

# Dijagnostika kvarova brodskih centrifugalnih pumpi

---

Jelavić-Šako, Duje

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split, Faculty of Maritime Studies / Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:164:619688>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-25**

Repository / Repozitorij:

[Repository - Faculty of Maritime Studies - Split -  
Repository - Faculty of Maritime Studies Split for  
permanent storage and preservation of digital  
resources of the institution](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
POMORSKI FAKULTET U SPLITU**

**DUJE JELAVIĆ-ŠAKO**

**DIJAGNOSTIKA KVAROVA BRODSKIH  
CENTRIFUGALNIH PUMPI**

**ZAVRŠNI RAD**

**SPLIT, 2023.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
POMORSKI FAKULTET U SPLITU**

**STUDIJ: BRODOSTROJARSTVO**

**DIJAGNOSTIKA KVAROVA BRODSKIH  
CENTRIFUGALNIH PUMPI**

**ZAVRŠNI RAD**

**MENTOR:**

**dr. sc. Đorđe Dobrota**

**STUDENT:**

**Duje Jelavić-Šako**

**(MB:0021330323)**

**SPLIT, 2023.**

## SAŽETAK

Centrifugalne pumpe su jednostavne konstrukcije, učinkovite, pouzdane te su relativno jeftine za proizvodnju. Pošto su centrifugalne pumpe zbog svojih ostvarivih performansi (visina dobave i protok) jedna od najčešće korištenih vrsta pumpi kako u industriji tako i na brodovima, njihovi radni parametri, kao i njihove ranjivosti dobro su poznate. Općenito, kvarovi pumpe rezultiraju operativnim promjenama koje smanjuju učinkovitost ili mogu dovesti do kvara pumpe. Cilj ovog rada je opisati kvarove centrifugalnih pumpi koji se javljaju kod brodskih pumpnih sustava koji koriste ovaj tip pumpi. Osim opisa modova kvara, objašnjen je i princip rada centrifugalne pumpe, njihova podjela i konstrukcija te je opisan primjer sustav upravljanja i dijagnostike centrifugalne pumpe zasnovanom na modelu.

**Ključne riječi:** *brodski pumpni sustav, centrifugalna pumpa, modovi kvara, dijagnostika kvara.*

## ABSTRACT

Centrifugal pumps are simple in design, efficient, reliable, and relatively inexpensive to manufacture. Since centrifugal pumps are among the most commonly used types of pumps in both industry and ships due to their achievable performance (head and flow), their operating parameters and vulnerabilities are well known. In general, pump failures lead to operational changes that can reduce efficiency or lead to pump failure. The objective of this paper is to describe centrifugal pump failures that occur in ship pumping systems that use this type of pump. In addition to describing the failure modes, the paper explains the operating principle of a centrifugal pump, its classification and design, and describes an example of a control and diagnostic system for a centrifugal pump based on a model.

**Keywords:** *ship pump system, centrifugal pump, failure mode, failure diagnostics.*

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2. CENTRIFUGALNE PUMPE</b> .....	<b>2</b>
2.1. <b>PODJELA CENTRIFUGALNIH PUMPI</b> .....	7
2.2. <b>OSNOVNI DIJELOVI CENTRIFUGALNE PUMPE</b> .....	10
2.3. <b>RADNA KOLA CENTRIFUGALNIH PUMPI</b> .....	10
2.4. <b>PERFORMANSE CENTRIFUGALNIH PUMPI</b> .....	12
2.5. <b>UPRAVLJANJE RADOM CENTRIFUGALNE PUMPE</b> .....	16
<b>3. DIJAGNOSTIKA KVAROVA CENTRIFUGALNIH BRODSKIH PUMPI</b> .....	<b>18</b>
3.1. <b>HIDRAULIČKI KVAROVI</b> .....	18
3.1.1. <b>Kavitacija</b> .....	18
3.1.2. <b>Pulsacije tlaka</b> .....	22
3.1.3. <b>Radijalni potisak</b> .....	22
3.1.4. <b>Aksijalni potisak</b> .....	23
3.2. <b>MEHANIČKI KVAROVI</b> .....	24
3.2.1. <b>Kvar ležaja</b> .....	24
3.2.2. <b>Kvar podmazivanja</b> .....	25
3.2.3. <b>Prekomjerne vibracije</b> .....	26
3.2.4. <b>Zamor</b> .....	27
3.3. <b>OSTALI MODOVI KVARA</b> .....	28
<b>4. PRIMJER SUSTAVA UPRAVLJANJA I DIJAGNOSTIKE CENTRIFUGALNE PUMPE</b> .....	<b>30</b>
<b>5. ZAKLJUČAK</b> .....	<b>33</b>
<b>LITERATURA</b> .....	<b>34</b>
<b>POPIS SLIKA</b> .....	<b>35</b>
<b>POPIS TABLICA</b> .....	<b>35</b>
<b>POPIS KRATICA</b> .....	<b>35</b>

# 1. UVOD

Za realizaciju procesa u brodskom porivnom i pomoćnom energetskom sustavu koriste se različite vrste fluida (kapljevina) koje cirkuliraju unutar različitih strojeva i sustava u svrhu hlađenja, zagrijavanja, podmazivanja i kao goriva ili se pak prenose s jednog mjesta na drugo radi realizacije funkcija brodskih službi. Ove kapljevine cirkuliraju dodavanjem energije od različitih tipova pumpi.

Kvarovi centrifugalnih pumpi rezultiraju radnim promjenama koje smanjuju učinkovitost ili dovode do kvara pumpe. Radi prepoznavanja i otklanjanja kvarova, potrebno je dobro poznavati njihov princip rada i funkciju u pumpnom sustavu.

Postoji više osnovnih kvarova centrifugalnih pumpi koji se pojavljuju tijekom njihovog rada. Ovi kvarovi uključuju mehaničke, hidrauličke i ostale modove kvara.

U ovom završnom radu klasificirani su i opisani osnovni modovi kvara centrifugalnih pumpi. Rad je sastoji od 5 poglavlja.

Rad je strukturiran kroz pet poglavlja. Nakon uvodnog dijela, u drugom poglavlju opisana je centrifugalna pumpa, princip rada centrifugalne pumpe te su navedene najvažnije mjere performanse nužnih za provođenje procesa dijagnostike kvarova. Treće poglavlje se zasniva na modovima kvarova brodskih centrifugalnih pumpi, njihovim uzrocima, posljedicama te mogućim rješenjima. Nakon detaljnog opisa mehaničkih i hidrauličkih modova kvara koji proizlaze iz promjena tlaka, bilo u spiralno kućištu ili cijevima koji vode prema pumpi, zbog promjena u parametrima poput temperature, brzine protoka i protoka fluida te trošenja potrošnih komponenti centrifugalne pumpe rad opisuje primjer sustava upravljanja i dijagnostike kvarova centrifugalne pumpe. Četvrto poglavlje opisuje metode održavanja uređaja te primjer dijagnostike kvarova brodske centrifugalne pumpe koristeći metodu mjerenja vibracija koja je zbog svoje uspješnosti najraširenija metoda za dijagnostiku kvarova.

## 2. CENTRIFUGALNE PUMPE

Pumpe su hidraulički strojevi koji pretvaraju ulaznu mehaničku energiju u hidrauličku, tj. u protok i tlak. Dakle, one dodaju mehaničku energiju kapljevina koja je potrebna za njeno protjecanje kroz sustav određenim protokom i tlakom.

Mogu se pogoniti elektromotorom (najčešće) ili nekim drugim pogonskim strojem (rjeđe) kao što je parna turbina, dizelski motor.

Mogu biti privještene na stroj (dizelski motor ili turbina) koji ih pogoni preko mehaničkog prijenosnika (zupčasti ili remenski). U tom slučaju radi se o *PTO* (engl. *Power Take-Off*) pogonu pumpe.

Osnovna primjena brodskih pumpi je:

- prijenos kapljevine s jednog mjesta na drugo s određenim protokom, brzinom i razlikom visine (npr. transfer goriva iz skladišnih tankova u taložne i/ili dnevne, transfer slatke vode, prekrcaj tereta, balastiranje broda, dobavu morske vode za hlađenje, balastiranje i protupožarnu zaštitu, postupanje s kaljužnim vodama itd.);
- cirkulacija kapljevine unutar sustava (npr. cirkulacija rashladne vode ili ulja za podmazivanje brodskih strojeva i uređaja, prijenos energije i upravljanje u brodskim hidrauličkim sustavima).

Osnovne komponente pumpnog sustava su:

- pumpe koje mogu biti različite izvedbe;
- primarni pokretač: elektromotor, dizelski motor ili parna turbina;
- cjevovod koji nosi kapljevinu;
- ventili za upravljanje protokom u sustavu;
- druga oprema, kontrola i instrumentacija;
- krajnja oprema koja ima različite zahtjeve za protokom i tlakom te koja stoga određuje komponente pumpnog sustava (npr. izmjenjivači topline, spremnici i hidraulički strojevi).

Kako postoji mnogo različitih izvedbi pumpi te zbog njihove široke primjene, broj načina na koje se pumpe mogu podijeliti je velik.

Neki od načina (kriterija) podjela pumpi (time i brodskih pumpi) su:

- a) prema smjeru strujanja fluida: radijalne, poluaksijalne i aksijalne;
- b) prema principu rada: dinamičke i volumetričke (volumenske);

c) prema konstrukciji: s linearno pokretnim uređajem (stapne i klipne), rotorne i mlazne;

d) prema namjeni:

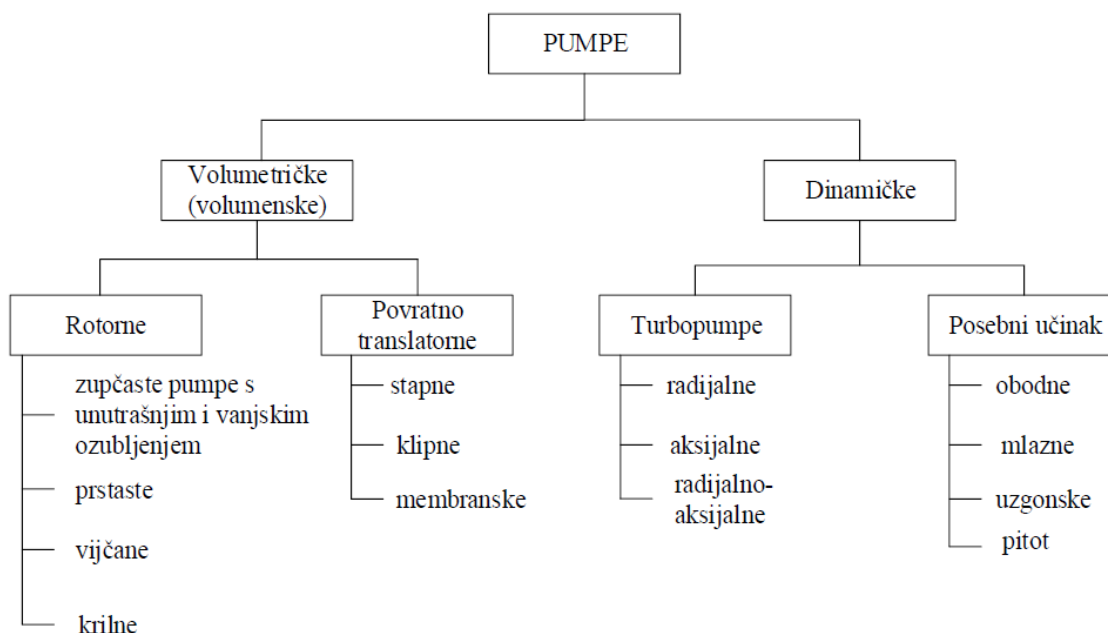
- za rad porivnih strojeva, kotlova i kondenzatora: rashladne vode, vode za napajanje i loženje kotlova, za podmazivanje, za dobavu goriva, itd.;
- za sigurnost broda: balastne, kaljužne i požarne;
- za upravljanje brodom: pumpe kao dio hidrauličnog kormilarskog uređaja;
- za potrebe posade i putnika: pumpe za pitku vodu, toplu i morsku vodu, službe evaporatora itd.;
- za službu tereta: pumpe za ukrcaj i iskrcaj tekućeg tereta;
- za hidrauličke sustave dizalica i vitala, daljinsko upravljanje i pogon drugih pumpi;
- za brodsku službu: pumpe za balastiranje broda, za transfer goriva i maziva.

e) prema visini dizanja (specifičnoj energiji):

- pumpe koje dižu kapljevину na malu visinu (s malim specifičnim energijama): kaljužne, balastne i rashladne;
- pumpe koje dižu kapljevину na veliku visinu (s velikim specifičnim energijama): napojne, požarne i tekućeg tereta.
- prema količini dobavljene kapljevine:
  - za velike količine: rashladne, balastne i tekućeg tereta;
  - za male količine: napojne vode, pitke vode, tople slatke vode i morske vode za brodske potrebe i slično.

