

**Dr. sc. Ante Bukša / Ph. D.**

Pomorski fakultet u Rijeci / *Faculty of Maritime Studies Rijeka*  
Studenska 2

**Danijel Matić, dipl. ing.**

Brodogradilite Viktor Lenac / *Viktor Lenac Shipyard*  
Martinšćica b.b., P.O. box 210

**Mr. sc. Rikard Miculinić / M. Sc.**

Pomorski fakultet u Rijeci /  
*Faculty of Maritime Studies Rijeka*  
Studenska 2  
Hrvatska / *Croatia*

**Prethodno priopćenje**  
***Preliminary communication***

UDK / *UDC:*

629.5.064.3

629.5.083.4

Primljeno / *Received:*

24. travnja 2012. / *24<sup>th</sup> April 2012*

Odobreno / *Accepted:*

28. svibnja 2012. / *28<sup>th</sup> May 2012*

## **KVAROVI HIDRAULIČNIH SUSTAVA I UREĐAJA BRODSKOG POGONA**

### ***HYDRAULIC SYSTEMS AND EQUIPMENTS FAILURES OF SHIP MACHINERY***

#### **SAŽETAK**

Održavanje brodskog pogona zasniva se na planu održavanja temeljenog na podacima dobivenim od proizvođača. Najveća se pažnja posvećuje održavanju komponenti brodskih sustava koje su značajne za sigurnost i operaciju. Brodski hidraulični sustavi i uređaji nisu značajni za sigurnost i operaciju brodskog pogona te se najčešće izostavljaju iz periodičnih sustavnih pregleda. Iz toga razloga u ovome su radu prikazani neki od kvarova hidrauličnih sustava i uređaja te način njihovog otklanjanja. Uzroci nastajanja kvarova hidrauličnih sustava uglavnom mogu biti: konstrukcijski, proizvodni i eksploatacijski. Pojava buke, visoke temperature fluida i pad snage u brodskom hidrauličnom sustavu su međusobno povezane pojave koje dovode do kvara. Prikazana su oštećenja klipova aksijalno-klipnog hidrauličnog stroja nastala uslijed pada viskoznosti ispod graničnih vrijednosti. Kako bi se smanjio nastanak kvarova preporučuje se ugradnja alarma visoke temperature i shut down sustava. Prijedlog autora je da se optimizacija troškova održavanja brodskih hidrauličnih sustava brodskog pogona može postići boljom edukacijom i organizacijom posade u svrhu efikasnijeg otklanjanja kvara.

**Ključne riječi:** brodski pogon, održavanje, kvarovi, brodski hidraulični sustavi i uređaji

#### **SUMMARY**

Maintenance of the ship machinery is based on the maintenance plan built on data supplied by the manufacturer. The greatest attention is oriented towards maintaining the components of marine systems that are of great significance for safety and operation. Marine hydraulic systems and equipments are not important for the safety and operation of the ship machinery and are usually omitted from the periodic systematic review. For this reason, this paper presents some of the failures of the hydraulic systems and equipments and the ways of correcting them. The main causes of the hydraulic systems failures can generally be: design, production and exploitation. The appearance of noise, high fluid temperature and power decrease in the ship's hydraulic system are interrelated phenomena that lead to failure. As it is displayed, damages of pistons of the axial-piston hydraulic machine appear due to the viscosity decrease below the limiting values. The installation of high temperature alarms and shutdown systems is proposed to reduce the occurrence of failures. The author suggest that optimization of the maintenance costs of the marine hydraulic systems of the ship machinery can be achieved through better education and organization of the crew in order to eliminate the abrupt more effectively.

**Key words:** ship machinery, maintenance, failures, marine hydraulic equipments and systems

## 1. UVOD

Svrha suvremenog održavanja brodskog pogona je održati projektiranu pouzdanost, raspoloživost i stupanj korisnog djelovanja uz što manje troškove. Od pravilnog održavanja brodskih sustava zavisi njegov pouzdani dugotrajni rad. Neplanirani zastoji i havarije, koji mogu nastati uslijed neodgovarajućeg održavanja, mogu stvoriti dodatne troškove. Svaki sat zastoja brodovlasniku nosi velike troškove, a zadatak stručnjaka održavanja je učiniti sve da do neočekivanog zastoja ne dođe ili da se vrijeme zastoja smanji. Problemi na koje suvremeno održavanje treba dati odgovore sve su brojniji i složeniji, te se zahtijeva znanstveni pristup njihovom rješavanju.

Komponentama brodskih sustava koje su značajne za sigurnost i operaciju brodskog pogona posvećuje se najveća pažnja u održavanju. Prema [1] komponente značajne za sigurnost SSI (Safety Significant Items) sastoje se od komponenata kritične funkcije sigurnosti SF (Safety Function), sigurnosnog procesa SP (Safety Process) i nadzora sigurnosti SK (Safety Keeping). Komponente značajne za operaciju OSI (Operation Significant Items) obuhvaćaju opremu čiji kvar može imati direktni udar na operativne troškove.

Brodski hidraulični sustavi su složeni tehnički sustavi kojima tijekom eksploatacije niz čimbenika ugrožava pouzdani i dugotrajni rad, a njihovo održavanje temelji se na planu održavanja zasnovanog na podacima dobivenim od proizvođača. Komponente hidrauličnih sustava i uređaja nisu značajne za sigurnost i operaciju brodskog pogona te se izostavljaju iz periodičnih sustavnih pregleda, kako posade broda i predstavnika brodovlasnika, tako i predstavnika klasifikacijskih društava. Iz toga razloga cilj je ovoga rada ukazati na kvarove hidrauličnih sustava i uređaja te njihovo otklanjanje.

## 2. ANALIZA KVAROVA I MOGUĆA PREVENCIJA HIDRAULIČNIH SUSTAVA I UREĐAJA BRODSKOG POGONA

Prema [2] kvar se može definirati kao prestanak sposobnosti nekog elementa da izvršava zahtijevanu funkciju. Postoji više kriterija na osnovi kojih se mogu klasificirati kvarovi. Kriteriji za klasifikaciju mogu biti uzrok nastajanja

## 1. INTRODUCTION

The purpose of modern ship machinery maintenance is to keep the projected reliability, availability and the level of yield with the reduced cost. A dependable and long-lasting marine system functioning depends on a proper maintenance. Unplanned outages and disasters that may occur due to improper maintenance can create additional costs. Every hour of delay carries great costs to the ship-owner, and maintenance expert's task is to do everything to prevent unexpected delays and to reduce downtime. Problems to which modern maintenance should provide answers for are numerous and complex and solving them requires a scientific approach.

