

ODRŽAVANJE ELEKTROMOTORNIH POGONA U EKSPLOATACIJI

MAINTENANCE OF ELECTRIC DRIVES OF EXPLOITATION

Meho Emkić, dipl.ing.maš.
J.U. MS Mašinska škola, Tuzla
Bosne srebrene br.6, Tuzla

Dr.sci. Alija Karić, dipl.ing.maš.
Univerzitet u Tuzli, Mašinski fakultet,
Tuzla u Tuzli

Mr.sci. Amir Arnautović, dipl.ing.maš.
J.U. MS Saobraćajna škola, Tuzla
Bosne srebrene br.6, Tuzla

Harun Tinjić, dipl.ing.maš.
JKP Centralno grijanje, Tuzla
u Tuzli

REZIME

U radu je predstavljena i sistematizovana problematika nadzora i dijagnostike stanja elektromotornih strojeva za vrijeme njihove eksploatacije kroz sljedeće tematske cjeline:

- *Osnovi dinamike elektromotornih pogona;*
- *Posljedice pojedinih režima rada elektromotornih pogona;*
- *Uzroci koji dovode do oštećenja rukavca vratila rotora; i*
- *Dijagnostičke metode praćenja stanja vratila rotora;*

Značaj poznavanja ponašanja i stanja vratila rotora u eksploataciji je u mogućnosti predviđanja i planiranja aktivnosti servisnog i remontnog održavanja elektromotornih pogona.

Prezentirani sadržaji i tematika održavanja (nadzora i dijagnostike) elektromotornih pogona u eksploataciji se mogu primijeniti i na druge mašine sa obrtnim elementima, kao što su: turbine, ventilatori, pumpe, kompresori, motori sus itd.

Ključne riječi: elektromotorni pogon, dijagnostika, eksploatacija.

ABSTRACT

The paper was presented systematising problems monitoring and diagnostics of electric machines for the state during their exploitation through the following topics:

- *The underlying dynamics of motor drives;*
- *Consequences of individual mode of electric drives;*
- *The causes that lead to damage to the rotor shaft sleeve, and*
- *Diagnostic methods of monitoring the rotor shaft;*

Importance of knowledge and behavior of the rotor shaft in the state of exploitation is able to predict and plan service activities and Overhaul Maintenance of electric drives.

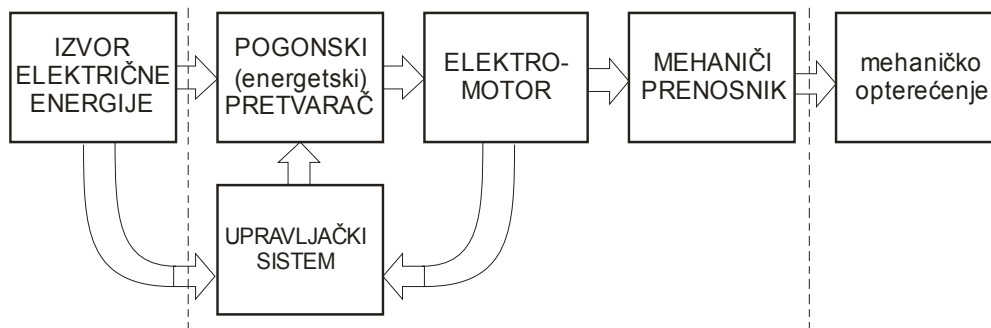
Presented activities and themes maintenance (monitoring and diagnostics) motor drives the exploitation can be applied to other elements of working with machines, such as turbines, fans, pumps, compressors, engines, etc.

Keywords: Electric drives, Diagnostics and Exploitation

1. UVOD

1.1. Šta su elektromotorni pogoni?

Elektromotornim pogonom nazivamo skup funkcionalno vezanih elemenata, koji se sastoji od: elektromotora, radne mašine, mehanizma za prenos snage između elektromotora i radne mašine i uređaja za napajanje i upravljanje, koji čine jedinstvenu tehničko-tehnološku cjelinu.



Slika 1. Šema elektromotornog pogona

1.2. Dijagnostika i elektromotorni pogoni

Elektromotorni pogoni su pogonski uređaji koji se mogu uspješno dijagnosticirati u eksploataciji. Za uspješno dijagnosticiranje stanja elektromotornih pogona neophodna je detaljna analiza svih radnih parametara što će omogućiti da elektromotorni pogon ima pouzdan rad, sa planiranim prekidima koji će poslužiti za aktivnosti koje će spriječiti da uopšte dođe do neplaniranog "stanja u otkazu".

