

# Obremenjevanje in vzdrževanje industrijskih olj v hidroelektrarnah

Boštjan GREGORC

**Izvleček:** Turbinska olja se zaradi sprememb načina obratovanja v energetskega sistema v zadnjih desetletjih hitreje starajo, kar vpliva na stroške vzdrževanja in na obratovalno nesposobnost v času zamenjave oljne polnitve. Primeren način vzdrževanja in poznavanje mehanizmov staranja olja lahko pripomoreta k podaljšanju intervala časa zamenjave. Prav tako pa s pravilnim vzdrževanjem turbinskih olj vplivamo na manjše število neplaniranih zaustavitev agregatov zaradi nedelovanja regulacijskih in ležajnih sistemov.

**Ključne besede:** hidroelektrarne, regulacija, turbinska olja, meritve

## 1 Uvod

Turbinska olja imajo pri obratovanju hidroelektrarn pomembno vlogo, saj s hidravličnim krmiljenjem turbin in vzpostavljanjem triboloških razmer v ležajih zagotavljamo nemoteno obratovanje sistema. Turbinsko olje se na posameznem agregatu v osnovi uporablja za krmiljenje vodilnih in gonilnih lopat (Kaplanove turbine) ter za mazanje in odvod toplote v treh drsnih ležajih posamezne turbine.

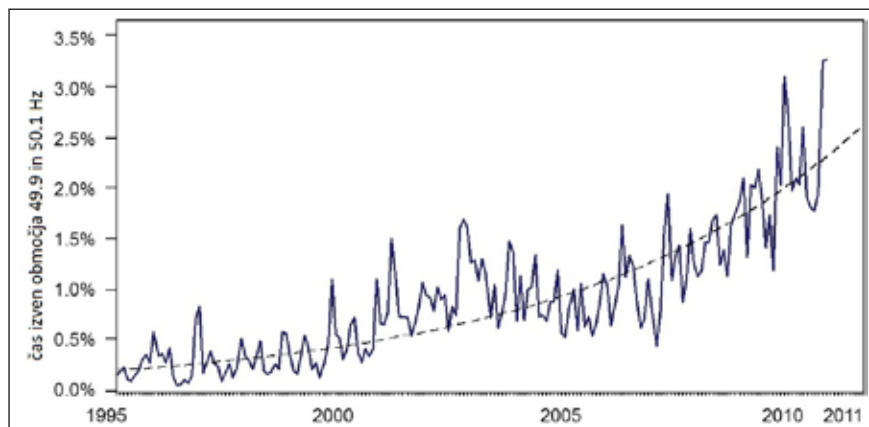
Hidroelektrarne na Dravi se nenehno posodablajo zaradi iztekaajoče se življenjske dobe opreme in nekoliko spremenjenih zahtev po obratovanju. Predvidena življenjska doba turbinske opreme je 40 let. Starejši agregati (grajeni pred letom 1990) so večinoma obratovali s tlaki v regulacijskem sistemu med 30 in 40 bar, kar je posledično vplivalo na večje dimenzije servomotorjev ter prostornine oljnih polnitev. Tako so polnitve za posamezen agregat znašale do 45.000 l turbinskega olja in dosegale življenjsko dobo 40 let. Starejše izvedbe agregatov so imele večje oljne izgube regulacijskih sistemov, saj so uporabljale manj

precizno tehniko regulacije. Obratovanje z agregati je bilo v preteklosti tudi manj dinamično (zagona sekvenca, sprememba moči, število zagonov in zaustavitev agregatov), kar pa se je spremenilo z uvedbo tržnih razmer v elektroenergetskem sistemu (EES).

