

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Индустијски инжењеринг

Предмет: Машински елементи

Број индекса: 120/2011

Огњан В. Срећковић Лежаји за ветрогенераторе Завршни рад

Комисија за преглед и одбрану

1. Др Мирко Благојевић, ван. проф. – ментор
2. _____
3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру завршног рада кандидат треба да:

- Проучи одговарајућу литературу везану за лежаје код ветрогенератора,
- На основу прикупљених и систематизованих података из препоручене и друге литературе ове области прикаже и методолошки изложи најзначајније особине лежаја код ветрогенератора,
- Укаже на важност одабира погодних лежаја за ветрогенераторе,
- Укаже на то колику важност и утицај има одабир лежаја на експлоатациони век и продуктивност ветрогенератора.

Препоручена литература:

[1] В. Николић: МАШИНСКИ ЕЛЕМЕНТИ, Машински факултет Крагујевац, 2004.

[2] Б. Стојановић, М. Благојевић: МЕХАНИЧКИ ПРЕНОСНИЦИ, Факултет инжењерских наука Крагујевац, 2015.

Крагујевац, септембар 2017.

Ментор:

Др Мирко Благојевић, ван. проф.

Резиме

Генерално посматрано, лежаји су машински склопови који се уграђују у ослоње вратила и осовина. Основна улога лежаја је преношење оптерећења са покретних на непокретне делове машина, и обезбеђење услова за релативно кретање обртних делова. У овом завршном раду представљене су основне карактеристике, појмови и подела лежаја за ветрогенераторе, њихова улога у раду ветрогенератора, значај правилног одабира лежаја да би се ветрогенератор експлоатисао на најбољи могући начин и самим тим смањили трошкови одржавања.

Кључне речи: **лежаји, ветрогенератор, оптерећење**

Abstract

From general aspect, bearings are mechanical set which is embedded in shaft support and shaft. Basic function and the most important role of bearings is transmitting load, from mobile to immobile parts of machines and securing conditions for relative movement of rotary parts. In this work we presented basic characteristics, terms and classification of wind generators, as well as their role in proper operating of wind generator, and why is important to select a proper bearing in order to exploit wind generator in the best possible way. We have also explained how to reduce the cost of maintenance and time during which wind generator will not be used.

Key words: **Bearings, wind generator, load**

Садржај

1. Увод.....	6
Основни појмови	6
2. Подела лежаја	9
2.1 Подела према правцу дејства силе	9
2.2 Подела према броју редова котрљајних тела	10
2.3 Подела према способности прилагођавања деформацији вратила	10
3. Врсте и карактеристике стандардних котрљајних лежаја	11
3.1 Прстенасти куглични једноредни лежаји	11
3.2 Прстенасти куглични једноредни лежаји са косим додиром	11
3.3 Прстенасти цилиндрично-ваљкасти једноредни лежаји	12
3.4 Игличасти лежаји	12
3.5 Прстенасти конично-ваљкасти лежаји	13
3.6 Колутни куглични лежаји	13
3.7 Самоподесиви лежаји	14
4. Мере и означавање котрљајних лежаја	15
5. Носивост и радни век лежаја	18
Оптерећење и напони у деловима лежаја	18
6. Обновљиви извори енергије	19
6.1 Енергетска будућност у изградњи ветропаркова	19
6.2 Најбоље локације за изградњу ветропаркова	21
6.3 Основни услови за производњу електричне енергије из ветра	22
7. Ветрогенератори	23
7.1 Историја ветрогенератора	23
7.2 Ветрогенератори са хоризонталном осовином	24
7.3 Ветрогенератори са вертикалном осовином	24

7.4 Главни трендови енергије ветра	25
8. Лежаји за ветрогенераторе	26
8.1 Компоненте ветрогенератора	27
8.2 Поузданост и одржавање ветрогенератора	29
8.3 Селекција лежаја за ветрогенераторе	30
8.4 Динамичка моћ ношења лежаја	30
8.5 Еквивалентн динамичко оптерећење	32
8.6 Лежај главног вратила	33
8.7 Лежај кућишта.....	34
8.8 Лежаји елисе	35
8.9 Лежај мултипликатора	36
8.10 Номенклатура лежаја	37
9. Детекција отказа ветрогенератора	38
9.1 Експериментални тестови	39
10. Закључак	41
11. Литература	42

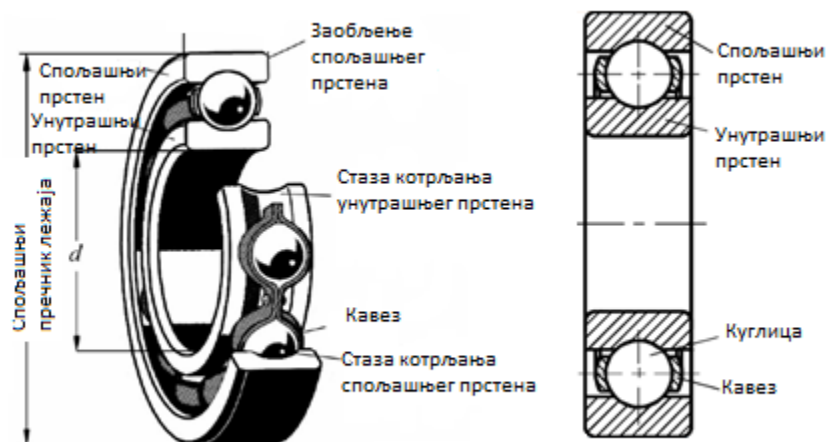
1. Увод

Основни појмови

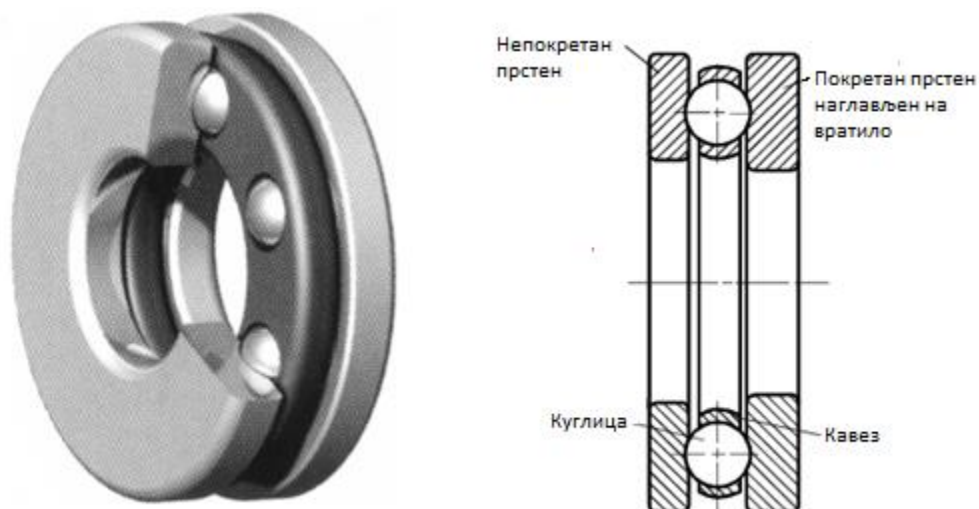
Котрљајни лежаји су машински склопови који се најчешће уграђују у ослоње вратила и осовина. Често се за котрљајни лежај користи само израз лежај. Основна улога лежаја је преношење оптерећења са покретних на непокретне делове машина, и обезбеђење услова за релативно кретање обртних делова. Лежаји преносе силе са вратила и осовина на носећу конструкцију (кућиште). Лежаји се уграђују и између других релативно покретних делова, нпр. између обртних главчина и вратила. Према томе, лежаји преносе само силе, а не и обртне моменте. Котрљајни лежаји су стандардни елементи и производе се у специјализованим фабрикама. Котрљајни лежаји се састоје од прстенова или колутова, котрљајних тела и кавеза (држача котрљајних тела). Котрљајна тела су смештена између спољашњег и унутрашњег прстена, код прстенастих лежаја, односно између колутова код колутних лежаја као што је приказано на слици бр. 1, [1].



Слика бр. 1 – Котрљајни лежаји



Слика бр. 2 - Саставни делови прстеног лежаја



Слика бр. 3 – Саставни делови колутног лежаја

Код колутних лежаја један колут је чврсто монтиран на вратило и окреће се заједно са њим. Други колут је углављен у кућици лежаја и непокретан је.

У прстеновима и колутима уграђени су жлебови, тзв. **стазе котрљања** по којима се крећу котрљајна тела.

Радијус кривине жлебова је нешто већи од радијуса кривине котрљајних тела. По правилу, прстенасти лежаји служе за преношење радијалних сила, а могу се применити и у случају радијалних и аксијалних сила. Колутни лежаји служе за преношење аксијалних сила.

Кавез спречава међусобни додир котрљајних тела и одржава њихово стално међусобно растојање.



а)



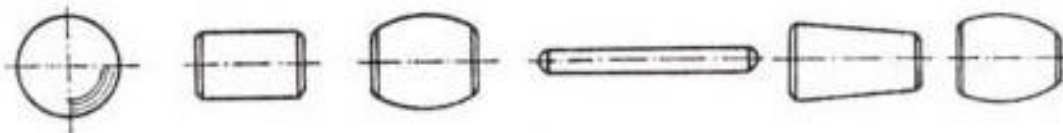
б)



в)

Слика бр. 4 – Кавези котрљајних лежаја: а) за куглице, б) за ваљке, в) при великим бројевима обртаја

Котрљајна тела могу бити у облику куглица, цилиндричних ваљака, заобљених ваљака, конуса, заобљених конуса и иглица, као што је приказано на слици број 5.

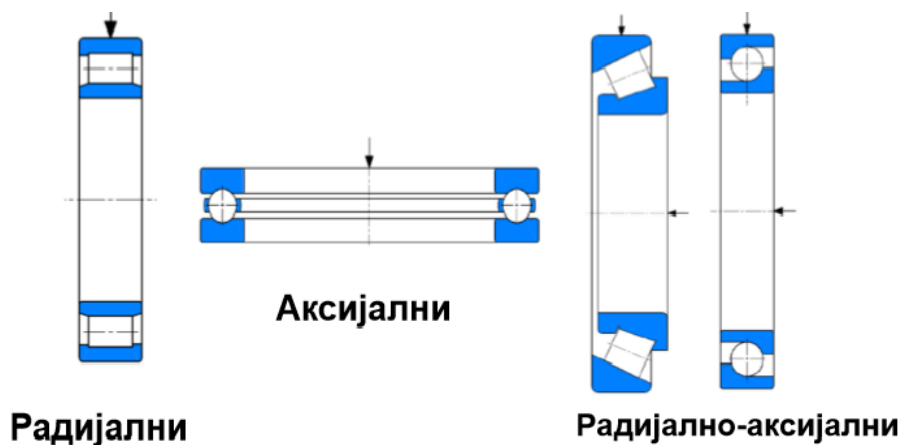


Слика бр. 5 – Облици котрљајних тела

2. Подела лежаја

2.1 Према правцу дејства сила (спољашњег оптерећења) разликују се:

- радијални,
- аксијални,
- радијално-аксијални лежаји.