The greatest attention is directed to the maintenance of marine systems components which are significant for the safety and operation of the ship machinery. According to [1], components important for the safety SSI (Safety Significant Items) consist of the components of the safety critical function SF (Safety Function), of the safety processes SP (Safety Process) and of the safety control SK (Safety Keeping). Components relevant to the OSI operation (Operating Significant Items) include equipments whose failure could have a direct impact on the operational costs.

Marine hydraulic systems are complex technical systems whose reliable and long-term operation is threatened by numerous factors during exploitation and their maintenance is based on a maintenance plan based on the data supplied by the manufacturer. The components of the hydraulic systems and equipments are not relevant to the safety and operation of the ship machinery and are, therefore, omitted from periodical systematic checking of both the ship's crew and the ship-owner representatives, as well as of the representatives of the classification societies. For this reason, this paper aims at pointing out the failures of hydraulic systems and equipments and their elimination.

## 2. FAILURE ANALYSIS AND POSSIBLE SHIP MACHINERY HYDRAULIC SYSTEMS AND EQUIPMENTS PREVENTION

According to [2], failure can be defined as the lack of ability of a certain element to perform a required function. There are several cri-

kvara, intenzitet, vanjska manifestacija (očigledan ili prikriven kvar), veza s drugim kvarovima (zavisni ili nezavisni kvar) itd. U radovima [1...7] prikazana je opća podjela kvarova u zavisnosti od karaktera tipičnih uzroka za tehničke sustave, koji su primjenjivi i za brodske hidraulične sustave. Uzroci nastajanja kvarova hidrauličnih sustava uglavnom su konstrukcijski (direktne pogreške konstruktora), proizvodni (pogreške u izradi i montaži) i eksploatacijski.

Buka, visoka temperatura fluida i pad snage u brodskom hidrauličnom sustavu su pojave koje dovode do funkcionalnog kvara. Pojava buke u hidrauličnom sustavu nastaje kao rezultat ulaska zraka, odnosno prisutnosti mjehurića zraka apsorbiranih u fluidu koji se tlače ili ekspanziraju. Prisutnost zraka ubrzava starenje ulja i uzrokuje oštećenja komponenti sustava, smanjenjem mazivih svojstava, pregrijavanjem i oštećenjem brtvila. Zrak ulazi u hidraulični sustav na pozicijama najnižih tlakova. Posebna pozornost pri održavanju mora se obratiti na spojeve. Kod izmjena ili popravaka elemenata hidrauličnog sustava mora se osigurati dobra dotegnutost svih spojeva. Ulaz zraka je moguć i kroz brtvenicu osovine pumpe ulja, gdje dolazi do pada tlaka i nastajanja mjehurića pare. Međutim, ulaskom fluida s mjehurićima u područje višeg tlaka, nastaje implozija mjehurića i dolazi do oštećenja površina hidrauličnog sustava i stvaranja buke. Ovi simptomi se najčešće pojavljuju u pumpama, posebno ako je na usisnoj liniji pumpe prljav filter.

Temperature fluida iznad 80°C oštećuju brtve što dovodi do ubrzanog starenja radnog fluida. Isto tako, visoka temperatura smanjuje viskoznost potrebnu za adekvatan rad svih komponenti sustava. Da bi se ograničio utjecaj povišenja temperature obično se u sustave ugrađuju alarmi visoke temperature.

Pad snage ili performansi je indikacija postojanja nekih od kvarova u sustavu. Pad snage manifestira se u dužem trajanju radne operacije od uobičajenog vremena. U slučaju pada snage ili smanjene brzine vrtnje hidrauličnog stroja radi se o smanjenom protoku ulja, koji može nastati kao rezultat unutarnjih ili vanjskih propuštanja. Ukoliko se radi o vanjskim propuštanjima relativno se lako uočava lokacija kvara. Unutarnja propuštanja je teže otkriti, te se u tim slučajevima koriste neke od kompleksnijih metoda dijagnostike primjerice radioaktivno ispitivanje ili infracrvene kamere. Unutarnja propuštanja mogu se događati unutar hidrauličnih

terija na basis of which failures can be classified. The criteria for such a classification can be the cause of failure formation, intensity, external manifestation (obvious or concealed failure), relation with other failures (dependent or independent failure), etc. In papers [1...7], a general failure classification is shown depending on the character of the technical systems typical causes, that are also applicable to the marine hydraulic systems. The causes of the hydraulic system failures are mainly of the structural (direct constructors' faults), manufacturing (defects in the design and installation), and exploitation nature.

Noise, high fluid temperature and power decrease in the ship's hydraulic system, are a phenomena that lead to functional failure. The appearance of noise in the hydraulic system is a result of the air entrance, or better yet, the presence of absorbed air bubbles in the fluid that are compressed or expanded. The presence of air accelerates oil aging and causes the systems' component damage by reducing the lubricating properties, overheating and seals damaging. Air enters the hydraulic system on the positions of the lowest pressure. Special attention during maintenance must be paid to pipelines and couplings. All couplings must be well tightened while alternating or repairing hydraulic system elements. The air inlet is possible through the oil pump shaft stuffing box where pressure drop and vapor bubbles are formed. However, the entrance of the fluids with bubbles into a higher pressure area results in an implosion of bubbles and leads to the hydraulic systems' surface damage and noise creation. These symptoms usually appear in pumps, especially if the filter on the pump suction line is filthy.

Fluid temperatures above 80°C damage a seal which leads to an accelerated aging of the working fluid. Likewise, high temperature reduces the viscosity required for a proper operation of all of the systems' components. High temperature alarms are usually built in to limit the impact of the temperature increase.

A power or performance drop is an indication failure in the system. A power drop is manifested in a much longer than standard duration of the working operation. In case of a power drop or a reduced hydraulic machines' rotation speed, a reduced oil flow occurs, as a result of internal or external leakages. When external leakages are concerned, it is relatively easy to note the location of the failure. Internal leakages are more difficult to detect, and in these cases, some of

pumpi, razvodnika, ventila ili motora. Pri propuštanju fluida dolazi do pada tlaka, a istovremeno i do porasta temperature. Buka, povećanje temperature i pad snage su značajke koje su međusobno povezane i utječu jedna na drugu.

Jedna od najvažnijih i najznačajnijih parametara pri radu i opsluživanju hidrauličnih sustava i uređaja je poznavanje radnog temperaturnog raspona. Radna temperatura je obrnuto razmjerna viskoznosti. Smanjenje mazivih svojstava, kao i trošenje dinamičkih komponenti unutar hidrauličnog sustava direktno je ovisno o promjeni viskoznosti.

Da bi održali temperaturu fluida i potrebnu viskoznost između zadanih parametara potrebno je:

- definirati potrebnu temperaturu i viskoznost fluida, odnosno gornju i donju optimalnu i dopuštenu vrijednost u odnosu na temperaturu okoline u kojoj sustav funkcionira
- odabrati odgovarajuće ulja i
- osigurati održavanje zadanih optimalnih i dopuštenih vrijednosti temperature i viskoznosti.