Novi hidravlični sistemi agregatov v večini uporabljajo sistemski tlak 60 bar (na DEM), zato so se zmanjšale dimenzije servomotorjev in količine oljnih polnitev. Glede na razmere v električnem omrežju se je povečala tudi odzivnost agregatov, kar je prispevalo k dodatnemu povečanju obremenjenosti turbinskih olj. Dodatno obremenjenost olja v regulacijskih sistemih predstavlja tudi primarna regulacija frekvence omrežja, ki jo izvajajo določeni agregati. V skladu z UCTE [1] so postavljene osnovne zahteve za proizvajal-

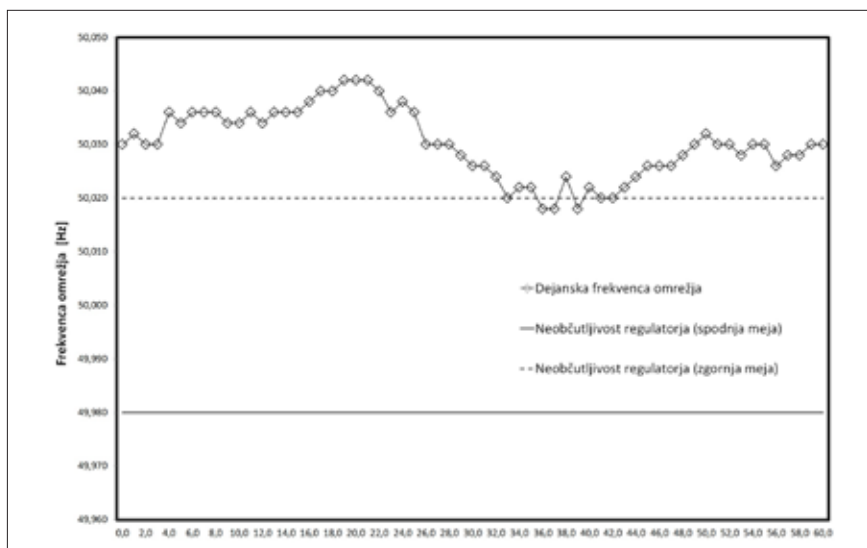
ce električne energije po primarni in sekundarni regulaciji frekvence omrežja. V primeru delujoče primarne regulacije se mora hidravlični regulator odzvati na spremembe mrežne frekvence, večje od  $\pm 20$  mHz (vsota merilne natančnosti frekvence in neobčutljivosti regulatorja). Prav tako pa je definirana statika turbinske regulacije, pri čemer velja za hidroelektrarne 4–5 % [2]. Vsekakor pa bo predstavljala primarna regulacija frekvence problematično delovanje agregatov v naslednjih letih, saj večanje deleža sončne in vetrne energije negativno vpliva na frekvenčne razmere v EES. Na *sliki 1* je prikazano časovno odstopanje frekvence zaradi povečanja razpršenih obnovljivih virov.

Nihanje mrežne frekvence ob predpostavljenih robnih pogojih izrazito



Slika 1. Sprememba povečanja časa odstopanja frekvence (1995–2011) [1]

dr. Boštjan Gregorc, univ. dipl. inž., Dravske elektrarne Maribor, d. o. o., Maribor



**Slika 2.** Odstopanje frekvence (junij 2013)

vpliva na delovanje turbinskih regulatorjev ter na življenjsko dobo hidravličnih komponent in hidravličnega olja. Na *sliki 2* je prikazan interval obratovanja agregata v hidroelektrarni, ko je bila frekvencja omrežja izven območja  $\pm 20$  mHz.

## ■ 2 Obremenjenost turbinskih olj

Pri analizi stanja obremenjenosti turbinskega olja je bila izvedena kratka analiza porabe olja v hidravličnem sistemu agregata hidroelektrarne z imensko močjo turbine 18,3 MW. Vključene so bile meritve oljnih izgub turbinskega regulatorja v primeru obratovanja agregata znotraj

cone primarne regulacije ( $\pm 20$  mHz) in izven omenjenega območja.

