

**Факултет инжењерских наука
Универзитета у Крагујевцу**

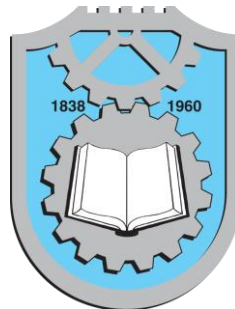
Никола Ж. Кастратовић

**ПРИМЕНА ВИБРОДИЈАГНОСТИКЕ У
АНАЛИЗИ ОТКАЗА КОТРЉАЈНИХ ЛЕЖАЈЕВА**

мастер рад

Крагујевац, 2017.

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Техничка дијагностика

Број индекса: 301/2015

Никола Ж. Кастратовић

ПРИМЕНА ВИБРОДИЈАГНОСТИКЕ У АНАЛИЗИ ОТКАЗА КОТРЉАЈНИХ ЛЕЖАЈЕВА

мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. **Др Петар Тодоровић, ред. проф. – ментор**

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру мастер рада кандидат би требало да материју обради кроз следећа поглавља:

- подела, означавање и извор котрљајних лежајева,
- механизми отказа котрљајних лежајева,
- преглед метода за идентификацију отказа котрљајних лежајева,
- експериментална истраживања (уознавање са мерном опремом и моделом ротационе машине, идентификација карактеристичних учестаности котрљајних лежајева у сигналу вибрација),
- закључна разматрања и
- литература.

Препоручена литература:

- [1] Тодоровић П., Мачужић И., Јеремић Б.: Техничка дијагностика, Машински факултет Крагујевац, 2009.
- [2] Николић В.: Машински елементи, Машински факултет Крагујевац, 2004.
- [3] Коковић В. Дијагностика и одржавање котрљајних лежајева, Факултет инжењерских наука Крагујевац, 2014.
- [4] SKF: Bearing damage and failure analysis, 2014.

Крагујевац, 22.06.2017.

Ментор:

Проф. др Петар Тодоровић, ред. проф.

САДРЖАЈ

1. УВОД	1
2. КОТРЉАЈНИ ЛЕЖАЈЕВИ	3
2.1 Врсте и карактеристике котрљајних лежајева	4
2.2 Означавање котрљајних лежајева	6
2.3 Избор котрљајних лежајева	7
2.4 Уградња котрљајних лежајева	7
2.5 Подмазивање котрљајних лежајева	8
3. МЕХАНИЗМИ ОТКАЗА КОТРЉАЈНИХ ЛЕЖАЈЕВА	11
3.1 Адхезивно хабање	13
3.2 Абразивно хабање	15
3.3 Корозионо хабање	17
3.4 Фретинг корозија	18
3.5 Замор материјала	20
3.6 Електрична ерозија	21
4. ПРЕГЛЕД МЕТОДА ЗА ИДЕНТИФИКАЦИЈУ ОТКАЗА КОТРЉАЈНИХ ЛЕЖАЈЕВА	23
4.1 Анализа вибрација у временском домену	24
4.2 Анализа вибрација у фреквентном домену	25
4.3 Метода ударног импулса – SPM (Shock Pulse Method)	29
4.4 Метода енvelope убрзања вибрација	31
4.5 SEE метода (Spectral Emitted Energy)	32
4.6 HFD метода (High Frequency Detection)	33
4.7 Метода крест фактора	33
5. ЕКСПЕРИМЕНТ	34
5.1 Опрема за извођење експеримента	34
5.2 Резултати експеримента	39
5.2.1 Резултати за учестаност од 20 Hz	40
5.2.2 Резултати за учестаност од 40 Hz	42
5.2.3 Резултати за учестаност од 60 Hz	45
5.2.4 Резултати за учестаност од 80 Hz	48
5.2.5 Аналитичко одређивање карактеристичне учестаности	50
6. ЗАКЉУЧАК	53
7. ЛИТЕРАТУРА	54

РЕЗИМЕ

Вибрације представљају део свакодневнице људи. У машинству вибрације се сматрају непожељном појавом која може имати штетан утицај на машинске конструкције. Вибрације изазивају замор и хабање. Често су одговорне за отказ који се може десити некој машини.

У раду су изложене врсте, карактеристике, подела, означавање, избор, уградња као и подмазивање котрљајних лежајева, затим наведене су врсте отказа котрљајних лежајева, дат је и преглед метода за откривање отказа преко мерења и анализе вибрација.

Урађено је експериментално истраживање, упознавање са мерном опремом и моделом ротационе машине, идентификација карактеристичних учестаности котрљајних лежајева у сигналу вибрација.

Кључне речи: котрљајни лежај, отказ, хабање, вибрације, мерење, анализа

ABSTRACT

Vibrations are a part of everyday life. In mechanical engineering vibration are considered an undesirable phenomenon that may have a detrimental effect on machine structures. Vibrations cause fatigue and wear. Often they are responsible for the cancellation that can happen to the machine.

The paper presents the types, characteristics, division, marking, selection, installation and lubrication of rolling bearings, followed by types of roller bearings failure, and a review of the method for fault detection through measurement and vibration analysis is given.

Experimental research, introduction with measuring equipment and model of rotary machine, identification of characteristic frequency of rolling bearings in the vibration signal was done.

Key words: roller bearing, failure, wear, vibration, measurement, analysis

ПРЕДГОВОР

Овај рад представља мастер рад на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу. Тема мастер рада је из области вибродијагностике. Вибродијагностика је веома значајна за анализу вибрација при раду техничких система, како би се на време уочила евентуална могућност појаве отказа и на време спречило да не дође до отказа у раду неког техничког система.

У првом поглављу рада дата су уводна разматрања о вибрацијама, вибродијагностици и котрљајним лежајевима.

У другом поглављу објашњене су врсте, карактеристике, подела, означавање, избор, уградња као и подмазивање котрљајних лежајева.

У трећем поглављу објашњени су поједини механизми отказа котрљајних лежајева, као и разлози због којих долази до отказа котрљајних лежајева.

У четвртном поглављу дат је преглед метода за откривање отказа преко анализе нивоа вибрација.

У петом поглављу извршена су експериментална истраживања, упознавање са мерном опремом и моделом ротационе машине, идентификација карактеристичних учестаности котрљајних лежајева у сигналу вибрација. Наведен је и приказ добијених резултата приликом извођења експеримента.

У шестом поглављу изведени су закључци и на крају наведена је коришћена литература за израду мастер рада.

Захваљујем се ментору професору др Петру Тодоровићу, ред. проф. на сарадњи током израде мастер рада. Захваљујем се и асистентима Ивану Грујићу и Надици Стојановић на помоћи током извођења експеримента.

У Крагујевцу, август 2017. године

Никола Кастратовић

1. УВОД

Помоћу метода вибродијагностике могуће је открити механичке промене које се догађају на ротационим машинама, отклонити њихове узроке и спречити урушавања система и откази опреме пре њиховог настанка.

Вибрацијски поремећаји у раду машина настају због механичких, термалних, електромагнетних или хидродинамичких активности.

Вибродијагностика као рутинска метода превентивног одржавања енергетских машина знатно смањује трошкове одржавања, повећава безбедност, поузданост и животни век целог система.

У пракси је врло тешко избећи појаву вибрација. Вибрација је свакодневни феномен и сусрећемо је у нашим кућама, током транспорта, при раду.

Често врло мале и у почетку безначајне вибрације могу побудити резонанцу неких других делова структуре и могу се појачати до те мере да постану главни и врло озбиљни извори нараслих вибрација и буке. Последица вибрација јесте замор и хабање, а често су одговорни за отказ који може настати на машини.