Proizvođači hidraulične opreme određuju dopuštene i potrebne vrijednosti viskoznosti. U tablici 1. prikazane su minimalne i maksimalne optimalne i dopuštene vrijednosti viskoznosti fluida hidrauličnih uređaja. Optimalne vrijednosti viskoznosti se kreću između 36cSt do 16cSt, što odgovara radnoj temperaturi od 55°C do 78°C. Interval dopuštenih vrijednosti je značajno širi, no maksimalni vijek trajanja ležajeva bit će ostvaren ukoliko su radni parametri blizu 25 cSt i 65°C.

the more complex methods, such as radioactive diagnostic tests or infrared cameras, are used. Internal leakages can occur inside hydraulic pumps, cursors, valves or motors. During the fluid leakage, pressure drop and temperature rise can occur at the same time. Noise, temperature rise and power fall are features that are simultaneously interrelated and influence each other.

One of the most important and the most significant parameters during the hydraulic systems and equipments operation and servicing is to know the operating temperature range. The operating temperature is inversely proportional to viscosity. Reducing the lubricating properties, as well as the dynamic components wear off within the hydraulic system is directly dependent on the change in viscosity.

To maintain the fluid temperature and the required viscosity between the specified parameters, it is necessary to:

- define the required temperature and fluid viscosity, i.e. the upper and lower optimum and permissible value in relation to the ambient temperature in which the system operates,
- choose the right oil and
- ensure the maintenance of the given optimum and permissible values of temperature and viscosity.

The hydraulic equipment manufacturers establish permissible and required viscosity values. Table 1 shows the minimum and maximum optimum and permissible viscosity fluid values of hydraulic machines. The optimum viscosity values range between 36 cSt and 16 cSt, which corresponds to the operating temperature ranging from 55°C to 78°C.

**Tablica 1.** Područje viskoznosti fluida od minimalne do maksimalne dopuštene vrijednosti [8]

**Table 1** Area of fluid viscosity ranging from minimum to maximum permissible values [8]

Vrijednost viskoziteta <i>Value of viscosity</i>	cSt	Temperatura <i>Temperature</i>
Minimalna dopuštena <i>Minimum permissible</i>	10	95 °C
Minimalna optimalna <i>Minimum optimum</i>	16	78 °C
Optimalni vijek trajanja ležaja <i>Optimum bearing life</i>	25	65 °C
Maksimalna optimalna <i>Maximum optimum</i>	36	55 °C
Maksimalna dopuštena <i>Maximum permissible</i>	1,000	2 °C



Smanjenje nastanaka kvarova i oštećenja, kao posljedica prekoračenja područja minimalnih i maksimalnih vrijednosti viskoznosti i temperature, može se postići monitoringom i ugradnjom odgovarajućih elemenata automatske regulacije, npr.:

- alarma visoke temperature pri kojoj viskoznost pada ili raste izvan optimalnih vrijednosti
- zaustavljanje sustava pri visokoj temperaturi uslijed koje viskoznost pada izvan dopuštene vrijednosti
- zaustavljanje sustava pri niskoj temperaturi uslijed koje prelazi maksimalnu vrijednost viskoznosti.

U tablici 1. vidimo raspone minimuma i maksimuma optimalnih i dopuštenih vrijednosti viskoznosti. To znači da hidraulični fluid tijekom operacije ima promjenljivu viskoznost u ovisnosti o temperaturi. U slučajevima značajnijih zagrijavanja fluida može doći do pada viskoznosti na opasnu razinu ispod minimalne dopuštene vrijednosti, a s time i do mogućih značajnijih oštećenja unutar hidrosustava. Sustav u takvim okolnostima mora imati mogućnost brzog odgovora i na eventualne poremećaje i brzo reagirati.

Na slici 1. prikazana su oštećenja klipova aksijalno-klipnog hidrauličnog stroja koja su nastala uslijed pada vrijednosti viskoznosti ispod donje granične vrijednosti. Zlatna boja naslaga vidljivih na tijelu hidrauličnog stroja su dokaz da je fluid radio na višim temperaturama od

The interval of permissible values is significantly wider, but the maximum bearing life will be achieved if the operating parameters are close to 25 cSt and 65°C.

The reduction of failures and damages, as a result of exceeding the area of the minimum and maximum viscosity and temperature values, can be achieved by monitoring and installing appropriate elements of automatic regulation, e.g.:

- high temperature alarms which influence the viscosity decrease or increase beyond optimum values,
- system blockage at a high temperature which influences the viscosity to fall beyond permissible values,
- system blockage at a low temperature at which it exceeds the maximum value of viscosity.

Table 1 shows the minimum and maximum ranges, optimum and permissible viscosity values. This means that the hydraulic fluid during operation has a variable viscosity depending on the temperature. A dangerous level, below the minimum permissible value, can be reached in case of a significant fluid heating which can lead to possible significant damages within the hydro-system. In such circumstances, the system must be able to act rapidly to eventual disruptions and to react quickly.

Figure 1 shows piston damages of an axial-piston hydraulic machine, which appeared during the viscosity value drop below the lower limit value. Gold paint layers, visible on the body of the hydraulic machine, are the proof



**Slika 1.** Oštećenje klipova aksijalno-klipnog hidrauličnog stroja [9]  
**Figure 1** Damage to pistons of the axial-piston hydraulic machines [9]



**Slika 2.** Odvajanje klipa od čahure [10]  
**Figure 2** Separation of the piston from the sleeve bearing [10]

svog dopuštenog područja. Uslijed visokih temperatura i pada viskoznosti ulja izvan dopuštenih granica, između klipova i stijenki cilindra pojavljuje se veće trenje, koje ima za posljedicu zaribavanja klipova u cilindrima, što je dovelo do lomova klipova na svojim najslabijim točkama.

Ugradnjom alarma i logike za isključivanje sustava može se utjecati na rano uočavanje nepravilnosti i sprječavanje havarije.

Kontrola radne temperature zahtijeva poznavanje temperaturnog raspona u kojem sustav smije raditi. Ugradnjom alarma operaterima je olakšano uočavanje kritičnog stanja u slučajevima promjene temperature izvan dopuštenih granica.

Na slici 2. prikazan je klip s deformiranom čahurom koja se odvojila od klipa hidraulične pumpe. Izdvajanje čahure od klipa dolazi uslijed povećanja vakuuma u usisnom vodu i dinamički promjenjivog vlačnog opterećenja. U ovom slučaju, kada dođe do odvajanja klizača s čahurom od čela klipa zbog visokog tlaka fluida na izlazu iz pumpe, dolazi do kvara sa značajnim oštećenjima čitave pumpe. Obično su aksijalno-klipni strojevi s nagibnim rotorom nešto otporniji na udarna opterećenja.