1.3. Opravljanost uvođenja održavanja (nadzora i dijagnostike) u eksploataciji

U tehnički razvijenim zemljama 1970-tih godina se primjenjivalo preventivno plansko održavanje (pregled stanja, podmazivanje itd). U toku 1980-tih godina preventivno održavanje je počelo da se izvodi prema potrebi (održavanje prema stanju). Kod održavanja prema stanju koristi se savremena oprema za praćenje (monitoring) i dijagnostiku. Budući nivo značaja terotehnologije određuju činjenice koje se odnose na:

- Kvalitet
- Produktivnost
- Profit
- Zaštita životne sredine
- Sigurnost
- Pобољшanje karakteristika tehničkih sistema

Tehnički sistemi brzo zastarevaju u smislu njihove sposobnosti da zadovolje savremene trendove pri eksploataciji. Izvođenjem određenih aktivnosti nadzora i dijagnostike u eksploataciji mogu se radnim sistemima poboljšati eksploatacijsko-tehničke karakteristike i efektivnost sistema.

2. OSNOVI DINAMIKE ELEKTROMOTORNIH POGONA

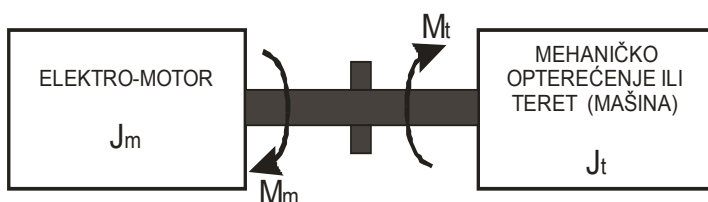
2.1. Osnovi dinamike elektromotornog pogona

Da bi se analizirale pojave koje se javljaju u radu elektromotornih pogona potrebno je poznavati osnovne fizičke veličine koje se koriste u analizi rada elektromotornih pogona.

Tabela 1. Parametri translatornog i rotacionog kretanja

TRANSLATORNO KRETANJE		ROTACIONO KRETANJE	
Udaljenost	s [m]	Ugaoni pomak	α [rad]
Brzina	$v = ds/dt$ [m/s]	Ugaona brzina	$\omega = d\alpha/dt$ [rad/s]
Ubrzanje	$a = dv/dt = d^2s/dt^2$ [m/s ²]	Ugaono ubrzanje	$\varepsilon = d\omega/dt = d^2\alpha/dt^2$ [rad/s ²]
Masa	m [kg]	Moment inercije	J [kgm ²]
Sila	$F = m \cdot a$ [N]	Obrtni moment	$M = J \cdot \varepsilon$ [Nm]
Mehanički rad	$W = \int F ds$ [Nm]	Mehanički rad	$W = \int M d\alpha$ [Nm]
Kinetička energ.	$E_k = mv^2/2$ [J]	Kinetička energija	$E_k = J\omega^2/2$ [J]
Snaga	$P = dW/dt = F \cdot v$ [W]	Snaga	$P = dW/dt = M \cdot \omega$ [W]

Iz šeme modela mehaničkog dijela pogona se mogu uočiti neke osnovne veličine koje utiču na dinamiku, odnosno na stanje elektromotornog pogona.



Slika 2. Model mehaničkog dijela pogona

Motor razvija na osovini moment M_m . Radni stroj se opire momentom tereta M_t kojemu se dodaje i ukupni moment trenja. Rezultat djelovanja ova dva momenta je M_{din} (dinamički m.):

$$\pm M_m \pm M_t = J (d\omega/dt) = M_{din},$$

gdje su:

$J = J_m + J_t$ (ukupni moment inercije),

ω (ugaona brzina) [1/s],

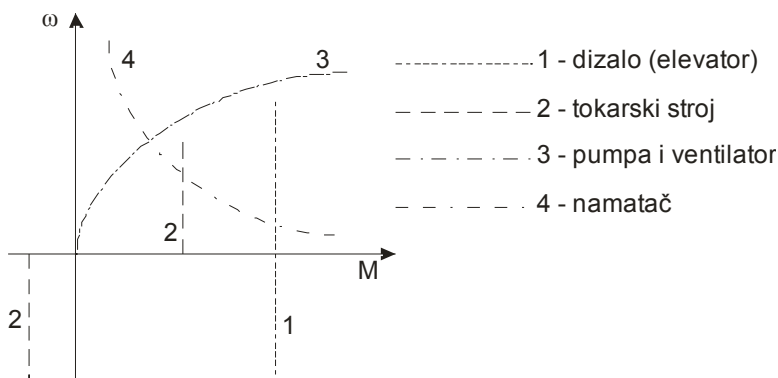
n (brzina vrtnje ili frekvencija vrtnje) [1/s],

$J (d\omega/dt) = M_{din}$ (moment ubrzanja/usporenja ili dinamički moment),

M_m (moment motora, razvijen na osovini) i

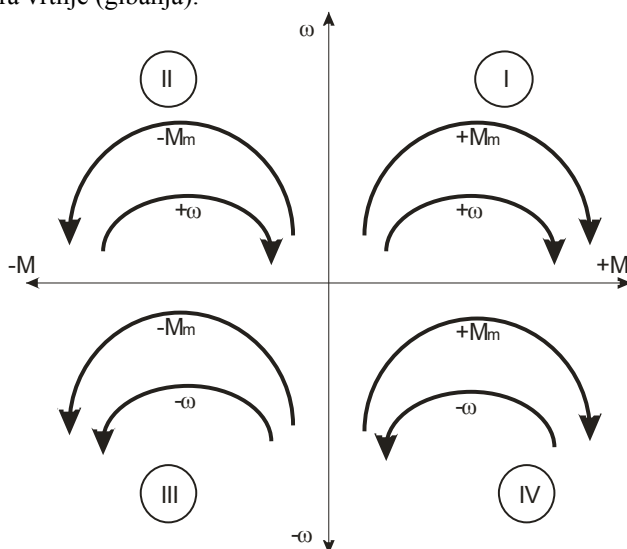
M_t (moment tereta uključujući trenje).

Predznak i veličina dinamičkog momenta određuju ubrzanje (usporavanje) pogona. Režim pogona u kojem je: $\pm M_m \pm M_t = 0$, tj. kada su moment motora i moment tereta jednak iznosa i suprotnog smjera ($M_{din} = 0$), $J (d\omega/dt) = 0 \rightarrow \omega = \text{konst.}$, - to je statičko ili ustaljeno stanje, a ako je: $\pm M_m \pm M_t \neq 0$, odnosno, $J (d\omega/dt) \neq 0 \rightarrow \omega \neq \text{konst.}$ - to je dinamičko stanje. Postoji dinamički moment, gdje se sistemu pogona mijenja brzina, on se ubrzava ili usporava (koči). Prema karakteru djelovanja elektromotornih pogona sve sile i momente dijelimo na: aktivne i reaktivne. Aktivne sile i momente stvaraju vanjski uticaji neovisno o stanju elektromotornog pogona i smjeru kretanja pogona (elektromotora). To su npr.: potencijalna energija, energija vjetrova, sila teže (gravitacijska sila). Reaktivni momenti i sile pojavljuju se uvijek kao reakcija na kretanje ili tendenciju kretanja. Takve sile i momenti su složeno ovisni o brzini, kvaliteti dodirnih površina, pritisku, temperaturi, i sl. i opisuju se kao sile i momenti trenja. Ako se zanemari uticaj momenata trenja, računamo da je moment tereta jednak momentu opterećenja radnog mehanizma: $M_{opt} = M_t$. Da li ćemo uzeti u obzir momente trenja, ovisi o konkretnim mehanizmima i načinu pokretanja pogona.



Slika 3. Statičke momentne karakteristike tipičnih opterećenja

Na narednoj slici se mogu vidjeti četiri kvadranta za prikaz režima rada elektromotornog pogona, gdje se mogu definisati dva kvadranta za koje je karakterističan motorski rad i dva kvadranta gdje je karakterističan generatorski rad: Za motorski rad – moment motora (sila) djeluje u smjeru vrtnje (gibanja), a za generatorski rad – moment motora (sila) djeluje suprotno od smjera vrtnje (gibanja).



