

**Факултет инжењерских наука универзитета у
Крагујевцу**



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Индустријски инжењеринг

Предмет: Машински елементи

Број индекса: 134/2014

Милош П. Перовић

Лежаји код ветрогенератора

завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Благојевић Мирко, ред. проф.

2. _____

3. _____

Датум одбране:

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да помоћу препоручене и шире литературе, стекне основна знања из области лежаја код ветрогенератора. Потребно је да детаљно опише процедуре везано за: принцип функционисања самих лежаја код ветрогенератора, начин њиховог избора, подмазивања, одржавања.

Препоручена литература:

[1] Лукић, Н., Енергија и окружење, скрипта - превод са енглеског, Машински факултет, Крагујевац, 2010.

[2] Mulder, K., Sustainable Development for Engineers: A Handbook and Resource Guide, Hague, 2006.

Крагујевац, март, 2019.

Ментор:

Др Мирко Благојевић, ред. проф.

САДРЖАЈ

1. Увод.....	1
2. Енергија ветра	3
2.1 Глобални и локални ветрови	4
2.2 Ружа ветрова	5
2.3 Непредвиљивост ветра.....	6
3. Избор лежаја код ветрогенератора.....	8
3.1 Директни и хибридни погони	9
3.2 Избор лежаја за директне погоне и хибридне главне машине	11
3.3 Расподела оптерећења лежаја	12
4. Најпогоднији лежаји за ветротурбине	14
5. Савремени програми за симулацију и прорачун лежаја	18
6. Подмазивање лежаја ветрогенератора	26
Закључак	32
Литература.....	33

Резиме

У овом раду описане су врсте и карактеристике лежаја код ветрогенератора као и начин њиховог функционисања и методе избора самих лежаја код ветрогенератора. Рад се такође бави и енергијом ветра и утицајем те енергије на околину као и све већим порастом коришћења енергије ветра. Савремени системи анализе лежаја који се врше у модерним софтверима за анализу објашњени су у једном од поглавља. Као крајња и завршна тачка рада помиње се један од битних фактора код система лежаја а то је подмазивање, у које је укључено и одржавање са циљем повећања животног века лежаја.

Кључне речи: анализа, ветрогенератор, лежаји

Abstract

This paper describes the characteristics of wind turbine bearings as well as how they work and the meter selection of the wind turbine codes themselves. The work is also dealt with by wind energy and harnesses that energy in the environment of kio and ever – increasing defeats of user wind energy. Modern systems are analyzing the bearing that is in the modern software version for analysis, which is underway when it comes to laying. The end point of the work mentions one of the largest factors of the bearing system codes and that is lubrication, which has been used and stated with the civilians of linking the life of a bearings.

Keywords: analysis, bearings, wind turbine

1. Увод

Енергија ветра је вид обновљивог извора енергије чије се коришћење у свету константно шири. Заинтересованост за енергију ветра је увек зависило од цене фосилних горива. Након другог светског рата, са падом цене фосилних горива падала је и заинтересованост за енергију ветра, а седамдесетих година након пораста цене горива и са увођењем ембарга од стране земаља чланица *OPEC*-а поново расте интересовање за енергију ветра.

Енергија ветра поред предности да је обновљиви извор енергије има и предност у томе што је и еколошки чиста енергија (без емисије CO_2 и SO_2). Електрична енергија произведена енергијом ветра коришћењем ветрогенератора је и даље скупа али тежи ка појефтијењу [1].

Главни проблеми код трибологије ветрогенератора се јављају у систему преноса тј. у зупчастом преноснику. Већина застоја у раду настају услед отказа на лежајима унутар тог система. Углавном се ови откази јављају као последице лошег подмазивања, или недостатка правилног одржавања.

Најчешће коришћени тип ветрогенератора је хоризонтална аксијална погонска група, која је постављена на вертикални носач (стуб), и ротира око осе правца струјања ветра. Ротор ветрогенератора покреће генератор преносним системом који повећава број обртаја вратила. Пошто, ветротурбина увек мора да ротира у односу на стуб, електрична енергија се преноси до система преноса, помоћу клизних прстенова. Носећа конструкција мора бити поуздана и чврста, да би могла да издржи јаке олује јер је ветрогенератор постављен на вертикални носач који је висок преко 50 метара и који заједно са њом ротира у правцу ветра.

Лопатице ветротурбине имају много мање димензије попречног пресека у односу на дужину и њихови врхови се крећу брзином много већом од брзине ветра. Конструкција авионског пропелера је таква да обезбеђује велики потисак, док код ветрогенератора пропелер производи механичку енергију, која је сама производ момента силе.

Пожељна локација за инсталацију ветрогенератора је она која даје високу средњу брзину ветра. Ове локације се обично рангирају према средњој вредности енергетског флукса по јединици површине, $\rho w^3/2$. Високи енергетски флуks ветра захтева мање роторе код ветрогенератора. Инсталације ветрогенератора се најчешће врше у планинским пределима на вишим надморским висинама исто као и у приобалним подручјима. Ветрогенератори треба да буду заштићени у свим климатским зонама како у северним од ниских температура и леда тако и у ураганским условима, у току лошег времена. Ветрогенератори су најчешће постављени групно на локацијма названим ветроелектране, а њихово одржавање на удаљеним и неприступачним локацијама, понекад у суровом окружењу представља практичне тешкоће, који значајно увећавају трошкове експлоатације [1].

Ветрогенератори великих снага (чија је снага већа од 250 kW) користе кугличне лежаје или лежаје са специјалном конфигурацијом за задржавање нагиба лопатица и позиције лежаја. Лежаји се састоје од два кована прстена у којима се налазе стазе за котрљајна тела (куглице или ваљке). Унутрашњи и спољашњи прстени имају посебне елементе којима се омогућава директно везивање лежаја за носећу конструкцију. Куглице или ваљци су убачени у лежај кроз радијални цилиндрични отвор у једном од прстенова. Отвор се затим затвара помоћу чепа [6].

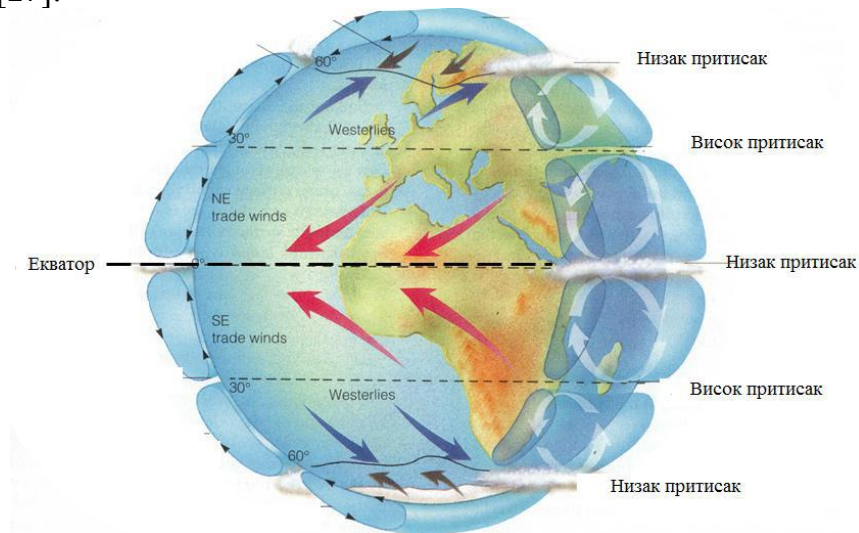
Лежаји су једна од најважнијих компоненти ветротурбина и њихове радне карактеристике морају са једне стране допринети поузданом раду целог система, а са друге стране њихова уградња мора бити и економски оправдана.

Механичка енергија се са главног вратила преноси на генератор који је са турбином повезан механичким спојем. Спој који повезује главно вратило и генератор садржи мултипликатор који повећава број обртаја ротора и прилагођава га захтеваном броју обртаја од стране генератора. Генератори у саставу ветротурбина могу бити асинхрони или синхрони, а данас се чешће користе ветрогенератори са синхроним генератором. Синхрони генератор не мора да садржи мултипликатор, као што мора асинхрони, тако да је са те стране погоднији за примену у пракси.

Ветрогенератори доста утичу на животну средину. Они емитују буку која веома подсећа на буку хеликоптера. Ипак, ветрогенератори су мање пожељне комшије у насељеним местима, али не штете пољопривреди. Такође, могу убити птице селице које покушавају да пролете кроз турбинска кола. Ветрогенератор у неразвијеним подручјима природе може значајно утицати на побољшање визуелног утиска [2].

2. Енергија ветра

Сваког сата снага коју Земља добија зрачењем Сунца износи 10^{14} kWh, од чега се 1 до 2% претвара у снагу ветра. Кретање ваздушних маса у атмосфери (слика 1.) се јавља због неравномерног загревања површине Земље на различитим географским ширинама, јер се ваздух загрева индиректно преко тла. Полови земље примају мање енергије од екватора, а земљиште се загрева брже од мора. Због температурне разлике између слојева ваздуха формирају се разлике притиска које се претварају у кинетичку енергију ветра. Глобални ветрови дувају од екватора према хладним половима Земље. Како је топао ваздух лакши од хладног он се на екватору подиже до висине око 10 км и путује према северном и јужном полу [27].