Osnovni podatki analiziranega hidravličnega sistema so:

Sistemska tlak:  
 $p_s = 60$  bar

Volumen oljnega rezervoarja:  
 $V_{rez} = 6000$

Neobčutljivost pozicioniranja:  
 $i_y < 0,02$  %

Servomotor – mrtvi čas:  
 $< 0,2$  s

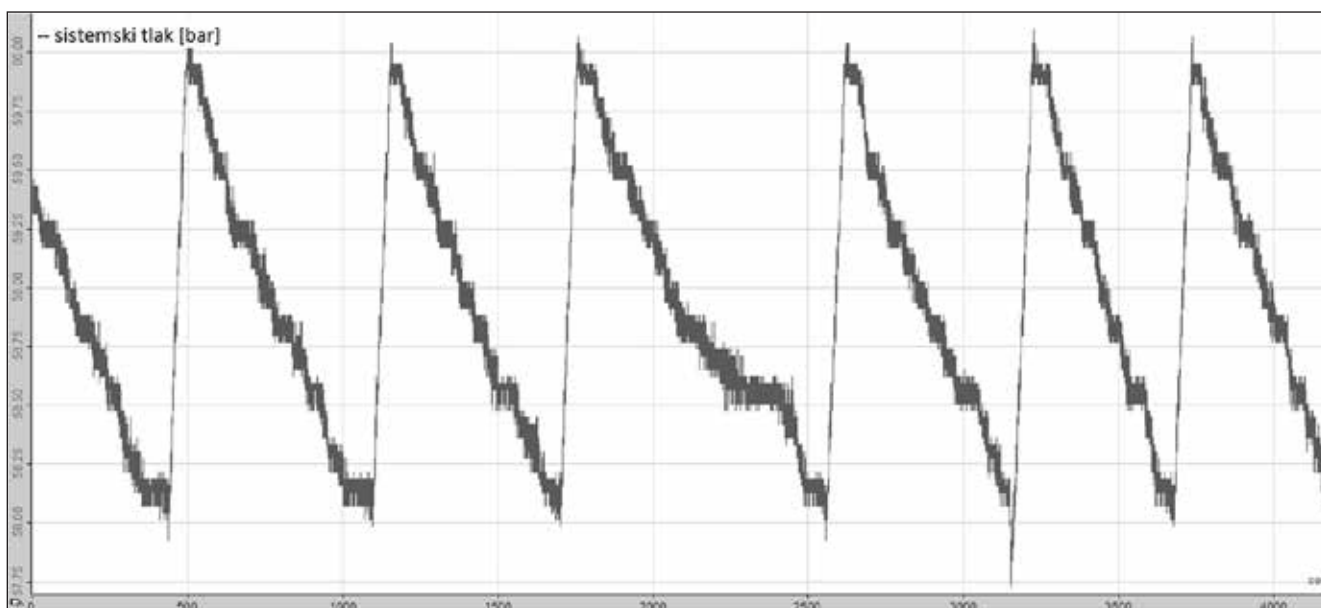
Temperaturno območje obratovanja hidravličnega regulatorja:  
 $25 - 50$  °C

Viskoznost turbinskega olja:  
 ISO VG68 mm<sup>2</sup>/s

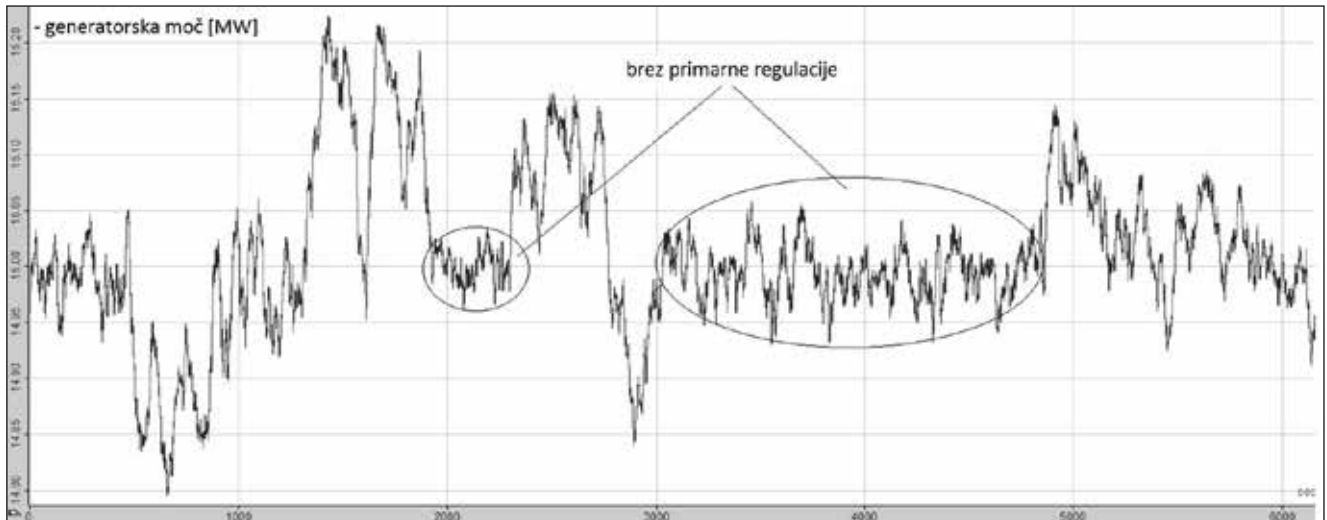
Prikaz porabe olja za regulacijo vodilnih in gonilnih lopat agregata se odraža na padcu sistemskega tlaka. *Slika 3* prikazuje intervale doziranja/porabe turbinskega olja, ko agregat obratuje pretežno v primarni regulaciji.

