

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA**

**Ivica Gavranić**

**DIJAGNOSTIKA PROTUEKSPLOZIJSKI  
ZAŠTIĆENIH ELEKTROMOTORNIH  
POGONA**

**MAGISTARSKI RAD**

Zagreb, 2002.

Magistarski rad izrađen je u S-Komisiji Državnog zavoda za normizaciju i mjeriteljstvo, Končaru-Elektroindustrija d.d. i Zavodu za elektrostrojarstvo i automatizaciju Fakulteta elektrotehnike i računarstva u Zagrebu.

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

Magistarski rad ima 114 stranica

Rad br.:

# S A D R Ź A J

|                                                                                                                               |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. UVOD</b>                                                                                                                | <b>1</b>  |
| <b>2. PROSTORI UGROŽENI EKSPLOZIJOM I ZONE OPASNOSTI</b>                                                                      | <b>3</b>  |
| 2.1. Značajke zapaljivih tvari i izvora ispuštanja                                                                            | 3         |
| 2.2. Proračun ventilacije i ocjena eksplozijske ugroženosti                                                                   | 4         |
| 2.3. Primjena metoda određivanja zona opasnosti                                                                               | 5         |
| <b>3. METODE TEHNIČKE DIJAGNOSTIKE<br/>ELEKTROMOTORNIH POGONA U ZONAMA OPASNOSTI</b>                                          | <b>7</b>  |
| 3.1. Elementi dijagnostike i monitoringa elektromotornih pogona                                                               | 8         |
| 3.2. Dijagnostika protueksplozijski zaštićenih asinkronih<br>elektromotora na temelju analize odziva na udarni napon          | 13        |
| 3.3. Dijagnostika kaveznih rotora protueksplozijski<br>zaštićenih asinkronih elektromotora mjerenjem otpora štapova i prstena | 17        |
| 3.4. Nadzor električnih strojeva (asinkronih elektromotora) analizom termičkog stanja                                         | 20        |
| 3.5. Dijagnostika asinkronih elektromotora temeljem analize vibracija                                                         | 22        |
| 3.6. Dijagnostika asinkronih elektromotora mjerenjem<br>rasipnih magnetskih tokova (magnetski monitoring)                     | 24        |
| 3.7. Ostale metode dijagnostike asinkronog elektromotora                                                                      | 27        |
| <b>4. ANALIZA SPEKTRA LINIJSKE STRUJE NAMOTA STATORA</b>                                                                      | <b>29</b> |
| 4.1. Principijelna shema i osnovna ideja                                                                                      | 29        |
| 4.2. Dijagnostika kaveza rotora asinkronog elektromotora                                                                      | 31        |
| 4.2.1. Kvarovi i nesimetrije kaveza rotora                                                                                    | 31        |
| 4.2.2. Detekcija nesimetrije kaveza rotora analizom spektra struje statora                                                    | 32        |
| 4.3. Otkrivanje ekscentričnosti analizom spektra struje statora                                                               | 35        |
| 4.4. Računanje struja u dijelovima kaveznog rotora                                                                            | 37        |
| 4.5. Primjeri dijagnostike asinkronog motora analizom spektra struje statora                                                  | 45        |
| 4.5.1. Rezultati ispitivanja kaveza rotora analizom spektra struje statora,<br>primjenom računalnog programa "MOTORMONITOR"   | 46        |
| 4.5.2. Rezultati ispitivanja dinamičke ekscentričnosti<br>primjenom računalnog programa "MOTORMONITOR"                        | 51        |
| 4.5.3. Ocjena kompjuterizirane dijagnostike stanja motora<br>temeljene na analizi spektra struje statora                      | 52        |
| <b>5. ISPITIVANJE PROTUEKSPLOZIJSKE ZAŠTITE<br/>ASINKRONOG ELEKTROMOTORA</b>                                                  | <b>54</b> |
| 5.1. Ispitivanje protueksplozijske zaštite elektromotora u vrsti zaštite oklapanje "Ex d"                                     | 55        |
| 5.2. Ispitivanje protueksplozijske zaštite elektromotora<br>u vrsti zaštite povećana sigurnost "Ex e"                         | 69        |
| 5.3. Ispitivanje protueksplozijske zaštite elektromotora u vrsti zaštite nadtlak "Ex p"                                       | 78        |
| <b>6. PRETVARAČI FREKVENCIJE U PROTUEKSPLOZIJSKI ZAŠTIĆENIM<br/>ELEKTROMOTORNIM POGONIMA</b>                                  | <b>84</b> |
| 6.1. Osnovni elementi EMP-a s pretvaračem frekvencije                                                                         | 84        |

|                                                                                                                                                                                                                                        |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.2. Utjecaj pretvarača na pogonske parametre motora .....                                                                                                                                                                             | 86         |
| 6.2.1. Zagrijavanje.....                                                                                                                                                                                                               | 86         |
| 6.2.2. Vršne vrijednosti napona i sustavi izolacije .....                                                                                                                                                                              | 88         |
| 6.2.3. Osovinski naponi i ležajne struje .....                                                                                                                                                                                         | 90         |
| <b>7. ZAKLJUČAK.....</b>                                                                                                                                                                                                               | <b>94</b>  |
| <b>LITERATURA .....</b>                                                                                                                                                                                                                | <b>96</b>  |
| <b>POPIS KORIŠTENIH OZNAKA .....</b>                                                                                                                                                                                                   | <b>100</b> |
| <b>PRILOZI .....</b>                                                                                                                                                                                                                   | <b>103</b> |
| <b>Prilog A:</b> Principijelna shema ispitivanja "Ex d" kućišta na unutarnji tlak.....                                                                                                                                                 | 103        |
| <b>Prilog B:</b> Ispitivanja elektromotora u vrsti zaštite povećana sigurnost "Ex e",<br>240kW, 380/660V; 423/244A, $\cos \varphi = 0.91$ , tvornički br. 943114<br>Ex e II T1/T2 u praznom hodu, kratkom spoju i pri opterećenju..... | 104        |
| <b>Prilog C:</b> Elektromotor u vrsti zaštite Ex ped IIB T3 s pridruženim<br>elementima i sustavom nadtlaka.....                                                                                                                       | 107        |
| <b>Prilog D:</b> Konstrukcijski podaci ispitivanih elektromotora.....                                                                                                                                                                  | 108        |
| <b>Prilog E:</b> Protueksplozijski zaštićeni elektromotorni pogoni<br>(elektromotori u vrsti zaštite Ex e II T3).....                                                                                                                  | 109        |
| <b>SAŽETAK .....</b>                                                                                                                                                                                                                   | <b>110</b> |
| <b>SUMMARY .....</b>                                                                                                                                                                                                                   | <b>111</b> |
| <b>KLJUČNE RIJEČI .....</b>                                                                                                                                                                                                            | <b>112</b> |
| <b>KEY WORDS .....</b>                                                                                                                                                                                                                 | <b>113</b> |
| <b>ŽIVOTOPIS.....</b>                                                                                                                                                                                                                  | <b>114</b> |

## 1. UVOD

Trofazni asinkroni elektromotori po svojoj brojnosti nadilaze sve ostale električne pogonske strojeve u industriji. Mnogi od tih elektromotora su instalirani u elektromotornom pogonu (EMP-u) u prostorima ugroženim eksplozijom, kao što su istraživanje i eksploatacija nafte, kemijska i farmaceutska industrija, prerada plina i sl. Iznenadni prekid rada u ovakvim EMP-ima izaziva velike materijalne štete s mogućim teškim ekološkim posljedicama.

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

Dijagnostičke aktivnosti ispitivanja "S" elektromotora (elektromotora u protueksplozijski zaštićenoj izvedbi) možemo podijeliti u dvije skupine. Prvu skupinu čini niz provjera same protueksplozijske zaštite i ovisan je o samoj izvedbi protueksplozijske zaštite. Te provjere čine izmjere sastava, mjerenja tlakova, kontrola nadtlaka, uvodi kabela, IP zaštite, mjerenje vremena  $t_E$ , ispitivanja najvećih zagrijavanja, ispitivanja u svrhu certifikacije protueksplozijske zaštite i sl. Ova mjerenja, u pravilu, provodi certifikacijska ustanova za protueksplozijsku zaštitu pri postupku certifikacije, a kasnije se navedena svojstva elektromotora periodički provjeravaju tijekom uporabe, u dijagnostičke svrhe.

Da bi se sa sigurnošću utvrdila primjenjivost elektromotora i nakon višegodišnje uporabe u prostoru ugroženom eksplozijom, nužno je detaljno ispitati stanje elektromotora. Uz ispitivanja elemenata protueksplozijske zaštite u užem smislu (prva skupina ispitivanja) nužno je provesti i opća ispitivanja na elektromotoru. U tu drugu skupinu ispitivanja koja je jednako važna kao i prva, možemo ubrojati dijagnostiku stanja kaveza rotora, namota statora, zračnih raspورا, ležajeva i sl. Upravo ovim dijagnostičkim postupcima se otkrivaju kvarovi u elektromotoru koji su česti 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 iz koje se može kvalitetno odlučiti o daljnjem radu elektromotora u prostoru ugroženom eksplozijom ili o potrebnim servisnim zahvatima.

Ovaj rad donosi prikaz nekih najraširenijih "ON-LINE" i "OFF-LINE" dijagnostičkih metoda provjere asinkronih elektromotora koje se primjenjuju na "standardne" elektromotore, ali i prikazuje posebne uvjete ispitivanja "S" elektromotora koje donose zahtjevi protueksplozijske zaštite.

Posebni zahtjevi protueksplozijske zaštite u prvom redu ovise o značajkama prostora u kojem su instalirani (zone opasnosti), a što je također ukratko prikazano u ovom radu, kao i neki posebni elementi utjecajni na rad elektromotora u prostoru ugroženom eksplozijom (npr. napajanje promjenjivim naponom i frekvencijom što je sve češći slučaj u suvremenim protueksplozijski zaštićenim EMP-ima).

Od svih danas primjenjivanih metoda dijagnostike asinkronih elektromotora posebnu pažnju privlači metoda spektralne analize statorske struje. Njene osnovne prednosti su pripadnost ON-LINE metodama, mogućnost provedbe ispitivanja udaljeno od predmetnog elektromotora (struja se može snimiti u napojnoj ploči), što je posebno pogodno za prostore ugrožene eksplozijom, mogućnost naknadne provedbe analiza i sl., te je ovoj metodi, u ovom radu, posvećena posebna pozornost.

Konkretna mjerenja, u protueksplozijski zaštićenom EMP-u, s kritičkim osvrtom na dobivene rezultate, su provedena primjenom upravo ove dijagnostičke metode.

Tipični kvarovi koji se pojavljuju u asinkronom elektromotoru i koji se danas relativno lako dijagnosticiraju, a posebno su bitni sa stanovišta protueksplozijske zaštite, su npr.:

- lom štapova i prstena rotora ili pojava visokoomskih spojeva što za posljedicu ima povećana zagrijanja, nesimetrije i sl.,
- ekscentričnost, što dovodi do povećanih vibracija, dodirivanja rotora i statora što oštećuje izolaciju, stvara iskre i sl.,
- narušena izolacija (međuzavojna ili prema masi) radi starenja, preopterećenja, jakih vibracija i sl.,
- mehanički kvarovi dijelova stroja (ležajeva, osovina i sl.).

Pravovremeno otkrivanje manjih kvarova sprječava nastanak većih (što je posebno karakteristično za kvarove rotora) te doprinosi aktivnostima održavanja u smislu kvalitetnijeg planiranja remontnih radova, i što je posebno važno za prostore ugrožene eksplozijom, povećava sigurnost pogona.

Dijagnostika protueksplozijskih zaštićenih EMP-a je relativno novo područje u protueksplozijskoj zaštiti i najvažnije je voditi računa o sveobuhvatnosti dijagnostičkih postupaka koji se primjenjuju. Danas je razvijen cijeli niz dijagnostičkih metoda (npr. metoda odziva na udarni napon, mjerenje otpora štapova i prstena, spektralna analiza statorske struje, termička slika, analiza vibracija, magnetski monitoring i sl.) i obično je, uz ispitivanje posebnih uvjeta protueksplozijske zaštite, dovoljna uporaba jedne ili dviju navedenih dijagnostičkih metoda, kako bi se u potpunosti ispitaio elektromotor.

Dijagnostika protueksplozijski zaštićenih EMP-a je složena i zahtjevna te je nemoguće u jednom radu detaljno razraditi sve bitne elemente same dijagnostike. Pokušaj je bio ukazati na neke najbitnije elemente dijagnostike te na njenu izuzetnu važnost u sustavu osiguranja pouzdanosti i posebice sigurnosti EMP-a u prostorima ugroženim eksplozijom.

Daljni razvoj treba usmjeriti i u normativnom reguliranju ovog područja budući da ne postoji regulativa koja precizno definira ovu problematiku.

## 2. PROSTORI UGROŽENI EKSPLOZIJOM I ZONE OPASNOSTI

Suvremeni elektromotorni pogon (EMP) se, kao sustav za pretvorbu električne energije u mehaničku, u pravilu sastoji od izvora napajanja, pretvarača (npr. U/f pretvarač), zaštitnih elemenata, sustava upravljanja, elektromotora, prijenosnog elementa i radnog stroja. Većina spomenutih elemenata EMP-a, namjenjenog za rad u prostorima ugroženim eksplozijom (zapaljivi plinovi, pare tekućina i prašine), mora biti na poseban način izrađena, ispitana i instalirana.

Posebni zahtjevi, koji se postavljaju pred EMP u prostorima ugroženim eksplozijom, prvenstveno ovise o eksplozijskim značajkama spomenutog prostora. U tom smislu nužno je provesti klasifikaciju prostora ugroženog eksplozijom. Kako bi bilo moguće jednostavnije objasniti posebne zahtjeve koji se traže, za npr. elektromotore, u prostorima ugroženim eksplozijom, a što će biti detaljno analizirano u samom radu, nužno je ukratko prikazati najvažnije elemente provedbe klasifikacije prostora.

Prikaz osnovnih elemenata i metode provedbe klasifikacije prostora, odnosno određenja ugroženosti eksplozijom, je dan za prostore ugrožene zapaljivim plinovima i parama dok se za zapaljive prašine detaljnije može vidjeti u [3] ili normi IEC 1241-3 [29].

### 2.1 Značajke zapaljivih tvari i izvora ispuštanja

Do eksplozije može doći ukoliko postoji eksplozivna atmosfera (zapaljivi plin ili para i zrak) i uzročnik paljenja (npr. iskra električnog uređaja). Često nije moguće spriječiti nastanak eksplozivne atmosfere, te je nužno primjeniti posebne mjere na izvedbu električnih uređaja kako oni ne bi predstavljali uzročnik paljenja.

Spomenute mjere uvelike ovise o značajkama zapaljivih tvari kao što su:

- sastav,
- plamište ( $^{\circ}\text{C}$ ),
- donja granica eksplozivnosti –  $DGE$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),
- relativna gustoća prema zraku,
- temperatura paljenja ( $^{\circ}\text{C}$ ),
- skupina i temperaturni razred.

Ugroženi prostori razvrstavaju se u zone 0, 1 ili 2 na temelju učestalosti pojave zapaljive tvari (plina ili pare) i duljine trajanja prisutnosti eksplozivne plinske atmosfere. Definicije zona se mogu vidjeti u literaturi [32]. Na razvrstavanje ugroženog prostora u zonu 0, 1 ili 2 posebnu važnost imaju značajke izvora ispuštanja zapaljive tvari kao što su [3][32]:

- stupanj ispuštanja (trajni, primarni ili sekundarni),
- radna temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) i tlak (Pa),
- kapacitet izvora ispuštanja –  $dG/dt$  ( $\text{kg}/\text{s}$ ),

te karakteristike ventilacije:

- vrsta (prirodna, prisilna),
- stupanj (jaka, srednja, slaba),
- raspoloživost (dobra, osrednja, loša).

Utjecaj izvora ispuštanja (opasnosti) i ventilacije na određenje zona opasnosti prikazan je u tablici 2.1. Oznaka NP u tablici označava neugroženi prostor.

Tablica 2.1. Zone opasnosti u odnosu na izvor ispuštanja i značajke ventilacije

| IZVOR<br>OPASNOSTI<br>(stupanj ispuštanja) | VRSTA VENTILACIJE                                   |                                                                     |                                                                  |
|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
|                                            | SLABA VENTILACIJA<br>SLV<br>(npr. zatvoren prostor) | SREDNJA VENTILACIJA<br>SRV<br>(npr. prirodno ventiliran<br>prostor) | JAKA VENTILACIJA<br>JAV<br>(npr. prisilno<br>ventiliran prostor) |
| TRAJNI                                     | ZONA 0                                              | ZONA 0 +<br>ZONA 1 ili 2                                            | ZONA 1 ili 2 ili NP                                              |
| PRIMARNI                                   | ZONA 1 ili 0                                        | ZONA 1 +<br>ZONA 2                                                  | ZONA 2 ili NP                                                    |
| SEKUNDARNI                                 | ZONA 2 ili 1 ili 0                                  | ZONA 2                                                              | NP (eventualno ZONA 2)                                           |

## 2.2 Proračun ventilacije i ocjena eksplozijske ugroženosti

Na temelju parametara, definiranih u prethodnom poglavlju, potrebno je provesti analize sa svrhom ocjene ventilacije odnosno provjere određenja zona opasnosti prema kriterijima iz tablice 2.1. Jednadžbe koje povezuju veličine bitne za ocjenu ventilacije odnosno provjeru zona opasnosti prikazane su u tekstu koji slijedi [3] [32]:

$$(dV/dt)_{\min} = \frac{(dG/dt)_{\max}}{k \cdot DGE} \cdot \frac{T}{293} \quad (2.1)$$

gdje je:

$(dV/dt)_{\min}$  - najniži obujamski protok svježeg zraka ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$(dG/dt)_{\max}$  - najveća količina ispuštanja izvora ( $\text{kg/s}$ )

$DGE$  - donja granica eksplozivnosti ( $\text{kg/m}^3$ )

$k$  - faktor sigurnosti

$T$  - temperatura okoline (K)

Uz poznat broj  $C$  izmjena zraka moguće je ocjeniti predpostavljeni obujam  $V_z$  potencijalno eksplozivne atmosfere pomoću izraza 2.2

$$V_z = \frac{f \cdot (dV/dt)_{\min}}{C} \quad (2.2)$$

gdje je:

$V_z$  - predpostavljeni obujam potencijalno eksplozivne atmosfere ( $\text{m}^3$ )

$C$  - broj izmjena svježeg zraka u jedinici vremena ( $\text{s}^{-1}$ )

$f$  - mjera učinkovitosti ventilacije (od 1 do 5)

Predpostavljeni 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 2.1. Navedeno praktično znači da je na rubu i izvan tog prostora koncentracija zapaljivog plina ili pare znatno manja od donje granice eksplozivnosti.

Za odabir električnih uređaja 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 primarnog i/ili sekundarnog izvora ispuštanja.

Navedeno vrijeme se može procijeniti pomoću izraza 2.3.

$$t = -\frac{f}{C} \ln \frac{k \cdot DGE}{X_0} \quad (2.3)$$

gdje je:

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

$X_0$  - početna koncentracija zapaljive tvari ( $\text{kg/m}^3$ )

U dosadašnjem tekstu o određivanju zona opasnosti uočljiva je česta pojava izraza "ocijeniti", "procijeniti", "predpostaviti" i slično. Dugo godina se u svjetskoj normizaciji i praktičnoj primjeni pokušava postaviti formula (jednadžba) za proračun određenja tipa i rasprostiranja zona opasnosti no niti jedan dosadašnji pokušaj nije dao prihvatljive rezultate. Proračuni prikazani u ovom radu koriste se samo kao metoda ocjene ventilacije na čemu se, i uz ranije opisane elemente, temelji određivanje zona opasnosti odnosno klasifikacija prostora.

Metoda opisana u ovom poglavlju rada predstavlja način određivanja zona koji se prvenstveno primjenjuje u Europi. Budući da metoda nije, kako je već rečeno, egzaktna i jednostavna neke su velike nacionalne normizacijske ustanove kakva je i ANSI (American National Standards Institute) izradile svoje "granske" dokumente određivanja zona opasnosti (npr. za istraživanje i eksploataciju nafte).

Ovakav "američki" pristup, radi nemogućnosti postizanja konsenzusa, nije zaživio u Europi. Postizanje suglasja i donošenje takvih dokumenata (barem u obliku preporuka), na razini Europske normizacije, bilo bi od velike praktične pomoći pri određivanju zona opasnosti. Američki pristup donosi jednostavnost provedbe klasifikacije prostora ali je i ograničen na konkretne primjere odnosno nužno je raspolaganje odgovarajućim dokumentima za svako posebno područje (npr. eksploatacija nafte, kemijska industrija,...). Univerzalnost primjene je odlika europskog pristupa određivanju zona opasnosti, no on zahtjeva opsežniji i temeljitiji pristup, a time i osposobljenije stručnjake za svaku pojedinačnu provedbu klasifikacije prostora.

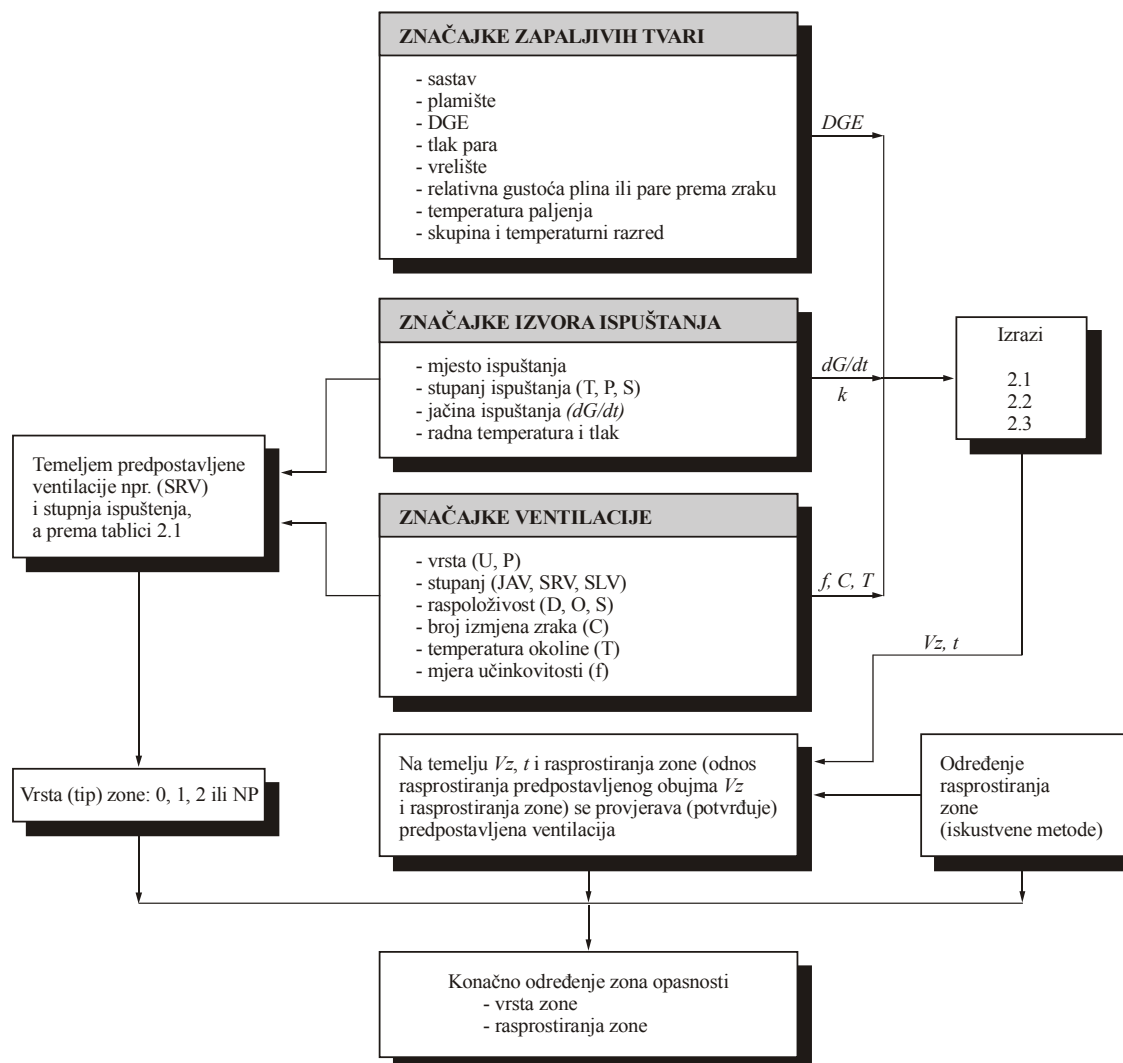
Ovim dijelom teksta se nastojalo samo ukratko prikazati različitosti europskog i američkog pristupa određivanju prostora ugroženog eksplozijom, a sama činjenica da ni jedan od njih nije nadvladao na međunarodnoj (IEC) razini ukazuje na postojanje nedostataka i u jednom i u drugom pristupu. Napomenimo samo da postoje i bitne razlike u samom označavanju ugroženog prostora kao i u označavanju protueksplozijske zaštite samih električnih uređaja. Europski pristup klasifikacije prostora je ukratko opisan u ovom radu, a detalji se mogu vidjeti prema npr. [3] [32] dok američki pristup detaljnije prikazuje npr. [31].

## 2.3 Primjena metoda određivanja zona opasnosti

Provedba klasifikacije prostora odnosno određivanja zona opasnosti vrlo je zahtjevan i složen posao koji zahtjeva precizno poznavanje tehnologije postrojenja, uvjeta ventilacije, stanja opreme i slično. Nažalost, neki od parametara na kojima se temelji (posebice prema europskoj metodi o kojoj mi govorimo) određivanje zona opasnosti, teško su dostupni (npr.

kapacitet izvora ispuštanja). Kriteriji za ocjenu dobivenih rezultata također nisu jednoznačni, nužno je veliko iskustvo u određivanju zona opasnosti.

Na slici 2.1 smo pokušali prikazati pojednostavljenu shemu postupka određivanja zona opasnosti iz koje je vidljiv odnos ulaznih i izlaznih elemenata koji sudjeluju u postupku klasifikacije prostora. Radi jednostavnosti utjecaj otvora među prostorima nije ovdje razmatran.



Slika 2.1. Pojednostavljena principijelna shema postupka određivanja zona opasnosti

Iz slike 2.1 je vidljivo da je za utvrđivanje tipa zone najbitniji (ne i jedini) čimbenik izvor ispuštanja, dok su za rasprostriranje zone od presudne važnosti značajke ventilacije. Cijeli postupak, koji se temelji na [3][32], pokazuje da klasifikaciju prostora treba provesti na temelju iskustva, a proračunom je potrebno provjeriti prikladnost (pretpostavljene) ventilacije. Slika 2.1 opisuje postupak samo za zapaljive plinove i pare (osim rudnika). Svakako treba težiti smanjenju stupnja ispuštanja (tehnološkim zahvatima npr. pretvoriti trajne izvore u primarne) te poboljšanju ventilacije kako bi stvarne zone bile što blažeg tipa (vrste) i manjeg rasprostriranja, čime se ublažavaju zahtjevi na električnu i ostalu opremu primijenjenu u tim prostorima. Projektiranje, izvedba, ispitivanje i dijagnostika elektromotornih pogona (EMP) u prostorima ugroženim eksplozijom uvelike ovise o vrsti i značajkama tih prostora. Iz navedenih je razloga u ovom poglavlju rada dan kratki prikaz tih značajki. Detaljno se o klasifikaciji prostora ugroženih eksplozijom može vidjeti npr. u [3], [29], [30], [31], [32].

### 3. METODE TEHNIČKE DIJAGNOSTIKE ELEKTROMOTORNIH POGONA U ZONAMA OPASNOSTI

Metode dijagnostike kvarova u EMP-u (u ovom radu se razmatra EMP sa asinkronim elektromotorom) se u posljednje vrijeme intenzivno razvijaju. Suvremene metode se koriste novim mjernim tehnologijama uz uporabu računalne i softverske opreme.

Metode dijagnostike, ovisno o njihovom utjecaju na normalan rad pogona, se dijele na "OFF-LINE" i "ON-LINE" metode. 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. Budući da ne prekida normalan pogon, moguća je češća primjena "ON-LINE" postupaka dijagnostike kvarova, pa čak i trajni nadzor određenih parametara koji ukazuju na mogući kvar, što omogućava ranije otkrivanje kvarova.

Rano otkrivanje manjih kvarova može spriječiti nastanke onih većih, što je npr. karakteristično za kvarove kaveza rotora asinkronih motora koji se razvijaju postupno. Pravovremeno otkrivanje kvara također doprinosi aktivnostima održavanja te omogućuje kvalitetnije planiranje remontnih radova u pogonu.

"ON-LINE" metode također omogućuju i daljinski nadzor stanja elektromotora (npr. temeljem spektra fazne struje statora, koju nije problem prenijeti na daljinu, može se zaključivati o stanju kaveza rotora). Kvalitetna i pravovremena dijagnostika kvara od izuzetne je važnosti za pogon u smislu smanjenja prekida rada, povećanja pouzdanosti pogona, smanjenja troškova održavanja, popravaka i slično.

Primjena elektromotornih pogona u prostorima ugroženim eksplozijom daje novu važnost suvremenim metodama dijagnostike u smislu povećanja sigurnosti takvih pogona. Pravovremeno otkrivanje kvara na elektromotoru u prostoru ugroženom eksplozijom može spriječiti nastanak većih kvarova koji mogu biti ozbiljan uzročnik paljenja eksplozivne atmosfere. U tom smislu je moguće spriječiti i velike kvarove na motoru koji pripadaju skupini "havarijskih" i koji nisu "pokriveni", u današnje vrijeme primjenjivanim, izvedbama protueksplozijske zaštite elektromotora.

Elektromotori ugrađeni u protueksplozijski zaštićene elektromotorne pogone uz sve specifičnosti i posebitosti pri projektiranju, izgradnji i ispitivanju, a o čemu će biti više riječi u petom poglavlju ovog rada, moraju udovoljavati i općim zahtjevima "običnih" motora tj. motora koji se koriste u neugroženim prostorima.

U ovom poglavlju rada ćemo dati prikaz nekih, danas najpoznatijih i raširenijih metoda dijagnostičkih ispitivanja asinkronih elektromotora, budući su asinkroni elektromotori najzastupljeniji u eksploziji ugroženim EMP-ima. Biti će prikazane metode dijagnostike kvarova koje se odnose na "standardne industrijske" asinkrone elektromotore (time i na elektromotore u protueksplozijski zaštićenoj tzv. "S" izvedbi), dok će posebitosti ispitivanja elektromotora sa stanovišta posebnih zahtjeva za prostore ugrožene eksplozijom biti tema posebnog poglavlja ovog rada.

### 3.1 Elementi dijagnostike i monitoringa elektromotornih pogona

Prije kratkog pregleda elemenata monitoringa EMP-a i nekih, u svijetu najraširenijih i najrazrađenijih, metoda dijagnostike kvarova asinkronih elektromotora, prikazimo neke statističke podatke o samim kvarovima asinkronih elektromotora.

Istraživanje kvarova asinkronih elektromotora srednjih i većih snaga (ispitna grupa 180 komada) je dalo prema [10] rezultate prikazane u tablici 3.1

Tablica 3.1. Udio pojedinih kvarova u ukupnim kvarovima asinkronih elektromotora

| VRSTA KVARA                | % UKUPNIH KVAROVA |
|----------------------------|-------------------|
| KVAROVI NAMOTA STATORA     | 26.50             |
| KVAROVI NAMOTA ROTORA      | 31.65             |
| KVAROVI PAKETA STATORA     | 9.34              |
| KVAROVI PAKETA ROTORA      | 13.25             |
| OŠTEĆENJA VRATILA I LEŽAJA | 12.94             |
| OSTALI KVAROVI             | 6.32              |

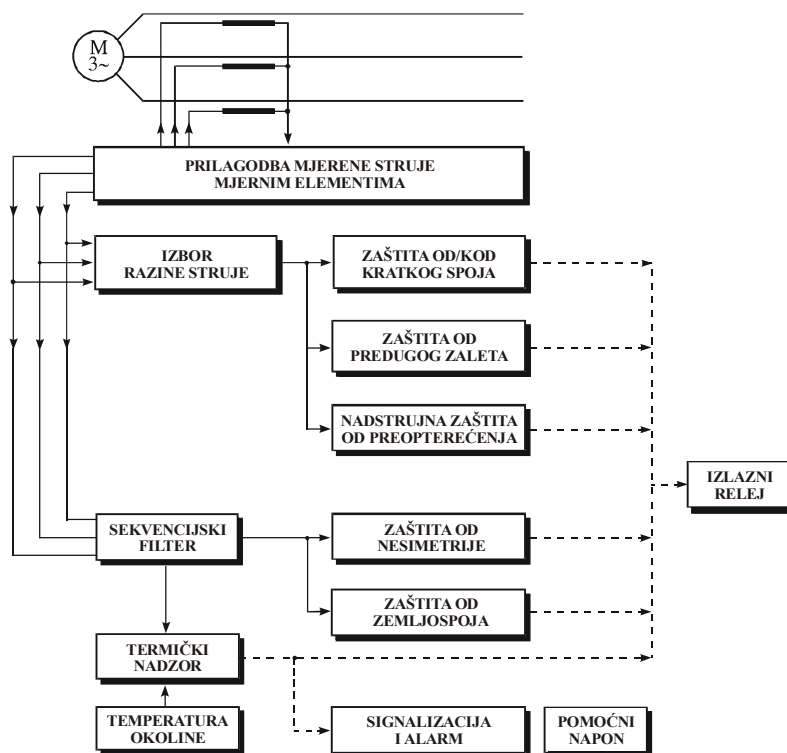
Ilustrativna je i tablica 3.2 u kojoj su prikazani najučestaliji uzroci oštećenja namota asinkronog elektromotora [4]:

Tablica 3.2. Najučestaliji uzroci oštećenja namota asinkronog elektromotora

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| PREOPTEREĆENJE              | 30% |
| OKOLINA (vlaga, prašina...) | 14% |
| JEDNOFAZNI RAD              | 14% |
| OŠTEĆENJE LEŽAJA            | 13% |
| STARENJE IZOLACIJE          | 10% |
| OSTALO                      | 19% |

Danas se metode dijagnostike (trajni nadzor ili povremeno ispitivanje) provode uglavnom na elektromotorima većih snaga, no daljnjim razvojem i sniženjem troškova dijagnostike očekuje se primjena i na elektromotore manjih snaga, što je posebice bitno za motore u prostorima ugroženim eksplozijom gdje su i mali elektromotori podjednako opasan uzročnik paljenja eksplozivne atmosfere kao i motori srednjih i velikih snaga.

Suvremene zaštite asinkronih elektromotora, koje su danas nezaobilazne u većini EMP-a, u sebi objedinjuju cijeli niz zaštitnih funkcija. Na slici 3.1. prikazana je jedna od tipičnih kompleksnih zaštita asinkronog elektromotora.



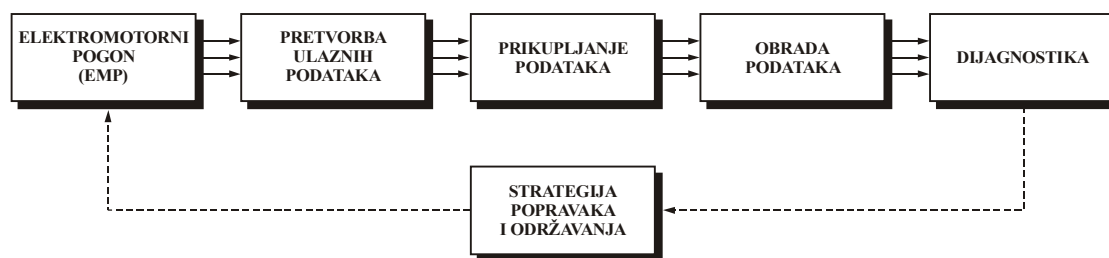
Slika 3.1. Kompleksna zaštita asinkronog elektromotora

Suvremeni zaštitni sustavi u sebi sadrže i elemente dijagnostike koji se ogledaju u praćenju određene veličine motora (npr. termička slika motora) i poduzimaju određene zaštitne radnje u slučaju izlaska nadzirane veličine izvan dopuštenih granica.

Temeljna razlika, može se reći nedostatak današnjih zaštitnih metoda, u odnosu na metode dijagnostike je u tome što se većina zaštitnih metoda temelji na pojavi nedopuštenog stanja (kvara) i nakon toga se poduzimaju potrebne radnje. Metode dijagnostike omogućuju otkrivanje ili trajno praćenje stanja i pojava koje prethode kvaru i na taj način je moguće spriječiti ili na vrijeme predvidjeti kvar. Posljedice ovakvih mogućnosti dijagnostike su znatne uštede i izbjegavanje velikih kvarova i time zastoja u pogonu, a povećanje sigurnosti EMP-a u prostoru ugroženom eksplozijom je od posebne važnosti.

Svaka metoda dijagnostike objedinjuje u sebi cijeli niz radnji i postupaka koji započinje "snimanjem" ulaznog podatka, nastavlja se obradom podataka, ocjenom dobivenih rezultata, te završava donošenjem odluke o provedbi potrebnih aktivnosti i zahvata na nadziranom odnosno ispitivanom objektu.

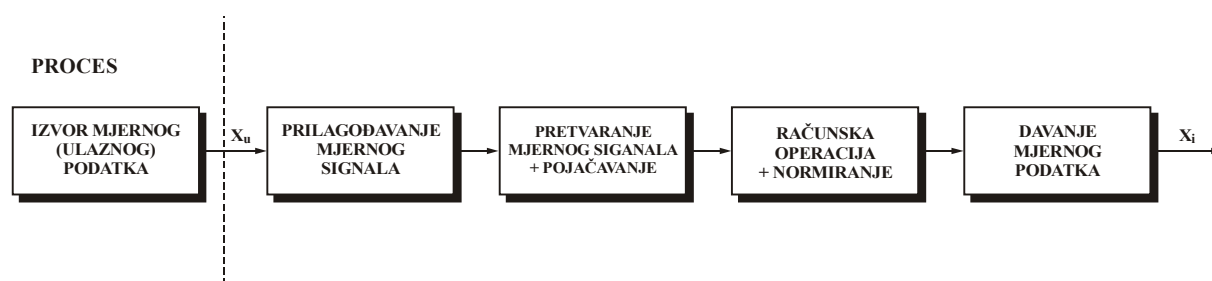
Slika 3.2 prikazuje principijelnu shemu postupaka i radnji nadzora i dijagnostike elektromotornog pogona – monitoringa. Shema prikazuje karakterističan slučaj [11] koji se može manje ili više razlikovati kod pojedinih postupaka dijagnostike.



Slika 3.2. Principijelna shema postupaka i radnji nadzora i dijagnostike elektromotornog pogona

Pod elektromotornim pogonom (u smislu prikaza na gornjoj shemi) se prvenstveno misli na elektromotor kao dio EMP-a. Pretvorba ulaznih podataka se uobičajeno provodi pomoću uređaja (u literaturi je čest engleski naziv "transducer") koji iz nadziranog sustava, kod nas je to elektromotor, uzimaju vrijednost neke veličine i pretvaraju je u drugu veličinu, može se reći pridružuju joj ekvivalent druge veličine. Općenito, mjerni pretvornik se može definirati kao uređaj pomoću kojeg se s određenom točnošću ostvaruje jednoznačna funkcionalna povezanost dviju fizikalnih veličina (npr. temperatura – otpor, protok – struja). Uobičajeno se ulazna veličina (npr. temperatura, pomak, vibracija, ubrzanje, tlak, struja, napon) pretvara na izlazu uređaja za pretvorbu u napon ili struju tj. u električne signale (analogne ili digitalne).

Na ovom mjestu nećemo ulaziti u prikaz principa rada (djelovanja) pretvornika koji se koriste pri dijagnostici EMP-a (navedeno se može vidjeti npr. prema [11]). Prikažimo samo funkcionalni niz koji definira zadatke koji se postavljaju pred mjerni pretvornik – slika 3.3. Između ostalog potrebno je osigurati odgovarajuće prilagođenje ulaznog kruga na osjetilo, pojačati (obično mali) nivo signala iz osjetila, normirati izlazni signal (npr. 4-20 mA, 0-10 V) i sl.

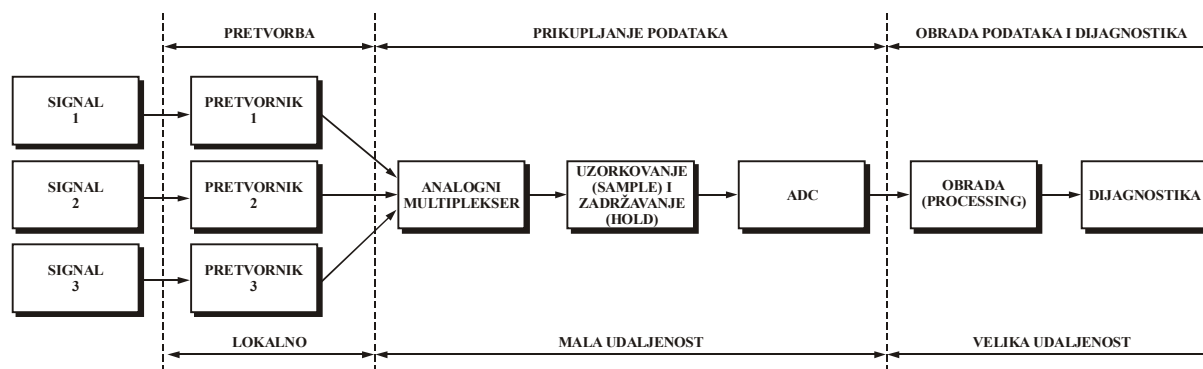


Slika 3.3. Zadaci mjernog pretvornika

Nakon pretvorbe ulaznog podatka (mjernog signala) proces monitoringa (nadzora) ili dijagnostike se nastavlja prikupljanjem tih podataka i primarnom obradom. Preciznost i način prikupljanja podataka su obično određeni naknadnim algebarskim postupcima koji se provode nad prikupljenim podacima, u procesu obrade podataka. Najvažnije je za proces prikupljanja podataka, neovisno o složenosti nadziranog sustava, sačuvati vjernost podatka dobivenog iz pretvornika. Preneseni i pohranjeni podaci moraju biti odgovarajuće kvalitete (npr. oslobođeni šumova) kako bi bili primjenjivi u procesu obrade podataka.

U složenim sustavima, kada se obrađuje velik broj ulaznih podataka, uobičajeno je imati procesni sustav udaljen od nadziranih objekata. U takvim slučajevima se preporuča provedba lokalne konverzije podataka. U okruženju s mnogo šuma (smetnji) je poželjno digitalizirati signale na mjestu prikupljanja, te ih kao takve proslijediti na centralno mjesto. Struktura jednog takvog sustava je prikazana na slici 3.4. Principi opisani ovim sustavom se primjenjuju za prikupljanje i prijenos podataka na naftnim platformama [11] koje predstavljaju tipičan EMP u prostoru ugroženom eksplozijom. Prikadno rješenje može biti primjena jedne ili dviju sveobuhvatnih metoda (npr. spektralna analiza statorske struje ili spektralna analiza signala vibracija ležaja) na velikom broju asinkronih elektromotora instaliranih u prostorima ugroženim eksplozijom na naftnoj platformi. Dijelovi sustava monitoringa su instalirani na samoj platformi (npr. pretvorba i prikupljanje podataka) te na kopnu (obrada i analiza podataka i dijagnostičke odluke). Budući da nije nužan trajni nadzor svih elektromotora, moguće je jednim sustavom na kopnu nadzirati EMP-ove na više platformi.

Primjer takvog sustava nadzora na daljinu je i [11] SPMAP (Shell Platform Machinery Analysis Programme) koji je pušten u pogon 1984. i nadzirao je velik broj asinkronih strojeva na naftnoj platformi u Sjevernom moru.



Slika 3.4. Tipična struktura automatskog sustava nadzora na daljinu

Osnovno prikupljanje podataka je razdijeljeno u tri ulančane funkcije – multipleksiranje, uzorkovanje i zadržavanje te konverzija u digitalni oblik. Uporaba multipleksera je potrebna ukoliko se prati veći broj kanala (ulaznih signala). Prednost multipleksera je velika brzina, može se skenirati i do 5000 kanala u sekundi. Nedostatak multipleksiranja je taj što motrenje (nadzor) nije kontinuirano, no u većini praktičnih slučajeva ciklus uzorkovanja, tj. interval između prikupljanja susjednih uzoraka je vrlo malen u usporedbi s vremenom u kojem može doći do pogreške/promjene.

Jedinica za uzorkovanje i zadržavanje, koja je u osnovi brzo pojačalo, može pohraniti ulaznu vrijednost i osigurati na ulazu u ADC (analogno/digitalni pretvornik) prisutnost konstantnog signala za vrijeme ciklusa A/D pretvorbe. Navedeno dopušta da vrijeme uzorkovanja ADC-a bude smanjeno, što rezultira bržim sustavom.

Povezivanju elemenata monitoringa i postavljanju kabela između pretvornika i dijelova sustava za prikupljanje podataka treba posvetiti posebnu pažnju. U većini slučajeva dvožične parice su prihvatljive za povezivanje pretvornika s primarnom procesnom jedinicom, no u slučaju zahtjeva za velikom neovisnošću o šumu preporuča se upotrijebiti optičke kabele. Komunikacija između primarne procesne jedinice i glavnog procesnog sustava treba biti uspostavljena pomoću integrirane veze s niskim nivoima šuma.

Obrada podataka (processing) je dio dijagnostičkog procesa gdje se, prethodno prikupljeni i odgovarajuće formatirani, podaci obrađuju i pretvaraju u oblik koji omogućava lakšu dijagnozu stanja analiziranog odnosno nadziranog objekta. Posljednjih godina su se razvile razne metode obrade podataka među kojima su najvažnije tehnike poznate općenito kao spektralna analiza. Rast primjene ovih metoda je pratio razvoj računalnog hardvera i softvera, te je razvijen cijeli niz instrumenata velikih mogućnosti po prihvatljivim cijenama. Budući da se metoda spektralne analize često primjenjuje u dijagnostičkim ispitivanjima elektromehaničkog stanja asinkronih elektromotora, o čemu će više biti riječi u ovom radu, na ovom mjestu ćemo samo prikazati temeljno načelo ove metode, kao jedne od često korištenih metoda obrade podataka.

Spektralna analiza je metoda koja transformira vremenski signal u frekvencijsku domenu. Spektralni prikaz vremenskog signala je skup komponenti u frekvencijskoj domeni. Transformacija se provodi upotrebom Fourier-ove analize [11], gdje je svaki periodički signal periode  $T$

$$g(t) = g(t + T) \quad (3.1)$$

predstavljen podjednako razmaknutim frekvencijskim komponentama

$$G(f_k) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} g(t) \cdot e^{-j2\pi \cdot f_k \cdot t} dt \quad (3.2)$$

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

$$g(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} G(f_k) \cdot e^{+j2\pi \cdot f_k \cdot t} \quad (3.3)$$

Vidljivo je da kontinuirana periodička funkcija vremena 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, s željenom točnošću, pomoću konačnog skupa elemenata (brojeva). Kako je ranije rečeno vrlo često je potrebno, za potrebe daljne obrade, digitalizirati signal iz pretvornika (transducera) 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 3.2 i 3.3 poprimaju oblik 3.4 i 3.5 [11]:

$$G(f_k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} g(t_n) \cdot e^{-j2\pi \cdot n \cdot k / N} \quad (3.4)$$

$$g(t_n) = \sum_{k=0}^{N-1} G(f_k) \cdot e^{+j2\pi \cdot n \cdot k / N} \quad (3.5)$$

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).

Danas se pri obradi podataka u procesu monitoringa, uz spomenute metode spektralne analize koriste i druge metode kao npr. funkcije korelacije koje se temelje na korelaciji dvaju signala u vremenskoj domeni – npr. između valnog oblika signala i njegovog pomaka (auto korelacija). U detekciji kvarova okretnih elemenata u ležajevima za obradu podataka se koristi metoda uprosječivanja signala (Signal Averaging). Metoda je u osnovi uprosječivanje velikog broja uzoraka, koji se dobivaju iz pretvornika pri čemu je svaki uzorak pažljivo vremenski pridružen istom periodu. Kod rotirajuće opreme rotacijska perioda elemenata koji se promatra je obično poznata. Na taj način se šum, koji se generira u sistemu, može prigušiti, a signal (poznate rotacijske periode) pojačati.

Dijagnostika predstavlja završne radnje u sustavu monitoringa prikazanog na slici 3.2. Konačni cilj sustava monitoringa je određivanje strategije održavanja i popravaka nadziranog objekta. Dok je pretvorbu ulaznih podataka, prikupljanje podataka i obradu podataka moguće provesti potpuno automatski, to s dijagnostičkim radnjama nije u potpunosti moguće. Dijagnostičke odluke su presudne za cijeli sustav monitoringa odnosno donošenje strategije daljnjih aktivnosti nad nadziranim objektom. Danas je najčešće "dijagnostički procesor" još uvijek čovjek. Postoje podijeljena mišljenja da li to treba biti tako ili ne. Zagovornici potpuno automatske dijagnostike naglašavaju da količina podataka i složenost u velikim sustavima

nadilazi mogućnosti čovjeka, dok protivnici takvog pristupa tvrde da pravilnu interpretaciju rezultata može dati samo čovjek.

