



# 8<sup>th</sup> International Tribology Conference

Osma internacionalna konferencija o tribologiji  
Beograd, 8. - 10. oktobra 2003.

## TRIBOLOGIJA VETROGENERATORA

**Aleksandar VENCL**, Mašinski fakultet, Centar za tribologiju, 27 Marta 80, 11120 Beograd  
**Aleksandar RAC**, Mašinski fakultet, Centar za tribologiju, 27 Marta 80, 11120 Beograd

### **Rezime:**

*Energija vetra se, kao obnovljiv i ekološki čist izvor energije, sve više koristi u svetu. Cena proizvodnje električne energije korišćenjem vetrogeneratora je još uvek visoka, ali sa tendencijom smanjenja. Osnovni tribološki problemi se javljaju u transmisionom sistemu i to u zupčastom prenosniku. Oni su uglavnom posledica neadekvatnog podmazivanja i/ili nedostatka redovnog održavanja. Ekstremni uslovi rada vetrogeneratora zahtevaju maziva poboljšanih karakteristika, što se postiže uvođenjem novih testova i primenom proaktivnog održavanja.*

**Ključne reči:** Vetrogeneratori, Triboelementi, Maziva, Održavanje.

## TRIBOLOGY OF WIND TURBINES

**Aleksandar VENCL**, University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Tribology Center, 27 Marta 80, 11120 Belgrade  
**Aleksandar RAC**, University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Tribology Center 27 Marta 80, 11120 Belgrade

### **Abstract:**

*Wind energy is renewable and ecologically clean energy source. It is more and more in use in the world. The price of the electrical energy produced by the wind turbines is still high, but in the future it is expected to become lower. The main tribological problems in wind turbines are in the transmission system, in the gearbox. They are mainly consequence of inadequate lubrication and/or lack of routine maintenance. Extreme wind turbines working conditions demands lubricants with improved characteristics. This has been accomplished by introduction of the new tests and applying proactive maintenance.*

**Key words:** Wind Turbines, Triboelements, Lubricants, Maintenance.

## 1. UVOD

Energija vetra je obnovljiv izvor energije čije je korišćenje, u svetu, u velikoj ekspanziji. Interesovanje za energiju vetra je uvek bilo povezano sa cenom fosilnih goriva. Kada je posle drugog svetskog rata cena goriva pala, opalo je i interesovanje, dok je 70-ih godina sa skokom cene goriva i uvođenjem embarga od strane zamalja OPEC i interesovanje poraslo. Energija vetra, pored

toga što je to obnovljiv izvor energije, je i ekološki čista energija (nema emisije CO<sub>2</sub> - efekat staklene bašte, niti SO<sub>2</sub> - kisele kiše). Cena proizvodnje električne energije iz energije vetra korišćenjem vetrogeneratora je još uvek visoka, ali sa tendencijom smanjenja.

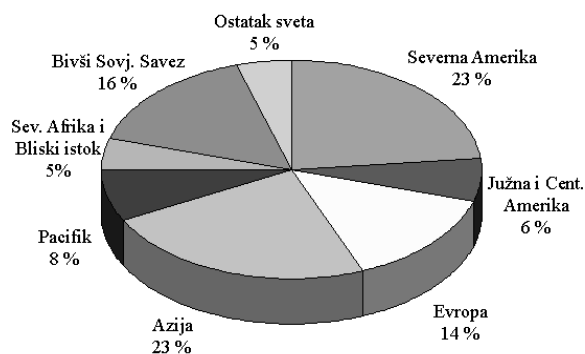
Osnovni tribološki problemi kod vetrogeneratora se javljaju u transmisionom sistemu i to u zupčastom prenosniku. Mnogi zastoji u radu su posledica otkaza na ležajevima unutar njega. Ovi

otkazi se javljaju kao direktna posledica neadekvatnog podmazivanja i/ili nedostatka redovnog održavanja.

