety in Hazardous Areas, International Conference (Publication 469), London 1999.
- [47] I. Gavranić, *Dijagnostika protueksplozijski zaštićenih elektromotornih pogona*, Magistarski rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2002.
- [48] I. Gavranić, *Methodology of Risk Assessment in Explosive Atmosphere/Hazardous Areas*, Ex-Journal 1 (35), pp. 38-51, Ex-Agency, Zagreb, 2007.
-

-
- [49] I. Gavranić, *Posebnosti električnih instalacija i uređaja u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom*, Časopis za elektrotehničke instalacije br. 8/2006, Kigen, Zagreb, 2006.
- [50] I. Gavranić, J. Fišter, *Procjena rizika postrojenja*, zbornik VI međunarodno savjetovanje Ex 2005, str. 93-96, Dubrovnik, 2005.
- [51] I. Gavranić, *Elektromotorni pogoni starih postrojenja*, Bilten Ex-Agencije br. 1-2 (32), str. 55-63, Ex-Agencija, Zagreb, 2004.
- [52] I. Gavranić, *Dijagnostika protueksplozijski zaštićenih asinkronih elektromotora*, S-bilten br. 1-2 (30), str. 55-63, S-Komisija, Zagreb, 2002.
- [53] I. Gavranić, *Suzbijanje i ograničavanje učinaka eksplozije*, Bilten Ex-Agencije br. 1-2 (31), str. 71-74, Ex-Agencija, Zagreb, 2003.
- [54] M. Wittler, *Experience of ATEX certification of complex machinery with electrical and non-electrical ignition sources*, Proceedings of the 6th International Conference Ex 2005, pp. 145-148, Dubrovnik, 2005.
- [55] C. Henderson, *Management system for users of "Ex" protected equipment in potentially explosive atmospheres to comply with ATEX 137*, Proceedings of the 6th International Conference Ex 2005, pp. 125-128, Dubrovnik, 2005.
- [56] S. Rumbak, *An approach to the quantitative assessment of risk*, Ex-Journal 1 (34), pp. 58-76, Ex-Agency, Zagreb, 2006.
- [57] S. Rumbak, S. Bratko, *Dijagnostička ispitivanja u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom*, Bilten Ex-Agencije br. 1(35), str. 80-88, Ex-Agencija, Zagreb, 2007.
- [58] S. Rumbak, *Risk assessment procedure in areas of explosive atmospheres*, Ex-Journal 1 (35), pp. 61-69, Ex-Agency, Zagreb, 2007.
- [59] E. Querol, J. G. Torrent, D. Bennett, J. Gummer, J. P. Fritze, *Ignition test for electrical and mechanical equipment subjected to hot surfaces*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 19 (639-644), 2006.
- [60] R. L. Rogers, *EU Project No: SMT4-CT97-2169 (Methodology for Risk Assessment of Unit Operations and Equipment for Use in Potentially Explosive Atmospheres*, Co-ordinator Dr. R. L. Rogers, Inburex GmbH, Hamm, 2000.
- [61] I. Boldea, S. A. Nasar, *Electric Drives*, Taylor & Francis, 2006.
- [62] I. Boldea, S. A. Nasar, *The Induction Machine Handbook*, CRC Press, New York, 2002.
- [63] *Directive 94/9/EC of the European Parliament and the Council (ATEX 95)*, 1994.
- [64] *Directive 1999/92/EC of the European Parliament and the Council (ATEX 137)*, 1999.
- [65] *Explosive atmospheres, Explosion prevention and protection - Part 1: Basic concepts and methodology*, EN 1127-1.
-

-
- [66] *Safety devices required for the safe functioning of equipment with respect to explosion risks*, prEN 50495, October, 2008.
- [67] *Functional safety of electrical /electronic/ programmable electronic safety-related systems*, all parts, EN 61508, 2001.
- [68] R. Wilcox, M. Burrows, S. Ghosh, B. M. Ayyub, *Risk-based Technology Methodology for the Safety Assessment Compressed Natural Gas Fuel Systems*, ICMES/SNAME, New York, 2000.
- [69] C. Petitfrere, C. Proust, *Analysis of ignition risk on mechanical equipment in ATEX*, Proceedings of the 4th Petroleum and Chemical Industry Conference Europe - Electrical and Instrumentation Applications, pp. 147-155, Paris, 2007.
- [70] Motormonitor - operating manual, ENTEK, Ohio, 1992.
- [71] P.A. Munns, Y. Loung, P.J.Rew, *Fire risk assessment for workplaces containing flammable substances*, Research report 040, W. S. Atkins Consultants limited for the Health and Safety Executive, Surrey, 2002.
- [72] J. Tixier, G. Dusserre, O. Salvi, D. Gaston, *Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 15 (291-303), 2002.
- [73] M. Lanphier, P.K. Sen, J. P. Nelson, *An update on surge protection of medium voltage motors: a comparison of the standards and application*, Proceedings of the 4th Petroleum and Chemical Industry Conference Europe - Electrical and Instrumentation Applications, pp. 3-10, Paris, 2007.
- [74] E. J. Thornton, J. K. Armintor, *The fundamentals of AC electric induction motor design and application*, Proceedings of the twentieth international pump users symposium, 2003.
- [75] A. J. Wilday, A. M. Wray, F. Eickhoff, M. Unruh, E. Fae, S. Halama, E. Conde Lazaro, P. Reina Perbal, *Determination of Safety Categories of Electrical Devices used in Potentially Explosive Atmospheres*, Project No: SMT4-CT98-2255, Final Report HSL/2000/01.
- [76] P. Thurnherr, G. Schwarz, *Electrical Installations in Hazardous Areas*, Proceedings of the 4th Petroleum and Chemical Industry Conference Europe - Electrical and Instrumentation Applications, pp. 11-15, Paris, 2007.
- [77] A. Hildebrandt, *Calculating the "Probability of Failure on Demand" (PFD) of complex structures by means of Markov Models*, Proceedings of the 4th Petroleum and Chemical Industry Conference Europe - Electrical and Instrumentation Applications, pp. 109-113, Paris, 2007.
- [78] L. Szentirmail, T. Szarka, *Electrical Drives Improvement for Industry Application*, Proceedings of the 16th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics 1-6, The High Tatras, Slovakia, 2007.
- [79] J. Arellano-Padilla, M. Sumner, C. Gerada, *Condition Monitoring for Mechanical Faults in Fully Integrated Servo Drive Systems*, 13th International Power Electronics and Motion Control Conference, 784-790, Poznan, Poland, 2008.
-