Слика бр. 6 – Подела лежаја према правцу дејства сила

Код **радијалних и радијално-аксијалних лежаја** (лежаји за радијално и аксијално оптерећење), котрљајна тела се котрљају између прстенова. Због тога се називају још и **прстени (прстенасти лежаји)**.

Код аксијалних лежаја котрљајна тела се котрљају између колутова па се називају **колутни лежаји**.

Аксијални лежаји могу да преносе аксијалну силу само у једном или у оба смера, па се разликују **једносмерни** и **двосмерни** котрљајни лежаји.

2.2 Према броју редова котрљајних тела лежаји могу бити:

- једноредни (један ред котрљајних тела),
- вишередни (два или више редова котрљајних тела).

Дворедни лежаји имају већу моћ ношења.



Једноредни

Дворедни

Вишередни

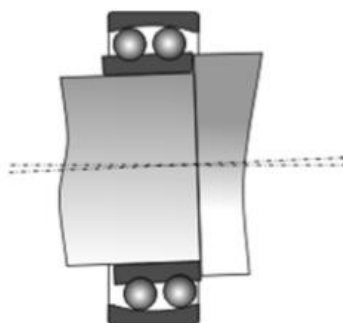
Слика бр. 7 – Подела лежаја према броју редова котрљајних тела

2.3 Према способности прилагођавања лежаја деформацији вратила у ослонцу лежаји се деле на:

- круте (неподесиве),
- зглобне (подесиве).



Крути лежај



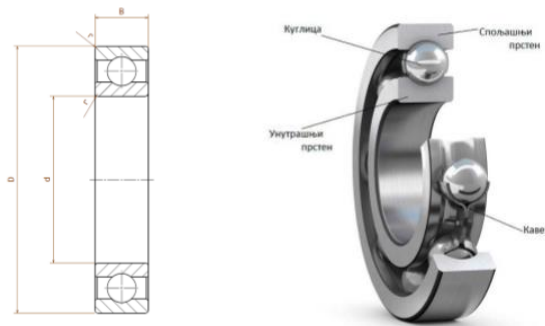
Подесиви лежај

Слика бр. 8 – Крути и подесиви лежај

3. Врсте и карактеристике стандардних котрљајних лежаја

3.1 Прстенасти куглични једноредни лежаји

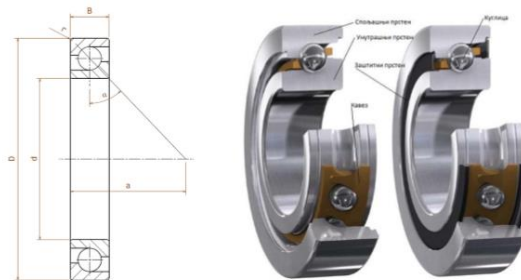
Спадају у групу радијално-аксијалних лежаја. Способни су да пренесу релативно велика радијална и знатна аксијална оптерећења. Прстенасти куглични једноредни лежаји могу да пренесу велике радијалне и знатне аксијалне силе у оба смера. Величина аксијалне силе не би требало да буде већа од 70% носивости лежаја. Примена ових лежаја је универзална.



Слика бр. 9 - Прстенасти куглични једноредни лежај

3.2 Прстенасти куглични једноредни лежаји са косим додиром

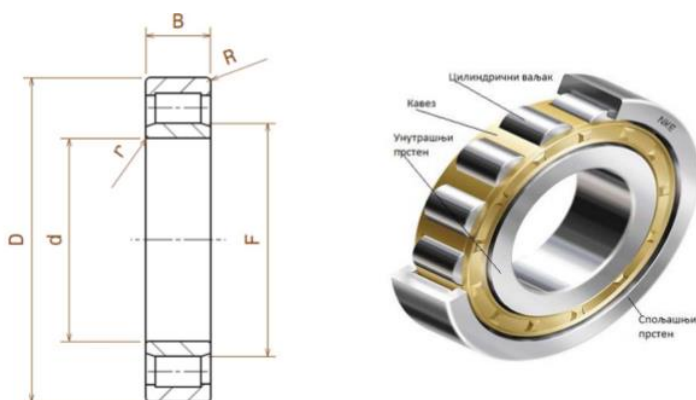
Прстенасти куглични лежаји са косим додиром преносе велике радијалне и аксијалне силе. Карактеристично је да жлебови за котрљајна тела на спољашњем и унутрашњем прстену имају наклон само са једне стране, а друга страна је изведена равно. Зато једноредни лежај са косим додиром може да преноси аксијалну силу само у једном смеру. Ако се жели преношење аксијалне силе у оба смера, онда се ови лежаји уграђују у пару или по један лежај у сваком ослоњу. Дворедни лежаји са косим додиром преносе аксијалну силу у оба смера. Примењују се код вратила где се захтева тачно вођење и код вратила механичких преносника снаге.



Слика бр. 10 - Прстенасти куглични једноредни лежај са косим додиром

3.3 Прстенасти цилиндрично-ваљкасти једноредни лежаји

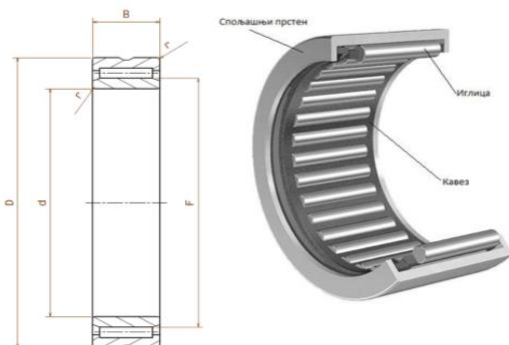
Прстенасти цилиндрично-ваљкасти лежаји могу да преносе велике радијалне силе, а неки типови ових лежаја преносе и мање аксијалне силе. Погодни су при великим учестаностима обртања, па се примењују код разних преносника, осовина шинских возила, електромотора, итд. Карактеристика овог типа лежаја је то да је додир котрљајног тела и прстенова линијски. Користе се првенствено за пренос радијалних оптерећења (слика бр. 11).



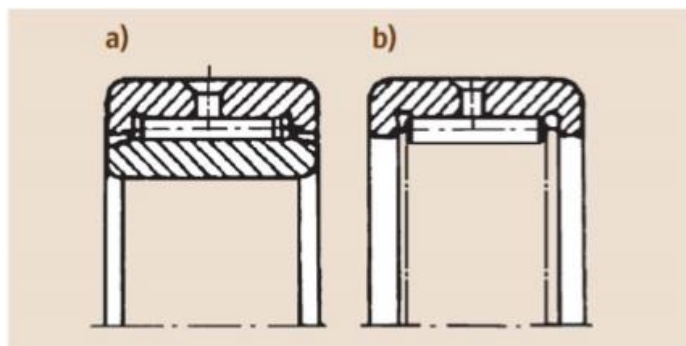
Слика бр. 11 – Прстенасти цилиндрично-ваљчани лежај

3.4 Игличасти лежаји

Представљају специјално извођење цилиндрично ваљчаних лежаја, где котрљајна тела имају занемарљиво мали пречник у односу на дужину (имају облик иглице). Могу да преносе само радијално оптерећење.



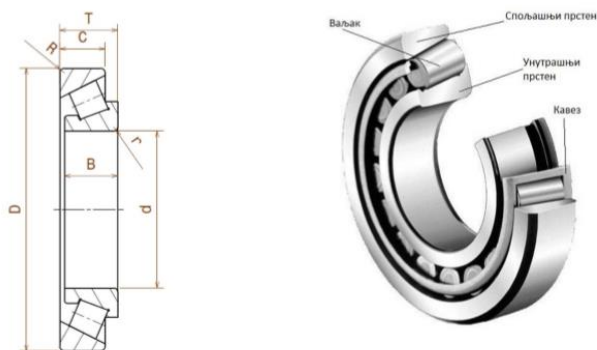
Слика бр. 12 - Игличасти лежај



Слика бр. 13 - Игличасти прстен са спољашњим и унутрашњим прстеном и без унутрашњег прстена

3.5 Прстенасти конично-ваљкасти једноредни лежаји

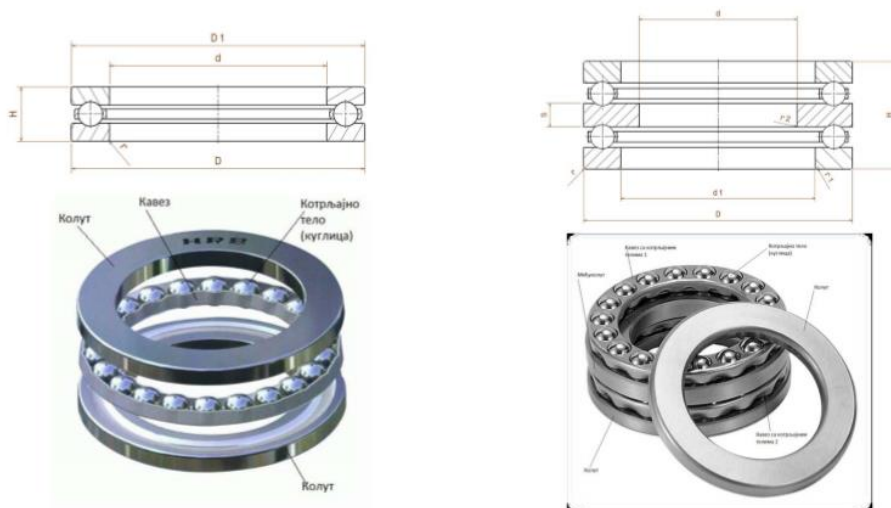
Преносе велика радијална и аксијална оптерећења и имају најширу примену. Користе се код свих врста преносника, трансмисије моторних возила, алатних машина, итд. Уграђују се у пару, као предмет и лик у огледалу, јер се на тај начин елиминише додатна аксијална сила која настаје у раду, а тежи да раздвоји прстенове лежаја, [1].