## 2. KORIŠĆENJE ENERGIJE VETRA

Korišćenje energija vetra je u stalnom usponu uz godišnji porast instalisane snage vetrogeneratora od 25-35%. Samo u 2001-oj godini je u SAD instalisano 2000 MW snage. Nemačka sa instalisanih 8745 MW je prva na svetu, SAD sa oko 4400 MW druga, Španija sa 3337 MW treća, a Danska sa 2417 MW četvrta u svetu po instalisanoj snazi vetrogeneratora (ukupno u svetu oko 25000 MW, od čega u Evropi oko 18000 MW). Kada se uzme u obzir da 1 MW snabdeva oko 1000 domaćinstava, to znači da bi već sada 25 miliona domaćinstava moglo da dobija električnu energiju od vetrogeneratora [1,2].

Prema nekim studijama razvoja korišćenja energije vetra napravljenim 1998. godine, koje su se do sada pokazale kao tačne, do 2020. godine se predviđa porast instalisane snage u svetu na 1 280 000 MW, sa raspodelom po regionima datim na slici 1 [3].

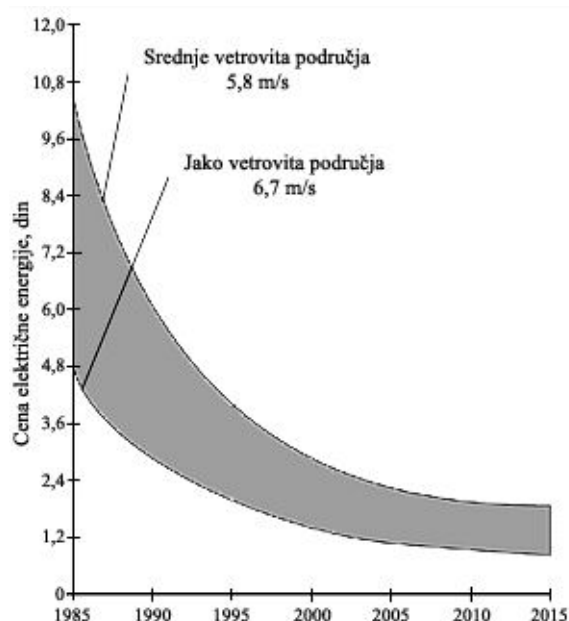


Slika 1. Predviđena raspodela instalisane snage po regionima

Vetrogeneratori ne rade tokom cele godine (neodgovarajuća brzina vetra), pa se ukupna snaga dobija množenjem instalisane snage sa brojem radnih sati.

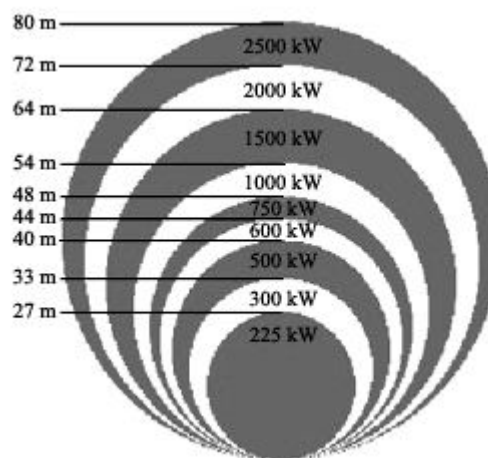
Električna energija dobijena vetrogeneratorima je i dalje skuplja od električne energije dobijene sagorevanjem uglja i prirodnog gasa (za nekih 30-50%). Cena kilovatsata električne energije dobijene vetrogeneratorima, u svetu se kreće u granicama od 2 do 3 dinara, sa tendencijom smanjenja (slika 2).

U tabeli 1. je prikazano povećanje dimenzija komercijalnih vetrogeneratora od 1980. do 2000. godine [6].



Slika 2. Cena energije vetra [4]

Jedan od načina smanjenja troškova je i povećanje dimenzija rotora (propelera), odnosno kapaciteta. Na slici 3. je prikazan odnos povećanja kapaciteta u odnosu na povećanje prečnika rotora [5].