Слика 1. Кретање ваздушних маса у атмосфери [28]

У односу на остале климатске елементе, ветар је векторска величина што значи да је дефинисан са три елемента: правац, смер и интензитет. А у пракси, ветар је одређен са два елемента: правац (који је исти као и смер) и брзина то јест јачина. Правац ветра представља страну света на коју ветар дува (север N, југ S, исток E и запад W). Брзина ветра представља пут који вадушне честице пређу у јединици времена (m/s) [29].

Ветар као климатски елемент је толико важан, да се некада посматра и као фактор који одређује и остале климатске елементе. Наиме, промена правца ветра (посебно у умереним ширинама) може за врло кратко време да доведе до промене и осталих климатских елемената, пре свега температуре, влажности, облачности, падавина и тако даље. Ветар доноси са собом одлике оне климе одакле дува. Поред тога што ветар утиче

на друге климатске елементе, он има непосредан утицај и на човека и његове делатности, као и на вегетацију.

Ветар чак ни у једном кратком временском интервалу не дува истом брзином. Промена брзине ветра се означава као његова маховитост (ударност). Осим тога ветар непрекидно мења и правац дувања. То је немир ветра. Маховитост и немир ветра представљају његову структуру.

Сунчева топлота знатно више загрева подручја око екватора у односу на остале делове Земље. Топли ваздух се изнад екватора уздиже до висине од око 10 km изнад тла, одакле се даље циркуларно распрострањује под утицајем Кориолисове силе. Ветар, кретање ваздуха изнад неког дела земље, може бити узрокован примарном циркулацијом због глобалног распореда притиска ваздуха (типично за четири годишња доба), или преко кретања синоптичким саставом и антициклона који утичу на стварање локалних ветрова различитих карактеристика, а зависе од конфигурације терена, карактеристика тла и кретања сунчевих маса.

На северној полулопти ветар има смер ротације обрнуту смеру казаљке на сату како се приближава подручју ниског притиска. На јужној полулопти ветар има смер ротације у смеру казаљке на сату око подручја ниског притиска. При нормалном атмосферском притиску при температури од 15 °C ваздух тежи отприлике 1.225 kg/m³ али се повећањем влажности и густоћа повећава. Такође важи да је ваздух гушћи када је хладнији него кад је топлији. На високим надморским висинама притисак ваздуха је нижи, па је ваздух ређи. Треба напоменути ни да теоретски ни практично није искористива сва снага ветра [30].

2.1 Глобални и локални ветрови

Глобални ветрови су висински. Настају као последица неједнаких загревања ваздушних маса у земљиној атмосфери. У зонама око екватора ваздух се интензивније загрева него на половима, где је сунчево зрачење мање због мањег упадног угла. Ове разлике у температури генеришу ветрове. Топао ваздух са екватора се диже увис и струји ка северном и јужном полу. Зато се у зонама око екватора смањује атмосферски притисак, те хладнији ваздух са севера и југа струји ка екватору, наравно на мањој висини у односу на топли ваздух. Ово кретање ваздушних маса се одвија на висинама од 1 km до 10 km и представља глобалне ветрове. Када Земља не би ротирала, топле ваздушне масе, које се уздижу са екватора би стизале до северног и јужног пола где би се хладиле, понирале и враћале назад. Међутим, због Земљине ротације, при кретању ваздушних маса ка половима на њих делује и Кориолисова сила која утиче на смерове струјања ваздуха. Осим тога ова сила на различитим географским ширинама формира зоне са високим и ниским ваздушним притиском које представљају изворе и поноре глобалних ветрова. С обзиром да су глобални ветрови висински и због тога их треба познавати јер утичу на ветрове у нижим слојевима атмосфере [31].

Локални ветрови представљају кретање ваздушних маса у приземном слоју атмосфере. Настају због локалних разлика у атмосферским притисцима. Типични локални ветрови су морски и планински ветрови. Морски ветрови настају услед разлике у температурама мора и копна. Копно се дању брже греје од мора, па се топлији ваздух изнад копна диже и ствара низак притисак изнад тла. Тиме се покреће хладнији ваздух

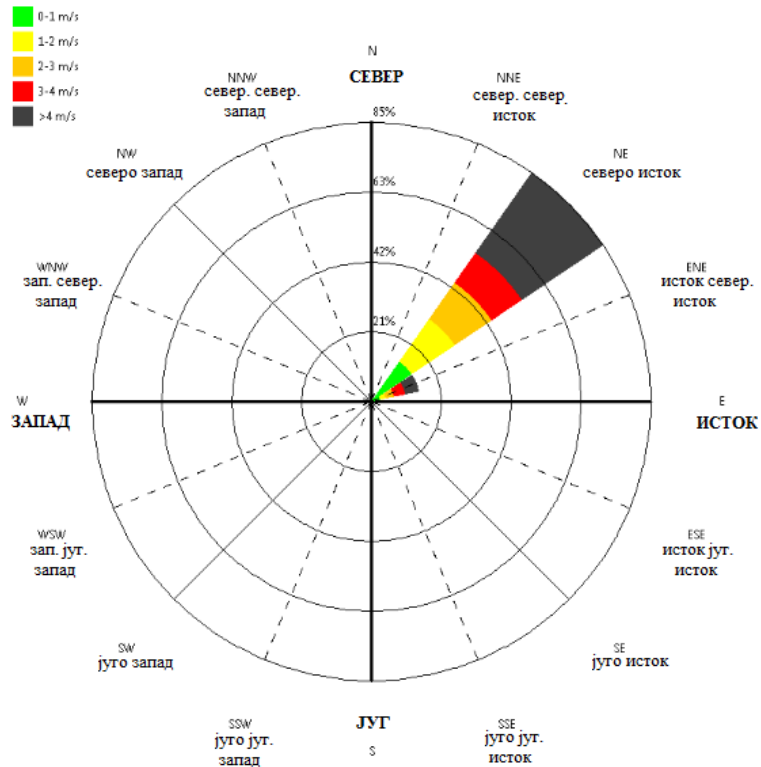
изнад мора ка копну. Ноћу, због бржег хлађења копна, море постаје топлије, па се мења смер ветра од копна ка мору.

У планинама, као последица загревања сунчаних страна планине, настају струјања која су преко дана усмерена уз планину, а ноћу мењају смер. На локалне ветрове велики утицај има рељеф терена. С тим у вези јавља се низ ефеката локалног повећања брзине ветра. На пример, ветар је интензивнији на врху брда него у подножју.

Тунел ефекат је убрзавање ветра између два брда која на ветар делују као природни левак. Ефекат брда и ефекат тунела могу локално повећати брзину ветра и до 30%, што вишеструко повећава његову снагу. Осим ових позитивних ефеката, у граничном површинском слоју постоје различите природне и вештачке препреке које узрокују и негативне ефекте смањења брзине ветра и појаву турбуленција, што знатно утиче на квалитет ветра као примарног енергента.

2.2 Ружа ветрова

Ружа ветрова је графички приказ карактеристика и средњих брзина ветрова из појединих праваца. Ради се о поларном дијаграму на коме су представљене стране света које означавају правце из којих ветар дува. На ружи ветрова се најбоље уочавају доминантни ветрови у неком месту у одређеном временском периоду. Најчешће се израђују руже ветрова за четири главна и четири међуглавна правца (страна света). Ружа ветра може имати 8, 16 или 32 правца ветра (страна света). Најчешће се израђује ружа ветра са 8 праваца. Осим такозване обичне руже ветра (поларни дијаграм) може се израђивати и „извртута ружа ветра“, која представља хистограм и брзина ветрова из различитих праваца. Средње карактеристике ветра највише се разликују у екстремним месецима, па се зато осим за годину, руже ветрова најчешће израђују за месеце јануар и јул [30].



Слика 2. Пример руже ветра [30]

2.3 Непредвиљивост ветра

Електрична енергија добијена из енергије ветра варира из сата у сат, дневно и сезонски. Годишње варијације нису толико значајне. Због тога се може краткорочно предвидети количина енергија која се може добити. Као и код других извора електричне енергије, енергија ветра мора бити према одређеном распореду потрошње. Зато се користе методе прогнозирања снаге ветра, али предвиђање износа добијене енергије из ветра није увек најпоузданија метода [32] .

Потрошња и производња електричне енергије морају бити подјенаке како би мрежа остала једнако оптерећења. Оваква варијабилност може представљати изазов при спајању електричне енергије произведене ветром у мрежу. Непредвидљива природа ветра повећава трошкове за регулацију, подиже радну залиху, а при високој продорности могла би довести до повећања количине електричне енергије у систему што може проузроковати проблеме с преоптерећењем. Решење би било складиштење или повезивање мреже наизменичне струје високонапонским кабловима наизменичне струје. Мреже за пренос енергије већ сада се морају носити са застојима производње и дневним променама електричне потражње. Системи с великим капацитетом за енергију ветра би требало имати више резерве. Реверзибилне електране или други облици складиштења енергије у мрежи могу ускладиштити енергију добијену за време јаких ветрова и пустити је када је то потребно.