Na podlagi znanih intervalov nihanja gladin in tlakov v sistemu je ocena cirkulacije oljne polnitve v primeru delovanja primarne regulacije in znaša ok.  $650 \times V_{rez}$ . V primeru manjšega odziva hidravličnega regulatorja na mrežne spremembe ( $> \pm 200$  mHz) je ocena cirkulacije olja v sistemu ok.  $120 \times V_{rez}$ , kar v večini predstavljajo oljne izgube, ter del porabe tlačne energije za regulacijo po moči. Na *sliki 4* je prikazan primer spremembe nihanja generatorske moči zaradi delovanja primarne regulacije.

Vsekakor pa vpliva regulacija Kaplanovih turbin v primeru aktivne primarne regulacije frekvence na hitrejše staranje oljne polnitve in na povečano obrabo krmilnih komponent turbinskega regulatorja. Prav tako se poveča poraba električne energije za delovanje turbinskega regulatorja. S stališča regulacijskih sistemov in odzivnosti so za obratovanje v območju primarne regulacije frekvence primernejše hidroelektrarne s Peltonovimi turbinami.



**Slika 3.** Prikaz dopolnjevanja in porabe turbinskega olja (junij 2013)



**Slika 4.** Prikaz nihanja delovne moči generatorja v primeru delovanja primarne regulacije in v primeru neaktivnosti

### ■ 3 Vzdrževanje turbinskih olj

Uporabnost (življenjska doba) oljne polnitve v regulacijskih in ležajnih sistemih je odvisna od kvalitete turbinskega olja, obratovalnih značilnosti in vzdrževanja. Neizvajanje vzdrževanja zmanjšuje uporabnost turbinskega olja in povečuje nujnost obnove oz. zamenjave hidravličnih in ležajnih sistemov. Pri vzdrževanju turbinskega olja je potrebno posebej paziti na:

- vsebnost nečistoč v olju (delci v olju),
- stanje fizikalno-kemičnih parametrov v posamezni polnitvi,
- vsebnost vode,
- temperaturni režim in penjenje.

#### Nečistoče v olju

Dejavnik, s katerim se izrazito vpliva na podaljšanje oljne polnitve turbinskega olja, je ustrezna čistost olja, ki neposredno vpliva na obrabo hidravličnih komponent. Prav tako nečistoče (vsebnost delcev) negativno vplivajo na fizikalno-kemične

lastnosti olja (povečanje nevtralizacijskega števila). Pri podrobnejšem spremljanju vsebnosti nečistoč v enem letu smo v regulacijskih sistemih zaznali povečanje s 16/14/11 na 21/19/16 (ISO 4406:1999), kar pomeni, da se je v celotni oljni polnitvi agregata z volumnom 10000 l vsebnost nečistoč povečala z 1,5 g na 60 g. Glede na povečano količino nastalih nečistoč v izbranem časovnem intervalu je možno sklepati na povečano obrabo v regulacijskih in ležajnih sistemih (slika 5). Za detekcijo nečistoč v olju je priporočljiva vgradnja merilnikov/indikatorjev nečistoč z on-line grafičnim prikazom.