-
- [80] P. Kolodziejek, E. Bogalecka, *Broken Rotor Bar Impact on the Closed Loop and Sensorless Control of Induction Machine*, 13th International Power Electronics and Motion Control Conference, 819-824, Poznan, Poland, 2008.
- [81] A. Mahyob, M. Y. Elmoctar, P. Reghem, G. Barakat, *Coupled Magnetic Circuit Method and Network Method Modelling of Stator Faults in Induction Machines*, 13th International Power Electronics and Motion Control Conference, 825-832, Poznan, Poland, 2008.
- [82] P. Pieters, J. Riikonen, *Case study: To eliminate major root causes of failures with Variable Speed Drive System (VSDS)*, Proceedings of the 5th Petroleum and Chemical Industry Conference Europe - Electrical and Instrumentation Applications, pp. 17-23, Weimar, 2008.
- [83] V. Rodolfo, A. Scaburri, *Proper Maintenance for Electrical Plants in Hazardous Areas with Potentially Explosive Atmosphere*, Proceedings of the 5th Petroleum and Chemical Industry Conference Europe - Electrical and Instrumentation Applications, pp. 77-81, Weimar, 2008.
- [84] B. Bouman, E. Morskieft, E. Haar, P. Pieters, *SIL Classification for Intelligent Motor Control Systems in Accordance with the ATEX Directive*, Proceedings of the 5th Petroleum and Chemical Industry Conference Europe - Electrical and Instrumentation Applications, pp. 144-149, Weimar, 2008.
- [85] J. Rautee, F. Lienesch, T. Liew, *Safety improvements of non-sparking and increased safety motors*, Proceedings of the 5th Petroleum and Chemical Industry Conference Europe - Electrical and Instrumentation Applications, pp. 179-187, Weimar, 2008.
- [86] I. Gavranić, *Primjena elektromotora u eksplozivnoj atmosferi - eksperimentalna istraživanja rizika paljenja*, Sigurnost, vol. 51(3), pp. 207-214, ZIRS, Zagreb, 2009.
- [87] *Report on an investigation by UK manufacturers of large electrical machines into problems of electrical motors of type "Ex e" and "Ex n" operating in potentially explosive atmospheres*, Rotating Electrical Machines Association, London, 1990.
- [88] Norme niza IEC 60034 - Rotating electrical machines (svi dijelovi), IEC.
- [89] *A Guide to Risk Based Assessments of Large "Ex e" and "Ex n" High Voltage Machines*, Publication No. 181, Engineering Equipment and Materials Users Association (EEMUA), London, 1995.
- [90] *Inženjerski priručnik* (grupa autora), Školska knjiga, Zagreb, 1996.
- [91] A. Miletić, M. Cettolo, *Frequency Converter Influence on Induction Motor Rotor Faults Detection Using Motor Current Signature Analysis - Experimental Research*, Proceedings of the 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED 03), Atlanta, GA, USA, 24-26, 2003.
- [92] W. J. Decoursey, *Statistics and Probability for Engineering Application - with Microsoft Excel*, Elsevier Science, ISBN: 0-7506-7618-3, 416 p, Boston, 2003.
- [93] K. Fukunaga, *Introduction to Statistical Pattern Recognition*, Computer Science and Scientific Computing, CA: Morgan Kaufmann, ISBN: 0-12-269851-7, 616 p, San Francisco, Tokyo, London, 1990.
-

-
- [94] H. C. Foley, *An Introduction to Chemical Engineering Analysis Using Mathematica*, Academic Press, ISBN: 0-12-261912-9, 531 p, San Diego, London, Tokyo, 2002.
- [95] R. R. Fullwood, *Probabilistic Safety Assessment in the Chemical and Nuclear Industries*, Butterworth Heinemann, ISBN: 0-7506-7208-0, 545 p, Boston, Melbourne, 1999.
- [96] J. Bird, *Engineering Mathematics*, Newnes, ISBN: 0-7506-5776-6, 543 p, Oxford, Amsterdam, Sidney, 2003.
- [97] H. P. Bloch, F. K. Geitner, *Machinery Component Maintenance and Repair*, Gulf Publishing Company, ISBN: 0-87201-781-8, 614 p, Houston, 1990.
- [98] H. P. Bloch, *Improving Machinery Reliability*, Gulf Publishing Company, ISBN: 0-88415-661-3, 710 p, Boston, 1998.
- [99] D. R. H. Jones, *Failure Analysis Case Studies II*, Pergamon Press, ISBN: 0-08-043959-4, 462 p, Oxford, 2001.
- [100] R. K. Mobley, *Root Cause Failure Analysis*, Newnes, Butterworth Heinemann, ISBN: 0-7506-7158-0, 325 p, Boston, 1999.
- [101] R. K. Mobley, *An Introduction to Predictive Maintenance*, Butterworth Heinemann, ISBN: 0-7506-7531-4, 459 p, Boston, 2002.
- [102] J. S. Oakland, *Statistical Process Control*, Butterworth Heinemann, ISBN: 0-7506-5766-9, 460 p, Oxford, 2003.
- [103] D. J. Smith, *Reliability, Maintainability and Risk - Practical Methods for Engineers*, Butterworth Heinemann, ISBN: 0-7506-5168-7, 348 p, Oxford, 2001.
- [104] T. Mol, *Productive Safety Management*, Butterworth Heinemann, ISBN: 0-7506-5922-X, 435 p, Oxford, 2003.
- [105] D. F. Cooper, S. Grey, G. Raymond, P. Walker, *Project Risk Management Guidelines*, John Wiley & Sons, ISBN: 0-470-02281-7, 401 p, Chichester, 2005.
- [106] R. Ferdous, F.I. Khan, B. Veitch, P. R. Amyotte, *Methodology for computer - aided Fault Tree Analysis*, Trans IChemE, Process Safety and Environmental Protection 85(B1), pp. 70-80, 2007.
- [107] R. Pula, F.I. Khan, B. Veitch, P. R. Amyotte, *A Grid Based Approach for Fire and Explosion Consequence Analysis*, Trans IChemE, Process Safety and Environmental Protection 84(B2), pp. 79-91, 2006.
- [108] F. I. Khan, B. Veitch, P. R. Amyotte, *Evaluation of Inherent Safety Potential in Offshore Oil and Gas Activities*, Proceedings of 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 9 p, Vancouver, 2004.
- [109] T. Lowery, D. Petro, *Application Considerations for PWM Inverter Fed Low Voltage Induction Motors*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 30, No 2, March/April 1994.
-

-
- [110] G. Jung, *Functional safety the product of quantity and quality*, Proceedings of the 3th Petroleum and Chemical Industry Conference Europe - Electrical and Instrumentation Applications, pp. 131-134, Amsterdam, 2006.
- [111] R. Ouendag, B. de Wit, H. van den Doel, C. Sprengers, *Maintenance of Electrical Installations with Focus on Motors According to ATEX Directive 137*, Proceedings of the 3th Petroleum and Chemical Industry Conference Europe - Electrical and Instrumentation Applications, pp. 23-28, Amsterdam, 2008.
- [112] V. Hirsch, *Extending the test interval of protection/safety equipment with improved diagnostics*, Proceedings of the 3th Petroleum and Chemical Industry Conference Europe - Electrical and Instrumentation Applications, pp. 135-139, Amsterdam, 2006.
- [113] P. Reupke, J. P. Zeeuwen, *Area Classification as a tool for risk assessment*, Chilworth Technology, 13th Symposium at UMIST, p 11, Manchester, 1997.
- [114] *An introduction to Functional Safety and IEC 61508*, MTL Instruments Group plc. AN9025, 2002.
- [115] A. Fritsch, *Functional Safety and Explosion Protection*, Ex-Magazine, STAHL, ISSN 0176-0920 (ID-Nr. 00 006 99 77 0), pp. 33-43, Waldenburg, 2005.
- [116] M. Beyer, *On the Method of Ignition Hazard Assessment for Explosion Protected Non-Electrical Equipment*, Ex-Magazine, STAHL, ISSN 0176-0920 (ID-Nr. 00 006 99 77 0), pp. 77-84, Waldenburg, 2005.
- [117] O. Cottin, *Inspection, maintenance and repair of ATEX equipment*, Proceedings of the 4th Petroleum and Chemical Industry Conference Europe - Electrical and Instrumentation Applications, pp. 16-20, Paris, 2007.
- [118] V. T. Covello, J. Mumpower, *Risk Analysis and Risk Management: An Historical Perspective*, Risk Analysis, Vol. 5, No. 2, pp. 102-120, 1985.
- [119] C. Lehrmann, *Über ein Zulassungsverfahren für explosionsgeschützte, umrichter gespeiste Kfzglaufer der Zundschutzart „Erhöhte Sicherheit“*, Doktor-Ingenieur Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik und Informatik der Gottfried Wilhelm Leibniz, Universität Hannover, 2006.
- [120] R. H. Knight, G. R. Webster, T. Flyen, *A novel induction motor suitable for use in a potentially explosive atmosphere*, Electrical Machines and Drives, 6th International Conference (Con. Publ. No. 376), Pages 25-31, 1993.
- [121] N. Jones, *Preventable risks in Ex “n” and Ex “e” explosion protected motors*, Electrical safety in Hazardous Environment, 5th International Conference, Pages 228-232, 1994.
- [122] J. Pukite, P. Pukite, *Modelling for Reliability Analysis*, IEEE Press ISBN 0-7803-3482-5, <http://umn.edu/~puk/carms.html>, 07.02.2009.
- [123] W. M. Goble, *Control Systems Safety Evolution and Reliability*, ISBN 1-55617-636-8, www.isa.org, 07.02.2009.
-