Ускладиштена енергија повећава економску вредност енергије ветра јер може заменити велике трошкове производње током највеће потражње. Потенцијални приход може премашити трошкове и губитке у складиштењу. У неким регијама, највећа брзина ветра не може се поклопити с врхом потражње електричне енергије. У државама САД-а, Калифорнији и Тексасу, за време врућих летњих дана брзине ветра су ниске, а потражња електричне енергије висока због масивног коришћења клима уређаја. Нека комунална предузећа субвенционишу куповину геотермалних топлотних пумпи својим корисницима, у сврху смањења потрошње електричне енергије током летњих месеци чинећи коришћење клима уређаја и до 70% мање. Друга могућност је да се подручја међусобно повежу у тако звану „Супермрежу“ високоволтажних каблова за једносмерну струју. У Великој Британији, потражња за електричном енергијом виша је зими него лети, пропорционално брзини ветра. Соларна енергија тежи да буде комплементарна енергији ветра. Подручја са високим ваздушним притиском доносе ведро небо и слабије површинске ветрове, док су дани с нижим ваздушним притиском претежно ветровити и облачни. То значи да је соларне енергије обично највише лети, док је енергије ветра највише зими, те се тако енергија ветра и сунчева енергија међусобно поништавају. Као и код других извора и производња електричне енергије из ветроелектрана мора бити испланирана, но природа ветра то никако не омогућава, упркос помоћи метеорологије.

3. Избор лежаја код ветрогенератора

Како произвођачи ветрогенератора стичу искуство са пројектовањем турбина и мултипликатора, они повећавају потребу за побољшањем поузданости погонских склопова, користећи архитектуру која оптимизује структуру трошкова турбина и носача.

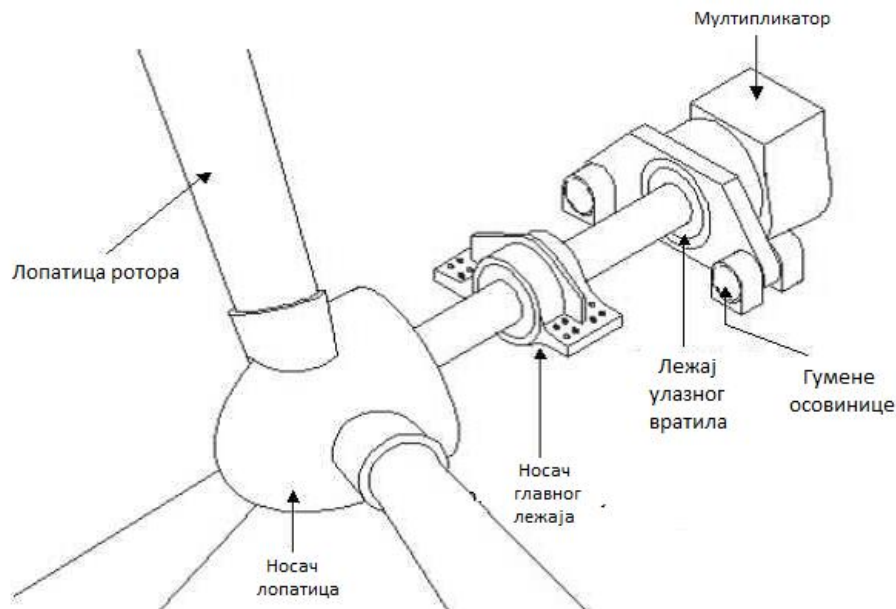
Дизајн генератора ветротурбина у прошлости се ослањао на модуларну архитектуру. Појединачна одступања од традиционалног дизајнерског приступа имају за циљ повећање поузданости и смањење трошкова турбина. Две најчешће коришћене архитектуре ветрогенератора укључују директне погонске и хибридне турбине средње брзине. Директни погони са једне стране доводе до виших трошкова, али са друге стране могу умањити сложеност конструкције елиминацијом мултипликатора. Хибридни погони се такође фокусирају на поједностављивање конструкције мултипликатора и углавном резултују мањом масом погонске групе.



Слика 3. Конфигурација модуларног погонског склопа [3]

Кључна ствар у пројектовању турбине је избор система лежаја који се користи за ослањање главног вратила. Опције укључују систем једноструког положаја лежаја који користи дворедни лежај или вишеструки систем положаја лежаја. За сваки положај се такође морају одредити врста лежаја и његова конфигурација. За веће турбине, одрживе алтернативе укључују комбинације сферних, цилиндричних и коничних ваљкастих лежаја.

Услед великих аксијалних оптерећења, коришћење сферних ваљкастих лежаја може да резултује лошим ефектима као што су неравномерна расподела оптерећења између редова, деформисање ваљака, превелико загревање ваљака,....



Слика 4. Конфигурација модуларног погонског склопа [3]

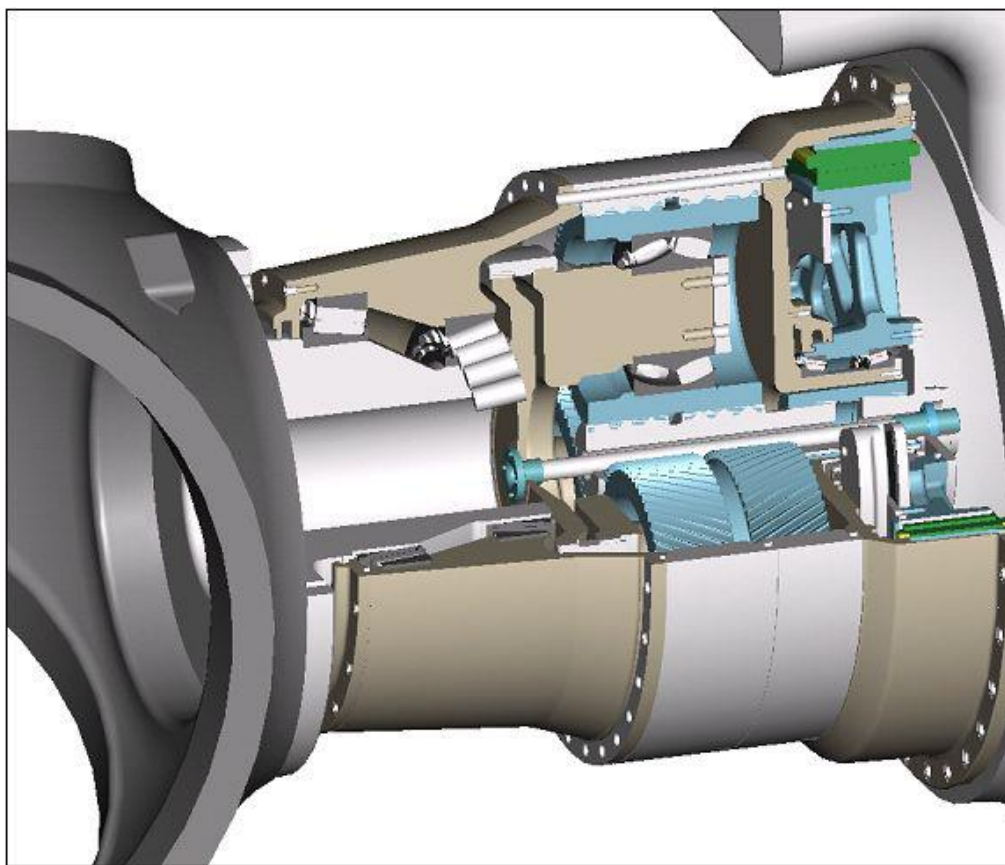
Конични ваљкасти лежаји доприносе повећању крутости целог система. Уз то, уградња цилиндричних ваљкастих лежаја се може комбиновати са уградњом коничних ваљкастих лежаја, из разлога што пружају додатни радијални капацитет и крутост. Ове и сличне предности комбиновања коничних и цилиндричних ваљкастих лежаја доприносе бољим решењима ветрогенератора великих снага [4].

3.1 Директни и хибридни погони

При пројектовању реалних машинских и грађевинских конструкција најтежи задатак је одређивање стварних оптерећења на елементима конструкције. Исто важи и за пројектовање ветрогенератора и пуно је простора за побољшања у овој области како би се добиле поузданије конструкције.

На основу истраживања услова околине и реакција ветротурбина на те услове, развијају се нове конструкције које доводе до тога да системи постану робуснији и отпорни на непознате изазове и/или елиминисање извора који се тичу проблема поузданости. Ветротурбине са директним погоном које не користе мултипликаторе у потпуности морају да испуне неке одговарајуће аспекте. Да би се обезбедила захтевана снага при мањим брзинама, ветрогенератори обично постају тежи, већи и скупљи. Типична решења за лежаје су трореди цилиндрични ваљкасти лежаји у комбинацији са аксијалним лежајима. Такође, у овим ситуацијама повољна решења представљају и дворедни конични ваљкасти лежаји [5].