Zbog relativno visoke specifične snage, aksijalno-klipni hidraulični strojevi imaju široku primjenu. Odlikuju se kompaktnom konstrukcijom, visokim radnim tlakom, velikim rasponom kapaciteta i pogodnom konstrukcijom za primjenu sustava za upravljanje kapacitetom i smjerom rotacije. Proizvode se kao pumpe i motori, pri čemu su pumpe najčešće u podesivoj izvedbi. Motori se izvode podjednako u podesivoj i nepodesivoj varijanti. Dije se na: aksijalno-klipne strojeve s nagibnom pločom i aksijalno-klipne strojeve s nagibnim rotorom.

that fluid was working at higher temperatures than that of its optimum and permissible area. A more intensive friction, outside the permissible limits, is formed between the piston and the cylinder plate due to high temperatures and oil viscosity drop, resulting in the seizure of pistons in the cylinder and thus leading to piston fractures at their weakest points.

The installation of alarms and shut down system logic can have an influence on the early detection of irregularities and on the prevention of averages.

To control the operating temperature requires a good knowledge of the temperature range which the system is allowed to work in. By installing the alarm, the detection of a critical situation is made much easier for the operators in case of a change in the temperature beyond permissible limits.

Figure 2 shows a piston with a deformed sleeve bearing that has been separated from the hydraulic piston pump. The separation of the piston sleeve occurs due to the vacuum increase in the suction line and to the dynamically varying tensile load. In this case, when the separation of the slider with a cocoon from the piston forehead due to high fluid pressure at the pump outlet occurs, a failure with significant damages to the whole pump is the result. Usually, the axial-piston machines with rotor tilting are somewhat more resistant to impact loads.

Because of the relatively high specific power, the axial-piston hydraulic machines are widely used. They feature in a compact design, high operating pressure, a wide range of capacities and structure suitable for the implementation of the capacity and rotation direction management system. They are manufactured as pumps and motors, where the pumps are usually produced in

Obje su konstrukcije u biti slične i sastoje se od kućišta u kojem rotiraju i u kojem se uzduž osi rotacije nalaze cilindri s pripadnim klipovima. Kao i kod radijalno-klipnih strojeva, radi izbjegavanja mrtvog položaja konstruira se stroj s neparnim brojem cilindara. Spomenuti aksijalno-klipni hidraulični strojevi našli su veliku primjenu u brodskom pogonu, primjerice kod Framo sustava [11..13].

Zupčaste pumpe su najmanje osjetljive na pojavu prevelikog vakuuma na usisnoj strani pumpe. Unatoč toj činjenici dokazano je da uslijed onečišćenja usisnog filtra te pojavom povećanog vakuuma, dolazi do ubrzane oksidacije ulja.

U mnogim hidrauličnim sustavima postoje usisni filtri dovoljno grube finoće tako da ne dolazi do značajnijeg pada tlaka. Uz filter mora biti i paralelni obilazni cjevovod s nepovratnim ventilom kako bi spriječio pad tlaka i otežano strujanje u slučaju jačeg onečišćenja filtra.

Pad performansi hidrauličnih strojeva je znak da nešto nije u redu s radom sustava (npr. hidraulični motor sporije radi). Propuštanje ulja unutar hidrauličnog sustava direktno utječe na brzinu vrtnje, a onda i na snagu hidrauličnog motora. Protok fluida unutar hidrauličnog sustava može biti smanjen uslijed vanjskih i unutarnjih propuštanja. Unutarnja propuštanja, kao što je prije spomenuto, mogu se odvijati unutar pumpi, motora, razvodnih ventila te ih je zbog toga mnogo teže pronaći.

U praksi se ulja najčešće mijenjaju prema radnim satima. Bilo bi potrebno i ekonomski isplativo vršiti analizu hidrauličnog ulja i prema rezultatima analize definirati je li ulje za izmjenu ili ne. Situacija je uglavnom slična i s izmjenama filtarskih uložaka. Ukoliko se filtarski uložak mijenja na osnovi radnih sati, najvjerojatnije će se dogoditi prerana ili prekasna izmjena. Ukoliko prerano izmijenimo filtarski uložak, bezrazložno trošimo novac, a da filtarski uložak nije još dovoljno zaprljan koliko bi mogao biti, te i dalje vrši svoju funkciju. Prekasnim izmjenama fluida dopuštamo nečistoćama da vrše svoj negativan utjecaj na sustav.

Važni koraci za nadzor i prevencije brodskih hidrauličnih sustava uređaja su:

1. Korištenje infracrvenih termometara, s obzirom da se tako lako nadziru sve potrebne točke unutar sustava. Za nadzor odabiremo pozicije koje inače nisu lako dostupne.

an adjustable version. Motors are produced both in the adjustable and non adjustable version. They are divided into: axial-piston machines with tilting plate and axial-piston engines with tilt-rotor. Both structures are essentially similar and they consist of a casing in which they rotate and in which there are cylinders with associated pistons located along the axis of rotation. As in the radial-piston machines, in order to avoid a dead position, a machine with an odd number of cylinders is constructed. The mentioned axial-piston hydraulic machines have found an extensive application in the ship's propulsion, for example in the Framo system [11..13].

Gear pumps are the least sensitive to the occurrence of high vacuum on the suction side of the pump. Despite this fact, it has been proven that an accelerated oil oxidation occurs due to the contamination of the suction filter and to the appearance of an increased vacuum.

In many hydraulic systems, there are suction filters of a sufficient coarse fineness so that there is no significant pressure drop. A parallel bypass line with a check valve must be constructed to prevent the pressure drop and a heavier flow in case of greater filter pollution.

The performance drop of hydraulic machines is a sign that something is wrong with the system (e.g., hydraulic motor is slower). The leakage of oil within the hydraulic system directly affects the speed of rotation and then the power of the hydraulic motor. The flow of fluid inside the hydraulic system can be reduced due to external and internal leaks. Internal leakage, as mentioned before, can take place inside the pumps, motors, regulation valves and this makes them harder to find.

In practice, oil is often changed according to the working hours. It would be necessary and economically profitable to analyze the hydraulic oils, and to define whether to change the oil or not according to the results obtained. The situation is mainly similar to the changes of filter cartridges. If the filter cartridge is changed based on the working hours, it is more than likely that a too early or too late change will happen. If the filter cartridge is changed too early, money is uselessly spent, and the filter cartridge is not even dirty enough, as it could be, to still continue performing its function. With too late fluid changes, impurities will perform their negative impact on the system.

2. Oznake stalnih točaka za mjerenje na području spremnika ulja. Važno je voditi računa da očitavanja uvijek budu na istom mjestu.
3. Mjerenje temperature ulja na ulazu i izlazu iz rashladnika ulja.
4. Ugradnja manometra za mjerenje tlaka (mjerenje razlike tlaka na ulazu i izlazu iz filtara).