-
- [124] F. Lienesch, *Static converter-fed electrical drives*, Ex-Magazine, STAHL, pp. 24-30, Waldenburg, 2003.
- [125] J. O. Lamell, T. Trumbo, T. F. Nestli, *Offshore platform powered with new electrical motor drive system*, IEEE PCIC Conference Record, paper No. PCIC-2005-29, Denver, 2005.
- [126] *Chemical Physics and Explosion Protection*, Reports from the Divisions, Germany, www.ptb.de/en/publikationen, 21.01.2009.
- [127] S.H. Chetwani, M.K. Sharma, M.K. Shah, *Multi-Technology NDE Approach to Motor Condition Monitoring*, www.nde2007.com, 03.01.2009.
- [128] R. G. Bartheld, *Motor Surface Temperature in Hazardous Areas*, Industry Applications, IEEE Transactions, Volume IA-14, ISSN: 0093-9994, Pages 220-222, 1978.
- [129] R. L. Haynes, F.L. Messec, *Motors for use in hazardous areas: a review of requirements and current practices*, Industry Applications, IEEE Transactions, Volume 29, Pages 32-41, 1993.
- [130] H. Greiner, *Explosion protected electric motors*, Ex-Magazine, STAHL, pp. 26-30, Waldenburg, 2007.
- [131] *European Directives - Application of the ATEX Directives to Power Drive Systems (PDS)*, CEMP, 2006., www.cemp.org, 21.01.2009.
- [132] *Pravilnik o opremi i zaštitnim sustavima namijenjenim za uporabu u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom*, "Narodne novine" Republike Hrvatske br. 123/05.
- [133] *Pravilnik o najmanjim zahtjevima sigurnosti i zaštite zdravlja radnika te tehničkom nadgledanju postrojenja, opreme, instalacija i uređaja u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom*, "Narodne novine" Republike Hrvatske br. 39/06 i 106/07.
- [134] Ž. Klaić, *Rječnik stranih riječi*, Nakladni Zavod Matice Hrvatske, Zagreb, 1990.
- [135] *Tehnički leksikon*, Leksikografski Zavod Miroslav Krleža, Zagreb, 2007.
- [136] S. Kaplan, B. J. Garrick, *On the Quantitative Definition of Risk*, Risk Analysis, Vol. 1, No. 1, pp. 11-27, 1981.
- [137] R. von Mises, *Probability, Statistics and Truth*, Dover publications, Inc., 244 p, New York, 1957.
- [138] J. M. Bernardo, A. F. M. Smith, *Bayesian Theory*, Wiley, ISBN 0-471-12104-5, 383 p, 1996..
- [139] Norme niza IEC 60079 - Explosive atmospheres (svi dijelovi), IEC.
- [140] J. Crnković, *Ispuštanja ugljikovodika pri normalnom radu proizvodnih naftnih i plinskih postrojenja, uporaba rezultata mjerenja jakosti ispuštanja prema API*, Bilten Ex-Agencije br. 1-2 (32), str. 47-53, Ex-Agencija, Zagreb, 2004.
-

-
- [141] P. Peršić, *Kompresornica za komprimiranje zemnog plina u funkciji sabiranja, procesiranja, podizanja nafte ili skladištenja plina u svjetlu normi HRN EN 1127-1 i HRN EN 13463-1*, Bilten Ex-Agencije br. 1-2 (31), str. 53-69, Ex-Agencija, Zagreb, 2003.
- [142] J. Deškin, *Uvod u klasifikaciju prostora u svjetlu procjene rizika postrojenja*, Bilten Ex-Agencije br. 1(35), str. 19-23, Ex-Agencija, Zagreb, 2007.
- [143] *Overview of thermographic applications*, Infratec i *Infrared Thermography for Predictive Maintenance*, FLIR systems, prospektni mateijali.
- [144] J. Moser, *Petojezični elektroenergetski rječnik*, Kigen, Zagreb, 2005.
- [145] A. J. Wilday, A. M. Wray, *Safety Categories for Safety Devices Used in Electrical Equipment for Use in Potentially Explosive Atmospheres*, Explosion Safety in Hazardous areas, 1999., Conference Publication No. 469, pp 83-88, 1999.
- [146] S. Rumbak, *Istraživanje učinaka oštećenja kotrljajnog ležaja u eksplozivnoj atmosferi*, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.
- [147] A. Galović, *Nauka o toplini II*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1997.
- [148] A. Galović, *Termodinamika I*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1998.
- [149] F. Powell, *Safety against Explosions*, 9th International Symposium on Prevention of Occupational Accidents and Diseases in the Chemical Industry, June 1981.
- [150] P. F. Lees, *Los Prevention in the Process Industries*, Hazard Identification, Assessment and Control, Vol. 2.
- [151] L. A. Medard, *Accidental Explosions*, Vol. 2., J. Wiley & Sons, New York, 1989.
- [152] D. G. Godal, R. Ingle, *The Ignition of flammable liquids by hot surfaces*, Fire Technology, Vol. 3., 1967
- [153] A. W. Cox, P. F. Lees, M. L. Ang, *Classification of Hazardous Location Courtesy of Institute of Chemical Engineers*, 1990.
- [154] D. C. Crowl, *Understanding Explosion*, Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, 2003.
- [155] G. R. Astbury, Report Number HSL/2006/09 - Review of Unidentified Ignition Sources of Unplanned Flammable Release - Comparison of Offshore and Onshore.
- [156] *Electrical equipment for hazardous areas*, Published by Standards Australia International Ltd, 3rd edition, ISBN 0733735878 Sydney, 2001.
- [157] *Izješće o ispitivanju br. 8128482*, R. Končar, Zavod za eksplozionu zaštitu, Arhiva Ex-agencije, Zagreb, 1981.
- [158] *Izješće o ispitivanju br. M2009/01IB; M2009/04IB; M2009/06IB; M2007/01IB; M2009/08IB*, Mato-el-d, Ivanić Grad, 2009.
- [159] *Three-phase asynchronous motors, Technical application papers*, ABB, June 2008., www.abb.com, 28.06.2009.
-

-
- [160] *Izvešće o ispitivanju asinkronih visokonaponskih Ex motora (ser. br. 999487, 999489, 999485, 999491, 940330 i 940331), za JANAF, ELTRA MG, 10.04.2007.; Isvješta o ispitivanjima br. 161/08 (999470), 290/07 (999469), 022/08 (999487), 222/08 (999491), 162/08 (999485), 319/08 (999489), 337/07 (940331) i 023/08 (940330), za JANAF, ELTRA MG, 2008.; Izvešće o ispitivanju PS Melnice, Terminal Omišalj i Terminal Sisak (999847, 999470, 999467, 999469, 999478, 999473, i 999472), za JANAF, ELTRA MG, 20.12.2006.*
- [161] *Suglasnost za korištenje i objavu konstrukcijskih podataka motora 4AZs 280S-2, rezultata provedenih dijagnostičkih ispitivanja i pripadajućih ispitnih protokola, fotografija te ostale tehničke dokumentacije, KONČAR-GIM d.d. (dopis od 13.01.2010), JANAF d.d. (dopis znak N-17/10 od 18.01.2010) i PETROKEMIJA d.d. (dopis znak VIP-11/2010 od 13.01.2010.).*
- [162] *Kompjuterizirana „on-line” dijagnostika elektromehaničkog stanja visokonaponskih asinkronih motora u postrojenjima Petrokemija d.o.o. Kutina, faza II, elaborat br. ZES 621, Fakultet elektrotehnike i računarstva Zagreb, Kutina i Zagreb, studeni 2008.*
- [163] *Statistika pojavnosti specifičnih kvarova rotora kaveznih niskonaponskih motora u vremenskom razdoblju 2005.-2008., Mato-el-d, Ivanić Grad, 13.02.2009.*
- [164] *Izveštaji o ispitivanju asinkronih visokonaponskih Ex motora br. 87/Ex 04102, br. 21572-03/391, br. 84/581 i 61-I-009/04 (999486, 999488, 999545, 999478, 999473, 999474 i 999477) za JANAF, KONČAR Institut za elektrotehniku, 2003/2004.; Izveštaji o ispitivanju asinkronih visokonaponskih Ex motora br. 21570-03/355, br. 21570-03Z/363, br. 84/535, i br. 61-I-085/03 (999469, 999471 i 999468) za JANAF, KONČAR Institut za elektrotehniku, 2003.; Izveštaj o ispitivanju asinkronih visokonaponskih Ex motora br. 21520-04Z-392 (999494 i 999496), za JANAF, KONČAR Institut za elektrotehniku, 2004.; Izveštaji o ispitivanju asinkronih visokonaponskih Ex motora br. 21570-03/346, br. 84/536, br. 21572-02/309, br. 84/475 i br. 61-I-087/02 (999491, 999485, 999489, 999467, 999470 i 999847), za JANAF, KONČAR Institut za elektrotehniku, 2002/2003/2004.*