Што се тиче хибридинх погона они користе генераторе средњих брзина и користе одговарајуће електронске системе за постизање потребних брзина. Овакве конструкције могу значајно да промене и смање горњу масу торња у односу на излазну снагу. Такође, На овај начин се постиже и знатно рационалније коришћење простора у кућишту на стубу ветрогенератора.

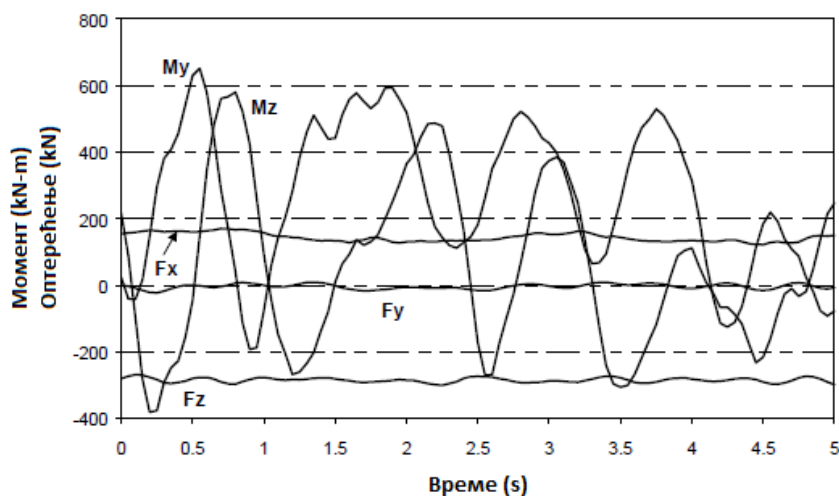


Слика 5. Пример хибридног погона са дворедним главним коничним ваљкастим лежајем [5]

3.2 Избор лежаја за директне погоне и хибридне главне машине

Ветрогенератори (посебно погонска група која се налази на врху стуба, као и сам стуб) изложени су веома сложенем, временски променљивом оптерећењу. Ова оптерећења имају веома велики утицај на конструкцију ветрогенератора, његову структуру, а наравно и на цену. Због поузданог и безбедног рада ветрогенератора нису дозвољена прекомерна поједностављења у фази прорачуна.

Радни циклуси при анализи ветрогенератора се најчешће генеришу помоћу специфичних софтвера, углавном са излазима од 20 Hz. Подаци са високим фреквенцијама омогућавају огроман број снимака система, па и за веома кратке временске периоде. Сви ови подаци морају да буду разврстани у одређене категорије. На слици 6 виде се подаци у периоду до 5 секунди и њихова варијација. У овом кратком временском интервалу графички су приказани комплетни подаци. Ти подаци се касније сортирају [4].



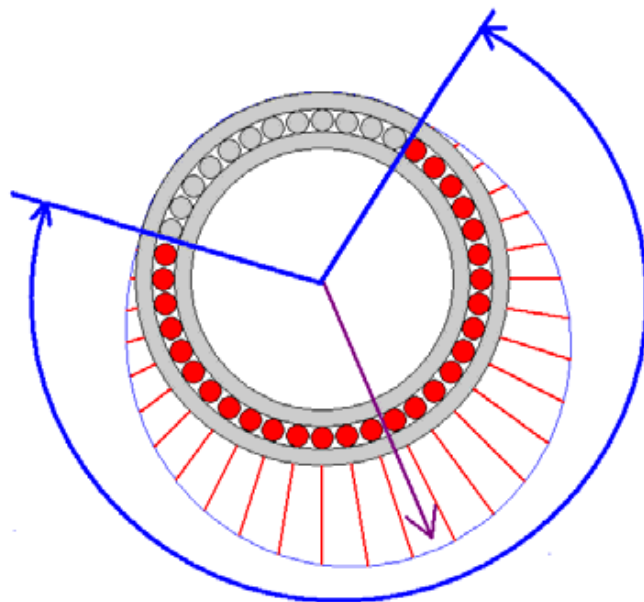
Слика 6. Подаци у временском интервалу од 5 секунди у софтверу за прорачун оптерећења ветрогенератора [4]

Да би се правилно дефинисао радни циклус из података који се очитавају из временских серија за услове оптерећења, могу се употребљавати две методе за генерисање циклуса рада – са независним или зависним смањењем.

3.3 Расподела оптерећења лежаја

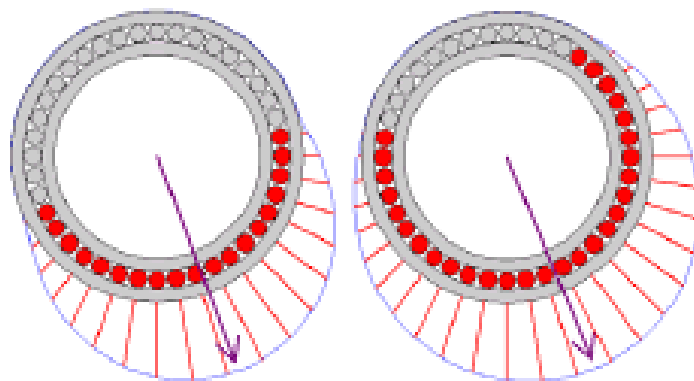
Оптерећење лежаја се не преноси равномерно на сва котрљајна тела лежаја. Укупно оптерећење се расподељује на котрљајна тела испод меридијанске равни која представља раван лежаја нормалну на правац дејства силе. Меридијанска раван дели лежај на две зоне (зону са оптерећеним и зону са неоптерећеним котрљајним телима). Расподела оптерећења на котрљајна тела зависи од бројних фактора (одступања мера и облика, грешке при монтажи, радна температура,...) па се у зависности од њих зона оптерећених тела може смањивати и повећавати.

У специјалним случајевима, расподела оптерећења може изгледати као на слици 7 [6].



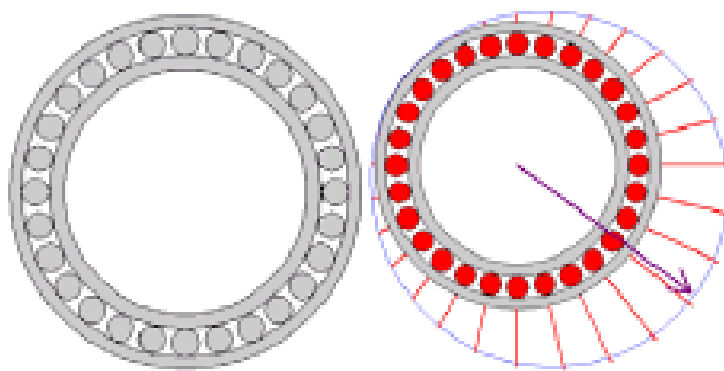
Слика 7. Зона оптерећења котрљајних лежаја у специјалним околностима [6]

Конични ваљкасти лежаји имају веома повољну расподелу оптерећења на котрљајна тела. Најчешће се уграђују у пару, па њихове појединачне зоне су међусобно зависне. Правилна расподела оптерећења код лежаја у великој мери утиче на радни век целог ветрогенератора. Веома променљива оптерећења код ветрогенератора неповољно утичу на расподелу оптерећења код лежаја и њихов радни век. Расподела оптерећења код дворедних конично ваљкастих лежаја је приказана на слици 6 [5,6].



Слика 8. Расподела оптерећења код дворедих конично ваљкастих лежаја [6]

Расподела оптерећења код дворедих цилиндричних ваљкастих лежаја је приказана на слици 9.



Слика 9. Расподела оптерећења код дворедих цилиндричних ваљкастих лежаја [6]

Оптимизација зоне носивости код лежаја ветрогенератора има веома велики значај. Коришћењем разних метода оптерећења се могу избалансирати међу расположивим ваљцима да би се смањила оптерећења на максимално оптерећеном ваљку у одређеним условима. Ако систем није довољно оптимизован или употребљава типове лежаја који не обезбеђују контролу зоне оптерећења (слично као код коничних ваљкастих лежаја), мањи број ваљака може да преноси највећи део оптерећења.

4. Најпогоднији лежаји за ветротурбине

Није претерано рећи да се цела индустрија ветротурбина ослања на правилан избор лежаја. Ветрогенератори раде у отежаним условима, а лежаји који се користе треба да имају веома дуг и поуздан радни век. На пример, животни век ваљкастих котрљјних лежајева у ветротурбинама је око 175000 радних сати.

Веома је корисно да се наведу бројне врсте лежаја који су заступљени у типичним ветроелектранама. Цилиндрични ваљкасти лежаји често се бирају код великих радијалних оптерећења како код мултипликатора, тако и у генераторима. Вишеређи цилиндрични ваљкасти лежаји користе се за још већа радијална оптерећења. На пример, могуће је пронаћи ове врсте лежаја са динамичком и статичком моћи ношења од 2672 – 5890 kN. Такође су доступне и посебне конструкције ових лежаја са оптимизованом геометријом и оптимизованим дизајном, а такође и посебним мазивима за спречавање корозије и за боља триболошка својства. Овакви лежаји често долазе у модуларном систему[7].