Слика бр. 14 - Прстенасти конично-ваљчани једноредни лежај

3.6 Колутни куглични лежаји

Користе се за пренос чисто аксијалног оптерећења. Колутни лежаји су осетљиви на одступања паралелности ослоних површина, па је због тога боље користити варијанте са сферним ослањајућим прстеновима. **Једноредни колутни лежај** преноси аксијалну силу само у једном смеру. **Дворедни колутни лежај** преноси аксијалну силу у оба смера, при чему је средњи колут учвршћен на вратилу а два спољашња у кућишту (слика број 15).



Слика бр. 15 – Једноредни и дворедни колутни лежај

3.7 Самоподесиви лежаји

Самоподесиви лежаји имају најбоље карактеристике јер имају велику моћ ношења, преносе велике ударе и могу да се прилагођавају еластичним деформацијама вратила. Самоподесиви лежај намењен је за велика радијална и мала аксијална оптерећења, [1].

Једноредни самоподесиви лежај уграђује се у ослонце вратила изложених великим радијалним оптерећењима са јаким ударима. Такође се примењује код преносника возила и у општој машиноградњи. Ови лежаји преносе и мале аксијалне силе.

Дворедни самоподесиви лежај поред великих радијалних сила, преноси и знатне аксијалне силе у оба смера. Омогућава углове нагиба вратила од 0.5° до 2° . Примењују се, такође у тешкој машиноградњи, за ваљаоничке станове, итд.



Слика бр. 16 – Самоподесиви лежај

4. Мере и означавање котрљајних лежаја

Спољашње мере котрљајних лежаја су стандардизоване према стандардима ISO 15, ISO 104 и ISO 355, DIN 616, DIN ISO 355, односно SRPS M.C3.506. Сваком пречнику отвора d (пречнику вратила), одговара спољашњи пречник D (пречник омотача) и стандардна ширина B , код прстенастих лежаја, односно висина H код аксијалних лежаја. Ознака лежаја се састоји из два дела: основне и додатне ознаке, [1].

Означавање лежаја

Основна ознака дефинише тип и величину лежаја. Тип лежаја – ознака типа лежаја, састоји се од једног или више бројева или слова и представља основну карактеристику конструкције лежаја. Ознака реда мера добија се на основу стандардизованих спољашњих мера (ширина-висина и спољашњи пречник D). Одговарајући низ (ред) за спољашње пречнике означава се бројевима 8, 9, 0, 1, 2, 3, 4, ширине бројевима 0, 1, 2, 3, 4, 5, а висине бројевима 7, 9, 1. Први број у редовима означава најмањи пречник, односно ширину (или висину), а задњи највећу вредност ових величина.

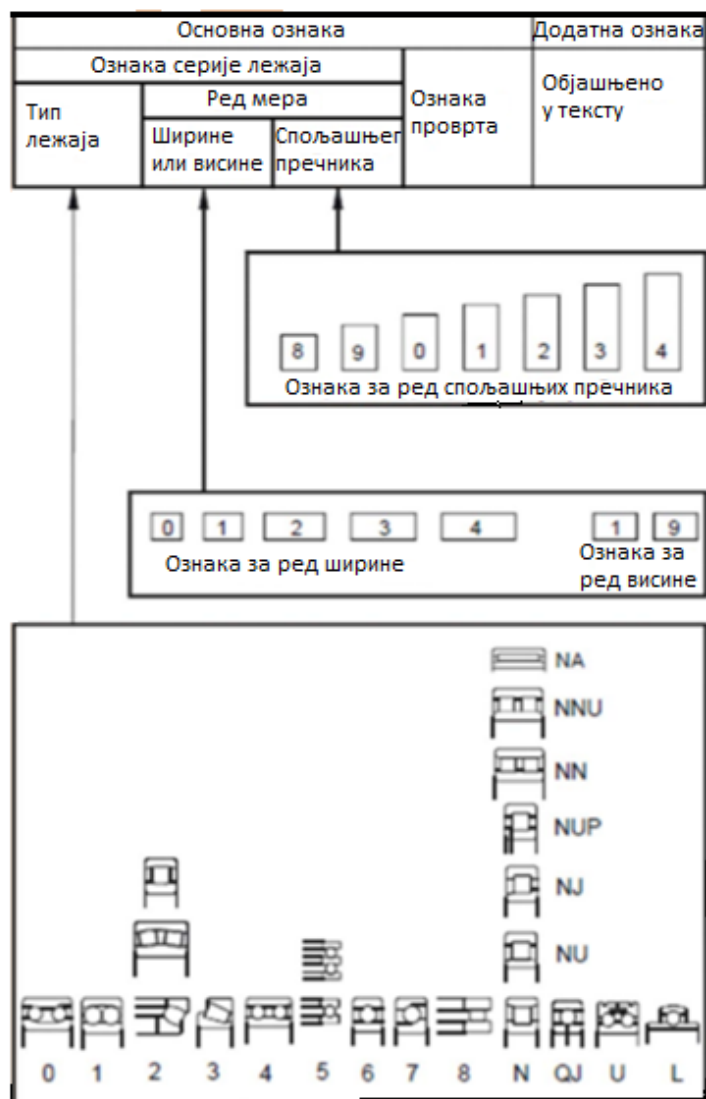
Ознака за отвор (унутрашњи пречник) надовезује се на ознаку за серију лежаја и образује се на различите начине зависно од типа и величине лежаја.

За лежаје са пречником отвора мањим од 10 *mm*, ознака је идентична вредности пречника у *mm*.

За пречнике отвора 10, 12, 15 и 17 *mm* ознаке су 00,01,02,03.

Ознака лежаја са пречником отвора од 20 до 500 *mm* се добија када се вредност пречника у *mm* подели бројем 5, а за пречнике отвора веће од 500 *mm* ознака одговара пречнику у *mm*, [1].

Табела бр. 1 – Означавање лежаја



Ознака **реда мера** добија се на основу стандардизованих спољашњих мера (ширина–висина и спољашњи пречник). За један унутрашњи пречник (d) лежаја, предвиђено је више ширина (висина) и спољашњих пречника. Тиме се за исти пречник обезбеђује низ лежаја различите носивости. Код ознаке реда мера, први број се односи на ширину односно висину лежаја, а други број на спољашњи пречник прстена или колута у зависности од типа лежаја, [2].

Табела бр. 2 – Пример за ред спољашњих мера лежаја

Ред спољашњих пречника	3	03		13		23		33	
	2	02		12		22		32	
	0	00		10		20		30	
Ред мера									
Ред ширина		0		1		2		3	

d

Додатна ознака служи за обележавање материјала, конструктивних специфичности, зазора и толеранција, мазива и др. Ознака се пише иза или испред основне ознаке. Допунска ознака испред основне ознаке значи да су лежаји некомплетни.

Ако је основна ознака група бројева:

1. број – тип лежаја,
2. број – ред ширине,
3. број – ред спољашњег пречника,

Остале бројке – величина унутрашњег пречника.

Ако је основна ознака група слова и бројева:

Слова означавају тип лежаја,

1. број – ред ширине,
2. број – ред спољашњег пречника,

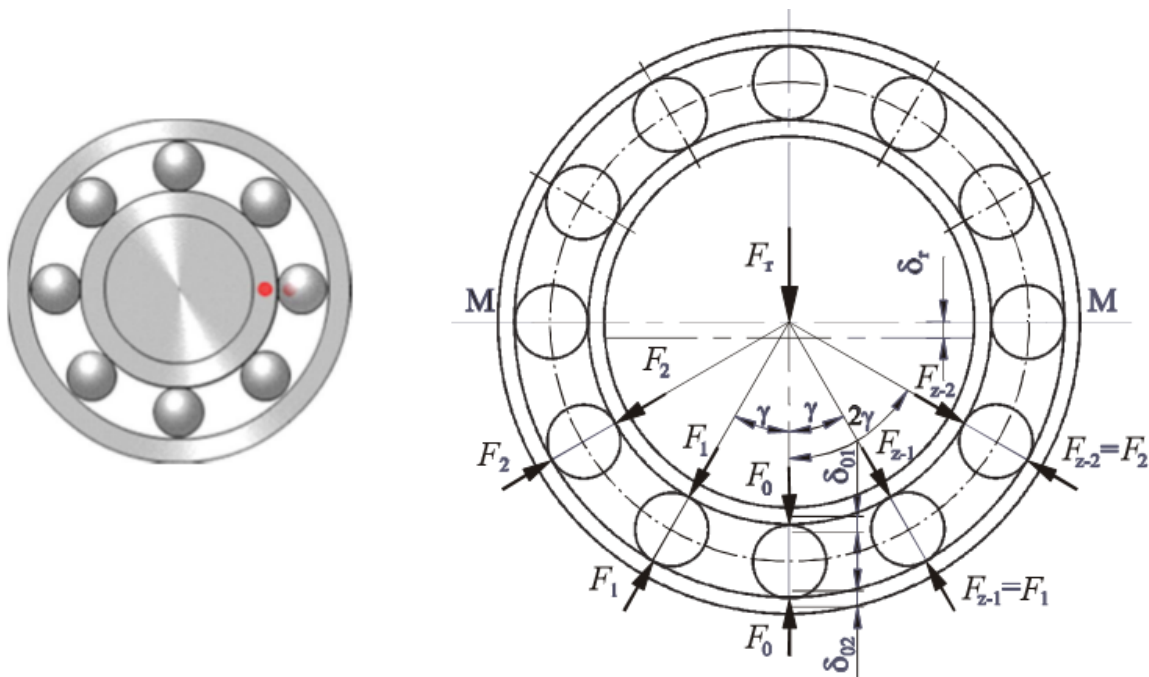
Остале бројке – величина унутрашњег пречника. Пример за основну ознаку лежаја: **6315**

- број **6** – означава тип лежаја (радијални једноредни куглични лежај) ,
- број **3** - је ознака за ред спољашњег пречника (ред ширине 0),
- број **15** – означава унутрашњи пречник ($d = 5 \times 15 = 75 \text{ mm}$) .

5. Носивост и радни век лежаја

Оптерећење и напони у деловима лежаја

Код радијалних лежаја, укупно оптерећење F се расподељује на више котрљајних тела z , али је $z_s < z$. Укупно оптерећење F се расподељује на котрљајна тела испод меридијанске равни "М-М" – равни која је нормална на правац нападне линије силе. Меридијанска раван дели лежај на две зоне – у једној се налазе неоптерећене, а у другој оптерећене куглице. Куглице чији центри леже у меридијанској равни не преносе оптерећење. Оваква расподела се односи на случај када су растојања котрљајних тела једнака, када нема одступања мера и облика, када је кућиште у које је уграђен спољашњи прстен лежаја довољно круто (не мења облик услед оптерећења), и када правац дејства спољашњег оптерећења пролази кроз центар једне од куглица и усмерено је ка истој, [1].