Za EMP u prostorima ugroženim eksplozijom važno je ukazati i na slijedeće činjenice. Pretvorba ulaznih podataka se uobičajeno provodi u blizini izvora ulaznog podatka (npr. termosonde, pomoćne sonde ugrađene u elektromotore i sl.). Ukoliko je elektromotor dio EMP-a u prostoru ugroženom eksplozijom nužno je, uz primjenu protueksplozijski zaštićenog elektromotora, primijeniti protueksplozijsku zaštitu i na mjerne pretvornike. Ostali elementi sustava monitoringa (prikupljanje, prijenos i obrada podataka, dijagnostika i sl.) se nalaze izvan prostora ugroženog eksplozijom, no važno je razmotriti i njihov utjecaj na elemente u prostorima ugroženim eksplozijom (mogući prijenos energije, kvarovi i zaštite i sl.).

Danas su u svijetu razvijeni i sustavi za nadzor, prijenos, obradu i prikaz podataka (signala) koji se mogu ugrađivati i u prostore ugrožene eksplozijom (npr. STAHL, EXICOM [54] ili PROFIBUS PA (UOS 200) [53]). Riječ je o procesorskim sustavima koji se mogu ugrađivati u zonu 1 i 2, a čija se protueksplozijska zaštita temelji na samosigurnosti "Ex i". Prednost ovakvih sustava je mogućnost povezivanja sustava u ugroženom prostoru i sustava u neugroženom prostoru na jedinstven sustav (protokol), lagana nadogradivost opremom različitih proizvođača na isti bus sustav i sl. Uporaba ovakvih sustava je još uvijek relativno skupa i u Hrvatskoj vrlo rijetka.

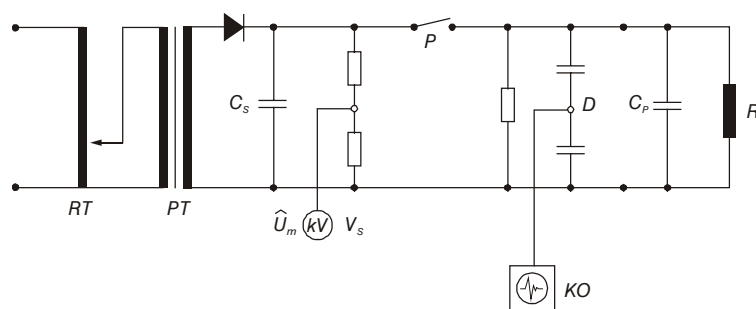
### **3.2 Dijagnostika protueksplozijski zaštićenih asinkronih elektromotora na temelju analize odziva na udarni napon**

Iako na prvi pogled vrlo robusne izvedbe asinkroni elektromotori su ipak osjetljivi na kvarove, a posebice u pogonima koje klasificiramo kao "teški pogon". U takvim pogonima su češći kvarovi rotora nego kvarovi statora. Kvarovi rotora su posljedica termičkih i mehaničkih naprezanja koja nastaju npr. uslijed centrifugalnih sila, djelovanja elektromagnetskih sila na štap kaveznog rotora, ekscentričnosti, vibracija, nestacionarnog temperaturnog polja, nejednolike popunjenosti lijevanih aluminijskih štapova i sl. Među česte kvarove namota statora možemo ubrojati međuzavojne spojeve, spojeve prema masi i prekid namota. Česta je i ekscentričnost zračnog rasporeda.

Pravovremeno otkrivanje povećanih zagrijanja električnog stroja ili detektiranje kvarova koji mogu dovesti do spomenutih zagrijanja (npr. nesimetrije, kratki spojevi među zavojima i sl.) je od posebne važnosti za sigurnost u prostorima ugroženim eksplozijom. Kod EMP-a u zonama opasnosti je također vrlo važno rano otkrivanje kvarova koji mogu dovesti do mehaničke ili električne iskre (npr. nesimetrija zračnog rasporeda, oštećeni štapovi ili prsteni rotora i sl.)

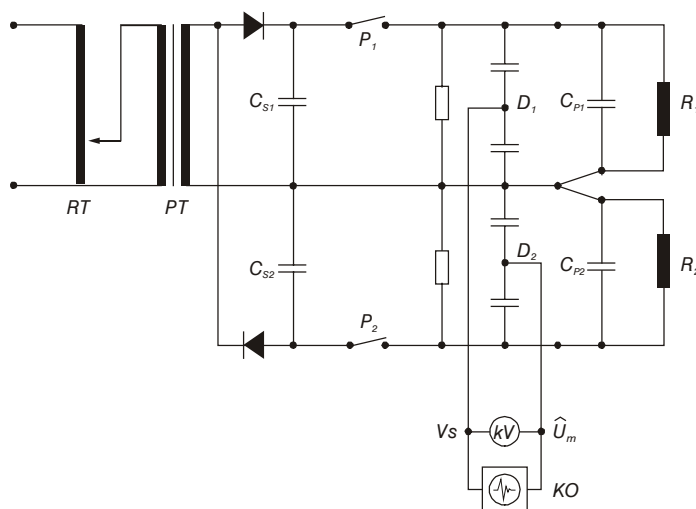
Dijagnostika asinkronih elektromotora, u protueksplozijski zaštićenoj izvedbi, na temelju analize odziva na udarni napon je jedna od najraširenijih "OFF-LINE" metoda dijagnostike EMP-a, instaliranih u zoni opasnosti. Osnovne prednosti ove metode su efikasnost i niska cijena ispitivanja u odnosu na cijenu protueksplozijski zaštićenog elektromotora. U Hrvatskoj je ova metoda našla značajnu primjenu kod dijagnostike protueksplozijski zaštićenih elektromotornih pogona u naftnoj industriji (rafinerije nafte, naftne platforme) te u drvnoj i kemijskoj industriji.

Osnovna shema generatora udarnog napona s jednostrukim udarnim krugom, koji se koristi u ovoj dijagnostičkoj metodi prikazan je na slici 3.5 dok je varijanta s dvostrukim udarnim krugom prikazana na slici 3.6 [27].



Slika 3.5. Generator udarnog napona s jednostrukim udarnim krugom

- RT - regulacijski transformator
- P - prekidač
- $\hat{U}_m$  - vršna vrijednost ispitnog napona
- $C_p$  - kapacitet ispitivanog objekta
- R - otpor izolacije ispitivanog objekta
- KO - katodni osciloskop
- $C_s$  - udarni kondenzator
- D - kapacitivni djelitelj napona
- PT - ispitni transformator
- $V_s$  - voltmetar udarnog napona



Slika 3.6. Generator udarnog napona s dvostrukim udarnim krugom

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

Pri ispitivanju s udarnim naponom se u ispitivani objekt (npr. namot statora asinkronog elektromotora) šalje impuls dobiven pražnjenjem udarnog kondenzatora  $C_s$ . Svaki ispitivani objekt (namot) 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 3.6 [27].

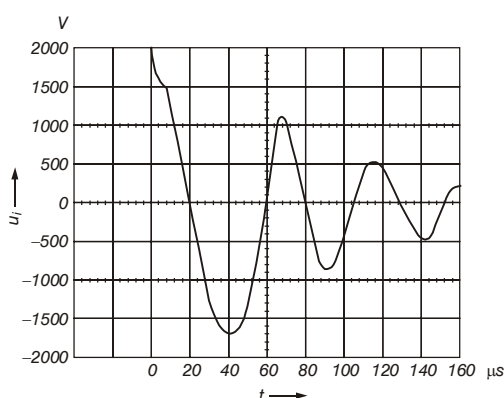
$$f = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot (C_S + C_P)}} \quad (3.6)$$

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, ustanoviti 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 faze). 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.

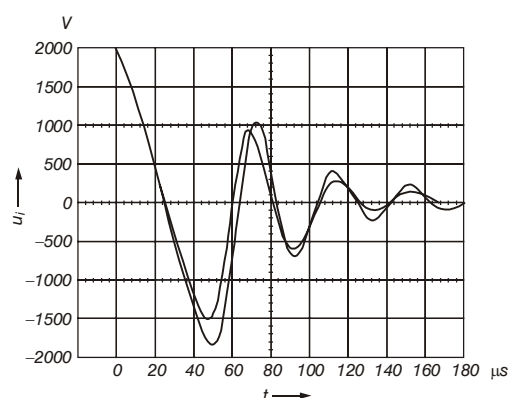
Ispitni uređaj daje vrlo kratke impulse (oko 1  $\mu$ s), male energije, pojedinačno ili u slijedu frekvencije 50 Hz. Ispitivanje udarnim naponom se može primjeniti u slijedeće svrhe [27]:

- ispitivanje simetričnosti namota, odnosno ispravnosti spajanja svitaka u faze,
- određivanje smjera vrtnje i smjera okretnog polja na stezaljkama stroja,
- ispitivanje međuzavojne izolacije svitaka namota statora,
- ispitivanje međuzavojne izolacije kompletnog rotorskog namota (kod generatora),
- brzo određivanje stanja osnovne izolacije namota nakon velikih nesreća – poplava, požara,
- praćenje stanja izolacijskog sustava električnih strojeva kroz duži vremenski period,
- određivanja ekscentričnosti zračnog rasporeda.

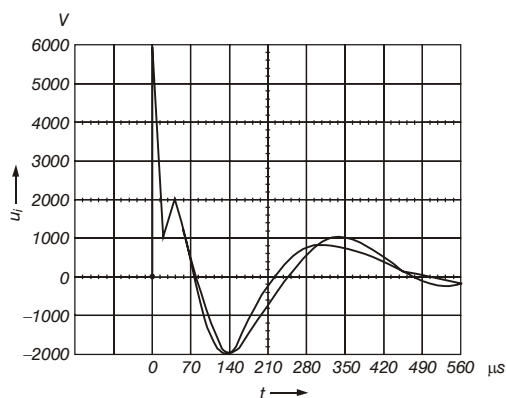
Na slikama 3.7 do 3.11, preuzetim iz [26], su prikazane tipične krivulje uzbuđenog titrajnog napona s opisom nedostataka ili kvara na električnom stroju.



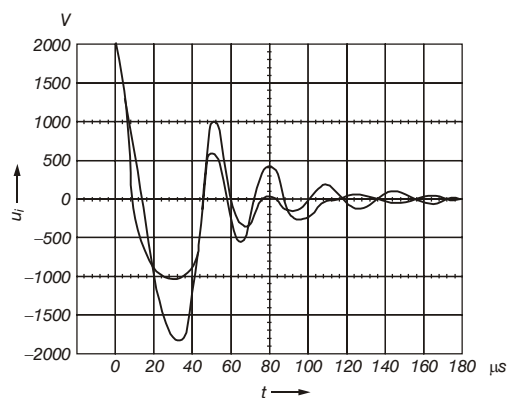
Slika 3.7. Simetričan namot - dvije identične poklopljene krivulje



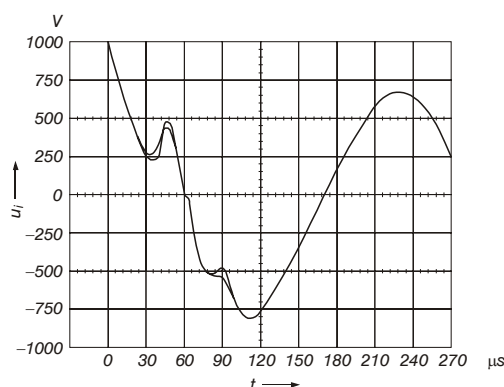
Slika 3.8. Nesimetričan namot - dvije različite krivulje



Slika 3.9. Nejednoliki zračni raspod (zakretanjem rotora mijenja se položaj krivulja)



Slika 3.10. Spoj među zavojima



Slika 3.11. Kvar kaveznog rotora (odlemljeni štapovi od prstena)

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 zahtjevana, no potrebno je veliko iskustvo u tumačenju dobivenih odziva. Dijagnostika elektromotora pomoću udarnog napona pripada "OFF-LINE" skupini dijagnostičkih metoda, što uobičajeno znači isključenje elektromotora iz pogona i barem djelomično rastavljanje, takva mjerenja se provode na posebnim ispitnim mjestima tj. izvan prostora ugroženog eksplozijom. Budući je određena ispitivanja moguće obaviti bez rastavljanja motora (rotor unutar statora), npr. ispitivanje međuzavojne izolacije svitaka, javljaju se ideje da se spomenuta mjerenja provedu na mjestu ugradnje motora tj. u prostoru ugroženim eksplozijom. Razmišljanja se temelje na uporabi uređaja udarnog napona male energije.

Ispitivanja udarnim naponom, u prostorima ugroženim eksplozijom (uz prisutnost eksplozivne atmosfere), nisu prihvatljiva bez osiguranja da energija strujnih krugova bude pouzdano nedovoljna za paljenje eksplozivne atmosfere što je temeljni princip vrste protueksplozijske zaštite "samosigurnost". Pri tome bi trebalo udovoljiti cijelom nizu zahtjeva (npr. strujni krug u normalnom radu ili čak i uz jedan kvar ne smije zapaliti eksplozivnu atmosferu, limitirani su najveći iznosi vanjskog induktiviteta ovisno o najmanjoj energiji paljenja i sl.) Mjerna oprema i mjerna metoda temeljena na ovim zahtjevima do sada u Hrvatskoj, koliko je poznato, nije primijenjena. Stoga se ispitivanja udarnim naponom mogu provoditi isključivo van prostora ugroženih eksplozijom odnosno bez prisutnosti eksplozivne atmosfere.

### 3.3 Dijagnostika kaveznih rotora protueksplozijski zaštićenih asinkronih elektromotora mjerenjem otpora štapova i prstena

Od svih kvarova odnosno oštećenja asinkronih elektromotora najveći udio imaju oštećenja rotora, 31% od svih kvarova [35]. Tako visok udio u svim oštećenjima se čini neočekivanim obzirom na robusnost samog rotora. Ovisno o načinu izrade razlikujemo dvije vrste kaveznih rotora – lijevani kavez i lemljeni kavez. Lijevani kavezi se u pravilu koriste kod motora malih i srednjih snaga i najčešće su štapovi zajedno s kratkospojnim prstenima izrađeni od aluminijskog paketa koji se ulijeva u limeni paket. Kod motora većih snaga se koriste lemljeni kavezi kod kojih se, u utore limenog paketa, ulažu štapovi i tvrdo leme s kratkospojnim prstenovima. Štapovi su obično od bakra, a kod pogona s teškim zaletima se koriste i bronca ili mesing.

Uslijed nehomogenosti materijala (npr. nečistoće u aluminiju) kao i uslijed samog tehnološkog procesa izrade se uočavaju, i kod novih motora, određeni nedostaci. Motori s "slabim rotorima" imaju sljedeće nedostatke [35]:

- nisku korisnost,
- povećanu buku i vibracije,
- smanjeni vijek trajanja.

Pravovremeno otkrivanje spomenutih nedostataka povećava pouzdanost pogona, smanjuje troškove (električne energije), a u prostorima ugroženim eksplozijom, što je od posebne važnosti, smanjuje mogućnost nastanka eksplozije. Neki nedostaci kao npr. vibracije su česti uzrok nastajanja električnih lukova kao i postepenog nagaranja rotorskih limova. Povećana termička naprezanja dovode do povećanih temperatura dijelova rotora, nejednolikih istezanja štapova u aksijalnom smjeru što ima za posljedicu razlabavljenje rotorskog paketa. Prekid štapa ili kontakta štap-prsten uzrokuje zatvaranje struja susjednih štapova kroz zube rotorskog paketa što stvara jako lokalno zagrijavanje površine rotora, što je posebno opasno kod motora u protueksplozijskoj izvedbi povećana sigurnost – "Ex e". Spomenuti nedostaci rotora, u prostorima ugroženim eksplozijom, predstavljaju ozbiljne uzročnike paljenja potencijalno prisutne eksplozivne atmosfere. Iz navedenih razloga je posebno važna provjera stanja kratkospojnog kaveza. Jedna od čestih i razvijenih metoda je usporedbena metoda mjerenja električnog otpora pojedinih štapova istog rotora (ili štapova dva rotora). Sva mjerenja se provode na rotoru koji je izvan statora tj. elektromotor je izvan pogona ("OFF LINE" dijagnostička metoda).

Kod lijevanih kaveza nejednolik je električni otpor pojedinih štapova i električni otpor dijelova (segmenata) prstena [35],

- električni otpor štapa  $R_{st} \neq \text{konst.}$
- električni otpor prstena  $R_{pr} \neq \text{konst.}$

Karakteristika lemljenih kaveza je nejednoliki kontaktni otpor između štapa i kratkospojnog prstena tj.,

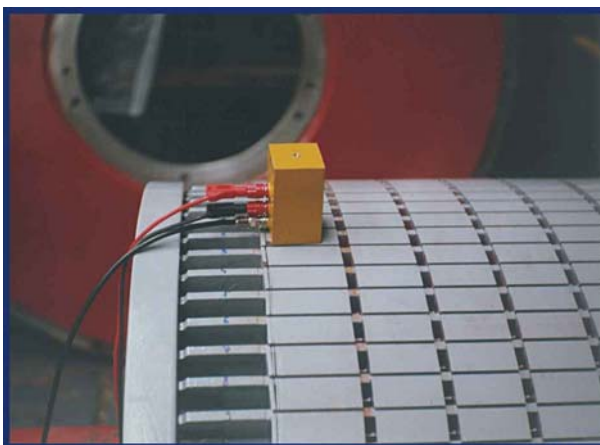
- kontaktni otpor između štapa i prstena  $R_k \neq \text{konst.}$

Mjerna oprema [22] se sastoji u primjeni uzбудnih (US) i mjernih (MS) senzora. Uzбудni senzor služi za induciranje napona u mjerenom (ispitivanom) štapu. Uzбудni senzor je napajan izmjeničnim naponom frekvencije 50 ili 60 Hz. Uslijed djelovanja uzbudnog senzora kroz štap (zbog induciranog napona u štapu) teče struja. Za mjerenje spomenute struje se koristi mjerni (MS) senzor. Pri ovom mjernom postupku rotor miruje. Moguća je i primjena mjerne metode sa rotorom u vrtnji (na posebnom stroju) i uz primjenu permanentnih magneta umjesto uzbudnog (US) senzora. Glavni nedostatak ove metode je u osiguranju dovoljne energije (indukcije) permanentnog magneta te u otežanom tumačenju dobivenog oscilograma budući da svi štapovi prolaze ispod permanentnog magneta te je teško odrediti koji je štap u kvaru. Također se

javljaju problemi usklađenosti brzine vrtnje rotora i vremenske baze osciloskopa. Spomenuta je metoda iz navedenih razloga manje u uporabi od metode s uzбудnim svitkom, te ju ovdje nećemo dalje razmatrati. Položaj uzbudnog (US) i mjernog (MS) senzora prikazan je na slikama 3.12, 3.13 te 3.14. Slike su preuzete iz literature [22].



*Slika 3.12. Položaj uzbudnog senzora pri mjerenju vodljivosti rotorskih štapova*



*Slika 3.13. Položaj mjernog senzora pri mjerenju vodljivosti rotorskih štapova*



*Slika 3.14. Mjerenje vodljivosti rotorskih štapova*

Inducirani napon u mjernom senzoru iznosi [22]:

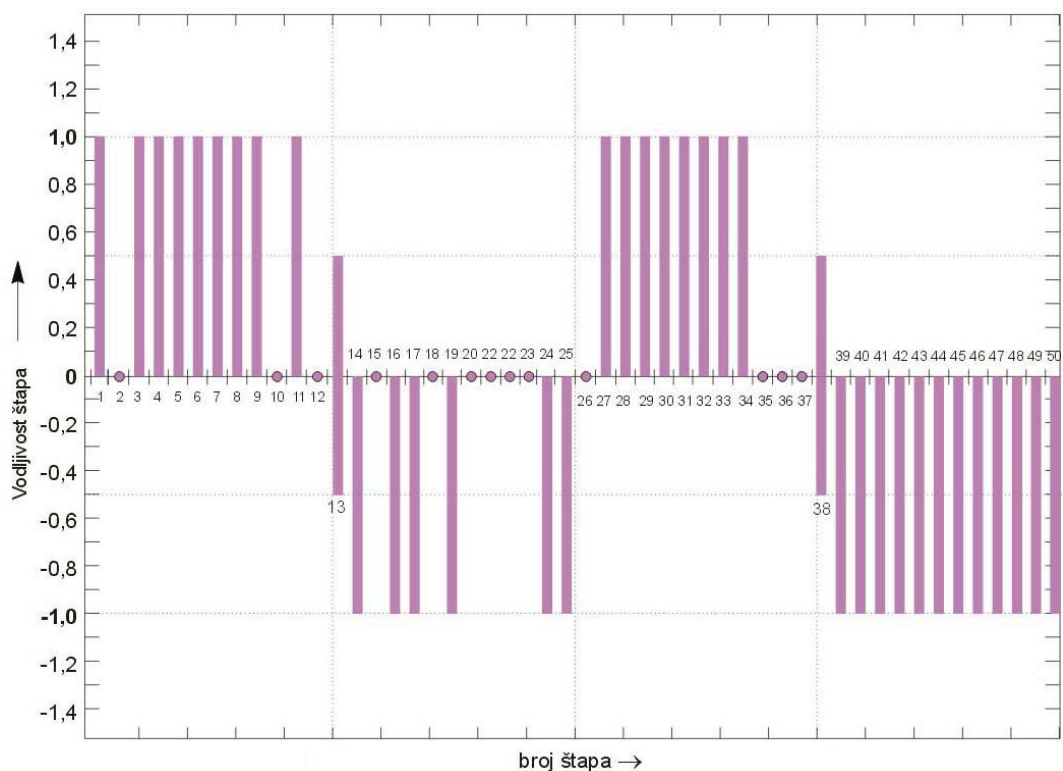
$$U_{in} = \frac{k_s \cdot M_{um}}{L} \cdot Y = K \cdot Y \quad (3.7)$$

gdje je:

- $U_{in}$  - inducirani napon u mjernom senzoru (V),
- $k_s$  - faktor ovisan o primijenjenim senzorima,
- $M_{um}$  - međuinduktivitet između uzbuđenog i mjernog senzora (H),
- $L$  - razmak između uzbuđenog i mjernog senzora (m),
- $Y$  - realna vodljivost kaveza (S),
- $K$  - 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 (mjerenog) štapa, kontaktnih otpora štap-kratkospojni prsten i otpora serijsko-paralelnog spoja segmenta prstena i preostalih štapova (svih osim mjerenog).

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. Kako je ranije rečeno ocjena kvalitete pojedinih štapova se temelji na usporednoj metodi između vodljivosti svih štapova jednog rotora. Tipičan primjer rezultata mjerenja je prikazan na slici 3.15 preuzetog iz literature [22].



Slika 3.15. Rezultati mjerenja vodljivosti rotorskih štapova kaveznog rotora

Kod (vrlo) dobrih rotora je odstupanje vodljivosti pojedinih štapova u granicama  $\pm 5\%$  srednje vrijednosti svih štapova u rotoru, dok je kod još upotrebljivih štapova vodljivost pojedinih štapova u granicama  $\pm 10\%$ . Budući je riječ o OFF-LINE metodi, (mjerenja se provode nakon zaustavljanja rada i pripreme motora za ispitivanje) mjerenje se uobičajeno provodi u ispitnoj stanici tj. izvan prostora ugroženog eksplozijom.

U tom smislu je ispitivanje protueksplozijski zaštićenih elektromotora identično ispitivanjima elektromotora standardne industrijske izvedbe. Nema posebnih zahtjeva na izvedbu mjerne opreme budući se ispitivanje provodi van zone opasnosti.

### 3.4 Nadzor električnih strojeva (asinkronih elektromotora) analizom termičkog stanja

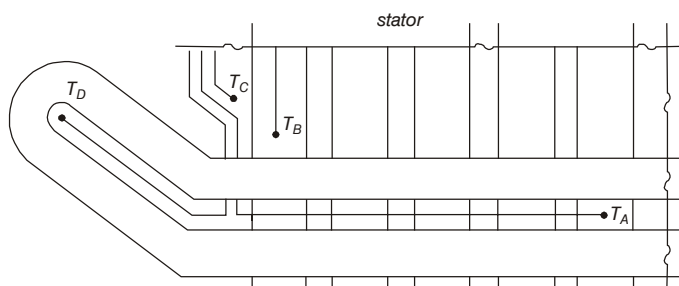
Granice korištenja električnih strojeva su uvelike određene najvećom temperaturom koju izolacija stroja može izdržati. Često se (pri proizvodnji strojeva i kasnije pri dijagnostici stroja) ispitivanje svojstava provodi mjerenjem temperature namota odnosno temperature stroja. Većina izolacijskih materijala niskonaponskih asinkronih motora je organskog porijekla i osjetljiva je na prekoračenja dopuštenih najvećih temperatura. Praćenje (trajno ili povremeno mjerenje) temperature asinkronog elektromotora ima važnu ulogu u procjeni stanja stroja i njegovog životnog vijeka, a posebice kod pogona u prostorima ugroženim eksplozijom gdje povišena temperatura (iznad one za koju je motor izrađen i certificiran) predstavlja nedopušteno stanje u radu motora, odnosno direktnu opasnost od eksplozije. Presudni su odnosi temperature motora i temperature paljenja medija u čijem je okruženju instaliran elektromotor.

Tri su osnovna principa primijenjena u nadzoru temperature stroja [11]:

- mjerenje lokalne temperature stroja ugrađenim temperaturnim senzorima,
- termičko modeliranje, uporaba termalne slike koja se dobiva odgovarajućim veličinama, kako bi se nadzirala temperatura najtoplijeg mjesta u stroju,
- mjerenjem distribuiranih temperatura u stroju ili grubo mjerenje temperature rashladnog medija.

Lokalno mjerenje temperature se provodi temperaturnim senzorima. Danas se uglavnom koriste dvije vrste spomenutih senzora i to NTC (negativni temperaturni koeficijent) i PTC (pozitivni temperaturni koeficijent). Mnogi današnji programibilni kontroleri su predviđeni za rad s PT-100 sondama za nadzor temperature. Za promatranje aktivnog dijela stroja senzori su obično smješteni u statorskim namotima i u statorskoj jezgri. Senzori mogu biti smješteni i u ležajevima kako bi se otkrilo pregrijavanje istih.

Problemi kod mjerenja lokalnih temperatura se ogledaju u nepristupačnosti točaka mjerenja. Temperaturni senzori su u pravilu metalni uređaji i ne mogu biti smješteni na najtoplije mjesto direktno na bakar namota budući da zahtijevaju električnu izolaciju. Najtoplija mjesta (mogu biti između zavoja, na kraju zavoja i sl.) ovise o termičkom dizajnu stroja, uvjetima hlađenja i sl. te ih je teško odrediti tj. postoji rizik da lokalna vruća mjesta budu previđena. Mogući raspored temperaturnih senzora prikazan je na slici 3.16 [11].



Slika 3.16. Raspored temperaturnih senzora u stroju

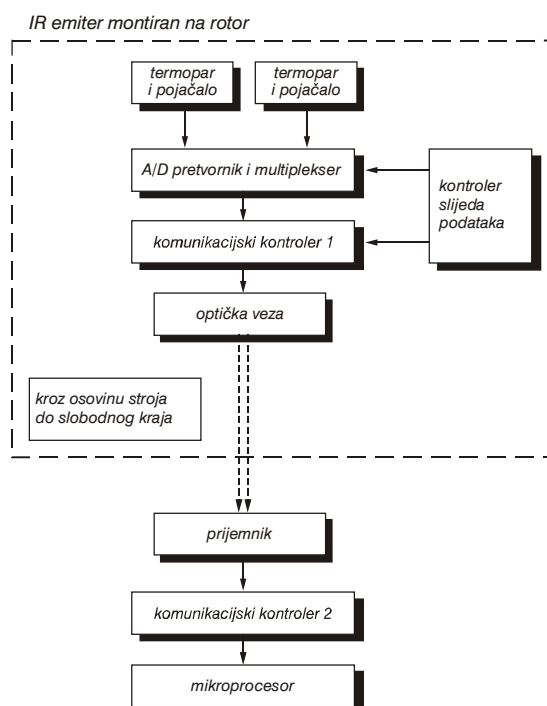
$T_A$  je ugrađen u utoru između gornjeg i donjeg svitka,  $T_B$  u lameliranoj jezgri,  $T_C$  je montiran na potencijalno vrućoj komponenti (npr. stezna ploča), dok je  $T_D$  ugrađen u glavu namota.

Kako je ranije spomenuto slabost ove metode je u tome da su termoparovi i otpornički termometri metalni uređaji i ne mogu biti smješteni na bakru namota (gdje i nastaje toplina uslijed Joulovih gubitaka) nego su smješteni na izolaciju vodiča. Sami senzori su također dodatno izolirani. Mjerena (izmjerena) temperatura nije temperatura samog namota (vodiča) nego tek njezina slika.

Mjerena se temperatura  $T_l$  približava temperaturi aktivnog djela  $T_c$  (koju stvarno želimo nadzirati) ukoliko je debljina dodatne izolacije  $t_2$  upotrijebljena preko ugrađenih temperaturnih senzora dovoljno velika u usporedbi s glavnom izolacijom  $t_1$ .

Sva dosadašnja razmatranja su se odnosila na stacionarne dijelove motora gdje su bile i ugrađene mjerne sonde. Međutim asinkroni motori su posebno osjetljivi na temperature rotora u kojem su gubici vrlo veliki. Iz navedenog je vidljivo da se temperatura rotora može naglo podići do vrijednosti koje mogu razoriti spojeve štapova i prstena odnosno i rotor u cjelini. Ranije su se za mjerenje temperatura rotora koristile metode uporabom papira osjetljivog na temperaturu ili metode pomoću termopara spojenog pomoću kliznih prstenova. Spomenute metode nisu bile dovoljno pouzdane za primjenu u sustavima monitoringa (nadzora). Danas se razvijaju tehnike i metode koje bi bile dovoljno pouzdane za potrebe monitoringa, a temeljene su na optičkom povezivanju između rotora i jedinice za dekodiranje na statoru.

Metoda bi mogla naći lakšu primjenu u dijagnostici "Ex p" i "Ex d" elektromotora, dok bi za primjenu kod "Ex e" elektromotora trebalo riješiti zahtjevnije pitanje protueksplozijske zaštite sustava povezivanja rotor – stator, budući se nadzor provodi u prostoru ugroženom eksplozijom (ON-LINE metoda – pogon u radu). Shematski prikaz same metode je prikazan na slici 3.17 [11].



Slika 3.17. Shematski prikaz metode za monitoring temperature rotora

Mjerenje lokalne temperature je relativno jednostavna metoda iz skupine ON-LINE metoda (senzori su ugrađeni u motor u fazi proizvodnje), ali stalno ostaje sumnja da senzori temperature nisu smješteni u najtoplijim točkama. Za rješenje ovog problema (koji je bio izraženiji kod transformatora) je razvijena metoda termičke slike najtoplijih mjesta.

Termička slika (najtoplija mjesta) elektromotora se temelji na termičkom modelu koji se stvara u mikroprocesoru, na temelju signala okolne temperature zraka i statorske struje. Na taj način se mogu proračunati predvidljive temperature raznih ključnih točaka u elektromotoru. Za primjenu ove metode nužno je poznavanje konstrukcijskih karakteristika motora koje su nužne za generiranje termičkog modela u procesoru.

Gruba mjerenja (npr. rashladnog medija električnog stroja) se često primjenjuju na većini električnih strojeva (npr. generatori) i jasno prikazuju kada je stroj preopterećen ili sustav hlađenja ne radi ispravno. Metoda je relativno neosjetljiva na sva lokalna pregrijavanja i nije našla značajnu primjenu u monitoringu asinkronih motora.

Napori u razvoju monitoringa analizom termičkog stanja su usmjereni ka razvijanju metode kojom bi indikacija jedne visoke temperature dobivene od uređaja ugrađenog u električnom stroju dala kompletnu sliku. Nadzor i zaštita elektromotora na temelju termičkog modeliranja za sada je relativno rizično radi nepredvidivih stanja u pogonu (ispad ventilatora hlađenja, nagli porast vanjske temperature i slično).

Mjerenje temperature se danas najčešće provodi na "tradicionalni" način i posebno je opravdano kod velikih jedinica i važnih EMP-a.

Uspoređivanjem vrijednosti dobivenih temperatura (kroz periodička mjerenja) može se zaključivati o stanju elektromotora, što se može primijeniti u dijagnostičke svrhe. Mjerenje temperature se također koristi u zaštitne svrhe - nadzor (porastom temperature preko najveće dopuštene vrijednosti automatski se isključuje elektromotor). Mjerenje temperature, u ove svrhe, se uobičajeno provodi kontinuirano.

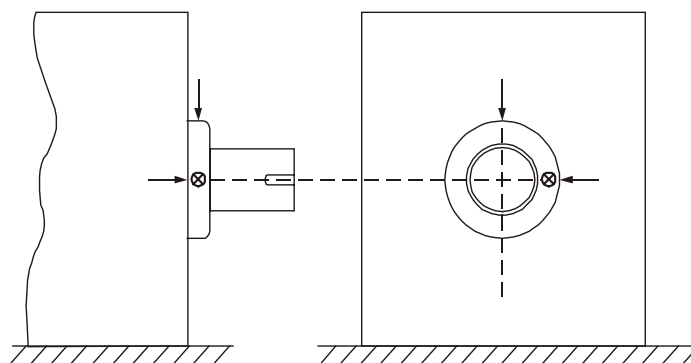
Kod EMP-a u prostorima ugroženim eksplozijom je također česta primjena nadzora elektromotora analizom termičkog stanja, a za neke pogone je i zahtijevana prema HRN IEC 60079-14 (npr. za elektromotore napajane promjenjivom frekvencijom i naponom) gdje je zahtijevana direktna kontrola temperature i zaštitni uređaj koji će djelovati na isklop motora.

Nadzor električnih strojeva analizom termičkog stupnja je ON-LINE metoda koja se primjenjuje kada je pogon u radu tj. uz mogućnost prisutnosti eksplozivne atmosfere. U tom smislu se primjenjuju temperaturne sonde u protueksplozijski zaštićenoj izvedbi (npr. ugrađene u "Ex d" kućišta elektromotora ili spojene na "Ex i" strujne krugove).

### **3.5 Dijagnostika asinkronih elektromotora temeljem analize vibracija**

Vibracije koje se javljaju u elektromotornim pogonima možemo podijeliti na elektromagnetske (ovisne o indukciji, frekvenciji i obliku napona napajanja, klizanju, vrsti stroja i sl.), mehaničke vibracije (neizbalansiranost rotora, oštećenja u ležajevima, loši temelji i sl.), te aerodinamičke koje su posljedica strujanja zraka oko pokretnih dijelova stroja. Mjerenjem i analizom vibracija ležaja motora može se zaključiti o stanju rotora tj. moguće je u spektru vibracija prepoznati statičku i dinamičku neuravnoteženost rotora, necentriranost osovine, provjes osovine ili oštećenja ležaja.

Međunarodnim normama, smjernicama i preporukama je definirano da se mjerenje vibracija provodi na ležajevima, budući da su kod vibracija elektromotora najizraženije vibracije osovine rotora. Mogući raspored mjernih pretvornika (elektrodinamički ili piezoelektrični) prikazan je na slici 3.18.

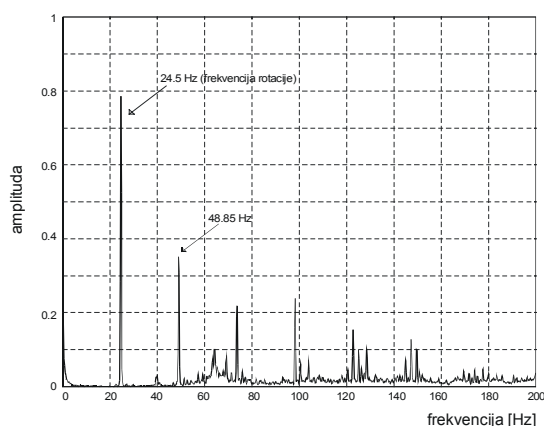


Slika 3.18. Mogući raspored mjernih davača za mjerenje vibracija

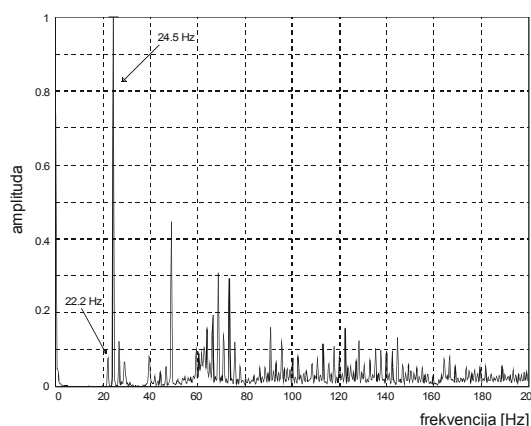
Prednost vibracijske dijagnostike je u tome što se ispitivanja provode u pogonskim uvjetima tj. bez zaustavljanja pogona (ON-LINE metoda). Ugradnja pretvornika je jednostavna (izrada provrta s odgovarajućim navojem).

Prekid štapa kaveznog rotora izaziva električnu nesimetriju u rotoru, a što ima za posljedicu oscilacije brzine vrtnje. Prema [15] zaključak o stanju kaveza se donosi na temelju omjera amplituda bočnih harmonika oko frekvencije rotacije i amplitude vibracija na frekvenciji rotacije. Ako je taj omjer manji od 56 puta ili 35 dB vjerojatno postoji prekid u kavezu, a ako je omjer veći od 50 dB vjerojatno je kavez ispravan. Kod spektra vibracija motora s oštećenim rotorom (prekid štapa) javljaju se dodatni bočni harmonici s razmakom frekvencija jednakim dvostrukoj frekvenciji klizanja, koji su smješteni oko frekvencije rotacije i njenih višekratnika ( $v \cdot f_R \pm 2 \cdot s \cdot f_l$ ), gdje je  $f_R$  osnovni harmonik frekvencije rotacije,  $s$  je klizanje,  $f_l$  je frekvencija osnovnog harmonika napona napajanja statora, a  $v = 1, 2, 3 \dots$

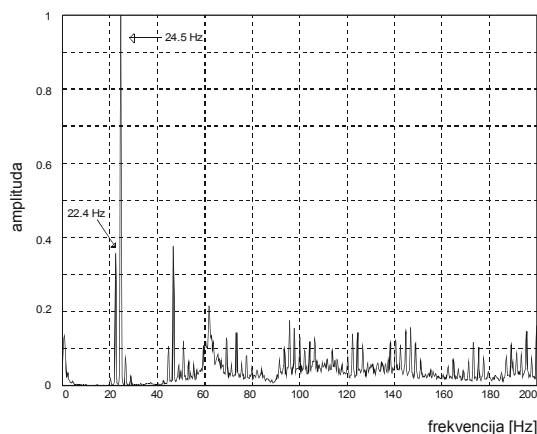
Na slici 3.19, preuzetoj prema literaturi [15], su prikazani frekvencijski spektri radijalnih vibracija ležaja s ispravnim rotorom, s jednim prekinutim štapom, s pet prekinutih štapova od kojih su 2 susjedna, te s 8 prekinutih štapova od kojih je 5 susjednih. Frekvencija  $f_R$  iznosi 24.45 Hz ( $1467 \text{ min}^{-1}$ ),  $2 \cdot s \cdot f_l = 2.2 \text{ Hz}$ ,  $f_l = 50 \text{ Hz}$ .



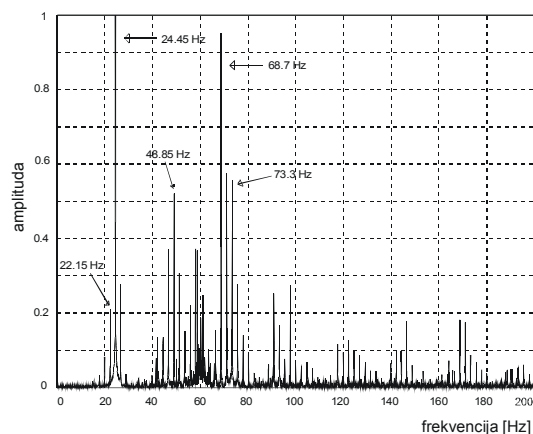
a) ispravan rotor



b) prekid jednog štapa



c) prekid 5 štapova, dva su susjedna štapa



d) prekid 8 štapova, pet je susjednih štapova

Slika 3.19. Frekvencijski spektri radijalnih vibracija ležaja

Aksijalne vibracije nastaju djelovanjem pulzirajuće sile u smjeru osovine. Uzroci pojave te sile mogu biti elektromagnetskog ili mehaničkog porijekla.

Mehaničke sile se javljaju npr. kod nepravilnosti pri spajanju elektromotora s radnim strojem pri čemu i mala odstupanja u spoju mogu izazvati velike vibracije u aksijalnom smjeru.

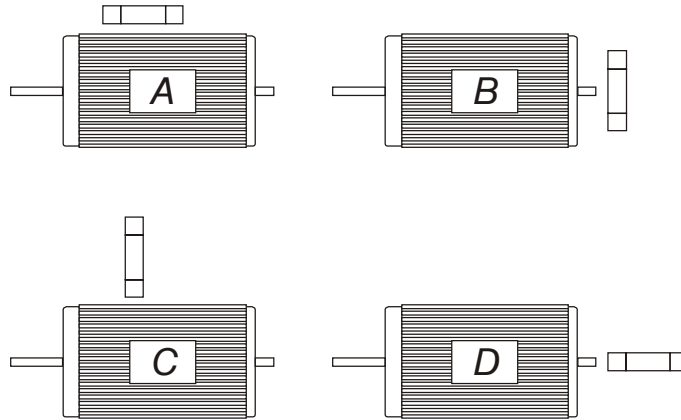
Elektromagnetski izazvani aksijalni vibracija kod simetričnog stroja neće biti. One se javljaju kod nesimetrija magnetskog polja u stroju. Jedan od uzroka nastanka nesimetrija magnetskog polja je nesimetrija u rasporedu struja koja može biti izazvana oštećenjem štapova u rotoru. Upravo je ova činjenica iskorištena kod dijagnostike asinkronih motora temeljem analize vibracija. Utjecaj prekida štapa na nesimetrije magnetskog polja stroja detaljnije će biti prikazan u četvrtom poglavlju ovog rada.

Ovdje je važno naglasiti da osnovni harmonički član sile na obodu uzrokuje vibraciju s jednim titrajem za vrijeme jednog punog okretaja polja statora. Radi dodatnih harmoničkih članova raspodjele obodne sile javljaju se dodatne komponente vibracija ovisne o klizanju, izazvane inverznom komponentom raspodjele sila [20].

Primjena dijagnostike metodom analize vibracija je moguća i na elektromotore u prostorima ugroženim eksplozijom tj. uz prisutnost eksplozivne atmosfere, budući je moguće provesti odgovarajuću protueksplozijsku zaštitu pretvornika (npr. oblaganje "Ex m" ili samosigurnost "Ex i"). Kao i većina dijagnostičkih metoda i ova metoda zahtjeva veliko iskustvo i relativno složenu mjernu opremu. Teorijski i praktično je ova metoda detaljnije opisana u [11] [15] [20] [40] [56].

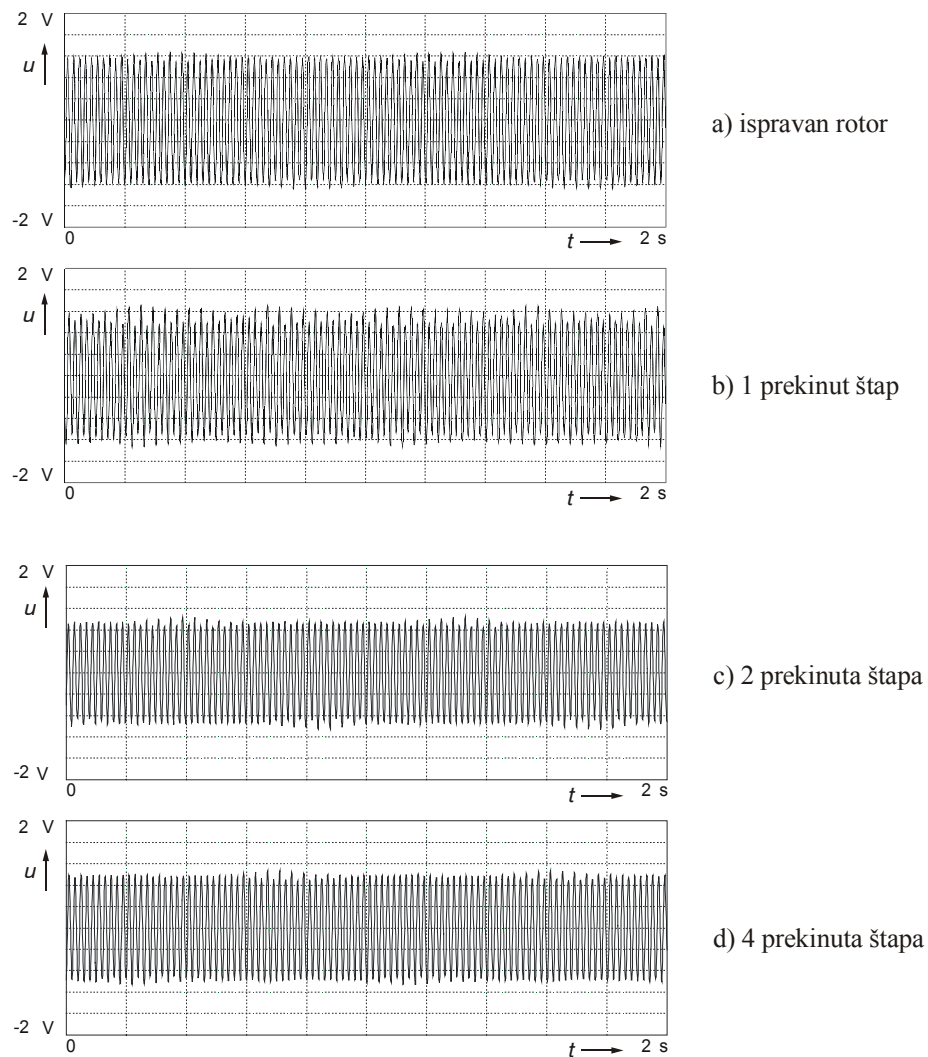
### 3.6 Dijagnostika asinkronih elektromotora mjerenjem rasipnih magnetskih tokova (magnetski monitoring)

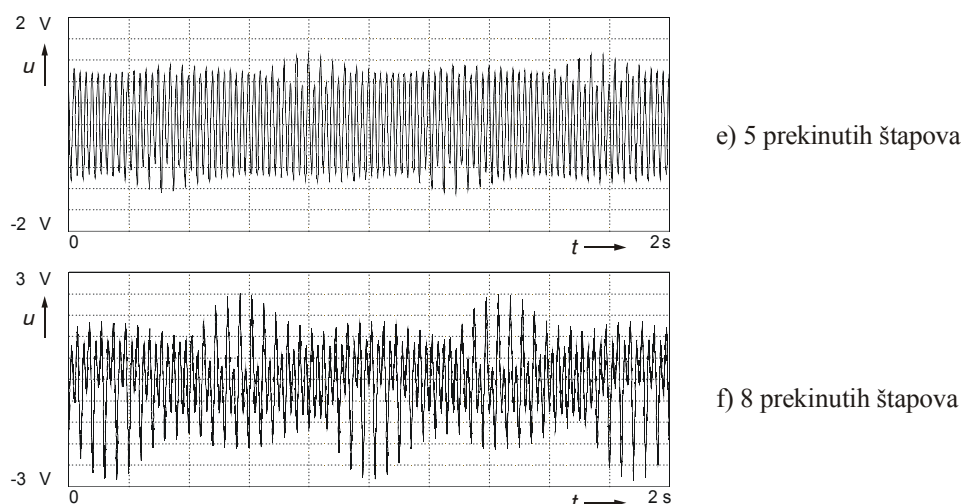
Ova "ON-LINE" metoda se temelji na analizi magnetskog polja stroja. Tako se npr. pri nesimetričnom rotoru javljaju u magnetskom polju (u zračnom rasporu ali i na kućištu asinkronog motora) i komponente magnetskog (rasipnog) polja koje potječu od spomenute nesimetrije odnosno oštećenja rotora. Jaka nesimetrija magnetskog (rasipnog) polja ukazuje na lošu kvalitetu ili oštećenje rotora [12]. Informacija o nesimetriji magnetskog polja se dobiva preko mjernih senzora (temeljem induciranih napona – senzori mjere vremensku promjenu rasipnog magnetskog polja), koji mogu biti ugrađeni u elektromotor ili naknadno postavljeni izvana na motor. Na slici 3.20. su prikazani neki položaji mjernog svitka (senzora).



Slika 3.20. Položaji mjernog svitka (senzora)

Na slici 3.21, preuzetoj prema literaturi [15], prikazani su valni oblici napona mjernog senzora postavljenog na položaju A i to za ispravan rotor, te prekid 1, 2, 4, 5 ili 8 štapova.