POPIS OZNAKA

A, A_0, A_1	- koeficijenti kod prikaza $R_p(t)$ i $z(t)$ (poglavlje 7)
a	- koeficijent kod izračuna $\mathcal{G}_{kst}$, $K/(A/mm^2)^2s$ (poglavlje 4)
B	- magnetska indukcija, T
b	- faktor/koeficijent ležaja (poglavlje 4)
C	- broj izmjena svježeg zraka u jedinici vremena, s^{-1}
c	- specifična toplina (toplinski kapacitet) zagrijanog tijela, J/kgK
$\cos \varphi$	- faktor snage
C_p	- kapacitet ispitivanog objekta, F (poglavlje 5)
C_s	- kapacitet udarnog kondenzatora, F (poglavlje 5)
cS	- posljedice realizacije neželjenog događaja
D, d	- dimenzija promjera, mm
d	- duljina
d	- duljina željezne jezgre, mm (prilozi)
dG/dt	- kapacitet izvora ispuštanja (plina ili pare), kg/s
$(dG/dt)_{max}$	- najveća količina ispuštanja izvora zapaljivog medija, kg/s
DGE	- donja granica eksplozivnosti, kg/m^3
$(dV/dt)_{min}$	- najniži obujamski protok svježeg zraka, m^3/s
dV_0/dt	- ukupni protok svježeg zraka kroz promatrani obujam u jedinici vremena, m^3/s
E	- energija
$E_{p\ min}$	- najmanja energija paljenja eksplozivne atmosfere, J
E_p	- energija paljenja, J
E	- inducirani napon
E	- inducirani napon (iznos, efektivna vrijednost), V
e	- inducirani napon (trenutna vrijednost), V
E_{dvp}	- direktna komponenta inducirano napona u statoru, V
E_{ivp}	- inverzna komponenta inducirano napona u statoru, V
F_{SF}	- vjerojatnost kvara (zatajenja) sigurnosnog sustava
f	- frekvencija
f_D, f_L	- frekvencijske komponente čiji iznosi (u odnosu na osnovnu komponentu - f_1) ukazuju na stanje kaveza rotora, Hz
f_{dvp}	- frekvencija napona i struje direktne komponente reda v_p , Hz

f_{ivp}	- frekvencija napona i struje inverzne komponente reda v_p , Hz
f_k	- frekvencija uzorkovanja (diskretna), s^{-1}
f_p	- frekvencija pulsiranja polja, Hz
f_1	- frekvencija napona narinutog na stator, Hz, s^{-1}
f_2	- frekvencija vrtnje okretnog polja prema vodičima rotora, s^{-1}
f	- mjera djelotvornosti ventilacije (poglavlje 3)
f_{invp}	- namotni faktor (poglavlje 5)
$G(f_k)$	- funkcija signala (struje) u frekvencijskoj domeni
$g(t)$	- funkcija signala (struje) u vremenskoj domeni
H	- jakost magnetskog polja, A/m
I	- električna struja
I	- struja (nazivna), A
I_A	- struja pokretanja „Ex e“ elektromotora, A
I_k	- struja oštećenog (prekinutog) štapa rotora, A
I_n	- nazivna struja elektromotora, A
I_{ldvp}	- direktna komponenta dodatne struje u namotu statora, A
I_{livp}	- inverzna komponenta dodatne struje u namotu statora, A
i_{ldvp}	- relativni iznos dodatne direktne komponente statorske struje
i_{livp}	- relativni iznos dodatne inverzne komponente statorske struje
j	- gustoća električne struja, A/mm ²
k	- specifična električna vodljivost, Sm/mm ² (poglavlje 4)
k	- konstanta (geometrije) kaveza rotora (poglavlje 5)
k	- faktor/koefficient
K	- ukupni mjerni faktor induciranog napona u mjernom senzoru (poglavlje 5)
k	- faktor sigurnosti kod izračuna $(dV/dt)_{min}$ (poglavlje 3)
k_s	- faktor ovisan o primijenjenim mjernim senzorima (poglavlje 5)
k_w	- redukcijski faktor kod izračuna $\mathcal{G}_{kr}t$ (poglavlje 4)
k_2	- koeficijent odvođenja (prijelaza) topline, W/K
L, l	- duljina, dužina
l	- dužina vodiča, mm
l	- duljina (razmak) između mjernog i uzbudnog senzora, m (poglavlje 5)
L	- induktivitet
L	- induktivitet, H (poglavlje 5)
L	- induktivitet ispitivanog objekta, H (poglavlje 5)
L_s	- ukupni samoinduktivitet namota i mreže jedne faze, H

m	- masa zagrijanog tijela, kg
M_{um}	- međuinduktivitet uzbudnog i mjernog senzora, H
M_2	- broj štapova kaveza rotora (poglavlje 5)
$M(t)$	- slučajna varijabla (poglavlje 7)
N	- broj štapova kaveza rotora (poglavlje 5)
N	- broj ispitanih motora (poglavlje 7)
n	- broj dijagnosticiranih kvarova (poglavlje 7)
n	- brzina vrtnje (poglavlje 5)
n	- nazivna brzina vrtnje (motora/rotora), min^{-1} (poglavlje 5)
n_d	- brzina vrtnje direktne komponente okretnog polja, min^{-1}
n_i	- brzina vrtnje inverzne komponente okretnog polja, min^{-1}
n_s	- sinkrona brzina vrtnje osnovnog harmonika okretnog polja statora, min^{-1}
n_{2s}	- brzina vrtnje okretnog polja rotora prema rotoru, min^{-1}
n_{20}	- brzina vrtnje okretnog polja rotora prema statoru, min^{-1}
n	- cijeli broj
P	- snaga (radna), W
p	- tlak, Pa (poglavlje 3)
p	- broj pari polova (rotora i statora) (poglavlje 5)
P, p	- vjerojatnost (poglavlje 3 i poglavlje 7)
p_{es}	- vjerojatnost pojave eksplozivne atmosfere
p_{ex}	- vjerojatnost nastanka eksplozije
p_{exat}	- vjerojatnost pojave eksplozivne atmosfere (poglavlje 7)
p_{exup}	- vjerojatnost nastanka uzročnika paljenja (poglavlje 7)
p_{exupr}	- vjerojatnost nastanka djelotvornog uzročnika paljenja uslijed kvara rotora (poglavlje 7)
p_{exups}	- vjerojatnost nastanka djelotvornog uzročnika paljenja uslijed kvara statora (poglavlje 7)
P_{pr}	- procijenjena vjerojatnost nastanka kvara (poglavlje 7)
pS	- vjerojatnost pojave neželjenog događaja
p_{up}	- vjerojatnost pojave uzročnika paljenja
P_{cur}	- gubici u bakru štapa i prstena, W
P_n	- nazivna snaga elektromotora, W
Q	- količina (oslobođene) topline, J, Ws
$Q(t)$	- funkcija nepouzdanosti odnosno razdiobe kvara
$Q_N(t)$	- empirijska funkcija nepouzdanosti odnosno razdiobe kvara
$q(t)$	- funkcija gustoće vjerojatnosti kvara
$q_N(t)$	- empirijska funkcija gustoće vjerojatnosti kvara