Слика бр. 17 – Расподела оптерећења на котрљајна тела кугличног лежаја

6. Обновљиви извори енергије

Енергија је способност неког тела да врши рад.

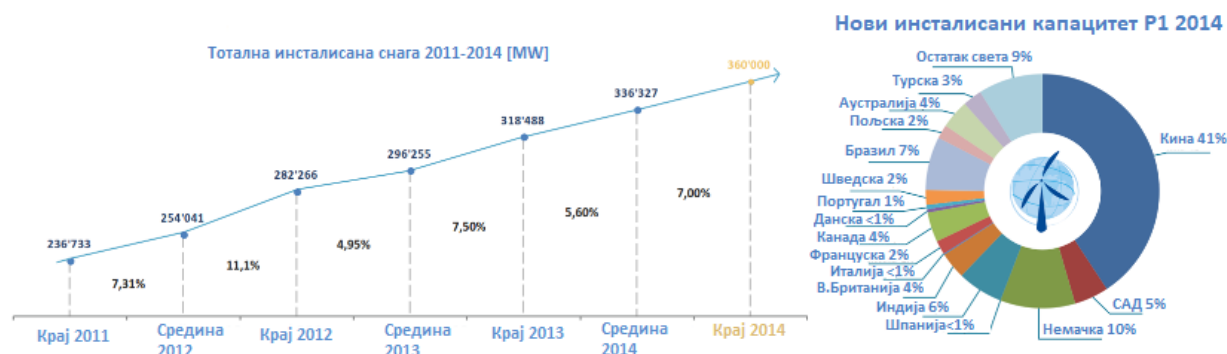
Обновљиви извори енергије представљају неисцрпне изворе енергије из природе, који се обављају у одређеном временском интервалу, у целости или делимично. Обновљиви извори енергије се експлоатишу с циљем производње електричне, топлотне и механичке енергије, а њихова значајна одржива карактеристика јесте нешкодљивост за околину, са смањеном или редукованом емисијом CO_2 у процесу производње енергије. Република Србија располаже обновљивим изворима енергије сунца, воде, ветра, геотермалне енергије и биомасе.

6.1 Енергетска будућност у изградњи ветропаркова

Ветар је хоризонтално струјање ваздушних маса, настало услед разлике температуре, односно просторне разлике у ваздушном притиску. Ветар је последица сунчевог зрачења, тј. енергија ветра је трансформисани облик сунчеве енергије, а на његове карактеристике у великој мери утичу и географски чиниоци. Сва обновљива енергија долази од Сунца. Сунце према Земљи зрачи 1015 kWh/m^2 . Око 1-2% енергије која долази од Сунца претвара се у енергију ветра.

Постоје делови земље на којима дувају такозвани стални (планетарни) ветрови, и на тим подручјима је искоришћавање енергије ветра најисплативије. Добре позиције су обале океана и пучина мора. Пучина се истиче као најбоља позиција због сталности ветрова, али цене инсталације и транспорта енергије коче такву експлоатацију. Код претварања кинетичке енергије ветра у механичку енергију (окретање осовине генератора), искоришћава се само разлика брзине ветра на улазу и на излазу. Као добре стране искоришћавања енергије ветра, истичу се висока поузданост рада постројења, нема трошкова за гориво и нема загађивања околине. Лоше стране су високи трошкови изградње и променљивост брзине ветра (не може се гарантовати испоручивање енергије). Велике ветрењаче често се инсталирају у парк ветрењача и преко трансформатора спајају се на електричну мрежу.

Према подацима *Светске асоцијације енергије ветра* капацитет производње електричне енергије из ветра је до јуна 2014. године достигао 336,327 MW. 17613 MW снаге је инсталирано у првој половини 2014. године. Ово проширење је веће од оног у првим половинама 2012. и 2013. године. Капацитет је првих 6 месеци на светском нивоу порастао за 5.5% и за 13.5% на годишњем нивоу (гледано од средине 2013. до средине 2014.). Упоредно гледано у 2013. години је раст био нижи и износио је 12.8%. Детаљна актуелна статистика се може видети на дијаграму број 1, преузетом са сајта светске асоцијације ветра [4].



Дијаграм бр.1 – Тотална инсталисана снага 2011- 2014.

Према подацима EWEA (*European Wind Energy Association*), инсталирана снага на нивоу Европе у току 2014. износи 11.791,4 MW што представља пораст од 3.8% у односу на исти период у 2013. години. У 2014. години ветрогенератори су заузели прво место по стопи нових инсталација са 43.7% укупних нових енергетских инсталација. То представља 12 процентуалних поена напретка у односу на 2013. годину. Интересантан податак је да су обновљиви извори енергије чинили 79.1% укупних нових енергетских инсталација у 2014.-21.3 GW од укупних 26.9 GW. У табели 3 дате су инсталисане снаге у европским државама преузете са сајта светске асоцијације ветра, [4].

Табела бр. 3 – Инсталисане снаге у европским државама

	ИНСТАЛИСАНО 2013	КРАЈ 2013	ИНСТАЛИСАНО 2014	КРАЈ 2014
Европски капацитет (MW)				
Аустрија	308.4	1.683.8	411.2	2.095
Белгија	275.6	1.665.5	293.5	1.959
Бугарска	7.1	681.1	9.4	690.5
В.Британија	2.075	10.710.9	1.736.4	12.440.3
Грчка	116.2	1.865.9	113.9	13979.8
Данска	694.5	4.807	67	4.845
Естонија	10.5	279.9	22.8	302.7
Ирска	343.6	2.049.3	222.4	2.271.7
Италија	437.9	8.557.9	107.5	8.662.9
Кипар		146.7		146.7
Летонија	2.2	61.8		61.8
Литванија	16.2	278.8	0.5	279.3
Луксембург		58.3		58.3
Мађарска	295	2.671	141	2.805
Малта				
Немачка	3.238.4	34.250.2	5.279.2	39.165
Пољска	893.5	3.389.5	444.3	3.833.8
Португал	200	4.730.4	184	4.914.4
Румунија	694.6	2.599.6	354	2.953.6
Словачка		3.1		3.1
Словенија	2.3	2.3	0.9	3.2
Финска	163.3	449	184	627
Француска	630	8.243	1.042	9.285
Холандија		329.2		329.2
Хрватска	81.2	260.8	85.7	346.5
Чешка	8	268.1	14	281.5
Шведска	689	4.381.6	1.050.2	424.8
Шпанија	175.1	22.959.1	27.5	22.986.5
Укупно	11.357.3	117.383.6	11.791.4	128.751.4

	ИНСТАЛИСАНО 2013	КРАЈ 2013	ИНСТАЛИСАНО 2014	КРАЈ 2014
Земље кандидати за чланство у ЕУ (MW)				
Македонија			37	37
Србија				
Турска	646.3	2.958.5	804	3.762.5
Укупно	646.3	2.958.5	841	3.799.5
EFTA (MW)				
Исланд	1.8	1.8	1.2	3
Лихтенштајн				
Норвешка	110	771.3	48	819.3
Швајцарска	13.3	60.3		60.3
Укупно	125.1	833.4	49.2	882.6
Остатак Европе (MW)				
Белорусија		3.4		3.4
Фарска Острва	4.5	6.6	11.7	18.3
Русија		15.5		15.4
Украјина	95.3	371.2	126.3	497.5
Укупно	99.8	396.7	138	534.7
Укупно Европа	12.228.5	121.572.2	12.819.6	133.968.2

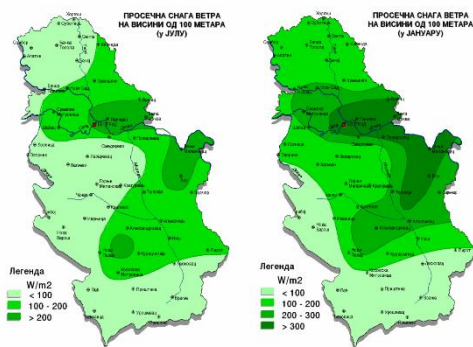
Европска Унија: 128.751.4 (MW)
Земље кандидати за чланство у ЕУ (MW): 3.799.5 (MW)
EFTA: 882.6 (MW)

Србија има технички искористив ветропотенцијал у распону од 8-15 GW што је знатно више од нашег тренутног дефицита у електричној енергији. Узимајући у обзир сталан раст потрошње електричне енергије, долази се до закључка да у Србији има доста потреба за уградњом ветрогенератора. Уз то, највећа потрошња електричне енергије у Србији је у зимском периоду, а то је управо и период када се остварује највећа производња електричне енергије помоћу ветрогенератора, јер ветрови зими дувају већим интензитетом, [5].

6.2 Најбоље локације за изградњу ветропаркова

У Србији, у овом тренутку нема ни једне озбиљније ветроелектране која би произвождала електричну енергију из енергије ветра. У Србији се ради на поправљању ситуације што се тиче броја ветрогенератора. У склопу анализе могућности искоришћења енергије обновљивих извора, а посебно у циљу утврђивања економски исплативог потенцијала енергије ветра и одређивање локације са најповољнијим карактеристикама ради изградње ветроелектрана, урађен је пројекат *Атлас ветрова*. У Србији постоје потенцијално погодне локације за изградњу ветрогенератора:

- 1) Источни делови Србије – Стара Планина, Власина, Озрен, Ртањ, Дели Јован, Црни Врх...У овим регионима постоје локације чија је средња брзина ветра преко 6 m/s. Ова област покрива око 2000 km² и у њој би се перспективно могло изградити око 2000 MWW инсталиране снаге ветрогенератора.
- 2) Златибор, Жабљак, Бјеласица, Копаоник, Дивчибаре су планинске области где би се мерењем могле утврдити погодне микролокације за изградњу ветрогенератора.
- 3) Панонска низија, северно од Дунава је такође богата ветром. Ова област покрива око 2000 km² и погодна је за изградњу ветрогенератора, јер је изграђена путна инфраструктура, постоји електрична мрежа, близина великих центара, потрошње електричне енергије и слично. У перспективи би се овој области могло инсталирати око 1500-2000 MW ветрогенераторских производних капацитета. На слици испод су дате просечне брзине ветрова на територији Србије у односу на годишње доба за које су мерени, [3,5].



Слика бр. 18 – Просечне брзине ветрова на територији Србије

6.3 Основни услови за производњу електричне енергије из ветра

За производњу електричне енергије из ветра, потребни су ветрогенератори чији су основни делови елисе, преносни механизам, електрогенератор, носећи стуб и струјни трансформатор неопходан за прикључивање на електродистрибутивну мрежу. Пречник ротора може бити преко 120 m, док је тежина једне елисе до 20 t, а висина стуба са ветрогенератором преко 130 m. Комплетан ветрогенератор може да тежи око 200 t.