Слика 10. Цилиндрични ваљкасти лежај [8]

Конични ваљкасти лежаји погодни су за радијална и аксијална оптерећења која и јесу у великој мери присутна код вратила ветрогенератора. Овакви лежаји могу да анулирају и мала угаона одступања, а када се уграђују у пару прихватају аксијална оптерећења у оба смера. Имају велику статичку и динамичку моћ ношења и веома се често примењују код ветрогенератора. Произвођачи често праве оптимизоване конструкције конусних лежаја за употребу код мултипликатора.



Слика 11. Конични ваљкасти лежај [9]

Сферни ваљкасти лежаји се најчешће користе код великих радијалних оптерећења и малих до средњих брзина. Њихови ваљци имају сферични облик. Трење код сферних ваљкастих лежаја је веће него код одговарајућих кугличних лежаја због различитих обимних брзина на котрљајним телима. Најчешће се користе код главних осовина.



Слика 12. Сферни ваљкасти лежај [10]

Куглични лежаји са ослањањем у четири тачке се састоје од радијалних једноредних кугличних лежаја и дизајнирани су да прихвате аксијална оптерећења која се јављају у оба смера. Радијална оптерећења су подржана до одређеног дела аксијалног оптерећења. Ови лежаји заузимају много мање аксијалног простора него што је случај код дворедних лежаја. Унутрашњи прстен је подељен на две половине што омогућава једноставну монтажу и употребу већег броја куглица у лежају чиме се повећава носивост. Спољашњи прстен са куглицама и кавезом може да се монтира независно од две половине унутрашњег прстена. Ови лежаји се обично користе код излазних осовина при великим брзинама.



Слика 13. Куглични лежај са ослањањем у четири тачке [10]

„Дубоко ожлебљени“ куглични лежаји су лежаји специјално намењени за примену код ветрогенератора. Користе се за велике брзине и велика радијална и аксијална оптерећења у једном или оба смера. Код оваквих лежаја димензије котрљајних стаза су веома блиске димензијама куглица што омогућава да ови лежаји прихватају велика оптерећења. Ова врста лежаја углавном се користи у генераторима [7].



Слика 14. „Дубоко ожлебљени“ куглични лежај [11]

Електрично изоловани лежаји спречавају настајање оштећења при проласку електричних струја кроз елементе лежаја. Ово се постиже употребом изолационог мазива (керамичког оксида) на спољашњем или унутрашњем прстену, или употребом ваљаних елемената од керамичких оксида, у зависности од врсте и величине лежаја [7]. Ови лежаји су апсолутно замењиви са стандардним лежајима.



Слика 15. Електрично изоловани лежај [11]

Многе ветроелектране имају једностепене или двостепене планетарне мултипликаторе. Планетарни мултипликатори ветрогенератора данас користе модуларне системе лежаја. Предност лежајних склопова је у томе што садрже стандардне лежаје, што углавном поједностављује њихово одржавање и набавку. Ово је веома важно јер лежаји мултипликатора преносе велика оптерећења. На пример, „*NKE*“ лежајни системи се састоје од цилиндричних ваљкастих лежаја који су уграђени директно у планетарни зупчаник. Отвор зупчаника има функцију спољашњег прстена, тако да сами лежаји немају спољашњи прстен.

Системи лежаја се обично развијају према захтевима купаца. На пример, постоје мултипликатори снага 1,5 MW, 2 MW и 2,5 MW који сада користе модуларне системе састављене од једноредних цилиндричних ваљкастих лежаја без спољашњих прстенова. Лежаји имају пречнике од 160, 190 и 200 mm, а тренутно се развијају верзије од 220 mm [7].

Избор лежаја зависи од расположивог простора посебно од ситуацијама замене постојећих лежаја, као и начина примене. Да би се додатно повећала носивост, цилиндрични ваљкасти лежаји користе концепцију која може да поднесе већа оптерећења од стандардних типова лежаја [7]. Овакви лежаји имају унутрашње месингане кавезе који садрже контролне жлебове који омогућавају ендоскопу да процени стање унутрашње котрљајне површине прстена. За већа оптерећења и шире зупчанике лежаји се могу склопити у сетове од 2, 3 или 4 лежаја са различитим одстојним прстенима.

Модуларни концепт лежаја има бројне предности: веома компактна конструкција, коришћење стандардних елемената лежаја, једноставно подмазивање,...

5. Савремени програми за симулацију и прорачун лежаја

Застоји у ветротурбини повезани су са великим трошковима. Сви фактори се због тога морају узети у обзир током пројектовања. Ради се са савременим програмима симулације и израчунавања како би се осигурала оптимална селекција елемената ветротурбине.

Хибридна симулација (симулација са више тела)

Уз помоћ хибридних симулација могуће је описати динамичко понашање целе ветротрубине укључујући све виталне елементе. На основу модела, појединачне компоненте погонског склопа и цела конструкција турбине могу да се побољшају још у фази развоја [12].

Софтвер **Bearinx®**

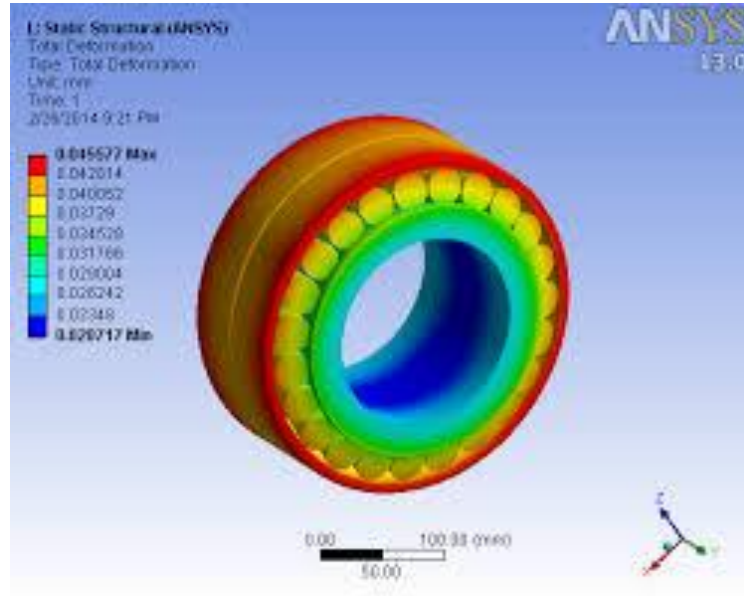
Уз помоћ софтвера **Bearinx®** могу да се моделирати и прорачунавати све врсте лежаја, сложена вратила и системи вратила до погонских јединица. Реакције ослонаца, оптерећења лежаја, упоредни напони осовина и остали битни параметри израчунавају се и приказују графички или у табелама [12]. Наравно, тачно се израчунава и унутрашња расподела оптерећења у лежају, узимајући у обзир облик лежаја. Софтвер **Bearinx®** може веома прецизно израчунати и радни век лежаја. Програм **Bearinx®** купцима нуди могућност прорачуна лежаја развијеном апликацијом.



Слика 16. Свеобухватне анализе за оптималан дизајн лежаја [12]

FEM (Finite Elements Method) прорачуни

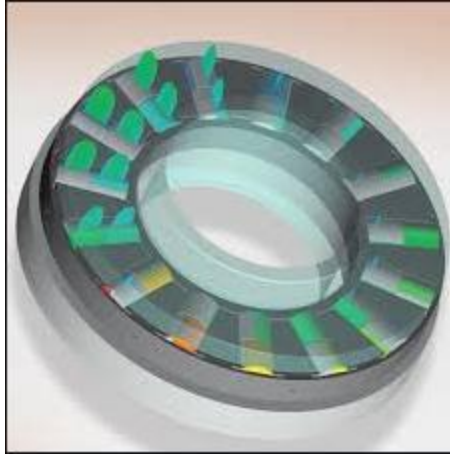
За још детаљније анализе, преко FEM прорачуна се могу одредити расподеле напона, деформација и оптерећења лежаја који раде у веома сложеним условима.



Слика 17. Структурна и термичка FEM анализа коничног ваљкастог лежаја [13]

Софтвер САВА 3D

Софтвер САВА 3D омогућава динамичку анализу котрљајућих лежаја узимајући у обзир утицај трења између елемената у контакту, као и убрзања (успорења) котрљајних тела када улазе у зону оптерећења и кад излазе из ње.



Слика 18. Анализа динамичког понашања котрљајних лежаја у програму САВА 3D [14]

Софтвер Telos 3D

Програм Telos 3D омогућава веома детаљне контактне анализе елемената котрљајних лежаја. Велика предност овог софтвера је што у обзир узима у обзир и карактеристике мазива [14].