Određeni broj kvarova i oštećenja na elementima sustava nastaje kao rezultat nepoznavanja, neiskustva, ali i zanemarivanja procedure pri puštanju u pogon, posebice nakon opsežnijih remonta ili većih popravaka.

Pogreške pri uhodavanju ili startanju uređaja obično nastaju kao rezultat kavitacije, prisutnosti zraka ili nedovoljnog podmazivanja. Često se takva oštećenja ne pokazuju odmah, već nakon stotina ili tisuća radnih sati.

Ovisno o vrsti sustava, tipu ugrađene opreme, detaljizirane procedure mogu biti isporučene i od proizvođača. Međutim, za veliku većinu sustava postoje univerzalne procedure koje su svakako temelj za određivanje standarda pri upućivanju.

Stanje komponente hidrauličnih uređaja i sustava mijenja se kao funkcija eksploatacije (Slika 3). Pretpostavlja se da je stanje komponente dobro u trenutku kada je puštena u rad – označeno na slici kao početno stanje. Ono se pogoršava kako se vrijeme eksploatacije povećava, a kada stanje komponente pređe prag upozore-

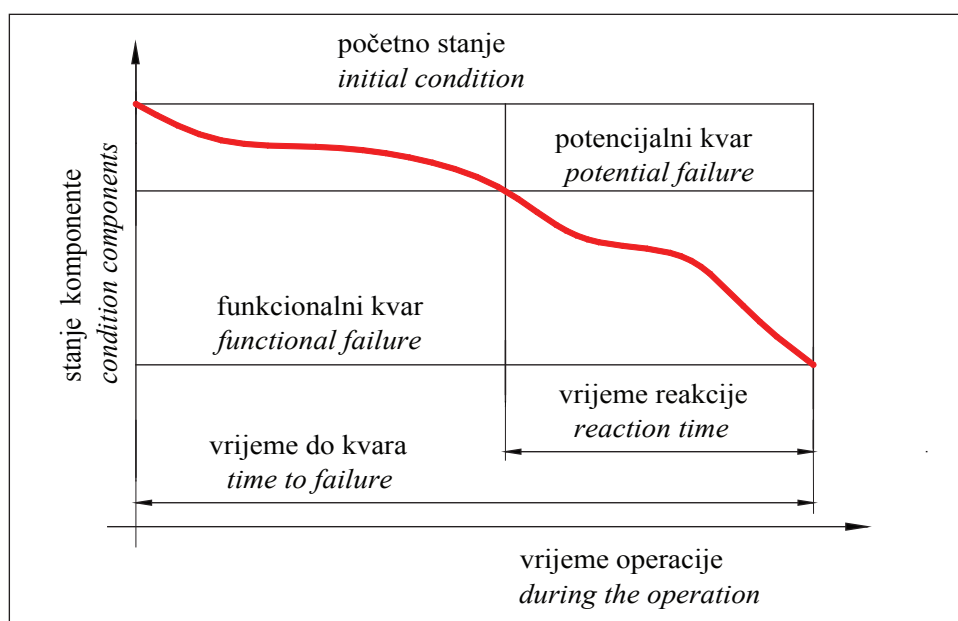
Important steps in the supervision and prevention of marine hydraulic system equipments are:

1. the use of infrared thermometers, as they are so easy to monitor all necessary points within the system. The usually not easily available positions are selected for supervision.
2. fixed points labels for the measurement of the oil tank. It is important to ensure that readings are always in the same place.
3. measuring the oil temperature at the inlet and outlet of oil cooler.
4. installation of a pressure gauge for measuring pressure (pressure differential at the entrance and exit of the filters).

A certain number of failures and damages to system elements occur as a result of ignorance, inexperience, and neglecting the starting procedure, especially after extensive overhaul or major repairs.

Errors during running-in or starting the device usually occur as a result of cavitations, of the presence of air or insufficient lubrication. These damages are often not visible immediately, but after hundreds or thousands of working hours.

Depending on the type of the system, type of the equipment installed, detailed procedures can be delivered from the manufacturer. However, for most systems, universal procedures exist that are certainly the basis for determining standards at running-in.



Slika 3. Stanje komponente  
Figure 3 Components condition



**Tablica 2.** Odnos između predvidljivosti i zakona kvara [1]  
**Table 2** Relation between predictability and law of failure [1]

Stopa hazarda <i>The hazard rate</i>	Opis <i>Description</i>	Predvidljivost <i>Predictability</i>
DFR /CFR	FMCC <sup>2</sup> sa smanjujućom ili konstantnom stopom kvara <i>FMCC with a declining or constant failure rate</i>	nikakva ( $p = 0$ ) null ( $p = 0$ )
IFR	FMCC pokazuje povećavajuću stopu kvara <i>FMCC shows an increasing failure rate</i>	niska ( $0 < p < 0,5$ ) low ( $0 < p < 0,5$ )
Značajni IFR Significant IFR	FMCC pokazuje značajno povećavajuću stopu kvara <i>FMCC shows a significantly increasing rate of failure</i>	visoka ( $0.5 \leq p \leq 1$ ) high ( $0.5 \leq p \leq 1$ )

nja, zvan potencijalni prag, to je znak za početak kvara. Kada stanje performansi padne ispod korektnog funkcioniranja (na slici označeno kao otkazno stanje), događa se funkcionalni kvar. Ako se ne primijeni kontinuirani monitoring stanja, nemoguće je odrediti točno vrijeme potencijalnog ili funkcionalnog kvara. Da bi se odredio stupanj pogoršanja i vrijeme reakcije, potrebno je ugraditi jedan sofisticirani sustav dijagnostike stanja, ali troškovi bi bili visoki. Upravo zbog toga poželjno je pogoršanje stanja pratiti putem inspekcije, koja se postiže koristeći očekivano vrijeme reakcije, što se može procijeniti u konzultacijama s ekspertima.

Predvidljivost ( $p$ ) kvara komponenata hidrauličnih uređaja se definira prema (1) u intervalu od (0,1). Predvidljivost pokazuje kako je moguće predvidjeti vrijeme do kvara ili vrijeme između kvarova. Predvidljivost ovisi o srednjem vremenu između kvarova MTBF<sup>1</sup> i standardnoj devijaciji  $\sigma$  [1].

$$p = \begin{cases} 1 - \frac{\sigma}{MTBF}; \sigma < MTBF \\ 0; \sigma = MTBF \end{cases}, \quad (1)$$

The condition of hydraulic equipments components and systems is changing as a function of exploitation (Figure 3). It is assumed that the components are in a good condition at the time of putting into operation, indicated in the figure as an initial condition. It gets worse as the time of exploitation increases, and when the state of a component exceeds the warning threshold called the potential threshold, that is a sign of an early failure. When the performance falls below the state of a correct functioning (marked as normal condition on figure 3), a functional failure occurs. If there is no continuous monitoring, it is impossible to determine the exact time of a potential or functional failure. To determine the degree of deterioration and the reaction time, it is necessary to incorporate a sophisticated diagnostics system, and the cost would be high. Therefore, it is advisable to monitor the deterioration through inspection, which is achieved by using the expected reaction time, which can be assessed in consultation with experts.