Да би се проверило да ли постоје услови на одређеној локацији за постављање ветрогенератора, прво је неопходно измерити брзину ветра, а она зависи од конфигурације терена, објеката на тлу, и њихове висине. Ако ветар дува брзином од око 3 m/s па све до 25 m/s, први услов је задовољен. Ипак, требало би имати у виду да је потребно да ветар дува најмање 2800 сати годишње просечном брзином од преко 6 m/s (једна година има 8760 сати), да би се одређена локација узела у обзир за изградњу ветропарка.

Веома је важно да инвеститор буде упознат са неопходношћу континуираног мерења брзине ветра у временском распону од макар годину дана, јер једино на тај начин могуће је тачно проценити колико електричне енергије би се произвело на разматраној локацији, [4].



Слика бр. 19 – Процентуална расподела извора обновљиве енергије

7. Ветрогенератори

Ветрогенератори (ветроелектране или аеро-електране) су врста електрана које користе енергију ветра, који је обновљиви извор енергије. Ветрогенератори се састоје из носеће конструкције у облику стуба, ветротурбине, генератора електричне енергије, дела који регулише брзину обртања генератора и излазни напон ветрогенератора, и прикључка на неки систем за акумулисање енергије или на електричну мрежу. Ветрогенератори користе ветар за стварање електричне енергије. Једноставно речено ветрогенератори раде супротно од вентилатора, уместо да користе електричну енергију за стварање струјања они користе ветар за стварање електричне енергије. Ветар окреће елисе сличне пропелерима око ротора, а ротор је везан на главну осовину која окреће генератор за стварање електричне енергије, [3].

7.1 Историја ветрогенератора

По открићу електромотора и електричног генератора у 19. веку, почели су експерименти са производњом електричне енергије. Први модели ветрогенератора су били мало више од ветрењача са додатним електричним генератором, који је претварао механичку енергију у електричну. Сматра се да је први ветрогенератор направио *Чарлс Бруш* 1888. године у Кливленду (САД). Године 1908. постојала су у САД 72 ветрогенератора снаге од 5-25 KW. У време првог светског рата, 100000 мањих ветрењача за фарме је произвођено сваке године у САД, углавном за пумпање воде. До 1930. године, мањи ветрогенератори су постали чести на фармама, обезбеђујући струју за неколико сијалица, радио и друге мање потрошаче. После 1930. почела је електрификација руралних делова САД, и ветрогенератори су углавном напуштени због јефтине струје из развијене електричне мреже. У Европи, електрификација је свуда била централизована на државном нивоу, и ветрогенератори су постојали само као експерименти до 1973. године. После нафтне кризе 1973., а поготово после 2000. године, развој се све више убрзава. Цена енергије из ветрогенератора полако пада, а цена енергије из класичних необновљивих извора енергије расте. Све је ово допринело да је количина произведене електричне енергије из ветрогенератора порасла 5 пута у периоду од 2000. до 2007. године, [3].



Слика бр. 20 – Изглед ветропарка

7.2 Ветрогенератори са вертикалном осовином

Заједничка особина ветрогенератора ове конструкције је што је оса ротације елиса или турбине вертикална.

Предности ветрогенератора са вертикалном осовином:

- једноставна израда,
- велики обртни момент,
- издржљивост,
- нема потребе да се окрећу у правцу ветра, без механизма за ту сврху,
- лакше одржавање од ветрогенератора са хоризонталном осовином, јер је генератор близу тла.

Недостаци ветрогенератора са вертикалном осовином:

- мања ефикасност од ветрогенератора са хоризонталном осовином,
- потребан већи степен механичког преноса за производњу електричне енергије.

7.3 Ветрогенератори са хоризонталном осовином

У данашње време најраспрострањенији тип ветрогенератора за велике снаге је управо ветрогенератор са хоризонталном осовином.

Предности ветрогенератора са хоризонталном осовином:

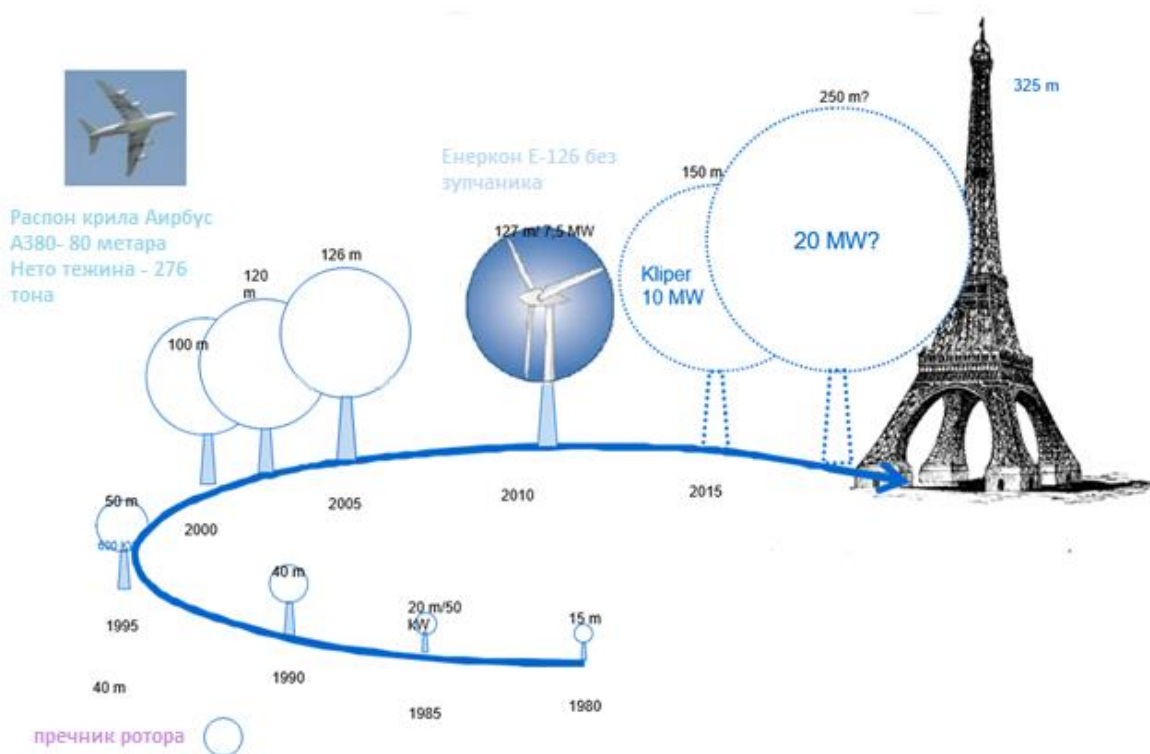
- постављају се на већим висинама где су и брзине ветра веће,
- боља ефикасност од ветрогенератора са вертикалном осовином,
- могућност мењања нападног угла елисе (повећава ефикасност и олакшава регулацију брзине).

Недостаци ветрогенератора са хоризонталном осовином:

- скупи торњеви веће висине,
- вибрације при раду,
- потреба за непрекидним усмеравањем осовине у ветар,
- сложеност конструкције,
- скупо одржавање високих стубова и генераторског склопа на великој висини.

7.4 Главни трендови енергије ветра

Брза глобализација растуће индустрије довела је до пораста броја произвођача ветротурбина. У томе предњаче азијски произвођачи ветротурбина. Како индустрија напредује из дана у дан, тако се померају и границе могућности ветротурбина. Константан развитак довео је до могућности да се реализују и планови монтирања ветротурбина у екстремна поднебља (пустиње, арктичке области, близу обала). Одлазак у екстремна поднебља представља нове изазове за конструкторе ветрогенератора. Раст индустрије ветротурбина доводи и до проширења величине турбина, MMW класа добија на значају. Самим тим преовлађује ширење турбина директног погона наспрам оних опремљених мltипликаторим. Велики утицај на индустрију ветротурбина има и политичка ситуација у свету, [5].

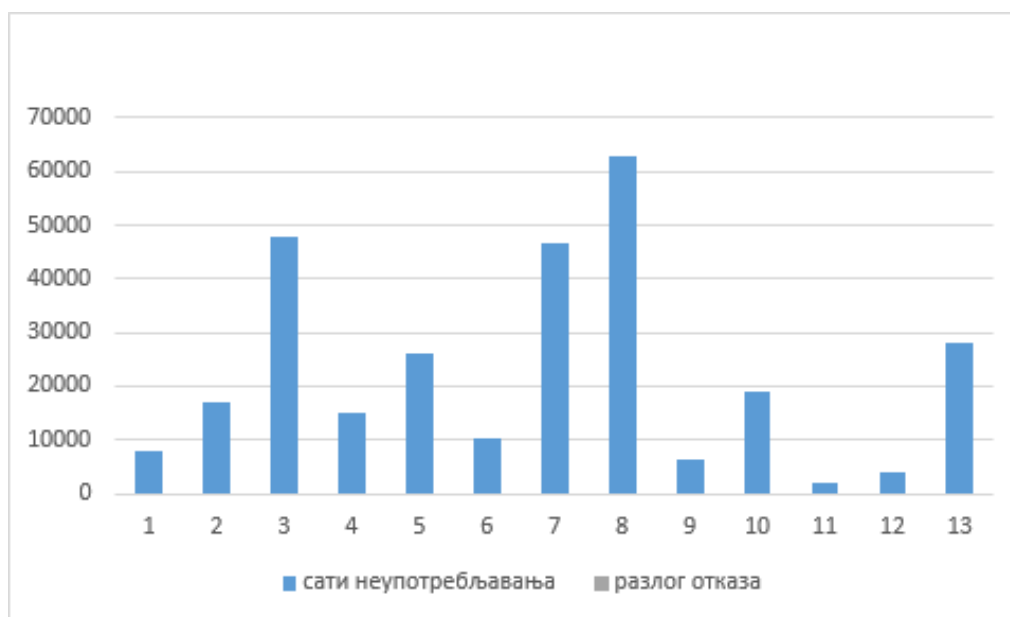


Слика бр. 21 – 2010: 200 пута више енергије него 1980., повећање ротора за 8,5 пута

8. Лежаји за ветрогенераторе

Потреба за приступачним и поузданим ветрогенераторима је веома важна јер свет пребацује свој фокус производње енергије на обновљиве изворе енергије. Статистика отказа ветротурбина показује да је већина времена некоришћења повезана са лежајима.