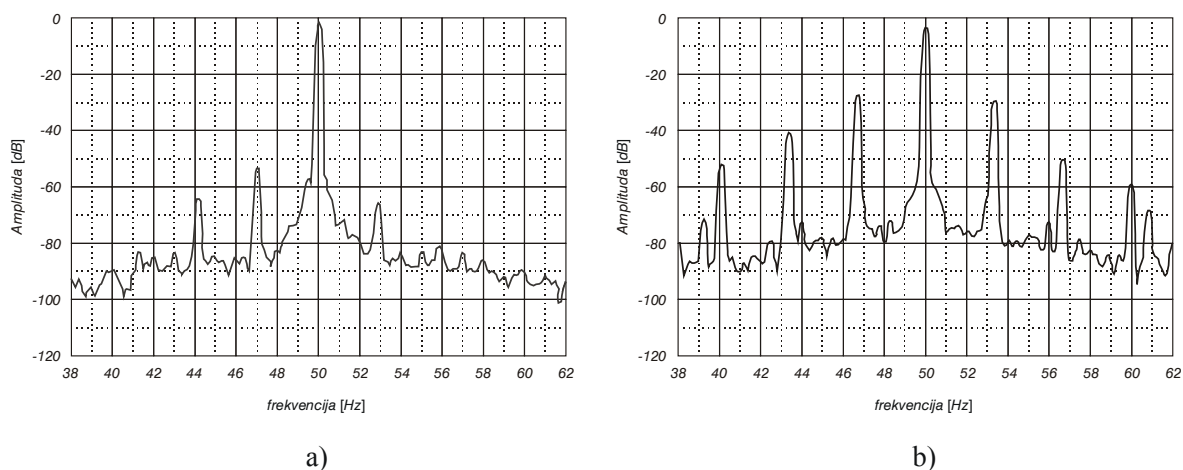


Slika 3.21. Valni oblici napona mjernog senzora  
 a) ispravan rotor  
 b) 1 prekinut štap  
 c) 2 prekinuta štapa (simetrično raspoređeni)  
 d) 4 prekinuta štapa (simetrično raspoređeni)  
 e) 5 prekinutih štapova  
 f) 8 prekinutih štapova

Iz valnih oblika je vidljivo da su valni oblici za simetrično oštećenje 2 i 4 štapa, te ispravnog rotora vrlo slični. Također nije moguće sa sigurnošću prepoznati prekid jednog štapa. Za slučaj prekida 5 i više štapova uočava se značajnija promjena valnog oblika napona što otvara mogućnost primjene ove metode u dijagnostici prekida kaveza rotora. Valni oblici, za slučaj položaja senzora na mjestu C su [15] slični kao za položaj A ali su inducirani naponi 10 puta manji. Rezultati pri položaju B i D su gotovo neprimjenjivi (u njima nema promjena valnih oblika ili frekvencijskih spektara). Mali pomaci senzora za posljedicu imaju veliku ovisnost induciranih napona (najmanje je osjetljiv položaj A). Također je na mjerne rezultate vrlo utjecajno i opterećenje stroja. Kod nazivno opterećenog elektromotora je struja kaveza rotora također nazivna, no ona je radi nejednolike vodljivosti štapova (pri oštećenju) nesimetrična. Navedena nesimetrija je vidljiva u magnetskom (rasipnom) polju odnosno na induciranom naponu mjernog senzora. U praznom hodu je rotorska struja mala te je njen utjecaj na magnetsko polje zanemariv tj. teško mjeriv.

Dobivene rezultate mjerenja (valne oblike) je moguće prikazati i u frekvencijskoj domeni. Frekvencijski spektar induciranih napona za ispravan rotor i za rotor s 7 štapova u prekidu (od ukupno 44) je prikazan na slici 3.22 preuzetoj prema literaturi [9]. Mjerni senzor je postavljen bočno (položaj A prema slici 3.20).

Frekvencije na kojima se javljaju dodatni bočni harmonici napona induciranih u senzoru, kod oštećenog rotora, biti će detaljnije određene u četvrtom poglavlju ovog rada.



Slika 3.22. Frekvencijski spektar inducirano napona  
 a) ispravan rotor (bez prekinutih štapova)  
 b) rotor s 7 prekinutih štapova (od ukupno 44)

Navedenom dijagnostičkom metodom je moguće prepoznati i spoj među zavojima statorskog namota [12], no također postoji veliki broj kvarova koji se manifestiraju na iste ili slične načine što otežava primjenu ove dijagnostičke metode.

Također je važno upozoriti na probleme vezane uz izvedbu mjernih senzora sa stanovišta protueksplozijske zaštite, budući je navedena metoda "ON-LINE" tj. primjenjuje se uz moguću prisutnost eksplozivne atmosfere.

Mjerne senzore je moguće pri proizvodnji ugraditi u sam motor (npr. senzor je u kućištu samog motora u vrsti protueksplozijske zaštite oblaganje "Ex d" ili je npr. senzor elektromotora u izvedbi povećana sigurnost "Ex e" spojen na samosiguran strujni krug "Ex i") te motor kao takav ispitati i certificirati za prostore ugrožene eksplozijom.

Vanjski mjerni senzori mogu biti izrađeni u nekoj od vrsta protueksplozijske zaštite (npr. oblaganje "Ex d" ili samosigurnost "Ex i") te sami senzori moraju biti ispitani i certificirani za prostore ugrožene eksplozijom. O posebnim zahtjevima, koji se postavljaju pred uređaje za rad u prostorima ugroženim eksplozijom će biti više riječi u zasebnom poglavlju ovog rada.

Analiza trenda promjene stanja presudna je u dijagnostici kvarova asinkronog motora. Stabilan, odnosno nepromijenjen signal, upućuje da u stroju nije došlo do promjena odnosno pogoršanja. Ukoliko se periodičkim ispitivanjima uoči znatno (dvostruko ili višestruko) povećanje pojedinih spektralnih linija to je siguran znak da oštećenja motora rastu.

Ova dijagnostička metoda detaljno je opisana u [9] [11] [12] [15].

### 3.7 Ostale metode dijagnostike asinkronog elektromotora

Uz, do sada u ovom radu ukratko prikazane dijagnostičke metode, postoji još cijeli niz "ON-LINE" i "OFF-LINE" metoda tehničke dijagnostike, kao što su npr. ultrazvučna metoda i primjena X-zraka ili snimanje fluktuacija brzine vrtnje rotora i analiza spektra jedne linijske struje namota statora [28] [10]. Također postoji niz dijagnostičkih metoda koje se temelje na kemijskim svojstvima materijala i pretežito analiziraju svojstva izolacijskih materijala stroja (koja su uglavnom organskog porijekla) [11].

Analize na temelju kemijskih svojstava su relativno složene sa zahtjevnom ispitnom opremom, što bi uz dodatne zahtjeve, koje donose prostori ugroženi eksplozijom, činilo ove metode kompliciranim za primjenu u zonama opasnosti.

Danas se pokušava ispitivati i analizirati i struje koje se induciraju uzduž osovine električnih strojeva s ciljem da se pomoću njih indiciraju stanja jezgre stroja ili oštećenja namota. Struje uzduž osovine kod velikih strojeva dosežu i velike iznose koji mogu oštetiti ili razoriti ležajeve što je također bitan razlog za nadzor ovih struja [11][48].

Unatoč velikom broju dijagnostičkih metoda, od kojih je samo manji dio prikazan i u ovom radu, uobičajeno je dovoljna uporaba jedne ili dvije sveobuhvatnih metoda dijagnostike da upozori na kvar, odnosno da osigura pouzdan i siguran pogon asinkronog motora.

## 4. ANALIZA SPEKTRA LINIJSKE STRUJE NAMOTA STATORA

Zone opasnosti, odnosno moguća prisutnost eksplozivne atmosfere u EMP-u može biti ograničavajući faktor za primjenu nekih dijagnostičkih metoda opisanih u trećem poglavlju 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.

Navedeni uvjeti mogu biti ograničavajući faktor primjene metoda koje direktno ispituju elektromotor, koji je u prostoru ugroženom eksplozijom. Takve metode, kao što su npr. magnetski monitoring, analiza odziva na udarni napon ili analiza vibracija su teže ili gotovo neprimjenjive kod EMP-a u prostoru ugroženom eksplozijom, ili je potrebno osigurati stanje "bez plina" kako bi se obavila mjerenja, što je često također teško ostvariv uvjet.

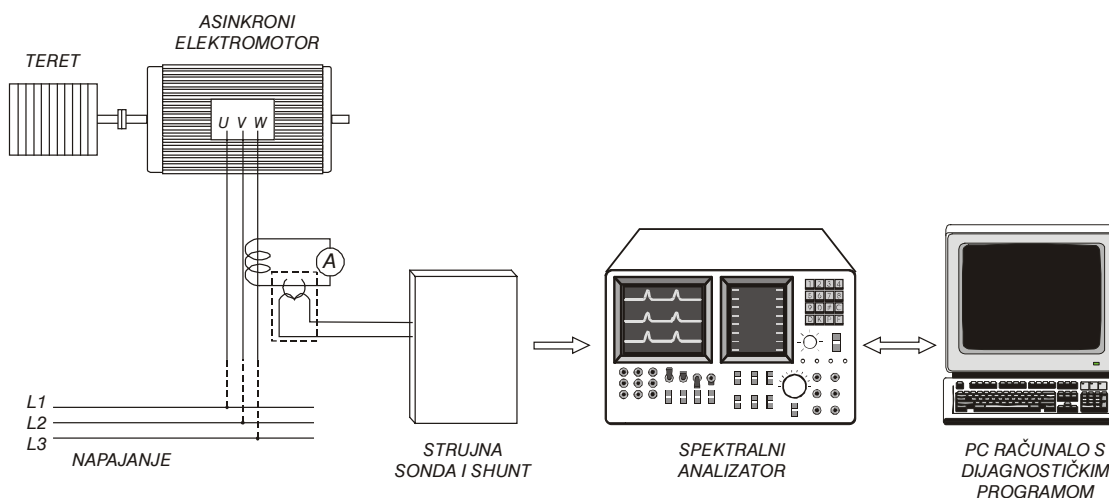
Stoga su kod dijagnostičkih ispitivanja asinkronih elektromotora u EMP-u ugroženom eksplozijom od posebne važnosti dijagnostičke metode kod kojih se sve ispitne radnje i aktivnosti obavljaju izvan prostora ugroženog eksplozijom. Jedna od takvih metoda je i analiza spektra linijske struje namota statora.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

### 4.1 Principijelna shema i osnovna ideja

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

Pretvorba se obavlja pomoću spektralnog analizatora na temelju Fourierove transformacije, o kojoj je bilo više riječi u trećem poglavlju ovog rada.

Na temelju vrijednosti (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 4.1.



Slika 4.1. Principijelna shema i potrebna oprema (metoda analize spektra statorske struje)

Svaka vrsta kvara asinkronog elektromotora uzrokuje u spektru statorske struje porast točno 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 (npr. elektromotor bez oštećenja, stanje još uvijek zadovoljavajuće, motor pred havarijom i sl.)

Iz frekvencijskog spektra statorske struje moguće je detektirati npr. slijedeće kvarove [9][16]:

- prekid ili oštećenja štapova rotora,
- prekid ili oštećenja kratkospojnog prstena,
- povećanje otpora štapova i kratkospojnog prstena radi nečistoća i poroznosti aluminijske, statičku i dinamičku ekscentričnost,
- mehaničke deformacije radi termičkih naprezanja,
- eliptičnost statorskog i rotorskog paketa,
- istrošenost ležajeva i
- oscilacije brzine vrtnje.

U ovom radu će, od navedenih kvarova, detaljno biti analizirana dinamička ekcentričnost te prekid ili oštećenja štapova kaveza rotora, kao najznačajniji kvarovi kod asinkronih elektromotora. Podaci prikupljeni pri provedbi ove dijagnostičke metode se spremaju u računalu te je moguće uspoređivati rezultate mjerenja provedenih u određenom vremenskom razdoblju na ispitivanom elektromotoru. Na taj način je moguće pratiti trend stanja motora (rotora) i ocjenjivati uspjeh poduzetih remontnih radnji.

Sami postupak dijagnostike se provodi bez ometanja pogona što je značajna prednost ove metode (ON-LINE).

Primjena analize spektra statorske struje, kao dijagnostičke metode, kod elektromotora u prostorima ugroženim eksplozijom donosi niz prednosti kao što su npr.:

- prepoznavanje kvara u fazi nastanka čime se mogu izbjeći veći kvarovi koji mogu biti uzročnici paljenja eksplozivne atmosfere,
- ispitivanja je moguće provesti u normalnim pogonskim uvjetima (i uz eventualnu prisutnost zapaljivog medija) budući se ispitivanje obavlja daleko od elektromotora tj. u neugroženom prostoru,
- temeljem rezultata ispitivanja moguće je planirati radnje održavanja i servisiranja,
- pravovremenim otkrivanjem kvarova smanjuju se troškovi održavanja i omogućuje pravovremeno pribavljanje rezervnih dijelova (posebice značajno npr. za naftne platforme),
- povećava se produktivnost elektromotora i sl.

Metoda dijagnostike analizom spektra struje statora (struje napajanja) se, ukratko prikazano, 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.

## 4.2 Dijagnostika kaveza rotora asinkronog elektromotora

### 4.2.1 Kvarovi i nesimetrije kaveza rotora

Iako jednostavne i otporne konstrukcije kavezi asinkronih elektromotora nisu tako neosjetljivi na kvarove kako se to često misli. 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 reverziziranjima (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.

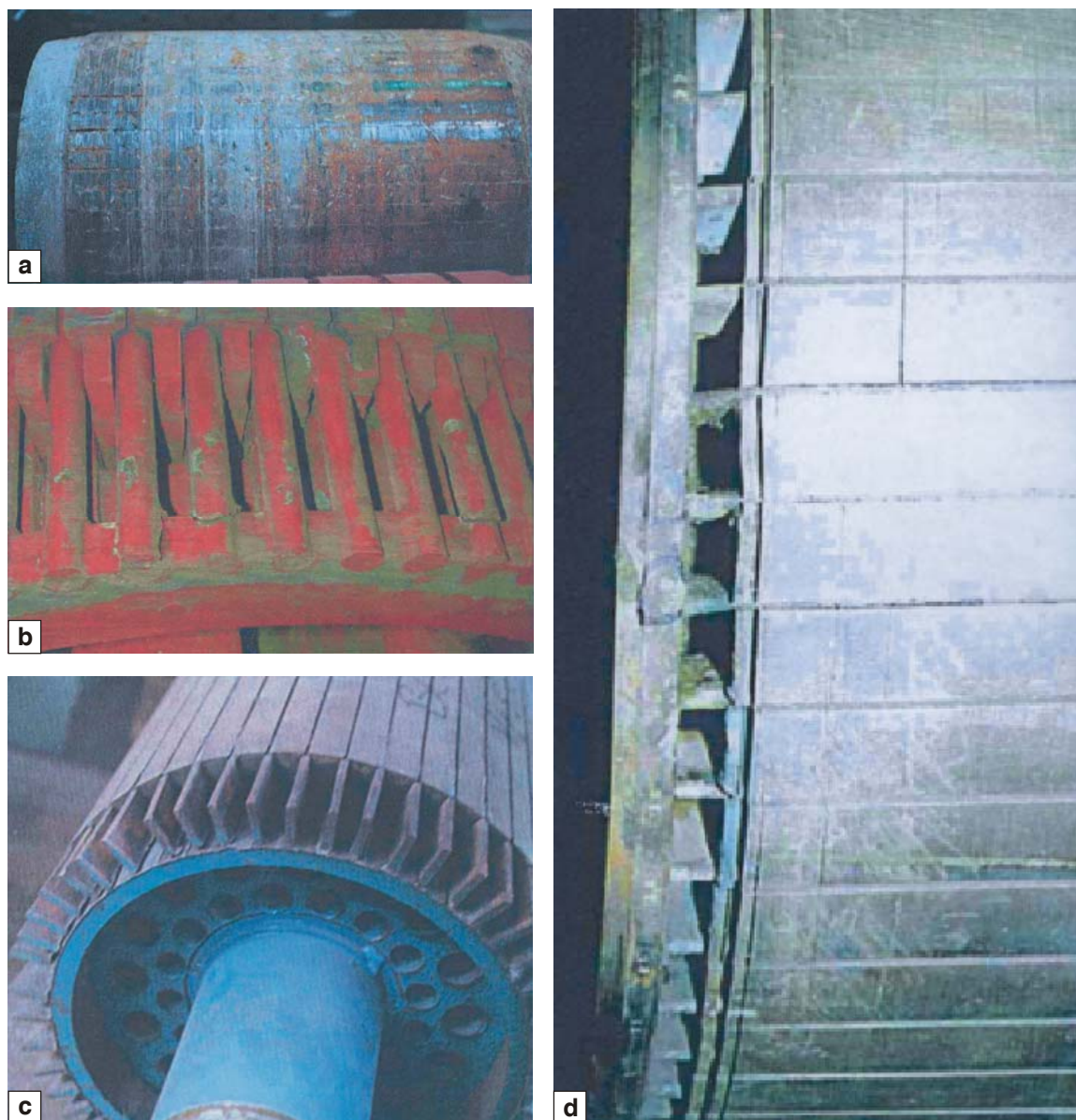
Oštećenja kaveza rotora (lomovi štapova i prstenova) u pravilu ne nastaju naglo, već započinju napuknućem na jednom mjestu što za posljedicu ima povećano lokalno zagrijavanje koje pogoduje novim lomovima, te se kvar postupno širi.

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 aluminija kod kojih su najčešće greške loši spojevi štapova i prstena.

Navedene nepravilnosti i kvarovi rotora dovode do nesimetrije otpora kaveza što uzrokuje nesimetrije magnetskog polja. Nesimetrije ne nastaju samo radi slabe tehnologije izrade lijevanih kaveza ili loših spojeva štapova i prstena. Ostali uzroci nesimetrije mogu biti [11][28]:

- štap rotora ima veliku zračnost u utoru, što u uvjetima zaleta stvara radialne sile na štap koje mogu dovesti do oštećenja ili puknuća štapa,
- oblik utora onemogućava uzdužno rastezanje štapa koje se javlja kod termičkih opterećenja, što također može biti uzrok kvara,
- mehanička napetost (zaostale sile) pri postupku izrade kaveza, koje predstavljaju potencijalni uzročnik kvara u kasnijem radu motora i sl.

Na slici 4.2., preuzetoj prema literaturi [35], su prikazani neki od (havarijski) kvarova koji se često javljaju kod rotora asinkronih elektromotora, posebice kod teških uvjeta rada.



Slika 4.2. Teška oštećenja (kvarovi) kaveza rotora asinkronog elektromotora

- a) Oštećenje lijevanog aluminijskog kaveza
- b) Oštećenje spoja štapa i prstena rotora
- c) Tipičan kvar zbog loše izrade, erozija
- d) Oštećeni spojevi i puknuća štapova

#### 4.2.2 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 4.1.a, 4.1.b i 4.1.c [8].

Brzina okretnog polja rotora prema rotoru je:

$$n_{2s} = \frac{60 \cdot f_2}{p} = \frac{60 \cdot f_1 \cdot s}{p} \quad (4.1.a)$$

dok je brzina rotora prema statoru:

$$n = n_s \cdot (1-s) = \frac{60 \cdot f_1}{p} \cdot (1-s) \quad (4.1.b)$$

što za brzinu okretnog polja rotora prema statoru daje:

$$n_{20} = n_{2s} + n = \frac{60 \cdot f_1 \cdot s}{p} + \frac{60 \cdot f_1 \cdot (1-s)}{p} = n_s \quad (4.1.c)$$

gdje je:

- $n_{20}$  – brzina okretnog polja rotora prema statoru ( $\text{min}^{-1}$ )
- $n$  – 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 [Hz]
- $n_s$  – sinkrona brzina (brzina okretnog protjecanja)
- $n_{2s}$  – brzina okretnog polja rotora prema rotoru ( $\text{min}^{-1}$ )
- $s$  – 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. [8]:

$$f_2 = \frac{(n_s - n) \cdot p}{60} \quad (4.2)$$

tj.:

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{n_s - n}{n_s} = s \quad (4.3)$$

gdje je:

- $n$  – brzina vrtnje rotora
- $f_2$  – frekvencija struje i napona u rotoru (Hz)
- $f_1$  – frekvencija napona narinutog na stator (Hz)
- $s$  – klizanje rotora

Ukupno okretno protjecanje  $\theta$  rezultanta je okretnog protjecanja  $\theta_1$  što ga stvaraju struje statora i okretnog protjecanja  $\theta_2$  koje uzrokuju struje rotora. Navedeno vrijedi i za ukupno magnetsko polje stvoreno ukupnim protjecanjem.

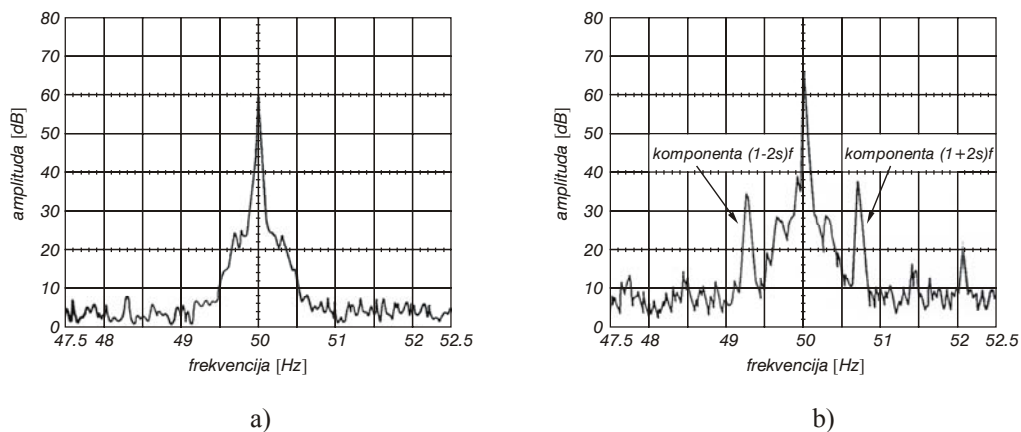
Narušavanje simetrije rotora (npr. puknuće štapa) dovodi do nesimetrije struje rotora odnosno okretnog polja rotora, koje sudjeluje u stvaranju ukupnog magnetskog polja u rasporu.

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 i najmanja nesimetrija polja može promijeniti karakteristike motora [15]: statorsku struju, brzinu vrtnje, moment, buku i vibracije.

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, najznačajnija je komponenta koja se javlja na frekvenciji  $f_1(1-2s)$ .

Amplituda ove komponente je ovisna o stupnju nesimetrije (odnos broja prekinutih štapova i ukupnog broja štapova). Temeljem odnosa amplitude ove komponente i osnovne komponente ( $f_1$ ) se zaključuje o stanju kaveza. Simetrično u odnosu na osnovnu komponentu tj. na frekvenciji  $f_1(1+2s)$  javlja se, približno iste amplitude, i komponenta koja je posljedica oscilacije brzine vrtnje [9][15].

Na slici 4.3, preuzetoj iz [14], je prikazan frekvencijski spektar struje statora asinkronog motora u okolini frekvencije osnovne komponente ( $f_1=50$  Hz) za slučaj simetričnog i nesimetričnog (s prekinutim štapovima) kaveza rotora.



Slika 4.3. Frekvencijski spektar struje statora asinkronog motora u okolini frekvencije 50 Hz

a) neoštećen kavez rotora (simetrično polje)

b) oštećen kavez rotora (nesimetrično polje), lijeva komponenta je posljedica puknuća štapova, a desna je posljedica oscilacije brzine vrtnje

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.

### 4.3 Otkrivanje ekscentričnosti analizom spektra struje statora

Ekscentričnost stroja je stanje nejednakosti zračnih rasporeda uzduž provrta stroja. Porastom ekscentričnosti rezultirajuće neuravnotežene radijalne sile magnetskog privlačenja mogu dovesti do struganja rotora o stator odnosno njihovih oštećenja. Pojava takvih oštećenja (i mehaničkih iskri koje se mogu javiti) može, u prostorima ugroženim eksplozijom, predstavljati uzročnik paljenja. Spomenuta oštećenja su posebice opasna kod elektromotora u vrsti zaštite "povećana sigurnost". Postoje dva tipa ekscentričnosti zračnog rasporeda, statička i dinamička.

Kod statičke ekscentričnosti položaj najmanje dužine radijalnog zračnog rasporeda je nepomičan u prostoru. Ova vrsta ekscentričnosti može biti uzrokovana ovalnošću statorske jezgre ili neispravnim centriranjem rotora i statora za vrijeme montaže. Ako je sklop rotorske osovine dovoljno krut, razina statičke ekscentričnosti se ne mijenja tokom vrtnje [43]. Iz navedenog je razloga "snimanje" i praćenje promjena statičke ekscentričnosti manje interesantno za dijagnostičke primjene.

U slučaju dinamičke ekscentričnosti, središte rotora nije u središtu rotacije i položaj najmanjeg zračnog rasporeda rotira zajedno s rotorom. Dinamička ekscentričnost se može pojaviti iz više razloga kao što su savijena rotorska osovinica, oštećenja ležajeva, mehanička rezonancija pri kritičnoj brzini itd. Ako dinamička ekscentričnost nije na vrijeme uočena, može doći do naglog širenja kvarova i na koncu do prekida rada elektromotora.

Prisustvo dinamičke (i statičke) ekscentričnosti se može otkriti primjenom spektralne analize struje statora [9][11][16][43][44].

Frekvencijske komponente u spektru statorske struje  $f_{eksc}$ , koje su zanimljive sa dijagnostičkog stajališta su opisane izrazom 4.4 [9][16][43]:

$$f_{eksc} = f_s \cdot \left[ (N_R \pm n_d) \cdot \frac{1-s}{p} \pm n \right] \quad (4.4)$$

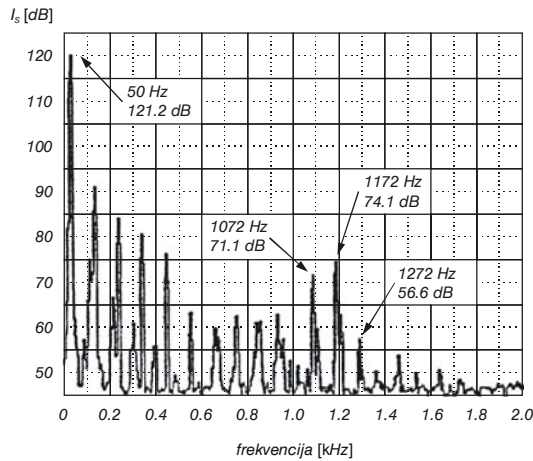
gdje je:

- $f_s$  - frekvencija napona napajanja statora [Hz]
- $N_R$  - broj utora rotora
- $n_d$  - 0 za statičku, 1,2,3,... za dinamičku ekscentričnost
- $s$  - klizanje
- $p$  - broj pari polova
- $n$  - 1, 3, 5, 7, ...

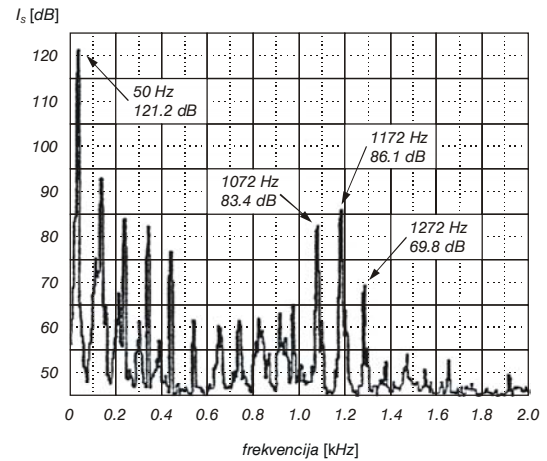
Često su u stvarnosti prisutne i statička i dinamička ekscentričnost istovremeno. Ekscentričnost zračnog rasporeda do 10% se smatra dopuštenim, no proizvođači motora drže tu razinu i nižom. Gornja granica "prihvatljive" ekscentričnosti iznosi 20%, dok je pri 50%-tnoj ili višoj razini ekscentričnosti motor nužno isključiti iz EMP-a [9][43].

Na slici 4.4, preuzetoj prema literaturi [9], je prikazan frekvencijski spektar struje statora iz kojeg je vidljiv porast frekvencijskih komponenti (opisanih jednačinom 4.4) pri povećanju statičke ekscentričnosti sa 10% (prihvatljivo) na 50% (neprihvatljivo).

Motor je napajan frekvencijom  $f_s = 50$  Hz; broj utora rotora  $N_R = 51$ ; brzina vrtnje je iznosila  $n_v = 1322 \text{ min}^{-1}$  ( $s = 0.11866$ ).



a) 10% statička ekscentričnost



b) 50% statička ekscentričnost

Slika 4.4. Frekvencijske komponente opisane izrazom 4.4 u spektru struje statora asinkronog motora

Sve frekvencijske komponente  $f_{eksc}$  opisane izrazom 4.4 nisu nužno vidljive u spektru struje statora. Prema nekim istraživanjima [43] samo će posebna kombinacija broja pari polova i broja utora rotora dati značajnije povećanje statičkom ili dinamičkom ekscentričnošću izazvanih komponenti.

Taj odnos broja pari polova  $p$  i broja utora rotora  $N_R$  za trofazni stroj je prema literaturi [43] prikazan izrazom 4.5:

$$N_R = 2 \cdot p \cdot [3 \cdot (m \pm q) \pm r] + k \quad (4.5)$$

gdje je:

$$m \pm q = 0, 1, 2, 3, \dots$$

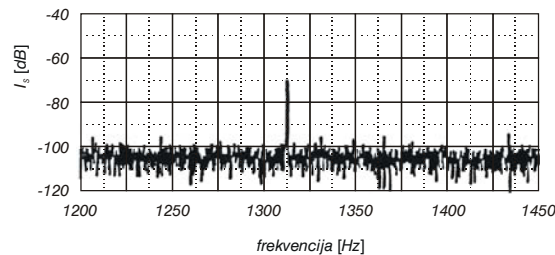
$$r = 0 \text{ ili } 1$$

$$k = 0 \text{ uz prisutnu samo dinamičku ili samo statičku ekscentričnost}$$

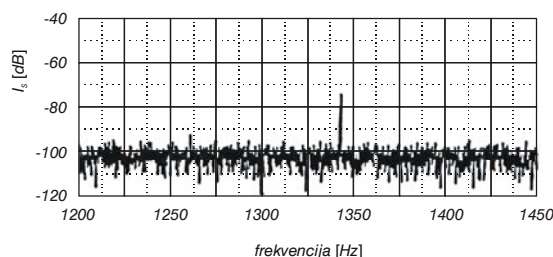
$$k = \pm 1 \text{ uz prisutnu statičku i dinamičku ekscentričnost}$$

Za motor čiji je spektar struje prikazan na slici 4.4 smo imali  $2p = 4$ , te uz  $m \pm q = 4$ ,  $r = 1$  i  $k = -1$  dobijemo  $N_R = 51$ . Navedeni motor je imao 51 utora rotora.

Na slici 4.5 je prema istraživanjima [43] prikazan simulirani spektar struje statora trofaznog asinkronog elektromotora; 60 Hz,  $2p = 4$ ;  $N_R = 43$ ;  $s = 0.029$ ,  $P = 3$  hp. Odnos  $N_R$  i  $2p$  udovoljava izrazu 4.5 uz  $m \pm q = 4$ ,  $r = 1$  i  $k = -1$ . Frekvencija izražene komponente za statičku ekscentričnost ( $n_d = 0$ ,  $n = 1$ ) prema izrazu 4.4 iznosi 1312 Hz, dok za dinamičku ekscentričnost ( $n_d = 1$ ,  $n = 1$ ) iznosi 1341 Hz.



a) 38.46% statička ekscentričnost



b) 20% dinamička ekscentričnost

Slika 4.5. Simulirani spektar struje statora

Simulacija prikazuje statičku ekscentričnost iznosa 38,46% (slika 4.5.a) i dinamičku ekscentričnost iznosa 20% (slika 4.5.b).

Rezultati dobiveni simulacijama su bili vrlo dobro podržani i eksperimentalnim rezultatima [43]. Komponente na nižim frekvencijama, koje su bile prisutne i kod ispravnog stroja, ne pokazuju značajne promjene kada je uvedena ekscentričnost. No, komponente viših frekvencija su pokazale povećanje od oko 5 dB.

Pojava karakterističnih komponenti u spektru struje statora, izazvanih statičkom i dinamičkom ekscentričnošću, je iskorištena u dijagnostičkim ("ON-LINE") metodama otkrivanja ekscentričnosti.

#### 4.4 Računanje struja u dijelovima kaveznog rotora

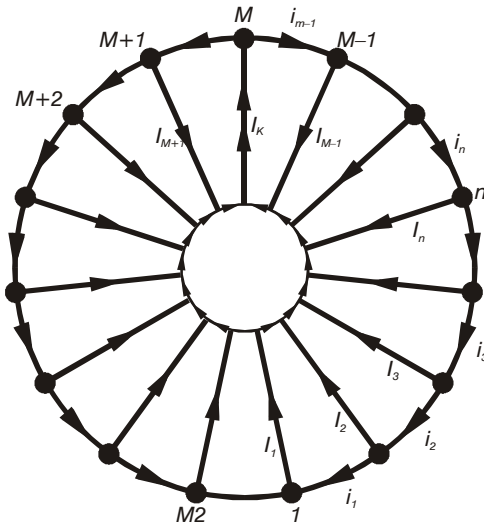
U današnjoj literaturi [9][39] česta je analiza koja struje nesimetričnog kaveza rotora razmatra kroz matricu u kojoj rotor ima broj petlji jednak broju štapova na njemu.

Analize i proračuni koji slijede, radi pojednostavljenja, uzimaju u obzir slijedeće pretpostavke [9][39]:

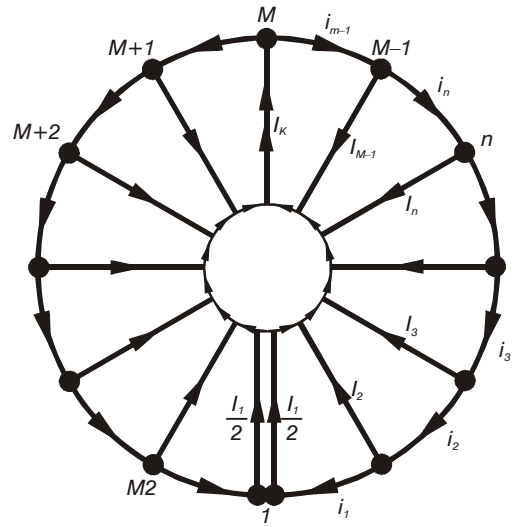
- statorski namoti su jednaki, simetrično raspoređeni i napajani preko simetričnog trofaznog sustava napona, magnetsko polje u zračnom rasporu uzrokovano statorskom strujom sadrži samo osnovnu frekvencijsku komponentu,
- ispravan kavez rotora je simetričan i svi štapovi imaju jednaku impedanciju,
- štapovi rotora su izolirani od željeza rotora,
- prekinut je potpuno ili djelomično samo jedan štap ili samo jedan segment prstena,
- rotor se u pogonu vrti samo s malim klizanjem te se iznosi rasipnih i glavnih reaktancija petlji kaveza mogu zanemariti, uzimaju se u obzir samo omski otpori štapova i segmenata prstena.

Analiza struja, pri prekidu jednog štapa rotora, može se provoditi kao 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.

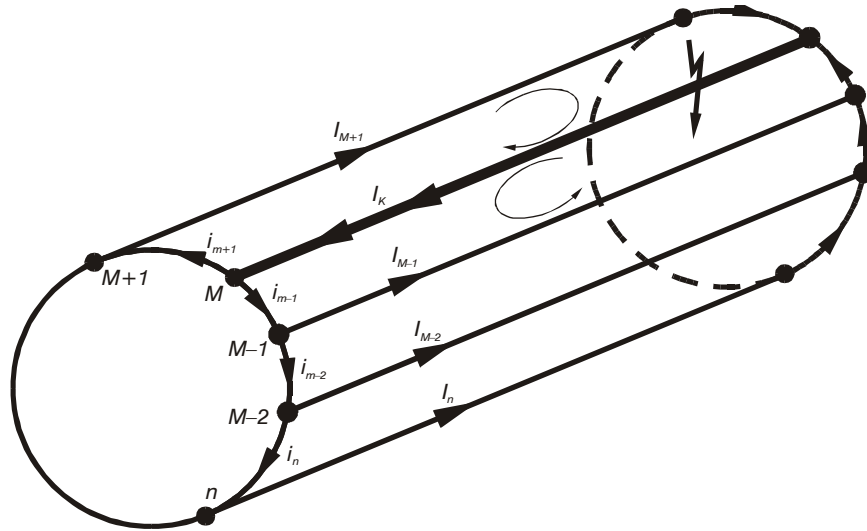
Raspored dodatnih struja u kavezu, pri prekidu jednog štapa, shematski je prikazan (u jednoj ravnini) za kavez s neparnim brojem štapova na slici 4.6.a, a za kavez s parnim brojem štapova na slici 4.6.b. Model kaveza rotora je prikazan na slici 4.6.c.



Slika 4.6.a Dodatne struje u kavezu pri prekidu štapa - neparni broj štapova



Slika 4.6.b Dodatne struje u kavezu pri prekidu štapa - parni broj štapova



Slika 4.6.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.

Temeljni je zadatak proračunati kakva je raspodjela struje po štapovima budući o tome ovisi spektar harmonijskih članova, na čemu se i temelji ova dijagnostička metoda.

Struje u štapovima označimo sa  $I_1$  do  $I_{M_2}$ , a struje u segmentima prstena sa  $i_1$  do  $i_{M_2}$ , gdje je  $M_2$  ukupan broj štapova. Prekinuti (oštećeni) štap označimo sa  $M$ . Štap broj 1 je onaj štap koji je prvi nakon točke na obodu smještene dijametralno prekinutom štapu  $M$  kod neparnog broja štapova, odnosno onaj štap smješten točno dijametralno štapu  $M$  u slučaju parnog broja štapova. Pri tome vrijedi:

$$M = \frac{M_2}{2} + \frac{1}{2} \quad (4.6.a)$$

za neparni broj štapova, odnosno

$$M = \frac{M_2}{2} + 1 \quad (4.6.b)$$

za parni broj štapova.

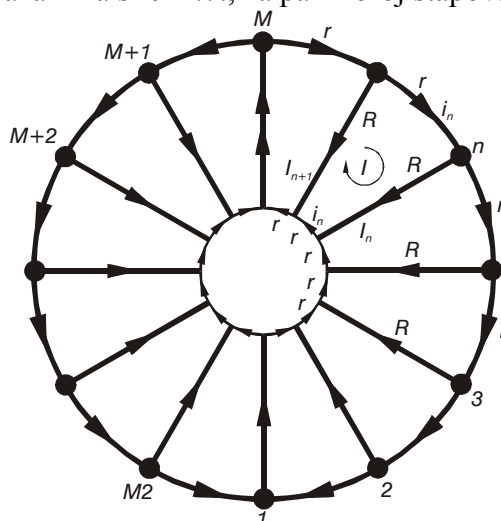
Struja  $I_k$  oštećenog štapa jednaka je negativnom punom iznosu struje neoštećenog štapa ako je prekid potpun, odnosno odgovarajućem dijelu te struje ako se radi o povećanom otporu štapa (npr. napuknuće, poroznost materijala). Uz raniju pretpostavku rada motora s malim klizanjem tj. uz zanemarenje reaktancija, za štap vrijedi izraz:

$$Z = R \quad (4.7.a)$$

odnosno za segment prstena

$$z = r \quad (4.7.b)$$

Otpori kaveza rotora su prikazani na slici 4.7., za parni broj štapova.



Slika 4.7. Otpori kaveza rotora

Za petlju I vrijedi:

$$I_n \cdot R + i_n \cdot r - I_{n+1} \cdot R + i_n \cdot r = 0 \quad (4.8)$$

odnosno:

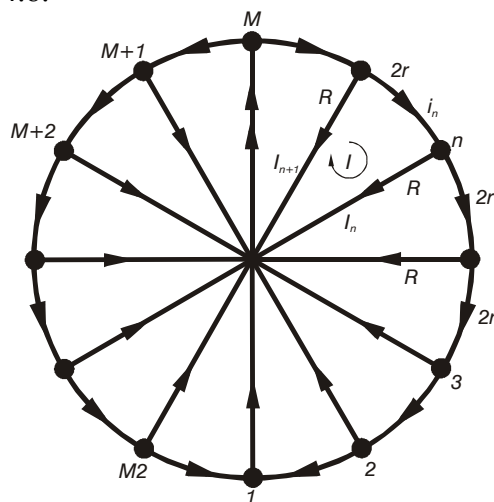
$$I_{n+1} = I_n + 2 \cdot \frac{r}{R} \cdot i_n \quad (4.9)$$

uvođenjem konstante  $k$  (svojstvo kaveza),

$$k = 2 \cdot \frac{r}{R} \quad (4.10)$$

možemo pisati:

$$I_{n+1} = I_n + k \cdot i_n \quad (4.11)$$



Temeljem izraza 4.11 i rasporeda struja u kavezu (slike 4.6.a i 4.6.b) možemo provesti računanje struja u štapovima i segmentima prstena. Jakost struje koja bi tekla u štapovima, kad ne bi bilo prekida označimo sa 100%, tj. razmatrajmo relativne odnose. Računanje počnimo od štapa 1 i imamo:

$$\begin{aligned}
I_2 &= I_1 + k \cdot i_1 \\
i_2 &= I_2 + i_1 \\
I_3 &= I_2 + k \cdot i_2 \\
i_3 &= I_3 + i_2 \\
I_{M-1} &= I_{M-2} + k \cdot i_{M-2} \\
i_{M-1} &= I_{M-1} + i_{M-2} \\
I_M &= I_k = i_{M-1} + i_{M+1} = 2 \cdot i_{M-1}
\end{aligned} \tag{4.12}$$

Raspodjele struje  $I_k$  na lijevu i desnu stranu kaveza je potpuno simetrična (uz ranije definiranu pretpostavku da nema drugih oštećenja kaveza osim štapa  $M$ ), te kod kaveza s neparnim brojem štapova vrijedi:

$$i_1 = I_1 \quad (4.13)$$

a za kavez s parnim brojem štapova možemo pisati:

$$i_1 = \frac{I_1}{2} \quad (4.14)$$

što je vidljivo iz slike 4.6.b

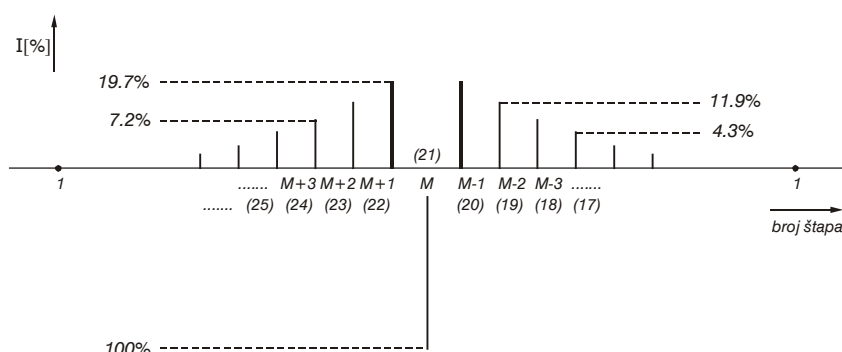
Lako se može pokazati da, zbog simetrije, općenito vrijedi:

$$\begin{aligned} I_{M+a} &= I_{M-a} \\ i_{M+a} &= i_{M-a} \end{aligned} \quad (4.15)$$

gdje je  $a = 1, 2, 3 \dots$

Na sličan način se mogu dobiti i odnosi dodatnih struja kaveza za slučaj prekida jednog segmenta prstena.

Za ilustraciju prikažimo odnose dodatnih struja u štapovima pri prekidu jednog štapa za motor sa  $M_2 = 40$  štapova i  $2p = 4$  [39]. Prekinut je štap br. 21 ( $M = 21$ ).



Slika 4.9. Dodatne struje u štapovima pri prekidu štapa  $M = 21$ ;  $M_2 = 40$  štapova;  $2p = 4$

Pretežni dio magnetskog djelovanja struja u kavezu se događa u zraku (uz zanemaren efekt zasićenja u željezu). U navedenom slučaju odnosi se mogu smatrati linearnim, pa se može odvojeno promatrati djelovanje normalnih simetričnih višefaznih struja kaveza od djelovanja dodatnih struja zbog oštećenja te ih na kraju superponirati.

U zračnom rasporu asinkronog motora nastaje dvopolno polje nesinusnog oblika izazvano dodatnim strujama u štapovima (dvopolnim protjecanjem). Komponente tog polja se mogu odrediti Fourierovom analizom. Polje pulsira frekvencijom  $f_p$ :

$$f_p = s \cdot f_1 = \frac{s \cdot n_s \cdot p}{60} \quad (4.16)$$

gdje je:

- $s$  – klizanje
- $f_1$  – frekvencija napona narinutog na stator (Hz)
- $n_s$  – sinkrona brzina vrtnje glavnog harmoničkog člana statorskog polja ( $\text{min}^{-1}$ )
- $p$  – 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

$$\nu_p = \frac{v}{p} \quad (4.17)$$

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  $\nu_p$  dodatnog polja u rasporu, u vodičima statora iznosi za direktnu komponentu:

$$f_{dvp} = \frac{\nu \cdot n_d}{60} = f_1 \cdot [\nu_p - s \cdot (\nu_p - 1)] \quad (4.18)$$

odnosno za inverznu:

$$f_{ivp} = \frac{\nu \cdot n_i}{60} = f_1 \cdot [\nu_p - s \cdot (\nu_p + 1)] \quad (4.19)$$

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 (dvopolno) 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  $I_{lu}$  koja bi tekla pri struji nazivnog opterećenja u štapovima rotora (označene sa 100%).

Za konačne izraze direktne i inverzne komponente dodatne struje u namotu statora možemo pisati [39]:

$$I_{ldvp} = \frac{E_{dvp}}{2\pi \cdot f_{dvp} \cdot L_s} \quad (4.20)$$

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

gdje je:

- $E_{dvp}$  – direktna komponenta inducirano napona u statoru,
- $E_{ivp}$  – inverzna komponenta inducirano napona u statoru,
- $f_{dvp}$  – frekvencija direktne komponente reda  $\nu_p$ ,
- $f_{ivp}$  – frekvencija inverzne komponente reda  $\nu_p$ ,
- $L_s$  – ukupni samoinduktivitet namota i mreže u strujnom krugu jedne faze.

Direktna i inverzna komponenta inducirano napona reda  $\nu_p$  ovise o indukciji u rasporu i geometriji motora (broju pari polova, namotnom faktoru, broju utora po polu i fazi, broju zavoja po fazi i sl.). Obzirom da su direktna i inverzna komponenta pulzirajućeg polja međusobno jednake i struje  $I_{ldvp}$  i  $I_{livp}$  će biti međusobno jednake.

Temeljem svega rečenog će relativni iznosi dodatne statorske struje uzrokovani prekidom štapa (ili segmenta prstena) iznositi:

$$i_{ldvp}(\%) = i_{livp}(\%) = 100 \cdot \frac{I_{ldvp}}{I_{lu}} \quad (4.21)$$

Frekvencija struje  $i_{ldvp}$  određena je izrazom 4.18, dok je frekvencija struje  $i_{livp}$  određena izrazom 4.19. Za ilustraciju su, u tablici 4.1 [39], prikazani rezultati računskih analiza za motor 22 kW, 40 štapova, dobiveni opisanom računskom metodom. Proračun dodatnih statorskih

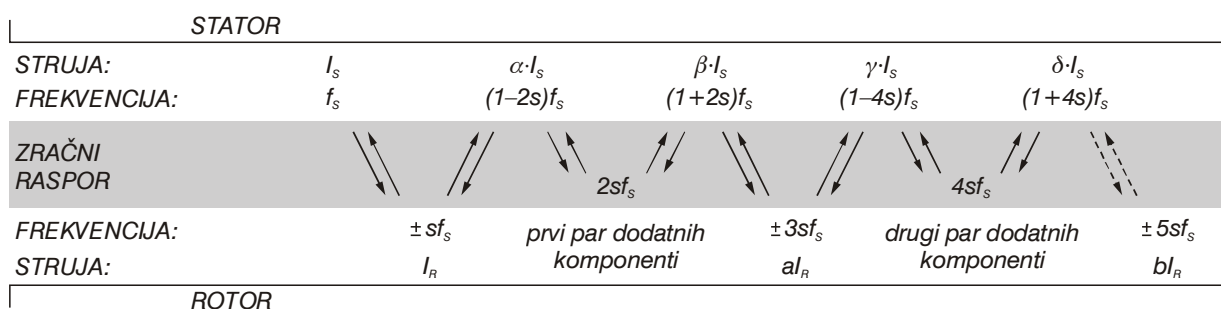
struja je proveden za slučaj prekida jednog štapa. Podaci o motoru su: 22 kW, 380 V, spoj trokut,  $p = 2$ ,  $1470 \text{ min}^{-1}$ , stator 48 utora, 14+15 vodiča/utoru, korak 1-11, rotor kavezni s 40 utora,  $k = 2 \cdot r/R = 0.2563$ .

Tablica 4.1. 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 4.1 je vidljivo da su dodatne struje u statorskom namotu, nastale kao posljedica prekida jednog štapa rotora, male u odnosu na struje opterećenja, a frekvencije direktne i inverzne komponente nisu iste. Iz navedenog je nužna uporaba odgovarajućih filtera kako bi se uočile komponente spektra "interesantne" sa dijagnostičkog stanovišta.