Ipak, njihova osnovna podjela zasniva se na principu rada odnosno na mehanizmu izmjene energije u radnom prostoru pumpe, a prema kojem se dijele na volumetričke (volumenske, zapreminske) i dinamičke pumpe. Na slici 1, prikazana je podjela pumpe prema mehanizmu izmjene energije.





**Slika 1. Podjela pumpi prema mehanizmu izmjene energije [1]**

U grupu dinamičkih pumpi spadaju one pumpe kod kojih se mehanizam pretvorbe energije zasnivana nekom hidrodinamičkom zakonu prema kojem se kapljevina prenosi djelovanjem sila koje na njih djeluju u prostoru što je neprekidno povezan s usisnim i tlačnim cjevovodima pumpe. Daljnja podjela ovih pumpi je na turbopumpe i pumpe na principu posebnih učinaka.

Kod turbopumpi pretežna pretvorba energije odvija se po zakonu o promjeni količine gibanja. Ove pumpe povećavaju tlak i brzinu, odnosno samo tlak ili samo brzinu kapljevine time što pretvaraju mehanički rad rotirajućeg radnog kola (rotora) u kinetičku energiju kapljevine da bi potom iskorištavajući procese strujanja kapljevine u lopaticama radnog kola i u kanalima kućišta odnosno statora pumpe, kinetičku energiju pretvorila u tlak.

U dinamičke turbopumpe spadaju centrifugalne pumpe koje mogu biti radijalne, aksijalne i radijalno-aksijalne. Centrifugalne pumpe imaju promjenjivi odnos protoka i tlaka. Veći tlak u sustavu generira manji protok i obratno. Na slici 2, prikazani su tipovi dinamičkih pumpi.



Radijalna pumpa



Aksijalna pumpa



Radijalno aksijalna  
pumpa

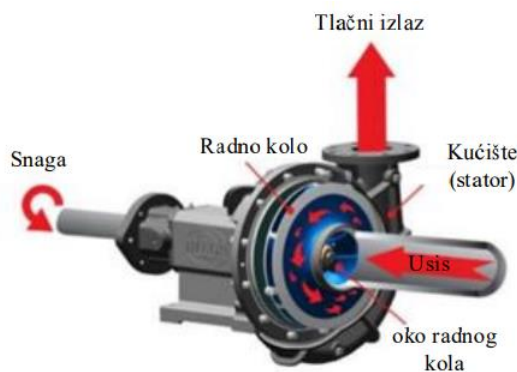
**Slika 2. Dinamičke pumpe [1]**

Princip rada volumetričkih pumpi, kao i svih volumetričkih strojeva, zasniva se na radnoj komori promjenjivog volumena u kojoj relativnim gibanjem radnih elemenata (klipovi, zupčanici, vijci ili krilca) dolazi do povećanja ili smanjenja volumena radne komore. Tijekom faze povećanja volumena dolazi do stvaranja podtlaka i usisavanja kapljevine, a tijekom faze smanjivanja volumena do potiskivanja, tj. tlačenja kapljevine. Prema tome se u volumenskim pumpama kapljevine prenose pomoću periodičkih promjena volumena prostora što ga zauzima kapljevina, a koji se povremeno i naizmjenično povezuje s usisnim i tlačnim cjevovodima pumpe. One se pak dijele na dvije velike podgrupe: povratno-translatorne pumpe (engl. *reciprocating pumps*) i rotorne pumpe. Osnovni čimbenik koji čini razliku između ovih pumpi je taj što povratno-translatorne pumpe trebaju ventile ili razvodnike, a rotorne pumpe ne trebaju ni ventile ni razvodnike radi realizacije efekta pumpanja. Za razliku od centrifugalne pumpe, volumenska pumpa ne razvija tlak već proizvodi samo protok kapljevine koji je funkcija broja okretaja pumpe ili volumena dobave ako ima mogućnost promjene istog (pumpe promjenjivog volumena dobave). Otpori sustava određuju tlak u cjevovodnom sustavu i tlačnom dijelu pumpe. To znači kako će tijekom rada nastaviti davati protok neovisno o tlaku u cjevovodnom sustavu.

Za razliku od centrifugalne pumpe, volumenska pumpa neće "umrijeti" ili se "vratiti na svoju krivulju" kao odgovor na porast tlaka u sustavu.

Centrifugalne pumpe nisu samousisne i često zahtijevaju posebnu opremu za uklanjanje plinova i punjenje radnog kola. Iako su neke centrifugalne pumpe dizajnirane kao samousisne, one su istovremeno skupe, manje pouzdane i manje učinkovite. Koriste u širokom rasponu radnih uvjeta kada se zahtijevaju veliki protoci manjeg tlaka u kojima viskoznost fluida nije prevelika. Jednostavnije su konstrukcije i pouzdanije od volumenskih, zahtijevaju minimalno održavanje i imaju dulji životni vijek. Procesi trošenja su manji pa zahtijevaju manje doknadnih dijelova nego volumenske. Zbog toga centrifugalne pumpe imaju široku primjenu na brodovima.

Centrifugalne pumpe su dinamički strojevi pomoću kojih se kapljevina dobavlja na višu razinu ili u područje višeg tlaka pretvaranjem rotacijske kinetičke energije u hidrodinamičku energiju protoka fluida. One povećavaju tlak i brzinu kapljevine na način da pretvaraju mehanički rad rotirajućeg radnog kola (rotora) u energiju tlaka i kinetičku energiju kapljevine iskorištavajući procese strujanja kapljevine u međulopatičnim kanalima radnog kola i u kanalima kućišta (statora) pumpe. Na slici 3 je prikazana tipična radijalna centrifugalna pumpa.



**Slika 3. Centrifugalna pumpa [3]**

U osi vrtnje smještena usisna cijev i njome se pumpi dovodi kapljevina, a tangencijalno na kućište pumpe je smještena tlačna cijev kojom se kapljevina odvodi od pumpe. U spiralno kućište pumpe kapljevina ulazi u pumpu aksijalno kroz oko radnog kola (područje niskog tlaka) koji se okreće velikom brzinom. Okretanjem rotora, na kojem se nalaze lopatice, dolazi do kružnog gibanja fluida koji se nalazi između lopatica. Dok se rotor i lopatice okreću, oni prenose momentum (količinu gibanja) ulaznoj kapljevini. Nastala centrifugalna sila potiskuje kapljevinu od središta prema obodu i preko izlaznog

kućišta kapljevina potiskuje u tlačni cjevovod. Okretanjem rotora kapljevina se neprestano usisava i istiskuje iz pumpe te na taj način kapljevina teče ravnomjerno i neprekinuto, što znači kako je strujanje stacionarno.

Kako je rad centrifugalne pumpe stacionaran, različite vrijednosti tlaka, koji je izazvan centrifugalnom silom, i visinu dobave dobivamo promjenom brzine vrtnje rotora. U izlaznom kućištu kapljevina protječe kroz stalno rastuću površinu presjeka gdje se prema Bernoullijevom principu kinetička energija pretvara u tlak kapljevine.

Pogonski motor centrifugalnih pumpi može se priključiti neposredno spojkom ili posredno preko reduktora na vratilo rotora same pumpe. Za pogon centrifugalnih pumpi najviše se koriste izmjenični elektromotori: jednofazni asinkroni motori ako nam je potrebna snaga do 1 kW i trofazni asinkroni motori za veće snage.

Pumpe koje su stalno potopljene u neku od kapljevina koriste jedino elektromotore zatvorene izvedbe budući da ona onemogućuje prodor kapljevine u motor. Motori s unutarnjim izgaranjem primjenjuju se samo za pogon manjih prenosivih pumpi ili za rad brodskih pumpi u slučaju nužnosti. Parne turbine ponekad se upotrebljavaju za pogon pumpi u brodskim energetske postrojenjima kao npr. pumpe za napajanje parnih kotlova, za prekrcaj tereta ili kao balastne pumpe na tankerima.

Tlak koji se stvara u centrifugalnoj pumpi proporcionalan je gustoći kapljevine koja se dobavlja. Ukoliko se rotor okreće u prisutnosti zraka razviti će se vrlo mali tlak i pumpa neće moći podizati kapljevina. Naime, prisutnost čak i malog zračnog džepa u bilo kojem dijelu pumpe može uzrokovati prekid dobave pumpe. Stoga je centrifugalnu pumpu neophodno potrebno prije puštanja u rad napuniti kapljevina (engl. *priming*) iz razloga što nije samousisna. To je postupak uklanjanja zraka iz pumpe i usisnog voda dovođenjem u pumpu kapljevina koja se pumpa. Kako se pumpa puni, ta kapljevina potiskuje sav zrak, plin ili paru koji se nalaze u protočnim kanalima. Ovaj postupak se može vrši ručno ili automatski.

## **2.1. PODJELA CENTRIFUGALNIH PUMPI**

Centrifugalne pumpe mogu se podijeliti na nekoliko načina, npr. na temelju njihovih karakterističnih značajki kao to su visina dobave, kapacitet i učinkovitost ili prema njihovom dizajnu i konstrukciji.

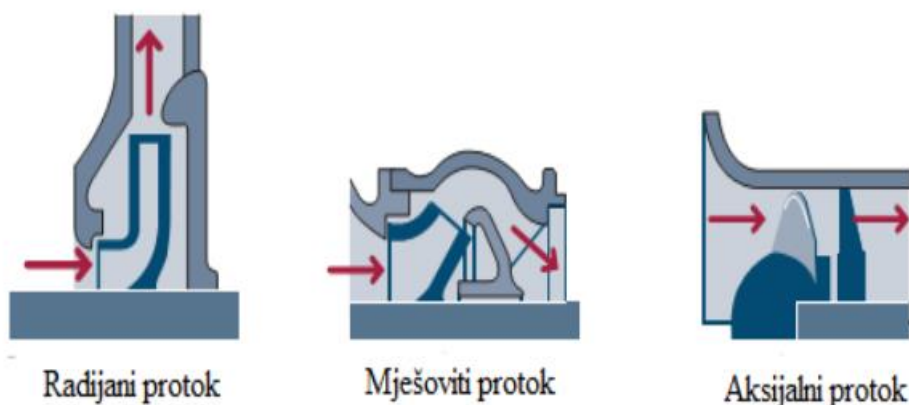
Ipak, pumpe se najčešće o razvrstavaju prema njihovoj specifičnoj brzini. Konačni odabir pumpe mora uslijediti nakon pomne analize mogućih izbora.