Лежаји су кључни делови ветрогенератора. Они морају континуално радити под различитим оптерећењима и често са неадекватним подмазивањем. Ветропаркови у близини обале су такође тешки за одржавање. Код ветрогенератора се најчешће користе ваљкасти лежаји веома великих димензија. Откази ветрогенератора понекада су изазвани отказима лежаја, који за последицу имају велико време некоришћења ветрогенератора. Многи застоји у раду су последица отказа на лежајима унутар ветрогенератора. Ови откази се јављају као директна последица неадекватног подмазивања и недостатка редовног одржавања.



1-сензори	5-анемометар	9- редуктор	13-ротор
2-хидраулични системи	6- кућиште	10-систем за подешавање нагиба	
3-електронски системи	7-генератор	11-механичка кочница	
4-систем електронске контроле	8- лежај главног вратила	12-ваздушна кочница	

Дијаграм бр. 2 – Сати неупотребљавања сакупљени од 2003. до 2007. године за ветрогенераторе које раде у Немачкој, [6]

Постоје различити предлози за решавање проблема отказа лежаја ветрогенератора, чији минимални радни век треба да буде 20 година, [7]. Предлози варирају од комплетне замене архитектуре лежаја, па до коришћења лежаја од ојачаних материјала (коришћењем разних врста превлака).

У овом раду је усвојен приступ компаративне анализе, [8]. Поређења су извршена између лежаја који су способни за функционисање унутар ограничења под којима ветротурбине раде. Овај приступ је у складу са стандардним принципима селекције лежаја за механичке уређаје. Најпре су анализирана ограничења које лежај поседује, а затим су она упоређена са матрицом одабира лежаја произвођача за различите опције лежаја, које се даље анализирају коришћењем података о животном веку лежаја обрадом добијених података из ветропаркова. Основни прорачун животног века лежаја је био крајњи одлучујући фактор на основу кога су обављана поређења за различите лежаје унутар турбине.

8.1 Компоненте ветрогенератора

Основни делови ветрогенератора су торањ, ротор и кућиште. Ротор заједно чине главчина и елисе. Главчина се често посматра као део трансмисионог система. Ротор је повезан са кућиштем у којем се налазе трансмисиони систем, генератор, контролни уређај и кочница. Улога кућишта је и да заштити компоненте које се налазе унутар њега. Главне компоненте ветрогенератора приказане су на слици бр. 22.

Трансмисиони систем заједно са генератором представља кључне делове ветрогенератора. Трансмисиони систем се састоји од: главчине, главног вратила (спороходног), лежаја, спојница и зупчастог преносника-мултипликатора.

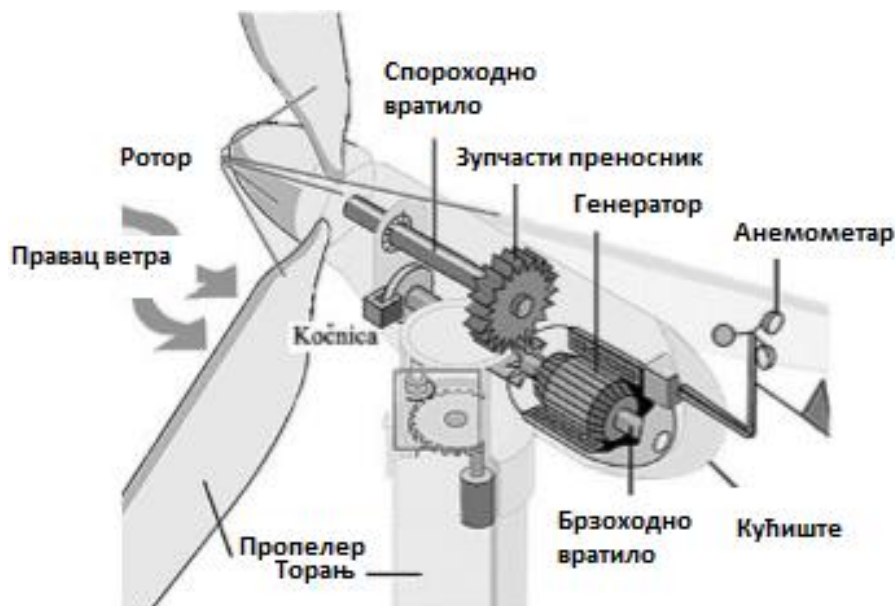
Главчина се обично, услед специфичног облика израђује од сивог лива. Главно вратило се најчешће израђује ковањем од челика. Брзина обртања главног вратила је око $40-60 \text{ min}^{-1}$.

Главни лежаји су обично сферни котрљајни лежаји. Заптивање је лабиринтско и тиме је отклоњено хабање, као и продор воде и прљавштине у лежаје. Главно вратило је преко фриксионе спојнице повезано са зупчастим преносником, на који преноси обртни момент. Улога зупчастог преносника-мултипликатора је да увећа брзину обртања главног вратила са $40-60 \text{ min}^{-1}$ на $1500-1800 \text{ min}^{-1}$. Ово захтева велике и масивне зупчанике. У зависности од излазне снаге, преносник може бити двостепени (150 MW), тростепени (300 MW), или планетаран (преко 450 MW). Излазно вратило преносника је са генератором спојено крутом спојницом.

Узимајући у обзир све специфичности и захтеве који се пред њих постављају, мазива за ветрогенераторе морају да испуњавају високе стандарде по питању квалитета. Ови стандарди су далеко виши у односу на оне који се постављају пред мазива за зупчанике у индустрији, и много тачније осликавају стварне услове експлоатације, укључујући услове рада на ниским температурама.

Захтеви за квалитетом мазива која се употребљавају на ветрогенераторима који су постављени у близини мора су специфични, с обзиром да та мазива морају да имају продужени век употребе.

За подмазивање зупчастог преносника користе се течна мазива, минералног и синтетичког порекла, а за индивидуалне котрљајне лежаје употребљавају се техничке масти. При томе се за испитивање мазива користе постојећи уређаји и методе са пооштреним условима испитивања (SKF Emkor, FAG FE 8) или се развијају нови. Очекује се, такође, развој нових стандарда за мазива за ветрогенераторе, који ће укључивати и испитивања компатибилности мазива са бојама, лаковима и заптивним материјалима.



Слика бр. 22 – Главне компоненте ветрогенератора

8.2 Поузданост и одржавање ветрогенератора

Услови који се захтевају за уља од стране произвођача зупчаника су већ у примени, и већина уља за подмазивање зупчаника их задовољавају. Проблеми се јављају код нових услова (тестова) за лежаје, који су уведени и који не само да оцењују похабаност лежаја и кавеза лежаја, већ оцењују и корозивни питинг (замор материјала) и промену у боји лежаја. Да би се испунили ови захтеви потребно је користити мање активне и мање агресивне ЕР адитиве. Уља за зупчанике ветрогенератора треба да имају термичку стабилност најбољих хидрауличких уља, у комбинацији са карактеристикама ЕР адитива садашњих уља за зупчанике. Постојећи захтеви за високом поузданошћу рада система ветрогенератора условљавају и примене савремених поступака одржавања. Основни триболошки проблеми су на лежајима унутар мултипликатора. Они морају да приме веома велика оптерећења. У зависности од положаја у преноснику и од радног оптерећења, лежаји ће некад морати да преносе велика оптерећења при малим брзинама, а некад мала оптерећења при великим брзинама.

Висока оптерећења при малим брзинама, која се јављају када је брзина ветра мала, могу да доведу до прекида уљног филма и скраћења века лежаја. Лежаји у мултипликатору се углавном подмазују аутоматским системом подмазивања. Специјалан уљни филтер, који је одвојен од уљног расхладног система, обезбеђује високу чистоћу уља. Ово је јако битно у пустињама и сувим подручјима где ваздушна прашина може да доспе у зупчасти преносник и да проузрокује абразивно хабање. Код ветрогенератора који се налазе на платформама постављеним на мору, влага и со су увек присутан контаминант. Чистоћа уља је јако битна, а најчешћи контаминанти у зупчастом преноснику су: они унети приликом уграђивања, они створени унутар самог преносника, они који су ушли кроз одушке и заптивке и они унети непажњом приликом одржавања. Нечистоће унете приликом уградње су последица монтаже у неадекватним условима. Ове нечистоће су најопасније приликом стартовања јер уљни филтер није у стању да их моментално одстрани. Нечистоће које се стварају унутар самог преносника су углавном продукти хабања зупчаника, лежаја, и осталих компонената. Хабање се манифестује као микропитинг, макропитинг, адхезија, абразија и фретинг. Нечистоће у преноснику могу да доспу и преко одушака и заптивки. Приликом одржавања тј. подмазивања такође треба водити рачуна да не дође до продора нечистоћа. Програм превентивног одржавања односно праћења стања задржаности уља, киселости, вискозности и присуства воде могу да помогну у смањењу броја отказа.

У садашњем тренутку уље се у мултипликатору мења сваких 8-12 месеци, мада се ради на продужењу овог интервала и очекује се да за ветрогенераторе постављене на мору он бити продужен на три године.

Развојем и све већим бројем ветрогенератора који се налазе на платформама постављеним на мору, услед отежаног приступа, све се више указује потреба за што бољим предвиђањем века мазива. У ту сврху се све више користи проактивно одржавање, [9].

Основне карактеристике које треба одређивати и проверавати током употребе мазива су: чистоћа (у складу са ISO стандардом), вискозност, присуство воде и оксидација. Са ова четири параметра, 90% информација о мазиву и компонентама је доступно.

8.3 Селекција лежаја за ветрогенераторе

Поузданост лежаја одређена на основу животног века и ефикасности трошкова, представља репер за избор лежаја за ветрогенератор. Зато се мора изабрати одговарајући тип и величина лежаја. Процес селекције мора размотрити све факторе који ће утицати на трошкове и перформансе лежаја. Ови фактори укључују: величину и правац оптерећења, брзину ротације, захтевани животни век, доступни простор, подмазивање, дизајн вратила и кућишта, прилагођавање, температуру и окружење.

За основни пројекат величина и правац оптерећења, укључујући и брзину обртања, захтевани животни век и доступни простор се сматрају критичним факторима.

8.4 Динамичка моћ ношења и радни век лежаја

Очекује се да ветротурбине раде 175 000 сати (20 година).