R	- električni otpor, Ω
R	- rizik od neželjenog događaja (poglavlje 1, poglavlje 3 i poglavlje 7)
$R_p(t)$	- funkcija pouzdanosti
$R_{pN}(t)$	- empirijska funkcija pouzdanosti
r	- faktor/koefficient kod izračuna Z_R (poglavlje 4)
r	- faktor rasipanja topline u impregniranim namotima (poglavlje 4)
S	- presjek vodiča, mm^2
S	- neželjeni događaj (poglavlje 1, poglavlje 3 i poglavlje 7)
s	- klizanje
T	- temperatura
T	- temperatura okoline, K, $^{\circ}\text{C}$ (poglavlje 3)
T	- temperatura zagrijavanja štapova, $^{\circ}\text{C}$ (poglavlje 6)
$T_{p \min}$	- najmanja temperatura paljenja eksplozivne atmosfere, $^{\circ}\text{C}$
T_p	- temperatura paljenja, $^{\circ}\text{C}$
ΔT_{iz}	- izmjerena nadtemperatura zagrijavanja pri sniženo naponu, K, $^{\circ}\text{C}$ (poglavlje 6)
ΔT_{pr}	- preračunata nadtemperatura zagrijavanja za puni napon kratkog spoja, K, $^{\circ}\text{C}$ (poglavlje 6)
t	- vrijeme
t	- vrijeme potrebno da prosječna koncentracija padne sa X_0 na $k \cdot DGE$, s (poglavlje 3)
t_E	- dopušteno vrijeme stajanje sa zakočenim rotorom „Ex e“ elektromotora, s
t_1	- vrijeme iniciranja paljenje eksplozivne atmosfere/smjese, s
t_2	- vrijeme razvijanja lančanog procesa eksplozije, s
t_3	- vrijeme stabilizacije lančanog procesa eksplozije, s
U	- električni napon
U	- napon (nazivni), V
U_i	- inducirani napon pojedinog štapa, V (poglavlje 5)
u_i	- relativna vrijednost induciranih napona pojedinog štapa (poglavlje 5)
U_{in}	- inducirani napon u mjernom senzoru, V
U_{is}	- sniženi napon kratkog spoja pri ispitivanju zagrijavanja, V
U_m	- vršna vrijednost ispitnog napona, V (poglavlje 5)
U_n	- nazivni linijski napon, V
U_{peak}	- vršni napon (kod primjene U/f pretvarača), V
U_{sr}	- srednji inducirani napon svih štapova kaveza rotora, V (poglavlje 5)
V_Z	- pretpostavljeni obujam potencijalno eksplozivne atmosfere, m^3
V_0	- ukupni ventilirani obujam koji pripada promatranom prostoru i koji

	opslužuje dotična ventilacija, m ³
Z	- električna impedancija, Ω
Z_R	- radijalni zračni raspor, mm
$z(t)$	- funkcija učestalosti kvara
$z_N(t)$	- empirijska funkcija učestalosti kvara
X	- električna reaktancija, Ω
X_0	- početna koncentracija zapaljive tvari, kg/m ³
x_i	- uspješan rad i -te komponente sustava (poglavlje 7)
$\overline{x_i}$	- kvar i -te komponente sustava (poglavlje 7)
Y	- vodljivost kaveza rotora, S (poglavlje 5)
α	- temperaturni koeficijent električne vodljivosti, K ⁻¹
γ	- gustoća materijala, kg/m ³ , kg/mm ³
η	- korisnost
$\mathcal{G}$	- nadtemperatura/temperatura
$\mathcal{G}_{\text{dop}}$	- najveća dopuštena ukupna temperatura, °C
$\mathcal{G}_k$	- nadtemperatura zbog kvara, zakočeni rotor - određena vremenom t_E , °C
$\mathcal{G}_{\text{kl/tr}}$	- najveća dopuštena ukupna temperatura izolacijske klase i temperaturnog razreda, °C
$\mathcal{G}_n$	- nadtemperatura nazivni opterećenog motora, °C
$\mathcal{G}_{\text{nmax}}$	- najveća stagnirana nadtemperatura nazivno opterećenog motora, °C
$\mathcal{G}_o$	- najviša očekivana temperatura okoline, °C
θ	- električno protjecanje
θ	- ukupno okretno protjecanje, A
θ_1	- okretno protjecanje statora, A
θ_2	- okretno protjecanje rotora, A
λ	- koeficijent toplinske vodljivosti, Wm ⁻¹ K ⁻¹
ν	- red harmoničkog člana
ρ	- specifični električni otpor, $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$
τ	- vremenska konstanta zagrijavanja, s
ω	- kutna brzina, rad/s

POPIS KRATICA

AIT	- Auto Ignition Temperature
ATEX	- Atmosphères Explosibles
CENELEC	- Comité Européen de Normalisation Electrotechnique
CTI	- Comparative Tracking Index
DFT	- Discrete Fourier Transformation
DGE	- Donja granica eksplozivnosti
EMP	- Elektromotorni pogon
EN	- Europäische Norm
EPL	- Equipment Protection Levels
Ex	- Oznaka protueksplozijski zaštićenog uređaja
FMEA	- Failure Mode and Effect Analysis
FTA	- Fault Tree Analysis
GGE	- Gornja granica eksplozivnosti
HAZOP	- Hazard Operability Analysis
HRN	- Hrvatska norma
HZN	- Hrvatski zavod za norme
IEC	- International Electrotechnical Commission
IO	- Izravna opasnost
IP	- Ingress Protection
JAV	- Jaka ventilacija
LEL	- Lower Explosive Limit
MESG	- Maximum Experimental Safe Gap
MIC	- Minimum Ignition Current
MS	- Mjerni senzor
NPR	- Neprihvatljiv rizik
NPSR	- Najveći pokusni sigurnosni raspor
NSP	- Najmanja struja paljenja
PO	- Podnošljiv rizik
PR	- Prihvatljiv rizik
PTB	- Physikalisch-Technische Bundesanstalt
SLV	- Slaba ventilacija
SM	- Stehiometrijska smjesa
SRV	- Srednja ventilacija
TP	- Temperatura paljenja
UEL	- Upper Explosive Limit
US	- Uzbudni senzor

PRILOZI

Prilog A: Protueksplozijski zaštićeni elektromotorni pogoni u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom.



Slika A.1. „Ex e II T3“ motor, 6 kV, 500 kW



Slika A.2. „Ex e II T3“ motor, 6 kV, 1,9 MW



Slika A.3. „Ex de IIA T3“ motor, 6 kV, 370 kW



Slika A.4. „Ex ped IIB T3“ motor, 6,6 kV, 1,7 MW

Prilog B: Konstrukcijski podaci ispitivanog „Ex e“ elektromotora

Parametar (Podatak)	Mjerna jedinica	Iznos (Tip)
Tip	-	4AZs 280S-2
Oznaka protueksplozijske zaštite	-	Ex e II T3
I_A/I_N	-	6
t_E	s	16 (T1), 16 (T2), 8,1 (T3)
Nazivna snaga	kW	47
Nazivni napon	V	380
Nazivna struja	A	83
Nazivna frekvencija	Hz	50
Broj pari polova	-	1
Nazivna brzina vrtnje	min^{-1}	2960
Struja praznog hoda	A	17,1
Struja kratkog spoja	A	498
Spoj statorskog namota	-	D
Vrsta namota statora	-	dvoslojni ovalni
Vrsta namota rotora	-	kavezni
Broj statorskih utora	-	42
Broj rotorskih utora	-	34
Provrt statora (Φ)	mm	250
Vanjski promjer rotora, D (Φ)	mm	247,8
Vanjski promjer statora (Φ)	mm	420
Širina zračnog raspora - jednostrano	mm	1,1
Duljina vodiča (štapa) rotora između prstena	mm	265
Duljina željeza (jezgre), d	mm	215
Serijski broj	-	971529



Slika B.1. Ispitivani „Ex e“ motor

Prilog C: Potencijalno iskrenje u zračnom rasporu i procjena faktora rizika kaveznih rotora (prema IEC 60079-7)