Općenito, centrifugalne pumpe mogu se podijeliti na temelju načina na koji fluid (kapljevina) protječe kroz pumpu. Ova podjela temelji se ne samo prema načinu kako kapljevina protječe kroz pumpu već i prema dizajnu kućišta pumpe i radnog kola.

Tri vrste protoka kroz centrifugalnu pumpu su (slika 4):

- radijalni protok;
- mješoviti protok (dio radijalni, dio aksijalni);
- aksijalni protok (radno kolo-propeler).

Najčešće su korištene pumpe s radijalnim i s mješovitim protokom.



**Slika 4. Vrste protoka [1]**

Kod pumpi s radijalnim protokom (engl. *radial flow pump*), radno kolo samo centrifugalnim silama proizvodi dobavni tlak. Put kapljevine kroz radno kolo je pod kutom od  $90^\circ$  obzirom na vratilo pumpe.

Kod pumpi s aksijalnim protokom (engl. *axial flow pump*), kapljevina ulazi i izlazi iz radnog kola aksijalno. Radno kolo ovih pumpi je oblikovano poput propelera pa se nazivaju i propelernim.

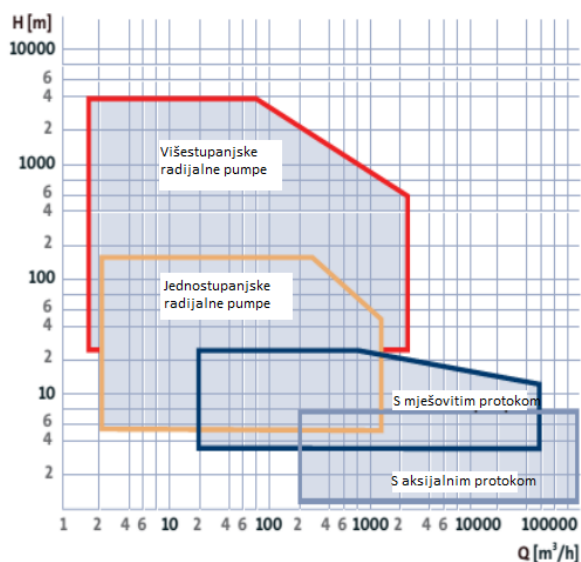
Radno kolo može biti opremljeno s podesivim lopaticama čijom se promjenom nagiba postižu različite dobavne količine ili smanjuje početni zakretni moment. Koriste se prvenstveno za crpljenje većih količina kapljevina na manje dobavne visine.

Kod pumpi s mješovitim protokom (engl. *mixed flow pumps*), kapljevina ulazi na radno kolo aksijalno, a ispušta se u smjeru između radijalnog i aksijalnog. To zahtijeva poseban oblik radnog kola.

Dobavna visina ove pumpe postiže se kombinacijom sile podizanja i centrifugalne sile. Put kapljevine kroz radno kolo je pod kutom manjim od  $90^\circ$ . Ukoliko postoji potreba za višim podizanjem kapljevine, ove se pumpe mogu izvesti kao višestupanjske. Slično

aksijalnim pumpama kapljevina može ulaziti i izlaziti aksijalno iz pumpe ili se radno kolo može smjestiti u spiralno kućište pa tada voda iz pumpe izlazi radijalno. Koristi se za velike kapacitete gdje spiralno kućište omogućava rad s manjim dobavnim visinama.

Na slici 5, prikazani su osnovni tipovi centrifugalnih pumpi prema načinu protjecanja i njihovo područje primjene s obzirom na protok i tlak (visinu).



**Slika 5. Područje primjene centrifugalnih pumpi [1]**

Radijalne pumpe imaju najšire područje primjene od tri glavna tipa turbopumpi. Imaju kapacitet dobave od 6 - 40000 m<sup>3</sup>/h, visinu dobave od 1- 2000 m i brzinu vrtnje radnog kola 960 - 3000 min<sup>-1</sup>.

Obično imaju 1-12 stupnjeva. Dobavna visina radnog kola je ograničena pa se za veće dobavne visine radna kola moraju spojiti u seriju. Na taj način fluid prelazi iz jednog u slijedeće radno kolo pa se porast tlaka ostvaruje u nekoliko stupnjeva. Shodno rečenom postoje jednostupanjske i višestupanjske centrifugalne pumpe.

U pumpe fluid može ulaziti kroz jedan ili više ulaza (najviše četiri) pa tako postoje jednoulazne i višedulazne centrifugalne pumpe. Obzirom na položaj vratila, centrifugalne pumpe mogu biti horizontalne ili vertikalne izvedbe.

Različiti zahtjevi za performansama centrifugalnih pumpi, posebno s obzirom na visinu dobave i protok te montažu, zajedno sa zahtjevima za ekonomičnošću rada samo su neki od razloga zašto se toliko tipova centrifugalni pumpe koriste u praksi.

## 2.2. OSNOVNI DIJELOVI CENTRIFUGALNE PUMPE

Svaka centrifugalna pumpa izrađena je od mnogo dijelova. Ipak postoji nekoliko osnovnih koje ima svaka centrifugalna pumpa.

Ti se dijelovi mogu podijeliti na komponente mokrog i mehaničkog kraja (engl. *wet end* i *mechanical end*).

Mokri kraj pumpe uključuje one dijelove koji određuju hidrauličke performanse pumpe. Dva primarna dijela mokrog kraja su radno kolo i kućište. U nekim slučajevima prvi radijalni ležaj može biti podmazivan vodom. U tom slučaju i ležaj pripada mokrom kraju.

Mehanički kraj uključuje one dijelove koji podupiru rotor unutar kućišta. Mehanički kraj pumpe uključuje vratilo pumpe, brtve, ležajeve i rukavac vratila.

Radno kolo (engl. *impeller*) je rotor koji se koristi za povećanje kinetičke energije protoka.

Kućište (engl. *casing*) je nepropusna komora koja okružuje rotor. Dizajnirano je na takav način da se kinetička energija kapljevina na izlazu iz rotora pretvara u energiju tlaka prije nego što kapljevina napusti kućište i uđe u izlaznu cijev.

Vratilo (engl. *shaft*) je mehanička komponenta za prijenos okretnog momenta s motora na rotor.

Brtva vratila (engl. *shaft sealing*) - Centrifugalne pumpe su opremljene prstenima za zatvaranje ili mehaničkom brtvom koja pomaže u sprječavanju istjecanja kapljevina koja se pumpa.

Ležajevi nose i ograničavaju relativno kretanje vratila s rotorom te smanjuju trenje između rotirajućeg vratila i kućišta. Koriste se slijedeći tipovi ležajeva od kojih svaki djeluje na različitim principima:

- klizni ležaj;
- kotrljajući ležaj;
- hidrodinamički ležaj;
- magnetski ležaj.

## 2.3. RADNA KOLA CENTRIFUGALNIH PUMPI

Dizajn radnog kola (impelera) je najznačajniji čimbenik za određivanje performansi centrifugalne pumpe. Ispravno dizajniran rotor optimizira protok, istovremeno smanjujući

turbulenciju i povećavajući učinkovitost. Radna kola mogu se podijeliti na otvorena, poluotvorena i zatvorena (slika 6).



**Slika 6. Vrste radnih kola [1]**

Otvoreno radno kolo imaju samo lopatice spojene na centralnu glavčinu koje su s obje strane slobodne. Lopatice se okreću i obavljaju rad u prostoru kućišta (bez vijenca ili glavčine). Nedostatak otvorenih radnih kola je čvrstoća. Stoga se prvenstveno koriste kod jeftinijih pumpi malih promjera i pumpi za rad s kapljevina s nečistoćama (suspendirane krute tvari). Kod dugih lopatica dodaje se ojačanje u obliku djelomične glavčine ili rebara. U prostoru između lopatica i kućišta dolazi do volumnih gubitaka koji se povećavaju s trošenjem. Kako bi se ponovno postigla početna učinkovitost, potrebno je zamijeniti radno kolo i okružujuće kućište.

Kod poluzatvorenih radnih kola lopatice su s jedne strane slobodne, a s druge zatvorene s zaštitnim pokrovom (ploča) koji povećava mehaničku čvrstoću lopaticama. Ovaj tip radnog kola ima veću učinkovitost od otvorenih. Mogu se koristiti u pumpama srednjeg promjera i kod kapljevina koje sadrže male količine suspendiranih krutina. Zbog minimalizacije recirkulacije i drugih gubitaka, vrlo je važno da postoji mali zazor između lopatica rotora i kućišta.

Zatvoreno radno kolo je najčešći tip i koristi se gotovo u svim radijalnim pumpama za rad s bistrim kapljevina. Lopatice se nalaze između dva diska, sve u jednom odljevku. Na taj način glavčina i vijenac potpuno pokrivaju međulopatični prostor od ulaza do izlaza, te time sprječavaju veće volumne gubitke koji se javljaju kod otvorenih i poluotvorenih tipova radnih kola. Stoga se koriste se u velikim pumpama s visokom učinkovitošću i nižom potrebnom neto pozitivnom usisnom visinom.



Radno kolo se obično oslanja na habajuće prstenove s malom zračnošću (engl. *close-clearance wear ring*) na rotoru i na kućištu pumpe radi smanjenja aksijalnih opterećenja i pomoći u održavanju učinkovitosti.

Zbog toga radno kola ovog tipa su složenijeg i skupljeg dizajna ne samo zbog rotora, već i zbog toga što su potrebni i dodatni habajući prstenovi.

## 2.4. PERFORMANSE CENTRIFUGALNIH PUMPI

Iako teorija centrifugalnih pumpi može dati dovoljno mjerodavne rezultate, ipak najvažnije mjere performansi pumpe dobivaju se njenim opsežnim hidrauličkim ispitivanjima.

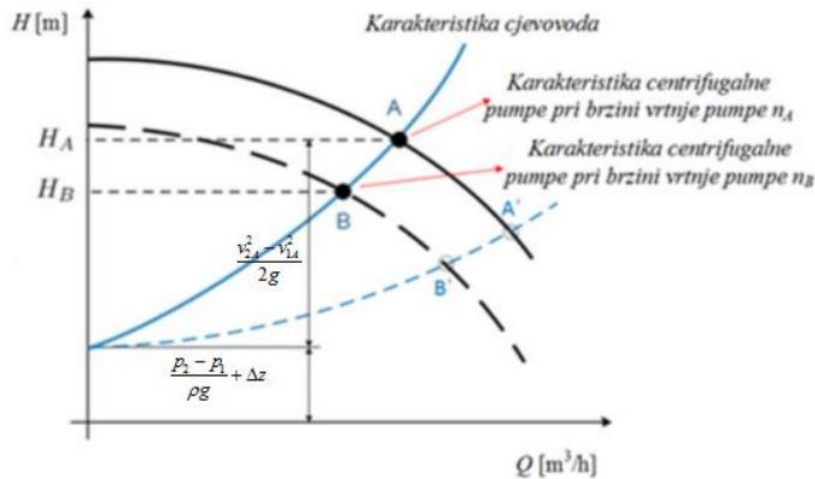
Performanse centrifugalne pumpe opisuju se slijedećim veličinama:

- protokom (dobavna količina)  $Q$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] koja se normalno definira kao korisni volumni protok na izlaznoj prirubnici;
- specifičnim radom  $Y$  [ $\text{J}/\text{kg}$ ] ili visinom dobave  $H$  [ $\text{m}$ ];
- mehaničkom snagom na vratilu pumpe  $P$  [ $\text{W}$ ];
- učinkovitošću  $\eta$  na spojki vratila pumpe;
- neto pozitivnom usisnom visinom  $NPSH$  (engl. *Net Positive Suction Height*) na ulazu u pumpu ili neto pozitivnom usisnom energijom (engl. *Net Positive Suction Energy*)  $NPSE = g \cdot NPSH$ .