Такође, вибрације могу бити и корисне. Постоје доста машина и уређаја чија се основна функција заснива управо на вибрацијама, као што су сита, покретне траке за транспорт ситних комада, хидраулични чекић, ултразвучне каде за чишћење, маљеви, набијачи,...

Вибрације настају као последица механичких сила које се генеришу унутар техничког система и најчешће настају услед [1]:

- неуравнотежености обртних маса,
- прелазних режима у току експлоатације (залетање/успоравање и др.),
- хабања елемената у контакту (котрљајни и клизни лежајеви, ...) и
- основне функције циља техничког система (вибрациона сита, вибрациони транспортери и сл..).

У општем смислу, вибрација представља осцилаторно кретање механичког система, при чему се померање тачака система мала у поређењу са димензијама самог система. За тело се каже да вибрира када изводи осцилаторно кретање око свог равнотежног положаја. Осцилација је периодично кретање око равнотежног положаја, односно кретање које се понавља након неког временског интервала.

Утицај вибрација које се јављају, делују на цело тело човека, без обзира да ли седи, лежи или стоји на некој вибрирајућој потпорној површини (платформе, седиште возила, радне машине,...). Поремећаји здравља се јављају постепеном обично после 2 до 7 година рада на местима где су радници изложени општим вибрацијама.

Котрљајни лежајеви су машински склопови који се најчешће уграђују у ослонце 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 само силе, а не и обртне моменте.

Котрљајни лежајеви су стандардни елементи и производе се у специјализованим фабрикама. Познати произвођачи котрљајних лежаја у Европи су SKF у Шведској, FAG у Немачкој, GPZ у Русији, TIMKEN у Енглеској и др. У нашој земљи највећи произвођач је FKL у Темерину.

Правилно обављање функције котрљајних лежајева зависи од њихове поузданости, односно природе настајања и интензитета појаве отказа.

Анализа сигнала у фреквентном домену је најзначајнији алат који се примењује за откривање отказа преко мерења и анализе вибрација. [1]

У овом раду биће представљено следеће:

- објашњене су врсте, карактеристике, подела, означавање, избор, уградња као и подмазивање котрљајних лежајева.
- механизми отказа котрљајних лежајева,
- преглед метода за идентификацију отказа преко мерења и анализе вибрација
- експериментална истраживања, упознавање са мерном опремом и моделом ротационе машине, идентификација карактеристичних учестаности котрљајних лежајева у сигналу вибрација. Наведен је и приказ добијених резултата приликом извођења експеримента.
- на крају су изведени закључци.

2. КОТРЉАЈНИ ЛЕЖАЈЕВИ

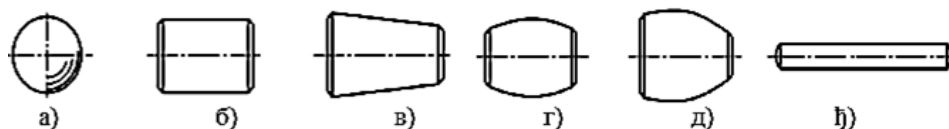
Котрљајни лежајеви се састоје од: прстенова (колUTOва), котрљајних тела и кавеза (држача котрљајних тела). Котрљајна тела су смештена између прстенова, а помоћу кавеза се одржава њихово константно међусобно растојање (слика 2.1). [2]



Слика 2.1 Делови прстеног лежаја [2]

Материјал стандардних котрљајних лежајева је челик, док се код минијатурних котрљајних лежајева котрљајна тела израђују од сафира. За примену у агресивним срединама, какве су киселине, користе се котрљајни лежајеви од керамике и пластике.

Котрљајна тела (слика 2.2) су смештена између спољашњег и унутрашњег прстена, код прстенастих лежаја, односно између колUTOва код колУтних лежаја.



Слика 2.2 Облици котрљајних тела: а) куглица, б) цилиндрични ваљак, в) конус, г) заобљени ваљак, д) заобљени конус-бачвасти облик, ж) иглица [2]

У прстеновима и колУтима урађени су жлебови, тзв. стазе котрљања по којима се крећу котрљајна тела. Радијус кривине жлебова је нешто већи од радијуса кривине котрљајних тела. Кавез спречава међусобни додир котрљајних тела и одржава њихово стално међусобно растојање. Код колУтних лежаја један колУт је чврсто наглављен на вратило и окреће се заједно са њим. Други колУт је углављен у кућици лежаја и непокретан је. [2]

Предности:

- Ниска производна цена и набавка.
- Релативно једноставно конструкционо извођење.
- Задовољавајућа носивост за ниже и средње учесталости обртања.
- Једноставно подмазивање и одржавање.
- Лака замена (нема хабање рукавца и не треба њихова замена).

- Мањи губици енергије.
- При покретању стартује се са мањим зазором (имају тачније вођење).
- Не захтевају посебно упуштање до достизања радног стања.

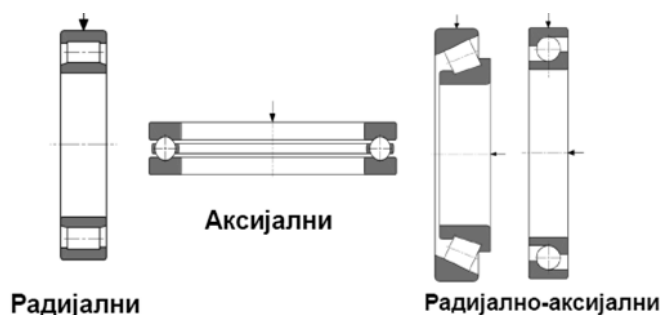
Недостаци:

- Велики ниво буке и вибрације.
- Велика осетљивост на ударна оптерећења.
- Код неких конструкционих извођења лакше је уградити дводелне клизне лежајеве.
- Котрљајни лежајеви су једнореди па се изводе са аксијалним померањем.
- За високе учесталости обртања не могу да раде успешно као клизни лежајеви са течним трењем.
- Носивост, односно радни век им се јако смањује.

2.1 Врсте и карактеристике котрљајних лежајева

Према правцу дејства сила (спољашњег оптерећења) разликују се, слика 2.3:

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



Слика 2.3 Подела према правцу силе [2]

Према броју редова котрљајних тела лежаји могу бити, слика 2.4:

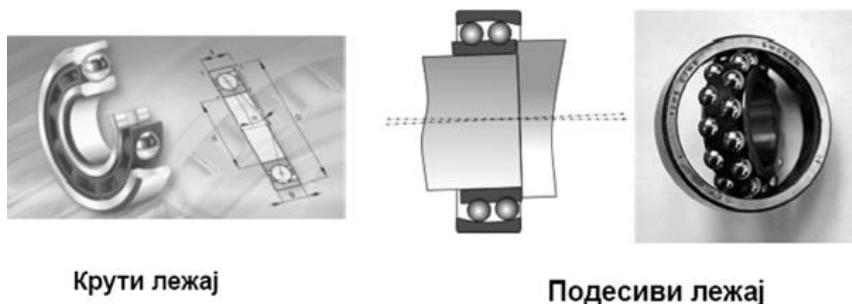
- једноредни (један ред котрљајних тела) и
- вишередни (два или више редова котрљајних тела).



Слика 2.4 Подела према броју редова котрљајних тела [2]

Према способности прилагођавања лежаја деформацији вратила у ослонцу лежаји се деле на, слика 2.5:

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



Слика 2.5 Подесив и неподесив лежај [2]

Прстенасти куглични једноредни лежај: Спадају у групу радијално-аксијалних лежаја. Способни су да пренесу релативно велика радијална и знатна аксијална оптерећења. Величина аксијалне силе не би требало да буде већа од 70% носивости лежаја. [2]

Прстенасти куглични једноредни лежај са косим додиром: Ова група лежаја спада у групу радијално – аксијалних лежаја, с тим што аксијалну силу преносе само у једном смеру. Ова особина представља главни разлог због чега се овакви типови лежаја увек уграђују у пару.