Odnose elektromagnetskih pojava u rotoru i statoru (i njihov međusobni utjecaj) moguće je prikazati i prema slici 4.10 preuzetoj iz literature [9]:



Slika 4.10. Dodatne komponente statorske struje ( $\alpha I_s$ ,  $\beta I_s$ ,  $\gamma I_s$  i  $\delta I_s$ ) prouzrokovane nesimetrijom rotora

Simetrični namot statora stvara okretno polje frekvencije  $f_s$  koje inducira u rotoru struju  $I_R$  frekvencije  $s \cdot f_s$ . Kod nesimetrija u rotoru rotorske struje stvaraju nesimetrično polje koje se može rastaviti na dvije komponente (frekvencija  $+s \cdot f_s$  i  $-s \cdot f_s$ ).

Direktna i inverzna komponenta rotiraju prema statoru brzinom:

$$n_d = (1-s) \cdot n_s + s \cdot n_s = n_s \quad (4.22)$$

$$n_i = (1-s) \cdot n_s - s \cdot n_s = (1-2 \cdot s) \cdot n_s$$

Direktna komponenta ( $+s \cdot f_s$ ) djeluje zajedno s okretnim poljem statora i predstavlja osnovni princip rada asinkronog motora. Inverzna komponenta ( $-s \cdot f_s$ ) inducira u simetričnom namotu statora struju  $\alpha \cdot I_s$  frekvencije  $(1-2 \cdot s) \cdot f_s$ .

Sa slike 4.10 je vidljiv daljnji utjecaj dodatnih komponenti struja statora na induciranje struja u rotoru i obratno. U struji statora se uočavaju dodatne komponente sa frekvencijama:

$$f = (1 \pm 2 \cdot k \cdot s) \cdot f_s \quad (4.23)$$

gdje je:

$s$  – klizanje

$f_s$  – frekvencija napona narinutog na stator [Hz]

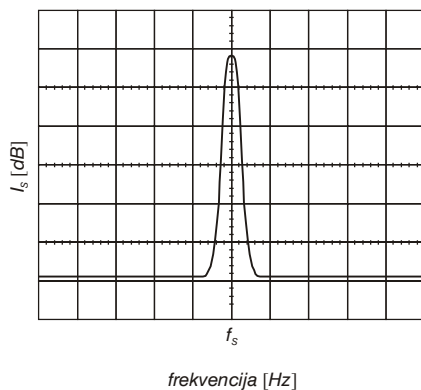
$k$  – 1, 2, 3 ...

$aI_R, bI_R$  – dodatne komponente struje rotora prouzrokovane nesimetrijom rotora

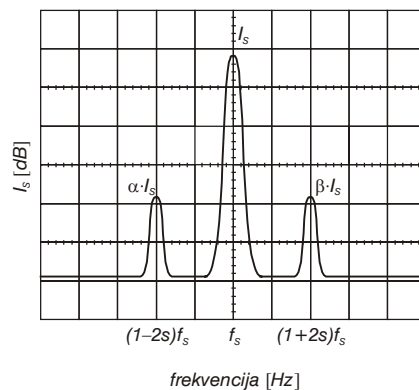
$\alpha I_S, \beta I_S, \gamma I_S$  i  $\delta I_S$  – dodatne komponente statorske struje prouzrokovane nesimetrijom rotora

Za dijagnostičke svrhe su najbitnije dodatne komponente struje statora frekvencije  $(1 \pm 2 \cdot s) \cdot f_s$  koje su najuočljivije (najizraženije amplitude).

Dodatne komponente u spektru struje statora možemo ilustrirati slikom 4.11 koja prikazuje spektar za simetričan i nesimetričan rotor.



a) simetričan rotor



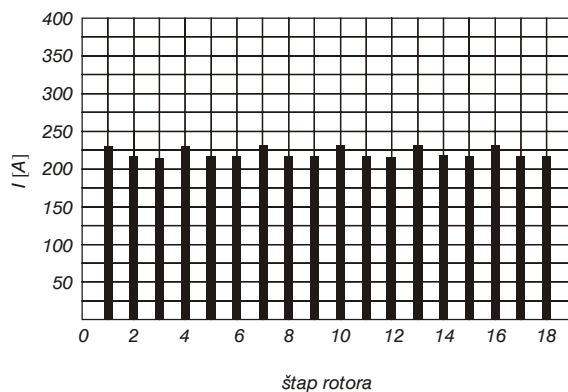
b) lijeva komponenta radi nesimetrije, desna radi oscilacija brzine vrtnje

Slika 4.11. Dodatne komponente u spektru struje statora koje predstavljaju indicaciju nesimetrije rotora

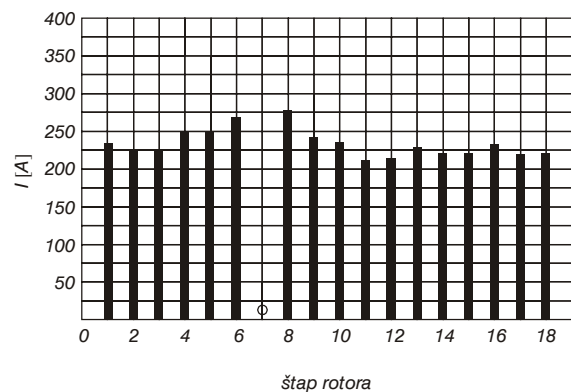
Sa stanovišta protueksplozijske zaštite interesantno je prikazati amplitude induciranih struja u štapovima rotora (pri oštećenju dijela štapova).

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.

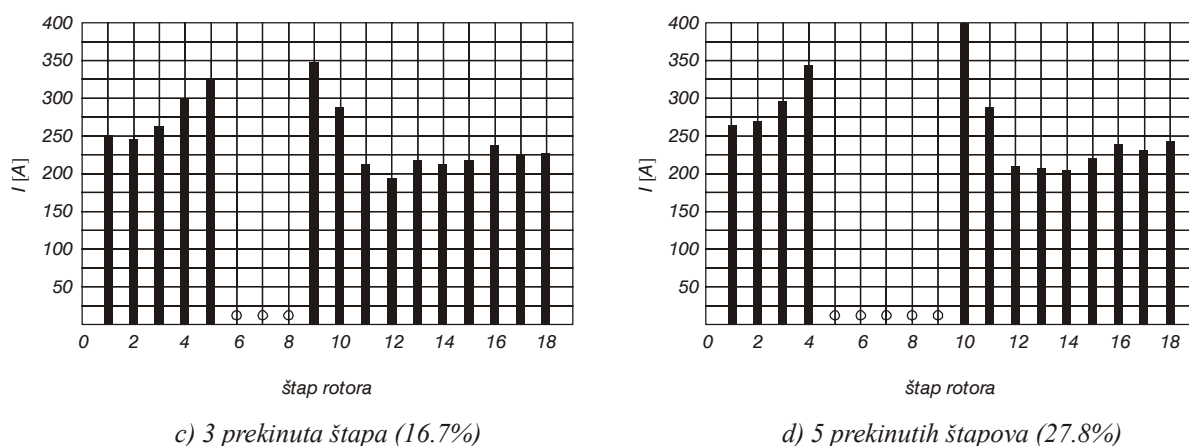
Na slici 4.12, preuzetoj iz literature [9], su prikazane amplitude induciranih struja u štapovima rotora nazivno opterećenog dvopolnog asinkronog elektromotora. Lagana odstupanja amplituda kod ispravnog rotora posljedica je nejednolikog zračnog rasporeda.



a) neoštećen kavez rotora



b) 1 prekinut štap (5.5%)



Slika 4.12. Amplitude induciranih struja u štapovima rotora

Primjena ovih teorijskih razmatranja, u dijagnostičke svrhe, će biti obrađena u poglavlju 4.5 ovog rada.

#### 4.5 Primjeri dijagnostike asinkronog motora analizom spektra struje statora

U ovom dijelu rada biti će prikazani rezultati dijagnostičkih ispitivanja provedenih na asinkronim elektromotorima u vrsti protueksplozijske zaštite povećana sigurnost - "Ex e".

Za ispitivanje elektromehaničkog stanja (kavez rotora i dinamička ekscentričnost) je korištena dijagnostička metoda temeljena na analizi spektra struje statora (jedne faze), prema principijelnoj shemi 4.1. Ispitivanja su provedena na trofaznim asinkronim elektromotorima slijedećih podataka:

- tip 4AZsh 1127-2; Y; 6 kV; 1.9 MW; 210 A; 2980 min<sup>-1</sup>; Ex e II T3;  
 $I_A/I_N = 5.5$  s;  $t_E = 8.5$  s i
- tip 4AZsh 905-4; Y; 6 kV; 500 kW; 58 A; 1485 min<sup>-1</sup>; Ex e II T3;  
 $I_A/I_N = 6.2$ ;  $t_E = 5.8$  s.

Detaljni konstrukcijski podaci ispitivanih elektromotora su prikazani u dodatku D, dok su dijelovi protueksplozijski zaštićenog EMP-a, sa ispitivanim elektromotorima prikazani na slici u prilogu E.

Dijagnostička ispitivanja su provedena na elektromotornom pogonu crpki u sustavu naftovoda, u suradnji sa S-Komisijom Zagreb i Zavodom za elektrostrojarstvo i automatizaciju Fakulteta elektrotehnike i računarstva Zagreb.

Pri dijagnostici je korišten programski paket pod nazivom "MOTORMONITOR" koji je razvila tvrtka ENTEK. Ispitivanja pomoću ovog programa se obavljaju u pogonskim uvjetima, bez ometanja pogona, a računalne analize rezultata ispitivanja su pretvorene u jednostavne dijagnostičke preporuke. Ove preporuke omogućuju donošenje odluka o daljnjim aktivnostima na ispitivanom elektromotoru (npr. daljnji pregled "OFF-LINE" metodama, te eventualni popravak ili zamjenu).

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 (rotora). Praćenje trenda stanja (pogoršanja) pruža mogućnost izbora najpogodnijeg trenutka za popravak ili zamjenu motora.

Prema principijelnoj shemi (slika 4.1) snimani su u pogonu pod opterećenjem (najvećeg iznosa koji je bio raspoloživ u vrijeme ispitivanja) oscilogrami struje u jednoj fazi namota statora. Spektar fazne struje statora (vidljiv na ekranu analizatora i na računalu) sadrži uz komponente koje su karakteristične za "zdravi" rotor, superponirane i komponente koje karakteriziraju oštećenja kaveza (npr. oštećenja štapova, prstenova ili loše spojeve). Te komponente karakterističnih frekvencija (o čemu je ranije bilo više riječi u ovom radu) i njihove amplitude se koriste za ocjenu stanja rotora. Program "MOTORMONITOR" sve izmjerene vrijednosti amplituda pojedinih komponenti preračunava na nazivno opterećenje motora.

Ocjena stanja rotora se u konačnoj programskoj obradi daje mjerom zvanom "indeks kvara" (indeks stanja) čija je veličina definirana na slijedeći način:

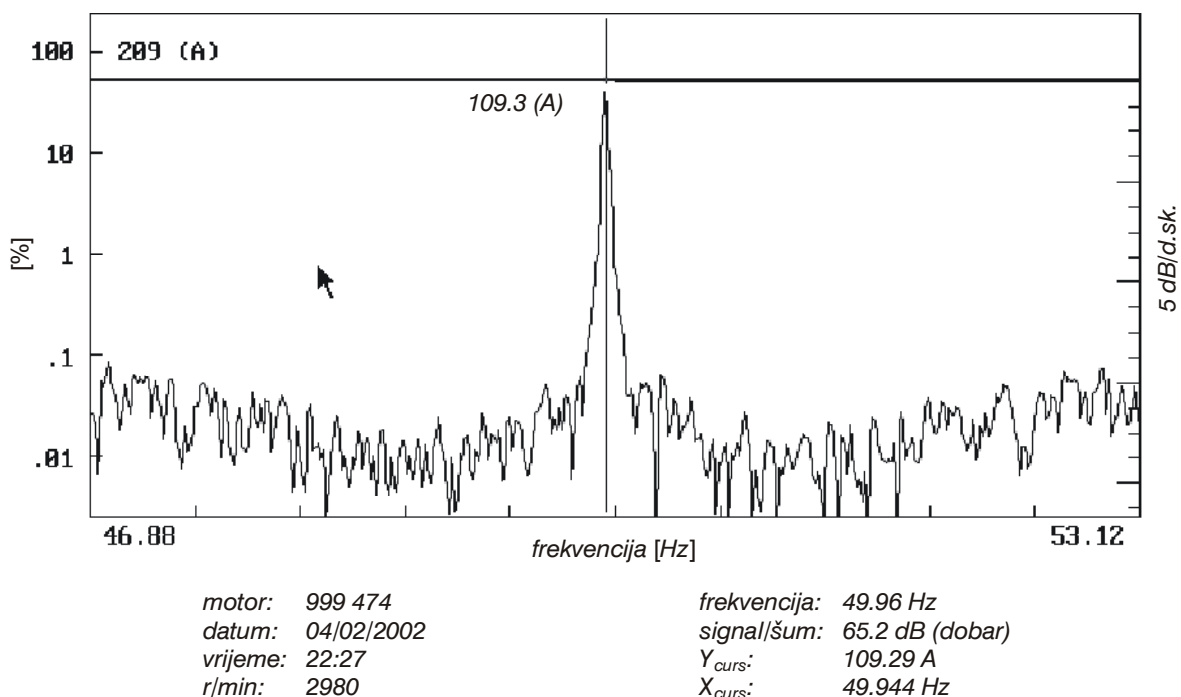
- < 0.5 - bez oštećenja
- 0.5 - 1.5 - još zadovoljavajuće stanje
- 1.5 - 2.5 - potreban remont (servis)
- > 2.5 - motor pred havarijom

Na sličan način program "MOTORMONITOR" obrađuje i snimljene podatke o ekscentričnosti.

Uz direktno snimanje struje motora i poznavanje podataka očitanih s natpisne pločice motora nužno je i poznavanje podataka koji obično nisu lako dostupni (npr. broj utora rotora, struja magnetiziranja i sl.) ili ih je potrebno što točnije ocijeniti. Navedeni podaci za ispitivane elektromotore su dobiveni od proizvođača elektromotora.

#### 4.5.1 Rezultati ispitivanja kaveza rotora analizom spektra struje statora, primjenom računalnog programa "MOTORMONITOR"

Na slici 4.13 je prikazan spektar struje statora elektromotora tipa 4AZsh 1127-2, 1.9 MW, ser. br. 999 474 (s dobivenim indeksom stanja iznosa 0.19).



Slika 4.13. Spektar struje statora asinkronog elektromotora ser. br. 999474, 1.9 MW u okolici frekvencije 50 Hz

Mjerenje provedeno na motoru ser. br. 999 474 (prikazano slikom 4.13) je provedeno uz struju opterećenja iznosa 109.29 A. Nazivna struja motora iznosi 210 A, no iz tehnoloških uvjeta pogona nije bilo moguće dobiti veće opterećenje.

Na ovom elektromotoru je provedeno još jedno ispitivanje, pri struji opterećenja od 98.4 A te je dobiven indeks stanja iznosa 0.11. Motor bi trebalo ispitati pri većem opterećenju (što bliže nazivnom).

Dijagnostička poruka 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".

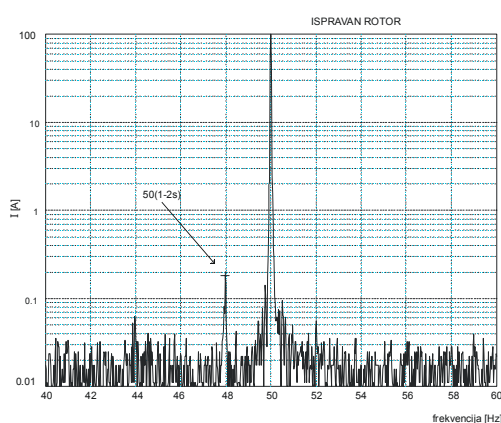
Sa slike 4.13 je vidljivo da nema izraženih dodatnih komponenti na frekvencijama koje ukazuju na stanje kvara rotora, opisane izrazom 4.23.

Prema nekim istraživanjima kod omjera amplitude osnovnog harmonika ( $f_1$ ) i amplitude bočnog harmonika  $f_1(1-2s)$  većeg od 316 (50 dB) nema oštećenja rotora. Taj se omjer amplituda smanjuje, te kod pet prekinutih štapova iznosi 56 (35 dB). Navedeni omjeri su eksperimentalno provjereni laboratorijskim ispitivanjima na motoru snage 55 kW [15]. Rezultati tih laboratorijskih ispitivanja su prikazani u tablici 4.2 i na slici 4.14 preuzetoj iz literature [15].

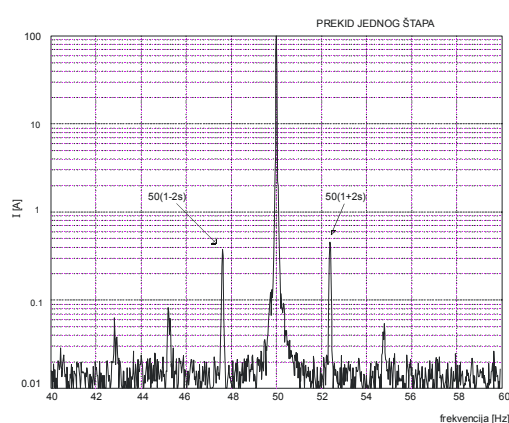
Tablica 4.2. Promjene amplitude bočnog harmonika  $f_1(1-2s)$  u odnosu na amplitudu osnovnog harmonika  $f_1$  struje kod različitih stanja rotora.

| STANJE ROTORA    | $If_1 \cdot (1-2s) / If_1$ |       |      |
|------------------|----------------------------|-------|------|
|                  | omjer                      | dB    | %    |
| ispravan rotor   | 1/571                      | -55.1 | 0.18 |
| prekid 1 štapa   | 1/268                      | -48.6 | 0.37 |
| prekid 5 štapova | 1/41                       | -32.3 | 2.43 |

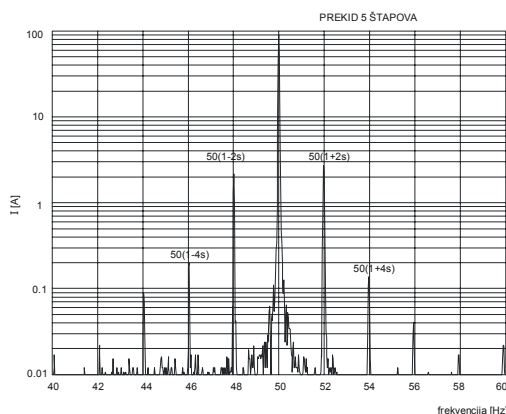
Važno je napomenuti da dobivene vrijednosti ovise o rasporedu prekinutih štapova i ukupnom broju štapova. Rezultati prema tablici 4.2 i slici 4.14 se odnose za slučaj prekida 5 štapova od kojih su dva susjedna br. 1 i 2 te su u prekidu i štapovi br. 11, 21 i 31. Ukupan broj utora rotora je 48.



a) ispravan rotor



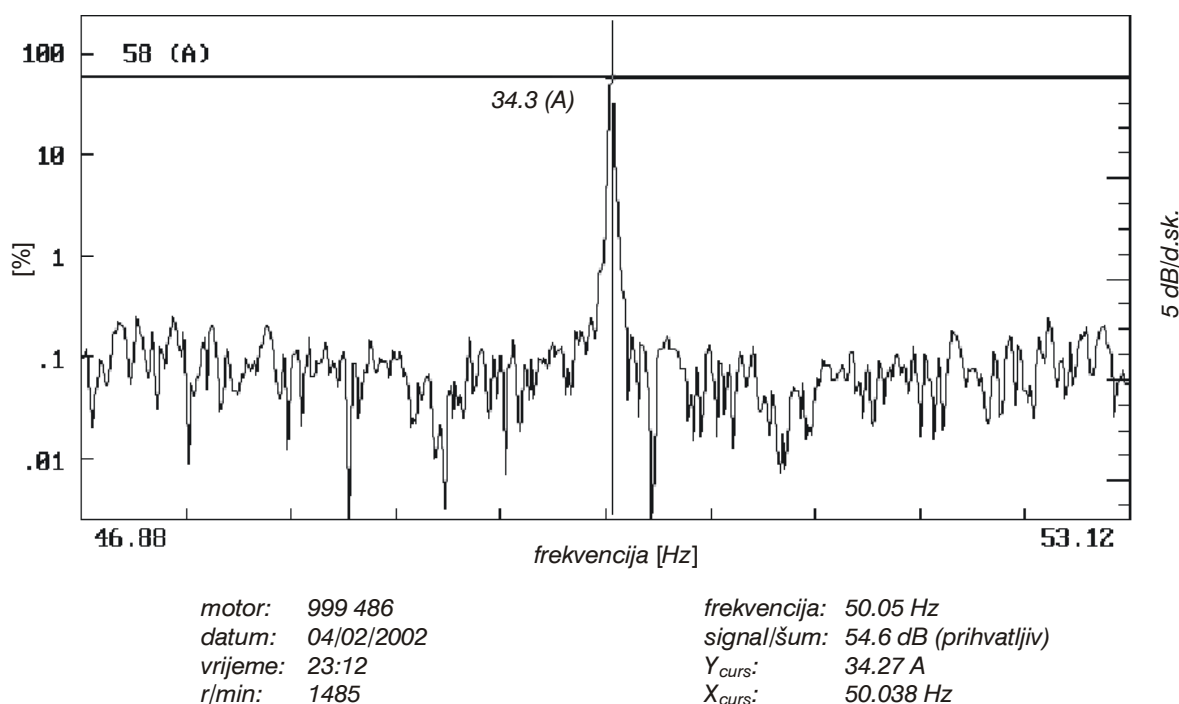
b) prekid 1 štapa



c) prekid 5 štapova

Slika 4.14. Spektar struje statora nazivno opterećenog elektromotora (55 kW) u okolici frekvencije 50 Hz.

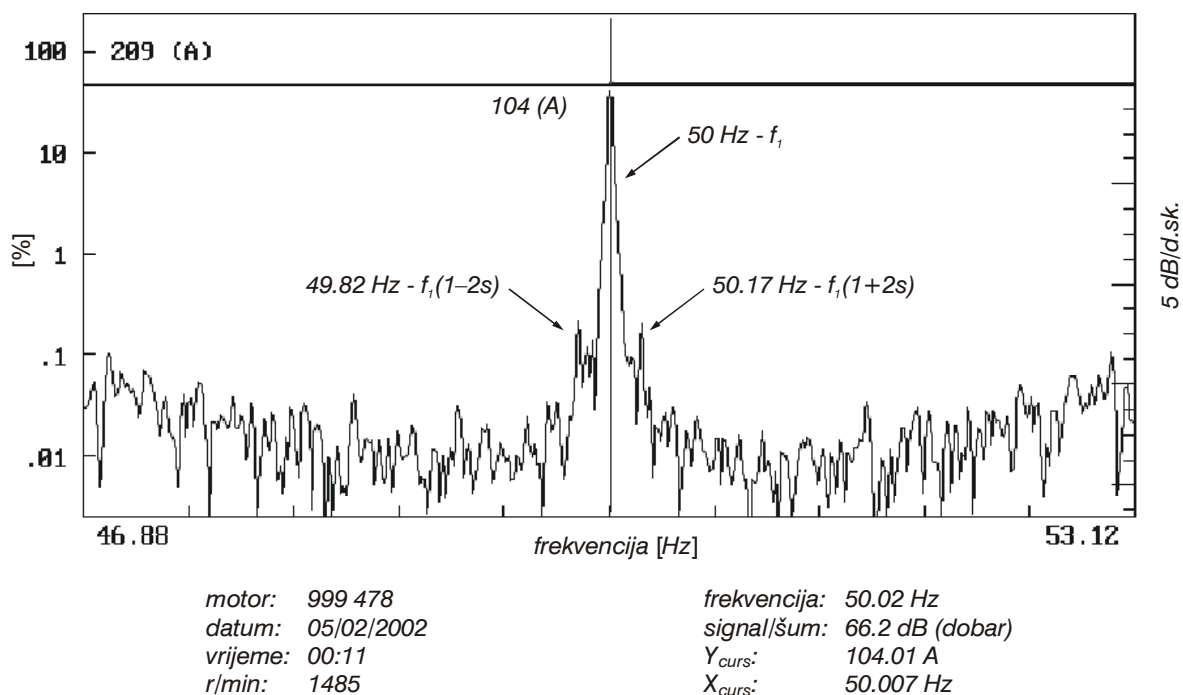
Snimanje struje primjenom programa "MOTORMONITOR" je provedeno i na elektromotoru tipa 4AZsh 905-4, 500 kW, ser. br. 999 486. Spektar struje statora ovog elektromotora prikazan je na slici 4.15.



Slika 4.15. Spektar struje statora asinkronog elektromotora ser. br. 999 486, 500 kW u okolici frekvencije 50 Hz.

Mjerenje na motoru ser. br. 999 486 su provedena uz struju opterećenja iznosa 34.5 A. nazivna struja motora je 58 A. Dobiven je indeks stanja iznosa 0.47. Dijagnostička poruka je bila identična kao za motor ser. br. 999 474. Sa slike 4.15 je vidljivo da nema izraženih komponenti na frekvencijama koje ukazuju na stanje kvara rotora, opisane izrazom 4.23.

Slijedeći ispitivani elektromotor je bio tipa 4AZsh 1127-2, 1.9 MW, ser. br. 999 478. Spektar struje statora ovog elektromotora je prikazan na slici 4.16.



Slika 4.16. Spektar struje statora asinkronog elektromotora ser. br. 999 478, 1.9 MW u okolici frekvencije 50 Hz.

Mjerenje na elektromotoru ser. br. 999 478 je provedeno uz struju opterećenja 104.1 A. Nazivna struja motora je 210 A. Dobiven je indeks stanja rotora 0.66. Isto mjerenje je provedeno i pri struji opterećenja 113.8 A, pri čemu je dobiven veći indeks stanja rotora (iznosa 0.76). Motor bi trebalo ispitati pri većem opterećenju (što bližem nazivnom).

Dijagnostička poruka programa "MOTORMONITOR" je glasila:

"Rotorski namot pokazuje znakove povećanog otpora spojeva i treba ga ponovno pregledati u roku od devet mjeseci. Ako pogon s ovim motorom ima cikluse "teškog pogona" pregled treba obaviti unutar šest mjeseci ili nakon 50 zaleta, što prije nastupi."

Klizanje motora  $s$  (dobiveno temeljem brzine iz programa) je iznosilo 0.00173. Temeljem klizanja  $s$  dobivaju se frekvencije komponenti  $f_1(1 \pm 2s)$  iznosa 50.17 Hz odnosno 49.82 Hz. Na slici 4.16 je uočljiv porast amplituda spomenutih komponenti.

Približni omjer (iščitano sa slike 4.16) amplituda bočnih harmonika  $f_1(1 \pm 2s)$  i amplitude osnovnog harmonika  $f_1 = 50$  Hz iznosi -47 dB odnosno  $1/224$ . Navedeni omjer upućuje svakako na povećanje otpora spojeva pa čak (prema tablici 4.2 - laboratorijska ispitivanja) i na mogućnost prekida jednog štapa.

Obzirom na dobiveni indeks stanja rotora odnosno dijagnosticirani povećani otpor spojeva, te uz činjenicu da elektromotor radi u prostoru ugroženom eksplozijom, ovaj motor bi trebalo servisirati i ispitati u specijaliziranoj radionici. Pri tome bi trebalo provesti detaljan pregled i ispitivanje rotora npr. mjerenjem otpora štapova i prstena odnosno njihovih spojeva. Također se preporuča provjeriti i statorski namot npr. primjenom analize odziva na udarni napon. Servis i ispitivanja je potrebno provesti u što kraćem roku.

Prema laboratorijskoj provjeri dijagnostičkih poruka programa "MOTORMONITOR" na elektromotoru snage 26 kW;  $2p = 2$  su dobiveni odnosi indeksa stanja (kvara) i dijagnostičke poruke programa "MOTORMONITOR" ovisno o vrsti kvara. Navedeno je prikazano u tablici 4.3 [10].

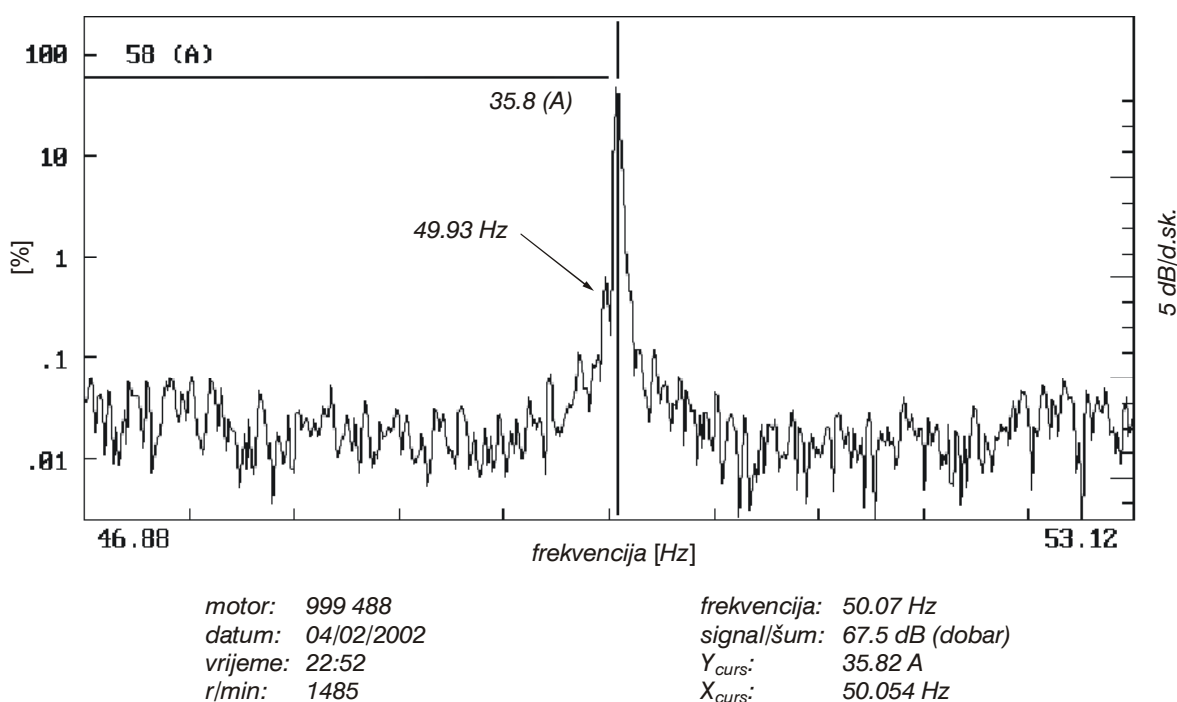
Tablica 4.3. Indeks kvara pri laboratorijskom ispitivanju (namjernom oštećenju rotora)

| Stanje motora     | Indeks kvara | Dijagnostička poruka     | Preporuka za ponovno mjerenje |
|-------------------|--------------|--------------------------|-------------------------------|
| ispravan          | 0.29         | ispravan                 | 12 mjeseci                    |
| 1 štap prerezan   | 0.8          | povećani otpori          | 9 mjeseci                     |
| 3 štapa prerezana | 2.07         | više od 1 štap u prekidu | 2 tjedna                      |

Usporedba poznatog stanja motora (rotora) i dijagnostičke poruke ukazuje na dobro slaganje (određenje stanja) pri svakom namjerno izazvanom oštećenju rotora.

No, nije moguće direktno preslikati kriterije dobivene laboratorijskim ispitivanjima radi velikih konstrukcijskih razlika ispitivanog elektromotora i elektromotora koji je razmatran u spomenutim laboratorijskim ispitivanjima. Svakako bi trebalo provesti ispitivanje motora pri većem opterećenju.

Prikažimo i rezultate ispitivanja provedenih na elektromotoru tipa 4AZsh 905-4, 500 kW, ser. br. 999 488. Spektar struje statora ovog elektromotora je prikazan na slici 4.17.



Slika 4.17. Spektar struje statora asinkronog elektromotora ser. br. 999 488, 500 kW u okolini frekvencije 50 Hz.

Mjerenje na elektromotoru ser. br. 999 488 je provedeno uz struju opterećenju iznosa 35.9 A. Nazivna struja motora je 58 A. Dobiven je indeks stanja rotora 0.32 sa dijagnostičkom porukom identičnom kao za motor ser. br. 999 474.

Na slici 4.17 je uočljiv samo bočni lijevi harmonik na frekvenciji blizu osnovne frekvencije  $f_1 = 50$  Hz. Frekvencija tog harmonika (iščitana sa slike 4.17) iznosi 49.93 Hz. Klizanje motora  $s$  (dobiveno temeljem brzine iz programa) iznosi 0.00133 te frekvencija harmonika  $f_1(1-2s)$ , interesantnog u smislu dijagnostike stanja rotora, iznosi 49.88 Hz. Program "MOTORMONITOR" komponentu na frekvenciji 49.93 Hz nije promatrao kao frekvenciju bitnu za dijagnostiku stanja rotora. Amplituda navedene komponente u odnosu na osnovnu komponentu iznosi - 40 dB odnosno 1/100.

Radi relativno malog opterećenja motora (i velike snage) klizanje  $s$  je malo te je otežano razlučivanje komponenti s razmakom jednakim dvostrukom klizanju. Preporučljivo bi bilo ponoviti ispitivanje s većim opterećenjem.

#### 4.5.2 Rezultati ispitivanja dinamičke ekscentričnosti primjenom računalnog programa "MOTORMONITOR"

Mjerenje razine dinamičke ekscentričnosti primjenom računalnog programa "MOTORMONITOR" provedeno je na ukupno sedam elektromotora u protueksplozijski zaštićenoj izvedbi Ex e II T3. Elektromotori tipa 4AZsh 1127-2 (4 kom.) su elektromotori u izvedbi s horizontalnom osovinom dok su elektromotori tipa 4AZsh 905-4 (3 kom.) u izvedbi s vertikalnom osovinom. Rezultati ispitivanja dinamičke ekscentričnosti s dijagnostičkim porukama programa "MOTORMONITOR" prikazani su u tablici 4.4. (a, b, c, d, e).

Tablica 4.4. Rezultati ispitivanja dinamičke ekscentričnosti elektromotora u protueksplozijskoj zaštiti Ex e II T3.

a)

|                                                                                                                                                                                                                                       |                  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| tip elektromotora:                                                                                                                                                                                                                    | 4 AZsh 1127-2    |
| serijski broj:                                                                                                                                                                                                                        | 999 473; 999 477 |
| % dinamičke ekscentričnosti:                                                                                                                                                                                                          | 20               |
| Datum mjerenja:                                                                                                                                                                                                                       | 04.02.2002.      |
| <b>Dijagnostička poruka (preporuka):</b><br>Ovo je normalna razina dinamičke ekscentričnosti. Stoga se može smatrati da je stanje ovog motora zadovoljavajuće. Ponovno ispitivanje treba obaviti za 9 - 12 mjeseci od današnjeg dana. |                  |

b)

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |               |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| tip elektromotora:                                                                                                                                                                                                                                                                              | 4 AZsh 1127-2 |
| serijski broj:                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 999 474       |
| % dinamičke ekscentričnosti:                                                                                                                                                                                                                                                                    | 32            |
| Datum mjerenja:                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 04.02.2002.   |
| <b>Dijagnostička poruka (preporuka):</b><br>Razina dinamičke ekscentričnosti ovog motora započet će razvijanje sekundarnih kvarova. Provjerite mehaničke vibracije stroja i usporedite ih s prethodnim podacima. Motor mora biti ponovno ispitan najkasnije za mjesec dana od današnjeg datuma. |               |

c)

|                                                                                                                                                                                                                                                                             |               |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| tip elektromotora:                                                                                                                                                                                                                                                          | 4 AZsh 1127-2 |
| serijski broj:                                                                                                                                                                                                                                                              | 999 478       |
| % dinamičke ekscentričnosti:                                                                                                                                                                                                                                                | 24            |
| Datum mjerenja:                                                                                                                                                                                                                                                             | 05.02.2002.   |
| <b>Dijagnostička poruka (preporuka):</b><br>Razina dinamičke ekscentričnosti ovog motora može uzrokovati vibracije u ležajevima. Provjerite mehaničke vibracije stroja. Ako su one u dozvoljenim granicama, ponovno ispitivanje mora se obaviti najkasnije za šest mjeseci. |               |

d)

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| tip elektromotora:                                                                                                                                                                                                                                                                              | 4 AZsh 905-4     |
| serijski broj:                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 999 486; 999 545 |
| % dinamičke ekscentričnosti:                                                                                                                                                                                                                                                                    | 32               |
| Datum mjerenja:                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 04.02.2002.      |
| <b>Dijagnostička poruka (preporuka):</b><br>Razina dinamičke ekscentričnosti ovog motora započet će razvijanje sekundarnih kvarova. Provjerite mehaničke vibracije stroja i usporedite ih s prethodnim podacima. Motor mora biti ponovno ispitan najkasnije za mjesec dana od današnjeg datuma. |                  |

e)

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |              |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| tip elektromotora:                                                                                                                                                                                                                                                                              | 4 AZsh 905-4 |
| serijski broj:                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 999 488      |
| % dinamičke ekscentričnosti:                                                                                                                                                                                                                                                                    | 40           |
| Datum mjerenja:                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 04.02.2002.  |
| <b>Dijagnostička poruka (preporuka):</b><br>Razina dinamičke ekscentričnosti ovog motora započet će razvijanje sekundarnih kvarova. Provjerite mehaničke vibracije stroja i usporedite ih s prethodnim podacima. Motor mora biti ponovno ispitan najkasnije za mjesec dana od današnjeg datuma. |              |

Dijagnostičke poruke (preporuke) programa "MOTORMONITOR" su u skladu i s kriterijima o dopuštenim granicama ekscentričnosti, npr. prema literaturi [9][43].

Prema navedenoj literaturi [9][43] ekscentričnost zračnog rasporeda do 10% se smatra dopuštenom, gornja granica prihvatljive ekscentričnosti iznosi 20%, dok je pri 50%-noj ili višoj razini ekscentričnosti motor nužno isključiti iz EMP-a.

Prema rezultatima ispitivanja dinamičke ekscentričnosti, prikazanim u tablici 4.4, uočljivo je pogoršano stanje dinamičke ekscentričnosti ili utjecaj opterećenja kod znatnog broja ispitivanih elektromotora. Predlaže se, u specijaliziranoj radionici, provesti detaljan pregled ležaja. Prije demontaže motora preporuča se izmjeriti vibracije motora i crpki. No, svakako se preporuča, u roku od 30 dana, provesti provjeru stanja dinamičke ekscentričnosti ponovnim mjerenjem.

Važno je napomenuti da iz tehnoloških razloga EMP-a pri ispitivanju motora nije bilo moguće postići opterećenja veća od 48% (na nekim motorima su bila i oko 37%), te je rezolucija za traženje pojedinih komponenti bila nedovoljna. Omjer signal/šum također je bio nepovoljan kod nekih mjerenja. Stoga se preporuča ponoviti mjerenja kod većih opterećenja (što bliže nazivnim).

Praćenje trenda stanja kod ispitivanja dinamičke ekscentričnosti je od posebne važnosti i na temelju tih analiza je moguće donositi određene odluke o daljnjim zahvatima na motorima.

#### 4.5.3 Ocjena kompjuterizirane dijagnostike stanja motora temeljene na analizi spektra struje statora

Ova suvremena metoda dijagnostike, koja koristi dostignuća novih tehnologija mjerne, računalne i softverske opreme, i koja ne ometa EMP ("ON-LINE") je posebno interesantna za EMP-e u prostoru ugroženom eksplozijom. Sva mjerenja, snimanja i obrada podataka se provodi izvan prostora ugroženog eksplozijom (napojna ploča elektromotora), te nema posebnih zahtjeva na izvedbu mjerne opreme sa stanovišta protueksplozijske zaštite.

Prema ispitivanjima provedenim unutar ovog rada, te prema literaturi koja obrađuje ovu dijagnostičku metodu npr. [9][10][11][15][16][28][34][39][43] može se zaključiti da je metoda vrlo primjenljiva kod značajnijih oštećenja motora. 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 izobličenju struje (šumovi) koja su u pravilu stalno prisutna.

Komercijalni program "MOTORMONITOR" temeljen na analizi spektra struje statora je potvrđen nizom laboratorijskih ispitivanja i primjenom u praksi [10][28]. Kompjuterski postavljena dijagnoza je potvrđivana naknadnom demontažom s detaljnim pregledima (U-I metoda provjere otpora, primjena penetranta na spojna mjesta i sl.). Nakon popravka dijagnosticiranih kvarova ponovno je provedeno ispitivanje primjenom programa "MOTOMONITOR" te je dijagnosticirano ispravno stanje rotora (indeks kvara je bio smanjen s

početnih 1.7 na 0.1) [10]. Nažalost, stanje elektromotora ispitanih u ovom radu nije, za sada, bilo provjereno u radionici detaljnim pregledom.

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 interesantnijih dijagnostičkih metoda za elektromotore u prostorima ugroženim eksplozijom.

Primjena ove dijagnostičke metode na elektromotore u protueksplozijskoj zaštiti, koji su bili ispitivani u okviru ovog rada, je dala slijedeće zaključke (rezultate):

- 2 motora su ispravna, preporuča se kontrola za 12 mjeseci,
- 4 motora ne pokazuju znakove oštećenja rotora, no imaju povećanu razinu dinamičke ekscentričnosti te se preporuča provjera za 30 dana,
- 1 motor pokazuje znakove povećanog otpora spojeva rotora i povećanu razinu dinamičke ekscentričnosti; temeljem dobivenih rezultata ispitivanja i uz činjenicu da je motor instaliran u prostoru ugroženom eksplozijom, ovaj motor bi trebalo u što kraćem roku ispitati u specijaliziranoj radionici; provjeru rotora se preporuča provesti mjerenjem otpora štapova i prstena odnosno njihovih spojeva; preporuča se provesti detaljan pregled ležaja kao i mjerenje vibracija na elektromotoru i crpki.

Temeljem ovih rezultata je moguće planirati daljnje aktivnosti vezane uz provjeru stanja rotora i ekscentričnosti kod ovih motora. Umjesto skupe i komplicirane demontaže svih sedam motora, koji su duži niz godina u pogonu, i detaljnog pregleda u radionici ili kod proizvođača, za dio ispitanih motora je za sada dovoljno pratiti trend kvarova i u skladu s tim planirati servisne zahvate.

Budući da nije potrebna demontaža svih motora ostvaruje se velika ušteda, kako zbog same cijene demontaže i dodatnih pregleda, tako i zbog neometanja rada EMP-a.

## 5. ISPITIVANJE PROTUEKSPLOZIJSKE ZAŠTITE ASINKRONOG ELEKTROMOTORA

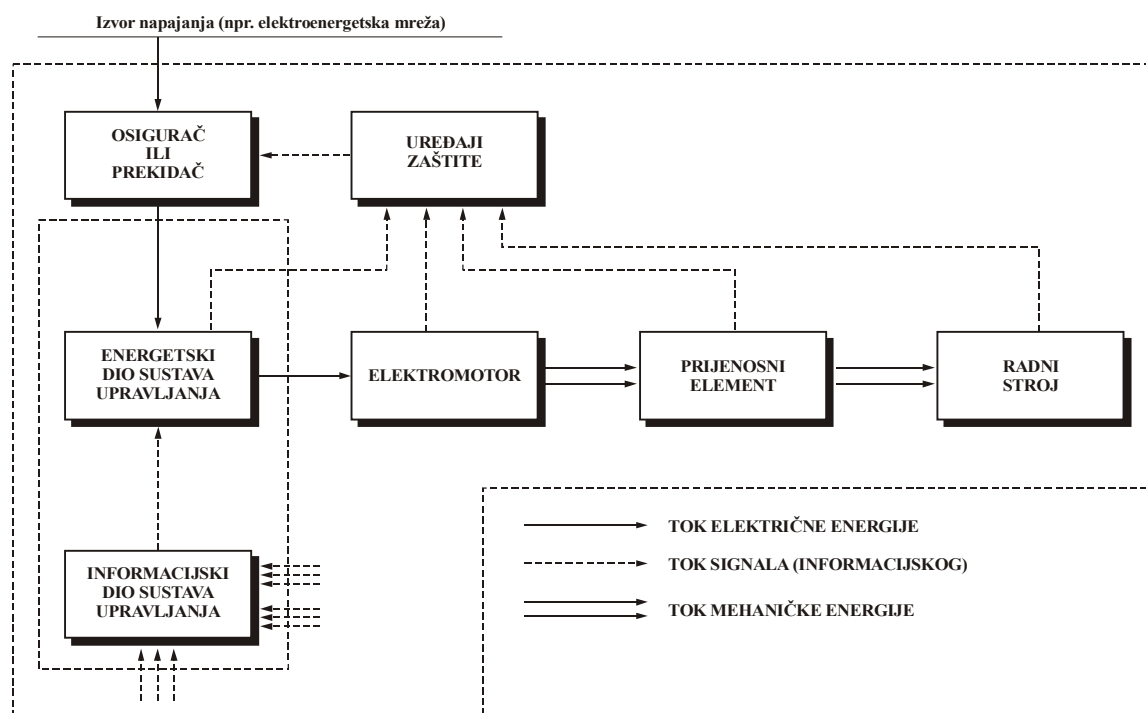
Siguran i pouzdan rad EMP-a u prostorima ugroženim eksplozijom je moguće osigurati jedino uz dobro i detaljno poznavanje stanja svih elemenata EMP-a (sl. 5.1). U ovom radu ćemo se ograničiti na asinkroni elektromotor kao najčešće korišteni motor u EMP-u u zonama opasnosti.

Ispitivanja asinkronog elektromotora, instaliranog u prostorima ugroženim eksplozijom, načelno možemo podijeliti u dvije skupine.

Prvu skupinu čine ispitivanja (dijagnostika) koja se provodi i na "običnim" motorima tj. na motorima standardne industrijske izvedbe, ali je izuzetno važno i za elektromotore u "S" izvedbi. Cilj ovih ispitivanja je ustanoviti stanje elektromotora (rotora, statora, ležajeva i sl.), eventualne kvarove te procijeniti preostali vijek trajanja unutar kojeg neće doći do kvara koji bi mogao biti uzročnik paljenja eventualno prisutne eksplozivne atmosfere. Neka od ovih ispitivanja, kao i metode koje se danas u svijetu koriste, su detaljnije prikazani u trećem i četvrtom poglavlju ovog rada.

U drugu skupinu ispitivanja možemo ubrojati sva ispitivanja (neposredno nakon proizvodnje, ili nakon određenog vremena uporabe) kojima se provjeravaju posebni zahtjevi kojima moraju udovoljiti elektromotori predviđeni za rad u prostorima ugroženim eksplozijom.

Neki od najvažnijih zahtjeva i metode provjere njihovih ispunjenja su tema ovog poglavlja.



Slika 5.1. Uobičajena struktura EMP-a u prostoru ugroženom eksplozijom

Dosadašnja iskustva pokazuju da se ispitivanja iz prve skupine, posebice kod manjih elektromotora u prostorima ugroženim eksplozijom, vrlo rijetko provode.

Jedan od glavnih ciljeva ovog rada je upravo ukazati na izuzetnu važnost ispitivanja i prve i druge skupine. Stvarnu i realnu sliku stanja elektromotora odnosno ocjenu prihvatljivosti njegove primjene u ugroženim prostorima moguće je imati jedino nakon provedbe ispitivanja i iz prve i iz druge skupine ispitivanja.

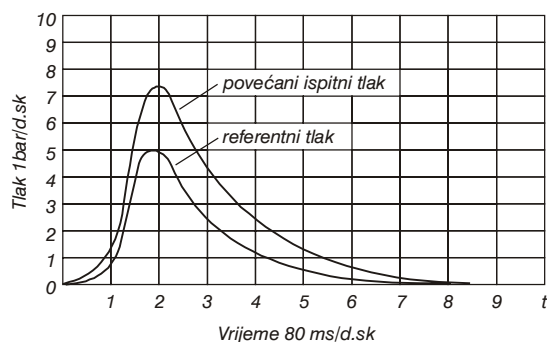
### 5.1 Ispitivanje protueksplozijske zaštite elektromotora u vrsti zaštite oklapanje "Ex d"

Vrsta protueksplozijske zaštite oklapanje "Ex d" je, uz povećanu sigurnost "Ex e" i nadtlak "Ex p", jedna od najčešće korištenih protueksplozijskih zaštita asinkronih elektromotora, te ćemo detaljnije opisati elemente ove zaštite i osnovna ispitivanja koja se provode na elektromotoru, s ciljem utvrđivanja realnog i trenutnog stanja protueksplozijske zaštite elektromotora.

Osnovni princip ove vrste protueksplozijske zaštite je zaštita električnog uređaja kućištem koje u slučaju unutarnje eksplozije (npr. uslijed el. iskre ili pregrijanog rotora elektromotora) mora:

- izdržati tlak eksplozije bez trajnih deformacija te
- spriječiti prijenos eksplozije iz kućišta na vanjski okolni prostor, odnosno pouzdano spriječiti probojno paljenje.