Uz ove veličine neophodno je poznavanje broja okretaja  $n$  radnog kola (rotora) pumpe.

U praksi se performanse svih pumpi obično očitavaju s njihove  $Q$ - $H$  karakteristike (krivulje) pumpe često zvane i krivulje performanse (engl. *performance curve*).

Kao što se može vidjeti iz slike 7, dijagrami krivulja karakteristike pumpe koriste protok  $Q$  i visinu dobave pumpe  $H$  kao osnovne veličine karakteristike.



**Slika 7. Q-H krivulja karakteristike centrifugalne pumpe [1]**

U dinamici fluida pojam visina dobave pumpe  $H$  koristi se za mjerenje kinetičke energije koju stvara pumpa. To je maksimalna visina na koju pumpa može podizati fluid. Visina  $H$  i protok  $Q$  određuju snagu pumpe. Maksimalna visina dobave centrifugalne pumpe uglavnom je određena vanjskim promjerom radnog kola pumpe i kutnom brzinom vratila. Visina  $H$  se mijenja promjenom volumnog protoka kroz pumpu. Kada centrifugalna pumpa radi s konstantnom kutnom brzinom, povećanje visine  $H$ , zbog stvorenog protutlaka u protočnoj struji uzrokuje smanjenje protoka kojeg centrifugalna pumpa može održavati. Odnos između visine  $H$  i protoka  $Q$  koji centrifugalna pumpa može održavati, ovisi o različitim fizičkim veličinama pumpe kao to su: dovedena mehanička snaga pumpi, kutna brzina vratila, tip i promjer radnog kola, gustoća i viskoznost fluida. Ovaj je odnos vrlo složen i njegova se analiza sastoji u opsežnim hidrauličkim ispitivanjima određene centrifugalne pumpe. Kada se u  $Q$ - $H$  dijagram ucrtava krivulja karakteristike cjevovoda (krivulja otpora cjevovodnog sustava) točka sjecišta (A ili B) definira se kao radna točka (engl. *operating point or duty point*) pri nekoj konstantnoj brzini vrtnje ( $n_A$  ili  $n_B$ ). Iz toga je očito kako se dobavni protok pri konstantnoj brzini vrtnje pumpe može jednostavno upravljati prigušenjem protoka (upravljačkim ventilom na tlačnoj strani pumpe) djelujući time na veličinu otpora, a time i na karakteristiku cjevovoda koji siječe krivulju karakteristiku pumpe u novim radnim točkama (A' ili B' za slučaj smanjenja prigušenja).

Drugi najčešći načini upravljanja protokom koriste u praksi su:

- obilaženje protoka obilaznim (engl. *by-pass*) vodom i ventilom;

- promjena promjera radnog kola (engl. *impeller trimming*) i
- promjena broja okretaja pumpe.

Sve navedene načine upravljanja potvrđuje izraz za protok dobiven iz jednadžbe očuvanje snage u pumpi. Pošto pumpa pretvara mehaničku energiju u hidrauličku, snaga s obje strane pumpe mora biti jednaka:

$$P_p = P_m$$

$$Q_p \cdot p_t = M_p \cdot \omega = M_p \frac{2\pi n}{60} = M_p \frac{\pi n}{30} \quad (1)$$

$$Q_p = \frac{M_p \pi n}{p_t 30}$$

gdje je:

$P_p$  -stvarna hidraulička snaga pumpe, kW,

$P_m$ -stvarna mehanička snaga na vratilu pumpe, kW,

$Q_p$  - stvarni protok pumpe, m<sup>3</sup>/s,

$p_t$  - tlak na izlaznoj (tlačnoj) strani pumpe, Pa,

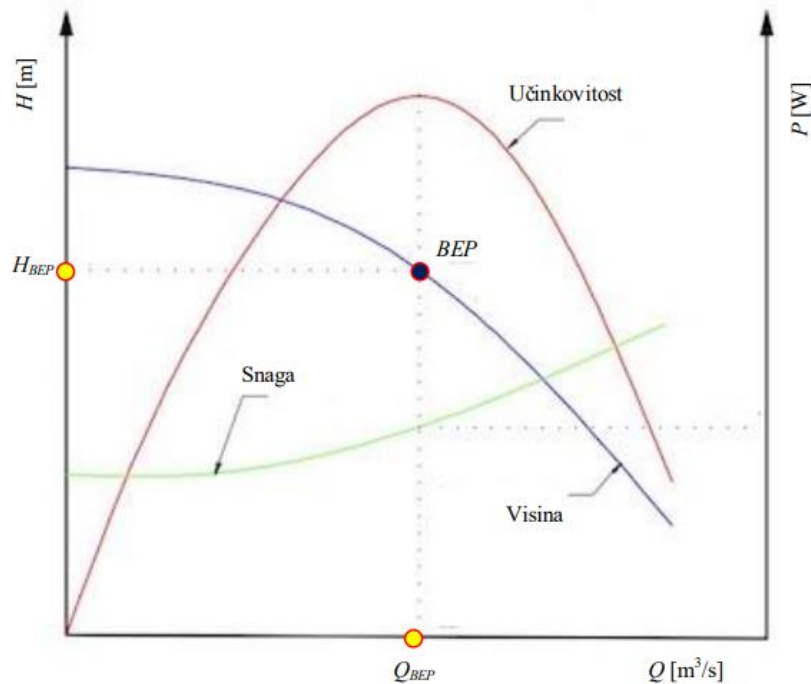
$M_p$  - stvarni moment na vratilu pumpe, Nm,

$\omega$  - kutna brzina vratila pumpe, rad/s.

$n$  -broj okretaja vratila pumpe, min<sup>-1</sup>.

Prigušenjem protoka djeluje se na tlak  $p_t$  koji je obrnuto proporcionalan protoku. Promjenom promjera radnog kola se smanjuje dodana energija fluidu jer se smanjuje moment  $M_p$  koji proporcionalan protoku. Isto tako i promjena broja okretaja vratila pumpe  $n$  dovodi do proporcionalne promjene protoka. Obilaženjem protoka direktno se smanjuje protok uz konstantni broj okretaja vratila pumpe.

Radna točka pumpe ne mora nužno biti ista kao i njena optimalna radna točke (engl. *Best Efficiency Point*: kratica: *BEP*). Točka *BEP* je točka maksimalne učinkovitosti pumpe i funkcija je same pumpe te je prikazana na slici 8.



**Slika 8. Krivulje visine, snage, učinkovitosti [1]**

Točka *BEP* za tipičnu centrifugalnu pumpu nalazi se na krivulji karakteristike s koordinatama u točkama optimalne visine  $H_{BEP}$  i optimalnog protoka  $Q_{BEP}$ . Pumpa treba raditi na ili u blizini *BEP*-a.

Općenito se smatra da centrifugalna pumpa treba biti veličine i odabrana za rad u rasponu od +/-10% *BEP*-a. Stoga je pronalaženje ove točke važno iz razloga omogućavanja najučinkovitijeg rada i najduljeg vijeka trajanja pumpe.

Pumpe nemaju 100% učinkovitost iz razloga što se pri pretvorbi kinetičke energije u energiju tlaka dio kinetičke energije prije pretvorbe izgubi. Ovi gubici mogu biti unutrašnji ili vanjski. Unutrašnji uključuju hidrauličke i volumenske, dok vanjski uključuju mehaničke.

Hidraulički gubici smanjuju visinu tlaka nastalu u radnog kolu pumpe. Uključuju gubitke zbog trenja radnog kola, trenja u kućištu i gubitke zbog promjene smjera protoka i brzina u pumpi. Ovi gubici iskazuju se hidrauličkom učinkovitošću  $\eta_h$ .

Volumenski gubici su gubici koji utječu na količinu dobave pumpe, a samim time indirektno i na njenu visinu dobave. Zbog razlike tlaka prije i poslije radnog kola jedan dio protoka iz područja višeg dijela tlaka cirkulira kroz konstruktivne zračnosti između radnog kola i kućišta te brtvi radnog kola u područje nižeg tlaka. Kod višestupanjskih pumpi postoje i gubici između pojedinih stupnjeva. Iskazuju se volumenskom učinkovitošću  $\eta_v$ .

Mehanički gubici su posljedica su trenja u ležajevima i brtvećim elementima pumpe te trenja diska između radnog kola i fluida koji puni zračnost između radnog kola i kućišta. Iskazuju se mehaničkom učinkovitošću  $\eta_m$ .

Navedeni gubici utječu u manjoj ili većoj mjeri na karakteristiku pumpe, ali i na snagu potrebnu za pogon pumpe. Ukupna učinkovitost pumpe  $\eta_p$  omjer je uložene snage i snage predane fluidu, a može se definirati kao umnožak navedenih učinkovitosti.

Specifična brzina  $n_s$  ili brzohodnost predstavlja važan parametar pri odabiru i projektiranju pumpe, a izvedena iz teorije sličnosti.

Fizikalne veličine koje određuju specifičnu brzinu su broj okretaja, visina dobave i protok pumpe. Iznosi navedenih veličina uzimaju se iz *BEP* točke.

Ova brzina se može definirati kao teoretska brzina idealne pumpe geometrijski slične stvarnoj pumpi koja će u pogonu s tom brzinom pri jediničnom protoku ( $1 \text{ m}^3/\text{s}$ ) u optimalnoj radnoj točki proizvesti jediničnu visinu dobave (1 m).

Protok kapljevine kroz radno kolo mijenja se s povećanjem specifične brzine. Radna kola radijalnih pumpi imaju male specifične brzine, dok radna kola pumpi s mješovitim protokom imaju veći specifični opseg brzina. Radna kola aksijalnih imaju najveće specifične brzine.

Kako bi se povećao volumni protok u sustavu ili nadoknadili linijski (engl. *major*) i lokalni (engl. *minor*) gubici, centrifugalne se pumpe često koriste paralelno ili u seriji.

## 2.5. UPRAVLJANJE RADOM CENTRIFUGALNE PUMPE

Parametri pumpe osjetljivi na promjenu su protok, usisni i izlazni tlak, snaga i učinkovitost. Izbor prikladnog sustava upravljanja centrifugalnom pumpom ovisi o čimbenicima kao što su konfiguracija postrojenja, potrebno stanje operativnog procesa i cijena.

Takvi sustavi mogu koristiti četiri glavne tehnike za upravljanje centrifugalnom pumpom:

- prigušivanje protoka;
- obilaženje protoka;
- uključivanje/isključivanje pumpe;
- podešavanje broja okretaja pumpe.

Prva tri su jednostavna i jeftina. Međutim, zbog toga što ovi načini upravljanja rade pri konstantnoj brzini pumpe relativno su neučinkoviti, troše više energije, uzrokuju habanje i imaju veće operativne troškove.

Prigušni ventili kontroliraju protok povećavajući protutlak ili hidraulički otpor sustava. Ovo povećanje tlaka ili zahtjeva za visinom dobave pumpe pomjera radnu točku ulijevo duž krivulje pumpe i obično dalje od *BEP* točke. Rezultat je gubitak učinkovitosti.