Прстенасти цилиндрично-ваљчани једноредни лежај: Карактеристика овог типа лежаја је то да је додир котрљајног тела и прстенова линијски. Користе се првенствено за пренос радијалних оптерећења.

Игличасти лежај: 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. [2]

Прстенасти конично-ваљчани једноредни лежај: 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. Могу да пренесу веома висока радијална и аксијална оптерећења. [2]

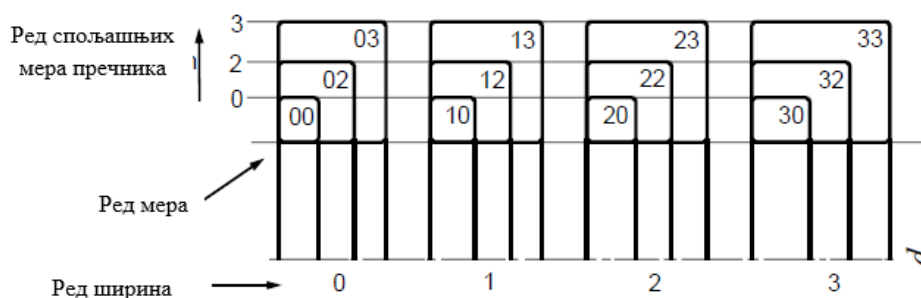
2.2 Означавање котрљајних лежајева

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. [2]

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. [2]

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. [2]

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. [2]



Слика 2.6 Пример за ред спољашњих мера [2]

Ознака за отвор - 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 и 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. [2]

Додатна ознака служи за обележавање материјала, конструктивних специфичности, зазора и толеранција, мазива и др. Ознака се пише иза или испред основне ознаке. [2]

Допунска ознака испред основне ознаке значи да су лежаји некомплетни. [2]

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 ($d = 5 \times 15 = 75 \text{ mm}$).

2.3 Избор котрљајних лежајева

Избор лежаја се врши на основу задатих радних услова: оптерећења, броја обртаја, век трајања и сигурност у раду. При томе, прво се бира тип котрљајног лежаја. [2]

Основа за прорачун је моћ ношења лежаја и то:

- динамичка моћ ношења, када је број обртаја већи од 10 min^{-1} .
- статичка моћ ношења, када лежај мирује или лагано осцилује, а број обртаја је мањи од 10 min^{-1} .

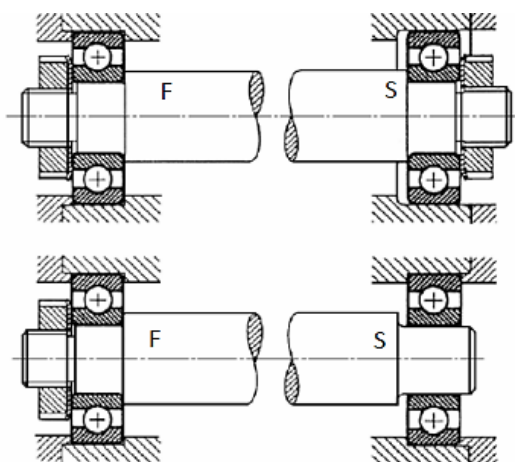
Према прорачунатој вредности C (израз 2.1) односно C_0 (израз 2.2) и пречнику рукавца вратила d усваја се лежај који има исту или већу динамичку моћ ношења или статичку моћ ношења. [2]

$$C \geq \frac{F}{k_t} \sqrt[3]{\frac{60 \cdot n \cdot L_n}{10^6}} \quad (2.1)$$

$$C_0 = k_0 \cdot F_0 \quad (2.2)$$

2.4 Уградња котрљајних лежајева

Преношење радијалног оптерећења се постиже учвршћивањем унутрашњег прстена на вратилу и спољашњег прстена у кућишту. Лежај у једном ослонцу треба да је аксијално учвршћен (F) и преноси аксијалну силу у оба смера, док други лежај треба да је слободан (S). Осигуравајући елементи су: степенести прелази на вратилу и у кућишту, навртке са специјалним подметачем, прстенасти ускочници, дистантне чауре, нееластични прстенови. Примери осигурања прстенастог кугличног лежаја на вратилу и у кућишту приказани су сликом 2.7. [2]



Слика 2.7 Примери осигурања лежаја на вратилу и у кућишту [2]

2.5 Подмазивање котрљајних лежајева

Када би рукавац при обртању био у непосредном додиру са постељицом лежишта, јављало би се јако трење на додирној површини; трење би проузроковало знатне губитке енергије, штетно загревање и хабање металних делова. Да би се ове незгоде ублажиле, потребно је да су додирне површине подмазане. [3]

Трење у лежајима састоји се из три компоненте: трења котрљања, трења клизања и трења у мазивом материјалу. Између њих постоји веома сложена и блиско узајамна веза која отежава детаљну анализу сваке компоненте понаособ. [3]

Трење котрљања настаје у процесу кретања котрљајних тела по путањи котрљања. Веома је комплексне природе јер је делимично условљено клизањем у зони контакта котрљајних тела и путање котрљања, а делимично еластичним хистерезисом. [3]

Трење клизања се јавља у контакту котрљајних тела и држача, међусобном контакту котрљајних тела (лежаји без држача), као и код контакта чела ваљка и наслона. У нормалним условима, сила која делује на држач је мала а самим тим је и трење незнатно. Али у условима недовољног подмазивања, загађене атмосфере, врло великих бројева обрта, губици на трење се знатно повећавају. Ово се особито јако испољава у условима нарушених кинематских односа, нарочито већег искоришћења прстена. Трење клизања се јавља у контакту котрљајних тела и држача, међусобном контакту котрљајних тела (лежаји без држача), као и код контакта чела ваљка и наслона. У нормалним условима, сила која делује на држач је мала а самим тим је и трење незнатно. Али у условима недовољног подмазивања, загађене атмосфере, врло великих бројева обрта, губици на трење се знатно повећавају. Ово се особито јако испољава у условима нарушених кинематских односа, нарочито већег искоришћења прстена. [3]

Трење у мазивом материјалу састоји се из унутрашњег трења у мазиву у зони додира и мешања и премештања мазива при истискивању вишка мазива, нарочито при високим бројевима обрта. Губици на трење расту са увећањем броја обрта лежаја, вискозности и утршка мазива. [3]

Каже се је подмазивање потпуно када су рукавац и постељица одвојени слојем мазива. Потпуно подмазивање се не постиже обилним довођењем мазива, већ рационалном конструкцијом рукавца и лежишта, при довољној брзини обртања.

Потпуно подмазивање се не може увек остварити. Подмазивање пружа још једну корист: циркулацијом мазива може се знатно олакшати хлађење лежишта.

Задатак подмазивања је:

- Да се смањи хабање додирних површина на месту контакта котрљајних тела са осталим деловима лежаја.
- Да трење и хабање буде што мање.
- Да се заштите радне површине од корозије.
- Да се смањи бука.
- Да се одводи топлота.
- Да се спречи продор спољашњих нечистоћа.

Смањењем хабања додирних површина постиже се стварањем уљног филма између површина које међусобно релативно крећу. Код котрљајних лежајева треба обезбедити довољну количину уља на котрљајним додирним површинама. Уље треба да обезбеди раздвајање додирних површина и онемогући непосредни контакт метала. [3]

Као средство за подмазивање користе се:

- техничке масти,
- уља и
- у специјалним случајевима и чврста мазива.