Динамичка моћ ношења лежаја C , представља оптерећење (односно силу) константног правца и интензитета које лежај преноси и при коме најмање 90% испитиваних лежаја оствари $N_c=10^6$ обртаја (промена оптерећења) без појаве оштећења. Значи, вероватноћа издржљивости лежаја је 0,9 а вероватноћа разарања 0,1. Број промена $N_c=10^6$ одговара веку лежаја (или времену испитивања) од 500 сати и броју обртаја $33,33 \text{ min}^{-1}$. Динамичка моћ ношења је максимално оптерећење које лежај може да издржи ако ради 500 сати при броју обртаја $33,33 \text{ min}^{-1}$.

Динамичка моћ ношења лежаја се утврђује експерименталним путем. Произвођачи лежаја је наводе у каталозима. Код експерименталног испитивања динамичке носивости прстенастих лежаја, оптерећење је радијално F_r , а обрће се унутрашњи прстен. Код испитивања колутних лежаја, оптерећење је чисто аксијално F_a .

Радни век лежаја је дефинисан бројем часова рада лежаја до појаве замора материјала (питинга). При константном броју обртаја n , min^{-1} , датом еквивалентном оптерећењу F и динамичкој моћи ношења C , номинални радни век лежаја (одговара нормалним условима рада),[1]:

$$L_h = \left(\frac{C}{F} \right)^\alpha \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n} \quad (1)$$

Експонент α зависи од облика котрљајних тела. На основу ISO препорука је $\alpha=3$ за кугличне лежаје, и $\alpha=10/3$ за ваљкасте лежаје.

Прорачуната номинална вредност радног века лежаја се заокружује и то: за радни век мањи од 1000 часова, заокруживање се врши на целих 10; испод 10000 часова на целих 100 и за вредности преко 10000 на целих 1000. Ако стварни радни услови одступају од нормалних, користи се израз за модификовани радни век лежаја. При томе се узима у обзир радна температура лежаја (k_t), вероватноћа издржљивости (a_1), услови подмазивања (a_2), својства материјала (a_3), па је модификовани радни век исказан једначином бр. 2: [2]

$$L_{Mh} = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \left(\frac{k_t \cdot C}{F} \right)^\alpha \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n} \quad (2)$$

Фактор температуре k_t узима у обзир смањење носивости лежаја, вискозност мазива и зазора на повишеној температури. Оријентационе вредности овог фактора су дате у табели бр. 4.

Табела бр 4. – Фактор температуре k_t

t (°C)	100	150	200	250	300
k_t	1	1	0.9	0.75	0.6

Фактор вероватноће издржљивости a_1 дат је у табели бр. 5.

Табела бр. 5 – Фактор издржљивости a_1

P_N	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99
a_1	5	4	3	2	1.0	0.62	0.53	0.44	0.33	0.21

8.5 Еквивалентно динамичко оптерећење

Оптерећење лежаја одређује се према познатим законима механике. У пракси се срећу три случаја оптерећења лежаја: радијална, аксијална и комбинована.

Када је оптерећење приближно константно и дејство је радијално, еквивалентно оптерећење лежаја је $F=F_r$. У случају дејства само аксијалне силе, узима се да је еквивалентно оптерећење $F=F_a$. При дејству радијалних и аксијалних сила (комбинована оптерећења), еквивалентно оптерећење се дефинише у зависности од радних услова:

Када су радно оптерећење и број обртаја лежаја приближно константни у току рада, еквивалентно оптерећење се добија на основу израза: $F=XF_r+YF_a$, где је :

- F_r стварно резултујуће радијално оптерећење у ослонцу (векторски збир свих радијалних сила у ослонцу);
- F_a стварно резултујуће аксијално оптерећење у ослонцу (резултујућа аксијална компонента отпора ослонца);
- X коефицијент радијалног оптерећења и Y коефицијент аксијалног оптерећења.

Вредности коефицијента X и Y зависе од типа и величине лежаја као и односа величине аксијалне и радијалне компоненте оптерећења F_a/F_r .

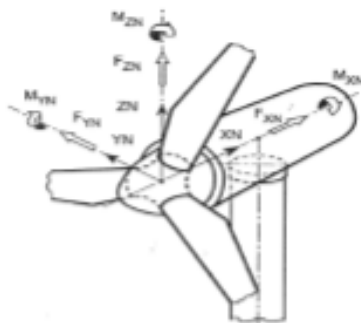
Ако су радно оптерећење (радијална сила, аксијална сила) и број обртаја променљиви, прорачун се изводи према идеалном оптерећењу (идеално оптерећење је оно при коме лежај има исти век као при променљивом оптерећењу). При томе могу да наступе следећи случајеви:

а) оптерећење лежаја се мења периодично-приближно линеарно,

б) оптерећење лежаја је стохастичког карактера, [1].

8.6 Лежај главног вратила

Слика 23 приказује анализу деловања оптерећења на главно вратило. Оптерећења на главном вратилу су: радијално оптерећење (тежина)- F_{ZN} ; споредно оптерећење ветра - F_{YN} ; потисак ротора - F_{XN} и обртни моменти елиса.



Слика бр. 23 – Деловање оптерећења на главно вратило

Подаци оптерећења коришћени за ову анализу су из циклуса оптерећења од око 500 варијабилних оптерећења за турбину од 8 MW. Постављена је претпоставка за ротирајућу брзину вратила од 16 min^{-1} и пречник вратила од 900 mm. Ово споредно оптерећење ветра F_{YN} је игнорисано јер је занемарљиво. Главно вратило је ослоњено на два лежаја-непокретни лежај који се налази близу елиса, и покретни лежај који се налази близу мултипликатора. Табеле бр. 6 и 7 у наставку показују животни век лежаја.

Табела бр. 6 – Анализа фиксираних лежаја главног вратила

Тип лежаја		Динамичко оптерећење лежаја P_m , kN	Динамичка моћ ношења C , kN	Модификовани радни век лежаја L , Mh	Номинални радни век лежаја L , h
TRB	SR	666.54	3960	379.8	395625
	DR	1281.95	16800	5306.33	5.52 E6
SRB		1281.95	21400	11888.92	12.38 E6
ABB	SR	211.98	1560	398.55	0.42 E6
	DR	553	676	1.82	1895.83

* TRB- конусни ваљкасти лежај; SR- једноредни лежај; DR- дворедни лежај; SRB- сферични ваљкасти лежај; ABB- куглични лежај са косим додиром

Табела бр. 7 – Анализа нефиксираног лежаја главног вратила

Тип лежаја		Динамичко оптерећење лежаја P_m , kN	Динамичка моћ ношења C , kN	Модификовани радни век лежаја L , Mh	Номинални радни век лежаја L , h
ABB	SR	342.69	1330	58.45	6.09x10 ⁴
SRB		1281.95	18400	7204.74	7.5x10 ⁶
CRB	SR	120.21	7040	780022.02	8.12x10 ⁸
	DR		16500	133880421	1.33x10 ¹⁴
	4R		19800	4495255.68	4.5x10 ¹²
TRB	SR	666.54	11000	5.311	5.53x10 ³
	DR	762.6	14700	19204	2x10 ⁷

* ABB- куглични лежај са косим додиром; SRB- сферични ваљкасти лежај; CRB- цилиндрични ваљкасти лежај; TRB- конусни ваљкасти лежај; SR- једноредни лежај ; DR- дворедни лежај; 4R-четвороредни лежај

8.7 Лежај кућишта

Потисно оптерећење је најважнији фактор за лежај кућишта јер ротира кућиште. Ротира га при ниској и константној брзини. Константна брзина од 0,285 rpm⁻¹ и величина од 1400 mm су коришћене за анализу. Табела 3 приказује анализиране лежаје и животне векове сваког од њих.

Табела бр. 8 – Анализа лежаја кућишта

Тип лежаја		Динамичко оптерећење лежаја P_m , kN	Динамичка моћ ношења C , kN	Модификовани радни век лежаја L , Mh	Номинални радни век лежаја L , h
TCRB		543.7	1587	35.54	2.08x10 ⁶
TSRB		470.7	36800	2.04x10 ⁶	1.19x10 ¹¹
ABB		532.85	1460	20.57	1.2x10 ⁶
BB	SR	529.09	1900	46.31	2.71x10 ⁶
TTRB		481.3	3300	612.33	3.58x10 ⁷

8.8 Лежај елисе

Код лежаја елисе долази до већег аксијалног оптерећења јер се елисе врте у круг, и повременог радијалног оптерећења до ког долази приликом ротирања кућишта.

Табела бр. 9 – Анализа лежаја елисе

Тип лежаја		Динамичко оптерећење лежаја P_m , kN	Динамичка моћ ношења C , kN	Модификовани радни век лежаја L , Mh	Номинални радни век лежаја L , h
ABB	SR	342.69	1330	58.45	6.09x104
SRB		1281.95	18400	7204.74	7.5x106
CRB	SR	120.21	7040	780022.02	8.12x108
	DR		16500	133880421	1.33x1014
	4R		19800	4495255.68	4.5x1012
TRB	SR	666.54	11000	5.311	5.53x103
	DR	762.6	14700	19204	2x107

* ABB- куглични лежај са косим додиром; SR- једноредни лежај; SRB- сферични ваљкасти лежај; CRB-цилиндрични ваљкасти лежај; DR- дворедни лежај; 4R- четвороредни лежај; TRB- конусни ваљкасти лежај

8.9 Лежаји мултипликатора

Табела у наставку се састоји од листе могућих лежаја за различите ротирајуће делове. Као резултат мањка података, само је прва анализа изведена за мултипликатор. Фактори укључују велику брзину и радијално оптерећење.

Табела бр. 10 – Тип лежаја за мултипликатор

	Тип лежаја	
Брзоходно вратило	Непокретна страна	SRB, CRB, TRB, BB, 4PCBB
	Покретна страна	SRB, CRB, BB
Средње вратило	Непокретна страна	SRB, CRB, TRB, 4PCBB
	Покретна страна	SRB, CRB
Спороходно вратило	Непокретна страна	SRB, TRB
	Покретна страна	SRB, CRB, FCCRB
Планетарни преносник	SRB, CRB, FCCRB, TRB	
Носач	FCCRB, SRB, TRB	

*SRB- сферни ваљкасти лежај; CRB-цилиндрични ваљкасти лежај; TRB- конусни ваљкасти лежај; BB- куглични лежај; 4PCBB- куглични лежај са четири контактне тачке; FCCRB- цилиндрични ваљкасти лежај

Тренутно, главна осовина користи SRB лежаје за оба ослонаца. Иако је за SRB тип лежаја израчунати животни век дужи од других лежаја, TRB- SR/DR или ABB-SR, упркос томе прелазе жељених 20 година рада животног века ветротурбине за непокретни ослонац. Исто тако, у слободном ослонцу CRB-SR/DR/4R, TRB-SR/DR и ABB- SR имају краћи животни век лежаја у поређењу са SRB, али прелазе праг од 175000 сати рада. Зато се може рећи да је одговарајућа комбинација или TRB-SR/DR или ABB-SR за непокретни ослонац, с тим да било шта од CRB-SR/DR/4R, TRB-SR/DR и ABB-SR на слободном крају нуди алтернативе, узевши у обзир понављане отказе до којих долази коришћењем SRB лежаја. Исто тако, CRB се тренутно користи за лежај кућишта и има опције TCRB, ABB, BB и TTBB. Средњи лежај користи куглични лежај.. Одабир средњег лежаја показује да ниједан од одабраних лежаја нема одговарајући животни век. Међутим, ово може бити последица неколико фактора, јер је прорачун базиран искључиво на подацима произвођача, [10].