Otpornost na unutarnji tlak eksplozije se postiže čvrstoćom kućišta koja se provjerava ispitivanjem na način da se kućište podvrgne unutarnjoj eksploziji i izmjeri tzv. referentni tlak. Nakon toga se kućište podvrgne ispitnom tlaku uvećanom 1.5 puta u odnosu na referentni tlak, ali ne manje od 3.5 bara [45]. Važno je osigurati da ispitni tlak ima približno jednak porast kao i referentni te da krivulja ispitnog tlaka prekriva krivulju referentnog tlaka eksplozije čime se postiže i odgovarajuća energija impulsa tlaka [3]. Traženo je prikazano na slici 5.2. [3].

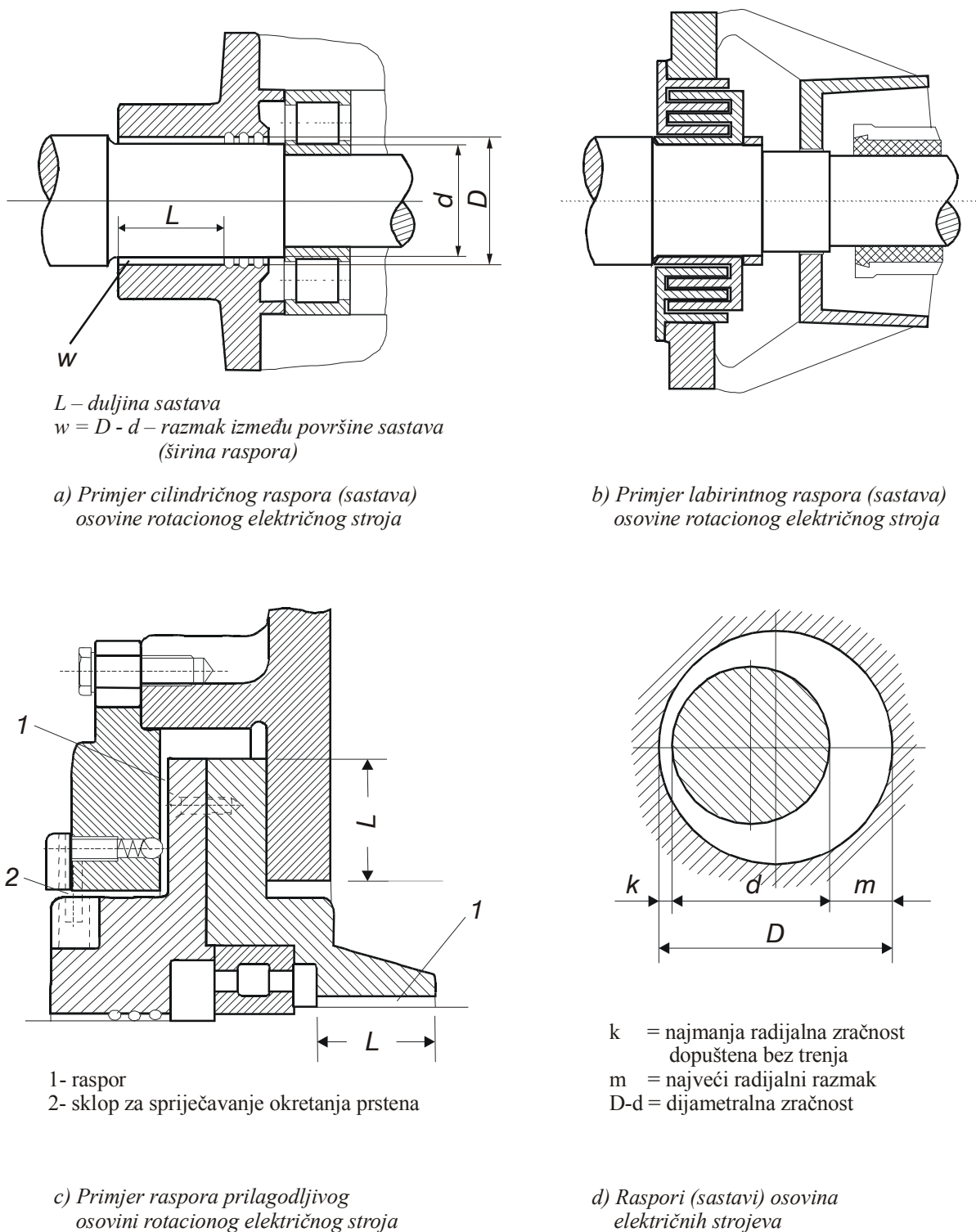


Slika 5.2. Ispitni i referentni tlakovi eksplozija

Probojno paljenje se sprječava posebnim oblicima i dimenzijama sastava kroz koji prolazi plamen eksplozije iz unutrašnjosti elektromotora (kućišta) u okolni vanjski prostor.

Na slici 5.3., a prema [45] su prikazani neki uobičajeni raspori (sastavi) rotacijskih strojeva (npr. asinkronih elektromotora) u protueksplozijski zaštićenoj izvedbi "Ex d".

Provjera (izmjeri) sastava su jedno od važnijih ispitivanja elektromotora u vrsti zaštite oklapanjem, kako nakon proizvodnje, tako i nakon određenog razdoblja uporabe elektromotora.



Slika 5.3. Zaštitni raspori (sastavi) zaštite oklapanja kućištem

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, tj. da smanji koncentraciju topline po površini uzročnika paljenja, što je odlučujuće za inicijalno paljenje plamenom eksplozije.

Razmak između površina sastava " $w$ " utječe na gušenje eksplozije u samom sastavu, ali i na ukupnu energiju plamena izvan sastava, dok duljina sastava " $L$ " utječe na oblik plamena izvan sastava, odnosno na toplinu po površini uzročnika paljenja. Posebni zahtjevi, sa

stanovišta protueksplozijske zaštite, kako pri projektiranju tako i pri ispitivanju, za elektromotore u vrsti zaštite oklapanje "Ex d" su temeljno definirani normama HRN EN 50014 i HRN EN 50018.

Pri projektiranju elektromotora u vrsti zaštite oklapanje "Ex d" potrebno je prvo odrediti skupinu za koju je motor namijenjen i to:

I skupina: za rudnike s metanskim režimom rada,

II skupina: za mjesta s eksplozivnom atmosferom (osim rudnika s metanskim režimom rada)

Elektromotori skupine II (koji se i promatraju u ovom radu) se dijele u podskupine IIA, IIB i IIC.

Podjela na podskupine je utemeljena na najvećem eksperimentalnom sigurnosnom rasporu (MESR), što je prikazano u tablici 5.1. [3].

Tablica 5.1. Podjela plinova i para u podskupine

| skupina plinova | MESR (mm) |
|-----------------|-----------|
| IIA             | >0.9      |
| IIB             | 0.5-0.9   |
| IIC             | <0.5      |

Podskupina A je namijenjena za rad u zonama opasnosti ugljikovodika (metana i drugih), skupina B je npr. etilen i gradski plin, dok je skupina C npr. vodik i acetilen. MESR (najveći eksperimentalni sigurnosni raspor) je raspor kod kojeg nema probojnog paljenja za dužinu sastava od 25 mm koja je mjerena na aparatu prema IEC 60079-1A.

Važan čimbenik o kojem je potrebno voditi računa kod projektiranja, ali i kasnijeg održavanja, ispitivanja i servisiranja elektromotora u vrsti zaštite oklapanje je temperaturni razred. Razvrstavanje u temperaturne razrede, prema tablici 5.2. [3] [45], se temelji na činjenici da zagrijana površina elektromotora i plinovi i pare koji su oko nje, istog temperaturnog razreda, ne mogu dovesti do eksplozije.

Tablica 5.2. Podjela na temperaturne razrede

| Temperaturni razred | Najveća dozvoljena temperatura uređaja (°C) | Plinovi i pare s temperaturom paljenja iznad (°C) |
|---------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| T1                  | 450                                         | 450                                               |
| T2                  | 300                                         | 300                                               |
| T3                  | 200                                         | 200                                               |
| T4                  | 135                                         | 135                                               |
| T5                  | 100                                         | 100                                               |
| T6                  | 85                                          | 85                                                |

Odgovarajućim normama je definiran cijeli niz posebnih zahtjeva koji se postavljaju pred elektromotore u vrsti zaštite "Ex d" što mi ovdje nećemo navoditi.

Na ovom mjestu ćemo prikazati neka najvažnija ispitivanja koja se provode na elektromotorima u vrsti zaštite oklapanje, neposredno nakon proizvodnje u svrhu certificiranja, ili nakon višegodišnje uporabe motora s ciljem utvrđivanja stvarnog i trenutnog stanja protueksplozijske zaštite.

Ispitivanja su provedena u laboratorijima "S – Komisije", Zagreb na slijedećim elektromotorima:

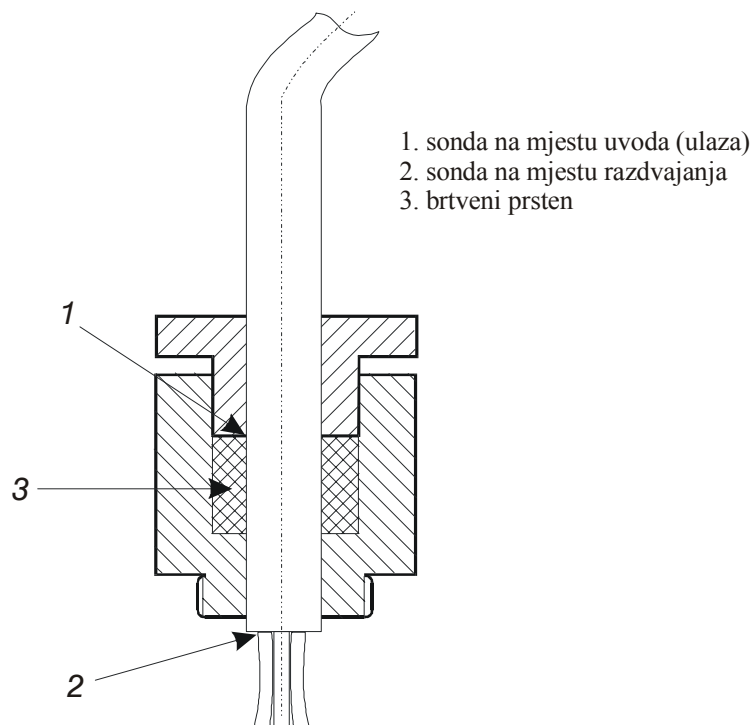
– 10 kV; 500 kW; 33A; Ex de IIB T3

– 0.4 kV; 55 kW; 97A; Ex de IIB T4

Dio ispitivanja (npr. ispitivanja u kratkom spoju) je proveden kod proizvođača elektromotora.

Prvi korak pri pregledu i ispitivanju protueksplozijske zaštite elektromotora je provjera tehničke dokumentacije i nacrtu o izvedbi elektromotora, te provjera označavanja (označne pločice) u odnosu na zahtjeve normi (HRN EN 50014 i HRN EN 50018).

Mjerenje temperature na mjestu razdvajanja (grananja vodiča) i na mjestu ulaza kabela se provodi pomoću termosondi čiji je položaj, pri mjerenju, prikazan na slici 5.4.



Slika 5.4. Mjerenje temperature razdvajanja vodiča i uvida kabela

Ukoliko je temperatura kod nazivnih uvjeta veća od 70 °C na mjestu uvida kabela ili je veća od 80 °C na mjestu grananja vodiča, to mora biti naznačeno na vanjskoj strani elektromotora ili u tipskom certifikatu odnosno izjavi proizvođača kao uputa korisniku za izbor kabela, što je vrlo važno u smislu pravilnog odabira priključnog kabela [45].

Na elektromotoru (nazivno opterećenje) snage 55 kW je izmjerena nadtemperatura (uz  $T_{okoline} = 21\text{ °C}$ ) 11K na mjestu ulaza kabela, dok je na mjestu razdvajanja vodiča nadtemperatura iznosila 27 K. Kod elektromotora 500 kW, pri istim uvjetima su izmjerene nadtemperature iznosa 0.3 K odnosno 3.5 K.

Slijedeće važno ispitivanje koje je provedeno na razmatranim elektromotorima je bilo ispitivanje stupnja mehaničke (IP) zaštite. Ispitivanje IP zaštite se provodi sukladno zahtjevima normi IEC 60034-5 i HRN EN 60529.

Asinkroni elektromotori pripadaju kućištima kategorije 1 (normalni pogon uzrokuje smanjenje tlaka zraka u unutrašnjosti kućišta), te se ispitivanje prašinom, za prve karakteristične brojke 5 i 6 provodi u ispitnoj komori, a tlak u unutrašnjosti kućišta motora se održava pomoću vakuum crpke ispod iznosa okolnog atmosferskog tlaka.

Ispitivanje je provedeno prašinom (puderom) talka 0.75 mm u trajanju od 2 sata.

Zaštita se, prema HRN EN 60529, smatra zadovoljavajućom ako se prilikom pregleda pokaže da je količina pudera koja se nakupilo u kućištu nedovoljna da bi ugrozila sigurnost elektromotora – za prvu karakterističnu brojku 5, dok je za prihvatanje prve karakteristične

brojke 6 nužno da nakon završenog ispitivanja nema u unutrašnjosti elektromotora nataložene prašine.

Rezultati mjerenja na ispitivanom elektromotoru snage 55 kW (zaštita od prodora stranih tijela) su prikazani u tablici 5.3. Elektromotor je certificiran kao IP 55/56.

Tablica 5.3. Zaštita od prodora stranih tijela (rezultati ispitivanja motora 55 kW)

| Šifra                    | 1             | 2            | 3             | 4           | 5                    | 6                  | Rezultat |
|--------------------------|---------------|--------------|---------------|-------------|----------------------|--------------------|----------|
| Prostor kućišta          | kugla<br>50mm | prst<br>12mm | žica<br>2,5mm | žica<br>1mm | Prašina talka 0.75mm |                    |          |
|                          |               |              |               |             | Trajanje<br>pokusa   | Trajanje<br>pokusa |          |
| Kućište motora           | —             | —            | —             | —           | 2 h                  | —                  | Dobar    |
| Priključna kutija motora | —             | —            | —             | —           | 2 h                  | —                  | Dobar    |

Ispitivanje zaštite od prodiranja vode, opisano drugom karakterističnom brojkom, se provodu pomoću ispitne mlaznice promjera 6.3 mm protoka 12.5 l/min  $\pm$  5% u minimalnom trajanju 3 min sa udaljenosti 2.5 - 3.0 m za karakterističnu brojku 5, odnosno ispitnom mlaznicom promjera 12.5 mm protoka 100 l/min  $\pm$  5% u minimalnom trajanju 3 min sa udaljenosti 2.5 – 3.0 m za karakterističnu drugu brojku 6.

Nacionalnim tehničkim odborima prepuštena je odluka o uvjetima prihvatanja rezultata (EN 60529) no eventualna voda koja je uspjela prodrijeti u kućište nikako ne smije:

- utjecati na ispravan rad ili sigurnost motora,
- ležati na izolacionim dijelovima opreme, kako ne bi došlo do stvaranja površinskih struja,
- prodrijeti do dijelova pod naponom ili do namota koji nisu predviđeni za rad u vlažnom stanju,
- skupljati se na mjestima blizu uvida kabela, niti ulaziti u kabele.

Rezultati ispitivanja zaštite od prodora tekućine na predmetom elektromotoru 55 kW su prikazani u tablici 5.4. Elektromotor je certificiran kao IP 55/56.

Tablica 5.4. Zaštita od prodora tekućine (rezultati ispitivanja elektromotora 55 kW)

| Šifra                              | 5 (mlaz vode) |          | 6 (mlaz vode) |          | 7 (potapanje) |          | 8 (potapanje) |          |
|------------------------------------|---------------|----------|---------------|----------|---------------|----------|---------------|----------|
| Prostor kućišta                    | Trajanje      | Rezultat | Trajanje      | Rezultat | Trajanje      | Rezultat | Trajanje      | Rezultat |
| Kućište i priključna kutija motora | 3 min         | Dobar    | 3 min         | Dobar    | –             | –        | –             | –        |

Sukladno HRN EN 50019, na elektromotoru snage 55 kW, provedena je provjera zračnih razmaka neizoliranih vodljivih dijelova različitog potencijala. Rezultati ispitivanja i zahtjevi norme su prikazani u tablici 5.5.

Tablica 5.5. Kontrola zračnih razmaka (rezultati ispitivanja elektromotora 55 kW)

| Nazivni napon | Najmanji zračni razmaci između dijelova pod naponom (mm) |           | Najmanji zračni razmaci između uzemljenih dijelova i dijelova pod naponom (mm) |           |
|---------------|----------------------------------------------------------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|
|               | Dopušteno                                                | Izmjereno | Dopušteno                                                                      | Izmjereno |
| 400           | 6.0                                                      | 16.0      | 6.0                                                                            | 15.0      |

Toplinska ispitivanja odnosno mjerenje temperature je jedno od najvažnijih ispitivanja sa stanovišta protueksplozijske zaštite. Navedeno mjerenje se uobičajeno provodi pri certifikaciji (na novom elektromotoru) ali, što je vrlo važno, i nakon određenog razdoblja uporabe

elektromotora. Ova ispitivanja se provode kod nazivnih parametara stroja, iznimka su toplinska ispitivanja za utvrđivanje najviše temperature površine koja se provode s naponom napajanja između 95% i 105% nazivnog napona stroja. Izmjerena najviša temperatura površine ne smije prijeći:

- vrijednosti koje su dane u tablici 5.2. za elektromotore I skupine,
- za II skupinu elektromotora, ako je svaki proizvedeni uzorak pojedinačno podvrgnut toplinskom ispitivanju, temperature označene na elektromotoru,
- za II skupinu elektromotora, ako se elektromotor podvrgava ispitivanju tipa, označenu temperaturu ili temperaturni razred umanjenu za 5 K za temperaturne razrede T6, T5, T4 i T3 te umanjenu za 10 K za T1 i T2.

Mjerenja temperature površine, temperature kablskih uvoda i drugih dijelova se provode u mirnom zraku s elektromotorom postavljenim u svom uobičajenom radnom položaju. Konačna temperatura smatra se postignutom kad stopa prirasta temperature ne prelazi 2 K/h. Mjerenja temperature na elektromotoru snage 500 kW dala su zadovoljavajuće rezultate, prikazane u tablici 5.6. Temperaturni razred elektromotora je T3.

Tablica 5.6. Mjerenja najvećih temperatura (rezultati ispitivanja elektromotora 500 kW)

| Nazivni podaci elektromotora |                          |         |      | Parametri ispitnog kruga |      |              |     |     |
|------------------------------|--------------------------|---------|------|--------------------------|------|--------------|-----|-----|
| Napon                        |                          | 10000 V |      | Napon                    |      | 10000 V – 5% |     |     |
| Struja                       |                          | 33 A    |      | Struja                   |      | 36 A         |     |     |
| Snaga                        |                          | 500 kW  |      | Snaga                    |      | 518.14 kW    |     |     |
| Gubici                       |                          | –       |      | Gubici                   |      | –            |     |     |
| Temperatura<br>okoline (°C)  | Najveća temperatura (°C) |         |      |                          |      |              |     |     |
|                              | (1)                      | (2)     | (3)  | (4)                      | (5)  | (6)          | (7) | (8) |
| 21                           | 83                       | 87.5    | 21.3 | 24.5                     | 23.8 | 64.0         | –   | –   |

Mjerene točke u tablici 5.6. su definirane na slijedeći način:

- (1) – temperatura najtoplije točke na vanjskoj stijenci kućišta,
- (2) – temperatura najtoplije točke statora (unutar kućišta),
- (3) – temperatura uvoda kabela,
- (4) – temperatura grananja vodiča,
- (5) – temperatura VN izolatora,
- (6) – temperatura ležaja.

Najveća dopuštena temperatura prema temperaturnom razredu T3 (deklariranom) iznosi 200 °C. Najveća temperatura površine utvrđena mjerenjem iznosi 83 °C. Mjerenje je provedeno uz temperaturu okoline od 21 °C. Izmjerena vrijednost preračunata na temperaturu okoline od 40 °C (najveća očekivana temperatura okoline u kojoj će elektromotor biti instaliran) iznosi 83 °C + (40 °C - 21 °C), što je manje od 200 °C tj. udovoljeno je zahtjevima za prostore određene kao T3. Ukoliko se u proizvodnji elektromotora ne ispituje svaki proizvedeni elektromotor, odnosno ukoliko se provodi samo ispitivanje tipa, tada najveća temperatura ne smije premašiti temperaturu temperaturnog razreda umanjenu za 5 K za T3, T4, T5 i T6 odnosno umanjenu za 10 K za T1 i T2.

Elektrostatskom naboju, koji se može pojaviti na plastičnim dijelovima elektromotora (posebice izraženo na ventilatoru elektromotora) treba posvetiti posebnu pažnju budući on može predstavljati ozbiljan uzročnik paljenja eksplozivne atmosfere. Izbor gradiva plastičnih dijelova mora biti takav da izolacijski otpor ne prelazi 1 GΩ pri (23 ± 2) °C i kod (50 ± 5) % relativne vlage. Moguće je i ograničenje najvećih površina.

Navedeno mjerenje je provedeno na ventilatoru elektromotora 500 kW primjenom dviju paralelnih elektroda i uporabom vodljivog premaza. Mjerenje je provedeno na temperaturi

23 °C i uz 50% relativne vlažnosti, ispitnim naponom 500 V istosmjerno, narinutim 1 minutu između elektroda.

Rezultati mjerenja su prikazani u tablici 5.7. Vidljivo je da je izmjereni otpor iznosa  $12 \times 10^9 \Omega$  veći od dopuštenog, te je provedena zamjena ventilatora nakon čega je provedeno ponovno mjerenje u istim uvjetima. Nova izmjerena vrijednost iznosa  $5 \times 10^4 \Omega$  zadovoljava.

Tablica 5.7. Mjerenje otpora izolacije dijelova od plastike (rezultati ispitivanja elektromotora 500 kW)

| Element    | Uvjeti           | Istosmjerni napon (V) | Trajanje (min) | Otpor izolacije ( $\Omega$ )     |
|------------|------------------|-----------------------|----------------|----------------------------------|
| Ventilator | 23 °C; 50 % r.v. | 500                   | 1              | $12 \times 10^9 / 5 \times 10^4$ |

Jedno od mjerenja koje se provodi na novim elektromotorima, ali i često tijekom uporabe, je i ispitivanje dielektričke čvrstoće. Prema HRN EN 50019 navedeno mjerenje se provodi u trajanju od 1 minute slijedećim naponima:

- za elektromotore s naponom napajanja s vršnom vrijednošću koja ne prelazi 90V sa  $500 V_{\text{eff}}$ ,
- za elektromotore u kojima su vršne vrijednosti unutarnjeg napona iznad 90V sa  $(2U_n + 1000)V_{\text{eff}}$  ili  $1500V_{\text{eff}}$ , s tim da je mjerodavna veća vrijednost,  $U_n$  je nazivni napon elektromotora.

Navedeno mjerenje je provedeno i na predmetnim elektromotorima, a rezultati su prikazani u tablici 5.8.

Tablica 5.8. Provjera dielektričke čvrstoće (rezultati ispitivanja elektromotora 500 kW i 55 kW)

| Nazivni napon elektromotora (V) | $(2 U_n + 1000)$ (V) | Trajanje (min) | Rezultat |
|---------------------------------|----------------------|----------------|----------|
| 10000 (elektromotor 500 kW)     | 21000                | 1              | Dobar    |
| 400 (elektromotor 55 kW)        | 1800                 | 1              | Dobar    |

Kako je i u uvodnom djelu ovog poglavlja rečeno oblik i dimenzije sastava (raspora) su od presudne važnosti kod sprječavanja probojnog paljenja koje je jedan od mogućih uzročnika paljenja okolne eksplozivne atmosfere. S toga je izuzetno važno provoditi mjerenja sastava, kako pri proizvodnji i certificiranju novih elektromotora, tako i kontrolna (dijagnostička) mjerenja sastava tijekom uporabe elektromotora.

U tablici 5.9. su prikazani kompletni rezultati mjerenja sastava provedeni na elektromotoru snage 55 kW. Tek detaljna provjera sastava može dati realnu sliku stanja neprodornog oklopa kao temelja ove vrste protueksplozijske zaštite, a na temelju čega se može ocijeniti daljnja primjenjivost elektromotora u prostoru ugroženom eksplozijom, naravno uz provedbu i ostalih ispitivanja i mjerenja.

Tablica 5.9. Mjerenje sastava (bez nareza) (rezultati mjerenja na elektromotoru 55kW)

| Element |    | Površina |                      | Duljina sastava "L" (mm) | Provrti "I" (mm) | Promjer            |        | Širina sastava "w" (mm) |
|---------|----|----------|----------------------|--------------------------|------------------|--------------------|--------|-------------------------|
| a       | b  | oblik    | Ra [ $\mu\text{m}$ ] |                          |                  | a (mm)             | b (mm) |                         |
| 1P      | 2P | C+R      | 3.2                  | D – 11.5 + 3             | –                | $\Phi$ 378H7/h6    |        | D – 0.093               |
|         |    |          |                      | M – 12.5 + 4             |                  |                    |        | M – 0.13                |
| 1S      | 2S | C+R      | 3.2                  | D – 11.5 + 3             | –                | $\Phi$ 378H7/h6    |        | D – 0.093               |
|         |    |          |                      | M – 12 + 4.2             |                  |                    |        | M – 0.10                |
| 3P      | 4P | C        | 3.2                  | D – 42                   | –                | $\Phi$ 78H7/77.7h6 |        | D – 0.349               |
|         |    |          |                      | M – 42                   |                  |                    |        | M – 0.36                |
| 3S      | 4S | C        | 3.2                  | D – 42                   | –                | $\Phi$ 78H7/77.7h6 |        | D – 0.349               |
|         |    |          |                      | M – 42                   |                  |                    |        | M – 0.35                |

| Element |    | Površina |                      | Duljina sastava "L" (mm) | Provrti "l" (mm) | Promjer         |        | Širina sastava "w" (mm) |
|---------|----|----------|----------------------|--------------------------|------------------|-----------------|--------|-------------------------|
| a       | b  | oblik    | Ra [ $\mu\text{m}$ ] |                          |                  | a (mm)          | b (mm) |                         |
| 2P      | 4P | R        | 3.2                  | D – 14                   | D – 9.5          | –               |        | D – < 0.1               |
|         |    |          |                      | M – 15                   | M – 9.0          |                 |        | M – < 0.1               |
| 2S      | 4S | R        | 3.2                  | D – 14                   | D – 9.5          | –               |        | D – < 0.1               |
|         |    |          |                      | M – 15                   | M – 9.0          |                 |        | M – < 0.1               |
| 1       | 5  | C+R      | 3.2                  | D – 7 + 9                | –                | $\Phi$ 184H7/g6 |        | D – 0.09                |
|         |    |          |                      | M – 8 + 9                |                  |                 |        | M – 0.04                |
| 5       | 6  | C+R      | 3.2                  | D – 7 + 11.5             | –                | $\Phi$ 255H7/g6 |        | D – 0.101               |
|         |    |          |                      | M – 8.7 + 11.7           |                  |                 |        | M – 0.1                 |

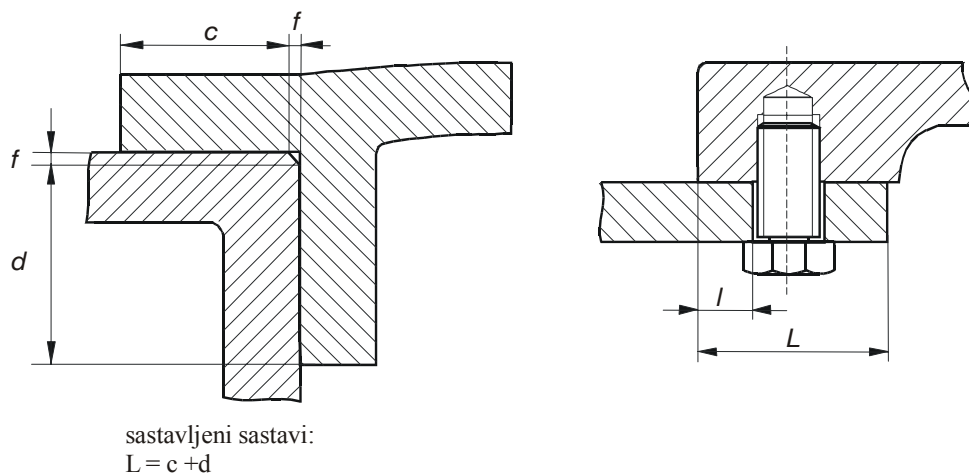
Na ovom mjestu nećemo ulaziti u detalje zahtjeva koji se postavljaju na sastave (što se može vidjeti prema [45]) nego ćemo ukratko prikazati osnovne elemente i njihovo značenje sa stanovišta protueksplozijske zaštite.

Oznaka "P" uz element označava da je mjerenje provedeno na pogonskoj strani elektromotora (strana osovine) dok slovo "S" označava stražnju stranu elektromotora. Oznaka "Ra" kod površine označava kvalitetu obrade – hrapavost. Oblik sastava "C" označava cilindrični, dok oznaka "R" označava ravni sastav. Elementi sastava su označeni slijedećim brojevima:

- 1 – kućište elektromotora,
- 2 – ležajni štit,
- 3 – osovina,
- 4 – zaštitni komad,
- 5 – priključna kutija,
- 6 – poklopac priključne kutije.

Oznaka "D" uz vrijednost označava vrijednost deklariranu dokumentacijom dok oznaka "M" označava izmjerenu vrijednost.

Površina raspora (sastava) mora biti tako izrađena da njen srednji koeficijent hrapavosti "Ra" (ISO 468) ne prelazi  $6.3 \mu\text{m}$ . Minimalne duljine sastava "L" i najveći raspori "w" su definirane normom HRN EN 50018. Sve izmjerene vrijednosti, uzimajući u obzir dopuštene tolerancije i odstupanja, su unutar normama definiranih vrijednosti. Elektromotor je u vrsti zaštite Ex de IIB T4. Razmak "l", tj. najkraći put kroz zaštitni sastav, kada je duljina sastava "L" prekinuta provrtom za prolaz pričvrstnog elementa za sastavljanje dijelova neprodorno oklopnog kućišta, na ispitivanom elektromotoru je također unutar dopuštenih granica. Duljina sastava "L" i razmak "l" su grafički "pojašnjeni" na slici 5.5.



Slika 5.5. Definicija duljine sastava "L" i razmaka "l"

Kod definiranja najvećeg raspora "w" uzimaju se u obzir tolerancije u izradi elemenata (npr.  $\Phi 378H7/h6$  znači da je provrt od 378 mm do  $(378 + 0.057)$  mm, a osovina može biti od  $(378 - 0.036)$  mm do 378 mm što daje najveću širinu sastava tj. raspor od 0.093 mm) ali je potrebno uzeti u obzir i druge elemente kao što su zračnost ležaja i sl.

Iz svega rečenog o mjerenjima i zahtjevima koji se postavljaju pred sastave vidljiva je složenost problematike koju nije bilo moguće, u ovom radu, detaljno prikazati, detaljnije se može vidjeti u npr. [45][63].

Nakon provjere konstrukcijskih zahtjeva, o čemu je bilo riječi do sada, a s ciljem kompletiranja slike o stanju protueksplozijske zaštite elektromotora, potrebno je provesti ispitivanja i provjere kućišta na unutarnji tlak (referentni i povećani) te ispitivanje probojnog paljenja.

Provjera konstrukcijskih zahtjeva ima važnu ulogu u dijagnostici stanja protueksplozijske zaštite elektromotora nakon višegodišnje uporabe. Naime, provjerom konstrukcijskih zahtjeva i provedbom ispitivanja na tlakove i probojno paljenje na novom elektromotoru, tijekom postupka certifikacije potvrđuje se pravilnost konstrukcije obzirom na protueksplozijsku zaštitu. Periodičkom kontrolom konstrukcijskih zahtjeva (dijagnostika) na elektromotoru, koji je duže vrijeme bio u pogonu, može se zaključivati o trenutnom i stvarnom stanju protueksplozijske zaštite i bez provedbe ispitivanja tlakova i probojnog paljenja koja je vrlo teško (gotovo nemoguće) provesti izvan specijaliziranog laboratorija.

Ispitivanja kućišta na referentni tlak, povećanim tlakom i ispitivanje probojnog paljenja su provedena na elektromotoru snage 500 kW; 10 kV; Ex de IIB T3; IP 54. Mjerenja su provedena prema principijelnoj shemi ispitivanja prikazanoj u prilogu A ovog rada. Određivanje referentnog tlaka eksplozije, tj. najviše vrijednosti najvećeg zaglađenog tlaka (filter 4.7 kHz) u odnosu na atmosferski tlak, provedeno je prema HRN EN 50 018. Elektromotor je bio u stanju mirovanja. Elektromotor je skupine IIB te su provedena ispitivanja sa smjesom 8% etilena i zraka te smjesom 24% ( $H_2 + CH_4$  (85/15)) i zraka.

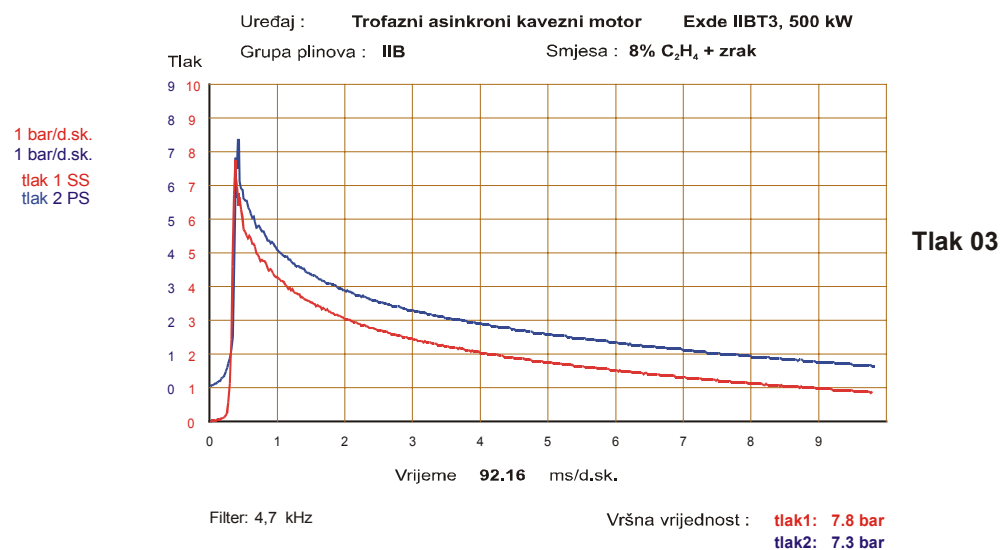
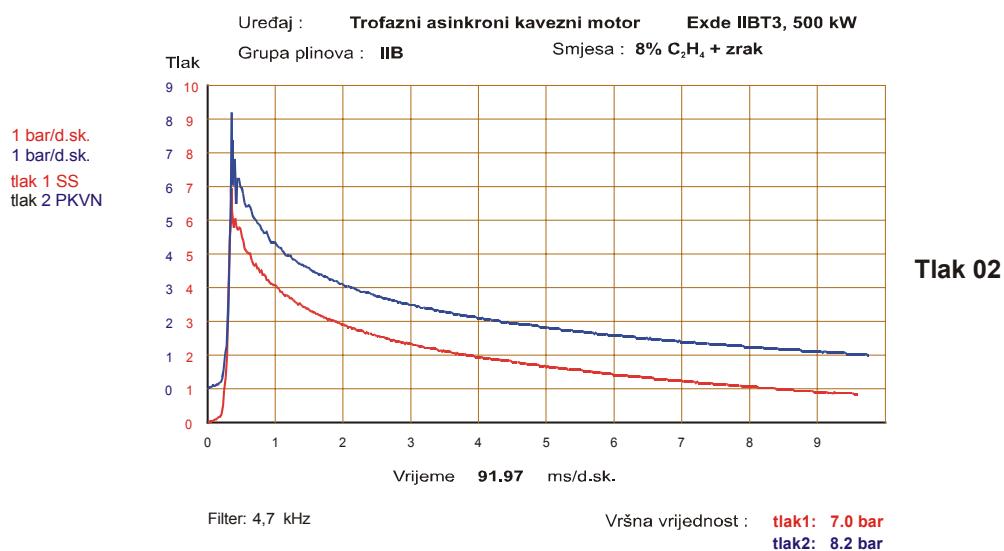
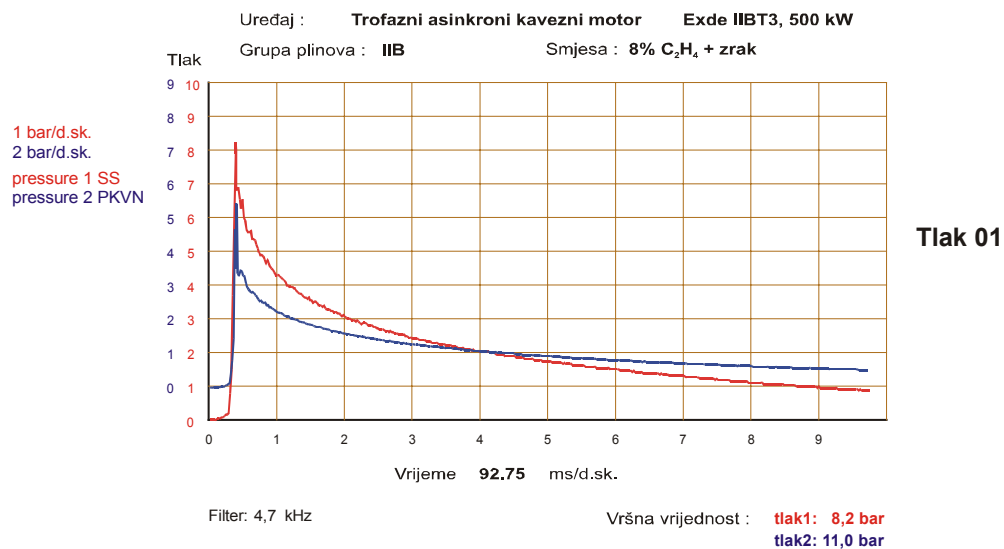
Mjerenja referentnog tlaka su provedena na pogonskoj (PS) i stražnjoj (SS) strani kućišta elektromotora, VN priključnoj kutiji (PKVN) i priključnoj kutiji za termosonde i grijače ( $PK_{mala}$ ). Smjesa je paljena visokonaponskim iskrištem.

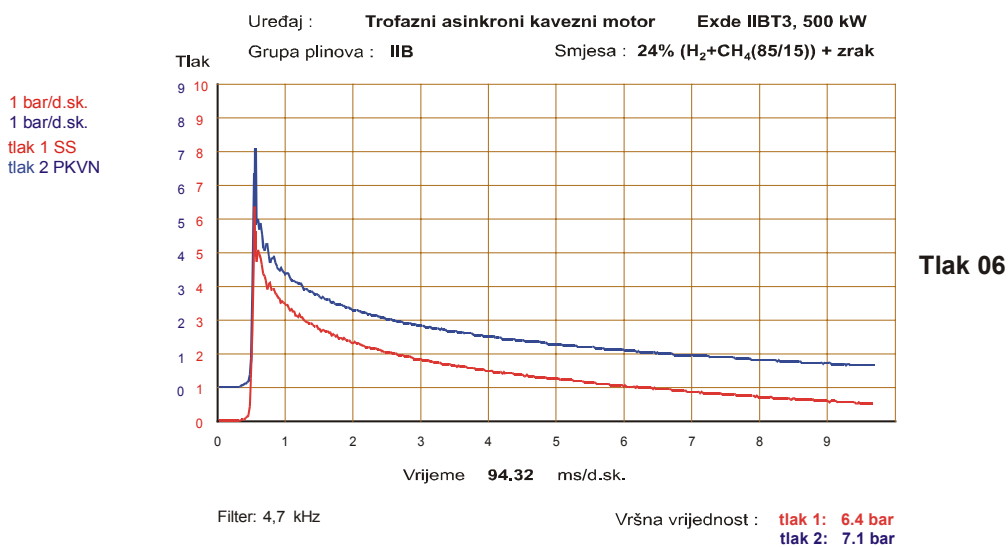
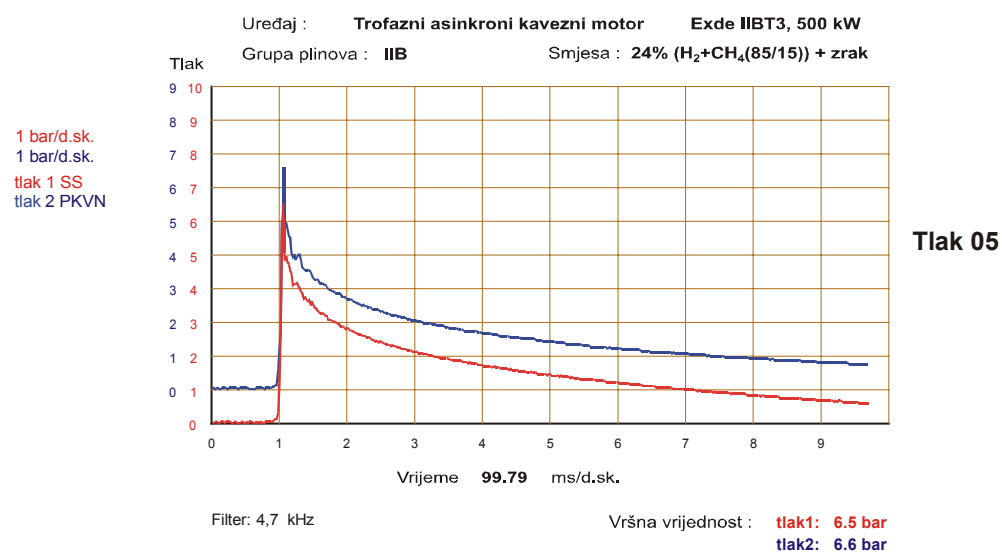
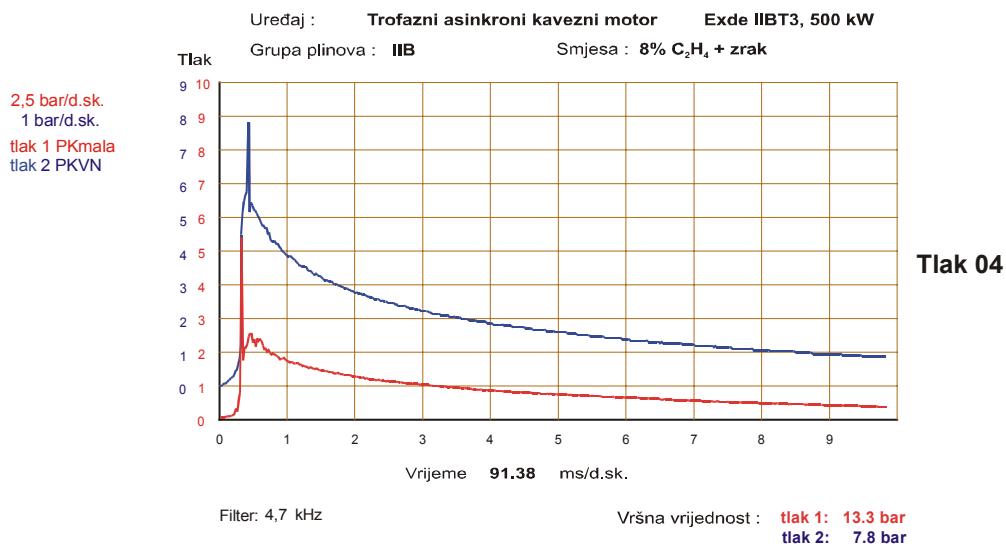
Pri svakom ispitivanju su mjereni tlakovi u dvije (od četiri) mjerne točke. Temperatura okoline je iznosila 17 °C. Rezultati mjerenja su prikazani u tablici 5.10.

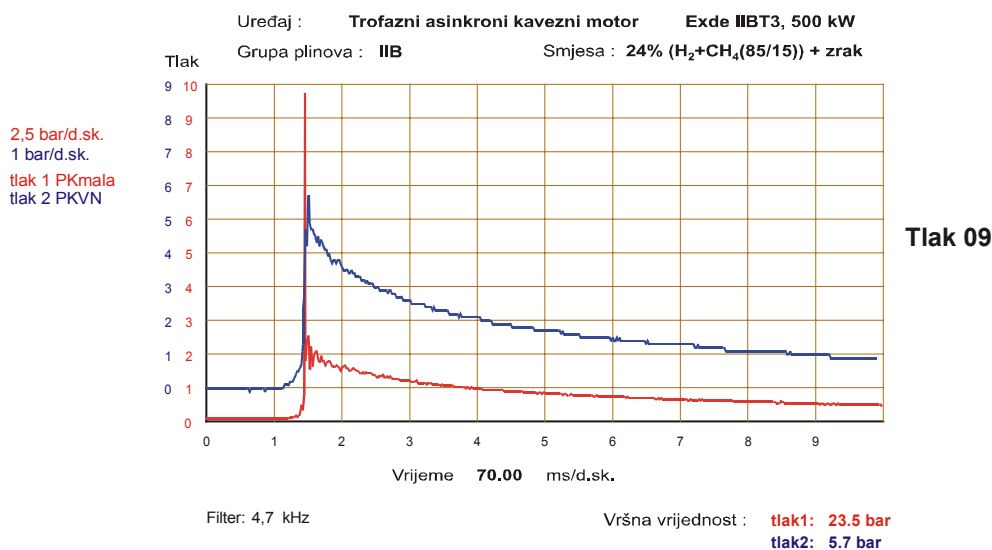
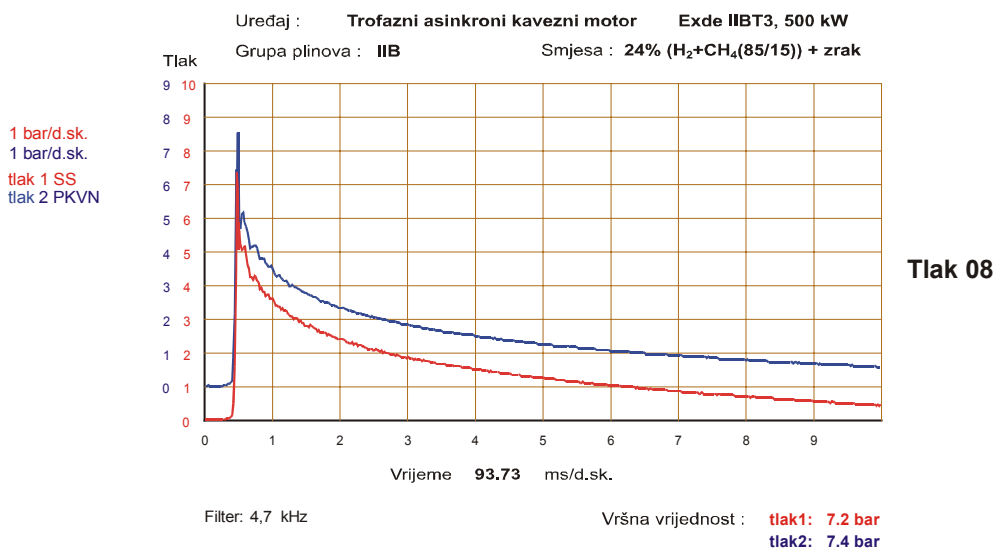
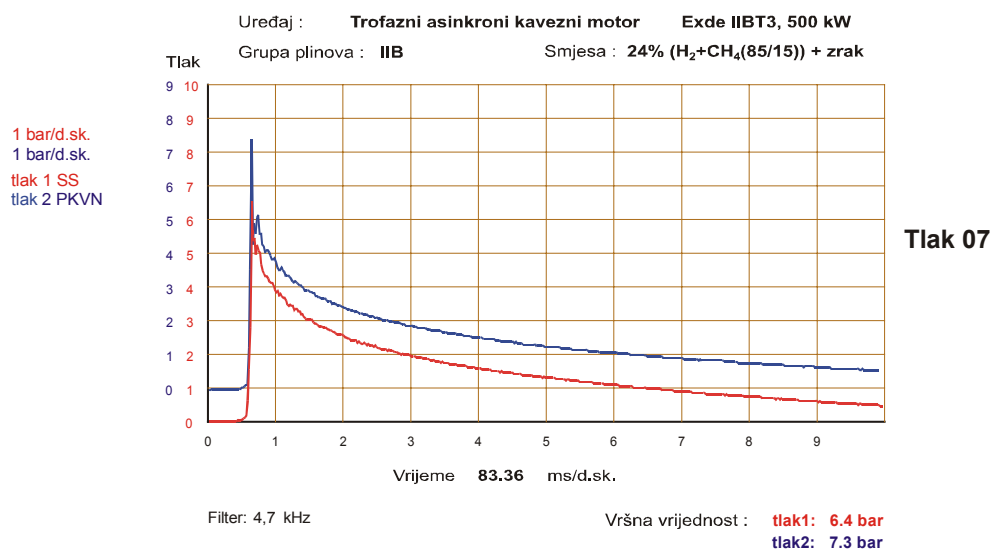
Tablica 5.10. Ispitivanje kućišta tlakom eksplozije (referentni tlak) (rezultati mjerenja na elektromotoru 500 kW)

| Ispitivanje | Plinska smjesa                     | Tlak eksplozije (bar) |     |      |             |
|-------------|------------------------------------|-----------------------|-----|------|-------------|
|             |                                    | Prostor               |     |      |             |
|             |                                    | PS                    | SS  | PKVN | $PK_{mala}$ |
| 1           | 8% $C_2H_4$ + zrak                 | –                     | 8.2 | 11   | –           |
| 2           | 8% $C_2H_4$ + zrak                 | –                     | 7.0 | 8.2  | –           |
| 3           | 8% $C_2H_4$ + zrak                 | 7.3                   | 7.8 | –    | –           |
| 4           | 8% $C_2H_4$ + zrak                 | –                     | –   | 7.8  | 13.3        |
| 5           | 24% ( $H_2 + CH_4$ (85/15)) + zrak | –                     | 7.2 | 7.4  | –           |
| 6           | 24% ( $H_2 + CH_4$ (85/15)) + zrak | –                     | 6.5 | 6.6  | –           |
| 7           | 24% ( $H_2 + CH_4$ (85/15)) + zrak | –                     | 6.4 | 7.1  | –           |
| 8           | 24% ( $H_2 + CH_4$ (85/15)) + zrak | –                     | 6.4 | 7.3  | –           |
| 9           | 24% ( $H_2 + CH_4$ (85/15)) + zrak | –                     | –   | 5.7  | 23.5        |

Rezultati snimanja referentnog tlaka prikazani su na slici 5.6. (za svih devet ispitivanja). Mjerilo vršne vrijednosti tlaka KISTLER 5511 je korišteno kao referentno mjerilo budući je navedeni uređaj baždaren. Dinamičko baždarenje pretvornika tlaka KISTLER 7055 i pojačala naboja KISTLER 5011 nije bilo provedeno.