При избору средства за подмазивање одлучујућу улогу имају:

- оптерећење,
- учесталост обртања и
- радна температура лежаја.

Чистоћа је од велике важности за исправно функционисање котрљајног лежаја. Маст треба држати у оригиналним паковањима и не сме се држати непокривена све до непосредне употребе (слика 2.8). [3]



Слика 2.8 Амбалажа мазива [3]

Генерално, лежајеви нису подмазани, док нису уграђени. Најважнији разлог за то је чистота. Што је мазиво касније убачено у лежај, већи су изгледи да се избегне контаминација. Лежај треба подмазати пре уградње само онда ако је то једина могућност да се постигне равномерна распоређеност масти. У кућишту треба увек оставити слободног места за маст која ће бити избачена из лежаја при пуштању у рад.

Треба пратити ова општа правила: лежај треба потпуно напунити машћу, али слободни простор у кућишту треба само делимично испунити машћу (30 – 50 %). Код улежиштења где нема вибрација, многе масти са литијумовим сапуном могу попунити и до 90% слободног простора у кућишту, без ризика да ће то изазвати пораст радне температуре. Тако се спречава продор нечистоћа и продужавају интервали поновног подмазивања. Лежајеви који раде на великим бројевима обртаја, као што су лежајеви главних вретена алатних машина, морају бити подмазани мањим количинама масти, да не би дошло до раста радне температуре улежиштења.

Уље је одговарајуће мазиво тамо где број обртаја или други радни услови не дозвољавају примену масти, или ако је потребно одвођење топлоте помоћу мазива. Високе радне температуре могу бити последица великог броја обртаја, тешког оптерећења, или високе температуре околине у којој лежај ради. Подмазивање уљем треба применити у случајевима када су интервали поновног подмазивања машћу врло кратки или кад је лежај уграђен у систем који се иначе подмазује уљем. Често се уље користи само зато што то захтевају друге машинске компоненте - заптивке, зупчаници, клизни лежајеви итд. [3]

Приликом избора начина подмазивања треба се трудити да се процес подмазивања изведе на најједноставнији начин. Начини подмазивања котрљајних лежајева [3]:

- Уљно “купатило”, је једноставан где је ниво уља налази у границама између средине котрљајног елемента до његове горње границе. На овај начин је омогућено формирање мазивог слоја и хлађење лежаја.
- Проточни системи подмазивања, уколико претходни систем подмазивања не даје резултата онда се захтева циркулација мазива кроз сам лежај. Ови системи подмазивања обично укључују спољашње резервоаре и пумпе и у неким случајевима измењиваче топлоте који одржавају мазиво и сам лежај на одговарајућој радној температури
- Уљна измаглица, се може користити код лежајева великих димензија или великих оперативних брзина. Код овог типа подмазивања мале капљице уља ношене ваздухом доспевају на и у лежај. На тај начин се обезбеђује довољна количина мазива за формирање уљног филма и одговарајуће хлађење лежаја. Код овог система се користи веома мала количина мазива која је веома кратког радног века.
- Подмазивање мазивим мастима.
- Чврста мазива.

3. МЕХАНИЗМИ ОТКАЗА КОТРЉАЈНИХ ЛЕЖАЈЕВА

Котрљајни лежајеви су витални део већине савремених техничких система. У многим својим применама сматрају се критичним компонентама чији откази могу проузроковати скупе и непланиране застоје у раду техничких система у које су уграђени.

Разлози који утичу на то да дође до превременог отказа котрљајних лежајева могу бити следећи:

- контаминација,
- грешке при уградњи,
- замор,
- неадекватно подмазивање и
- неправично складиштење.

Правилно обављање функције котрљајних лежајева зависи од њихове поузданости, односно природе настајања и интензитета појаве отказа. Откази котрљајних лежајева могу се поделити на:

- Изненадне, који су повезани са неправилним димензионисањем елемената лежајева, неадекватном технологијом њихове израде, грешкама у материјалу итд. Побољшањем квалитета материјала, технологије израде и услова уградње котрљајних лежаја они се могу у значајној мери елиминисати.
- Постепене, који се у пракси не могу избећи, али се могу правовремено открити распознавањем стања котрљајних лежајева у току рада.

У циљу правовременог откривања предстојећег отказа котрљајних лежајева неопходно је дефинисати одговарајуће дијагностичке параметре за праћење њиховог стања. Развијен је велики број метода за дијагностику стања котрљајних лежајева, које се према изабраном дијагностиком параметру могу поделити на:

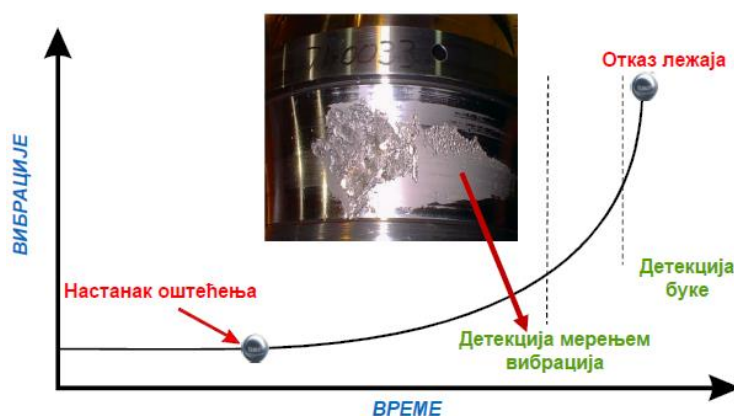
- методе мерења и анализе буке и вибрација,
- методе праћења термичког стања лежајева и
- методе анализе стања мазива.

На слици 3.1 приказани су могући облици отказа код котрљајних лежајева.



Слика 3.1 Облици отказа [4, 5]

На слици 3.2 је приказана крива која представља је типичан процес отказа лежајева.



Слика 3.2 Крива хабања [4]

Четири основна корака у детекцији отказа су:

- Детекција – периодично прикупљање параметара вибрација, читавањем са машина, делова машина или носеће конструкције упоређују се са границама аларма дефинисаним за машину.
- Анализа – примена напредних алата и техника, прво за потврду дијагнозе проблема и друго за идентификацију највероватнијег узрока високог нивоа вибрација.
- Корекција – активности које треба предузети у току рада машине или током застоја у одговарајуће време.
- Верификација – обезбедити да се спроведу поправке, у циљу отклањања основног узрока проблема и да поправке не доведу до нових проблема у раду машина.

Време од појаве првог оштећења котрљајне стазе до тренутка када више није могуће користити уређај (машину) варира од неколико секунди до неколико месеци.

Отказ котрљајних лежајева најчешће узрокује отказ техничког подсистема или чак целог система. Зависно од места уградње и постојања резерве, отказ лежаја може бити: критичан и не критичан. [4]

Критичним отказом се сматра:

- угрожавање производње,
- угрожавање безбедности по запослене и
- угрожавање човекове околине.

На елементима трибомеханичког система котрљајних лежаја могу настати различите врста хабања и повреда. На једном лежају могу настати истовремено више врста хабања, но, као по правилу, једна од насталих врста је доминантна и она ће суштински одредити даљи правац развоја триболошких процеса и коначно век трајања лежаја. [3]

Који ће се облици хабања јавити и који ће облик бити доминантан, зависи од великог броја фактора које је могуће поделити у четири основне групе:

- експлоатациони фактори,
- конструкциони фактори,
- фактори технологичности и
- фактори субјективних особина оператора.