Slika 4. Karakteristični režimi rada elektromotornog pogona

- I. kvadrant – motorski rad (pozitivni moment i pozitivna brzina vrtnje),
- II. kvadrant – generatorski rad (smjer brzine i momenta motora suprotni – kocenje),
- III. kvadrant – motorski rad (negativni moment i negativna brzina vrtnje),
- IV. kvadrant – generatorski kočni režim rada.

2.2. Osnovni režimi rada elektromotornih pogona

U elektromotornim pogonima definisano je osam karakterističnih režima rada. Tri osnovna režima su: trajni (S1), kratkotrajni (S2) i intermitentni režim rada (S3).

Trajni režim rada karakteriše trajanje opterećenja toliko dugo da temperature svih dijelova elektromotora dostignu stacionarna stanja. Primjer takvog pogona je pogon ventilatora.

Pri kratkotrajnom režimu rada radni period je relativno kratak i temperatura motora ne uspijeva da dostigne stacionarno stanje, a period prekida rada je dovoljno dug da se motor praktično ohladi do temperature okolne sredine. Primjer za ovaj režim može biti pogon kрана. Pri kratkotrajno povratnom (intermitentnom) režimu period rada i pauza se smjenjuju, pri čemu ni u jednom periodu rada temperatura motora ne dostigne stacionarno stanje. Primjer za ovakav režim rada može biti pogon automatskog struga koji, pri serijskoj proizvodnji, obavlja jednu operaciju.

U saglasnosti sa osnovnim režimima rada elektromotornih pogona, razlikuju se i definicije nominalnih podataka elektromotora. Elektromotori se rade za tri različita režima rada i na pločici sa podacima se nalaze odgovarajuće oznake.

3. POSLJEDICE POJEDINIH REŽIMA RADA ELEKTROMOTORNIH POGONA

Dakle, elektromotorni pogoni su u eksploataciji vrlo isplativi davaoci rada. Na elektromotorni pogon djeluju različite sile i momenti, koji u pojedinim fazama rada mogu dovesti do ekstremno velikih opterećenja. To je posebno izraženo kod intermitentnih opterećenja, gdje često dolazi do kretanja i zaustavljanja elektromotornog pogona. Pored toga postoje i opasnosti koje su posljedice stanja ležaja. Ako se ne reaguje pravovremeno, oštećenje ležaja po pravilu redovno izaziva oštećenje rukavca vratila.



Slika 5. Faktori koji utiču na stanje kotrljajnih ležaja

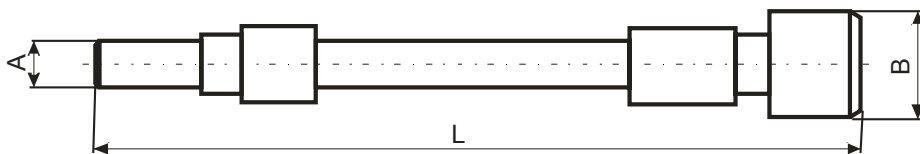
Uzimajući u obzir da u toku rada dolazi i do zamora materijala za očekivati je da kod pojedinih dijelova elektromotornog pogona može doći i do mehaničkih oštećenja.

4. UZROCI KOJI DOVODE DO OŠTEĆENJA RUKAVCA VRATILA ROTORA

4.1. Vratila

Vratila su mašinski elementi koji prenose obrtne momente, odnosno snagu. Prema konstrukciji, vratila mogu biti čvrsta i savitljiva. Čvrsta vratila mogu biti prava i koljenasta. Ako ose vratila ne leže na istom pravcu pri prenosu snage, onda se primjenjuju zglavkasta vratila. Tako je npr. kardansko vratilo na vozilima. Za prenos malih snaga kod raznih instrumenata, alata i mašina koriste se gipka vratila. Pored navedenih podjela čvrsta vratila se mogu podjeliti na laka i teška. Kod lakih vratila mogu se zanemariti težine elemenata koje vratilo nosi, a kod teških nemogu.

Najčešća oštećenja osovine i vratila su na rukavcima, tj. na mjestu oslanjanja u ležištima.