8. 10 Номенклатура лежаја

4PCBB	Куглични лежај са додиром у четири тачке
4R	Четвороредни лежај
ABB	Куглични лежај са косим додиром
BB	Куглични лежај
CRB	Цилиндрични ваљкасти лежај
DR	Дворедни лежај
SR	Једноредни лежај
SRB	Сферни ваљкасти лежај
TRB	Конусни ваљкасти лежај
TSRB	Потисни сферни ваљкасти лежај
TTRB	Потисни конусни ваљкасти лежај
TCRB	Потисни цилиндрични ваљкасти лежај
FCCRB	Цилиндрични ваљкасти лежај

9. Детекција отказа ветрогенератора

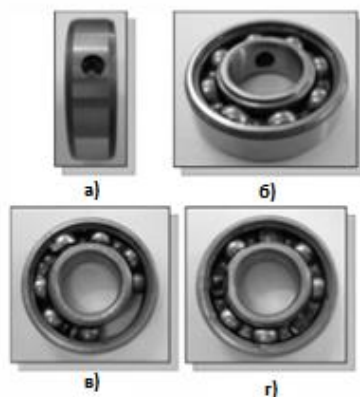
Откривање отказа на време и његова превенција је одувек био захтеван задатак. Међутим, у системима конверзије ветра то је још захтевније, јер ефикасност и одрживост ветропаркова веома зависи од смањења трошкова рада и одржавања. Најефикаснији начин смањења трошкова је сталан надзор стања ветрогенератора. Откривање отказа система у раној фази омогућава проактивно одржавање, које доводи број сати неупотребљавања система до минимума. Системи конверзије енергије ветра су најбрже растући извори нове електричне енергије на свету и очекује се да тако и остане током неког времена. Ти извори постају поуздани конкурент класичним системима генерисања енергије, који се суочавају са параметрима рада који се константно мењају, као што су трошкови горива и то што одржавање старијих система постаје скупље. Системи конверзије енергије ветра пружају алтернативна новонастала решења развијањем ветропаркова на копну и у близини мора, где постоје позамашни извори ветра, што доводи до најбољих прилика за генерисање струје. Међутим, окружења на копну и у близини мора захтевају веома високу поузданост инсталиране опреме јер су она тешко приступачна или чак неприступачна, [11].

Многе технике и алати су развијени за надзор стања ветрогенератора како би се продужио њихов животни век. Неке од ових техника су користиле постојеће и претходно инсталиране сензоре, који могу мерити брзину, излазну обртну силу, вибрације, температуру, густину флукса итд.

Пошто су ротори индукционе машине под великим оптерећењима, укључујући и термичке, механичке и електричне промене, они су статистички рањивији у поређењу са статором. Лежаји су компоненте код које се најчешће јављају откази, [12]. Поред тога, у контексту индустрије енергије ветра, откази лежаја су константан проблем који представља значајан проценат у оквиру укупних отказа ветротурбина, [13]. Отказ лежаја генератора је најчешћи мод отказа повезан са дугим временом неупотребљавања машине. До отказа лежаја углавном долази услед неусклађености у погонској комори, што повећава оптерећење и убрзава хабање лежаја.

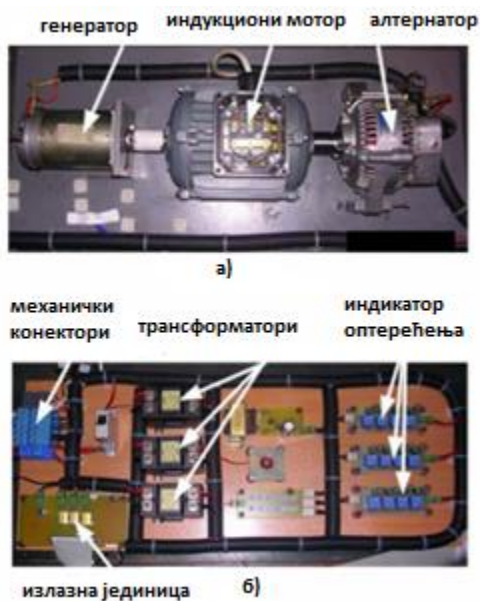
9.1 Експериментални тестови

Откази се добијају једноставним бушењем рупа на различитим деловима лежаја као што је приказано на слици бр. 24.



Слика бр. 24 – већтачки изазвани откази лежаја: а) отказ спољашњег прстена, б) отказ унутрашњег прстена, г) отказ кавеза, в) отказ куглице

За тестирање се користи конвенционална опрема да би се тестирао предложени метод детекције отказа (слика 25).



Слика бр. 25 – Механички и електрични део

Механички део је састављен од синхроне и индукционе машине. Индукциона машина се напаја из синхроног генератора, како би се елиминисала временска компонента фреквенције. Ово аутоматски елиминише доводну компоненту фреквенције, па се стога омогућава фокусирање само на отказе лежаја на струји статора.

Тестирана индукциона машина има следеће процењене параметре: 0,75 kW, 220/380 V, 1,95/3,4 A, 2780 rpm^{-1} , 50 Hz, две шипке, Y – повезана. Има два 6204,2 ZR типа лежаја са следећим параметрима : спољашњи пречник је 47 mm, унутрашњи пречник је 20 mm и средњи пречник је 31,85 mm. Лежај има осам куглица пречника од 12 mm и контактни угао од 0° .

10. Закључак

Одговарајући избор и примена лежаја су кључни за смањење времена неупотребљавања и трошкова одржавања ветрогенератора. Фокус би требало да буде на специјалним конструкцијама лежаја за ветротурбине, а не на стандардним облицима лежаја. Прави одабир лежаја омогућава смањење трошкова одржавања ветрогенератора, обезбеђује дужи животни век ветрогенератора и већу продуктивност. Ветротурбине често морају да се боре и са атмосферским неприликама, као што су екстремно високе или ниске температуре, земљотреси, јаке олује и налети ветрова, снежне падавине и слично. Због тога поузданост лежаја мора бити на високом нивоу како би се обезбедио константан рад. Сваким даном се ради на побољшању поузданости лежаја за ветротурбине и разни произвођачи улажу велика средства да би направили што поузданији производ. Излазна снага ветротурбина се константо повећава, захтеви поузданисти ветрогенератора такође, ради се на продужењу радног века. Самим тим ради се и на унапређењу специјално дизајнираних лежаја за ветрогенераторе. Поред техничког развитка ради се и на еколошком плану, јер ветрогенератори представљају будућност извора енергије из обновљивих ресурса и само је питање дана када ће потпуно заменити стандардне изворе енергије који користе необновљиве ресурсе као погонско гориво.

11. Литература

- [1] В. Николић: МАШИНСКИ ЕЛЕМЕНТИ, Машински факултет Крагујевац, 2004.
- [2] Б. Стојановић, М. Благојевић: МЕХАНИЧКИ ПРЕНОСНИЦИ, Факултет инжењерских наука Крагујевац, 2015.
- [3] <https://www.energetskiportal.rs/obnovljivi-izvori-energije/energija-vetra/>
- [4] <http://www.irena.org/home/>
- [5] <http://obnovljiviizvorienergije.rs/>
- [6] <http://www.wwindea.org/>
- [7] S. Y. a. N. Ninoyu, "Technical Trends in Wind Turbine Bearings."
- [8] Y. Amirat, M. Benbouzid, E. AI-Ahmar, B. Bensaker, and S. Turri, "A brief status on condition monitoring and fault diagnosis in wind energy conversion systems," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 13, no. 9, pp. 2629-2636, 2009.
- [9] B. Lu, Y. Li, X. Wu and Z. Yang, "A review of recent advances in wind turbine condition monitoring and fault diagnosis", in Proceedings of the 2009 IEEE PEMWA, Lincoln (USA), pp. 1-7, June 2009.
- [10] W. Yang, P.1. Tavner, c.1. Crabtree and M. Wilkinson, "Cost-effective condition monitoring for wind turbines," IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 57, no. 1, pp. 263-271, January 2010.
- [11] M. Benbouzid, "A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection," IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 47, no. 5, pp. 984-993, October 2000.
- [12] I. Antonino-Daviu, M. Riera-Guasp, M. Pineda-Sanchez, and R.B. Perez, "A critical comparison between DWT and Hilbert-Huang-based methods for the diagnosis of rotor bar failures in induction machines," IEEE Trans. Industry Applications, vol. 45, no. 5, pp. 1794-1803, September/October 2009.
- [13] E.H. El Bouchikhi, V. Choqueuse, M.E.H. Benbouzid, I.F. Charpentier and G. Barakat, "A comparative study of time-frequency representations for fault detection in wind turbine," in Proceedings of the 2011 IEEE IECON, Melbourne (Australia), pp. 3584-3589, November 2011.
- [14] P. Zhang; Y. Du; T.G. Habetler and B. Lu, "A survey of condition monitoring and protection methods for medium-voltage induction motors," IEEE Trans. Industry Applications, vol. 47, no. 1, pp. 34-46, January/February 2011.
- [15] P.J. Tavner, "Review of condition monitoring of rotating electrical machines," IET Electric Power Applications, vol. 2, no. 4, pp. 215-247, July 2008.
- [16] F. Immovilli, A. Bellini, R. Rubini and C. Tassoni, "Diagnosis of bearing faults in induction machines by vibration or current signals: A critical comparison," IEEE Trans. Industry Applications, vol. 46, no. 4, pp. 1350-1359, July/August 2010.

- [17] A Ibrahim, M. El Badaoui, F. Guillet and F.; Bonnardot, "A New bearing fault detection method in induction machines based on instantaneous power factor," IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 55, n012, pp.4252-4259, December 2008.
- [18] 1. Kamwa, AK. Pradhan and G. Joos, "Robust detection and analysis of power system oscillations using the Teager-Kaiser energy operator," IEEE Trans. Power Systems, vol. 26, nOI, pp. 323-333, February 2011