Анализа карактеристика лежаја на уређају ASTRAIOS (Schaeffler)

ASTRAIOS је један од најмодернијих, највећих и најефикаснијих уређаја за тестирање лежајева великих димензија на свету. Лежаји са великим димензијама тежине до 15 тона и спољашњих пречника од 3.5 метара могу да се тестирају у лабораторијским условима коришћењем овог уређаја. Он даје значајан допринос брзом и поузданом дизајну ветротурбина и повећава њихову сигурност [15].

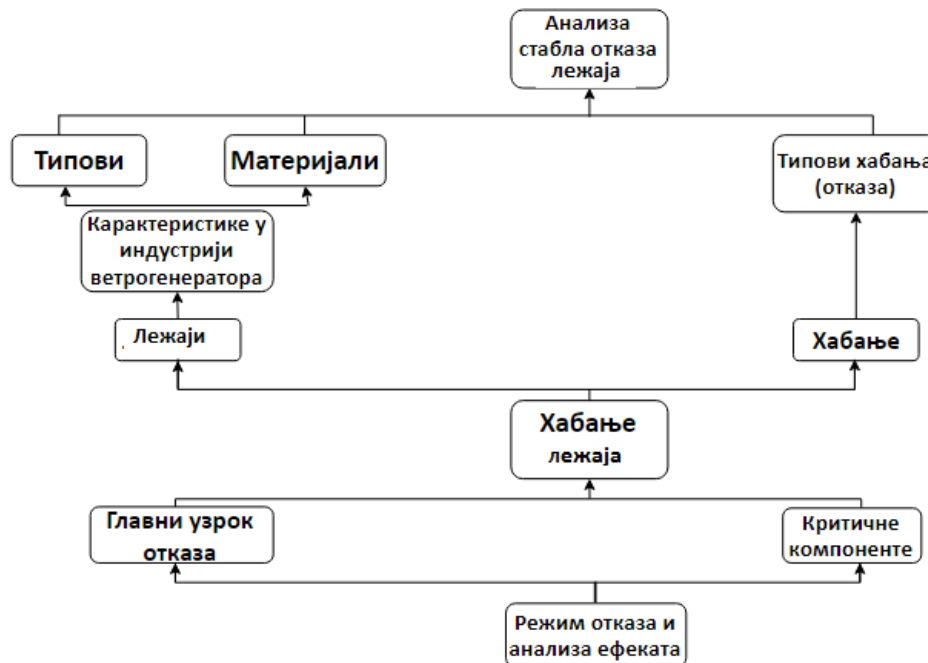
Преко 300 сензора у лежајима који се тестирају пружају информације које се могу проценити и користити за различите анализе. Технологију мерења и управљања пружа софтвер SARA. Стручњаци процењују податке и побољшавају моделе израчунавања упоређујући их са резултатима испитивања.



Слика 19. Пример тестирања на уређају ASTRAIOS [15]

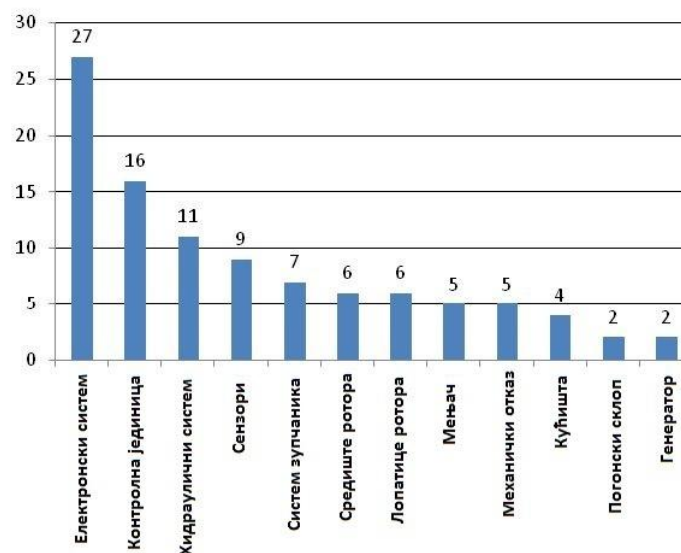
Анализа хабања лежаја код ветротурбина

У овом поглављу детаљно су проучаване поузданост и перформансе ветротурбина коришћењем више различитих методологија. Урађена је и анализа стабла отказа ФТА (Fault Tree Analysis) [16]. Компоненте попут лежаја и зупчаника су често најважније триболошке компоненте у системима ветротрубина, а хабање је главни узрок квара. Хабање је веома сложен процес који може да се покрене различитим механизмима. Овде су описане различите врсте хабања у лежајима ветротурбина. Стандардни отказ је дефинисан као „престанак способности компоненте да обавља потребну функцију“ [17]. Откази лежаја ветрогенератора не само да доводе до престанка рада система, већ и до економских губитака у производњи. Циљ ове анализе је да се дефинишу неопходни кораци у циљу побољшања радних карактеристика. У ту сврху развијена је анализа стабла отказа. На слици 20 приказан је дијаграм тока који представља поступак за развој анализе стабла отказа у овом поглављу.



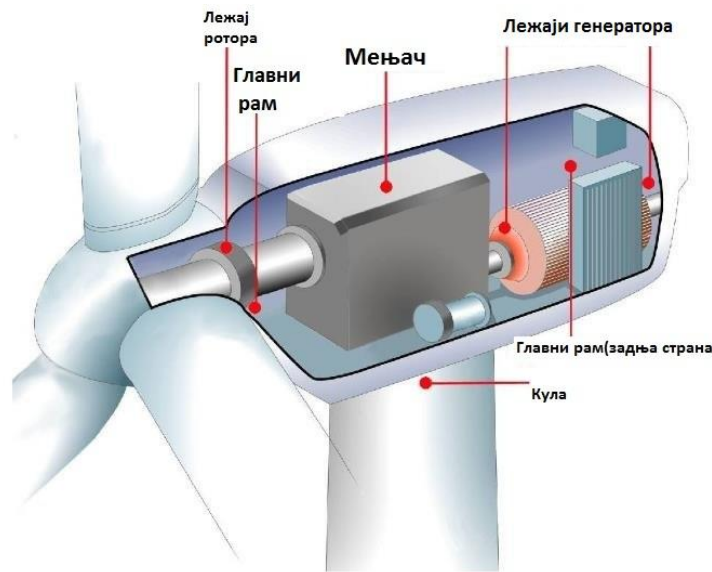
Слика 20. Анализа стабла отказа лежaja[16]

Као што је приказано на слици 20, испитани су модели отказа и анализе ефеката (ФМЕА) ветротурбина, за све критичне компоненте и главне узроке отказа. Према последњим светским анализама, лежaja су критичне компоненте ветротурбине, а откривено је и да је главни узрок отказа лежaja настанак хабања [16]. Слика 21 приказује преглед најважнијих отказа у ситему ветротурбина, где је хабање најчешћи узрок самог отказа.



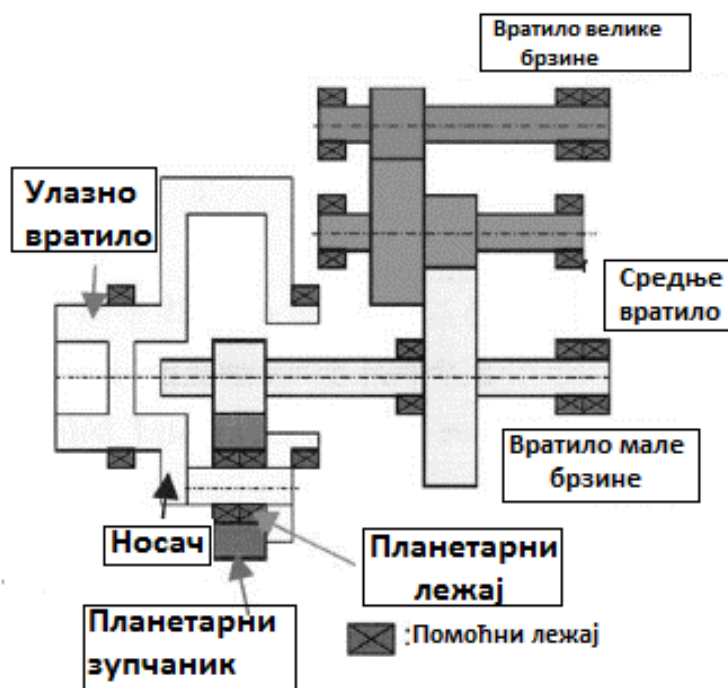
Слика 21. Процентуално учешће отказа појединих система код ветротурбина [16]

Лежаји се користе на различитим местим у ветрогенераторима. На слици 22 су приказане најважније локације лежаја код стандардне концепције ветрогенератора. Лежај осовине ротора носи ротор и преноси обртни момент на мултипликатор. Осцилације у брзини ветра доводе до варијације брзине ротирања и оптерећења лежаја. Лежаји осовине ротора су изложени веома променљивим оптерећењима (покретање ветротурбине, заустављање, убрзавање,...). То може довести до потенцијалних оштећења ове компоненте било услед унутрашњих или спољшњих фактора [18].