Glede na podrobno analizo sestave obrabnih kovinskih delcev (železo, baker, cink, ...) in poznavanje vgrajenih komponent v sisteme (metoda PML.07.16) je možno z ustreznimi posegi preprečiti nenapovedane zaustavitve agregatov in posledične stroške.

#### Fizikalno-kemični parametri posamezne polnitve

Za vsako novo oljno polnitev je priporočljivo izvesti fizikalno-kemično

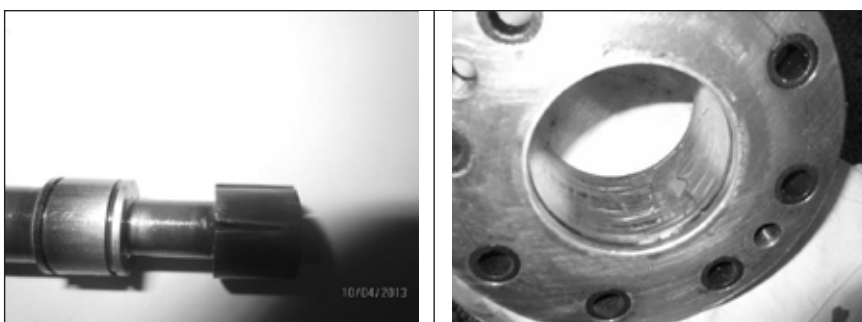
analizo za spremljanje sprememb posameznega parametra [3], [4]. Na podlagi sprememb je možno določiti sprejemljivost oljne polnitve za obratovanje agregata. V okviru laboratorijskih analiz je smiselno spremljati naslednje parametre turbinskega olja:

- barvo,
- nevtralizacijsko število,
- vsebnost antioksidanta,
- obrabne kovine,
- aditive,
- penjenje,
- električno prevodnost,
- MPC,
- RPVOT.

Pogostost izvedbe laboratorijskih analiz za turbinska olja je smiselna v časovnem intervalu 2–3 let, pri čemer je potrebno pogostost analiz povečati ob opaženih spremembah navedenih parametrov. Pogostost vzorčenja je potrebno povečati pri starejših oljnih polnitvah (> 10 let), kjer je smiselno izvajati laboratorijske analize najmanj enkrat letno.

#### Vsebnost vode v turbinskem olju

Vsebnost vode v turbinskem olju negativno vpliva na čas uporabnosti turbinskega olja v rezervoarjih. Voda vpliva na dodane aditivne elemente olja – oksidacija olja – in na nastanek korozije v sistemih. Glede na večletno spremljanje stanja olja in ustrezno preprečevanje vstopa vode v obliki pare ali kapljevine v sistem so normalne vsebnosti vode



**Slika 5.** Prikaz obrabe na krmilnem batu (levo) in na drsnem ležaju (desno)

v hidravličnih sistemih pri temperaturi 40 °C nižje od 40 mg/kg. V primeru vdora vode v sistem (ležajni ali regulacijski) se po odstranitvi deleža vode izrazito zmanjša vsebnost cinka v hidravličnem olju, poveča se penjenje in zmanjša količina antioksidanta. Prav tako se zaradi vode poslabšajo demulzivne lastnosti olja. Ocenjujemo, da vpliv vdora vode v oljne sisteme zmanjša uporabnost olja za ok. 25 % glede na prvotno stanje. Prav tako pa vdori vode povzročajo odpoved krmilnih/izvršilnih ventilov. Še spremenljiva zgornja vrednost vsebnosti vode v turbinskem olju je 100 mg/kg. Vsebnost vode v turbinskem olju je smiselno spremljati z on-line senzorji.

### Temperaturni režim in penjenje

Z vzdrževanjem primerne temperature turbinskega olja v sistemih se čas uporabnosti oljnih polnitvev podaljša. Obratovalna območja olja v rezervoarjih posameznega agregata hidroelektrarn se gibljejo med 30 in 50 °C. Glede na možno regulacijo temperature s pomočjo toplotnih prenosnikov zrak/olje, voda/olje je smiselno vzdrževati temperaturo olja na ok. 40 °C. Z višanjem temperature se hitrost staranja turbinskega olja povečuje.