Karakteristika	Vrijednost	Faktor rizika
Konstrukcija kaveza rotora	Neizolirani sastavljeni (npr. vareni) rotorski kavez	3
	Rotorski lijevani kavez otvorenih utora ≥ 200 kW po polu	2
	Rotorski lijevani kavez otvorenih utora < 200 kW po polu	1
	Rotorski lijevani kavez zatvorenih utora	0
	Izolirani rotorski kavez	0
Broj polova	2 – polni	2
	4 - polni do 8 – polni	1
	> 8 – polni	0
Izlazna snaga	> 500 kW po polu	2
	> 200 kW do 500 kW po polu	1
	≤ 200 kW po polu	0
Radijalni rashladni kanali u rotoru	Da, $L < 200$ mm (napomena 1)	2
	Da, $L \geq 200$ mm (napomena 1)	1
	Ne	0
Skošenje rotora ili statora	Da, > 200 kW po polu	2
	Da, ≤ 200 kW po polu	0
	Ne	0
Stršeći dijelovi rotora	Ne udovoljava (napomena 2)	2
	Udovoljava (napomena 2)	0
Ograničenje temperature (T)	$T > 200$ °C	2
	135 °C $< T \leq 200$ °C	1
	$T \leq 135$ °C	0
<u>Napomena 1:</u> L je duljina krajnjeg paketa jezgre. Pokusna ispitivanja su pokazala da se iskrenje najčešće javlja u kanalima u blizini kraja jezgre. <u>Napomena 2:</u> Stršeći dijelovi rotora (npr. krilca i mase za balansiranje) trebaju biti konstruirani tako da su spriječeni neželjeni kontakti (dodiri) i da rade unutar temperaturne klasifikacije. Udovoljavanje ovim zahtjevima daje faktor 0, a u protivnom 2.		

Prilog D: Procjena faktora rizika potencijalnog izboja statorskog namota motora nazivnog napona iznad 1 kV (prema IEC 60079-7)

Karakteristika	Vrijednost	Faktor rizika
Nazivni napon	> 6,6 kV do 11 kV	4
	> 3,3 kV do 6,6 kV	2
	> 1 kV do 3,3 kV	0
Prosječan broj pokretanja	> 1/sat	3
	> 1/dan	2
	> 1/tjedan	1
	< 1/tjedan	0
Vrijeme između detaljnih pregleda (IEC 60079-17)	> 10 godina	3
	> 5 do 10 godina	2
	> 2 do 5 godina	1
	< 2 godine	0
Stupanj mehaničke (IP) zaštite	< IP 44 (napomena 1)	3
	IP 44 i IP 54	2
	IP 55	1
	> IP 55	0
Uvjeti okoliša	Vrlo prljavo i vlažno (napomena 2)	4
	Vanjski prostor (obalno područje)	3
	Ostali vanjski prostor	2
	Čisti vanjski prostor	1
	Čist i suh unutarnji prostor	0
<u>Napomena 1:</u> Samo u čistom okolišu i uz održavanje od osposobljenog osoblja. <u>Napomena 2:</u> Vrlo prljavo i vlažno okruženje uključuje prostore koji mogu biti izloženi potapanju ili otvorene palube.		

Prilog E: Teški kvarovi kaveza rotora



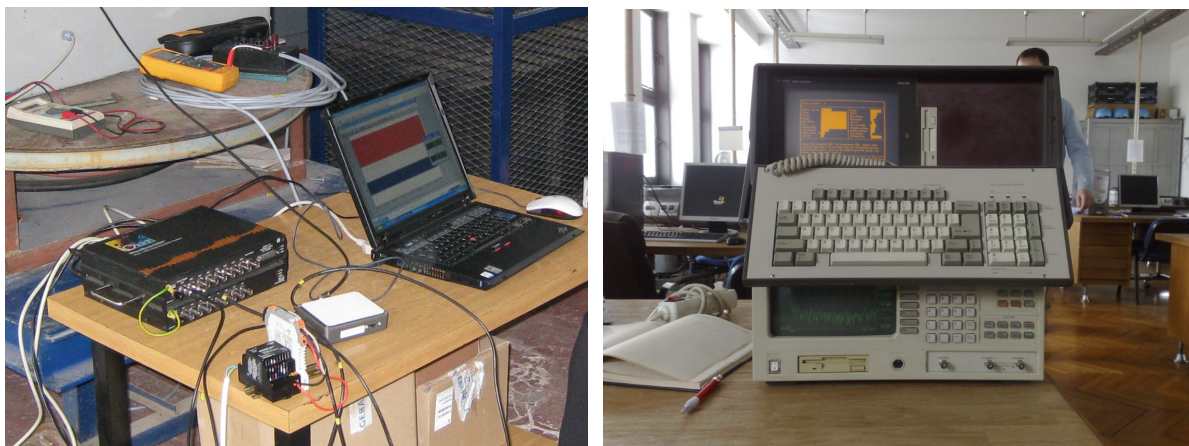
Slika E.1. Oštećenje spoja štapova i prstena



Slika E.2. Oštećenje lijevanog aluminijskog kaveza



Slika E.3. Tipični kvar zbog loše izrade, erozija

Prilog F: Korištena oprema kod specijalističkih dijagnostičkih ispitivanja**a)** Oprema za prikupljanje i obradu podataka kod analize spektra statorsche struje

Slika F.1. Oprema za A/D pretvorbu i pohranu signala statorsche struje te spektralni analizator Hewlett Packard Dynamic Signal Analyzer 35665A CSA LR50254C

b) Ispitni uređaj za ispitivanje udarnim naponom

Slika F.2. Ispitni uređaj za ispitivanje udarnim naponom Risatti H22/CPS

Prilog G: Stanja kaveza rotora pri ispitivanju



Slika G.1. Ispravan (servisiran) kavez rotora



Slika G.2. Razina I oštećenja kaveza rotora



Slika G.3. Razina II oštećenja kaveza rotora



Slika G.4. Razina III oštećenja kaveza rotora



Slika G.5. Razina IV oštećenja kaveza rotora

Prilog H: Korištena oprema kod ispitivanja djelotvornosti zagrijavanja
kao uzročnika paljenja

a) Miješalica za namješavanje eksplozivne smjese



Slika H.1. Miješalica za namješavanje eksplozivne smjese LUDEWIG & TILLMAN

b) Kromatograf za kontrolu sastava eksplozivne smjese



Slika H.2. Kromatograf za kontrolu sastava eksplozivne smjese PERKIN ELMER

c) Davači (pretvornici) tlaka i sustav/uređaj za mjerenje tlaka eksplozije



Slika H.3. Davači (pretvornici) tlaka i sustav/uređaj za mjerenje tlaka eksplozije KISTLER

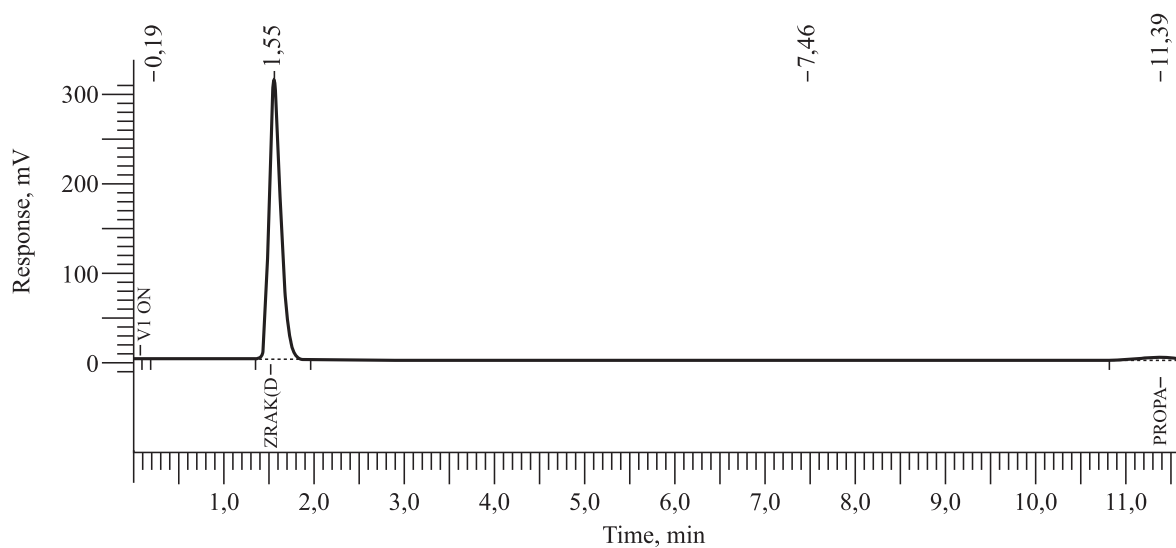
Prilog I: Kromatografski izvještaji o sastavu korištenih ispitnih smjesa
(propan/zrak, acetilen/zrak i vodik/zrak)