Слика 22. Локације у ветрогенератору са лежајима [18]

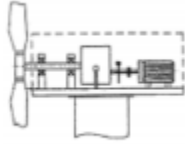
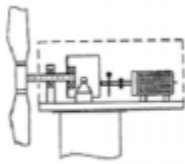
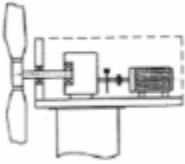
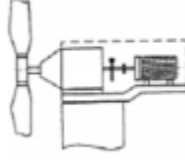
Различити типови лежаја могу да се користе за ослањање ротора, мултипликатора и генератора (Табела 1, која показује структуру зупчаника и склопова лежаја ротора без зупчаника). У Табели 1 су представљени најчешће коришћени типови лежаја за различите локације код ветротурбине. Две последње конфигурације су синхронни генератори који немају мултипликатор. Пошто су лежаји ротора изложени унутрашњим и спољашним вибрацијама, може доћи до различитих врста њиховог оштећења.



Слика 23. Локације лежаја у мултипликатору ветрогенератора [18]

Остали лежаји су смештени у ветротурбинском мултипликатору, као што су планетарни лежаји (лежаји носача), средњи и брзи лежаји вратила. Ови лежаји такође могу бити лежаји различитих типова. На претходној слици 23 приказани су положаји лежаја унутар мултипликатора ветрогенератора.

Табела 1: Лежаји ветрогенератора

Структура	Типови лежаја ротора	Типови лежаја генератора	Карактеристике
	• SRB • SRB • SRB	• SRB • CRB • DTRB	• Користе се два лежаја • Конфигурација има мултипликатор • Мултипликатор је повезан са осовином ротора
	• SRB	• CRB	• Бочни лежај генератора се такође користи као улазни лежај мултипликатора • Конфигурација садржи мултипликатор
	• SRB	• CRB	• Бочни лежај генератора се такође користи као улазни лежај мултипликатора • Конфигурација садржи мултипликатор
	• TRRB • DTRB	• Не користи се	• Не користи се лежај ротора, а оптерећење ротора преноси се лежајем мултипликатора • Конфигурација садржи мултипликатор

Типови хабања код лежаја

Ветрогенератори раде у изразито динамичким условима, што изазива веома сложена оптерећења лежаја система и осталих критичних компоненти. Лежаји ветротурбина могу да се оштете због спољних и унутрашњих узрока. Спољашњи узроци потичу од нестабилног ветра и налета (који доводе до високих контактних напрезања) до влаге или прашине који стварају корозивно/абразивно окружења и оштећење мазива. Ови услови доводе и до осталих видова оштећења [19,20].

6. Подмазивање лежаја ветрогенератора

Било да је у питању маст или уље, мазиво у ветротурбинама спречава хабање и оштећења између котрљајних и клизних површина лежаја. Смањује трење и стварање топлоте, помаже у заштити од корозије и спречава загађивање. С друге стране, неадекватно мазиво (и / или неправилно подмазивање) могу угрозити перформансе лежаја и његов радни век.

Право мазиво увек треба испоручивати у правој количини, у правом тренутку. Међутим, тачке подмазивања могу бити тешко доступне или неприступачне. У тим случајевима може доћи до прекомерног или недовољног подмазивања, а интервали подмазивања могу бити спорадични или временски неисправни, а контаминанти да се унесу у систем.

Боља алтернатива се може добити коришћењем аутоматских системима за подмазивање, који су пројектовани да убризгавају у систем прецизно контролисане количине одговарајућег мазива у унапред подешеним интервалима. На овај начин системи могу ефикасно да се заштите од хабања, оштећења и превремених отказа. Коначно, омогућавају да лежаји раде поуздано до истека пројектованог радног века у свим критичним фазама [24].

На основу података добијених из праксе, до 20% времена од укупног времена одржавања система ветрогенера троши се на подмазивање. Радници на одржавању се крећу уским простором у средишту турбине и подмазују потребне системе (од 10 до више од 80 локација) са неколико различитих мазив [24]. Ипак, 36% свих превремених оштећења на лежајима узроковано је лошим (неадекватним) подмазивањем. У најгорем случају, неправилно подмазивање може зауставити турбину.

Када ветротурбине престану са радом због одређених отказа, услед комплексног одржавања и дуготрајних поправки долази до великих трошкова: превелики трошкови мобилизације дизалица, високи трошкови и кашњења у набавци резервних делова – посебно у индустрији где потражња за неопходним компонентама надмашује снабдевање. Избор најадекватнијег система подмазивања зависи од бројних параметара. Ови параметри укључују радне услове (варијације радне температуре и вискозитета мазива), тачност количине потребног мазива, геометрију турбинског система (величина, димензије и симетрија) и захтеве за надгледањем.

Централизовани системи подмазивања могу се применити на све лежаје на осовини ротора турбине као и за остале лежаје система [24].



Слика 24. Централизовани систем подмазивања [24]

Системи подмазивања [24]:

- **Аутоматски систем са једном тачком:** они убризгавају прецизне и тачне количине масти без контаминаната и често се користе за подмазивање лежаја и осталих елемената у покретним деловима. Они суштински минимизирају ризике од прекомерног подмазивања и могу добављати мазиво 24/7 током периода до годину дана, у складу са унапред подешеним аутоматским тајмером.
- **Једноводни системи за подмазивање:** у овој централизованој конфигурацији, централна пумпна станица аутоматски испоручује мазиво кроз једну доводну мрежу у уређај за дозирање мазива. Сваки уређај за дозирање служи једној тачки подмазивања и може се подесити тако да испоручи тачну количину потребне масти или уља. Једноводни систем може вршити подмазивање на великој удаљености и у широком температурном опсегу.

- **Прогресивни системи за подмазивање:** они одвајају мале измерене количине мазива у честим и повременим временским интервалима. Проток масти који ствара пумпа система пропорционалан је прогресивним дозирним уређајима и распоређује се на сваки лежај према потреби. Измерене количине мазива се прогресивно уносе у унапред одређеним односима, од главних доводника до тачака подмазивања. Ако тачка подмазивања не прими мазиво, без обзира на разлог, или је секундарни доводник блокиран, цео циклус подмазивања је прекинут, а систем даје сигнал да упозори оператере на постојећи проблем. Интегрисана контрола и надзор система је још једна предност за прогресивне и једноредне системе за подмазивање.

Право мазиво за сваку тачку подмазивања

За подмазивање елемената ветрогенератора, посебно оних који раде у екстремним радним условима, од суштинске је важности да аутоматски систем за подмазивање испоручује праву количину мазива у право време. У супротном, ефекти трења и хабања могу бити знатно изражени.

Без науке о трибологији, развој мазива која омогућавају дужи радни век машинских система, већи капацитет оптерећења и мања потрошња енергије не би били могући. Због тога је компанија SKF основала специјализовани истраживачки центар у којем детаљно проучавају системе за подмазивања и мазива. Континуирано истраживање и развој, уз блиску сарадњу са произвођачима и оператерима ветротурбина, омогућили су SKF-у да развије масти, оптимизоване за различите примене лежаја у ветротурбинама [25].

Временски период између почетног подмазивања и стављања ветрогенератора у погон не сме бити дужи од једног месеца. Наравно, овај период зависи од бројних фактора. Ако се прекорачи овај интервал у лежаје се мора додавати свеже мазиво, непосредно пре него што се турбина ветрогенератора пусти у погон. Износ треба бити око 5 – 10% лежајне шупљине (почетних 100% напуњености лежаја) [26].

У већини случајева је веома тешко отклонити коришћено мазиво у потпуности са лежаа при подмазивању. Сходно томе, количине за подмазивање морају бити веће. Континуирано подмазивање је оптимално.

Количина допуњавања за лежај и шупљину кућишта

Одговарајуће количине мазива за допуну могу да се израчунају за различите временске интервале [26]:

$$m_R = x \cdot D \cdot B, g$$

m_R - маса допуне мазива по временском интервалу (по дану, недељи,...)

D - спољашњи пречник лежаја, mm

B - ширина лежаја, mm

x - фактор интервала подмазивања

Учесталост и количина допуне су минималне препоруке. Вибрације, влага, итд. могу захтевати веће количине и/или краће периоде подмазивања. Оптималне вредности би требало да се утврде током рада и због искуства на терену.

Одговарајуће количине мазива за допуну лабиринтских система могу се израчунати на следећи начин [26]:

$$m_R = x \cdot D \cdot B, g$$

m_R - маса допуне мазива по временском интервалу (по дану, недељи,...)