Obilazni vodovi pružaju točniju kontrolu protoka izbjegavajući pri tomu opasnost od stanja „mrtvog protoka“ (engl. *deadhead*), tj. stanja potpunog prekida protoka zbog zatvorenog tlačnog ventila ili blokiranog cjevovoda. Iako ovaj način upravljanja nema značajan utjecaj na razinu protutlaka u sustava, obično je najmanje energetska učinkovita opcija upravljanja protokom.

Podešavanje broja okretaja pumpe je najučinkovitiji način upravljanja protokom pumpe. Smanjenje brzine znači manju energiju danu fluidu, a time i manje energije koja se mora prigušiti ili zaobići.

Postoje dva osnovna načina podešavanja broja okretaja pumpe:

- primjenom višebrzinskih motora;
- pogoni podesive brzine (engl. *Adjustable Speed Drives*; kratica: *ASD*).

Oba načina direktno upravljaju izlazom pumpe. Višebrzinski motori sadrže različite setove namotaja za svaku brzinu motora. Međutim, skuplji su i imaju manju učinkovitost nego jednobrzinski motori te omogućavaju samo diskretnu promjenu brzine. Pogoni *ASD* pružaju učinkovitu alternativu upravljanja protokom kontinuiranom promjenom brzine vrtnje pumpe. Ovi pogoni mogu biti mehanički, elektromehanički i električki.

Mehanički *ASD* pogon uključuje hidrauličku spojku te podesivi remenski prijenos dok elektromehanički magnetsku spojku i indukcijski motor.

Električki *ASD* pogon koristi frekvencijski pretvarač kojim se podešava frekvencija struje napajanja u svrhu promjene broja okretaja motora. Zbog toga se naziva pogon promjenjive frekvencije (engl. *Variable Frequency Drive*; kratica: *VSD*). Ovaj tip pogona je danas najviše korišten u praksi.

### **3. DIJAGNOSTIKA KVAROVA CENTRIFUGALNIH BRODSKIH PUMPI**

Budući da su centrifugalne pumpe jedna od najčešće korištenih vrsta pumpi, njihovi radni parametri, kao i njihove ranjivosti dobro su poznate. Općenito, kvarovi pumpe rezultiraju operativnim promjenama koje smanjuju učinkovitost ili mogu dovesti do kvara pumpe. Pouzdanost brodskih sustava, pogotovo kritičnih, koji koriste centrifugalne pumpe je od najveće je važnosti za sigurnost broda.

Načini (modovi) kvara (engl. *failure mode*) centrifugalnih pumpi mogu se podijeliti u tri kategorije:

- hidraulički;
- mehanički;
- ostali.

#### **3.1. HIDRAULIČKI KVAROVI**

Hidraulički kvarovi proizlaze iz promjena tlaka, bilo u spiralno kućištu ili cijevima koji vode prema pumpi, zbog promjena u parametrima poput temperature, brzine protoka te protoka fluida. Ovo poglavlje obuhvaća glavne hidrauličke kvarove, razloge njihovog nastanka i moguća rješenja.

##### **3.1.1. Kavitacija**

Ovisno o temperaturi i tlaku, odnosno pri određenim termodinamičkim uvjetima ravnoteže kapljevite i plinovite faze, kapljevina isparava. Ako u određenim uvjetima strujanja tlak padne na tlak zasićenja (tlak isparavanja) dolazi do isparavanja kapljevine, odnosno do stvaranja mjehurića pare. Kada struja kapljevine s mjehurićima para dođe u područje većeg tlaka, mjehurići implodiraju. Time dolazi i do nagle promjene gustoće koja pak izaziva naglu i ekstremnu promjenu tlaka. Ova se pojava naziva kavitacijom [4].

Popratne su tlačne promjene toliko velike da razaraju i najčvršće materijale. Na mjestu oštećenja pojavljuju se rupice – kaverne koje svojim oblikom dodatno deformiraju strujanje koji dovode do još nižih tlakova što ubrzava proces. Ovu pojavu nazivamo kavitacijskom erozijom. Kavitacija dovodi do mehaničkih oštećenju hidrauličke opreme, posebno pumpi i turbina. U centrifugalnim pumpama kavitacija se javlja neposredno uz napadni brid (rub) lopatica rotora, kada u njegovu usisnom području dođe do naglog pada

tlaka ispod tlaka isparavanja, a što za posljedicu ima stvaranje mjehurića pare koji potom vrtnjom rotora dolaze u područje visokog tlaka gdje naglo implodiraju urokojući kavitacijsku eroziju [4].



**Slika 9. Kavitacijska oštećenje rotora centrifugalnih pumpi [4]**

S obzirom na mogućnost suhe i mokre ugradnje pumpi, fenomen kavitacije pojavljuje se u pumpama instaliranim u suhom, odnosno za slučaj kada voda iz crpnog spremnika dolazi u pumpu posredovanjem usisne cijevi. U pumpama mokre izvedbe nema usisne cijevi jer je pumpa ugrađena u crpnom spremniku. Zbog toga, kod ovog tipa pumpi se ne pojavljuje kavitacija, sve dok se radna točka crpnog sustava nalazi na dopuštenom dijelu  $Q - H$  krivulje [4].

Stoga svaku centrifugalnu pumpu suhe izvedbe treba provjeriti na mogućnost pojave i razvoja kavitacije, odnosno kavitacijske erozije. Uvjet da kod pumpe ne dođe do kavitacije dan je izrazom [4].:

$$\min p_{aps} > p_v \quad (2)$$

gdje su:

$\min p_{aps}$ , - najmanji apsolutni tlak u pumpi, [Pa]

$p_v$  - tlak (vodenih) para pri određenoj temperaturi,

$p_a$ - atmosferski tlak, [Pa].

Pri temperaturi vode do 100 °C, tlak para je manji od normalnog atmosferskog tlaka. Pošto se kod pojave kavitacije razmatra podtlak, analize je potrebno provoditi s apsolutnim vrijednostima tlakova .

Pojava kavitacije i kavitacijske erozije kod centrifugalnih pumpi suhe izvedbe dovodi do nepostizanja projektiranog kapaciteta crpnog sustava, oštećenja pumpi,



smanjenja uporabnog vijeka crpnih agregata kao i pojavu vibracija i buke. Za beskavitacijski režim rada pumpi potrebno je osigurati da najmanja vrijednost apsolutnog tlaka u pumpi bude iznad tlaka isparavanja za određenu temperaturu vode. To znači da se u crpnom sustavu, uzimajući u obzir pad tlaka u usisnoj cijevi i pumpi, mora osigurati minimalna vrijednost tlaka većeg od tlaka para. Kao osnovni parametar opisa fenomena kavitacije odabrana je neto pozitivna usisna visina koja se raščlanjuje na raspoloživu i potrebnu. Raspoloživu neto pozitivnu usisnu visinu proračunom definira projektant na temelju odabranih parametara usisnog dijela crpnog sustava, dok potrebnu neto pozitivnu usisnu visinu određuju proizvođači centrifugalnih pumpi [4]. Obično se centrifugalna pumpa radi unutar raspona od 85% do 110% svoje *BEP* točke. Međutim, mnoge pumpe su prisiljene raditi izvan ovog raspona. Kao rezultat toga, proizvođači nastoje osigurati da se mjehurići kavitacije ne skupljaju u pumpi, već u glavnom cjevovodnom sustavu, daleko od lopatica radnog kola[5].

Postoji nekoliko uzroka kavitacije u pumpi i sustavu cjevovoda. Primjeri su:

- veliki volumetrijski protok, veliko smanjenje količine tekućina u sustavu koja rezultira abnormalnim povećanjem temperature tekućine;
- smanjenje usisnog tlaka zbog promijenjenih uvjeta na usisnoj strani pumpe, zagrijavanje tekućine u usisnom sustavu, a što dovodi do većeg tlaka pare tekućine na ulaz pumpe;
- nestabilnost protoka unutar pumpe, koja se obično javlja pri protoku znatno ispod *BEP* točke;
- protok blizu nultog protoka što rezultira brzim zagrijavanjem tekućine u kućištu pumpe i blokiranjem pumpnog sustava parama;
- loša distribucija tekućine u pumpama koje rade paralelno;
- prevelike pumpe koje rade velikim kapacitetom;
- pumpanje tople vode s visokim tlakom pare;
- također se pretpostavlja da su između tekućine i vibrirajućih dijelova pumpe nastale šupljine koje su u kontaktu s tekućinom, a visok postotak protoka curenja može dovesti do povećanja temperature u impeleru, što bi tada moglo uzrokovati lokalno treptanje.

Konkretno, kavitacija oštećuje radno kolo i ne može se dugo tolerirati. Opsežna kavitacija značajne količine pare će oštetiti rad pumpe.

Dva su osnovna oblika kavitacije: putujuća i mirujuća. Putujuća kavitacija može se podijeliti na mjehuričastu i pjenastu kavitaciju. Mjehuričasta kavitacija nastaje na

tvorevinama koje su strujno oblikovane, te zbog toga oko takvih tijela se oblikuje strujanje bez odvajanja. Oblikovanje mjehurića nastaje u točki gdje su stvoreni uvjeti za nastanak kavitacije. Mjehuriće koji su stvoreni na ovakav način odnosi struja fluida, i vrlo kratko porastu, a dalje u smjeru strujanja su sve manji i manji, pa se na samom kraju pretvaraju u maglicu [6].

Kao što sam naziv kaže za mirujuću kavitaciju je karakteristično da većina njezinih dijelova miruje. Zapravo je to samo prividno tako, miruju samo granice kavitirajućeg strujanja, a unutar granica se formira intenzivno strujanje mjehurića. Mirujuća kavitacija se može podijeliti na [6].:

- slojastu kavitaciju;
- prugastu kavitaciju;
- pjegastu kavitaciju;
- vrtložnu kavitaciju;
- magličastu kavitaciju.

Slojasta kavitacija nastaje u blizini nekog oštrog brida, te također na dijelu tvorevine gdje je prisutan relativno mali polumjer zakrivljenosti. Ako dođe do nastupa većih kavitacijskih brojeva može doći i do intenzivnog odvajanja strujanja, dok pri manjim kavitacijskim brojevima nastupa popunjavanje dijela odvojenog strujanja parom i zrakom. Stražnji dio područja kavitacije je nestabilan, struja fluida otkida dijelove te ih nosi dalje, drobi ih i pretvara u pjenu [6].

Prugasta kavitacija može se definirati kao sami početak nastanka i razvoja slojaste kavitacije. Nastanak ovakve vrste kavitacije je određen geometrijom tijela oko kojeg struji fluid kao i kavitacijskog broja strujanja. Za ovakvu vrstu kavitacije je karakteristično da relativno malena promjena u geometriji tijela uzrokuje relativno velike promjene samog izgleda kavitacijske pojave [6].

Pjegastu kavitaciju karakteriziraju jako izražene klice kavitacije koje su raširene po površini tijela oko kojeg struji fluid. Dinamika takve pojave je nastajanje mjehura uz krutu stijenu, njihovo otkidanje, te nastanak novih mjehura na istom mjestu [6].

Vrtložna i magličasta su slične kavitacijske pojave. Na mjestu gdje se nalazi vrtlog, zbog prisutnosti centrifugalne sile u samom središtu vrtloga nastaje zona sniženog tlaka, pa se na tom mjestu formiraju uvjeti za nastanak kavitacije [6].