На основу литературних извора [2 – 5] у наставку биће дат преглед појединих механизма отказа котрљајних лежајева.

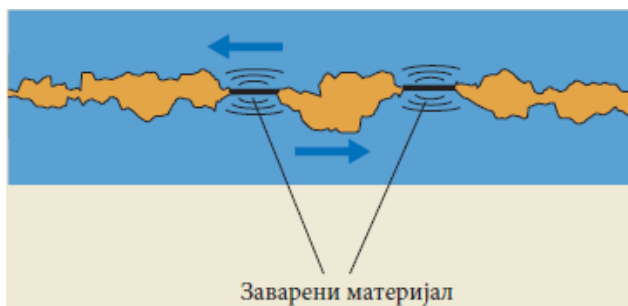
3.1 Адхезивно хабање

Адхезивно хабање представља основни облик механичког одстрањивања делова материјала елемената који су у директном контакту. У зависности од услова који владају у радној средини адхезионо хабање може имати различите интензитета и последице. Ова врста хабања заступљена је како код неподмазаних котрљајних лежаја, тако и код слабо подмазаних, код којих дебљина уљног филма мазива није довољна да потпуно раздвоји површине које су у међусобном додиру. На местима котрљајних елемената где владају знатни притисци, долази до генерисања топлоте и појава сила адхезије одн. долази до тренутног заваривања, а при кретању до смицања тако заварених спојева. [3]

Уколико је сам спој мање тврдоће од тврдоће спрегнутих материјала, одвајање настаје на самом споју, а уколико је један од материјала елемената у контакту мање тврдоће од другог, до раскида долази на истом материјалу.

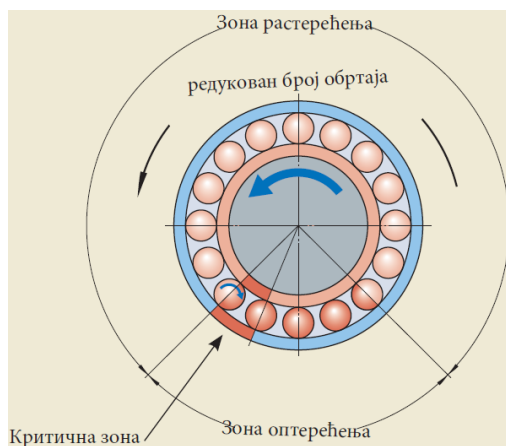
У најнеповољнијим случајевима може доћи и до потпуног заваривања елемената котрљајних лежаја који су у непосредном контакту. Последице тога могу бити далекосежне, преко декомпозиције и прекида рада читавог склопа, лома појединих елемената до потпуне хаварије комплетног постројења у коме се налазе оштећени котрљајни лежаји. Узроци појаве адхезионог хабања могу бити: лоше конструкционо

решење, неправилна монтажа, неправилан прекомерни рад осталих делова ротационог склопа, неадекватно одржавање (подмазивање) и др.

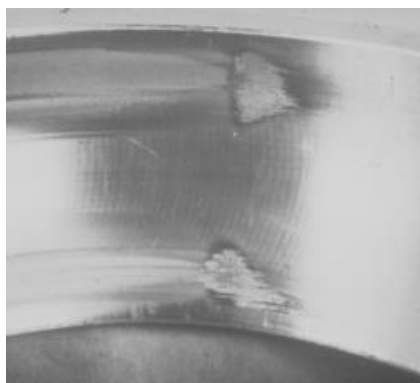


Слика 3.3 Адхезивно хабање [5]

Котрљајни елементи су изложени брзом (изненадном) убрзању када уђу у зону оптерећења (слика 3.4). Ово изненадно убрзање може изазвати клизања, која могу да генеришу довољно топлоте, тако да се материјал са површина у контакту топи заједно на местима контакта (слика 3.5). Овај процес заваривања проузрокује да материјал се преноси из једне површине на другу, што такође доводи до већег трење (слика 3.5). [5]



Слика 3.4 Ризик од хабања при већем убрзању [5]



Слика 3.5 Оштећење услед хабања [5]

Адхезивно хабање карактерише трансфер материјала са једне површине на другу. Најчешће се јавља на крајевима ваљака и одговарајућих бокова стаза котрљања, као и код контакта вратила и унутрашњег прстена и између кућишта и спољашњег прстена.

Адхезивно хабање се може јавити и приликом контакта котрљајних елемената и стаза котрљања, када је присутно клизање. [5]

Адхезивно хабање се јавља у различитим облицима и у зависности од степена хабања (његове величине) јављају се следећи облици:

- Скоринг (Scoring),
- Скуфинг (Scuffing),
- Смеаринг (Smearing) и
- Сеизинг (Seizing).

Скоринг се јавља када дебљина мазивог филма није довољна да раздвоји контактне површине. Јавља се контакт између неравнина и услед великих нормалних оптерећења и тангенцијалних напона, генерисања топлоте неравнине мењају свој облик и димензије. Долази до веома јаких адхезивних или заварених спојева на изолованим местима. Услед релативног кретања неравнина долази до кидања тих спојева што узрокује приметан трансфер материјала са једне површине на другу.

Скуфинг је напредан скоринг који се јавља на већем нивоу, када се више заварених спојева групишу на одређеном месту. Скуфинг се идентификује по израженој површинској храпавости и працен високим вредностима трења и температуре.

Смеаринг у неким случајевима се назива галинг. Овај вид хабања се односи на веома изражене пластичне деформације и масиван трансфер материјала са површине на површину. Завршна фаза смеаринг-а представља разарање различитих површинских филмова и површинских слојева. Такође, може условити промену у топографији површина и резултирати прогресивном скорингу или скуфингу.

Сеизинг је финална фаза адхезивног хабања. Заваривање између врхова неравнина контактних површина је тако изражено да долази до заустављања лежаја и узрокује катастрофално хабање. Сеизинг се веома ретко среће код котрљајних лежајева.

3.2 Абразивно хабање

Појава абразије је поступак механичког хабања када тврђи материјал клизи по мекшем материјалу и изазива његово браздање, резање и задирање. Материјали који изазивају појаву абразије могу бити: заостали остаци још из процеса израде, материјали из разних процеса (прашина, дим и блато) или други страни материјали (кварцни песак, атмосферске нечистоће) који на разне начине доспевају у простор између котрљајних елемената. Чест је случај појаве ове врсте оштећења и тамо где машине раде са присутним високим процентом абразивних честица у самом ваздуху, што је карактеристично за тракторе и остале прикључне машине због сложеног процеса у којем раде. Механичко хабање површина у контакту које је условљено појавом абразивног хабања, може имати следеће облике: мутне и сведе трагове, огреботине, зарезе, таласасте путање котрљања и др. [3, 5]

Абразивним хабањем називамо механичко хабање контактних површина, настало као резултат деловања абразивних честица, доспеле у зону контакта под оптерећењем, котрљајних тела и прстена, могу изазивати разарање контактних површина у виду удубљења, зареза, жљебова и огреботина. По ивицама оштећене површине образују се

гребени и гребеници који могу постати концентратори напрезања и извори заморног разарања. На процес абразивног хабања лежаја утиче велики број фактора: димензија честица, њихова концентрација и тврдоћа.

У трибомеханичким системима трења котрљања, абразивно хабање се увећава са порастом проклизавања елемената система једног у односу на други. Број обртаја незнатно утиче на интензитет абразивног хабања.

На крајевима удубљења или огреботина може настати веома висока концентрација напрезања при улазу оштећене површине у контакт. Зареци у правцу котрљања далеко више утичу на дебљину мазивног филма од попречних зареза.