Slika 3. Odnos kapaciteta i prečnika rotora vetrogeneratora

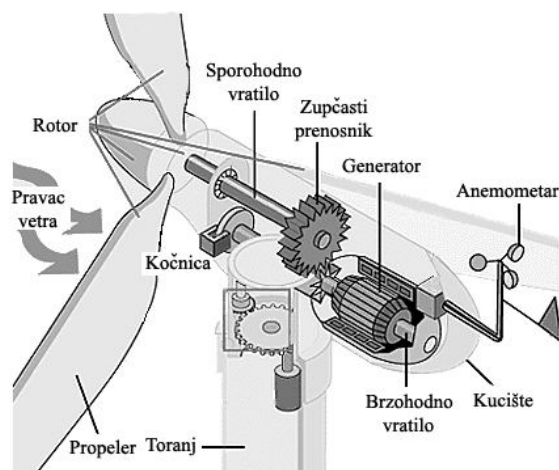
Prema količini energije koju je moguće dobiti vetrogeneratori se dele na: male (do 2kW), srednje (od 2-100 kW) i velike (preko 100 kW). Takođe mogu biti: konstantne brzine konstantne frekvencije, promenljive brzine konstantne frekvencije i promenljive brzine promenljive frekvencije, a prema orijentaciji se dele na one sa horizontalnom osom i one sa vertikalnom osom rotora [7]. U upotrebi su najčešće horizontalni vetrogeneratori izlazne snage od 0,75 MW do 2,5 MW [2].

Tabela 1. Povećanje dimenzija komercijalnih vetrogeneratora od 1980. godine

Godina	Kapacitet [kW]	Prečnik rotora [m]
1980-1982	55	15
1983-1985	75	17
1986-1988	120	21
1989-1991	250	27
1992-1994	500	40
1995-1997	750	48
1998-2000	2000	66

### 3. TRIBOLOŠKE KOMPONENTE VETROGENERATORA

Osnovi delovi vetrogeneratora su toranj, rotor i kućište (slika 4).



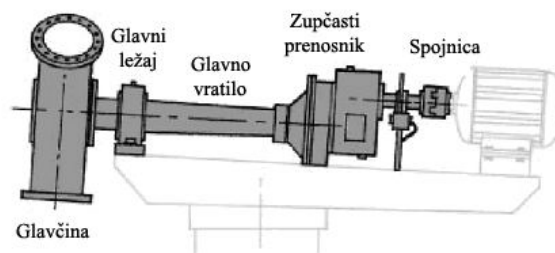
Slika 4. Glavne komponente vetrogeneratora [2]

Rotor zajedno čine glavčina i propeler. Glavčina se često posmatra kao deo transmisionog sistema. Rotor je povezan sa kućištem u kojem se nalaze transmisioni sistem, generator, kontrolni uređaj i kočnica. Uloga kućišta je i da zaštiti komponente koje se nalaze unutar nje. Transmisioni sistem zajedno sa generatorom predstavlja ključne delove vetrogeneratora.

Transmisioni sistem se sastoji od: glavčine, glavnog vratila (sporohodno), ležajeva, spojnice i zupčastog prenosnika (slika 5) [8].

Glavčina se obično, usled specifičnog oblika, izrađuje od sivog livenog gvožđa. Glavno vratilo se najčešće izrađuje kovanjem od čelika. Brzina obrtanja glavnog vratila je oko 40-60 o/min.

Noseći ležajevi su obično sferični kotrljajni ležajevi. Zaptivanje je labirintsko i time je otklonjeno habanje, kao i prodor vode i prljavštine u ležaj. Glavno vratilo je preko frikcionu spojnicu povezano sa zupčastim prenosnikom, na koji prenosi obrtni moment.



Slika 5. Transmisioni sistem vetrogeneratora

Uloga zupčastog prenosnika je da uveća brzinu obrtanja glavnog vratila sa 40-60 o/min na 1500-1800 o/min. Ovo zahteva velike i masivne zupčanike. U zavisnosti od izlazne snage prenosnik može biti dvostepen (150 MW), trostepen (300 MW) ili planetaran (preko 450 MW). Izlazno vratilo prenosnika je sa generatorom spojeno krutom spojnicom.