The predictability ( $p$ ) of the hydraulic devices components failure can be defined by (1) in the interval of (0,1). Predictability shows that it is possible to predict time until failure or time between failures. Predictability depends on the Mean Time between Failures MTBF<sup>1</sup> and the standard deviation  $\sigma$  [1].

$$p = \begin{cases} 1 - \frac{\sigma}{MTBF}; \sigma < MTBF \\ 0; \sigma = MTBF \end{cases}, \quad (1)$$

<sup>1</sup> Srednje vrijeme između kvarova MTBF (Mean Time Between Failures) primjenjuje se za komponente koje se mogu popraviti (BS 4778).

<sup>2</sup> Kombinacija mod kvara/uzrok FMCC (Failure Mode/Cause Combinations). Mod kvara predstavlja odstupanja od specifikacije na najnižoj razini funkcionalnog rastavljanja. Npr. trošenje, blokiranje, zaglavlivanje, labavljenje, gubitak geometrije, savijanje, lomovi, pukotine itd.

<sup>1</sup> Mean time between failures MTBF is applied to components that can be repaired (BS 4778).

<sup>2</sup> The Failure Mode/Cause Combination (FMCC). The mode of failure is a deviation from the specification at the functional decomposition lowest level. For example: wear and tear, freezing, jams, loosening, loss of geometry, bending, cracks, crevices, etc.

Predvidljivost kvara također pokazuje je li stopa kvara u padu DFR<sup>3</sup>, konstantna CFR<sup>4</sup> ili se povećava IFR<sup>5</sup> (Tablica 2), odnosno je li ponašanje kvara prikladno da bi bilo kontrolirano pomoću periodičnih akcija. Ako je stopa kvara u padu ili konstantna, predvidljivost je nikakva, periodično održavanje je neefikasno u takvim slučajevima. Periodično preventivno održavanje može se izabrati u slučaju visoke predvidljivosti, koja odgovara Weibullovoj raspodjeli s parametrom oblika  $\beta \geq 2$ . Odnos između parametra oblika  $\beta$  i predvidljivosti  $p$  prikazana je u tablici 3.

Parametar oblika  $\beta$  Weibullove raspodjele ima pozitivnu vrijednost i određuje oblik funkcije gustoće vjerojatnosti  $f(t)$ . U [14] prikazane su orijentacijske vrijednosti parametra oblika  $\beta$  za strojarsku opremu i komponente. Iz podataka se može uočiti velika razlika između najveće i najmanje vrijednosti parametara, npr. za vijak  $\beta = 0,5 \dots 10$ , a predlaže se  $\beta = 3$ . Predložene vrijednosti parametra oblika za komponente kreću se od  $\beta = 1$  (košuljica ležaja, magnetske spojke) do  $\beta \approx 2,5$  (vijci, zupčane spojke, hidraulični cilindri, pumpe), dok za instrumente  $\beta \approx 1$ . Iz podataka proizlazi da se pravi odgovor za stanje hidrauličnih sustava i uređaja može dobiti samo *snimanjem hidraulične opreme za vrijeme eksploatacije*. To govori da krivulja kade na svom srednjem dijelu ne pokriva kvarove elemenata hidrauličnih uređaja i sustava, osim za elektroničke uređaje.

Parametar  $t_0$  je *pomak ili parametar ulaza* (Threshold Parameter), a katkada se zove *zagarantirano vrijeme* (Guarantee Time), *vrijeme slobodno za kvar* (Failure-Free-Time) ili *minimalni vijek* (Minimum Life) [15]. Ako je  $t_0 > 0$ , onda je početak funkcije gustoće vjerojatnosti  $f(t)$  (Weibull PDF- Probability Density Function) za  $t_0$  desno od ishodišta. Slučaj  $t_0 > 0$  po-

The predictability of failure also indicates whether a failure rate is decreasing DFR<sup>3</sup>, whether it is constant CFR<sup>4</sup> or whether it is increasing IFR<sup>5</sup> (Table 2), or whether the behavior of failure is appropriate to be controlled by means of periodic actions. If the failure rate is decreasing or constant, the predictability is low, and the periodic maintenance is inefficient in such cases. The periodic preventive maintenance can be selected in case of a high predictability which corresponds to the Weibull distribution with a parameter of type  $\beta \geq 2$ . The relation between parameter type  $\beta$  and predictability  $p$  is shown in Table 3.

The parameter of type  $\beta$  of the Weibull distribution has a positive value and determines the shape of the density function probability  $f(t)$ . In [14] the recommended values for the  $\beta$  type parameter for mechanical equipment and components are shown. A great difference between the maximum and minimum value of the parameters can be seen from the data, e.g. for screw  $\beta = 0.5 \dots 10$ , while  $\beta = 3$  is suggested.

The proposed values of the components shape parameter range from  $\beta = 1$  (sleeve bearing, magnetic coupling) to  $\beta \approx 2.5(3)$  (screws, gear couplings, hydraulic cylinders, pumps), and for the instruments  $\beta \approx 1(1.1)$ . The data have shown that a right answer for the state of hydraulic systems and devices can be obtained only by *recording the hydraulic equipment during exploitation*. This suggests that the curve in its middle part does not cover failures of the elements of hydraulic devices and systems, except for electronic instruments.

The parameter  $t_0$  is a *shift or input parameter* (Threshold Parameter), sometimes called guarantee time (Guarantee Time), *failure free time* (Failure-free Time) or minimum expectancy (Minimum Life) [15]. If  $t_0 > 0$ , then the beginning of the probability density function is  $f(t)$

<sup>3</sup> Smanjenje stope kvara DFR (Decreasing Failure Rate) karakterizira *burn-in* kvarove. Novi uređaj u početku operacije može zakazati relativno brzo zbog pogrešaka u dizajnu, izradi ili montaži. Ako komponenta prođe ovo razdoblje, smatramo da nema očitih pogrešaka. *Burn-in* razdoblje se često provodi u tvornici (pokus sa strojem). O *burn-in* kvarovima se brine mo za vrijeme garancije. Hazardna stopa pada. Procijenjeni  $\beta = 0,3 \rightarrow (1)$ .