### 3.1.2. Pulsacije tlaka

Pulsacije tlaka zabrinjavajuće su samo kod visokotlačnih pumpi, gdje je visina dobave veća od oko 300 m. Pulsacije usisnog i ispusnog tlaka mogu uzrokovati nestabilnost kontrole pumpe, vibracije usisnog i tlačnog cjevovoda te visoke razine buke pumpe. Nadalje, potrebno je ispitati bilo kakav kvar unutarnjeg dijela na koji djeluje unutarnji tlak, uzimajući u obzir mogućnost kako su kvarovi uslijed zamora posljedica pulsiranja unutarnjeg tlaka. Ako kvar zamora pokaže mikroskopske pruge, koje su posljedica cikličkog stresa, pulsacije tlaka mogu biti temeljni uzrok problema. Veličina i učestalost ovih pulsacije ovise o nekoliko čimbenika, kao npr. dizajnu pumpe, ukupnoj visini dobave koju proizvodi pumpa, odzivu usisnog i tlačnog cjevovoda, te točki rada na karakterističnoj krivulji pumpe [5].

Učestalost pulsiranja može proizaći iz poznatih izvora, kao što je radna frekvencija ili se to može pojaviti nasumično iz izvora kao što su rezonancija sustava, vrtlozi u ventilima ili loš uzvodni cjevovod. Bez obzira na izvore, pulsacije ne treba odbaciti kao nevažne, budući da pulsacije nose informacije o sustavu. Uočene frekvencije u usisu pumpe mnogo su niže nego na tlačnoj strani pumpe. Tipične frekvencije su u reda od 5 do 25 ciklusa/s, i čini se kako nemaju izravnu vezu s brzinom vrtnje pumpe. Pulsacije tlaka mogu se pojačati buku u sustavu cjevovoda ili njegovim elementima, što može dovesti do izmjeničnog naprezanja i prekomjerne vibracije izvan granice izdržljivosti sustava. Prazni tok koji se nalazi na izlazu rotora jedan je od najjačih izvora pulsiranja. To je uzrokovano međudjelovanjem između protoka tekućine na lopaticama rotora i spiralnog kućišta koja rezultira pulsiranjem tlaka na frekvenciji prolaska lopatice i njezinim harmonicima [5].

### 3.1.3. Radijalni potisak

Radijalna potisna sila je sila koja djeluje na rotor pumpe i usmjerena je prema središtu rotacije. Sile na rotoru pumpe obično se sastoje od dinamičke cikličke komponente koja se nadovezuje na stabilno opterećenje. Dinamička komponenta brzo raste kada pumpa radi u režimu recirkulacije, odnosno niskog protoka u sustavu. Statičko opterećenje raste kako kod niskog, tako i kod visokog protoka, s minimalnom vrijednošću kod ili blizu *BEP* točke. Ovaj učinak često se nalazi kod jednostupanjskih pumpi, manje kod višestupanjskih pumpi, a rijetko kod pumpi s difuzornim dizajnom. Geometrija lopatice također može promijeniti veličinu radijalne potisne sile u sustavu.

Visoka radijalna potisna sila koja rezultira prekomjernim savijanjem vratila može dovesti do trajnih problema s mehaničkim brtvama i, eventualno, do kvara vratila. Kvarovi

vratila obično se pojavljuju kod pumpi s dvostrukim usisom ili kod višestupanjske pumpi. Obične jednostupanjske pumpe obično imaju kvarove vratila na rukavcima, gdje se ugrađuje radno kolo ili na mjestu najveće koncentracije naprezanja. Velika radijalna opterećenja mogu uzrokovati visoke temperature u ležajevima, a što može smanjiti njihov životni vijek. Klizni ležajevi imaju trošenje blazinice samo u jednom smjeru, dok će se rukavac trošiti ravnomjerno. Međutim, u suprotnom slučaju, uzrok nije prekomjerno opterećenje ležaja, već vjerojatno neuravnotežena ili savijeno vratilo.

Teško je otkriti visoke radijalne potisne sile u pumpi. Povećanje temperature u ležaju može ili ne mora biti simptom prekomjernog radijalnog opterećenja. Visoke temperature ležaja mogu biti rezultat nepostizanja poravnjanja, nedostatka podmazivanja ili prekomjernog aksijalnog opterećenja potisnog ležaja. Stoga bi trebala biti provedena dodatna istraživanja kako bi se isključili drugi uzroci prije zaključka da su radijalni tereti prekomjerni.

Većina kvarova koji su rezultat prekomjerne radijalne potisne sile pojavljuju se kod rada pumpi pri niskim protocima. Ova opterećenja mogu se smanjiti radom pumpe pri većim kapacitetima ili instalacijom by-pass ventila s između tlačne i usisne strane pumpe [5].

#### **3.1.4. Aksijalni potisak**

Aksijalna potisna sila djeluje duž vratila pumpe, ili prema unutarnjem ili vanjskom smjeru. Aksijalni potisak rezultat je dinamičke cikličke komponente koja se nadovezuje na statičko opterećenje u oba smjera. Povećanjem dinamičkog opterećenja na vratilu stvaraju se prekomjerna opterećenja koji konačno mogu dovesti do zamora materijala. Stabilno statičko opterećenje može preopteretiti ležaj, što povećava temperaturu na neprihvatljivu razinu i dovodi do kraćeg životnog vijeka ležaja.

Kvar vratila uglavnom je posljedica visokog cikličkog naprezanja kada pumpa djelomično recirkulira svoj izlaz. U ovom slučaju, ova naprezanja mogu se smanjiti povećanjem izlaza pumpe ili instalacijom linije za recirkulaciju kako bi izlazni protok bio izvan kritične točke. Ako to nije moguće, kvarovi vratila mogu se smanjiti zamjenom vratila od materijala s većim dopuštenim graničnim naprezanjem i primjenom različitih mjernih instrumenta kao što su npr. senzori blizine koji određuju aksijalni pomak vratila u odnosu na kućište ležaja [5]. Odvijanje kućišta potisnog ležaja može se dobiti pomoću seizmičkih instrumenata. Naposljetku, aksijalno opterećenje ležaja s nagibom može se pratiti pomoću ćelijske mase trajno instalirane na temeljnoj ploči.

Oštećenje ležaja uzrokovano je statičkim i dinamičkim aksijalnim silama. Velike statičke sile uzrokovat će pukotine na gibajućim elementima valjnih i kotrljajućih ležaja te metalnim segmentima odrivnih ležaja. Kako bi se utvrdilo koji od ova dva opterećenja uzrokuje kvar, potrebno je detaljno ispitivanje pod mikroskopom. Kvar zbog dinamičkog opterećenja pokazat će efekt kovanja uzrokovan točkama udara. Kvar zbog statičkog opterećenja pokazat će zamor metala bez efekta kovanja uzrokovanim opterećenjem. Većina kvarova ležajeva su kvarovi zbog zamora uzrokovanog dinamičkim cikličkim aksijalnim opterećenjem na komponente ležaja.

## 3.2. MEHANIČKI KVAROVI

Mehanički kvarovi mogu proizaći iz različitih dijelova pumpe, uključujući ležajeve, brtve, sustav podmazivanja u pumpe te iz drugih različitih problema. Ovo potpoglavlje obuhvaća glavne mehaničke probleme, razloge njihovog nastanka i moguća rješenja.

### 3.2.1. Kvar ležaja

Ležajevi se općenito kvare ili zbog onečišćenja maziva s vodom, uljem, drugom tekućinom ili čvrstim česticama ili zbog velike topline, koja je često uzrokovana preopterećenjem ležaja ili prekomjernim podmazivanjem. Ovi kvarovi mogu biti posljedica nekoliko uzroka.

Kada pumpa radi na svojoj *BEP* točki, jedino opterećenje ležaja nastaje zbog pritezanja rotirajućeg sklopa, naprezanja uzrokovanog neuravnoteženošću i bilo kakvog preopterećenja ležaja koje je naveo proizvođač. Međutim, većina pumpi ne radi kontinuirano na njihovoj *BEP* točki, te je stoga moguće preopterećenje [5].

Preopterećenje ležajeva može biti posljedica mnogo različitih uvjeta:

- neuravnoteženi rotirajući elementi;
- savijeno vratilo;
- blokirani otvori za uravnoteženje impelera;
- kavitacija;
- prekomjerni aksijalni potisak;
- prekomjerno radijalno opterećenje koje je uzrokovano radom s malim protokom ili nekim mehaničkim kvarom unutar pumpe;
- prekomjerno zagrijavanje ležajeva zbog nepravilnog odvođenja topline;

- nepravilno hlađenje ležajeva kao što je hlađenje kućišta ležaja crijevom za vodu ili nekim drugim sličnim sustavom;
- povećani unutarnji razmak pumpe oko habajućih prstenova;
- povećanje brzine ležaja;
- neusklađenost između pumpe i njezinog pogona;
- rad pumpe daleko od njezine *BEP* točke što može stvoriti prekomjernu radijalnu silu na rotoru;
- pogon pumpi preko remenskog prijenosnika;
- pumpanje tekućine velike gustoće koja može gotovo udvostručiti radijalno opterećenje na ležaju;
- korozija kotrljajućih ležajeva zbog vode u kućištu ležaja;
- toplinsko rastezanje vratila veće od toplinskog širenja ležaja uzrokujući ekscentričnost u kućište ležaja;
- prevelika udaljenost rotora koji se nalazi predaleko od ležaja;
- pogrešno nalijeganje ležaja i vratila (vratilo je izvan tolerancije što će uzrokovati da ležajevi budu pretijesni);
- frekvencija prolaza lopatica koja se podudara s rezonancijom sklopa pumpe;
- vibracija iz drugih dijelova cjevovodnog sustava ili unutar pumpe;
- stvaranje tlačnog udara u cjevovodu.

### 3.2.2. Kvar podmazivanja

Svrha podmazivanja je smanjenje trenja između dva pokretna dijela, čime se smanjuje njihovo trošenje i produljuje životni vijek dijelova sustava. Čisto mazivo ne može se istrošiti i ima korisni vijek trajanja od otprilike trideset godina na 30°C. Ovaj vijek trajanja se prepolovljuje za svako povećanje temperature ulja od 10°C.

Preopterećenje ležajeva može uzrokovati prekomjerno stvaranje topline unutar ležajeva. Porast temperature rezultirat će smanjenjem viskoznosti maziva, što dovodi do dodatnog stvaranja topline kako gubi sposobnost podrške opterećenju. U tom slučaju lak se ljušti, čiji se ostaci potom zagrijavaju na povišenoj temperaturi. Ovo zagrijavanje uništava sposobnost ulja ili masti da podmazuju ležaj. Infracrvena termografija može se koristiti kako bi se utvrdilo je li ležaj preopterećen na temelju količine proizvedene topline [5].

### 3.2.3. Prekomjerne vibracije

Vibracije pumpe stvaraju mehanički i hidrodinamički izvori. Mehanički izvori uvijek nastaju rotacijom neuravnoteženih masa i trenjem u ležajevima. Hidrodinamičke vibracije nastaju zbog poremećaja protoka fluida i interakcije lopatica rotora osobito s spiralnim perom i/ili vodećim lopaticama. Generirane vibracije uzrokovat će da površina pumpe vibrira koja će tada djelovati kao zvučnik koji emitira buku koja se prenosi zrakom. Tako osnovni mehanizmi koji generiraju vibracije koje se prenose strukturom i buku koja se prenosi zrakom su isti. Vibracije pumpe sadrže i širokopolasni šum i diskretne frekvencijske vrhove. Širokopolasni sadržaj pripisuje se turbulenciji toka, posebno u uski prostori između rotora pumpe i susjednih nepokretnih dijelova kućišta [9].