Slika 6. Vratilo rotora elektromotora. Rukavci su označeni sa A i B

4.2. Vrste opterećenja koja djeluju na vratila

U zavisnosti od načina promjene opterećenja u toku vremena, opterećenja mašinskih elemenata svrstavamo u: statičko (mirno) opterećenje i dinamičko (promjenljivo) opterećenje. Statičko opterećenje ima stalan intenzitet, pravac i smjer. Intenzitet statičkog opterećenja raste od nule do konačne vrijednosti postepeno i zatim ostaje konstantan. Dinamičko opterećenje se u toku vremena mijenja po intenzitetu, pravcu i smjeru. Dinamičko opterećenje može biti: jednosmjerno – promjenljivo, naizmjenično–promjenljivo i udarno.

Na elektromotorni pogon djeluju različite sile i momenti, koji u pojedinim fazama rada mogu dovesti do ekstremno velikih opterećenja. To je posebno izraženo kod intermitentnih opterećenja, gdje često dolazi do pokretanja i zaustavljanja elektromotornog pogona.

4.3. Najčešći uzroci koji dovode do oštećenja

Uzroci eventualnih kvarova ili lomova mogu se definisati kao neposredni i posredni. U neposredne uzroke spadaju: prirodna istrošenost, nepravilno konstruisan proizvod, greške u propisivanju tehnologije proizvodnje, greške u proizvodnji dijelova, nepravilna tehnologija opravke, greške u opravci, nepravilno uskladištenje i transport, nepravilna montaža ili podešavanje, nepravilna eksploatacija, kvar na drugim dijelovima uređaja itd.

Navedeni uzroci koji dovode do oštećenja i smanjenja vijeka eksploatacije u odnosu na ekonomski opravdan vijek, mogu nastati još prije nego što dio ili oprema počne da se eksploatiše, tj. kod projektovanja, razrade tehnologije izrade, proizvodnje, uskladištenja i transporta. Predviđeni eksploatacioni vijek unaprijed treba obezbijediti preventivnim mjerama koje će isključiti pojavu kvarova i lomova u toku eksploatacije.

Dakle, za pojavu oštećenja i kvarova na mašinskim elementima gdje ubrajamo i vratilo, a na osnovu navedenih uzroka, odgovornost možemo tražiti kod korisnika opreme i dijelova, kao i kod projektanta odnosno proizvođača dijelova i opreme.



Slika 7. Prikaz oštećenja rotora

Na prethodnoj slici je predstavljeno stanje rotora gdje je dijagnosticiran kvar ležaja, a to je dovelo do niza oštećenja. Na slici lijevo se vidi da je u toku rada dolazilo do mehaničkog kontakta rotora i statora, na slici u sredini se vidi da je neispravan ležaj uzrokovao pojavu visoke temperature što je uzrokovalo prijevremeno starenje nemetalnih dijelova (izolacije i sl.) i taloženje prljavštine u okolini ležaja, a na slici desno se vidi oštećenje samog rukavca.

5. DIJAGNOSTIČKE METODE PRAĆENJA STANJA VRATILA ROTORA

Za kvalitetno održavanje elektromotornih pogona neophodna je preventivna detaljna analiza svih radnih parametara i određivanje politike nadzora i dijagnosticiranja stanja u eksploataciji. U tabeli 2 su predstavljene osnovne dijagnostičke metode elektromotornih pogona u eksploataciji i problemski parametri koji se prate tim metodama.

Tabela 2. Dijagnostika elektromotornih pogona

Dijagnostički metod	Vibracije	Temperatura	Analiza ulja	Pritisak i protok
Debalans	x	x		
Nesaosnost vratila	x	x		
Oštećenje kugličnog ležaja	x	x	x	
Oštećenje kliznog ležaja	x	x	x	x
Oštećenje ili pohabanost zupčanika	x		x	
Hidraulički sistem			x	x
Lom	x			

Dijagnostika zasnovana na praćenju vibracija može da se primjenjuje za sve tehničke sisteme čiju strukturu čine pokretni elementi, gdje se u normalnim uslovima eksploatacije generišu dinamičke sile. One su posljedica procesa koji se odvijaju u ležištima, prenosnicima, spojnicama, vođicama, pogonskim sistemima itd. Ove sile dovode do oscilatornog kretanja (vibracija) u odnosu na referentnu, najčešće ravnotežnu poziciju. Česti izvori vibracija su neuravnoteženost i zakošenje pogonskog vratila i spojnice kao i vibracije i udarna opterećenja radnog stroja, a koje mogu da dovedu do opterećenja u osloncu vratila, odnosno rukavca vratila i ležaja.