Slika 5.6. Snimanje referentnog tlaka (rezultati snimanja na elektromotoru 500 kW)

Nakon utvrđivanja referentnog tlaka, provedeno je ispitivanje povećanim tlakom (dinamički postupak). Dinamičko ispitivanje se mora provesti tako da najveća vrijednost unutarnjeg tlaka kome se kućište podvrgava bude 1.5 puta veća od referentnog tlaka ali ne manja od 3.5 bara. Rezultati ispitivanja se smatraju zadovoljavajućim ako kućište ne pretrpi trajnu deformaciju ili oštećenje koje utječe na vrstu zaštite. Također raspori ne smiju biti nigdje trajno povećani.

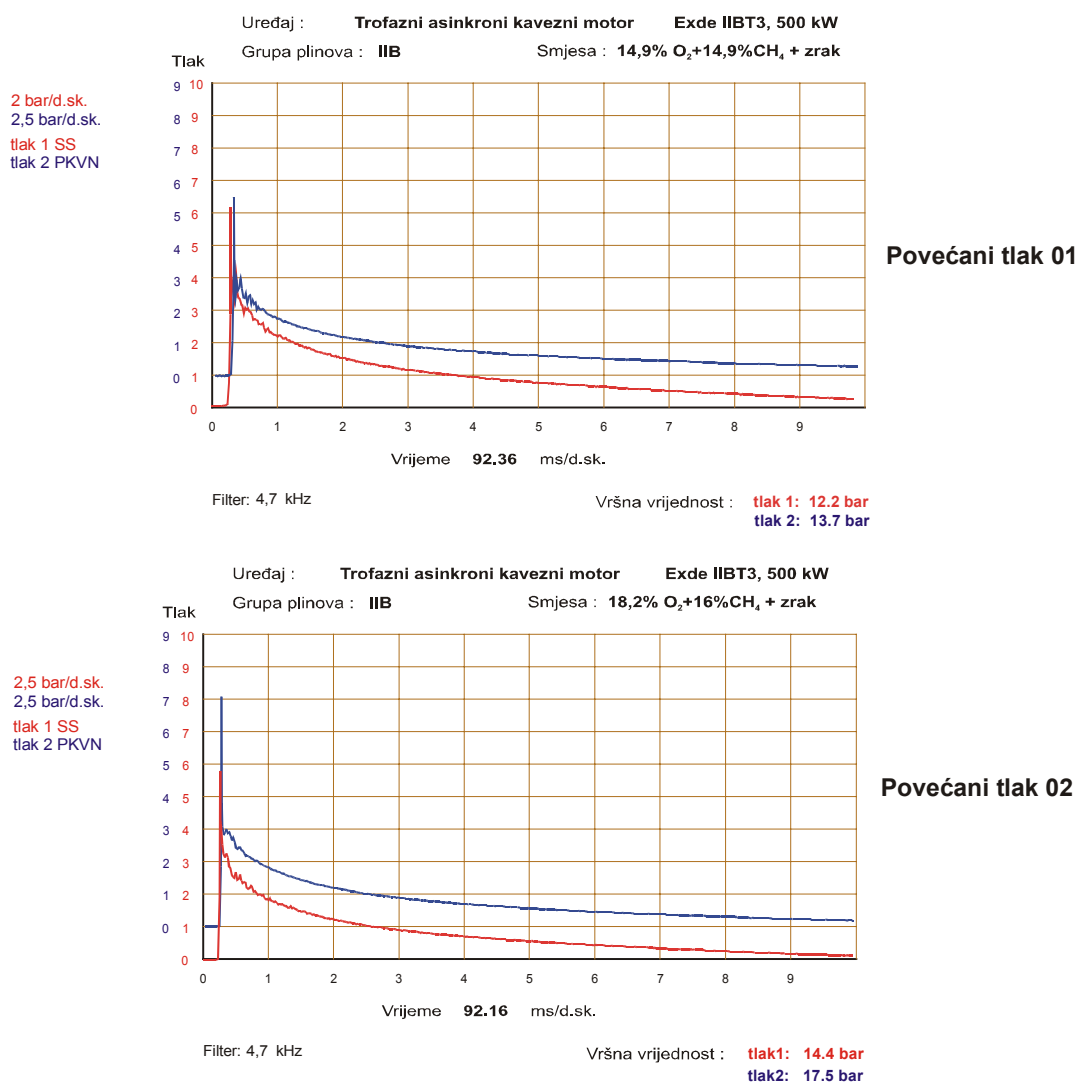
Rezultati ispitivanja povećanim tlakom elektromotora prikazani su u tablici 5.11. Tlakovi su mjereni na ležajnom štitu na stražnjoj strani i u VN priključnoj kutiji. Maksimalni referentni tlak stražnje strane iznosi 8.2 bara, a VN priključne kutije 11 bara.

Tablica 5.11. Ispitivanje povećanim tlakom (rezultati mjerenja na elektromotoru 500 kW)

| Ispitivanje | Tlak postignut smjesom                            | Veličina tlaka (bar) |      | Rezultat |     |
|-------------|---------------------------------------------------|----------------------|------|----------|-----|
|             |                                                   | SS                   | PKVN | Dobar    | Loš |
| 1           | 14.9%O <sub>2</sub> + 14.9%CH <sub>4</sub> + zrak | 12.2                 | 13.7 | ✓        | —   |
| 2           | 18.2%O <sub>2</sub> + 16%CH <sub>4</sub> + zrak   | 14.4                 | 17.5 | ✓        | —   |
| 3           | 14.9%O <sub>2</sub> + 14.9%CH <sub>4</sub> + zrak | —                    | 8.8  | ✓        | —   |

Kod atmosferskog tlaka i T = 17 °C

Rezultati snimanja povećanog tlaka (za ispitivanja r. br. 1 i 2) prikazani su na slici 5.7.



Slika 5.7. Snimanje povećanog tlaka (rezultati snimanja na elektromotoru 500 kW)

Kao posljednje, ali i najvažnije ispitivanje u nizu ispitivanja protueksplozijske zaštite asinkronih elektromotora u vrsti zaštita oklapanje "Ex d" je potrebno provesti ispitivanje probojnog paljenja. Ovo ispitivanje se svakako provodi na novom elektromotoru (tipsko, pa čak i pojedinačno ispitivanje) dok se na elektromotorima koji su bili u pogonu, radi složenosti ispitivanja, ono rijetko provodi. Na takvim elektromotorima se provode provjere konstrukcijskih zahtjeva iz čega se zaključuje o trenutnom stanju protueksplozijske zaštite, o čemu je već bilo riječi ranije.

Kod ispitivanja na probojno paljenje kućište se smješta u ispitni kotao. Ista eksplozivna smjesa unosi se u kućište i u ispitni kotao pod atmosferskim tlakom. Radi veličine motora, ispitivanje na probojno paljenje je provedeno van kotla alternativnim postupkom uporabom polietilenskog balona.

Elektromotor je skupine IIB te je ispitivanje provedeno smjesom 37% vodika + zrak. Rezultat ispitivanja je zadovoljavajući ako pri paljenju smjese unutar elektromotora ne dođe do paljenja smjese u ispitnom kotlu (polietilenskom balonu).

Rezultati ispitivanja na probojno paljenje za elektromotor 500 kW; 10 kV; Ex de IIB T3 su prikazani u tablici 5.12.

Tablica 5.12. Ispitivanje probojnog paljenja (rezultati mjerenja na elektromotoru 500 kW)

| Prostor      | Plinska smjesa            | Broj ispitivanja | Rezultat |     |
|--------------|---------------------------|------------------|----------|-----|
|              |                           |                  | Dobar    | Loš |
| Elektromotor | 37% H <sub>2</sub> + zrak | 5                | ✓        | –   |

Kod asinkronih elektromotora u vrsti zaštite oklapanje "Ex d" ispitivanja prikazana u ovom poglavlju rada su od izuzetne važnosti. Važnost ovih ispitivanja je u činjenici da se ova vrsta protueksplozijske zaštite elektromotora temelji na sprječavanju prijenosa eksplozije iz kućišta na okolni prostor. Iz temeljnog načela ove vrste protueksplozijske zaštite je vidljivo da zahtjevi na klasična ispitivanja asinkronog elektromotora (npr. kavez rotora, namoti statora, ekscentričnost i sl.) mogu biti ublaženi, tj. rizik od mogućih kvarova je dijelom prihvatljiv jer se eksplozija unutar motora izazvana npr. puknućem štapa rotora, pregrijavanjem rotora ili iskrom ne prenosi na vanjski prostor tj. ne dolazi do eksplozije u EMP-u ugroženom eksplozivnom atmosferom. No unatoč navedenom i na elektromotorima u vrsti protueksplozijske zaštite oklapanje se provode ispitivanja u praznom hodu, kratkom spoju i pri terećenju, (posebice radi zagrijavanja), mjere se otpori namota i sl. Navedena ispitivanja će biti detaljnije prikazana u dijelu rada koji razmatra ispitivanje protueksplozijske zaštite elektromotora povećana sigurnost "Ex e" radi posebne važnosti ovih ispitivanja kod ove vrste protueksplozijske zaštite.

Rezultati ispitivanja na predmetnim elektromotorima, prikazani u ovom radu, su rezultat višestrukih (i ponovljenih) ispitivanja do konačnog ispunjenja kriterija traženih normama. U tijeku ispitivanja su dijagnosticirana i stanja (vrijednosti pojedinih parametara) koja nisu udovoljavala traženim zahtjevima, no radi velikog broja provedenih ispitivanja prikazani su samo konačni rezultati (nakon poduzimanja radnji kojima je osigurano udovoljenje traženim zahtjevima). Temeljni cilj je bio prikazati metode ispitivanja.

Efikasnost zaštitnih mjera, u smislu protueksplozijske zaštite na, elektromotorima u vrsti zaštite oklapanje se ispituje složenim i vrlo skupim ispitivanjima, koja su ranije opisana.

Danas se u svijetu razvijaju kompjutorske simulacije za modeliranje širenja eksplozije (vatre) kroz sastave kućišta [37]. Kompjutorski je simulirana eksplozija u sfernoj kapsuli ( $V=230\text{ cm}^3$ ), punjenoj vodikom i zrakom u različitim omjerima, a paljenje je izazvano u centru kapsule. Dobiveni rezultati (tlakovi i temperature) su u skladu s općim iskustvima dobivenim klasičnim ispitivanjima, no razina preciznosti rezultata simulacija još nije zadovoljavajuća za pouzdanu primjenu.

Razvoj se dalje nastavlja primjenom specifičnih eksperimentalnih istraživanja s kojima se uspoređuju rezultati simulacija, kako bi se dobile preciznije potvrde istih.

## 5.2 Ispitivanje protueksplozijske zaštite elektromotora u vrsti zaštite povećana sigurnost "Ex e"

Asinkroni elektromotori u vrsti zaštite povećana sigurnost – "Ex e" su jedni od najčešće korištenih elektromotora u EMP-u ugroženom eksplozivnom atmosferom.

Temeljni razlog široke primjene ove vrste protueksplozijski zaštićenih asinkronih elektromotora je niska cijena u odnosu na druge vrste protueksplozijske zaštite. U protueksplozijskoj zaštiti povećana sigurnost je moguće izraditi samo električne uređaje koji u normalan radu ne iskre i koji imaju ograničeno zagrijanje, a izvedeni su tako da je malo vjerojatna pojava kvara na uređaju koji bi iskrom, lukom ili pregrijavanjem uređaja, mogao zapaliti eventualno prisutnu eksplozivnu atmosferu.

Protueksplozijska zaštita povećana sigurnost je primjenjiva i na asinkrone elektromotore, a sastoji se od:

- mehaničke zaštite aktivnih dijelova elektromotora pod naponom od onečišćenja vodom i prašinom, odnosno atmosferilijama,
- poboljšane električne izolacije i pouzdanijih električnih spojeva,
- ograničenog zagrijanja.

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.

Električna je izolacija kod ove vrste protueksplozijske zaštite određena, uz opće zahtjeve [45] [3] i:

- najmanjim dopuštenim zračnim razmacima i
- izolacijskim gradivom otpornim na provodne struje (provodne staze).

Iz same definicije zaštite povećana sigurnost je vidljivo da se ona temelji na pretpostavci da do kvara (na motoru), koji bi mogao biti uzročnik paljenja eksplozivne atmosfere, u normalnom radu neće doći, odnosno da će on biti na vrijeme isključen (djelovanjem zaštitnih uređaja).

Da bi ocijenili stvarno stanje elektromotora, tj. predvidjeli kvarove do kojih bi moglo doći uslijed eksploatacije elektromotora (oštećenja kaveza rotora, slabljenje međuzavojne izolacije i izolacije prema masi, pojava ekscentričnosti zračnog rasporeda i sl.) nužno je provesti dijagnostička ispitivanja kakva se provode na elektromotorima standardne industrijske izvedbe. Potrebno je primijeniti jednu ili više dijagnostičkih metoda npr. opisanih u trećem i četvrtom poglavlju ovog rada (npr. spektralnu analizu statorske struje i analizu odziva na udarni napon). Spomenutim dijagnostičkim metodama je moguće detektirati stanja koja prethode kvarovima (uzročnicima paljenja), poduzeti potrebne remontne zahvate, u određenom vremenskom razdoblju, te na taj način postići siguran rad motora odnosno spriječiti nastanak eksplozije.

Pouzdan i siguran rad asinkronog elektromotora u vrsti zaštite povećana sigurnost je moguće osigurati samo i jedino provedbom dijagnostičkih metoda koje se primjenjuje na "klasične" asinkrone elektromotore, te provedbom posebnih ispitivanja protueksplozijske zaštite povećana sigurnost o čemu će upravo biti riječi u ovom poglavlju rada.

Ispitivanja protueksplozijske zaštite će biti provedena na elektromotoru u vrsti protueksplozijske zaštite Ex e II T1/T2 snage 240 kW za napon 380/660 V, nazivne struje 423/244 A,  $I_A/I_N = 6.19$ ,  $t_E = 6s/6s$  (T1/T2).

Ispitivanja su provedena u laboratorijima "S-Komisije" i kod proizvođača.

Mjerenje temperature na mjestu razdvajanja (grananja) vodiča i na mjestu ulaza kabela (dopuštena je samo uporaba certificiranih kablskih uvodnica) je identično mjerenju prikazanom za elektromotor u vrsti zaštite oklapanje "Ex d" te ga ovdje nećemo ponovno razmatrati. Sukladno zahtjevu norme HRN EN 50014 (ranije HRN N.S8.011) provedeno je na kućištu elektromotora i na priključnoj kutiji ispitivanje otpornosti na udar.

Ispitni elementi su podvrgnuti učinku ispitne mase od 1 kg koja pada okomito s visine od 0.7 m što odgovara energiji od 7 J (teži uvjeti). Uteg ima glavu od čelika u obliku polukugle promjera 25 mm. Navedenim ispitivanjem nisu prouzročena oštećenja koja bi narušila protueksplozijsku zaštitu te se rezultati smatraju zadovoljavajućim. Rezultati mjerenja na elektromotoru snage 240 kW prikazani su u tablici 5.13.

Tablica 5.13. Ispitivanje otpornosti na udar

| Redni broj ispitivanja | Element            | Uvjeti |   | Energija (J) | Visina pada (m) | Rezultat |     |
|------------------------|--------------------|--------|---|--------------|-----------------|----------|-----|
|                        |                    | L      | T |              |                 | Dobar    | Loš |
| 1                      | Ventilatorska kapa | –      | ✓ | 7            | 0.7             | ✓        | –   |
| 2                      | Priključna kutija  | –      | ✓ | 7            | 0.7             | ✓        | –   |

Budući da se protueksplozijska zaštita elektromotora povećana sigurnost temelji na ograničenju zagrijanja potrebno je pažljivo i detaljno (posebice na elektromotorima koji su duži niz godina u uporabi) provesti mjerenja temperature. Postupak mjerenja je identičan kao kod motora u vrsti zaštite oklapanjem. Bitna je novina da se kod elektromotora u vrsti zaštite povećana sigurnost mora provjeriti i temperatura rotora (kritično mjesto) što se mjeri npr. provlačenjem termosonde kroz osovinu elektromotora. Sonda se spaja na mjernu opremu nakon što se motor zaustavi (vremenske promjene temperature nakon zaustavljanja su prihvatljive za ovo mjerenje).

Mjerenja temperature na elektromotoru snage 240 kW su dala zadovoljavajuće rezultate (temperaturni razred T1/T2) a rezultati su prikazani u tablici 5.14.

Tablica 5.14. Mjerenje najvećih temperatura (elektromotor snage 240 kW, "Ex e")

| Nazivni podaci elektromotora |                          |           |     | Parametri ispitnog kruga |       |        |     |     |
|------------------------------|--------------------------|-----------|-----|--------------------------|-------|--------|-----|-----|
| Napon                        |                          | 380/660 V |     | Napon                    |       | 380 V  |     |     |
| Struja                       |                          | 423/244 A |     | Struja                   |       | 423 A  |     |     |
| Snaga                        |                          | 240 kW    |     | Snaga                    |       | 240 kW |     |     |
| Temperatura<br>okoline (°C)  | Najveća temperatura (°C) |           |     |                          |       |        |     |     |
|                              | (1)                      | (2)       | (3) | (4)                      | (5)   | (6)    | (7) | (8) |
| 25                           | 83                       | 33        | 40  | 112.1                    | 133.2 | 47     | 36  | –   |

Mjerne točke u tablici 5.14. su definirane na slijedeći način:

- (1) – temperatura najtoplije točke na vanjskoj stijenki kućišta,
- (2) – temperatura uvida kabela,
- (3) – temperatura grananja vodiča,
- (4) – temperatura namota statora,
- (5) – temperatura rotora,
- (6) – temperatura ležaja (pogonska strana) nakon 4 h rada
- (7) – temperatura ležaja (stražnja strana) nakon 4 h rada.

Najviša dopuštena temperatura prema deklariranom temperaturom razreda T2 iznosi 300 °C. Najveća temperatura elektromotora utvrđena mjerenjem iznosi 133.2 °C. Mjerenje je provedeno na temperaturi okoline od 25 °C. Izmjerena vrijednost preračunata na temperaturu okoline od 40 °C (najveća očekivana vrijednost temperature okoline u kojoj će elektromotor biti

instaliran) iznosi  $133.2\text{ }^{\circ}\text{C} + (40\text{ }^{\circ}\text{C} - 25\text{ }^{\circ}\text{C})$ , što je manje od  $(300\text{ }^{\circ}\text{C} - 10\text{ }^{\circ}\text{C})$  tj. udovoljeno je zahtjevima za temperaturni razred T1/T2 i u slučaju kada se ne ispituje svaki motor u proizvodnji.

Provodne staze i zračni razmaci su bitni elementi o kojima ovisi protueksplozijska zaštita elektromotora u vrsti protueksplozijske zaštite povećana sigurnost. Ispitivani elektromotor je imao električnu izolaciju skupine II (HD 214 S2). Rezultati provedenih mjerenja i zahtjevi normi [45] su prikazani u tablicama 5.15 i 5.16.

Tablica 5.15. Kontrola zračnih razmaka

| Nazivni napon (V) | Kategorija izolacije | Najmanji zračni razmak (mm) |           |            |           |
|-------------------|----------------------|-----------------------------|-----------|------------|-----------|
|                   |                      | Između dijelova pod naponom |           | Prema masi |           |
|                   |                      | Dopušteno                   | Izmjereno | Dopušteno  | Izmjereno |
| 660               | –                    | 10                          | 22        | 10         | 28        |

Tablica 5.16. Kontrola provodnih staza

| Nazivni napon (V) | Kategorija izolacije | Najmanji razmak po površini (mm) |           |            |           |
|-------------------|----------------------|----------------------------------|-----------|------------|-----------|
|                   |                      | Između dijelova pod naponom      |           | Prema masi |           |
|                   |                      | Dopušteno                        | Izmjereno | Dopušteno  | Izmjereno |
| 660               | II                   | 16                               | >16       | 16         | >16       |

Provjera dielektričke čvrstoće je vrlo važna kod elektromotora u vrsti zaštite povećana sigurnost i često se primjenjuje kod provjere protueksplozijske zaštite elektromotora koji je duže vrijeme u pogonu. Spomenuto ispitivanje kao i ispitivanje IP zaštite na elektromotoru 240 kW, "Ex e", IP 54 je dalo zadovoljavajuće rezultate. Mjerenja su provedena istovjetno kao na motoru u vrsti zaštite oklopanje "Ex d" te postupak i rezultate mjerenja ovdje nećemo prikazivati.

Zagrijavanjima elektromotora u vrsti zaštite povećana sigurnost (kako statora tako i rotora) se posvećuje posebna pažnja s ciljem ustanovljavanja temperaturnog razreda te određivanja dozvoljenog vremena stajanja u kratkom spoju –  $t_E$ , budući da o navedenim elementima direktno ovisi protueksplozijska zaštita "Ex e" elektromotora.

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, prema tablici 5.2.

Najveća dopuštena ukupna temperatura  $\vartheta_{dop}$  [1], [6] iznosi:

$$\vartheta_{dop} = \vartheta_o + \vartheta_n + \vartheta_k \leq \vartheta_{kl} \quad (5.1)$$

gdje je:

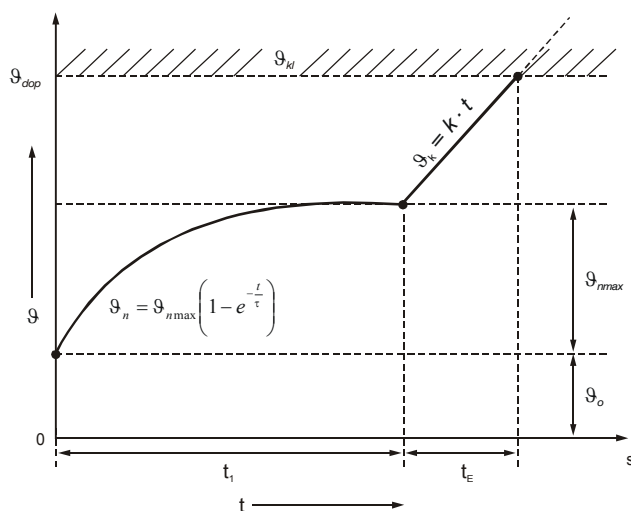
$\vartheta_o$  - najviša očekivana temperatura okoline, uobičajeno  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,

$\vartheta_n$  - nadtemperatura (zagrijanje) normalnog pogona,

$\vartheta_k$  - nadtemperatura (zagrijanje) zbog kvara (zakočeni rotor) – odgovara vremenu  $t_E$ ,

$\vartheta_{kl}$  - najveća dopuštena ukupna temperatura određena temperaturnim razredom (tablica 5.2) i klasom izolacije.

Objašnjenje zagrijavanja na primjeru zakočenog motora prikazuje slika 5.8.



Slika 5.8. Zagrijavanje motora i vrijeme  $t_E$

Predpostavlja se da je do kvara (zakočen rotor) došlo nakon uspostavljanja stacionarnog stanja nadtemperature normalnog pogona ( $\Theta_n$ ).

Proces zagrijavanja će zbog nazivne struje započeti oslobađanjem topline (gubitaka) ovisno o snazi koju možemo iskazati općim izrazom [6]:

$$P = \rho \cdot j^2 \cdot S \cdot l \quad (5.2)$$

gdje je:

- $l$  - dužina vodiča (m),
- $P$  - snaga (W),
- $\rho$  - specifični otpor ( $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ ),
- $j$  - gustoća struje ( $\text{A}/\text{mm}^2$ ),
- $S$  - presjek vodiča ( $\text{mm}^2$ ).

Intenzitet oslobađanja topline ovisi o snazi  $P$  dok količina oslobođene topline i temperatura ovise o trajanju snage  $P$ . Za količinu oslobođene topline  $Q$  možemo (u diferencijalu vremena) pisati:

$$dQ = P \cdot dt \quad (5.3)$$

Od oslobođene topline dio će biti odveden (prijenosom) na drugi medij  $dQ_1$ , dok će ostatak  $dQ_2$  djelovati na neposredno povećanje temperature (zagrijanje) tako da vrijedi odnos:

$$dQ = dQ_1 + dQ_2 \quad (5.4)$$

Odvod topline (prijenosom) u vremenu  $dt$  iznosi (prema Newtonovu zakonu):

$$dQ_1 = k_2 \cdot (\Theta - \Theta_o) \cdot dt \quad (5.5)$$

gdje je:

- $k_2$  – koeficijent odvođenja topline gubitaka ovisno o površini, toplinskoj vodljivosti materijala i koeficijentu odvođenja topline po jedinici površine za 1 K,
- $\vartheta$  – temperatura zagrijavanog tijela,
- $\vartheta_o$  – temperatura okoline (medija) na koju se odvodi toplina  $dQ_l$ .

Dio topline  $dQ_2$  (prema 5.4)

$$dQ_2 = dQ - dQ_l \quad (5.6)$$

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

$$dQ_2 = m \cdot c \cdot \vartheta \quad (5.7)$$

gdje je:

- $m$  – masa zagrijanog tijela (vodiča),
- $c$  – specifična toplota zagrijanog tijela (vodiča).

Iz dosadašnjih izraza možemo postaviti diferencijalnu jednadžbu za fizikalni proces zagrijavanja kako slijedi:

$$P \cdot dt = k_2 \cdot (\vartheta - \vartheta_o) \cdot dt + m \cdot c \cdot \vartheta \quad (5.8)$$

Stacionarno stanje će nastupiti kada se temperatura zagrijanog tijela više ne povećava, a kada će to nastupiti ovisi o vremenu prijelazne pojave i toku zagrijavanja za vrijeme prijelazne pojave. Riješena diferencijalna jednadžba (5.8) poprima oblik [1][6]:

$$e^{\frac{k_2}{m \cdot c} t} = 1 - \frac{k_2}{P} \cdot (\vartheta - \vartheta_o) \quad (5.9)$$

odakle zagrijanje odnosno nadtemperatura iznosi:

$$\vartheta_n = \vartheta - \vartheta_o = \frac{P}{k_2} - \frac{P}{k_2} \cdot \left( e^{-\frac{k_2}{m \cdot c} t} \right) = \frac{P}{k_2} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{k_2}{m \cdot c} t} \right) \quad (5.10)$$

ako uvedemo pojam vremenske konstante zagrijavanja  $\tau$  kao:

$$\tau = \frac{m \cdot c}{k_2} \quad (5.11)$$

konačni je izraz zagrijanja u prijelaznom stanju:

$$\vartheta_n = \vartheta_{n \max} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (5.12)$$

pri čemu smo koristili činjenicu da stacionarno stanje nastupa kad se temperatura zagrijanog tijela više ne povećava tj.  $dQ_2 = 0$ , pri čemu nastaje maksimalna temperatura  $\vartheta = \vartheta_{\max}$ , normalnog pogona.

U tom slučaju iz izraza:

$$P \cdot dt = k_2 \cdot (\vartheta - \vartheta_o) \cdot dt \quad (5.13)$$

stacionarno stanje daje:

$$P = k_2 \cdot (\vartheta_{\max} - \vartheta_o) \quad (5.14)$$

tj. maksimalna temperatura iznosi:

$$\vartheta_{\max} = \vartheta_o + \frac{P}{k_2} \quad (5.15)$$

odnosno maksimalno zagrijanje (nadtemperatura) će biti:

$$\vartheta_{n \max} = \frac{P}{k_2} \quad (5.16)$$

Izraz 5.12 opisuje krivulju zagrijavanja, na slici 5.8, za područje (vrijeme) normalnog pogona (područje  $t_I$ ).

Prema izrazu 5.12 stacionarno stanje (normalnog pogona) nastupa asimptotski za  $t \rightarrow \infty$  ali praktički se može reći da nastupa između  $3\tau$  i  $5\tau$  [6]. Kod praktičnih mjerenja se uzima da je stacionarno stanje nastupilo ako temperaturna promjena nije veća od 2K/sat.

Važno je naglasiti da se procesi zagrijavanja i rotora i statora odvijaju po istim fizikalnim principima (izrazima). 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 (nadtemperature) normalnog pogona. Prirast zagrijanja po vremenu (nadtemperatura) namota statora pri zakočenom rotoru  $\vartheta_{ks}/t$  može se u prvoj aproksimaciji izračunati na osnovi adijabatskog zagrijavanja bakra iz gustoće struje u namotu, što znači jednoliko davanje topline za koje vrijedi [6]:

$$\frac{\vartheta_{ks}}{t} = j^2 \cdot a \quad (5.17)$$

gdje je:

- $j$  - gustoća struje,
- $a$  - koeficijent za materijal koji se računa prema izrazu:

$$a = \frac{(1 + \alpha \cdot \Delta t)}{c \cdot \gamma \cdot k} \quad (5.18)$$

gdje je:

- $\alpha$  - temperaturni koeficijent električne vodljivosti
- $c$  - specifična toplota
- $\gamma$  - gustoća
- $k$  - vodljivost

Za bakar možemo uzeti (za područje temperatura oko 70 °C) da je  $a_{Cu} = 0.0065$  te možemo pisati:

$$\frac{g_{ks}}{t} = 0.0065 \cdot j^2 \quad (5.19)$$

te uz uvođenje:

$$b = 0.0065 \cdot j^2 \quad (5.20)$$

imamo:

$$\frac{g_{ks}}{t} = b \quad (5.21)$$

Na sličan način se može pokazati da prirast zagrijanja po vremenu štapa i prstena rotora (uz pretpostavku adijabatskog procesa zbog kratkog vremena zagrijavanja) iznosi:

$$\frac{g_{kr}}{t} = j^2 \cdot a \cdot k_w \quad (5.22)$$

gdje je  $k_w$  redukcijski faktor kojemu nije moguće utvrditi jednoznačnu vrijednost budući se uvjeti prijenosa topline razlikuju ovisno o konstrukciji rotora.

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

$$\frac{g_{kr}}{t} = \frac{P_{cur}}{c \cdot m} \quad (5.23)$$

gdje je:

- $P_{cur}$  - gubici u bakru štapa i prstena
- $m$  - masa kaveza (štapova i prstena)
- $c$  - specifična toplota

Izrazi 5.21 i 5.23 opisuju krivulju prirasta zagrijavanja po vremenu statora i rotora (nadtemperature) pri zakočenom rotoru (vrijeme  $t_E$  prema slici 5.8).

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

Područje “ $t_1$ ” na slici 5.8. je vrijeme normalnog pogona dok je “ $t_E$ ” vrijeme za koje se dostiže  $\vartheta_{dop}$ , uz zakočen rotor, a nakon normalnog pogona. Vrijeme “ $t_E$ ” se posebno određuje za najtopliju točku rotora i posebno za najtopliju točku statora.

Uz navedena ograničenja najviše temperature, određena temperaturnim razredom, najveća temperatura izoliranih namotaja ne smije prekoračiti vrijednosti prikazane u tablici 5.17 [45] [3] koje uzimaju u obzir toplinsku postojanost izolacijskog materijala.

Tablica 5.17. Granične temperature za izolirane namotaje

|                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                             | Metoda mjerenja temperature | Toplinski razred izolacijskog materijala u skladu s HD 566 |           |            |            |                 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------------------|-----------|------------|------------|-----------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                             |                             | A                                                          | E         | B          | F          | H <sup>1)</sup> |
| 1                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Granična temperatura (°C) u nazivnom radu:                  |                             |                                                            |           |            |            |                 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                   | a) jednoslojno izolirani namotaji                           | R ili T                     | 95                                                         | 110       | 120        | 130        | 155             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                   | b) ostali izolirani namotaji                                | R<br>T                      | 90<br>80                                                   | 105<br>95 | 110<br>100 | 130<br>115 | 155<br>135      |
| 2                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Granična temperatura <sup>2)</sup> (°C) nakon vremena $t_E$ | R                           | 160                                                        | 175       | 185        | 210        | 235             |
| R = metoda mjerenja električnog otpora<br>T = metoda mjerenja termometrom (dopušteno samo kad je mjerenje pomoću otpora nemoguće)                                                                                                                                                 |                                                             |                             |                                                            |           |            |            |                 |
| 1) Ima privremeno značenje dok ne bude propisana. Za više toplinske razrede izolacijskog gradiva vidjeti HD 566.<br>2) Te vrijednosti sastavljene su od temperature okoline, porasta temperature namotaja u nazivnom radu i porasta temperature u vremenu $t_E$ (vidi sliku 5.8). |                                                             |                             |                                                            |           |            |            |                 |

Asinkroni elektromotori s kaveznim rotorom moraju biti podvrgnuti ispitivanju s zakočenim rotorom radi određivanja odnosa početne i nazivne struje  $I_A/I_N$  i vremena  $t_E$ . Odnos  $I_A/I_N$  i vrijeme  $t_E$  utvrđuju se mjerenjem. Za nazivne snage iznad 160 kW zagrijanje i vrijeme  $t_E$  se mogu utvrditi proračunom [3][45].

Zagrijanje ispitivanog elektromotora (240 kW) u trajnom radu ( $\vartheta_o + \vartheta_n$ ) i pri nazivnom opterećenju provjereno je mjerenjem kod proizvođača. Temperatura okoline  $\vartheta_o$  je iznosila 25 °C, napon ispitivanja je iznosio 380 V, struja je iznosila 423 A, vrsta pogona je bila S1 a trajanje pokusa je bilo 5.5 sati. Zagrijanje (nadtemperatura) rotora je mjereno termosondom Cu – Ko dok je nadtemperatura statora mjerena metodom mjerenja otpora. Rezultati mjerenja nadtemperatura  $\Theta$  (K) su prikazani u tablici 5.18.

Tablica 5.18. Nadtemperatura rotora i statora u nazivnom radu (pogonu)

|                           |       |                          |          |
|---------------------------|-------|--------------------------|----------|
| Napon                     | 380   | struja (A)               | 423      |
| $\Theta_{rot}$ (K)        | 108.2 | $\Theta_{stat}$ (K)      | 87.1     |
| $T_o = 25$ °C             |       | $Rh_{stat}$ ( $\Omega$ ) | 0.008209 |
| Trajanje pokusa: 5.5 sati |       | $Rt_{stat}$ ( $\Omega$ ) | 0.011000 |

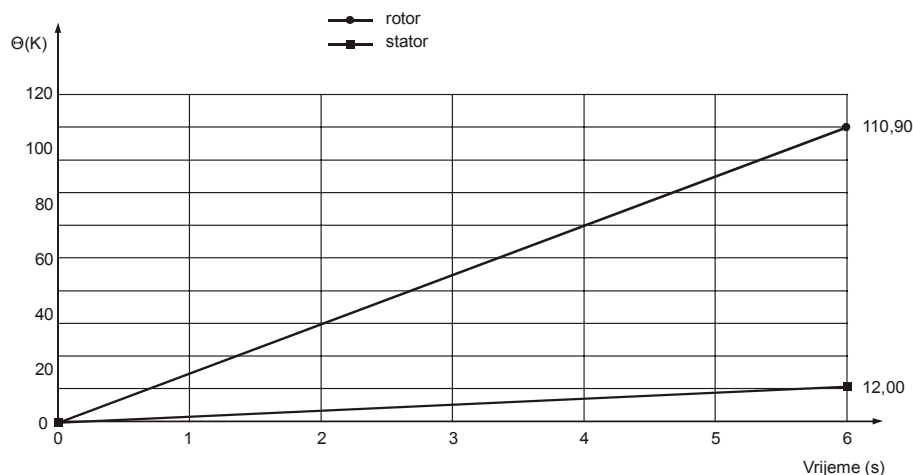
Analiza zagrijavanja sa zakočenim rotorom (u kratkom spoju) provedena je računskim putem, od strane proizvođača elektromotora [63], budući, radi veličine elektromotora, nije bilo moguće provesti ispitivanja. Konačni rezultati proračuna, bitni za analizu protueksplozijske zaštite elektromotora prikazani su u tablici 5.19.

Tablica 5.19. Nadtemperature rotora i statora u kratkom spoju i vrijeme  $t_E$  (proračunske vrijednosti)

|                     |       |
|---------------------|-------|
| $\Theta_{rot}$ (K)  | 110.9 |
| $\Theta_{stat}$ (K) | 12    |
| $t_E$ (s)           | 6     |

Struja kratkog spoja, izmjerena 5s nakon uključenja zakočenog motora (pri nazivnom naponu i nazivnoj frekvenciji) je iznosila 2618.4 A. Iz izmjerene struje kratkog spoja i nazivne struje elektromotora dobije se odnos  $I_A/I_N = 2618.4/423 = 6.19$ .

Nadtemperature rotora i statora (za vrijeme zakočenog motora) možemo prikazati i grafički (slika 5.9)



Slika 5.9. Zagrijanje rotora i statora u kratkom spoju (nadtemperature u odnosu na nazivno opterećen elektromotor)

Nakon provedbe ranije opisanih mjerenja i proračuna, potrebno je, na temelju dobivenih podataka odrediti temperaturni razred elektromotora, što čini jednu od temeljnih mjera protueksplozijske zaštite elektromotora povećana sigurnost. Navedeno određivanje temperaturnog razreda je prikazano u tablici 5.20.

Tablica 5.20. Određivanje temperaturnog razreda elektromotora u vrsti protueksplozijske zaštite "Ex e"

| Temper. razred | Stator           |                  |                 |                | Rotor            |                  |                 |                |
|----------------|------------------|------------------|-----------------|----------------|------------------|------------------|-----------------|----------------|
|                | Θ <sub>dop</sub> | Θ <sub>naz</sub> | Θ <sub>tE</sub> | t <sub>E</sub> | Θ <sub>dop</sub> | Θ <sub>naz</sub> | Θ <sub>tE</sub> | t <sub>E</sub> |
| T1             | 170              | 88               | 82              | > 6            | 410              | 109              | 301             | > 6            |
| T2             | 170              | 88               | 82              | > 6            | 260              | 109              | 251             | > 6            |
| T3             | 160              | 88               | 72              | > 6            | 160              | 109              | 51              | –              |
| T4             | 95               | 88               | 7               | –              | 95               | 109              | –               | –              |
| T5             | 60               | 88               | –               | –              | 60               | 109              | –               | –              |
| T6             | 40               | 88               | –               | –              | 40               | 109              | –               | –              |

Dopuštena nadtemperatura u kratkom spoju ( $\Theta_{dop}$ ) statora za temperaturne razrede T1 i T2 je dodatno ograničena toplinskim razredom izolacijskog materijala (za klasu izolacije F granična nadtemperatura, u odnosu na 40 °C okoline, iznosi 170 K). Nadtemperature u nazivnom radu elektromotora ( $\Theta_{naz}$ ) su preuzete iz tablice 5.18. ( $\Theta_{rot} = 108.2 \text{ K} \approx 109 \text{ K}$ ;  $\Theta_{stat} = 87.1 \text{ K} \approx 88 \text{ K}$ ). Dopušteno dodatno zagrijanje u kratkom spoju ( $\Theta_{tE}$ ) se dobije računski tj.:  $\Theta_{tE} = \Theta_{dop} - \Theta_{naz}$ .

Iz dijagrama na slici 5.9. je vidljivo da stator elektromotora, po pitanju zagrijavanja u kratkom spoju, udovoljava za temperaturne razrede T1, T2 i T3. Za temperaturni razred T4 dopušteno je  $\Theta_{tE}$  iznosa 7 K dok se stator u vremenu  $t_E$  (6s) dodatno zagrije za 12 K, dakle stator motora ne udovoljava za T4. Iz istog dijagrama i tablice 5.20. je vidljivo da rotor elektromotora udovoljava zahtjevima temperaturnih razreda T1 i T2.

Temeljem svih provedenih ispitivanja i proračuna može se zaključiti da ispitivani elektromotor, snage 240 kW, "Ex e" udovoljava zahtjevima temperaturnih razreda T1/T2 uz dopušteno vrijeme stajanja u kratkom spoju  $t_E = 6/6s$  (za T1 i T2).

Kako je rečeno i u uvodnom dijelu ovog poglavlja, stvarno stanje elektromotora, u vrsti zaštite povećana sigurnost, nakon višegodišnjeg rada u pogonu, moguće je ustanoviti samo provedbom ovdje opisanih ispitivanja (ili dijela ispitivanja) i dijagnostičkih ispitivanja kakva se provode na elektromotorima standardne industrijske izvedbe. Uz ispitivanja protueksplozijske zaštite, prikazana u ovom poglavlju, na elektromotorima u vrsti zaštite povećana sigurnost se provode i dodatna ispitivanja kao što su snimanje karakteristika praznog hoda, opterećenja, i kratkog spoja. Navedena mjerenja su važna radi provjere deklariranih podataka na kojima se jednim dijelom i temelji protueksplozijska zaštita povećana sigurnost. Ispitivanja u praznom hodu, kratkom spoju i pri terećenju elektromotora 380/660 V; 423/244 A; 240 kW, Ex e II T1/T2,  $\cos \varphi = 0.91$  je proveo proizvođač elektromotora. Navedena ispitivanja se uobičajeno provode kod tipskog ispitivanja elektromotora u vrsti zaštite povećana sigurnost i čine dodatak "Izvešću o ispitivanju protueksplozijske zaštite" koji izrađuje S-komisija Zagreb kao certifikacijska ustanova za protueksplozijsku zaštitu u Hrvatskoj. U prilogu B ovog rada su prikazani rezultati spomenutih ispitivanja koja je obavio proizvođač elektromotora [63].

Dio prikazanih ispitivanja se provodi i na elektromotorima koji su duže vrijeme u pogonu, a s ciljem utvrđivanja (dijagnosticiranja) trenutnog i stvarnog stanja protueksplozijske zaštite elektromotora u vrsti zaštite povećana sigurnost.

### 5.3 Ispitivanje protueksplozijske zaštite elektromotora u vrsti zaštite nadtlak "Ex p"

Vrsta protueksplozijske zaštite nadtlak "Ex p" se prvenstveno primjenjuje na kolektorskim elektromotorima (koji u normalnom radu iskre) no česta je primjena i na asinkronim visokonaponskim elektromotorima (dakle i većim snagama).

Temeljno načelo ove vrste protueksplozijske zaštite elektromotora je u odvajanju dijelova elektromotora, koji mogu biti uzročnici paljenja, od okolne eksplozivne atmosfere zrakom ili inertnim plinom pod nadtlakom.

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

Iz samog temeljnog načela zaštite nadtlak bi se moglo 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.

Iz navedenog je vidljivo da je na elektromotorima u vrsti zaštite nadtlak potrebno periodički provoditi i dijagnostička ispitivanja kakva se provode na elektromotorima standardne industrijske izvedbe s ciljem pravovremenog otkrivanja stanja i kvarova koji za posljedicu mogu imati povećanje temperature dijelova elektromotora (npr. rotora, ležajeva i sl.) iznad vrijednosti dopuštene temperaturnim razredom. Moguće je npr. primijeniti neke od dijagnostičkih metoda opisanih u trećem i četvrtom poglavlju ovog rada.

Pored spomenutih dijagnostičkih ispitivanja na elektromotoru u vrsti protueksplozijske zaštite nadtlak potrebno je provesti i neka posebna ispitivanja specifična ovoj vrsti zaštite, a koja će biti ukratko prikazana (sa rezultatima provedenih ispitivanja) u tekstu koji slijedi.

Ispitivanja se provode kako na novim elektromotorima, pri postupku certifikacije, tako i na elektromotorima koji su u pogonu s ciljem utvrđivanja trenutnog stanja protueksplozijske zaštite.

Ispitivanja su provedena na elektromotoru snage 1700 kW, 6600 V, 175 A, S1, F u vrsti protueksplozijske zaštite Ex ped IIB T3, [63]. Sam elektromotor te glavna energetska priključna kutija su u vrsti zaštite "Ex p". Tlačna i krilna sklopka za kontrolu nadtlaka su spojene u samosigurni "Ex i" strujni krug (navedeni zahtjev osigurava korisnik). U ležajevima i namotima su ugrađene termosonde za kontrolu temperature. Sonde u namotu su štice nadtlakom a mjerenje temperature se provodi samo za vrijeme postojanja nadtlaka. Termosonde u ležajevima spajaju se u samosigurni strujni krug (navedeni zahtjev osigurava korisnik). Priključci termosondi se spajaju u priključnoj kutiji povećane sigurnosti - "Ex e". Na elektromotoru je ugrađen antikondezacijski grijač u vrsti zaštite Ex de IIB T3. U ovom dijelu rada će biti prikazana provedena ispitivanja koja su bitna sa stanovišta vrste zaštite nadtlak "Ex p". Elementi vrste zaštite "Ex d" i "Ex e" su ranije opisani te ih ovdje nećemo prikazivati.

Izgled elektromotora s pridruženim elementima, te sustavom koji osigurava vrstu zaštite nadtlak, prikazan je na slici u prilogu C.

Rezultati mjerenja temperature i mjerna mjesta na ispitivanom elektromotoru u vrsti protueksplozijske zaštite nadtlak prikazani su u tablici 5.21.

Tablica 5.21. Termička ispitivanja (elektromotor snage 1700 kW)

| Nazivni podaci elektromotora |                          |      |      | Parametri ispitnog kruga |             |      |      |      |
|------------------------------|--------------------------|------|------|--------------------------|-------------|------|------|------|
| Napon                        | 6600 V                   |      |      | Napon                    | 6192 V      |      |      |      |
| Struja                       | 175 A                    |      |      | Struja                   | 190 A       |      |      |      |
| Snaga                        | 1700 kW                  |      |      | Snaga                    | 1766.094 kW |      |      |      |
| Temperatura okoline (C)      | Najveća temperatura (°C) |      |      |                          |             |      |      |      |
|                              | (1)                      | (2)  | (3)  | (4)                      | (5)         | (6)  | (7)  | (8)  |
| 16.5                         | 15.2                     | 45.6 | 20.8 | 18.6                     | 45.2        | 53.3 | 82.1 | 69.8 |

Mjerna mjesta u tablici 5.21. su definirana na slijedeći način:

- (1) – temperatura ulaznog zraka,
- (2) – temperatura izlaznog zraka,
- (3) – temperatura uvoda kabela,
- (4) – temperatura grananja vodiča kabela,
- (5) – temperatura ležaja (pogonska strana) nakon 2.25 sati rada (stacionarno stanje temperature),
- (6) – temperatura ležaja (stražnja strana) nakon 2.25 sati rada,
- (7) – temperatura statorskog namota,
- (8) – temperatura rotora.

Izmjerene vrijednosti udovoljavaju deklariranom temperaturnom razredu T3 (200 °C).

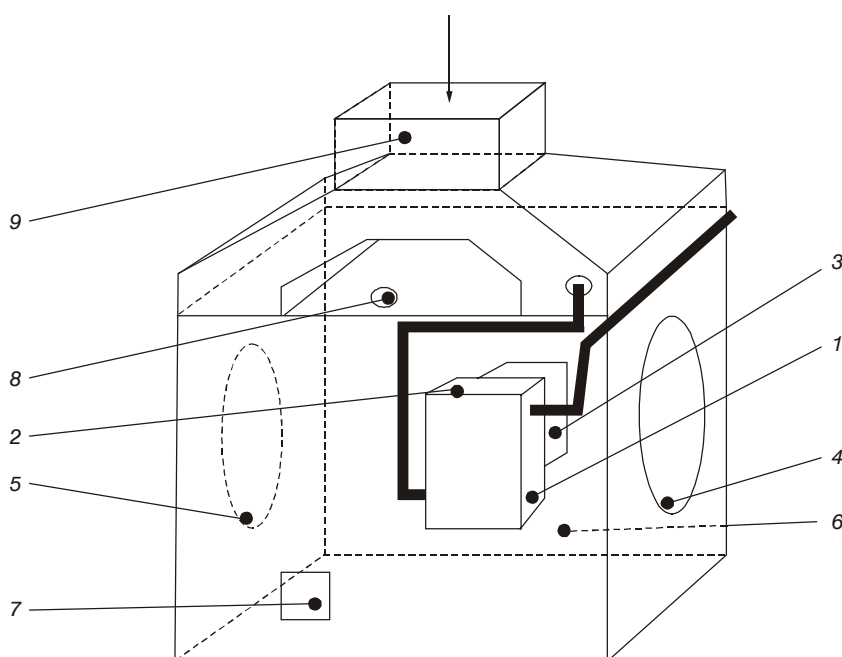
Na predmetnom je elektromotoru, sukladno normi HRN EN 50014, provedeno i ispitivanje starenja za gradiva koja se upotrebljavaju za brtvljenje priključne kutije (IP zaštita). Dobiveni rezultati su zadovoljavajući budući da na kraju ispitnog postupka promjena u tvrdoći nije bila veća od 20% tvrdoće prije starenja. Rezultati ispitivanja starenja su prikazani u tablici 5.22.