Turbulencija buke će biti minimalna kada pumpa radi s maksimalnom učinkovitošću, tj. pumpa radi na njezinoj *BEP* točki. Stope protoka izvan *BEP* točke stvaraju dodatnu hidrauličku buku, posebno za vrlo niske brzine protoka kada se unutarnja recirkulacija dogodi između usisnog i tlačnog područja pumpe [9].

Rotacijski zastoj je nestabilnost protoka koja se javlja u većini vrsta centrifugalnih pumpe kada se protok smanji ispod projektirane vrijednosti. Osim mehaničkih vibracija koji može biti izazvan zastojem, generirana akustična buka također može biti važan problem [9].

Uvjeti rezonancije mogu uzrokovati pretjerane razine vibracija, koje su potencijalno štetne za opremu i okolinu. Pumpe, njihova potporna konstrukcija i cjevovod podložni su raznim potencijalnim strukturnim problemima vibracija (uvjeti rezonancije). Aplikacije fiksne brzine često promašuju te potencijalne situacije rezonancije jer uobičajeni harmonici pobude zbog brzine kretanja, frekvencija prolaska lopatica, frekvencija klipa itd. ne podudaraju se s prirodnom konstrukcijom frekvencije. Problemi s vibracijama pumpe obično se javljaju s kućištima ležajeva i nosačem struktura (bazna ploča za vodoravnu primjenu, motor i stolica za okomitu primjenu [9].

Prekomjerne vibracije, ili na neki drugi način nezadovoljavajuće ili neprihvatljive vibracije, klasificirane su prema *ISO 10816* tako da imaju amplitude veće od 2,80 mm/s za male strojeve, 4,50 mm/s za srednje strojeve, 7,10 mm/s za velike strojeve s krutim temelja, a 11,2 mm/s za velike strojeve s mekim temeljem.

Vibracije su posljedica neuravnoteženih pokretnih dijelova koji se nalaze unutar sustav pumpe, interakcije tekućine i njezinih čestica s pumpom i spojnim cijevima, te

kretanja cjevovoda. Brojni su razlozi koji mogu dovesti do neželjenih vibracija u sustavu pumpe, kao što je [4]:

- neuravnoteženost impelera;
- hidraulička neravnoteža;
- problemi u ležajevima;
- pomicanje u kućištu;
- istrošenost komponente;
- kavitacija;
- zračna ili parna blokada;
- hidraulička pobuda.

Neuravnoteženost impelera obično se pojavljuje u potpisu vibracija kao 1x vibracija frekvencije brzine rada, a može biti posljedica ili mehanički problem, kao što je kvar mehaničke brtve ili ležaja, ili hidraulički problem [4].

Uglavnom, analize kako bi se utvrdilo je li impeler je uravnotežen ne izvode se dok se na rotoru ne otkriju velike rupičaste mrlje. Stupanj nagrizanja ili udubljenja obično se koristi kao pokazatelj da impeler treba balansirati. Neuravnotežene sile koje proizlaze iz labavog impeler mogu rezultirati velikim amplitudama vibracija. Impeleri se mogu pomaknuti zbog smanjenja zaostalih naprezanja koja nastaju kada se impeler ohladi i skupi oko vratila. Vibracije imaju tendenciju da rezultiraju napinjanjem impelera ili savijanjem vratila, što ga uklanja od izvorne ravnoteže duž svoje središnje crte. Stoga, kada se balansira impeler, nužno je da mora biti balansiran na radne brzine kako bi se procijenila važnost otklona vratila zbog prethodno navedenih čimbenika i zbog mogućih modalnih komponenti rezonancije [4].

Detekcija i rješavanje problema s vibracijama mogu uključivati testiranje, prilagodbu konstrukcije i promjene u dizajnu kako bi se osigurala sigurna i učinkovita operacija pumpe [5].

#### **3.2.4. Zamor**

Zamor se uglavnom kategorizira u jedno ili više od sljedećeg: cikličko opterećenje, zamor materijala ili zamor potpomognut okolinom. Pumpe su u osnovi strojevi koji nose tekućinu, s ili bez krutih tvari, izazivajući cikličko opterećenje njihovih komponenti. Iako centrifugalne pumpe kao rotacijski strojevi uglavnom rade u stabilno stanju, ipak dolazi do pulsiranja ili fluktuiranja primijenjenih naprezanja. Izvor ovih cikličkih naprezanja može biti od interakcije tekućine između izlaznih lopatica rotora i lopatica difuzora, ili, u slučaju



spiralne pumpe, lopatice impelera i kućište na usjeku. Mehanički izazvane sile proizlaze iz momenata savijanja koji djeluju na vratilo pumpe ili neravnoteže komponente u sklopu impelera [5].

Kada se cikličke sile primjenjuju na dijelove koji se nalaze u pumpi, pukotina se može pojaviti tijekom određenog vremenskog razdoblja na površini komponente. Lomovi se mogu pojaviti na komponenti, čak iako opterećenje proizvodi naprezanja koja su daleko manja od čvrstoće materijala. Nakon pojave pukotine komponenti, ona može rasti sa svakim cikličkim opterećenjem [5].

Zamor potpomognut korozijom događa se kada oštećenje korozijom promijeni teksturu površine i značajno poveća lokalna naprezanja djelujući na komponentu pumpe zbog osjetljivosti. Kada se to dogodi, vjerojatno je pucanje komponente uslijed zamora. U nekim slučajevima, na širenje pukotine može utjecati oksidacija, koja može maskirati značajke mehanizma zamora. Korozivni oksidi duž pukotine, mogu proizvesti učinak habanja, koji mehanički može povećati lokalne vlačne sile koje djeluju na vrhu pukotine i time povećati brzinu širenja pukotine. Habanje također mogu uzrokovati mjesta na kojima mogu nastati pukotine uslijed zamora. Osim toga, oštri radijusi i nedostaci na površini materijala, kao u slučaju poroznosti i loše strojne obrade, mogu djelovati kao koncentracije naprezanja u osjetljivim materijalima [5].

### **3.3. OSTALI MODOVI KVARA**

Postoje pojedini modovi kvara centrifugalnih pumpi koji ne spadaju u kategorije hidrauličkih ili mehaničkih kvarova. Ovi modovi kvara su ponekad strukturni, kao što je u slučaju erozije i korozije ili su rezultat mnoštva različitih izvora, poput slučaja prekomjerne potrošnje energije

U pumpama se mogu pojaviti pet različitih oblika erozija: kavitacijska, adhezivna, tarna (engl. *fretting*), abrazivna ili erozija udarcem čvrstih čestica.

Korozija je kemijska promjena materijala. Korozija dolazi u više različitih oblika kao npr. općenita korozija, korozija legura, galvanska korozija, napetosna korozija, mikrobiološki inducirana korozija, intergranularna korozija, od kojih su neke više uobičajena od ostalih.

Prekomjerna snaga pumpe je pokazatelj više mogućih uzroka problema u radu pumpe. Jedan od glavnih uzroka koji rezultira prekomjernom potrošnjom energije, a

možda u konačnici i kvarom motora, jest postojanje male ili velike koncentracije čestica u kapljevini. Ostali glavni uzroci mogu biti: previsoka brzina radnog kola, preuska brtva, prevelika viskoznost ili gustoća kapljevine, rotor dodiruje kućište, rotor se okreće u pogrešnom smjeru, rotor je instaliran u pogrešnom smjeru, zarobljeni zrak unutar pumpe, veće curenje u dovodnom vodu do pumpe, pumpa isporučuje više od predviđene količine, oštećen rotor, mehanička nepropusnost na unutarnjim komponentama pumpe ili cjevovod opterećuje pumpu. Slijedom navedenog tipični modovi kvara centrifugalne pumpe su prikazan u tablici 1 [8].

**Tablica 1. Modovi kvara centrifugalne pumpe**

<b>Mod kvara</b>	<b>Uzrok kvara</b>	<b>Utjecaj kvara</b>
<b>Smanjenje usisne visine</b>	Kavitacija pumpe	Smanjenja učinkovitost
<b>Smanjenje tlaka u pumpi</b>	Kavitacija pumpe	Eventualna erozija rotora, kućišta Buka i vibracije
<b>Izobličenje (defleksija) vratila</b>	Veliki radijalni potisak na rotoru pumpe	Eventualni kvar vratila i pumpe
<b>Neuravnoteženost vratila</b>	Istrošenost rotora	Savijanje i ekscentričnost vratila Propuštanje dinamičke brtve Istrošenje ležajeva
<b>Vanjsko propuštanje</b>	Kvar brtve Istrošena dinamička brtva Izbrazdanost rukavca na vratilu	Ovisi o vrsti kapljevine i kritičnosti vremena do kvara
<b>Mehanička buka</b>	Krhotine u rotoru Neuravnoteženost rotora Savijeno vratilo Istrošen / oštećen ležaj Temelj nije krut Kavitacija	Eventualno trošenje rotora i drugih komponenti

## Primjer sustava upravljanja i dijagnostike centrifugalne pumpe

U svrhu sprječavanja prije navedenih navedenih modova kvara osnovni zadaci održavanja na centrifugalnoj pumpi uključuju slijedeće radnje:

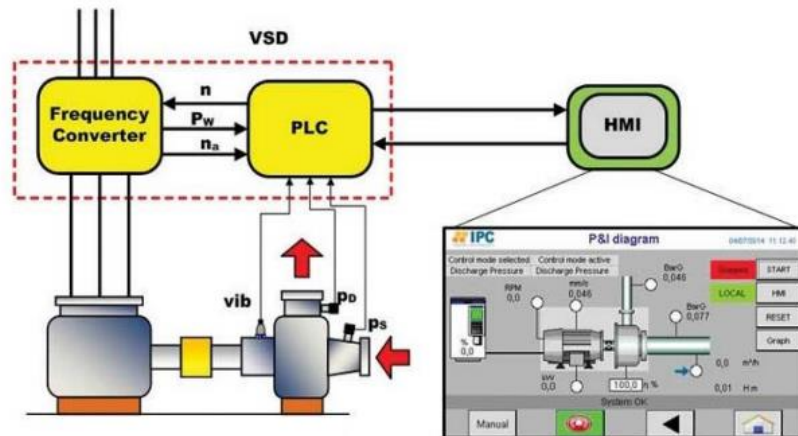
- podmazivanje i izmjena ležajeva;
- stezanje i izmjena dinamičkih brtvi;
- podešavanje i izmjena habajućeg prstena,
- izmjena radnog kola (rotora),
- poravnanje motora pumpe,
- popravak ili izmjena motora.

Nadalje, u svrhu sprječavanja kvarova pored preventivnih zahvata održavanja određenih od strane proizvođača pumpe i/ili politikom broдача prema *Sustava Planiranog Održavanja* (engl. *Planned Maintenance system*; kratica: *PMS*) mogu se primijeniti i tehnike nadzora stanja (engl. *Condition Monitoring*; kratica: *CM*).

Ovim tehnikama se provodi strategija *održavanje prema stanju* (engl. *Condition Based Maintenance*; kratica: *CBM*). *CBM* je održavanje koje se sastoji od praćenja rada i parametara i naknadnih radnji. Odabrani parametar može osigurati izravno ili neizravno mjerenje degradacije. Primjer izravnog mjerenja je praćenje degradacije pumpe mjerenjem protoka i mjerenjem vibracija. Primjer neizravnog mjerenja je praćenje degradacije ležaja na temelju analize krhotine čestica u ulju za podmazivanje.