<sup>4</sup> Konstantna stopa kvara CFR (Constant Failure Rate) karakterizira koristan radni vijek. Nema značajne promjene u stopi kvara. Slučajni kvarovi u ovom razdoblju nastaju zbog visoke temperature, vibracije ili opterećenja. Procijenjeni parametar oblika  $\beta = 1$ .

<sup>5</sup> Povećavajuća stopa kvara IFR (Increasing Failure Rate) karakterizira kvarove zbog procesa pogoršanja (starenja). Stopa hazarda raste, a procijenjeni parametar oblika iznosi  $\beta = 1) \rightarrow 2$ .

<sup>3</sup> The Decreasing Failure Rate (DFR) is characterized by burn-in failures. A new device at the beginning of the operation may fail relatively quickly due to errors in the design, manufacture or assembly. If the component passes this period, we believe that there are no evident errors. The burn-in period is often performed at the factory (experiments with the machine). The care of *burn-in* failures is taken during the warranty period. Hazard ratio falls. Estimated  $\beta = 0.3 \rightarrow (1)$ .

<sup>4</sup> The Constant Failure Rate CFR is characterized by a useful workspan. There are no significant changes in the rate of failure. Random failures occur in this period due to high temperature, vibration or load. The estimated shape parameter  $\beta = 1$ .

<sup>5</sup> The Increasing Failure Rate (IFR) is characterized by failures due to the deterioration process (aging). The hazard rate increases and the estimated shape parameter is  $\beta = 1) \rightarrow 2$ .

**Tablica 3.** Odnos između parametra oblika  $\beta$  i predvidljivosti  $p$  [1]**Table 3** The relationship between the shape parameter  $\beta$  and the predictability  $p$  [1]

$\beta$	$P$	
$0 < \beta < 1$	null : 0	
$1 < \beta < 2$	low: 0) $\rightarrow \cong 0.5$ (0.48)	For $t_0 = 0$
$2 \leq \beta$	high: 0.5 $\rightarrow 1$	

kazuje da ne može doći do kvara dok ne prođe neko vrijeme. Zbog toga se  $t_0$  zove parametar garancije (Guarantee Parameter). Predviđanja minimalnog vijeka mogu se dobiti kroz intervjue s ekspertima. Međutim, kako su slučajni kvarovi prisutni tijekom cijelog rada sustava, a odgovori eksperata su uglavnom nesigurni, može se sa sigurnošću pisati da je  $t_0 = 0$ .

Tri karakteristična primjera funkcija gustoće vjerojatnosti prikazana su na slici 4. Krivulja A je raspodjela vremena do kvara s uskom disperzijom raspodjele. Ovo znači da se može postići visoka pouzdanost kod predviđanja vremena do kvara. Krivulja B pokazuje širu raspodjelu, krivulja C je slična eksponencijalnoj raspodjeli gdje nije moguće pouzdano predvidjeti vrijeme do kvara.

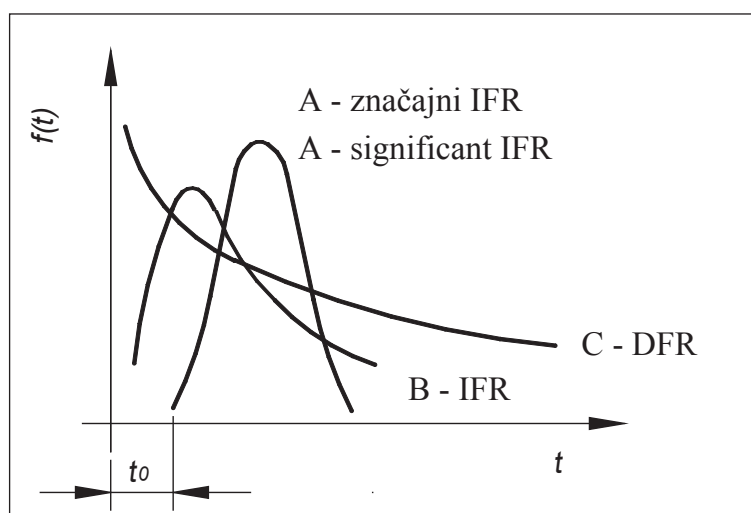
Značenje učinka kvara komponenti hidrauličnih uređaja i sustava može biti smanjeno modifikacijom instalirane komponente. Promjena geometrije instalirane komponente mijenja ponašanje kvara, a može rezultirati različitim učincima kvara i različitim značajem.

Predvidljivost ( $p$ ) u analizi rizika kvara pokazuje je li ponašanje kvara prikladno da bi bilo

(Weibull PDF- Probability Density Function)) for  $t_0$  on the right from the starting point. The case  $t_0 > 0$  indicates that there can be no failure until after some period of time. Therefore, the parameter  $t_0$  is called Guarantee Parameter. The predictions of a minimum lifespan can be obtained through interviews with experts. However, as random faults are present throughout the entire running of the system, and the experts' answers are generally uncertain, it is sure enough to note  $t_0 = 0$ .

Three typical examples of the probability density functions are shown in Figure 4. Curve A is the allocation of time up to the failure with narrow distribution dispersion. This means that a high reliability in predicting time up to the failure can be achieved. Curve B shows a wider distribution, the curve C is similar to the exponential distribution where it is not possible to reliably predict the time up to the failure.

The significance of the failure impact of hydraulic equipments and systems components can be reduced by modifying the installed components. By changing the geometry of the installed components, the behavior of failure is changed, but it can also result in different effects of failure and in different character.



**Slika 4.** Karakteristični oblici raspodjele raspona vijeka  
**Figure 4** Typical forms of distribution of the screw lifespan

kontrolirano pomoću periodičnih akcija. Predvidljivost pokazuje mogućnost predviđanja (očekivanja) TBF (Time Between Failure) ili TTF (Time to Failure). Prema [1] ako je učestalost kvara u padu (DFR - Decreasing Failure Rate) ili konstantna (CFR - Constant Failure Rate) predvidljivost je nikakva ( $p = 0$ ,  $\beta \leq 1$  i  $t_0 = 0$ ). Periodično održavanje je neefikasno u takvim slučajevima, stoga se neće dodati nizu efikasnih politika održavanja. Isto tako, ako je predvidljivost niska ( $0 < p \leq 0,5$ ,  $1 < \beta < 2$  i  $t_0 = 0$ ) može se razmotriti periodično preventivno održavanje. Međutim, prikladnije je preventivno održavanje prema stanju (On - Condition PM). Periodično preventivno održavanje (Periodic PM) odabire se u slučaju visoke predvidljivosti (značajno IFR,  $p > 0,5$ ). Visoka predvidljivost odgovara Weibullovom parametru oblika  $\beta \geq 2$ , ako je  $t_0 = 0$ .