D - пречник лабиринта, mm

B - ширина лавиринта, mm

x - фактор интервала подмазивања

Одржавање лежаја ветрогенератора

Одржавање лежаја ветрогенератора треба вршити редовно и у одговарајуће време. Што се тиче главног лежаја и његовог подмазивања, основне операције одржавања су подмазивање, процена количине мазива и квалитета мазива, провера старења мазива, преглед оштећења (кућишта и лежаја), мониторинг заптивања и преглед/замена компоненти у систему за подмазивање уљем [26]. Такође проверава се чистоћа подручја контакта са заптивкама и присуство мазива. У току одржавања потребно је прегледати површине стаза котрљања (унутрашњи и спољашњи прстен) и котрљајуће елементе као и прегледати узорке мазива на различитим локацијама лежаја.

Замена мазива

Замена мазива би требало да се обавља за време мировања турбине (осовина ротора осигурана против кретања) и мирног или слабијег ветра. Потребно је погледати сигурносна упутства за турбину.

Замена уља

Углавном се после 2 до 5 година (у зависности од анализе уља и искустава рада одређеног ветрогенератора и локације) уље мора у потпуности заменити. Овом приликом треба прегледати контактне површине и котрљајуће елементе. Након тога, важно је очистити филтер као и одводне чепове, резервоар и кућиште. У случају озбиљне контаминације, систем се мора очистити испирањем свежим уљем.

Замена масти

Пошто се старо мазиво гура у шупљину лежишта током допуњавања, потребна је замена комплетне количине масти након отприлике 3 – 5 година. Оптимално време замене зависи од стања мазива. Старо мазиво може се уклонити одговарајућим (пластичним) алатом, или испразнити пумпом. У случају озбиљне контаминације систем се мора очистити испирањем свежим мазивом. На крају, лежајну шупљину треба напунити мазивом.

Важне напомене за подмазивање лежаја ветрогенератора

Када се планира инсталација аутоматског система подмазивања унутар ветротурбине, ове смернице треба поштовати [26]:

- Одредити број тачака подмазивања,
- Изабрати одговарајуће мазиво према температури, брзини и условима оптерећења,
- Израчунати одговарајуће количине мазива и интервале подмазивања,
- Одабрати пумпе које су у складу са врстом рада и капацитетом система,
- Размотрити надзор као интегрални захтев за систем подмазивања.

Не постоји „универзално“ решење а избор система подмазивања и одговарајућих параметара. Правилно изабрано мазиво ће осигурати адекватно подмазивање без обзира да ли турбина ради или је у стању мировања, да ли је монтирана на копну или на обали или ради при екстремним температурама или условима. Након што је аутоматски систем за подмазивање укључен, мерљиви бенефити могу се остварити на сваком кораку [26]:

- Нема више мануелног подмазивања,
- Потрошња мазива одговара захтевима система,
- Могу се на основу добијених информација донети благовремене одлуке о куповини мазива,
- Застоји проузроковани неадекватним подмазивањем се смањују,
- Продуктивност и поузданост турбина се повећавају.
- Консултације са стручњацима и експертима из ове области могу знатно допринети избору најбољих система за подмазивање.

Закључак

У оквиру овог рада описана је енергија ветра, као један од све популарнијих облика обновљивих извора енергије. Количина електричне енергије која се у свету добија из енергије ветра драматично расте из године у годину.

У овом раду су пре свега описане све врсте котрљајних лежаја који се користе на различитим позицијама у ветрогенератору. Представљене су и различите концепције погонског система ветрогенератора (са и без мултипликатора). Описани су савремени програми који се користе за израду различитих симулација и анализа рада ветрогенератора у променљивим радним условима. У раду су представљени и различити модели хабања котрљајних лежаја код ветрогенератора. Описан је начин подмазивања лежаја и врсте мазива које се најчешће користе.

На основу овог рада може се закључити да су ветротурбинесве више у употреби. Ове машине, са свим својим карактеристикама и захтевима које задају триболошким компонентама, заједно са мазивима чине да се триболошке карактеристике мазива за лежаје и зупчанике и ефикасност метода за праћење стања мазива константно побољшавају и унапређују.

Триболошке компоненте попут лежаја и зупчаника често су најважније компоненте у системима ветротурбина, а хабање је главни узрок отказа. Међутим, из овог рада може се закључити да уз добру примену мазива и праћењем датих смерница за успешно подмазивање лежаја може се продужити животни век истих.

Литература

- [1] Mulder, K., Sustainable Development for Engineers: A Handbook and Resource Guide, Hague, 2006.
- [2] Лукић, Н., Скрипта: Енергија и окружење, превод са енглеског, Машински факултет, Крагујевац
- [3] Butterfield, S., McNiff, B., Musial, W., Improving Wind Turbine Gearbox Reliability, European Wind Energy Conference, Мај, 2007.
- [4] Bhatia, R., Springer, T., Using Histograms in the Selection Process for Tapered Roller Bearings, International Off – Highway Meeting, Milwaukee, 1981.
- [5] Dinner, H., Trends in Wind Turbine Drive Trains, KiSSsoft GmbH, Switzerland
- [6] Oyague, F., Gearbox Modeling and Load Simulation of a Baseline 750 – kW Wind Turbine Using State of the Art Simulation Codes, NREL/TP-500-41160, Фебруар, 2009.
- [7]<https://www.powerelectronics.com/alternative-energy/better-bearings-wind-turbines#close-olyticsmodal> Приступ: 28.09.2019.
- [8]<https://www.nskeurope.com/en/products/roller-bearings/cylindrical-roller-bearings.html> Приступ: 28.09.2019.
- [9]<https://www.indiamart.com/proddetail/single-row-taper-roller-bearing-16460343562.html> Приступ: 28.09.2019.
- [10]<https://www.hendersonbearings.co.uk/22210e1kc4-aka-22210-e1-k-c4-fag-spherical-roller-bearing-tapered-bore-50x90x23mm.html> Приступ: 29.09. 2019.
- [11] https://www.schaeffler.de/content.schaeffler.de/en/products-and-solutions/industrial/product-portfolio/rolling_and_plain_bearings/deep_groove_ball_bearing/index.jsp Приступ: 29.09.2019.
- [12]https://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/brochure/downloads_1/pwe_de_en.pdf Приступ: 30.09.2019.
- [13] Kletzli, D., B., Cusano, C., Conry, T., F., Thermally Induced Failures in Railroad Tapered Roller Bearings, Tribol., Trans, 42(4), pp. 824-832
- [14]https://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/brochure/downloads_1/pca_de_en.pdf Приступ: 30.09.2019

- [15] https://www.schaeffler.com/remotemedien/media/shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/brochure/downloads_1/wps_de_en.pdf Приступ: 01.10.2019
- [16] Tazi, N., Chatelet, E., Bouizidi, Y., Using a Hybrid Cost-FMEA Analysis for Wind Turbine Reliability Analysis Energies, vol.10, 2017.
- [17] International Standard Organization- ISO 13372-2012- Condition monitoring and diagnostics of machines-Vocabulary, International standard organization, Geneva, 2012.
- [18] Yagi, S., Bearings for wind turbine- NTN technical review no.71 NTN global technical review, 2004.
- [19] Kotzalas, M., Doll, G., Tribological advancements for reliable wind turbine performance, Philosophical transactions of the royal society, vol.368, pp.4829-4850, 2010.
- [20] Blau, P., Walker, H., Parten, R., Qu, J., Xu, H., Geer, T., Wear analysis of wind turbine gearbox bearings, US Department of Energy- DOE ORNL/TM 2010, Tennessee, 2010.
- [21] Eyre, T., Wear characteristics of metals, Tribology international, vol.9, 1976.
- [22] Paine, Cambell, Examples of damage which can occur in automobile engine bearings, TA 100/2, London, 1969.
- [23] Mehdizadeh, M., Khodabakhsh, F., An investigation into failure analysis of interfering part of steam turbine journal bearing, Case studies in engineering failure analysis, vol.2, 2014.
- [24] <http://www.nacleanenergy.com/articles/31650/automatically-lubricating-bearings-in-wind-turbines> Приступ: 01.10.2019.
- [25] https://www.skf.com/binary/57-254540/0901d196802f5c5f-Wind-Capability-brochure-14480-EN_V3.html Приступ: 01.10.2019.
- [26] <http://www.midpointbearing.com/wp-content/uploads/2017/10/FAG-Main-Shaft-Bearing-Lubrication.pdf> Приступ: 02.10.2019.
- [27] И. Винковић: Дипломски рад, Факултет стројарства и бродоградње, Загреб, 2009.
- [28] <http://www.iucbeniki.si/nit5/1337/index2.html>, Приступ: 05.10.2019.
- [29] <https://meteoplaneta.rs/meteoroloski-elementi-i-pojave/vetar-i-ruza-vetrova/>, Приступ: 05.10.2019.
- [30] <http://meteoplaneta.rs/2011/04/03/vetar-i-ruza-vetrova/> , Приступ: 05.10.2019.
- [31] <http://www.tfb.edu.mk/files/rezultati/4a31809e4415f.pdf> , Приступ: 05.10.2019.
- [32] <http://www.predmer2.npnetwork.co.rs/Obnovljivi-izvori-energije/o-energiji-vetra.html> , Приступ: 05.10.2019.