Penjenje olja se pogosto pojavi zaradi mešanja olja in zraka. Prav tako pa imata na pojav penjenja pomemben vpliv konstrukcija oljnega rezervoarja kot tudi kvaliteta oljne polnitve. Za vse sisteme je najvažnejša hitrost izločanja parne faze iz olja, saj ima slednja pomemben vpliv na vzpostavitev in nosilnost oljnega filma ter na natančnost pozicioniranja krmilnih in regulacijskih elementov (stisljivost olja!). Penjenje turbinskega olja narašča s starostjo oljne polnitve rezervoarjev. Glede na večletno spremljanje stanja penjenja olja je za obratovanje še sprejemljiva vrednost 500/10 (ml). V primeru preseganja vrednosti je potrebno podrobno preučiti oljni sistem in stanje oljne polnitve.

### Prepoznavanje stanja oljne polnitve (mineralna olja – kinematična viskoznost 68 mm<sup>2</sup>/s)

Za prepoznavanje stanja oljne polnitve je pomembno poznavanje fi-

**Preglednica 1.** Ocenjene mejne vrednosti turbinskih mineralnih olj

	Mejna vrednost	Metoda
Čistost olja	16/12/10	ISO 4406
Barva	>L5	ASTM D 1500
Nevtralizacijsko število	> 0,45 [mg KOH/g]	ASTM D 974
Električna prevodnost	$\Delta > 50$ [%]	/
Dielektrična konstanta	$\Delta > 5$ [%]	/
Vsebnost antioksidanta	< 15 [%]	ASTM D 7418
Penjenje olja	> 500/10 [ml]	ISO 6247
FT-IR	> 0,45 [/]	ASTM E 2272
Vsebnost vode	> 100 [mg/kg]	ASTM D 6304

zikalno-kemičnih parametrov ob prvem polnjenju rezervoarja, kar predstavlja osnovo za primerjanje ob uporabljenih enakih metodah merjenja.

Na podlagi opravljenih podrobnih analiz testiranja dveh različnih proizvajalcev turbinskega olja in pregleda večletnih laboratorijskih poročil regulacijskih in ležajnih sistemov so kot mejni kriteriji pred zamenjavo obstoječe polnitve podane ocenjene mejne vrednosti za mineralna turbinska olja (*preglednica 1*).

Glede na spremljanje trendov fizikalno-kemičnih lastnosti turbinskega olja je eden izmed kriterijev sprejemljivosti za obratovanje barva, kjer je ocenjena mejna vrednost L = 5. Za oceno stanja olja ima pomembno vlogo nevtralizacijsko število, saj se neposredno navezuje na pojav kislih produktov olja in porabo aditivnih elementov. Ocenjena mejna vrednost za nevtralizacijsko število je 0,45 mg KOH/g. Večanje nevtralizacijskega števila neposredno vpliva na zmanjšanje vsebnosti antioksidanta v turbinskem olju, kjer upoštevamo ocenjeno mejno vrednost 15 %. Olje s staranjem minimalno spreminja mazalne lastnosti in viskoznost (se zmanjša). Uporabnost mineralnega turbinskega olja je možno oceniti na podlagi FT-IR, kjer je ocenjena mejna vrednost 0,45. Sprejemljivost oljne polnitve je možno oceniti na podlagi dielektrične konstante, kjer je ocenjena mejna vrednost 5-odstotno povečanje glede na novo olje. Dielektrična konstanta se s staranjem olja povečuje, prav tako kot električna prevodnost olja. Električna prevo-

dnost se izrazito spreminja s staranjem olja in je eden izmed relativno preprostih parametrov spremljanja uporabnosti oljne polnitve. Povečanje električne prevodnosti za 50 % glede na novo olje oziroma ok. 450 pS/m predstavlja ocenjeno mejno vrednost uporabe. V okviru spremljanja stanja oljne polnitve spada še izvedba oksidacijske stabilnosti olja RPVOT (ASTM D 2272), kjer je ocenjeni mejni kriterij sprejemljivosti > 200 min.