### 3. ZAKLJUČAK

Održavanje broskog pogona temelji se na planu održavanja zasnovanog na podacima dobivenim od proizvođača. Od pravilnog održavanja broskog pogona zavisi njegov pouzdani dugotrajni rad. Neplanirani zastoji i havarije, koji mogu nastati uslijed neodgovarajućeg održavanja, stvaraju dodatne troškove. Najveća se pažnja posvećuje održavanju komponenti brodskih sustava koji su značajni za sigurnost i operaciju broskog pogona. Komponente hidrauličnih sustava i uređaja nisu značajne za sigurnost i operaciju broskog pogona te se izostavljaju iz periodičnih sustavnih pregleda, kako posade broda i predstavnika brodovlasnika, tako i predstavnika klasifikacijskih društava. Iz toga razloga potrebno je ukazati na kvarove hidrauličnih sustava i uređaja i njihovo otklanjanje.

Buka, visoka temperatura fluida i pad snage u broskom hidrauličnom sustavu su značajke koje dovode do kvara. Pad snage hidromotora je indikacija da postoji kvar u sustavu. Manifestira se u dužem trajanju radne operacije od uobičajenog vremena ili padom brzine vrtnje hidromotora. Smanjeni protok ulja može nastati kao rezultat unutarnjih ili vanjskih propuštanja. Unutarnja propuštanja mogu se događati unutar hidrauličnih pumpi, razvodnika, ventila ili motora. Pri propuštanju fluida dolazi do pada tlaka, a istovremeno i do porasta temperature. Buka, povećanje temperature i pad snage su

Predictability ( $p$ ) in the risk analysis shows whether the failure is appropriate to be controlled by means of periodic actions. Predictability shows the possibility of prediction (expectation) TBF (Time Between Failure) or TTF (Time To Failure). According to [1], if the failure rate decreases (DFR - Decreasing Failure Rate) or is constant (CFR - Constant Failure Rate) there is no predictability ( $p = 0$ ,  $\beta \leq 1$  and  $t_0 = 0$ ). The periodic maintenance is inefficient in such cases, and, therefore, it will not be added to a series of effective maintenance policies. Furthermore, if the predictability is low ( $0 < p \leq 0,5$ ,  $1 < \beta < 2$  and  $t_0 = 0$ ) a periodic preventive maintenance can be considered. However, preventive maintenance is more appropriate according to the condition (On - Condition PM). The periodic preventive maintenance (Periodic PM) is selected in case of high predictability (IFR significant,  $p > 0,5$ ). High predictability corresponds to Weibull shape parameter  $\beta \geq 2$ , where  $t_0 = 0$ .

### 3. CONCLUSION

Maintenance of the ship machinery is based on a maintenance plan based on the data supplied by the manufacturer. A reliable long-term operation of the ship machinery depends on its regular maintenance. Unplanned outages and disasters that may occur due to improper maintenance create additional costs. The greatest attention is paid to maintaining the components of marine systems that are important for the safety and operation of the ship machinery. The components of hydraulic systems and equipments are not relevant to the safety and operation of the ship machinery and are omitted from the periodic systematic checkups of the ship's crew and the ship-owner representatives, as well as representatives of the classification societies. For this reason, it is necessary to point out the failures of hydraulic systems and equipments and eliminate them.

Noise, high fluid temperature and power drop in the ship's hydraulic system are features that lead to failure. Drop in hydro power is an indication that there is a failure in the system. It is manifested by a longer duration of the working operation from the usual time or by the decrease in the speed of the hydraulic motor rotation. A reduced oil flow can occur as a result of the internal or external leakage. Internal leakage can occur within a hydraulic pump, slide valve, valve or motor. Fluid leakage simul-



značajke koje su međusobno povezane i utječu jedna na drugu. Zbog utjecaja povišene temperature potrebno je u hidraulične sustave ugraditi alarme visoke temperature.

Optimizacija troškova brodskih hidrauličnih uređaja i sustava može se postići boljom edukacijom i organizacijom posade u svrhu efikasnijeg otklanjanja kvara. Povremeno podešavanje intervala održavanja u realnoj situaciji ili eksploataciji, doprinosi smanjenju troškova u životnom ciklusu. Od strane brodarka, odnosno operatera hidrauličnih uređaja i sustava također bi bilo potrebno kroz analizu zastoja (evidentiranih ciklusa kvarova), vremena rada i stajanja (vrijeme remonta) doći do najjednostavnijeg principa održavanja.

taneously leads to a pressure drop and temperature rise. Noise, temperature increase and power drop are features that are interrelated and influence each other. Due to the influence of elevated temperatures, high-temperature alarms should be incorporated in hydraulic systems.

Cost optimization of marine hydraulic equipments and systems can be achieved through better education, training and organization of the crew to eliminate the failure more effectively. Periodic maintenance interval adjustment in a real situation or exploitation contributes to reducing costs in a lifetime cycle. On the part of the ship-owner and the hydraulic equipments and systems operator, it would also be necessary to analyze the deadlock (recorded failure cycles), operational time, idle lying time (repair time) in order to get to the simplest principles of maintenance.

## LITERATURA / REFERENCES

- [1] Vučinić, B., *MA – CAD*, Maintenance Concept Adjustment and Design, Delft, Faculty of Mechanical Engineering and Marine Technology, 1994.
- [2] Majdandžić N., *Strategija održavanja i informacijski sustavi održavanja*, Slavonski Brod, Strojarski fakultet, 1999.
- [3] Šegulja I., A. Bukša, V. Tomas, *Održavanje brodskih sustava*, Rijeka, Sveučilišta u Rijeci, 2009.
- [4] Lovrić, J., *Osnove brodske terotehnologije*, Dubrovnik, Pomorski fakultet, 1989.
- [5] Sabastijanović, S., *Osnove održavanja strojarских konstrukcija*, Slavonski Brod, Strojarski fakultet, 2002.
- [7] Šegulja I., A. Bukša, *Održavanje broskog pogona*, Pomorstvo, 20 (2006), 2, str. 106 – 108.
- [8] Operating Manual for Cargo Winches and Lifting Gear, Hagglunds Drives AB, SE-890 42 Mellansel, Sweden
- [9] <http://www.machinerylubrication.com/Read/1061/hydraulic-fluid>
- [10] <http://www.machinerylubrication.com/Read/1006/overpressurization-hydraulics>
- [11] [www.framo.com](http://www.framo.com)
- [12] Framo documentation; Type of documentation: Manufacturing Record Book, Framo order no: 612189, Customer: 3 MAJ Shipyard, Project: Hull no. 680
- [13] Framo, Service Manual, Cargo Pumping System, Framo order no: 612237, Hull no. 0446,
- [14] <http://www.barringer1.com/wdbase.htm>
- [15] Chi – Chao Liu, *A Comparison Between the Weibull and Lognormal Used to Analyze Reliability Data*, Department of Manufacturing engineering and Operations, University of Nottingham, 1997.