Uzimajući u obzir sve specifičnosti i zahteve koji se pred njih postavljaju, maziva za vetrogeneratore moraju da ispunjavaju visoke standarde po pitanju kvaliteta. Ovi standardi su daleko viši u odnosu na one koji se postavljaju pred maziva za zupčanike u industriji, i mnogo tačnije odlikavaju stvarne uslove eksploatacije, uključujući uslove rada na niskim temperaturama. Zahtevi za kvalitetom maziva koja se upotrebljavaju na vetrogeneratorima koji su postavljeni na moru su specifični, s obzirom da ta maziva moraju da imaju produženi vek upotrebe.

Za podmazivanje zupčastog prenosnika koriste se tečna maziva, mineralnog i sintetičkog porekla, a za individualne kotrljajne ležajeve upotrebljavaju se tehničke masti. Pri tome se za ispitivanje maziva koriste postojeći uređaji i metode sa pooštrenim uslovima ispitivanja (SKF Emkor, FAG FE 8) ili se razvijaju novi. Očekuje se, takođe, razvoj novih specifikacija za maziva za vetrogeneratore, koje će uključivati i ispitivanja kompatibilnosti maziva sa bojama, lakovima i zaptivnim materijalima.

Testovi koji se zahtevaju od strane proizvođača zupčanika su već u primeni i većina ulja za podmazivanje zupčanika ih zadovoljavaju. Ono što ne zadovoljavaju su novi testovi za ležajeve koji su uvedeni i koji ne samo da ocenjuju pohabanost ležaja i kaveza ležaja već ocenjuju i korozivni piting i promenu u boji ležajeva. Da bi se ispunili ovi zahtevi (testovi) potrebno je koristiti manje aktivne i manje agresivne EP aditive. Ulja za zupčanike vetrogeneratora treba da imaju termičku stabilnost najboljih hidrauličkih ulja u kombinaciji sa karakteristikama EP aditiva sadašnjih ulja za zupčanike.

#### 4. pouzdanost i održavanje sistema

Postojeći zahtevi za visokom pouzdanošću rada sistema vetrogeneratora uslovljavaju i primenu savremenih postupaka održavanja.

Osnovni tribološki problemi su na ležajevima unutar zupčastog prenosnika. Oni moraju da prime veoma visoka opterećenja. U zavisnosti od položaja u prenosniku i od radnog opterećenja ležajevi će nekad morati da prenose velika opterećenja pri malim brzinama a nekad mala opterećenja pri velikim brzinama. Visoka opterećenja pri malim brzinama, koja se javljaju kada je brzina vetra mala, mogu da dovedu do prekida uljnog filma i skraćanja veka ležaja.

Ležajevi u zupčastom prenosniku se uglavnom podmazuju automatskim sistemom podmazivanja. Specijalan uljni filter, koji je odvojen od uljnog rashladnog sistema, obezbeđuje visoku čistoću ulja. Ovo je jako bitno u pustinjama i suvim područjima gde vazдушna prašina može da dospe u zupčasti prenosnik i da prouzrokuje abrazivno habanje. Kod vetrogeneratora koji se nalaze na platformama postavljenim na moru vlaga i so su uvek prisutan kontaminant. Čistoća ulja je jako bitna, a najčešći kontaminanti u zupčastom prenosniku su: oni uneti prilikom ugrađivanja, oni stvoreni unutar samog prenosnika, oni koji su ušli kroz oduške i zaptivke i oni uneti nepažnjom prilikom održavanja.