Result File: C:\podaci\

Akreditacija\KONTROLA_MJESALICE_LUDEWIG_TILLMAN_60\PROPAN\4,6%\20 lit\1a.rst

Sequence File: C:\podaci\1a-20080507-094509.seq

Software Version: 6.2.1.0.104:0104



IZVJEŠTAJ

EX-agencija

Peak #	Component Name	Time min	Area %	Amount %
1		0,190	0,00	0,00
2	zrak (dušik)	1,546	96,91	95,21
3		7,463	0,03	0,00
4	propan	11,385	3,06	4,78
			100,00	100,00

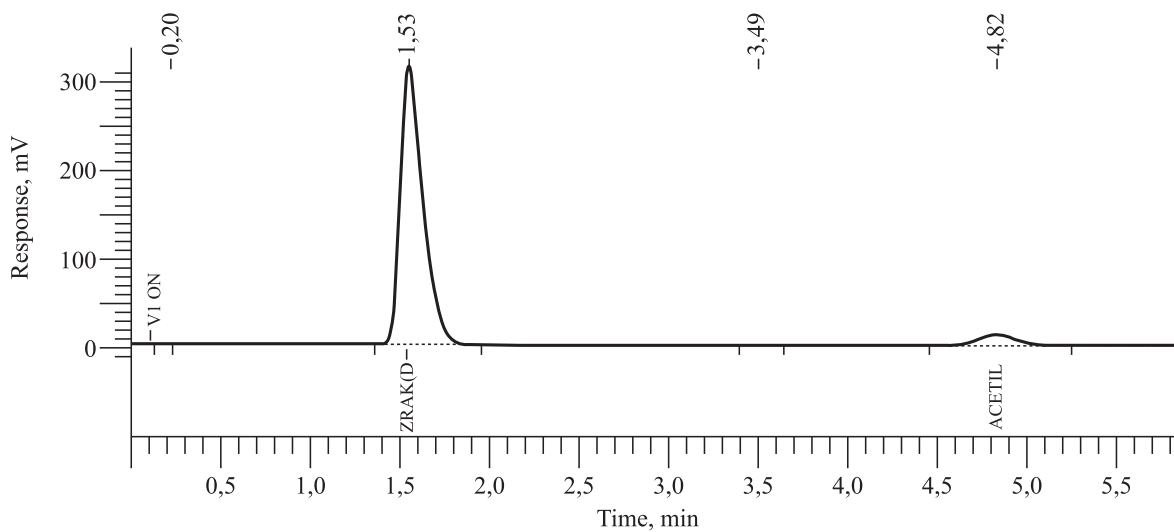
Slika I.1. Kromatografski izvještaj za ispitnu smjesu propan/zrak

Result File: C:\podaci\

Akreditacija\KONTROLA_MJESALICE_LUDEWIG_TILLMAN_60\ACETILEN\7,5%\20 lit\7b.rst

Sequence File: C:\podaci\7b.seq

Software Version: 6.2.1.0.104:0104



IZVJEŠTAJ

EX-agencija

Peak #	Component Name	Time min	Area %	Amount %
1		0,199	0,00	0,00
2	zrak (dušik)	1,533	92,51	92,52
3		3,488	0,02	0,00
4	acetilen	4,820	7,47	7,48
			100,00	100,00

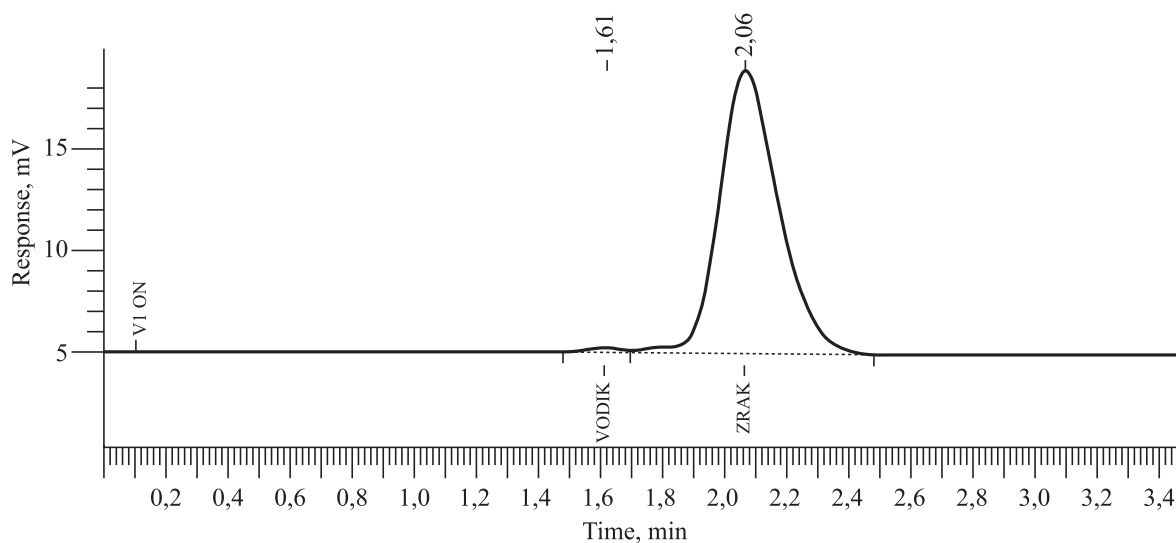
Slika I.2. Kromatografski izvještaj za ispitnu smjesu acetilen/zrak

Result File: C:\podaci\

Akreditacija\KONTROLA_MJESALICE_LUDEWIG_TILLMAN_60\VODIK\55%\20 lit\21102008\12a.rst

Sequence File: C:\podaci\12a.seq

Software Version: 6.2.1.0.104:0104



IZVJEŠTAJ

EX-agencija

Peak #	Component Name	Time min	Area uV*sec	Height uV	Area %	Adjusted Amount	Amount %
1	vodik	1,613	2459,31	324,16	1,29	23,1218	54,95
2	zrak	2,061	188511,94	13990,29	98,71	18,9575	45,05
			190971,25	14314,46	100,00	42,0793	100,0

Slika I.3. Kromatografski izvještaj za ispitnu smjesu vodik/zrak

SAŽETAK

„Procjena rizika primjene elektromotornih pogona u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom“

Procjena rizika primjene elektromotornih pogona u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom je istraživana teorijski i eksperimentalno.

Na temelju iskustva je procijenjeno da bi kvarovi, u kaveznom rotoru asinkronog motora, ovisno o intenzitetu, mogli biti efikasan uzročnik paljenja eksplozivne atmosfere. Asinkroni kavezni motor je odabran kao ključna elektrotehnička komponenta elektromotornog pogona smještenog u ugroženi prostor.

Analizom suvremenih dijagnostičkih metoda za rano otkrivanje kvarova u rotoru kaveznog asinkronog motora je zaključeno da je s aspekta primjene u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom najprikladnija metoda analize spektra statorske struje motora. Njenom primjenom se može otkriti kvar u kaveznom rotoru i njegov intenzitet.

Provedbom kompliciranog eksperimenta na „Ex e II T3“ trofaznom asinkronom motoru snage 47 kW, 380 V, 50 Hz je dokazano da zbog prekida više štapova u rotoru uz istovremenu prisutnost plina acetilena nastaje eksplozija. Time je potvrđena osnovna teza da stvorena vruća površina u rotoru može u uvjetima istovremenosti s eksplozivnom atmosferom izazvati eksploziju.