Glede na ocenjene mejne kriterije je potrebno pred odločitvijo za zamenjavo oljnih polnitvev preveriti pretekli obratovalni in temperaturni režim, izvajanje vzdrževanja olja (filtriranje, izločevanje vode, čiščenje rezervoarjev, ...) ter možnost mešanja z oljem drugačne sestave. Vsekakor pa je z laboratorijskim testiranjem glede na mejne vrednosti fizikalno-kemičnih lastnosti možno natančneje oceniti preostalo uporabno življenjsko dobo turbinskega olja.

## 4 Zaključek

bremenjevanje turbinskih olj v hidroelektrarnah je v zadnjih letih intenzivnejše. Oljne polnitve so manjše, sistemi pa obratujejo pod povišanimi tlačnimi razmerami, kar vse vpliva na zmanjšanje življenjske dobe oljne polnitve. Vključevanje hidroelektrarn s Kaplanovimi turbinami v sistem primarne regulacije frekvence omrežja predstavlja posebno problematiko glede na pričakovano življenjsko dobo turbinskih regulatorjev in oljnih polnitvev turbine. Vsekakor pa s pravilnim vzdrževanjem temperature olja, fil-

tracije, izločevanja vode vplivamo na podaljšanje intervala zamenjave oljne polnitve kot tudi na življenjsko dobo regulacijskih in ležajnih sistemov. Glede na ustrezno prepoznavanje indikatorjev sprejemljivosti oljne polnitve za obratovanje je pomembno spremljanje električne prevodnosti olja in ostalih parametrov (preglednica 1), s čimer lahko

dejansko ocenimo primernost obstoječe oljne polnitve za obratovanje.

### Literatura

- [1] <https://www.entsoe.eu/major-projects/network-code-development/load-frequency-control-reserves/>.
- [2] <http://www.uradni-list.si/1/>

[content?id=109820http://www.rsareliability.com/Oil%20Analysis%20Tables.pdf](http://www.rsareliability.com/Oil%20Analysis%20Tables.pdf).

- [3] <http://www.rsareliability.com/Oil%20Analysis%20Tables.pdf>.
- [4] Reginald S. Robertson: ASTM in-Service Monitoring Program for Steam and Gas Turbine Oils; Volume 42, 8,466–473; Journal of the American of Lubrication Engineers (1989)

### Loading and maintenance of industrial oils in hydroelectric power plants

**Abstract:** Due to changes in the operating mode of the energy system in the last decades, turbine oil is aging faster, which affects the cost of maintenance and causes operational inability at the time of oil replacement. Suitable maintenance mode and knowledge of the mechanisms of oil aging can help extend the replacement interval. Also, with proper turbine oil maintenance, we help diminish the number of unplanned shutdowns of aggregates due to non-functioning regulating and bearing systems.

**Keywords:** Hydro-power plants, regulation, turbine oils, measurements

industrijski  
**forum IRT**  
[www.forum-irt.si](http://www.forum-irt.si)



**6. INDUSTRIJSKI FORUM IRT 2014**

Portorož  
9. - 11. junij 2014

## NAJPOMEMBNEJŠI STROKOVNI DOGODEK ZA INDUSTRIJO

Dogodek je namenjen predstavitvi dosežkov in novosti iz industrije, inovacij in inovativnih rešitev iz industrije in za industrijo, primerov prenosa znanja in izkušenj iz industrije v industrijo, uporabe novih zamisli, zasnov, metod tehnologij in orodij v industrijskem okolju, resničnega stanja v industriji ter njenih zahtev in potreb, uspešnih aplikativnih projektov raziskovalnih organizacij, inštitutov in univerz, izvedenih v industrijskem okolju, ter primerov prenosa uporabnega znanja iz znanstveno-raziskovalnega okolja v industrijo.

### Dodatne informacije i prijava na dogodek:

Industrijski forum IRT, Motnica 7 A, 1236 Trzin, Slovenija  
tel.: 01/5800 884 | faks: 01/5800 803  
e-pošta: [info@forum-irt.si](mailto:info@forum-irt.si) | [www.forum-irt.si](http://www.forum-irt.si)

[www.forum-irt.si](http://www.forum-irt.si)