Nečistoće unete prilikom ugradnje su posledica montaže u neadekvatnim uslovima. Ove nečistoće su najopasnije prilikom startovanja jer uljni filter nije u stanju da ih momentalno odstrani. Nečistoće koje se stvaraju unutar samog prenosnika su uglavnom produkti habanja zupčanika, ležajeva, i ostalih komponenata. Habanje se manifestuje kao mikropiting, makropiting, adhezija, abrazija i fretting. Nečistoće u prenosnik mogu da dospeju i preko odušaka i zaptivki. Prilikom održavanja tj. domazivanja ili ponovnog podmazivanja takođe treba voditi računa da ne dođe do prodora nečistoća. Program preventivnog održavanja odnosno praćenja stanja zaprljanosti ulja, kiselosti, viskoznosti i prisustva vode mogu da pomognu u smanjenju broja otkaza. U tabeli 2 su date vrednosti zahtevane čistoće ulje za zupčasti prenosnik vetrogeneratora [9].

U sadašnjem trenutku ulje se u prenosniku menja svakih 8 do 12 meseci, mada se radi na produženju ovog intervala i očekuje se da za vetrogeneratore postavljene na moru on biti produžen na tri godine.

Razvojem i sve većim brojem vetrogeneratora koji se nalaze na platformama postavljenim na moru, usled otežanog pristupa, se sve više ukazuje potreba za

što boljim predviđanjem veka maziva. U tu svrhu se sve više koristi proaktivno održavanje. Osnovne karakteristike koje treba određivati i proveravati tokom upotrebe maziva su: čistoća (u skladu sa ISO standardom), viskoznost, prisustvo vode i oksidaciju [2]. Sa ova četiri parametra, 90% informacija o mazivu i komponentama je dostupno.

Tabela 2. Zahtevana čistoća ulja za zupčasti prenosnik vetrogeneratora

Uzorak ulja	Zahtevana čistoća po ISO 4406/99
Novo ulje	16/14/11
Iz prenosnika posle fabričkog testiranja	17/15/12
Iz prenosnika tokom upotrebe	18/16/13

#### 5. ZAKLJUČAK

Na osnovu svega se može zaključiti da su vetrogeneratori, kao grana industrije, u svetu u sve većoj upotrebi. Kao takvi, ovi uređaji, sa svim svojim specifičnostima i zahtevima koje postavljaju tribokomponentama, uključujući i maziva čine da se tribološke karakteristike maziva za zupčanike i ležajeve i efikasnost metoda za praćenje stanja maziva konstantno unapređuju i poboljšavaju.

#### 6. LITERATURA

1. Ministarstvo za nauku, tehnologiju i razvoj Republike Srbije, *Program korišćenja alternativnih i obnovljivih energetskih izvora - Javni poziv*, Web site: [http://160.99.1.20/uploads/articles/mntr\\_integralnivernpee7.pdf](http://160.99.1.20/uploads/articles/mntr_integralnivernpee7.pdf)
2. D. Barr, *Modern Wind Turbines: A Lubri-cation Challenge*, Machinery Lubrication, September-October 2002, 36-45.
3. BTM Consult ApS, *World Market Update 1996-97*, Ringkøbing 1995, Web site: <http://www.btm.de/>
4. U. S. Department of Energy, Wind Energy Program, *Industry Improving Technology, Lowering Costs*, Web site: <http://www.eere.energy.gov/wind/wtrr.html>
5. Danish Wind Industry Association, *Guided Tour on Wind Energy*, Web site: [www.windpower.org](http://www.windpower.org)
6. D. C. Quarton, *The evolution of wind turbine design analysis - a twenty years progress review*, Wind Energy, 1, S1, 5-24, 1998.
7. R. C. Bansal, T. S. Bhatti, D. P. Kothari, *On some of the design aspects of wind energy conversion systems*, Energy Conversion and Management, 43, 16, November 2002, 2175-2187.
8. H. Stiesdal, *The Wind Turbine Components and Operation*, Bonus Energy A/S newsletter, 1999, Web site: [www.bonus.dk](http://www.bonus.dk)
9. R. Errichello, J. Muller, *Oil Cleanliness in Wind Turbine Gearboxes*, Machinery Lubrication, July-August 2002.