Slika 8. Mjerno mjesto vibracija elektromotora

Za utvrđivanje stanja vratila rotora elektromotora je interesantna i dijagnostika zasnovana na praćenju termičkog stanja. U procesu eksploatacije tehničkih sistema, zbog kretanja kontaktnih elemenata (kotrljanje, klizanje itd.) i trenja koje se pri tome javlja, dolazi do pojave toplote. Toplota se ne generiše samo kao posljedica relativnog kretanja, već je njena pojava vezana i za obavljanje osnovne funkcije elektromotornog mehanizma. Na osnovu izmjerenih temperatura veoma pouzdano se može utvrditi stanje nekog tehničkog sistema ili njegovih elemenata. Za praćenje termičkog stanja primjenjuju se: kontaktne metode (termoparovi, termistori, termometri itd.), bezkontaktne metode (registrovanje infracrvenog zračenja toplotnog izvora-infracrvena termografija ili termovizija) i indikatorske metode (termoosetljive boje i lakovi). U oblasti održavanja u najširoj primjeni su prve dvije metode. Kontaktna metoda je zasnovana na mjerenju temperature pomoću termopara. Kod mjerenja temperature vrh sonde se oslanja na predmet mjerenja. Bezkontaktna metoda za praćenje

termičkog stanja radi na principu da sva tijela iznad apsolutne nule emituju energiju ili zračenje. Infracrveno zračenje je jedan od oblika emitovanja energije. Intenzitet infracrvenog zračenja nekog tijela zavisi od njegove površinske temperature. Ova pojava je iskorišćena da se razviju bezkontaktne metode. Bezkontaktne metode se koriste u slučajevima gde kontaktne metode ne mogu biti primjenjene. Ovo se prvenstveno odnosi na mjerenje temperature pokretnih elemenata, visokonaponskih polja i u oblasti veoma visokih temperatura. Termovizijska kamera i IC-termometar su primjeri modernih uređaja za bezkontaktnu analizu temperature.



Slika 9. Termovizijska kamera i IC-termometar

Praćenje stanja ulja, pritiska i protoka u uljnom sistemu su takođe neizostavne komponente kvalitetne dijagnostike stanja tehničkih sistema čiju strukturu čine pokretni elementi.

6. ZAKLJUČAK

Značaj poznavanja ponašanja i stanja obrtnih elemenata strojeva u eksploataciji je u funkciji mogućnosti predviđanja i planiranja vremena i mjesta nastanka oštećenja. Iz toga proizilazi kvalitetan odabir i primjena odgovarajućih metoda preventivnog održavanja, planiranje vremena zastoja i tehnologije opravke sa blagovremenom pripremom i nabavkom alata, materijala i rezervnih dijelova za opravku, što u konačnici utiče na visoku vrijednost efektivnosti elektromotornog pogona.

Prezentirani sadržaj i tematika nadzora i dijagnostike elektromotornih pogona u eksploataciji mogu se primijeniti i na druge mašine sa obrtnim elementima, kao što su: turbine, ventilatori, pumpe, kompresori, motori sus itd.

7. LITERATURA

- [1] Adamović Ž.: Tehnička dijagnostika u mašinstvu, Privredni pregled, Beograd,1986.
- [2] Jeremić, B.: Terotehnologija i efektivnost sistema, Industrijski sistemi-međunarodni časopis, br.2, sveska1, Novi Sad, okt.1999.
- [3] Knežević, J.: Upravljanje procesima održavanja i obnavljanja tehničkih sistema na osnovu teorije pouzdanosti, OMO, Beograd, 1988.
- [4] Milačić, V.R.: Metod laboratorijskih mjerenja 2, Mašinski fakultet, Beograd, 1988.
- [5] Sebastijanović, S.,Tufekčić, Dž.: Održavanje, Univerzitet u Tuzli-Mašinski fakultet, Tuzla, 1998.
- [6] Yoshikazu,T., Takashi,O.: Total Productive Maintenance, Asian P. O., Tokyo, 1990.
- [7] Emkić M.: Tehnologija navarivanja dijelova vratila rotora, diplomski rad, Univerzitet u Tuzli, Mašinski fakultet, Tuzla, 2009.