Istraživanjem su produbljene spoznaje o mogućnostima pojavljivanja uzročnika paljenja eksplozivne atmosfere, stvaranjem vrućih površina u rotoru motora zbog kvarova koji su skriveni i ne mogu se otkriti bez primjena suvremenih dijagnostičkih metoda.

Osmišljena je nova metoda procjene rizika primjene elektromotornih pogona u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom te je uvedena poopćena kategorizacija rizika u četiri kvantitativno-kvalitativne razine: prihvatljiv, podnošljiv, neprihvatljiv i izravna opasnost.

SUMMARY

„Risk assessment of electrical drives application in hazardous areas“

In the Ph. D. thesis, the risk assessment of the application of electrical drives in areas at risk of explosive atmospheres has been researched teoretically and empirically.

Based on experience, it has been assessed that faults in the rotor cage of the squirrel-cage induction motor, depending on the intensity of the fault, could generate an effective source of ignition of surrounding explosive atmospheres. The squirrel-cage induction motor has been selected as a key component in electrical drives installed in hazardous areas.

By detailed study of modern diagnostic methods for early detection of faults in the rotor cage of the squirrel-cage induction motor, the spectrum analysis of the stator current has been found to be the most appropriate for application in areas at risk of explosive atmospheres. Using this method, the fault in the rotor cage can be detected and its intensity determined.

Comprehensive tests performed on the "Ex e II T3" squirrel-cage induction motor rated 47 kW, 380 V, 50 Hz, have verified that an occurrence of several broken bars in the rotor cage in an explosive atmosphere of acetylene will lead to an explosion. This approved the basic thesis that a hot surface generated by a fault on a rotor cage can initiate an explosion when it coincides with explosive atmosphere.

This research uncovered the possibilities of the existence of effective sources of ignition due to faults in the rotor cage of the squirrel-cage induction motor, which cannot be detected without the use of modern diagnostic methods.

A new method for the risk assessment of the application of electrical drives in areas at risk of explosive atmospheres has been developed, with categorization in four quantitative-qualitative levels: acceptable, tolerable, unacceptable and direct danger.

KLJUČNE RIJEČI

eksplozivna atmosfera,
elektromotorni pogon (EMP),
procjena rizika,
statistička analiza i vjerojatnost,
kvar asinkronog kaveznog motora,
uzročnik paljenja,
dijagnostička ispitivanja,
protueksplozijska zaštita

KEY WORDS

explosive atmosphere,
electrical drive (ED),
risk assessment,
statistical analysis and probability,
fault of squirrel-cage induction motor,
source of ignition,
technical diagnostics
explosion protection

ŽIVOTOPIS

Ivica Gavranić rođen je 8. srpnja 1969. godine u Odžaku gdje je završio osnovnu i srednju elektrotehničku školu. Diplomirao je 1996. godine na Fakultetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu, Zavod za elektrostrojarstvo i automatizaciju s radom pod naslovom „Suvremene električke zaštite elektromotornog pogona u eksplozijski ugroženom ozračju”. Na istom je zavodu, pod mentorstvom prof. dr. sc. Drage Bana, 2002. godine obranio magistarski rad pod naslovom „Dijagnostika protueksplozijski zaštićenih elektromotora“.

Nakon završetka studija zapošljava se u tvrtci Ferimport, a od svibnja 1997. godine do danas radi u, od Vlade Republike Hrvatske osnovanoj, Agenciji za prostore ugrožene eksplozivnom atmosferom (Ex-Agencija). U Ex-Agenciji se, na mjestu voditelja projekta za elektroenergetska postrojenja, bavi tehničkim nadgledanjem postrojenja u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom. Uz postrojenja u Republici Hrvatskoj obavljao je tehničko nadgledanje i nad hrvatskim postrojenjima za eksploataciju nafte i plina u Italiji i Egiptu.

Ivica Gavranić, kao Hrvatski predstavnik, član je međunarodnog tehničkog pododbora IEC 31 J (MT 60079-14 - Electrical installations in hazardous areas). Također je član Hrvatskog nacionalnog tehničkog odbora ETO 64 - Električne instalacije, te tehničkog pododbora TO 31J - Klasifikacija prostora i instalacijski zahtjevi.

Tečaj za internog auditora prema ISO 9001:2000 (kod RWTUV-a) je završio 2005. godine i bio je voditelj tima izrade Priručnika kvalitete tehničkog nadgledanja u Ex-Agenciji. Kao član tima sudjelovao je u akreditaciji Sektora za certifikaciju Ex-Agencije.

Autor je i recenzent više od dvadeset radova objavljenih u zbornicima te stručnim i znanstvenim časopisima, kao i na domaćim i međunarodnim konferencijama. Urednik je rubrike „Stručne informacije“ stručno-znanstvenog časopisa za protueksplozijsku zaštitu „Bilten Agencije za prostore ugrožene eksplozivnom atmosferom“.

Redovni je predavač na inženjerskom PEX seminaru iz protueksplozijske zaštite uređaja i instalacija Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Također je stalni predavač i na „Ex-treningu“ praktične primjene protueksplozijske zaštite u organizaciji Ex-Agencije te je povremeni predavač na seminaru protueksplozijske zaštite koji organizira Zavod za istraživanje i razvoj sigurnosti.

Suradnik je na znanstvenom projektu „Optimiranje električnih strojeva i pogona za posebne uvjete eksploatacije“ kojeg vodi prof. dr. sc. Drago Ban, a pod pokroviteljstvom Ministarstva znanosti, obrazovanja i športa.

Služi se engleskim jezikom u govoru i pismu.

BIOGRAPHY

Ivica Gavranić was born on 8th July 1969 in Odžak, where he finished his elementary and high school (electro technical) education. He received his B.S. degree in electrical engineering from the Department of Electrical Machines, Drives and Automation, Faculty of Electrical Engineering and Computing, University of Zagreb, Croatia, in 1996, for his thesis titled “Modern electrical protections of electrical drives in areas at risk of explosive atmosphere”. In 2002 he received an M.S. degree from the same department, for his thesis titled “Fault diagnosis of explosion-protected electrical drives”, under the mentorship of Prof. Drago Ban, Ph. D.

His first employment was at Ferimport company, and from 1997 he has worked for the Agency for explosive atmospheres hazardous areas (Ex-Agency) established by the Government of the Republic of Croatia, where he still is today. As a project leader in the Technical department of Ex-Agency, he is responsible for technical supervision of plants at risk of explosive atmospheres. Besides plants in Croatia, he performed technical supervision of Croatian plants for the exploitation of oil and gas, located in Italy and Egypt.

As an official Croatian representative, Ivica Gavranić is a member of International technical subcommittee IEC SC 31J (MT60079-14 - Electrical installations in hazardous areas). Furthermore, he is a member of the Croatian national technical committee ETO 64 - Electrical installations, and technical subcommittee TO 31J - Classification of areas and installations requirements.

In 2005 he successfully finished the course for internal auditors in accordance with ISO 9001:2000 (at RWTUV). He took the role of team leader during the preparation of Ex-Agency's Quality Manual for Technical Supervision. As a team member, he participated in the accreditation of the Certification Department of Ex-Agency.

He is an author and consulting editor of more than twenty articles published in papers and technical and scientific magazines which were presented at national and international conferences. He is the editor of the clause “Technical information” in the technical-scientific magazine for explosion protection “Bulletin of the Agency for explosive atmospheres hazardous areas”.

He is a regular lecturer at engineering PEX seminars on the explosion protection of equipment and installations at the Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb, and is also lecturer at “Ex-Training” for the practical application of explosion protection techniques, organized by Ex-Agency. Occasionally, he lectures at the explosion protection seminar organized by the Institute of Safety Research and Development.

He collaborates on the scientific project “Optimization of Electrical Motors and Drives for Special Conditions of Exploitation” lead by Prof. Drago Ban, Ph. D., under the sponsorship of the Ministry of Science, Education and Sports.

He is fluent in English.