Tablica 5.22. Ispitivanje starenja za gradiva koja se upotrebljavaju za brtvljenje priključne kutije

| Ispitivano gradivo            | Tvrdća [Sh°] (srednja vrijednost) |                          |                         | Rezultat        |
|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------|
|                               | Dostavno stanje                   | Nakon 168 sati na 100 °C | Nakon 48 sati na -20 °C |                 |
| Brtva od elektrotehničke gume | 50.5                              | 55                       | 56                      | Zadovoljavajući |
| Brtva od obične gume          | 47.6                              | 46                       | 47                      | Zadovoljavajući |

Temeljna ispitivanja protueksplozijske zaštite elektromotora u vrsti zaštite nadtlak se odnose na ispitivanja povećanim tlakom, ispitivanja gubitaka, ispitivanja ispiranja i sl.

U svrhu ispitivanja nadtlaka na elektromotoru su izbušeni otvori na pojedinim mjestima ili su korišteni postojeći otvori (npr. za vijke na ležajnim štitovima, za ugradnju grijača i sl.). Na slici 5.10. prikazane su pozicije pojedinih mjernih mjesta, ove pozicije će biti korištene, u prikazu mjerenja koji slijedi, u svrhu definiranja mjernih točaka.



Slika 5.10. Mjerna mjesta mjerenja tlaka (na elektromotoru snage 1700 kW)

Mjerna mjesta, prema slici 5.10., su definirana na slijedeći način:

- (1) – priključna kutija dolje,
- (2) – priključna kutija gore,
- (3) – prostor između priključne kutije i motora,
- (4) – na mjestu vijka koji drži ležajni štit na stražnjoj strani,
- (5) – na mjestu vijka koji drži ležajni štit na pogonskoj strani,
- (6) – pri dnu motora (ispod izlaznog otvora koji nije vidljiv na slici),
- (7) – na mjestu grijača,
- (8) – na mjestu tlačne sklopke,
- (9) – na ulaznom otvoru za zrak.

Sukladno normi HRN EN 50016 provedena je provjera najnižeg nadtlaka u motoru. Mjerenje je provedeno u mirovanju i vrtnji motora te je mjeren nadtlak u pojedinim točkama, definiranim na slici 5.10. Za ispitivani elektromotor je bio definiran najmanji protok zraka od  $1.4 \text{ m}^3/\text{s}$  te najviši (istovremeno i radni) protok zraka od  $2.8 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Rezultati mjerenja su zadovoljavajući ako je u svakoj mjernoj točki izmjeren nadtlak (u odnosu na okolni) minimalnog iznosa 50 Pa.

U tablici 5.23 su prikazani rezultati mjerenja najnižeg nadtlaka (u mirovanju i vrtnji motora).

Tablica 5.23. Mjerenje najnižeg nadtlaka

| Mjereno u mirovanju motora             |              |              |              |              |
|----------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Protok zraka [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] | 1.4          | 2.3          | 2.8          | 2.0          |
| Mjerno mjesto                          | Nadtlak [Pa] | Nadtlak [Pa] | Nadtlak [Pa] | Nadtlak [Pa] |
| 1                                      | 80           | 190          | 280          | 140          |
| 2                                      | 80           | 190          | 280          | 140          |
| 3                                      | 140          | 360          | 580          | 260          |
| 4                                      | 140          | 360          | 580          | –            |
| 5                                      | 140          | 330          | 600          | –            |
| 6                                      | 60           | 180          | 300          | 130          |
| 7                                      | 80           | 210          | 400          | –            |
| 8                                      | –            | –            | –            | 160          |
| 9                                      | 120          | 310          | 520          | –            |

| Mjereno u vrtnji motora                |              |              |              |              |
|----------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Protok zraka [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] | 1.4          | 1.75         | 2.8          | 2.0          |
| Mjerno mjesto                          | Nadtlak [Pa] | Nadtlak [Pa] | Nadtlak [Pa] | Nadtlak [Pa] |
| 1                                      | –            | –            | 240          | 90           |
| 2                                      | –            | –            | 240          | 90           |
| 3                                      | –            | –            | 440          | 140          |
| 4                                      | – 60         | 40           | 440          | 140          |
| 5                                      | –            | –            | 420          | 140          |
| 6                                      | –            | –            | 300          | 160          |
| 7                                      | –            | –            | 380          | 140          |
| 8                                      | –            | –            | –            | 170          |
| 9                                      | –            | –            | 360          | 120          |

Iz rezultata mjerenja je vidljivo da deklarirani minimalni protok zraka od  $1.4 \text{ m}^3/\text{s}$  ne osigurava, na svim mjernim mjestima, minimalno traženi nadtlak od 50 Pa. Na mjernom mjestu 4 (u vrtnji) je izmjeren čak podtlak od 60 Pa, dok je na istom mjernom mjestu pri protoku od  $1.75 \text{ m}^3/\text{s}$  izmjeren nadtlak od nedovoljnih 40 Pa. U dogovoru s proizvođačem motora i korisnikom EMP-a je povećan najmanji protok zraka sa  $1.4 \text{ m}^3/\text{s}$  na  $2.0 \text{ m}^3/\text{s}$ . Pri protoku od  $2.0 \text{ m}^3/\text{s}$  na svim mjernim mjestima u motoru su izmjerene vrijednosti nadtlaka veće od zahtijevanih 50 Pa.

Tlačna sklopka, za kontrolu nadtlaka, je ugrađena na mjernom mjestu br. 8. Prilikom podešavanja potrebno je podesiti tlačnu sklopku na vrijednost koja će osigurati pouzdanu proradu sklopke prije nego nadtlak u bilo kojoj točki motora padne ispod 50 Pa. Najniži nadtlak (i u mirovanju i u vrtnji) je u priključnoj kutiji. Iz navedenog razloga je provedeno mjerenje pri kojem je određeno da pri nadtlaku u priključnoj kutiji od 55 Pa tlak na mjernom mjestu br. 8 (mjesto tlačne sklopke) iznosi 120 Pa. Zbog toga je potrebno tlačnu sklopku podesiti na vrijednost 120 Pa.

Nakon ispitivanja najnižeg nadtlaka provedeno je ispitivanje povećanim tlakom. Elektromotor je podvrgnut minimalno 150% najvećeg nadtlaka određenog za normalan rad. Na ispitivanom elektromotoru nije došlo do izobličenja koja bi obezvrijedila vrstu zaštite. Rezultati ispitivanja su prikazani u tablici 5.24.

Tablica 5.24. Ispitivanje povećanim tlakom

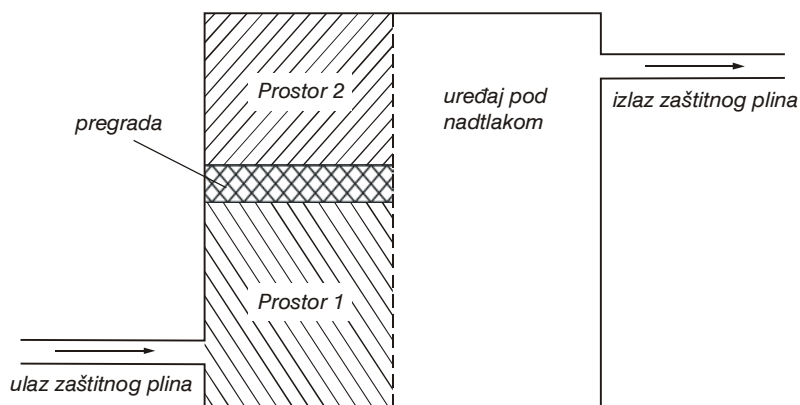
| Prostor           | Najveći radni nadtlak [Pa] | Ispitni nadtlak [Pa] | Vrijeme ispitivanja [s] | Rezultat        |
|-------------------|----------------------------|----------------------|-------------------------|-----------------|
| Prostor motora    | 600                        | 1000                 | 120                     | Zadovoljavajući |
| Priključna kutija | 280                        | 840                  | 120                     | Zadovoljavajući |

Ispitivanje povećanim tlakom provedeno je na način da je pri najvećem protoku zraka ( $2.8 \text{ m}^3/\text{s}$ ) izlazni otvor pritvoren, te su mjereni tlakovi. Kad su postignuti tlakovi prema tablici 5.24., tlak se održavao 120 sekundi.

Na ispitivanom elektromotoru je provedeno, sukladno HRN EN 50016, i ispitivanje gubitaka. Najveće gubitke definira proizvođač elektromotora.

Ovo ispitivanje je provedeno na način da je izlazni otvor bio potpuno zatvoren (zabrtvljen). Ventilator, za postizanje nadtlaka, pogonjen je preko frekvencijskog pretvarača te mu je bilo moguće mijenjati brzinu vrtnje, a time i protok zraka koji se upuhuje u motor. Nakon što je postignut najveći radni nadtlak u motoru od 600 Pa, pričekalo se par minuta kako bi se tlak stabilizirao te je konstatirano da nema daljnjeg porasta tlaka. U tom trenutku je količina zraka, koju je ventilator upuhivao u motor jednaka gubicima zraka u motoru kroz brtve i spojeve. Izmjerena je količina zraka (anemometrom) od  $30 \text{ dm}^3/\text{s}$ , što je bilo manje od najvećih dopuštenih gubitaka definiranih od proizvođača. Tendencija je da sustav nadtlaka ima jasno definiran otvor za dovod zraka i izlazni otvor, te da nema drugih "značajnijih" otvora.

Jedno od novijih ispitivanja koje se provodi na elektromotorima u vrsti zaštite nadtlak je ispitivanje ispiranja. Svrha je ovog ispitivanja provjeriti ispiranje pojedinih dijelova unutarnjeg volumena kućišta, budući je ono nejednoliko. Ranija ispitivanja (HRN. N. S8. 601; 621) su tražila samo peterostruku izmjenu slobodnog volumena kućišta i pripadnih cjevovoda. Navedeno se može pojasniti jednostavnim primjerom prema slici 5.11.



Slika 5.11. Ispiranje dijelova unutarnjeg volumena

Ako osiguramo da kroz ulaznu cijev prostruji količina zraka (ili zaštitnog plina) koja je jednaka peterostrukom volumenu kućišta i pripadnih cjevovoda, zbog pregrade u kućištu neće doći do ravnomjernog ispiranja svih dijelova kućišta. Prostor "1" će imati više od 5 izmjena zraka, a prostor "2" manje od 5 izmjena zraka. Moguće je da se u prostoru "2" zadrži eksplozivna atmosfera uslijed koje bi, nakon uključenja uređaja pod nadtlakom (elektromotora) na napon moglo doći do eksplozije. Da bi se eliminirala spomenuta mogućnost, provodi se ispitivanje pri kojem se kućište napuni ispitnim plinom u koncentraciji ne manjoj od 70% u bilo kojoj točki [18]. Nakon toga počinje opskrba zrakom ili zaštitnim plinom s najmanjom jačinom ispiranja koju je odredio proizvođač uređaja. Mjeri se potrebno vrijeme da koncentracija ispitnog plina u bilo kojoj točki padne ispod zahtijevane vrijednosti (npr. 25% DGE-a plina za

koji je rađen uređaj, ili 0.25% za ispitivanja sa CO<sub>2</sub> radi obuhvaćanja svih zapaljivih plinova) [45].

Za dobro ispiranje složenijih i većih kućišta motora većih snaga, potrebno je i više od 20 volumnih izmjena što su pokazala ispitivanja koja su provedena u europskim ispitnim stanicama [18].

Ispitivanje slično opisanom (vrijeme ispiranja je unaprijed bilo definirano, a mjerene su koncentracije ispitnog plina nakon provedenog ispiranja) je provedeno i na predmetnom (ispitivanom) elektromotoru.

Prostor motora i priključne kutije je punjen plinom CO<sub>2</sub> iz boce pod tlakom. Mjesto punjenja je postavljeno pri vrhu ležajnog štita te na mjernom mjestu br. 9 tj. na najvišoj točki motora. Mjernim cjevčicama DRAGER mjerena je koncentracija CO<sub>2</sub>. Nakon što je utvrđeno da koncentracija CO<sub>2</sub> na svim mjernim točkama iznosi više od traženih 70% uključen je ventilator s protokom zraka od 2.0 m<sup>3</sup>/s (najmanji predviđeni protok). Nakon unaprijed određenog vremena ispiranja ventilator je isključen te je na svim mjernim mjestima izmjerena koncentracija CO<sub>2</sub>. Rezultati mjerenja su prikazani u tablici 5.25.

Tablica 5.25. Ispitivanje ispiranja

| Trajanje predventilacije: 2.5 minuta |                                         |                                           | Trajanje predventilacije: 1.5 minuta |                                         |                                           |
|--------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|
| Mjerno mjesto                        | % CO <sub>2</sub> prije predventilacije | % CO <sub>2</sub> poslije predventilacije | Mjerno mjesto                        | % CO <sub>2</sub> prije predventilacije | % CO <sub>2</sub> poslije predventilacije |
| 1                                    | 75                                      | < 0.1                                     | 1                                    | 78                                      | < 0.1                                     |
| 2                                    | 75                                      | < 0.1                                     | 2                                    | 78                                      | < 0.1                                     |
| 3                                    | 75                                      | < 0.1                                     | 3                                    | 82                                      | < 0.1                                     |
| 4                                    | 85                                      | < 0.1                                     | 4                                    | 82                                      | < 0.1                                     |
| 5                                    | 88                                      | < 0.1                                     | 5                                    | 85                                      | < 0.1                                     |
| 6                                    | 88                                      | < 0.1                                     | 6                                    | 86                                      | < 0.1                                     |
| 7                                    | 90                                      | < 0.1                                     | 7                                    | 88                                      | < 0.1                                     |
| 8                                    | –                                       | –                                         | 8                                    | –                                       | –                                         |
| 9                                    | 72                                      | < 0.1                                     | 9                                    | 72                                      | < 0.1                                     |

Temeljem rezultata prikazanih u tablici 5.25. određeno je minimalno vrijeme predventilacija od 1.5 minuta.

Dio ispitivanja protueksplozijske zaštite elektromotora u izvedbi nadtlak, opisanih u ovom djelu rada, se redovito primjenjuje na elektromotore koji su duži niz godina u pogonu. Takva ispitivanja su provedena npr. na hrvatskim istraživačkim naftnim platformama "Zagreb" i "Labín", od strane S-Komisije Zagreb. Temeljem ovih ispitivanja je ocjenjena daljnja primjenljivost ispitivanih elektromotora u prostorima ugroženim eksplozijom.

Na kraju ovog poglavlja možemo iznijeti kratki zaključak. Opisana ispitivanja protueksplozijske zaštite asinkronog elektromotora čine jednu od temeljnih grupa ispitivanja koja se provode na elektromotorima instaliranim u prostorima ugroženim eksplozijom. Ispitivanja se provode na novim elektromotorima pri procesu certificiranja protueksplozijske zaštite te, što je podjednako važno, pri dijagnostici trenutnog i stvarnog stanja elektromotora u protueksplozijski zaštićenoj izvedbi koji je određeno vrijeme bio u pogonu.

Kako bi se točno i pouzdano odredila daljnja primjenljivost, protueksplozijski zaštićenog elektromotora u prostorima ugroženim eksplozijom potrebno je uz opisanu grupu ispitivanja provesti i ispitivanja koja se provode na elektromotorima "standardne" industrijske izvedbe. Ova ispitivanja su posebno važna kod motora u protueksplozijskoj zaštiti povećana sigurnost.

Kako bi se povećao stupanj sigurnosti protueksplozijski zaštićenog EMP-a, što je primarna zadaća u takvim pogonima, važno je ne zanemariti niti jednu od spomenutih grupa dijagnostičkih ispitivanja.

## 6. PRETVARAČI FREKVENCIJE U PROTUEKSPLOZIJSKI ZAŠTIĆENIM ELEKTROMOTORNIM POGONIMA

Kao rezultat povećane automatizacije u procesnoj tehnologiji, npr. naftne i kemijske industrije, danas se sve više koriste, i u pogonima ugroženim eksplozijom, regulirani elektromotorni pogoni.

Elektromotorni pogoni napajani preko pretvarača frekvencije imaju niz prednosti u odnosu na neregulirane EMP-e kao što su:

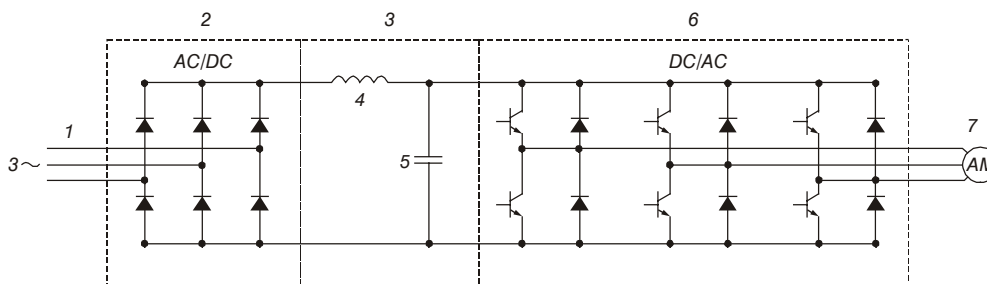
- ušteda električne energije (posebno izraženo kog reguliranih pogona crpki, ventilatora i centrifugalnih kompresora koji su u normalnom pogonu podopterećeni),
- unapređenje tehnološkog procesa, povećanje opsega i kvalitete proizvodnje,
- zaštita mehaničkih i električnih komponenti EMP-a (smanjene struje uklapanja, smanjene dinamičke sile, smanjeno zagrijavanje u toku zaleta i sl.).

Iako elektromotorni pogoni napajani iz pretvarača frekvencije pružaju velik broj prednosti, njihov rad uključuje i neke mane koje, u EMP-u u prostoru ugroženom eksplozijom, mogu predstavljati opasnost od eksplozije.

Stoga je, u takvim EMP, važno detaljno razmotriti utjecaj napajanja iz pretvarača (koji je instaliran van zone opasnosti) na pogonske parametre motora (koji je smješten u zoni opasnosti). Neki od utjecaja će ukratko biti opisani u ovom dijelu rada.

### 6.1 Osnovni elementi EMP-a s pretvaračem frekvencije

Na slici 6.1 je prikazana principijelna shema pretvarača frekvencije i napona [47].



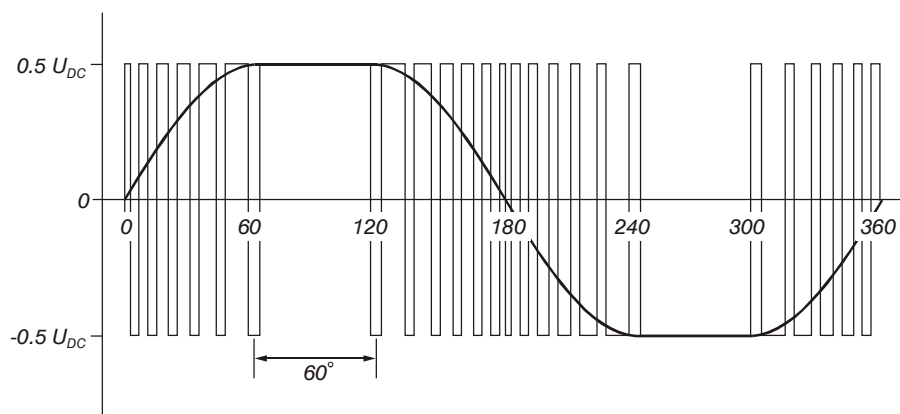
Slika 6.1. Principijelna shema pretvarača frekvencije i napona

Izmjenični napon iz mreže (1) se u stupnju ispravljača (2) pretvara u istosmjerni napon konstantnog iznosa, odakle se dovodi u međukrug (3). Svitak (4) izgladuje struju u međukrugu dok kondenzator (5) izgladuje napon međukruga. Zadnji i najsloženiji (najkritičniji) korak je pretvorba istosmjernog napona međukruga, nizom preklonih jedinica (6), u seriju impulsa koji simuliraju sinusni oblik napona na priključcima elektromotora (7).

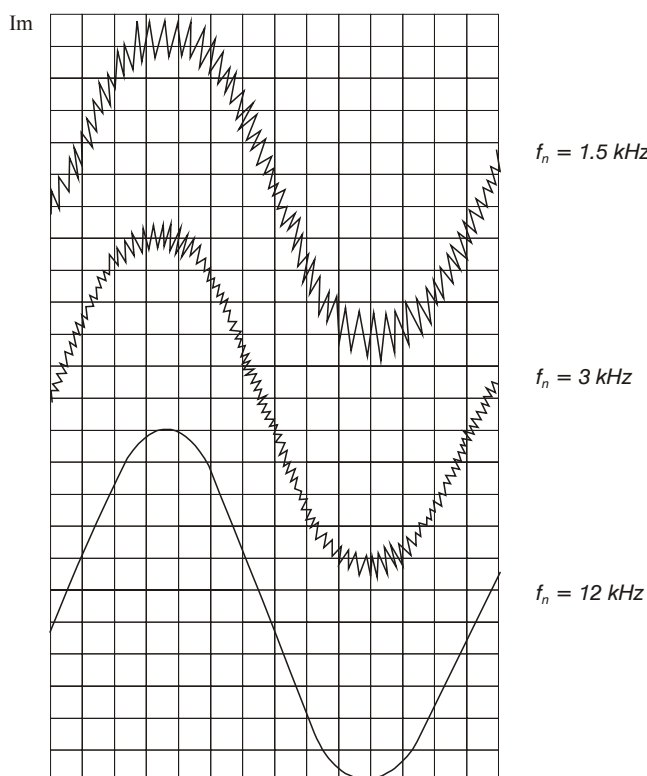
Stvarni napon na izlazu pretvarača (na elektromotoru) je oblikovan kao niz pravokutnih impulsa jednake amplitude (određene istosmjernim naponom ispravljača), ali promjenljivog trajanja impulsa i pauze (pulsno širinska modulacija – PWM, najčešće susretana kod pretvarača). Izlazni napon pretvarača se kontrolira preklapanjem tranzistora DC/AC pretvarača velikom brzinom. Frekvencija preklapanja se obično naziva "noseća frekvencija" ili "sklopna frekvencija". Karakteristika "noseće frekvencije" je od presudne važnosti kako će PWM

pretvarač aproksimirati čisti sinusni oblik. Općenito što je viša noseća frekvencija (npr. 8 kHz) to je izlazni valni oblik bliži čistom sinusnom valu ali se tada javljaju veća zagrijavanja motora i pretvarača. Niže noseće frekvencije (1 kHz) mogu uzrokovati objektivno veći čujni nivo šuma [47]. Promjenjive "noseće frekvencije" u određenom području mogu znatno smanjiti čujni šum motora.

Teorijski izlazni napon pretvarača je prikazan na slici 6.2, dok je utjecaj noseće frekvencije na oblik struje motora prikazan na slici 6.3 [61].



Slika 6.2. Oblik izlaznog napona pretvarača (teorijski)

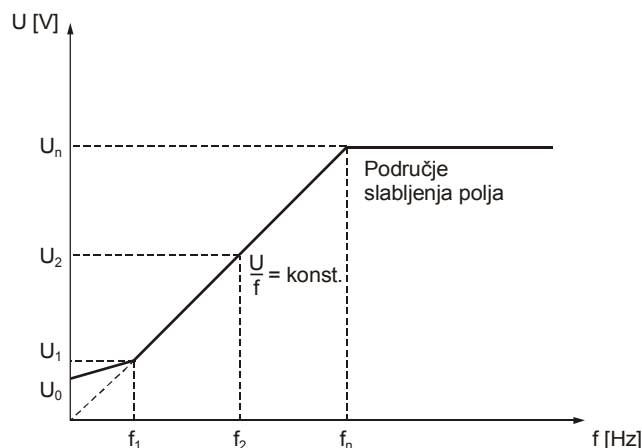


Slika 6.3. Utjecaj noseće frekvencije na oblik struje motora

Uvjeti koji se postavljaju pred izlazni napon pretvarača su prvenstveno definirani zahtjevom za konstantnim magnetskim tokom u zračnom rasporu asinkronog stroja, i konstantnim poteznim momentom. Drugim riječima potrebno je zadržati stalan omjer napona i frekvencije ( $U/f = \text{konst.}$ ). Izuzetno na području malih brzina uvodi se IR kompenzacija zbog

potrebe tzv. startnog napona ( $U_o$ ) (dodatnog momenta), kako bi se osigurao potrební potezni moment. Rad motora iznad osnovne frekvencije je poseban problem jer mehanička konstrukcija motora, ležajevi i balans ograničavaju najveću frekvenciju na kojoj motor može raditi i to svakako treba provjeriti za svaki motor. Većina pretvarača može dati izlazne frekvencije i do 400 Hz [47].

Frekvencija pri kojoj izlazni napon pretvarača dostiže najveći napon motora se naziva točka slabljenja polja. Iznad ove frekvencije napon zadržava podešenu maksimalnu vrijednost [47], [61], [42]. Navedeni elementi i  $U/f$  – karakteristika su prikazani na slici 6.4.



Slika 6.4.  $U/f$  karakteristika pretvarača

## 6.2 Utjecaj pretvarača na pogonske parametre motora

Snaga dovedena motoru preko PWM pretvarača ima neke nepovoljne utjecaje koji mogu biti uzročnici eksplozije u EMP-u instaliranom u eksplozijom ugroženom prostoru. Ti utjecaji uključuju povećano zagrijavanje, visoke vršne vrijednosti napona  $U_{peak}$ ,  $du/dt$ , i sl.

### 6.2.1 Zagrijavanje

Najveći dozvoljeni porast temperature namota je definiran izolacijskom klasom i, u prostorima ugroženom eksplozijom temperaturnim razredom. Navedeni porast temperature je definiran za rad motora pri nazivnoj brzini, s potpunim hlađenjem i uz "čisti" sinusni valni oblik napajanja. Po definiciji "čisti" sinusni valni oblik ne sadrži harmonike. No, izlazni napon iz pretvarača sadrži harmonike koji se mogu naći i na priključcima elektromotora i općenito ne daju korisni zakretni moment nego povećavaju zagrijavanje motora.

Sa stanovišta zagrijavanja (pregrijavanja) bitno je, kod elektromotora napajanih preko pretvarača, uzeti u obzir i slijedeće elemente [42][47][61]:

- ventilaciju i hlađenje motora kroz cijelo područje brzina,
- najveće struje preopterećenja i granice trajanja najveće struje (podesivo na pretvaraču),
- karakteristiku  $U/f$  uzimajući u obzir i napon  $U_o$  koji, kada je većeg iznosa, također dodatno zagrijava motor,
- karakteristiku moment/brzina radnog stroja,
- stvarni oblik napona i struje na priključcima elektromotora (noseća frekvencija, filteri),

- karakteristiku  $U/f$  za osnovnu komponentu valnog oblika napona napajanja motora uzimajući u obzir tolerancije mreže i pretvarača,
- utjecaj uvjeta okoline i sl.

Pri smanjenju brzine elektromotora smanjuje se i utjecaj hlađenja ventilatora za isti omjer. Ako je motor potpuno opterećen, a brzina je smanjena za 50%, od motora se traži da daje puni moment s polovinom maksimalnog hlađenja. Ta redukcija faktora hlađenja sa smanjenjem brzine će dosegnuti točku na kojoj je dopušteni iznos temperature motora premašen, što uzrokuje smanjenje vijeka života izolacije ili grešku koja može biti uzročnik paljenja eksplozivne atmosfere. Porast temperature elektromotora snage 10 HP, napajanog preko PWM pretvarača prikazan je u tablici 6.1, za različite brzine vrtnje [47].

Tablica 6.1. Zagrijavanje motora hlađenog ventilatorom za vrijeme smanjene brzine.

| Snaga [HP] | Napajanje | Frekvencija [Hz] | Brzina [%] | Moment [%] | Struja [A] | Porast temperature [°C] |
|------------|-----------|------------------|------------|------------|------------|-------------------------|
| 10         | PWM       | 60               | 100        | 100        | 12.5       | 55                      |
| 10         | PWM       | 30               | 50         | 100        | 14.7       | 104                     |
| 10         | PWM       | 15               | 25         | 100        | 14.1       | 122                     |

Centrifugalni tereti (pumpe i ventilatori) ne zahtijevaju puni moment pri smanjenim brzinama, što znatno smanjuje termička opterećenja motora u takvim primjenama.

U tablici 6.2 [47] su prikazane vrijednosti porasta temperature kad su zahtjevi za momentom smanjeni pri različitim brzinama.

Tablica 6.2. Smanjenje opterećenja pri smanjenim brzinama i zagrijavanje.

| Snaga [HP] | Napajanje | Frekvencija [Hz] | Brzina [%] | Moment [%] | Struja [A] | Porast temperature [°C] |
|------------|-----------|------------------|------------|------------|------------|-------------------------|
| 50         | sinusno   | 60               | 100        | 100        | 59.1       | 62                      |
| 50         | PWM       | 30               | 50         | 82         | 56.8       | 72                      |
| 50         | PWM       | 6                | 10         | 70         | 51.3       | 94                      |
| 50         | PWM       | 6                | 10         | 62         | 45.0       | 66                      |

Iako se izlazni valni oblik, kod modernih pretvarača približava sinusnom valnom obliku ipak taj valni oblik sadrži komponente koje u motoru generiraju dodatne gubitke i direktno doprinose povećanju zagrijavanja. Primjer spomenutih gubitaka (zagrijavanja) je prikazan u tablici 6.3. [47].

Tablica 6.3. Zagrijavanje motora pri punom opterećenju i brzini.

| Snaga [HP] | Napajanje | Frekvencija [Hz] | Brzina [%] | Moment [%] | Struja [A] | Porast temperature [°C] |
|------------|-----------|------------------|------------|------------|------------|-------------------------|
| 10         | sinusno   | 60               | 100        | 100        | 12.0       | 51                      |
| 10         | PWM       | 60               | 100        | 100        | 12.5       | 55                      |
| 50         | sinusno   | 60               | 100        | 100        | 59.1       | 62                      |
| 50         | PWM       | 60               | 100        | 100        | 61.4       | 73                      |

Područje slabljenja polja je također važno u smislu zagrijavanja motora, no radi rjeđeg rada motora, u ugroženom prostoru, brzinama većim od nazivnih, ovdje ga nećemo razmatrati.

Iz svega do sada rečenog vidljivi su vrlo složeni odnosi zagrijavanja elektromotora napajanog preko PWM pretvarača (utjecaj pretvarača, izvedbe motora i radnog stroja i sl.) te su

prema HRN IEC 60079-14 i HRN EN 50019 definirani posebni zahtjevi koji se postavljaju pred elektromotore koji rade u zonama opasnosti, a napajani su promjenjivom frekvencijom i naponom.

Kavezni asinkroni elektromotori u vrsti zaštite povećana sigurnost napajani promjenjivom frekvencijom i naponom, prema HRN EN 50019, moraju biti tipski ispitani i certificirani za takav režim rada kao jedinica spojena s pretvaračem i zajedno s predviđenim zaštitnim uređajem.

Slični zahtjevi bi se mogli postaviti i pred motore u vrsti zaštite nadtlak ukoliko nisu poduzete dodatne mjere u slučaju zakazivanja nadtlaka (npr. spajanjem kućišta na drugi sustav ventilacije) budući bi dodatno zagrijani dijelovi motora (radi napajanja promjenjivom frekvencijom i naponom) mogli doći u dodir s eksplozivnom atmosferom.

Kavezni asinkroni elektromotori u vrsti zaštite oklapanje napajani s promjenjivom frekvencijom i naponom zahtijevaju (prema HRN IEC 60079-14) ili:

- Sredstva (ili opremu) za direktnu kontrolu temperature pomoću usađenih osjetila specificiranih u dokumentaciji motora ili druge učinkovite mjere za ograničenje temperature površine kućišta motora. Zaštitni uređaj mora djelovati na isklon motora. Kombinaciju motora i pretvarača nije potrebno ispitivati zajedno, ili
- Motor mora biti tipski ispitivan za taj pogon kao jedinica u pridruženju s pretvaračem i predviđenim zaštitnim uređajem.

Vrlo je važno kod primjene temperaturnih osjetila, u namotu motora, provjeriti kompatibilnost istih s primijenjenim zaštitnim uređajem (relejem).

### 6.2.2 Vršne vrijednosti napona i sustavi izolacije

U izmjenjivačkom (DC/AC) krugu pretvarača uslijed prekapčanja elektroničkih sklopki (npr. IGBT) nastaju prijelazne pojave koje mogu na napojnim kabelima do motora rezultirati nepovoljnim djelovanjem naponskih putujućih valova.

Budući da je valni otpor (odnos L/C) namota elektromotora znatno veći od valnog otpora dovodnog kabela, na dovodnim stezaljkama motora se javljaju sklopni naponi iznosa većeg od napona međukruga (i većeg od nazivnog napona motora).

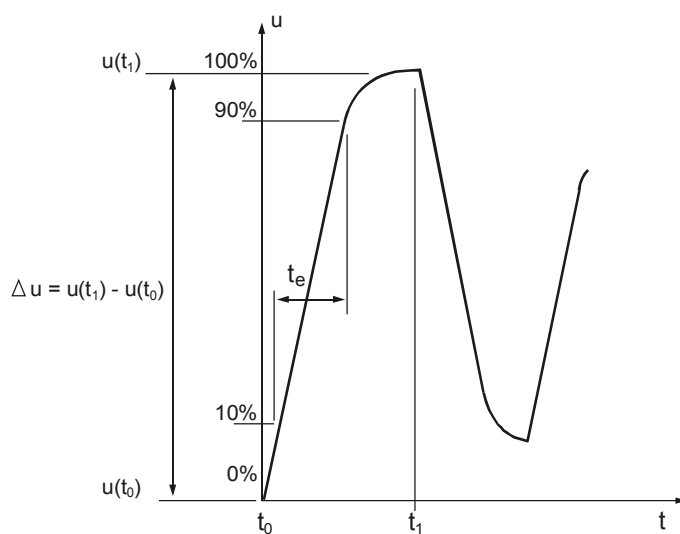
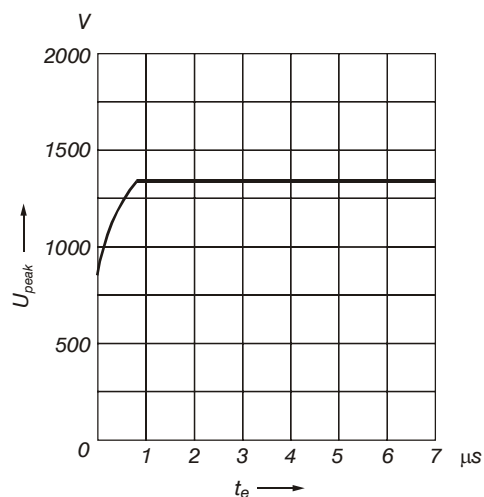
Naponski valovi na priključcima motora prodiru u namot i mogu dovesti do povećanog naprezanja sustava izolacije (utorske, izolacije faza, međuzavojne). Također ti vršni naponi ( $U_{peak}$ ), koji moraju biti definirani od proizvođača pretvarača (za razne slučajeve) mogu ugroziti zračne razmake i puzne staze u priključnoj kutiji.

Na iznos potencijalno opasnih napona ( $U_{peak}$ ) utječu:

- visina mrežnog napona,
- duljina i tip kabela od pretvarača do motora,
- vrijeme trajanja uključenja/isključenja tranzistora izmjenjivača (DC/AC),
- odnos induktiviteta i kapaciteta namota i sl.

Proizvođač pretvarača treba definirati vrijeme porasta napona ( $t_e$ ) te vršnu vrijednost napona nastalog impulsnim radom pretvarača ( $U_{peak}$ ).

Normom IEC 60034-17 definirano je vrijeme porasta napona  $t_e$  u priključnoj kutiji elektromotora, te je određena najveća dopuštena vrijednost impulsa napona u priključnoj kutiji ovisno o vremenu  $t_e$ , navedeno je prikazano na slici 6.5 odnosno 6.6.

Slika 6.5. Definicija vremena porasta napona  $t_e$  (brzina porasta napona  $du/dt$ )Slika 6.6. Najveća dopuštena vrijednost impulsa napona ( $U_{peak}$ ) ovisno o vremenu  $t_e$ 

Tipične vrijednosti spomenutih parametara (za pretvarač tipa VLT 5000) su prikazane u tablici 6.4 [64], udovoljeno je (za navedene dužine kabela) traženjima norme IEC 60034-17.

Tablica 6.4.  $U_{peak}$  i  $t_e$  za pretvarač VLT 5000

| Dužina kabela motor-pretvarač (m) | Napon napajanja (V) | Vrijeme porasta $t_e$ (μs) | $U_{peak}$ (V) |
|-----------------------------------|---------------------|----------------------------|----------------|
| 50                                | 380                 | 0.3                        | 850            |
| 150                               | 380                 | 1.2                        | 1000           |
| 50                                | 500                 | 0.4                        | 950            |
| 150                               | 500                 | 1.3                        | 1300           |

Vrijednosti  $U_{peak}$  prikazane u tablici 6.4 se javljaju u priključnoj kutiji elektromotora između dviju faza. Vršni napon ( $U_{peak}$ ) i brzina porasta napona  $du/dt$  ovise o izvedbi pretvarača, nosećoj frekvenciji, vrsti i dužini napojnih kabela, izvedbi motora ( $L$ ,  $C$ ) i sl. Postojećim normama nisu precizno definirani  $U_{peak}$  i  $du/dt$  za elektromotore i pretvarače koji rade u EMP-u ugroženom eksplozijom. U vrijeme pisanja ovog rada je upravo u raspravi bio prijedlog dokumenta IEC 60079-15 (31/408/DC) kojim se nastoji normativno regulirati uporaba pretvarača u EMP-u ugroženom eksplozijom. Prema spomenutom prijedlogu elektromotori ( $U_n < 1$  kV) napajani preko pretvarača moraju biti projektirani i izrađeni (izolacijski sustav) da izdrže  $U_{peak}$  prema zemlji do 1.6 kV i najveće  $du/dt$  od 3.5 kV/μs, ili pretvarač mora biti projektiran da ograničava  $U_{peak}$  prema zemlji na 1 kV i  $du/dt$  na najviše 1 kV/μs ako izolacija motora nije posebno definirana.

Za elektromotore ( $U_n \geq 1$  kV) pretvarač mora biti takvih karakteristika da ograničava  $U_{peak}$  prema zemlji na dvostruku vrijednost linijskog napona napajanja motora i  $du/dt$  na 1 kV/μs. Prema navedenom prijedlogu norme, sve posebitosti koje se odnose na rad motora preko pretvarača moraju biti označene na označnoj pločici elektromotora.

Radi otklanjanja spomenutih negativnih učinaka pretvarača ugrađuju se u izlazni krug odgovarajuće prigušnice i filteri (u pravilu specificirani od proizvođača pretvarača), no time se smanjuje "brzina dinamičkog odziva" pogona.

Vrijeme porasta napona određenog preklopnog elementa u PWM inverteru će odrediti najveću dužinu kabela koji se može primijeniti. Od presudne je važnosti, za EMP ugrožen eksplozivnom atmosferom, kompatibilnost sustava pretvarač-kabel-elektromotor te je uz definiranje spomenutih podataka o pretvaraču potrebno raspolagati i podacima o elektromotoru kao što su:

- dopušteni vršni napon  $U_{peak}$ ,  $du/dt$ ,
- najveća dopuštena brzina vrtnje elektromotora,
- dodatni gubici (zagrijavanja) pri napajanju preko pretvarača,
- dopušteni moment pri najnižoj i najvišoj brzini tj. ovisnost  $M/M_n(f)$  od najniže do najviše predviđene radne frekvencije (brzine), i sl.

### 6.2.3 Osovinski naponi i ležajne struje

Uništenje ili oštećenje ležajnih sklopova i osovine elektromotora čini 12.94% svih kvarova asinkronih elektromotora (tablica 3.1), te je tom problemu potrebno posvetiti posebnu pažnju. Jedan od mogućih i čestih uzroka navedenih oštećenja su osovinski naponi odnosno ležajne struje.

Osovinski naponi u asinkronom elektromotoru se mogu pojaviti zbog:

- nesimetričnosti u izvedbi magnetskog kruga, ekscentričnosti zračnog rasporeda i zasićenja u magnetskom krugu stroja,
- elektrostatičkog naboja dijelova elektromotora (uslijed vrtnje),
- remanentnog magnetskog toka u osovini elektromotora,
- napajanja iz pretvarača frekvencije.

Elektromagnetska indukcija između namota statora i osovine rotora dominira kod dugih aksijalnih strojeva. Osovinski napon nastaje zbog nesimetrije magnetskog polja u zračnom rasporu. Većina asinkronih motora je konstruirana tako da imaju najveći napon osovine prema uzemljenju  $< 1\text{ V}$  [48].

Inducirani naponi u osovini, iako relativno malih iznosa, uzrokuju znatne struje u ležajevima, radi male impedancije kruga zatvaranja struje, koje mogu oštetiti ili uništiti ležaj. Tipičan je primjer zatvaranja ležajnih struja od osovine kroz ležaj na pogonskoj strani, kroz stator te kroz ležaj na stražnjoj strani i ponovno na osovinu. Da li će poteći ležajne struje ovisi o veličini osovinskih napona i probojnom naponu uljnog filma u ležajevima. Tradicionalno rješenje za osovinske napone nastale elektromagnetskom indukcijom je izoliranje nepogonskog ležaja [48]. Na taj način se ne smanjuje napon osovine nego rezultirajuća struja kroz ležajeve.

Elektrostatički induciran napon osovine može biti prisutan u svakom slučaju gdje se može pojaviti skupljanje rotorskog naboja. Primjeri su povezivanje pogona remenima, prolaz ioniziranog zraka preko lopatica rotorskih ventilatora i sl. Eliminiranje ovih osovinskih napona se svodi na držanje osovine i okvira statora (zemlje) na istom potencijalu instaliranjem četkica za uzemljenje osovine, koje smanjuju elektrostatičko nabijanje i napon osovine na 70-400 mV [48].

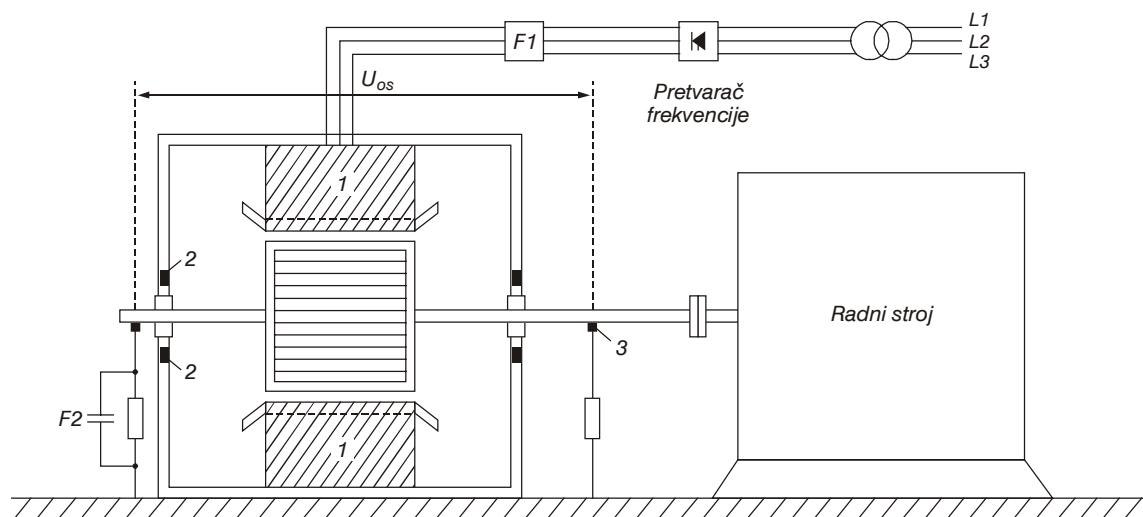
Osovinski inducirani naponi koji su posljedica remanentnog magnetizma u osovini elektromotora, u pogonskim se uvjetima ne mogu smanjiti te je potrebno poduzeti mjere zaštite od ležajnih struja što podrazumijeva odgovarajuće izoliranje svih puteva zatvaranja tih struja.

Iznos ležajne struje ovisi o impedanciji kruga zatvaranja gdje značajnu ulogu ima kontaktna površina u kotrljajućim ležajevima. Kontaktna površina se sastoji prvenstveno od kontakta u obliku točke između metalne kuglice i metalnog ležišta. Kontaktni otpor se povećava s povećanjem brzine vrtnje motora radi pojave izolirajućeg filma sredstva za podmazivanje između kuglice i ležišta.

Kvalitetni ležajevi čine visokoomsku impedanciju 80% vremena (prisutnost filma sredstva za podmazivanje) te istovremeno predstavljaju kondenzator spreman za nabijanje.

Ležajevi niže kvalitete imaju manji otpor kontakta u većem dijelu vremena i djeluju kao spojni kondenzator koji se može nabiti samo za vrijeme nekontaktnog spoja kuglice i ležišta (kraće vrijeme).

Osovinski naponi stvaraju ležajne struje koje uzrokuju nastajanje rupica ili kratera za vrijeme dok struja teče kroz brojne dodirne točke. Zagrijavanje se može pojaviti na dodirnim točkama do takvog iznosa da se materijal topi i oslobađa metalne čestice u sredstvo za podmazivanje. Visoka zagrijavanja dodirnih točaka i oštećenja ležaja mogu, u prostorima ugroženim eksplozijom, predstavljati uzročnik paljenja eksplozivne atmosfere. Principijelna skica elektromotora za ilustraciju osovinskog napona prikazana je na slici 6.7. Elektromotor je napajan preko pretvarača frekvencije.



Slika 6.7. Principijelna skica elektromotora za ilustraciju osovinskog napona

1. Namot na statoru
  2. Izolacija ležaja motora
  3. Četkica za uzemljenje (s otpornikom) za odvođenje statičkog elektriciteta
- F1. Filter na izlazu pretvarača  
F2. Filter između osovine motora i mase

Pri realizaciji ovakvog sustava na elektromotorima u prostorima ugroženim eksplozijom nužno je voditi računa o protueksplozijskoj zaštiti (iskreći elementi) te primijeniti neku od vrsta protueksplozijske zaštite (npr. nadtlak).

U visokokvalitetnim ležajevima sa sredstvima za podmazivanje visoke otpornosti (visokoomski) prelazni kondenzator se može isprazniti u niskoimpedantni krug kad električno polje pređe jačinu proboja u točkama hrapavosti sredstva za podmazivanje. Prag napona proboja u ležajevima je 0.4 V (uz jakost polja mineralnog ulja od  $10^6$  V/m), tipičan film ulja je 0.2  $\mu\text{m}$  i postoje dva filma u seriji. Pri navedenom naponu kondenzatora, koji je nabijen osovinskim naponom, dolazi do proboja sredstva za podmazivanje i javlja se kratkotrajni (ns) impuls struje velikog intenziteta koji je primarni izvor erozije ležaja [48] i uobičajeno se naziva EDM (Electric Discharge Machining).

Primjena PWM pretvarača za napajanje elektromotora uzrokuje pojavu različitih harmoničkih komponenti i visoke  $du/dt$  između statora i uzemljenja. Dio tih valnih oblika je prisutan kao rotorski napon osovine prema masi radi kapacitivnih veza.

Prema nekim istraživanjima [33] je kapacitivna veza značajnija od magnetske i prvenstveni je uzrok osovinskih napona i ležajnih struja kod elektromotora napajanih preko PWM pretvarača.

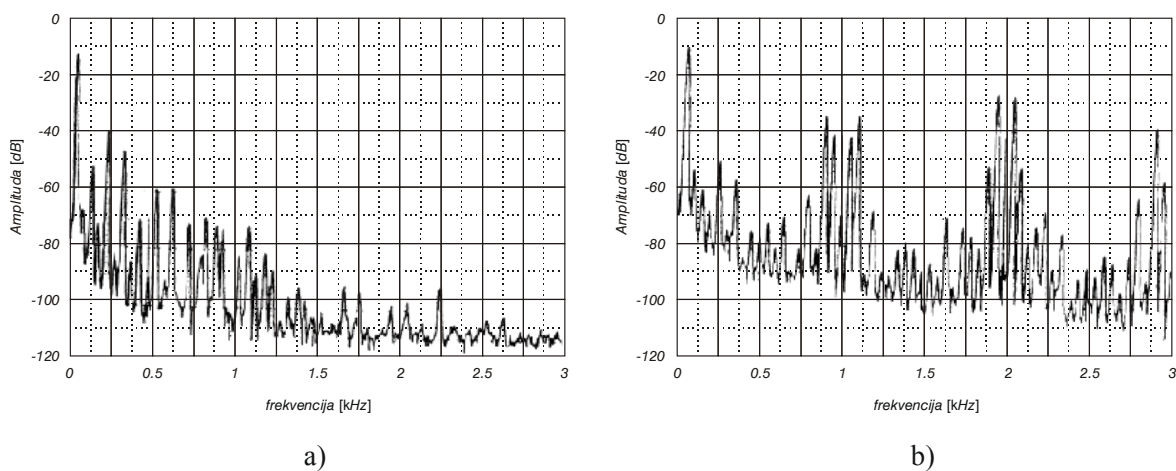
Primjena PWM pretvarača ima za posljedicu povećanje napona proboja u ležajevima (i preko 10 puta) u odnosu na sinusno napajanje, što se objašnjava teorijom dielektričkog proboja za impulsne izvore. Taj povećani nivo proboja kod PWM rada je neželjen jer su za vrijeme pražnjenja rezultirajuće EDM struje puno veće nego kod sinusnog napajanja, što ima za posljedicu povećanja oštećenja ležaja. Ugradnjom odgovarajućih filtera se može smanjiti veličina ovog osovinskog napona.