Еластохидродинамички слој смањује концентрацију напрезања, пропорционално односу дужине хидродинамичког слоја и његове дебљине на месту контакта. Захваљујући томе, веома мале абразивне честице могу изазвати разарање површине које сасвим или скоро не утиче на радне способности лежаја.

На слици 3.6 приказано је хабање спољног прстена, где се види и дубина хабања. Кавез је кључни део лежишта. Прстенови и ваљање елементи каљени до око 60 HRC. Већина металних кавеза су од лима или месинга. На слици 3.7 приказано је хабање кавеза од месинга. [5]

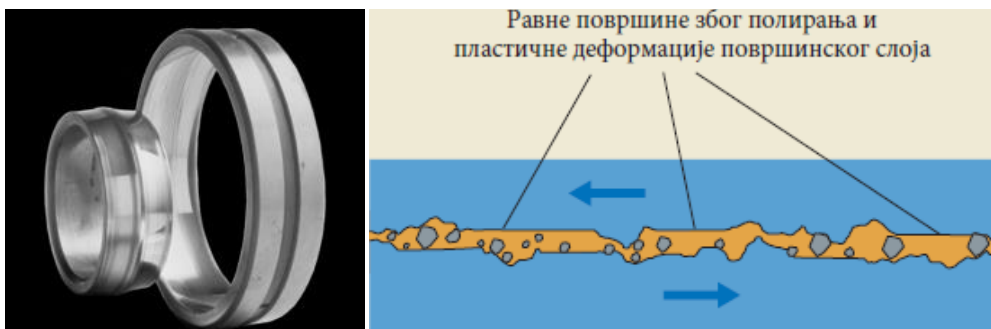


Слика 3.6 Хабање спољног прстена [5]



Слика 3.7 Кавез од месинга [5]

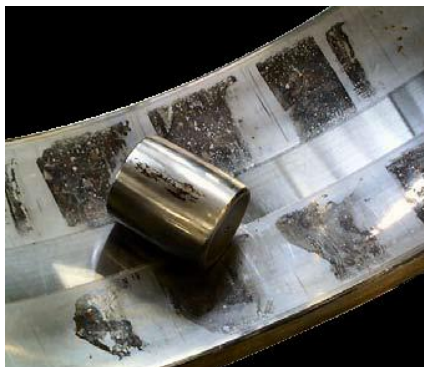
Полирано хабање је посебан облик абразивног хабања. Површине нових лежајева су сјајне, али немају и високу рефлексију (као у огледалу). Право огледало површине у имају само као резултат неадекватног подмазивања, изазваних танаким слојем мазива, а те честице које делују као средство за полирање (слика 3.8 лево). Ово омогућава метал – метал контакт, што доводи до абразивног хабања и пластичне деформације (слика 3.8 десно). Површине могу постати екстремно сјајне – све у зависности од величине честица, њихове тврдоће. [5]



Слика 3.8 Процес полирајућег хабања [5]

3.3 Корозионо хабање

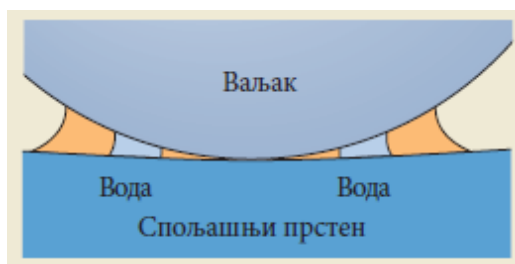
Корозија је можда најчешћи узрок прераног отказа лежаја код машина које су изложено дејству течности поготово у индустрији хране и пића. Вода може доћи до машине док је машина застоју или у време чишћења, што доводи до сиво-црних мрља котрљајућем елементу (слика 3.9). [5]



Слика 3.9 Корозија на спољном прстену [5]

Величина овог хабања зависи од: квалитета конструкционог решења, физичко-хемијских својстава материјала од којег је израђен лежај, услова радне средине, квалитета монтаже, квалитета уља и масти за подмазивање, режима рада и др. Неопходна заштита која умногоме може смањити доминантан утицај агресивних и других материја, а самим тим и корозије јесте употреба мазива способних да неутралише исте.

У стању мировања, вода у мазиву ће акумулирати на дно лежишта. Концентрација вода ће бити највећа на одређеној удаљености од ваљања контакта (слика 3.10). Разлог је тај да вода је тежа од мазива и да ће потонути док не дође до одговарајућег раскорака између елемената. То може довести до дубоке корозије, под називом нагризање. [5]



Слика 3.10 Акумулирање воде из мазива [5]

Дејство корозионог хабања је доминантно у условима хемијских активних средина, најчешће у прехранбеној индустрији. У додиру са киселинама и другим агресивним материјалима на површинама котрљајних лежаја стварају се разна хемијска једињења, која се у експлоатацији одводе заједно са осталим продуктима хабања. Проблем корозионог хабања није доминантан само код унутрашњих система где разна сагоревања и испаравања деструктивно делују на читав склоп, већ и код слабо заштићених спољашњих система, код којих доминантан утицај на појаву корозионог хабања имају спољашњи атмосферски утицаји. Ове појаве посебно су изражене код пољопривредних машина које дужи период нису у употреби, попут: трактора, једноосовинских трактора, комбајна и др. машина које се због изразитог сезонског рада дуго садржавају у периоду чекања. Уколико се у периоду чекања механизације не

предузму превентивне мере заштите котрљајних лежаја, обично долази до појаве корозије и знатног хабања котрљајних елемената. [3, 5]

Употреба хибридних лежаја са једним или више керамичких прстенова издржавају и најгоре триболошке услове, па. Они поседују већу носивост на притисак, већи модул еластичности, већу тврдоћу, имају два пута дужи радни век и упола смањују вибрације. Пружају најбоље могућности употребе у срединама са јако агресивним хемијским супстанцама, што је од изузетног значаја за њихову даљу употребу.

Хабање лежаја у условима појаве корозије зависи од већег броја фактора: врсте средстава за хлађење и подмазивање, физичко-хемијских својстава хемијски активних компоненти, режима рада, материјала, конструктивних карактеристика лежишта, и др.

У процесу експлоатације лежаја, на његовој површини образују се оксидне превлаке различите дебљине. Количина агресивних течности која прође кроз лежај, утиче на дебљину оксидне превлаке и на тај начин условљава интензитет хабања лежаја. Дебљина оксидне превлаке на активној површини лежаја условно се може класифицирати по боји: танка, релативно светла ($\leq 40\mu\text{m}$); средња, светло-мрка и сива ($\leq 500\mu\text{m}$); дебела, најчешће тамна ($> 500\mu\text{m}$). [3]

3.4 Фретинг корозија

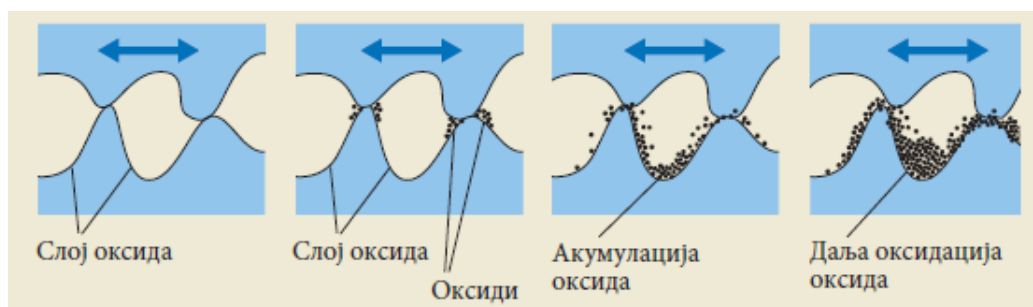
Фретинг корозија је врста хабања која се јавља при мањим осцилаторним померањима једне површине у односу на другу у условима деловања корозионих средина. Услови при којима се она јавља су: мале амплитуде померања спрегнутих елемената (реда неколико десетина микрометара) и везано с тим отежаног одвођења продуката хабања из зоне контакта; мале брзине релативног померања спрегнутих елемената (неколико милиметара у секунди); присутност оксидационе спољне средине (нпр. кисеоника из ваздуха) који хемијским реакцијама изазива оксидацију контактних површина са последицама њиховог разарања.