S napretkom tehnologije senzora i tehnika obrade signala, *CBM* strategija brzo se razvila. U *CBM*-u ispravnost opreme nadziru ugrađeni senzori, a pouzdanost u stvarnom vremenu prati se kroz sustav prognostike i upravljanja zdravljem (engl. *Prognostic and Health Management*; kratica: *PHM*). Prognostika i upravljanje zdravljem novi je inženjerski pristup za predviđanje budućih oštećenja/degradacije i preostalog korisnog vijeka (engl. *Remaining Useful Life*; kratica: *RUL*) sustava u uporabi na temelju trenutnih informacija o izmjerenim podacima o oštećenjima uključivanjem različitih disciplina kao što su senzorske tehnologije, fizika kvarova, strojno učenje, napredna statistika i inženjerstva pouzdanosti. Ovaj pristup omogućuje inženjerima da podatke i zdravstveno stanje sustava pretvore u informacije koje će poboljšati njihovo znanje o sustavu te pružiti strategiju za održavanje sustava u njegovoj izvorno namijenjenoj funkciji.

Na slici 9 prikazan je primjer sustav upravljanja i dijagnostike centrifugalne pumpe zasnovanom na modelu.



**Slika 9. Sustav upravljanja i dijagnostike centrifugalne pumpe [8]**

Za potrebe dijagnostike, sustav uključuje dva senzora tlaka instalirana u blizini prirubnica pumpe i senzor vibracija za izvršavanje zadataka upravljanja, odnosno dijagnostiku.

Sustav također uključuje frekvencijski pretvarač, programibilni logički kontroler (engl. *Programmable Logic Controller*; kratica: *PLC*) te sučelje čovjek-stroj (engl. *Human-Machine Interface*; kratica: *HMI*). Kao što je prikazano na slici, *PLC* pruža multivarijabilnu kontrolu, izvršava zadatke sekvenciranja i daje proračune za model pumpe, dok *HMI* sučelje preko ekrana omogućuje interakciju sa sustavom. Algoritam također omogućuje izračunavanje očekivanih vrijednosti snage, učinkovitosti i *NPSH*.

Upravljački algoritam se temelji na praćenju parametara pumpe i procesa u stvarnom vremenu. Isti izračunava odstupanje između očekivanih i stvarnih parametara performansi u stvarnom vremenu. Očekivane performanse dobivaju se iz referentnih i dizajniranih karakteristika, prilagođene stvarnim radnim uvjetima. Stvarne performanse dobivaju se mjerenjima u određenom operativnom stanju tako da vremenski trend razine odstupanja može rano ukazati na predstojeće probleme u radu. Dijagnostički sustav temelji se na poznavanju hidrauličke snage pumpe ( $P_p$ ) i očekivane učinkovitosti pumpe ( $\eta_p$ ).

Te se informacije koriste za određivanje očekivane mehaničke snage na vratilu pumpe ( $P_{we}$ ), koja se zatim uspoređuje sa stvarnom snagom ( $P_w$ ), izmjerenom ugrađenim senzorom u pretvaraču frekvencije. Ovaj upravljački sustav zasnovan na modelu smanjuje troškove energije i uklanja potrebu za dodatnim komponentama. Rezultat je povećanje pouzdanosti i raspoloživosti centrifugalne pumpe većih snaga koje se koriste u naftnoj i plinskoj industriji te na brodovima.

Pritom je važno napomenuti da je analiza vibracija najrašireniji i najuspješniji alat za analizu koji se koristi za dijagnostiku kvarova brodskih centrifugalnih pumpi. Tri tipa mjerenja se moraju provesti kako bi se odredila radna vibracija koju proizvodi periodično kretanje rotirajućih strojeva (kao što je vratilo pumpe): pomak, brzina, i ubrzanje. Važno je razumjeti fiziku različitih dinamičkih mjerenja kako bi se ispravno primijenili programima preventivnog održavanja temeljenim na vibracijama [11].

Kod identifikacije uzroka vibracija, mogu se koristiti općenite popise poznatih simptoma sa svrhom rješavanja tipičnih ili jednostavnih kvarova. Ipak, ne treba se pretjerano oslanjati na tu listu problema, posebno ako njihova primjena ne vodi direktno k rješenju problema.

Većina suvremenih tehnika za ispitivanje vibracija se temelji na nekoj vrsti "analize odziva", odnosno usporedbom dijagrama vibracija u odnosu na frekvenciju dobivenih pod reprezentativnim radnim uvjetima s dijagramima dobivenim na tipičnoj ispravnoj pumpi [12].

Najmanje šest komponenti može biti ozbiljno ugroženo vibracijama [12]:

- Vijek trajanja mehaničke brtve je direktno vezan za kretanje vratila. Vibracije mogu dovesti do intenzivnog habanja brtve, što kasnije samo povećava amplitudu vibracija.
- Brtve su osjetljive na radijalno kretanje vratila. To dovodi do isticanja fluida, ali i do habanja vratila ili ležaja. Pri tome se razvija toplina koja dovodi do drugih negativnih pojava.
- Ležajevi su konstruirani da podnose radijalno i aksijalno opterećenje, ali nisu konstruirani da podnose vibracije koje mogu dovesti do točkastog korodiranja staza ležajeva.
- Kritične dimenzije i tolerancije, kao što su zračnost ležaja i radnog kola jako ovise o vibracijama. Unutrašnja zračnost ležaja se mjere u mikrometrima [ $\mu\text{m}$ ].
- Komponente pumpe se mogu oštetiti vibracijama. Primjeri tih komponenti su klizni ležajevi, brtve i radna kola.
- Brtve na ležajevima su jako osjetljive na radijalno gibanje vratila. Kako ležajevi imaju malu toleranciju, vrlo mala oštećenja ležajeva dovode do kvara brtvi.
- Matice kojima su pričvršćeni pumpa i motor se uslijed vibracija mogu olabaviti.

## 4. ZAKLJUČAK

Dijagnostika kvarova je postupak identifikacije slabljenje funkcije sustava na temelju vidljivih simptoma ili sindroma, tj. određivanja koja je greška dovela do uočenog kvara.

Kvarovi brodske strukture i strojnog kompleksa u svakodnevnim brodskim operacijama mogu dovesti do velikih nesreća, što ugrožava posadu i putnike na brodu, a što predstavlja prijetnju za okoliš, nanosi štetu samom brodu i ima veliki utjecaj na gubitke poslovanja.

Pumpe su hidraulički strojevi koji pretvaraju ulaznu mehaničku energiju u hidrauličku, tj. u protok i tlak. Dakle, one dodaju mehaničku energiju kapljevina koja je potrebna za njeno protjecanje kroz sustav određenim protokom i tlakom.

Centrifugalne pumpe su dinamički strojevi pomoću kojih se kapljevina dobavlja na višu razinu ili u područje višeg tlaka pretvaranjem rotacijske kinetičke energije u hidrodinamičku energiju protoka fluida.

Uzevši u obzir da su centrifugalne pumpi jedna od najčešće korištenih vrsta pumpi na brodovima, njihovi radni parametri, kao i njihove ranjivosti dobro su poznate. Općenito, kvarovi pumpe rezultiraju operativnim promjenama koje smanjuju učinkovitost ili mogu dovesti do kvara pumpe. Pouzdanost brodskih sustava, pogotovo kritičnih, koji koriste centrifugalne pumpe je od najveće je važnosti za sigurnost broda.

Kvarovi centrifugalne pumpe nastaju kao posljedica loše konstrukcije, neodgovarajućih radnih uvjeta, nedovoljnog održavanja ili kombinacije prethodno navedenog. Kvarovi pumpe rezultiraju operativnim promjenama kojima se smanjuje učinkovitost. Kako bi se spriječili iznenadni troškovi i nepotrebni kvarovi centrifugalnu pumpu je potrebno redovito održavati. U svrhu sprječavanja prije navedenih navedenih modova kvara osnovni zadaci održavanja na centrifugalnoj pumpi uključuju podmazivanje i izmjena ležajeva, stezanje i izmjena dinamičkih brtvi, podešavanje i izmjena habajućeg prstena, izmjena radnog kola (rotora), poravnanje motora pumpe i popravak ili izmjena motora. Primjer dijagnostike kvarova ili praćenja degradacije pumpe je mjerenje vibracija, što je ujedno najučinkovitija i najraširenija metoda za dijagnostiku brodskih centrifugalnih pumpi.

## LITERATURA

- [1] Lalić, B., Dobrota, Đ. Brodski pomoćni strojevi i uređaji. Sveučilište u Splitu, Split, 2020.
- [2] Kurtela, Ž. Osnove brodostrojarstva. Veleučilište u Dubrovniku. Dubrovnik, 2000.
- [3] Hernandez-Solis, A. Diagnosis of centrifugal pumps. Royal Institute of Technology. Stockholom, 2006.
- [4] Vuković, Ž., Halkijević, I. Kavitacija u centirfugalnim pumpama. Građevinar, 2011;63(1):11-17.
- [5] Mc Kee, K., Forbes, G., Mazhar, I., Entwistle, R., Howard, I. A review of major centrifugal pump failure modes with application to the water supply and sewerage industries. Asset Managment Council, Australia. 2011
- [6] Sambolek, M. Propulzija broda, Brodarski institut, Zagreb, 2012.
- [7] Karassik, Igor J., J. P. Messina, P. Cooper, and C. C. Heald, Pump Handbook (3rd Edition). New York: McGrawHill, 2001.
- [8] Lalić, B., Dobrota, Đ. Dijagnostika kvarova. Sveučilište u Splitu, Split, 2021.
- [9] Albraik, A., Althobiani F., Gu, F., Ball, A. Diagnosis of Centrifugal Pump Faults Using Vibration Methods. Journal of Physics. 2012;364:1-12.
- [10] Mongeau, L., Thompson, D., Mclaughlin, D., Sound Generation by Rotating Stall in Centrifugal Turbo machines. Journal of Sound and Vibration. 1993.
- [11] Greene, R., Casada, A. Detection of Pump Degradation. Oak Ridge National Laboratory, 1995.
- [12] McNally, B. Centrifugal Pump & Mechanical Seal Reference Manual, McNally Institute, 1998.

## POPIS SLIKA

Slika 1. Podjela pumpi prema mehanizmu izmjene energije [1] .....	4
Slika 2. Dinamičke pumpe [1] .....	5
Slika 3. Centrifugalna pumpa [3] .....	6
Slika 4. Vrste protoka [1] .....	8
Slika 5. Područje primjene centrifugalnih pumpi [1] .....	9
Slika 6. Vrste radnih kola [1].....	11
Slika 7. Q-H krivulja karakteristike centrifugalne pumpe [1].....	13
Slika 8. Krivulje visine, snage, učinkovitosti [1] .....	15
Slika 9. Sustav upravljanja i dijagnostike centrifugalne pumpe [8].....	31

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Modovi kvara centrifugalne pumpe.....	29
--------------------------------------------------	----

## POPIS KRATICA

NPSH engl. <i>Net Positive Suction Height</i>	neto pozitivna usisna visina
NPSE engl. <i>Net Positive Suction Energy</i>	neto pozitivna usisna energija
BEP engl. <i>Best Efficiency Point</i>	optimalna radna točka
ASD engl. <i>Adjustable Speed Drives</i>	pogoni podesive brzine
VSD engl. <i>Variable Frequency Drive</i>	pogon promjenjive frekvencije
PLC engl. <i>Programmable Logic Controller</i>	programabilni logički kontroler
HMI engl. <i>Human-Machine Interface</i>	čovjek-stroj
PTO engl. <i>Power Take-Off</i>	pogoni preko mehaničkog prijenosnika