Iz svega do sada rečenog je vidljivo i postojanje negativnih pojava koje unose PWM pretvarač u elektromotorni pogon, kao što su povećana zagrijavanja (uslijed harmoničkih komponenti napajanja, smanjene ventilacije, pojave vrućih mjesta u dodirnim površinama ležaja i sl.), a što može biti uzročnik paljenja eksplozivne atmosfere i što zahtjeva detaljne analize u EMP koji radi u prostoru ugroženom eksplozijom.

Oštećenja ležaja mogu dovesti i do mehaničkih kvarova (npr. dodir rotora i statora) što može proizvesti i mehaničku iskru koja također predstavlja uzročnik paljenja eksplozivne atmosfere. Potrebno je razmotriti i zračne razmake i puzne staze u priključnim kutijama elektromotora u odnosu na  $U_{peak}$  i  $du/dt$  kao i usklađenost parametara kruga pretvarač-kabel-elektromotor.

Provedbu mjera za smanjenje spomenutih negativnih utjecaja potrebno je provoditi u skladu i s posebnim zahtjevima protueksplozijske zaštite (četkice za uzemljenje osovine, iskreći elementi i sl.)

Na kraju ovog poglavlja prikazimo prema [9] utjecaj PWM pretvarača na frekvencijski spektar statorske struje koji se, kako je ranije opisano, koristi pri dijagnostici asinkronih elektromotora. Slika 6.8a prikazuje frekvencijski spektar statorske struje nazivno opterećenog elektromotora s pet prekinutih štapova napajanog sinusnim naponom mreže dok slika 6.8b prikazuje slučaj pri napajanju iz pretvarača frekvencije.



Slika 6.8. Frekvencijski spektar statorske struje nazivno opterećenog elektromotora s 5 prekinutih štapova  
a) napajanje iz mreže (sinusno)  
b) napajanje iz pretvarača frekvencije

## 7. ZAKLJUČAK

Kavezni asinkroni elektromotori u protueksplozijski ugroženom EMP-u zahtijevaju primjenu sveobuhvatnih dijagnostičkih ispitivanja sa zadaćom utvrđivanja stvarnog i trenutnog stanja elektromotora. Budući da kvarovi na elektromotoru mogu biti uzročnici paljenja eksplozivne atmosfere vrlo je važno dijagnosticirati pojave koje prethode razvoju kvara kao uzročnika paljenja. U radu su obrađene dvije skupine dijagnostičkih ispitivanja asinkronih elektromotora:

- ispitivanje protueksplozijske zaštite elektromotora i
- ispitivanje elemenata elektromotora koji mogu biti ozbiljni uzročnici paljenja, a nisu obuhvaćeni današnjim normama iz područja protueksplozijske zaštite.

Provedena su, u specijaliziranom laboratoriju za protueksplozijsku zaštitu, dijagnostička ispitivanja protueksplozijske zaštite asinkronih motora u vrsti zaštite povećana sigurnost - "Ex e", oklapanje - "Ex d" i nadtlak - "Ex p". Tijekom eksploatacije se uočavaju nedostaci na protueksplozijskoj zaštiti kao što su narušena IP zaštita, poremećeni ili nedostatni sustavi nadtlaka, oštećeni zaštitni sastavi (raspori), povećana zagrijavanja, oštećena izolacija statorskih namota i sl.

U pogonskim su uvjetima provedena dijagnostička ispitivanja koja nisu obuhvaćena normama iz protueksplozijske zaštite, kao što su ispitivanja stanja kaveza i dinamičke ekscentričnosti. Ispitivanja su provedena na sedam visokonaponskih motora (6 kV, snage 1.9 MW i 500 kW) u vrsti protueksplozijske zaštite Ex e II T3. Korišten je komercijalni računalni softver "MOTORMONITOR" temeljen na spektralnoj analizi struje statora.

Za svaki motor je određen indeks stanja (kvara) rotora te postotak dinamičke ekscentričnosti, temeljem čega su definirani potrebni zahvati na motorima i vrijeme u kojem trebaju biti obavljeni. Ova "ON-LINE" dijagnostička metoda je vrlo praktična za primjenu kod protueksplozijski ugroženih motora budući da se sva mjerenja obavljaju "daleko" od motora tj. u neugroženom prostoru.

Rezultati ovih dijagnostičkih ispitivanja su od posebne važnosti jer su upravo oštećenja rotora (povećana zagrijavanja i iskre) i ekscentričnost (struganje rotora o stator) opasni uzročnici paljenja eksplozivne atmosfere. No, i ova metoda kao i većina drugih, ima i nedostataka kao što su potreba za nazivnim opterećenjem motora pri ispitivanju što je ponekad tehnološki teško osigurati, utjecaj smetnji, otežano otkrivanje manjih kvarova i sl.

Siguran i pouzdan rad asinkronog motora u prostoru ugroženom eksplozijom moguće je osigurati (potvrditi) samo primjenom ispitivanja i iz prve i iz druge skupine ranije spomenutih ispitivanja.

Ispitivanja iz prve skupine su detaljno razrađena u normama iz područja protueksplozijske zaštite, kao i kriteriji ocjene dobivenih rezultata. Kod primjene dijagnostičkih ispitivanja kaveza rotora i ekscentričnosti moguća je uporaba različitih metoda (opisanih u trećem i četvrtom poglavlju ovog rada) no kriteriji za ocjenu dobivenih rezultata nisu precizno definirani normativnim dokumentima.

Sve češća primjena pretvarača frekvencija u pogonima ugroženim eksplozijom donosi i neke nove negativne elemente na rad motora kao što su povećana zagrijavanja, napon  $U_{peak}$  i  $du/dt$  u priključnoj kutiji motora i sl.

Do konačnog normativnog definiranja ispitivanja koja je, uz posebna ispitivanja svake vrste protueksplozijske zaštite, nužno provoditi na elektromotorima u prostoru ugroženom eksplozijom (kao npr. ispitivanje kaveza rotora, ležajeva, namota statora, ekscentričnosti i sl.) teže će biti stvarno osigurati pouzdan ali prije svega siguran rad elektromotora koji radi u prostoru ugroženom eksplozijom.

Do tada je, uz napore koje treba usmjeriti ka normativnom reguliranju ovog područja, potrebno uz ispitivanja posebnih zahtjeva protueksplozijske zaštite primjenjivati i raspoložive dijagnostičke metode koje nadopunjuju ta posebna ispitivanja i uvelike doprinose povećanju sigurnosti eksplozijom ugroženog EMP-a.

Danas je u svijetu razvijen cijeli niz dijagnostičkih metoda (kao npr. spektralna analiza struje statora, analiza odziva na udarni napon, mjerenje otpora štapova i prstena, analiza vibracija, magnetski monitoring i sl.) kojima se ispituju stanja kaveza rotora, namota statora i ležajeva, kao i osovinski naponi, ležajne struje i sl.

Rezultati ispitivanja protueksplozijski zaštićenih elektromotora dobiveni primjenom spektralne analize struje statora nažalost nisu, u okviru ovog rada, uspoređeni sa rezultatima koji bi se dobili primjenom neke druge dijagnostičke metode (npr. mjerenjem otpora štapova i prstena).

Usporedba rezultata ispitivanja stanja rotora i dinamičke ekscentričnosti, protueksplozijski zaštićenih elektromotora, dobivenih primjenom različitih dijagnostičkih metoda je od izuzetne važnosti u primjeni dijagnostike i predstavlja poticaj i izazov za daljnji rad u ovom području.

---

## LITERATURA

- [1] N. Marinović, *Electrotechnology in Mining*, Elsevier, Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo, 1990.
- [2] B. Jurković, *Elektromotorni pogoni*, Školska knjiga, Zagreb, 1987.
- [3] N. Marinović, *Električni uređaji i instalacije za eksplozivnu atmosferu - priručnik za projektiranje, izradu, montažu, održavanje i popravak*, CIP, Zagreb, 1999.
- [4] N. Srb, *Smetnje i kvarovi u elektromotornim pogonima*, EDZ, Zagreb, 1988.
- [5] H. Požar, *Visokonaponska rasklopna postrojenja*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1990.
- [6] N. Marinović, *Protueksplozijska zaštita električnih uređaja*, Školska knjiga, Zagreb, 1986.
- [7] D. Ban, T. Čorak, D. Grubić, *Automatizirano ispitivanje asinkronih strojeva za termoelektrane*, V savjetovanje CIGRE, Cavtat, 2001.
- [8] R. Wolf, *Osnove električnih strojeva*, Školska knjiga, Zagreb, 1989.
- [9] R. Fišer, *Modeliranje in diagnostika napak v pogonih z asinhronskim motorji*, doktorska disertacija, Fakultet za elektrotehniko, Ljubljana, 1998.
- [10] D. Ban, R. Wolf, M. Cettolo, *Kompjuterizirana "ON-LINE" dijagnostika stanja rotora asinkronih motora*, IV međunarodni simpozij o novim tehnologijama, EDZ, Pula, 1993.
- [11] P. J. Tavner, J. Penman, *Condition Monitoring of Electrical Machines*, Research studies press LTD, Letchworth, 1987.
- [12] N. Srb, *Magnetski monitoring, efikasan nadzor asinkronih motora u pogonu*, EDZ, 6 EEDEEQ, Zagreb, 2001.
- [13] F. Lienesch, *Testing of Converter - Fed Drives in the Type of Protection Increased Safety "e" and Special Problems*, Explosion Safety in Hazardous Areas, Internacional Conference (Publication 469), London, 1999.
- [14] S. Ferkolj, R. Fišer, *Review of Modern Diagnostic Techniques for Condition Monitoring of Induction Motor Drives*, Faculty of Electrical Engineering, Ljubljana, EEDEEQ, Pula, 1997.
- [15] S. Štefanko, M. Bogut, D. Paljan, D. Krušelj, I. Kurtović, M. Momić, *Detekcija prekida kaveza rotora asinkronog motora*, Elektrotehnika br. 43, Zagreb, 2000.
- [16] 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.
- [17] N. Marinović, *Partikelzünddurchschlag an schlagwettergeschützten elektrischen Betriebsmitteln mit ebenen Spalten*, Von Fachbereich Bergbau und Geowissenschaften der technischen Universität Berlin zur Verleihung des akademischen Grades Doktor - Ingenieur, genehmigte Dissertation, Berlin, 1976.

- 
- [18] D. Rac, S. Đerek, *Konstruktivna ispitivanja električnih uređaja u vrsti protueksplozijske zaštite nadtlak "p"*, HRN EN 50016, S-bilten br. 1-2, S-Komisija, Zagreb, 1999.
- [19] L. C. Towle, *Safety Implications of Electrical Transients in Hazardous Areas*, Explosion Safety in Hazardous Areas, Internacional Conference (Publication 469), London, 1999.
- [20] D. Ban, R. Wolf, M. Cettolo, *Metode detekcije kvara kaveza rotora asinkronog motora*, Elektrotehnika vol. 34, br. 6, Zagreb, 1991.
- [21] Z. Lazarević, Ž. Janda, D. Petrović, S. Stojković, *The Advanced Method of Rotor Failure Detection in Large Induction Motors*, CIGRE 11-203, Paris, 2000.
- [22] N. Srb, *Provjera kvalitete kaveznih rotora pri popravku i proizvodnji*, EDZ, 6 EEDEEQ 2001, Zagreb, 2001.
- [23] D. Ban, A. Reicker, *Visokonaponski motori za pogon pumpi u sistemu naftovoda*, Končar-stručne informacije, Zagreb, 1978.
- [24] I. Gavranić, *Suvremene električke zaštite elektromotornog pogona u eksploziji ugroženom ozračju*, diplomski rad br. 1529, FER Zagreb, 1996.
- [25] 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.
- [26] N. Srb, *Prediktivno ispitivanje izolacije udarnim naponom*, Elektro-stručni časopis za elektrotehniku, br. 2, str. 34-40, Zagreb, rujan/listopad 1997.
- [27] J. Galić, *Primjena udarnog napona u dijagnostici stanja rotacijskih električnih strojeva*, V savjetovanje CIGRE, Cavtat, 2001.
- [28] D. Ban, R. Wolf, M. Cettolo, Z. Kovačević, *Razvoj dijagnostičkih metoda za motore vlastite potrošnje termoelektrana*, CIGRE R 11.08, Zagreb, 1993.
- [29] Norma IEC 1241-3, *Classification of Hazardous Area with Presence of Combustible Dust*, IEC, 1997.
- [30] Norma IP Code, *Area Classification Code for Petroleum Installations*, Institute of Petroleum, London, 1990.
- [31] Norma API, *Recommended Parctice for Classification of Locations for Electrical Installations at Petroleum Facilities Classified as Class I, Zone 0, 1, 2*, American Petroleum Institute, Washington, 1997.
- [32] Norme niza IEC 60079; *Electrical Apparatus for Explosive Gas Atmospheres*, IEC 1993/1995/1996.
- [33] Russel J. Kerkman, *Twenty Years of PWM AC Drives: When Secondary Issues Become Primary Concerns*, IECON 1996.
- [34] J. Škorja, *Električni luk u eksplozivno šticećenim kućištima*, magistarska radnja, ETF Zagreb, 1976.
- [35] N. Srb, *Kvarovi kaveznih rotora u pogonu*, EDZ, 6 EEDEEQ '2001, Zagreb, 2001.

- 
- [36] F. Podnar, *Metoda mjerenja ekvivalentne električne vodljivosti kaveza rotora asinkronih motora i snimanje dijagrama popunjenosti utora legurom*, EEDEEQ, Rovinj, 1996.
- [37] PTB report, *Extract from the PTB Annual report 1997*, Ex Magazine No 24, STAHL GMBH, Künzelsau, 1998.
- [38] R. Peters, *Overload Protection of Motors in Hazardous Areas*, Ex Magazine No 24, STAHL GMBH, Künzelsau, 1998.
- [39] R. Wolf, D. Ban, M. Cettolo, Z. Kovačević, *Dijagnostička ispitivanja kaveza rotora asinkronog stroja*, Elektrotehnika, ELTHB 2, 34 (5), 1991.
- [40] M. Stegić, *Vibracijska dijagnostika električnih strojeva*, I simpozij EEDEEQ, Rovinj, 1996.
- [41] Niz normi IEC 60364-4, 60364-5, 60364-6, *Electrical Installations of Buildings, Part 4: Protection for Safety, Part 5: Selection and Erection of Electrical Equipment, Part 6: Verification*, IEC.
- [42] Pretvarači frekvencije ACS 500 (SAMI GS), *Priručnik za makro primjene i korisnički priručnik*, Končar INEM – ABB.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] Norme EN 50014 + A1 + A2; 50016; 50018 + pr A1; 50019 + pr A1; *Electrical Apparatus for Potentially Explosive Atmospheres*, CENELEC, 1994/1995/1997/1999.
- [46] R. Kerkman, D. Leggate, G. Skibinski, *Interaction of Drive Modulation & Cable Parameters on AC Motor Transients*, IEEE Industry Application Society Conference, Oct. 6-10, 1996.
- [47] 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.
- [48] J. Erdman, R. Kerkman, D. Schlegel, G. Skibinski, *Effect of PWM Inverters on AC Motor Bearing Currents and Shaft Voltages*, IEEE - APEC 95, Dallas, Texas, March, 1995.
- [49] Priručnik, *Tehnički priručnik*, Končar d.d., Zagreb, 1991.
- [50] I. Gavranić, *Osvrt na europsku normu EN 60204-1 u odnosu na eksplozijski ugrožene prostore*, S-bilten br. 1-2, S-Komisija, Zagreb, 1997.
- [51] I. Gavranić, M. Dujmić, *Protueksplozijska zaštitna platformi za bušenje i proizvodnju nafte i plina*, S-bilten br. 1-2, S-Komisija, Zagreb, 1999.
- [52] I. Gavranić, *Električni uređaji u protueksplozijski zaštićenoj izvedbi i zone vodika u termoelektranama*, V savjetovanje CIGRE, Cavtat, 2001.
- [53] H. Schober, *Profibus DP, Also Available for the Hazardous Area*, Ex Magazine No 24, STAHL GMBH, Künzelsau, 1998.
-

- [54] A. Fritsch, *Operating and Monitoring Systems for Industrial and Hazardous Areas*, Ex Magazine No 24, STAHL GMBH, Künzelsau, 1998.
- [55] Grupa autora, *Switching, Protection and Distribution in Low-Voltage Networks*, SIEMENS MCD Verlag, 1994.
- [56] D. Filipović, *Vibroakustička dijagnostika u elektromotornim pogonima*, I simpozij EEDEEQ, Rovinj, 1996.
- [57] M. Stegić, N. Vranković, *On-line Vibration Monitoring the Stator End-windings on Turbogenerators*, 6 EEDEEQ, Zagreb, 2001.
- [58] Grupa autora, *Inženjerski priručnik IPI*, Školska knjiga Zagreb, 1996.
- [59] D. Krušelj, *Zakoni upravljanja kaveznim asinkronim strojem za optimalne stupnjeve djelovanja*, magistarski rad, FER, Zagreb, 1998.
- [60] K. de Haas, *Ständige Überwachung von elektrischen Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen*, S-bilten br. 1-2, S-Komisija, Zagreb, 2000.
- [61] J. Crnković, *Protueksplozijski zaštićeni elektromotori napajani iz pretvarača frekvencije i napona*, S-bilten br. 1-2, S-Komisija, Zagreb, 2000.
- [62] S. Bell, J. Sung, *Will Your Motor Insulation Survive a New Adjustable Frequency Drive*, IEEE Petroleum & Chemical Industry Conf. Sept. 1996.
- [63] Izvješća, *Izvješća o ispitivanju br. 00-0272 (2000.01.12); 99-0243 (1999.06.24); 96-0369 (1996.09.03); 99-0464 (1999.11.04)*, Arhiva "S-Komisije", Zagreb.
- [64] Prospektni materijali, *Prospektni materijali proizvođača pretvarača Danffos (pretvarači serije VLT 5000)*, Danffos.

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA

|                          |                                                                              |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| $B$                      | – magnetska indukcija                                                        |
| $C$                      | – broj izmjena svježeg zraka u jedinici vremena                              |
| $c$                      | – specifična toplina                                                         |
| $\cos \varphi$           | – faktor snage                                                               |
| $C_p$                    | – kapacitet kondenzatora $C_p$ (ispitivanog) objekta                         |
| $C_s$                    | – kapacitet kondenzatora $C_s$ (udarnog kondenzatora)                        |
| $D, d$                   | – dimenzija promjera                                                         |
| $dG/dt$                  | – jačina izvora ispuštanja zapaljivog plina ili pare                         |
| $(dG/dt)_{max}$          | – najveća količina ispuštanja uz izvor zapaljivog plina ili pare             |
| $(dV/dt)_{min}$          | – najniži obujamski protok svježeg zraka                                     |
| $DGE$                    | – donja granica eksplozivnosti (koncentracija zapaljivog plina ili pare)     |
| $E$                      | – inducirani napon (iznos)                                                   |
| $e$                      | – inducirani napon, trenutna vrijednost                                      |
| $E_{dvp}$                | – direktna komponenta induciranih napona u statoru                           |
| $E_{ivp}$                | – inverzna komponenta induciranih napona u statoru                           |
| $f$                      | – frekvencija                                                                |
| $f_{dvp}$                | – napona i struje direktne komponente reda $v_p$                             |
| $f_{ivp}$                | – napona i struje inverzne komponente reda $v_p$                             |
| $f_k$                    | – uzorkovanja (diskretna)                                                    |
| $f_n$                    | – sklopna (noseća) izmjenjivača                                              |
| $f_p$                    | – pulsiranja                                                                 |
| $f_R$                    | – osnovnog harmonika rotacije                                                |
| $f_1, f_s$               | – napona narinutog na stator (osnovni harmonik)                              |
| $f_2$                    | – napona i struje u rotoru (vrtnje okretnog polja prema vodičima rotora)     |
| $f$                      | – mjera učinkovitosti ventilacije (poglavlje 2)                              |
| $f_{nvp}$                | – namotni faktor (poglavlje 4)                                               |
| $GGE$                    | – gornja granica eksplozivnosti (koncentracija zapaljivog plina ili pare)    |
| $H$                      | – jakost magnetskog polja                                                    |
| $I_k$                    | – struja oštećenog (prekinutog) štapa rotora                                 |
| $I_{M2}$                 | – struja u štapu M2                                                          |
| $I_s$                    | – osnovni harmonik struje statora                                            |
| $I_1$                    | – struja u štapu 1                                                           |
| $I_{livp}$               | – inverzna komponenta dodatne struje u namotu statora                        |
| $i_{M2}$                 | – struja u segmentu prstena M2                                               |
| $i_1$                    | – struja u segmentu prstena 1                                                |
| $i_{ldvp}$               | – iznos dodatne direktne komponente statorske struje [p.u]                   |
| $i_{livp}$               | – iznos dodatne inverzne komponente statorske struje [p.u]                   |
| $\alpha I_s, \gamma I_s$ | – dodatne (bočne) frekvencijske komponente u struji statora radi nesimetrije |
| $\beta I_s, \delta I_s$  | – dodatne (bočne) frekvencijske komponente u struji statora radi nesimetrije |
| $j$                      | – gustoća struje                                                             |

---

|             |                                                                      |
|-------------|----------------------------------------------------------------------|
| $k$         | – faktor                                                             |
| $K$         | – ukupni mjerni induciranog napona u mjernom senzoru (poglavlje 3)   |
| $k$         | – sigurnosti primjenjen na <i>DGE</i> (poglavlje 2)                  |
| $k_s$       | – ovisan o primjenjenim mjernim sensorima (poglavlje 3)              |
| $k$         | – konstanta                                                          |
|             | – svojstvo kaveza                                                    |
| $L$         | – induktivitet                                                       |
| $L_s$       | – ukupni samoinduktivitet namota i mreže u strujnom krugu jedne faze |
| $L$         | – duljina / razmak                                                   |
|             | – razmak između uzbudnog i mjernog senzora                           |
|             | – duljina sastava (poglavlje 5)                                      |
| $L_K$       | – duljina dovodnog kabela od pretvarača do elektromotora             |
| $l$         | – najkraći put kroz zaštitni sastav (razmak)                         |
|             | – dužina vodiča                                                      |
| $M$         | – zakretni moment                                                    |
| $M_{UM}$    | – međuinuktivitet uzbudnog i mjernog senzora                         |
| $m$         | – masa                                                               |
|             | – zagrijanog tijela (vodiča)                                         |
|             | – kaveza (štapova i prstena)                                         |
| $M_2$       | – ukupan broj štapova rotora                                         |
| $N_R$       | – broj utora rotora                                                  |
| $n$         | – cijeli broj                                                        |
| $n$         | – brzina vrtnje                                                      |
|             | – rotora                                                             |
| $n_d$       | – direktne komponente okretnog polja                                 |
| $n_i$       | – inverzne komponente okretnog polja                                 |
| $n_s$       | – sinkrona osnovnog harmonika okretnog polja statora                 |
| $n_{2s}$    | – okretnog polja rotora prema rotoru                                 |
| $n_{20}$    | – okretnog polja rotora prema statoru                                |
| $P$         | – radna snaga                                                        |
| $P_{cur}$   | – gubici u bakru štapova i prstena                                   |
| $p$         | – broj pari polova                                                   |
| $Q$         | – količina oslobođene topline                                        |
| $R$         | – električni otpor                                                   |
| $R_{hstat}$ | – statora (hladno stanje)                                            |
| $R_k$       | – kontakti između štapa i prstena                                    |
| $R_{pr}$    | – prstena                                                            |
| $R_{st}$    | – štapa                                                              |
| $R_{tstat}$ | – statora (toplo stanje)                                             |
| $S$         | – prividna snaga                                                     |

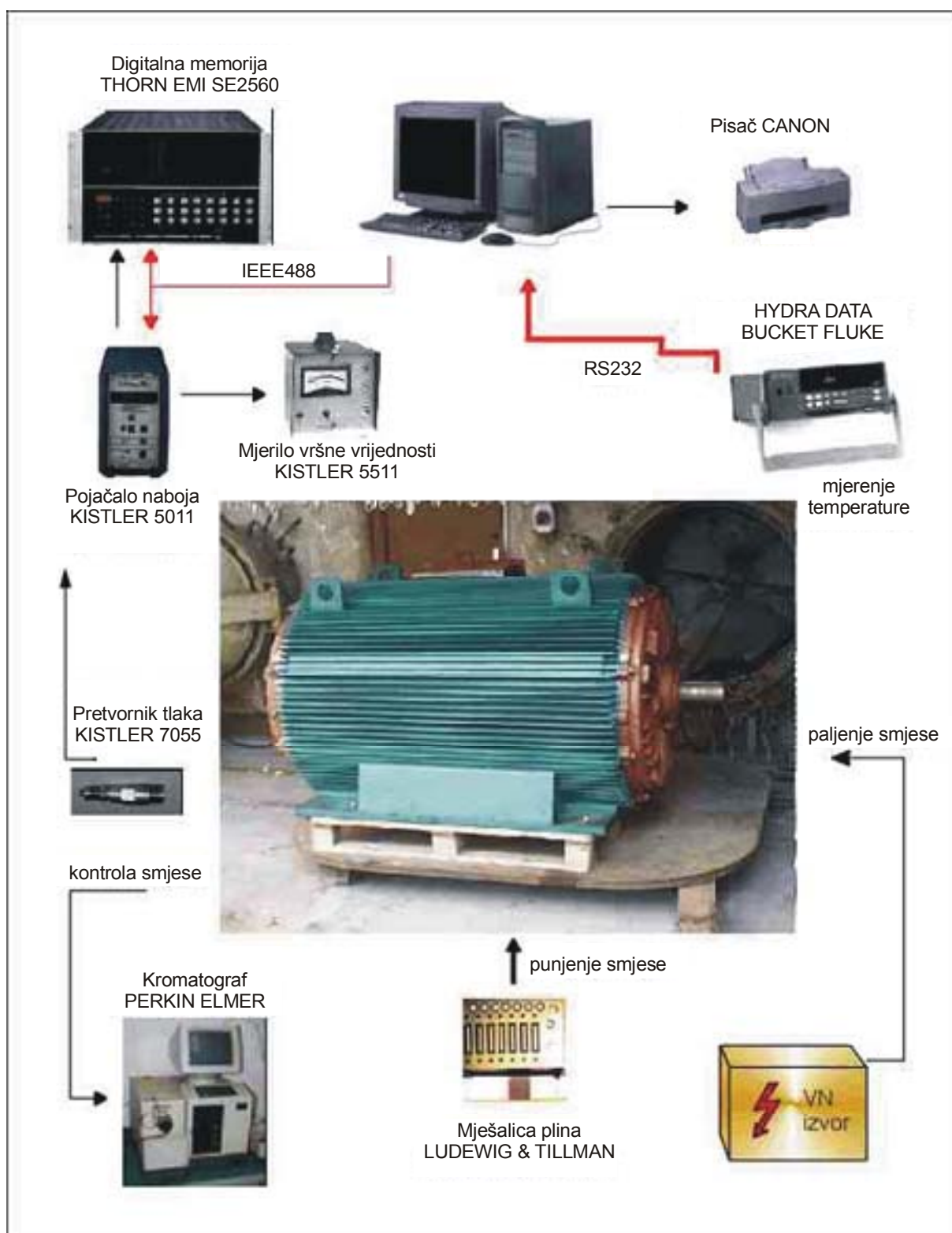
---

---

|                     |                                                                                          |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| $S$                 | – presjek vodiča                                                                         |
| $s$                 | – klizanje                                                                               |
| $T$                 | – temperatura / nadtemperatura                                                           |
| $T_c$               | – aktivnog dijela                                                                        |
| $T_k$               | – zbog utjecaja kvara (zakočen rotor)                                                    |
| $T_{kl}$            | – najveća dopuštena određena temperaturnim razredom                                      |
| $T_n$               | – normalnog pogona                                                                       |
| $T_o$               | – okoline                                                                                |
| $T_{okoline}$       | – okoline                                                                                |
| $T_t$               | – mjerena                                                                                |
| $T$                 | – trajanje periode izmjenične veličine                                                   |
| $t$                 | – vrijeme                                                                                |
|                     | – potrebno da prosječna koncentracija padne sa $X_o$ na $k \cdot DGE$ (poglavlje 2)      |
| $t_E$               | – dopuštenog stajanja sa zakočenim rotorom "Exe" elektromotora                           |
| $t_e$               | – porasta napona u priključnoj kutiji elektromotora                                      |
| $U_{in}$            | – inducirani napon u mjernom senzoru                                                     |
| $U_n$               | – nazivni linijski napon                                                                 |
| $U_{peak}$          | – najveća vrijednost impulsa napona                                                      |
| $V_k$               | – brzina širenja vala u kabelu                                                           |
| $V_z$               | – pretpostavljeni obujam potencijalno eksplozivne atmosfere                              |
| $w$                 | – širina sastava                                                                         |
| $Z$                 | – impedancija                                                                            |
| $X$                 | – reaktancija                                                                            |
| $X_o$               | – početna koncentracija zapaljive tvari                                                  |
| $Y$                 | – vodljivost                                                                             |
| $\alpha$            | – temperaturni koeficijent električne vodljivosti                                        |
| $\gamma$            | – gustoća materijala                                                                     |
| $\delta$            | – širina zračnog raspora                                                                 |
| $\eta$              | – korisnost                                                                              |
| $\theta$            | – ukupno okretno protjecanje                                                             |
| $\theta_1$          | – okretno protjecanje statora                                                            |
| $\theta_2$          | – okretno protjecanje rotora                                                             |
| $\mathcal{G}$       | – nadtemperatura zagrijanog tijela                                                       |
| $\mathcal{G}_k$     | – nadtemperatura zbog kvara                                                              |
| $\mathcal{G}_{kl}$  | – najveća dopuštena nadtemperatura određena temperaturnim razredom i izolacijskom klasom |
| $\mathcal{G}_n$     | – nadtemperatura normalnog pogona                                                        |
| $\mathcal{G}_{max}$ | – najveća nadtemperatura                                                                 |
| $\mathcal{G}_o$     | – temperatura okoline                                                                    |
| $v$                 | – red harmoničkog člana                                                                  |
| $\rho$              | – specifični otpor                                                                       |
| $\tau$              | – vremenska konstanta zagrijavanja                                                       |
| $\Phi$              | – magnetski tok                                                                          |
| $\varphi$           | – električni kut                                                                         |
| $\omega$            | – kutna brzina                                                                           |

---

# Prilog A: Principijelna shema ispitivanja "Ex d" kućišta na unutarnji tlak



**Prilog B:** Ispitivanja elektromotora u vrsti zaštite povećana sigurnost - "Ex e", 240kW, 380/660 V; 423/244 A,  $\cos \varphi = 0.91$ , tvornički br. 943114, Ex e II T1/T2, u praznom hodu, kratkom spoju i pri opterećenju

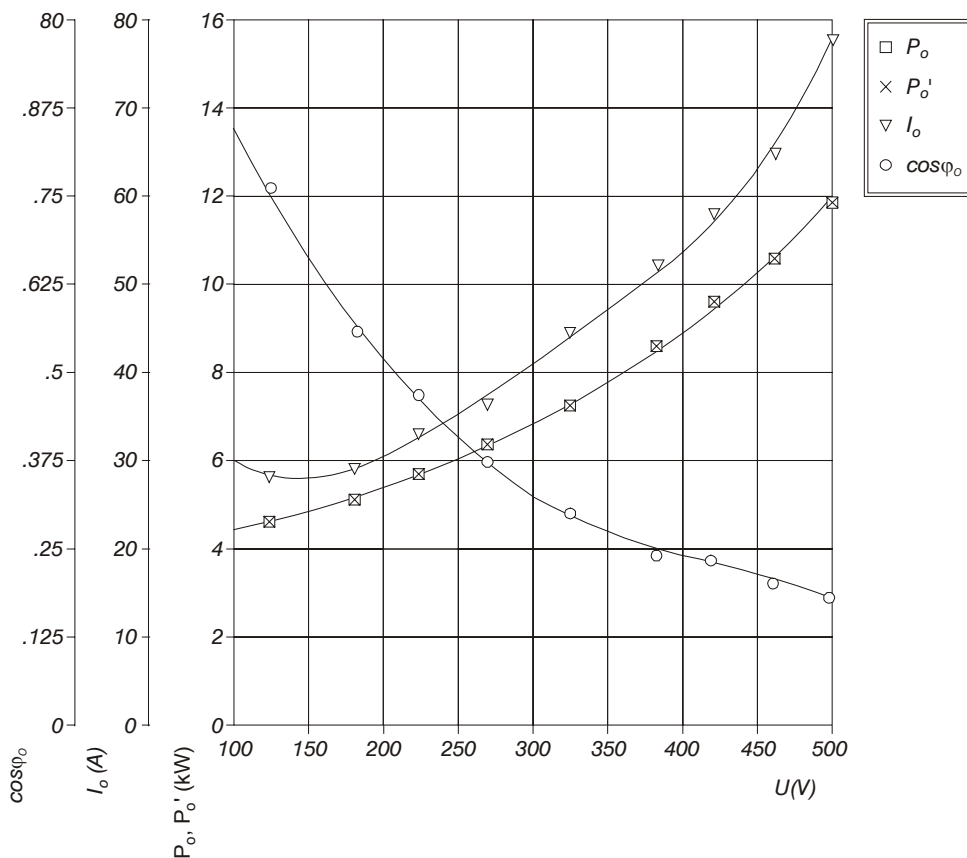
### Prazni hod

**Nazivni podaci:** 240 kW, 380/660 V, 423/244 A

Protueksplozijska zaštita: Ex e II T1/T2

Un (V): 380, Io (A): 51.37553,  $\cos \varphi_0$ : .2515659, Pcuo (kW): .0345631, Pfeo (kW): 4.437559  
Ptrv (kW): 4.024332, Po (kW): 8.496454

| U     | Io   | $\cos \varphi_0$ | Po    | Po'      |
|-------|------|------------------|-------|----------|
| (V)   | (A)  | —                | (kW)  | (kW)     |
| 497.1 | 78.5 | .1794679         | 12.13 | 12.04809 |
| 460.5 | 66   | .2024991         | 10.66 | 10.60210 |
| 418.5 | 57.6 | .2278447         | 9.513 | 9.468900 |
| 380.5 | 52.2 | .2489378         | 8.564 | 8.527781 |
| 324   | 44   | .2943450         | 7.268 | 7.242266 |
| 269.3 | 36.8 | .3711031         | 6.37  | 6.351999 |
| 223.3 | 32.7 | .4492666         | 5.682 | 5.667787 |
| 181.8 | 28.9 | .5613045         | 5.108 | 5.096898 |
| 125.3 | 28   | .7569864         | 4.6   | 4.589579 |
| 93.3  | 30.6 | .8675482         | 4.29  | 4.277554 |



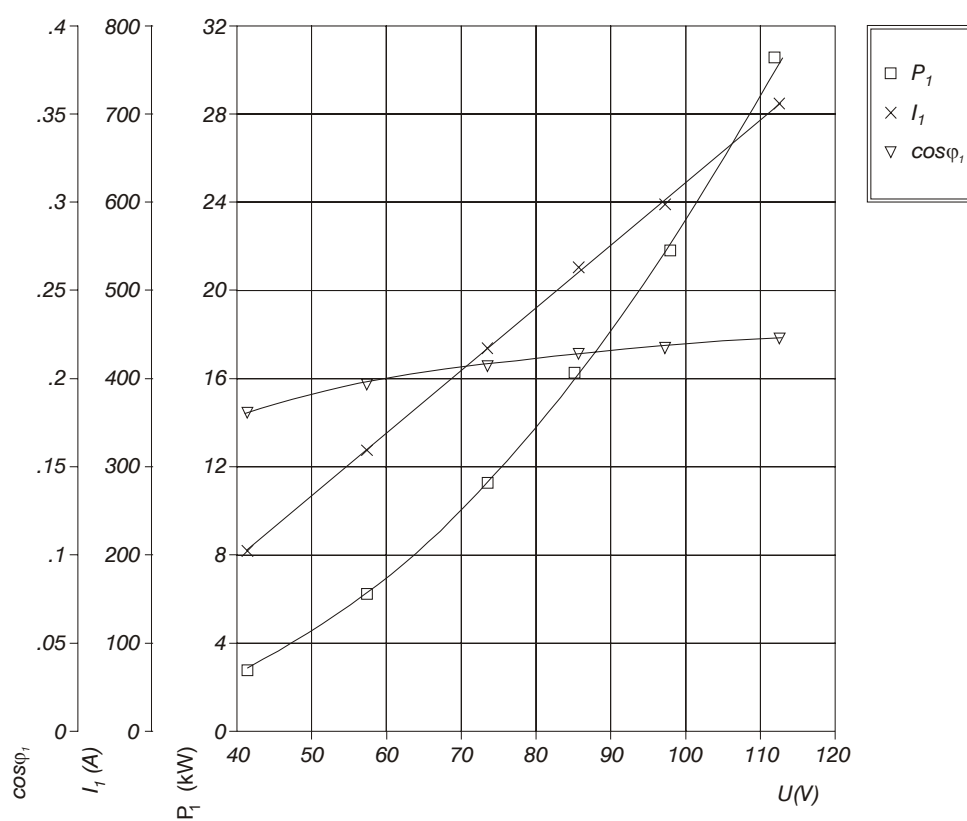
## Kratki spoj

Nazivni podaci: 240 kW, 380/660 V, 423/244 A

Protueksplozijska zaštita: Ex e II T1/T2

U (V): 380,  $I_1$  (A): 2618.396,  $\cos \varphi_1$ : .2403045

| U     | $P_1$ | $I_1$ | $\cos \varphi_1$ |
|-------|-------|-------|------------------|
| (V)   | (kW)  | (A)   | -                |
| 112.8 | 30.39 | 709.3 | .2192962         |
| 97.2  | 21.67 | 597.4 | .2154601         |
| 85.4  | 16.15 | 514.3 | .2122939         |
| 73.1  | 11.07 | 424.3 | .2060614         |
| 57    | 6.06  | 313.3 | .1959191         |
| 40.8  | 2.59  | 203.4 | .1801889         |
| 0     | 0     | 0     | 0                |
| 0     | 0     | 0     | 0                |



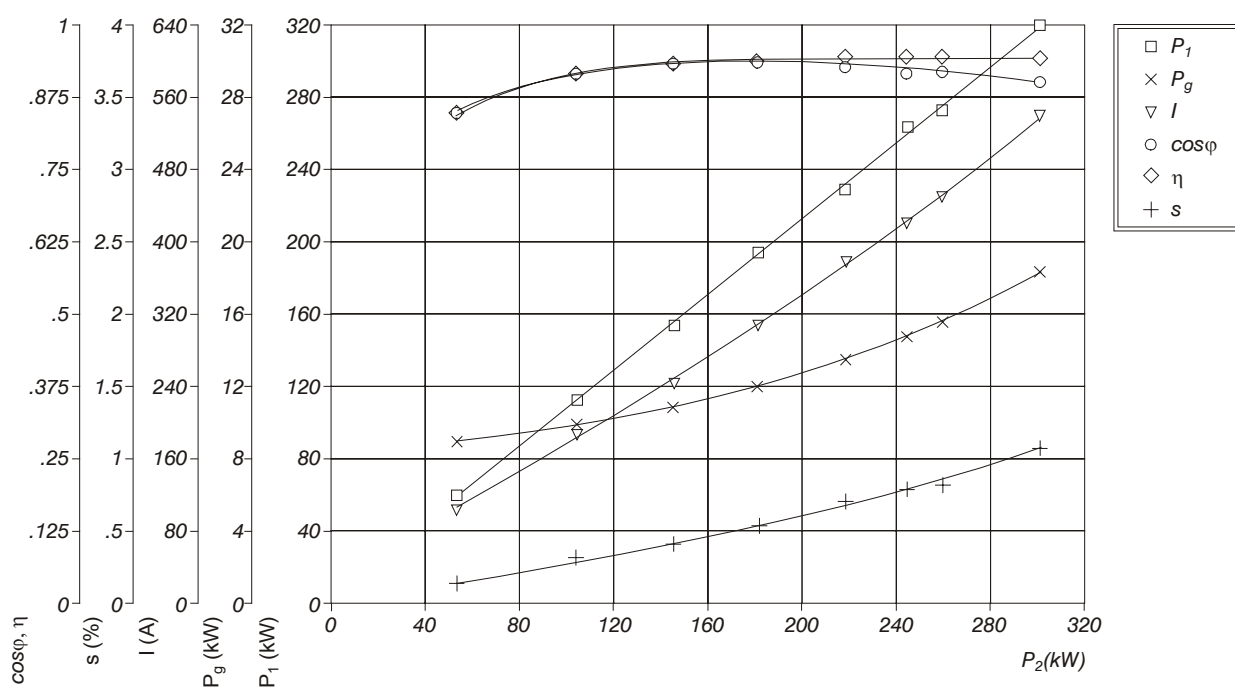
## Opterećenje

**Nazivni podaci:** 240 kW, 380/660 V, 423/244 A

Protueksplozijska zaštita: Ex e II T1/T2

$P_2$  (kW): 240,  $P_g$  (kW): 14.60323,  $I$  (A): 414.3079,  $\cos\varphi$ : .9239508,  $\eta$ : .9426432,  $s$ : .7754192,  
 $P_{cu1}$  (kW): 2.964278,  $P_{al2}$  (kW): 1.903939,  $n(\text{min}^{-1})$ : 2976.737,  $M_n$  (Nm): 769.9705

| $P_1$ | $P_2$    | U     | I     | $\cos\varphi$ | $\eta$   | s        |
|-------|----------|-------|-------|---------------|----------|----------|
| (kW)  | (kW)     | (V)   | (A)   | —             | —        | %        |
| 320   | 301.5481 | 381.2 | 538   | .9019214      | .9433379 | 1.096667 |
| 275.6 | 259.9789 | 384.2 | 451.2 | .9189813      | .9433195 | .85      |
| 259.5 | 244.6461 | 383.4 | 422.8 | .9253460      | .9427596 | .8       |
| 231.9 | 218.2533 | 383   | 376.6 | .9293420      | .9411526 | .7033333 |
| 193.4 | 181.2907 | 385.8 | 310.1 | .9344291      | .9373873 | .5466667 |
| 156.2 | 145.2390 | 386   | 250.4 | .9341429      | .9298270 | .4233333 |
| 113.4 | 103.4663 | 384.9 | 185.1 | .9200525      | .9124014 | .29      |
| 62    | 52.93563 | 386.3 | 109.9 | .8441569      | .8538005 | .1466667 |



**Prilog C:** Elektromotor u vrsti zaštite Ex ped IIB T3 s pridruženim elementima i sustavom nadtlaka.



**Prilog D:** Konstrukcijski podaci ispitivanih elektromotora

| Parametar                                   | Jedinica          | 4AZsh 1127-2       | 4AZsh 905-4        |
|---------------------------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| Oznaka protueksplozijske zaštite            | –                 | Ex e II T3         | Ex e II T3         |
| $I_A/I_N$                                   | –                 | 5.5                | 6.2                |
| $t_E$                                       | s                 | 8.5                | 5.8                |
| Nazivna snaga                               | kW                | 1900               | 500                |
| Nazivni napon                               | V                 | 6000               | 6000               |
| Nazivna struja                              | A                 | 210                | 58                 |
| Nazivna frekvencija                         | Hz                | 50                 | 50                 |
| Nazivna brzina vrtnje                       | min <sup>-1</sup> | 2980               | 1485               |
| Broj pari polova                            | –                 | 1                  | 2                  |
| Struja praznog hoda                         | A                 | 41.6               | 15.2               |
| Spoj statorskog namota                      | –                 | Y                  | Y                  |
| Vrsta namota statora                        | –                 | dvoslojni bačvasti | dvoslojni bačvasti |
| Vrsta namota rotora                         | –                 | kavezni            | kavezni            |
| Broj statorskih utora                       | –                 | 60                 | 72                 |
| Broj rotorskih utora                        | –                 | 52                 | 58                 |
| Provrt statora ( $\Phi$ )                   | mm                | 500                | 600                |
| Vanjska mjera rotora ( $\Phi$ )             | mm                | 494                | 597                |
| Vanjska mjera statora ( $\Phi$ )            | mm                | 995                | 900                |
| Širina zračnog raspora - jednostrano        | mm                | 3                  | 1.5                |
| Skošenje (rotor)                            | –                 | 1/60               | 1/72               |
| Dužina vodiča (štapa) rotora između prstena | mm                | 790                | 540                |

**Prilog E:** Protueksplozijski zaštićeni elektromotorni pogoni (elektromotori u vrsti zaštite Ex e II T3)



## SAŽETAK

U magistarskom radu su opisane metode tehničke dijagnostike kaveznih asinkronih elektromotora primjenjive na protueksplozijski zaštićene elektromotorne pogone.

Analiziran je utjecaj parametara ugroženog prostora na primjenu dijagnostičkih metoda, te posebni zahtjevi kod ispitivanja u uvjetima ugroženosti eksplozijom.

U laboratorijskim su uvjetima provedena ispitivanja elemenata protueksplozijske zaštite na elektromotorima u vrsti zaštite oklapanje - "d", povećana sigurnost - "e" i nadtlak - "p". Ispitivanja i analize rezultata su obavljeni u skladu s normama iz područja protueksplozijske zaštite, važećim u Republici Hrvatskoj. Definirane su potrebne radnje za otklanjanje utvrđenih nedostataka.

Razmotren je utjecaj pretvarača frekvencije, preko kojih se napajaju suvremeni protueksplozijski zaštićeni elektromotorni pogoni, na parametre motora značajne sa stanovišta protueksplozijske zaštite.

U pogonskim su uvjetima, primjenom metode analize spektra linijske struje namota statora, provedena ispitivanja stanja kaveza i dinamičke ekscentričnosti na motorima snage 1.9 MW i 500 kW u vrsti protueksplozijske zaštite povećana sigurnost - "e".

Temeljem dobivenih rezultata je ocijenjeno stanje kaveza rotora i dinamičke ekscentričnosti, te su definirane potrebne servisne aktivnosti i daljnja periodička ispitivanja.

## **SUMMARY**

In this M.S. thesis, methods of technical diagnostics of squirrel-cage induction motors that are applicable to explosion-proof electric motor drives are described.

The influence of hazardous area parameters on application of diagnostic methods is analysed, and also an analysis is given of special requirements for tests in the conditions of explosion hazard.

Elements of explosion protection of electric motors designed in types of protection Flameproof enclosures - "d", Increased safety - "e" and Pressurized - "p" were tested in laboratory conditions. The tests and analyses were made in accordance with standards that are valid for explosion protection in the Republic of Croatia. The actions necessary to eliminate the detected defects are specified.

The influence of frequency converters for feeding modern explosion-protected electric motor drives on parameters of the motor that are relevant in terms of explosion protection is considered.

The condition of the squirrel cage and the dynamic eccentricity were tested on 1,9 MW and 500 kW motors with explosion protection type Increased safety - "e". The tests were made in operating conditions, applying the spectral analysis method to stator winding line current.

The obtained results were used for assessment of the condition of rotor squirrel cage and the dynamic eccentricity, and also to define the necessary servicing activities and further periodic tests.

## **KLJUČNE RIJEČI**

protueksplozijska zaštita elektromotora

kvarovi asinkronih elektromotora

dijagnostička ispitivanja

spektralna analiza struje

## **KEY WORDS**

explosion protected electric motors

faults of squirrel-cage induction motors

technical diagnostics

spectral analysis of current

## **ŽIVOTOPIS**

Ime mi je Ivica Gavranić. Rođen sam 08.07.1969. u Odžaku gdje sam i završio srednju školu elektrotehničke struke, smjer elektroenergetika i elektrostrojarstvo, nakon čega sam se, zajedno s obitelji, preselio u Slavonski Brod.

1989. godine sam se upisao na Elektrotehnički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, smjer Elektrostrojarstvo i automatizacija. Po završetku studija sam se zaposlio u poduzeću Ferimport.

Od 01.05.1997. sam zaposlen u S-Komisiji Državnog zavoda za normizaciju i mjeriteljstvo na poslovima provedbe tehničkog nadzora električnih uređaja i instalacija u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom. Između ostalog sam sudjelovao na provedbi tehničkih nadzora na postrojenjima za istraživanje i eksploataciju nafte i plina u Hrvatskoj, Italiji i Egiptu, te na postrojenjima za preradu nafte i plina diljem Hrvatske.

Poslijediplomski znanstveni studij na Fakultetu elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu sam upisao 1998. godine.

Autor sam više radova objavljenih u zbornicima i stručnim časopisima. Član sam Hrvatskog nacionalnog Tehničkog odbora ETO 64 – Električne instalacije zgrada.

Neoženjen sam. Živim u Zagrebu.