Корозија настаје када постоји релативно кретање између носећег прстена и улежиштењем на вратилу или у кућишту. Релативно кретање може изазвати мале честице материјала да постану одвојена од лежишта и улежиштења. Ове честице брзо оксидирају када су изложене ваздуху, а резултат је гвожђе оксид (слика 3.11). Гвожђе оксид је већи у обиму од гвожђа (челик). Као резултат корозије лежаја, прстенови се не могу равномерно подржати, што може имати штетан утицај на расподелу оптерећења у лежаја. [5]

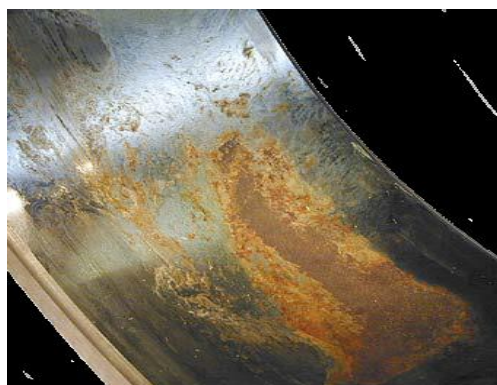
Разарања од фретинг корозије испољавају се у виду ишчупаних јамица димензија неколико десетина микрометара, испуњених као по правилу прашкастим продуктима хабања. [5]

SKF не препоручује употребу специјално формулисаних лепкова како би се избегла фретинг корозија. [5]

Слика 3.12 приказује корозију насталу од веома великог оптерећења или неадекватног улежиштења. Да би избегли корозију или да се успори процес, толеранције треба прилагодити, или специјалне анти – фретинг пасте или омотач треба користити. [5]



Слика 3.11 Шематски приказ фаза у развоју фретинг корозије [5]



Слика 3.12 Фретинг корозија на унутрашњем прстену [5]

При експлоатацији машина и преносника, фретинг – корозија може настати код свих машинских система укључујући и номинално непокретне, у присуству вибрација. Карактеристични случајеви су код:

- жљебних веза (зупчаници и спојнице на вратилу),
- котрљајних лежаја, обртних у обичним условима (спољашња површина спољашњег прстена и унутрашња површина унутрашњег прстена при недовољној чврстоћи склопа у кућишту или на вратилу),
- необртних котрљајних лежаја или лежаја подвргнутих обртно-повратним кретањима малих амплитуда (игличасти лежаји карданских вратила аутомобила и дизел локомотива), аксијални лежаји ротора хеликоптера,
- клизних лежишта,
- брегастих и зглобних механизма.

Површина елемената од челика и гвожђа, обухваћена фретинг – корозијом обично је покривена превлаком или (у присуству уља) "пастом" црвеног оксида (Fe_2O_3) или црном бојом (Fe_3O_4) или (у присуству влаге) бораксном превлаком пероксида $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$ (рђом). [3]

Као резултат фретинг – корозије смањује се заморна чврстоћа контактних површина, 3-6 пута. При фретинг-корозији, за разлику од других видова хабања, продукти хабања у својој основној маси не могу изаћи из зоне контакта радних површина елемената машинских система. [3]

3.5 Замор материјала

Слика 3.13 приказује пример хабања на спољном прстену сферног ваљкастог лежаја. Лежај је монтиран у кућишту са недовољном подршком у зони оптерећења. Као резултат тога, спољни прстен је био подвргнут цикличном савијању и на прстену настаје пукотина. [5]



Слика 3.13 Заморно хабање [5]

Питинг као врста хабања услед замора материјала карактерише се појавом јамица у почетној фази и разарањем контактне површине у завршној фази процеса. Заморном хабању су изложени сви елементи лежаја: прстени, котрљајна тела, држачи, бочни наслони унутрашњег прстена. [5]

Котрљајни лежаји предају оптерећење са једног прстена на други преко котрљајних тела. Елементи лежаја изложени су у раду виšekратно поновљеним, учесталим променама оптерећења и јаком замарању унутар материјала целог система. Присуство области цикличних напрезања је узрок настајања замора у котрљајним лежајима.

Присуство и деловање променљивих тангенцијалних напона је главни узрок појаве иницијалне пукотине, а променљиви нормални напони истезања изазивају даље ширење и распрострањавање пукотине.

Присуство мазива помаже даљем ширењу пукотине. Када пукотина изађе на површину испуњава се мазивом. При котрљању два тела, контактни напони расту све дотле док притисак уља у пукотини дође до нивоа при коме је раван напонима на површини. Овакво стање напона изазива напоне истезања у основи пукотине, који подпомажу одвајању ситних комадића метала и даљем ширењу пукотине.

Треба рећи да се на елементима трибомеханичких система лежаја јавља и иницијални питинг услед концентрације напрезања на местима изразитијих површинских неравнина. Са порастом стварне површине додира и равномернијом расподелом оптерећења престаје појава нових јамица. Иницијалне пукотине излазе на површину и прелазе у јамике услед:

- појаве тангенцијалних напона насталих као резултат деловања сила трења,
- температурних напона у зони контакта котрљајних тела и путање котрљања,
- настајања месних, недопустивих пренапрезања у материјалу, услед доспевања тврдих честица на путању котрљања.

Поред питинга, као вид заморног хабања јавља се и пелинг, кога карактерише формирање пукотина које са контактном површином заклапа веома оштар угао и даље се шири паралелно са површином на дубинама мањим од дубине максималног номиналног напона. [3]

Пелинг се може јавити у замрзнутим областима. Пелинг се јавља када је велики број неравнина у површинском слоју у директном контакту са другом тврдом површином. Пелинг директно зависи од параметара површинске храпавости.

Спалинг (љуспање) се идентификује као формирање великих и веома дубоких удубљења на оптерећеним површинама. У озбиљнијим случајевима, услед спалинга ова удубљења се могу проширити дуж читаве стазе котрљања и тако проузроковати уклањање велике запремине материјала са контактних слојева. Спалинг се сматра најчешћим обликом заморног оштећења.

Спалинг може бити зачет на површини или у подповршинском слоју. Овај вид заморног оштећења веома често је у вези са површинским дефектима који се понашају као концентратори напона. Удубљења настала услед контакта површине са продуктима хабања, огреботине и трагови брушења су честа места на којима спалинг настаје. Напредан вид спалинга се у неким случајевима назива флакинг, вид хабања који се идентификује кидањем материјала попречно или дуж стазе котрљања.

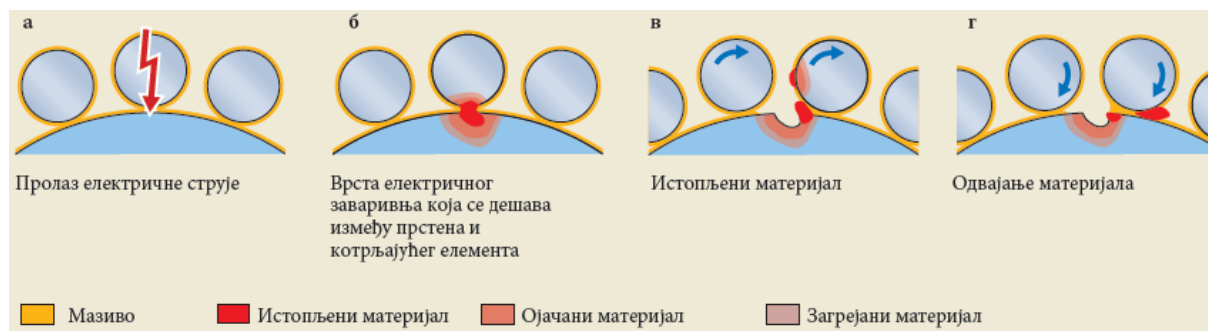
3.6 Електрична ерозија

Електрична ерозија је оштећење котрљајућих лежајева је чест узрок отказа - довољно често да је читав сет категорија наведени у ISO стандарду за оштећења лежишта (ISO 15243:2004). [5]

Када електрична струја (слика 3.14) прелази из једног прстена у други преко котрљајућег елемента, оштећење је неизбежно (а). На контактним површинама, процес је сличан као електрични лук за заваривање (висока густина струје преко малог контакта на површини, б). Материјал се загрева до температуре од каљења до нивоа топљења. Ово доводи до појаве промена боју подручја, које варирају у величини, где је материјал био темпераментан, ојачан (в) или истопљен. Вишак материјал котрљајућег елемента се на крају одваја од материјала (г). [5]

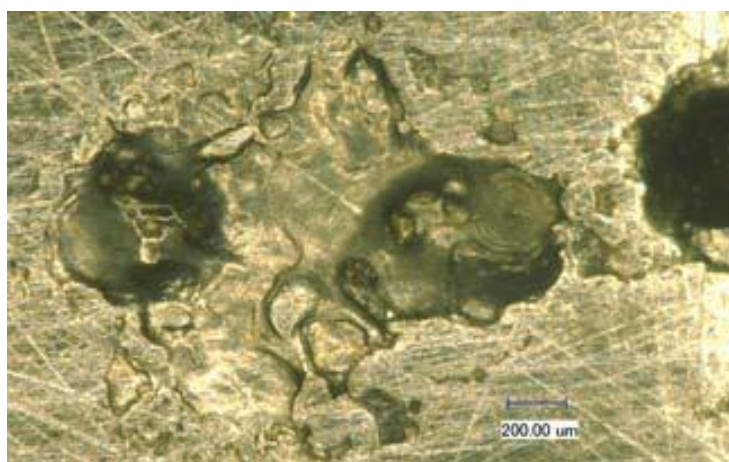
Електрична струја пролази кроз тачке контакта између две површине, које у струјном току представљају места повећане отпорности, може изазвати значајне штете контактних делова, што се огледа у њиховом хабању и одвајања честице са површине. Електрична ерозија је врло препознатљив облик хабања код лежајева који се срећу код ротирајућих електричних прибора и уређаја.

Због појаве јамица које умногоме подсећају на оштећења материјала површина услед замора материјала, често се овај вид хабања назива електрични питинг. Јамице се чешће јављају на постелици, али се јављају и на рукавцу где у мањем степену зависе од тврдоће. Варничење проузрокује оштећења мазива, као и контаминацију мазива и мазивог система. Премазима специјалним мастима и пастама, најчешће на бази графита, могу се оштећења смањити у великој мери.



Слика 3.14 Механизам електричне ерозије [5]

Слика 3.15 приказује пример сферног ваљкастог лежаја подвргнуте прекомерној електричној струји. Велики број веома великих кратера могу видети се на ваљку. Увећањем јасно показује се кратер са растопљеног материјала око својих ивица. [5]



Слика 3.15 Електрична ерозија микроскопски приказ [5]

4. ПРЕГЛЕД МЕТОДА ЗА ИДЕНТИФИКАЦИЈУ ОТКАЗА КОТРЉАЈНИХ ЛЕЖАЈЕВА

Захтеви за високом поузданошћу ротационих машина су сваким даном све већи, па су у овој области присутна стална побољшања. Са применом савремених материјала, ротационе машине су почеле да раде на све већем броју обртаја, док ротори на тим машинама постају све лакши. Од њих се очекује да раде без отказа у што дужем временском интервалу. Идентификација и лоцирање предстојећег отказа постају незаобилазан елемент у циљу постизања високе поузданости. [1]

У табели 4.1 илустровани су најчешће врсте отказа техничких система и назначене су методе техничке дијагностике које су у стању да их идентификују. На основу приказане забеле може се закључити да све врсте најчешћих отказа могу се идентификовати вибродијагностиком.

Табела 4.1 Најчешћи откази техничких система [1]

Отказ	Методe техничке дијагностике			
	Температура	Притисак и проток	Анализа уља	Вибрације
Дебаланс	+			+
Несаосност вратила	+			+
Оштећења котрљајних лежајева	+		+	+
Оштећења клизних лежајева	+	+	+	+
Оштећења зупчаника			+	+
Оштећења каишних преносника				+
Лом				+

Код највећег броја техничких система вибрације су непожељне јер:

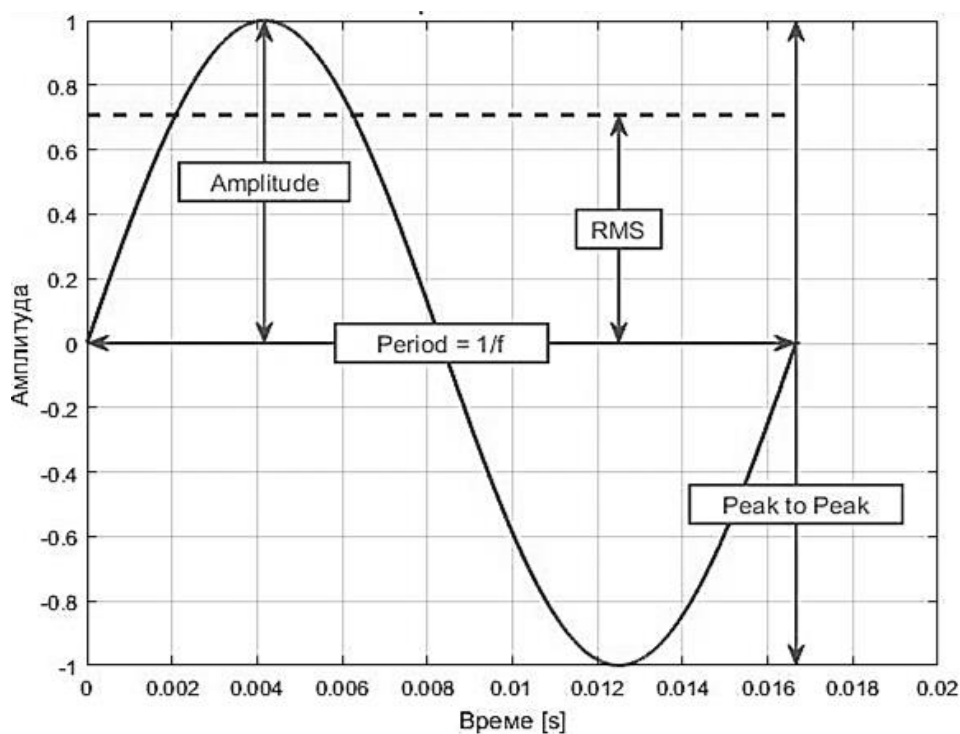
- интензивирају процес хабања покретних елемената,
- изазивају лом механичких компонената,
- доводе до слабљења раздојивих веза,
- доводе до отказа електронских компонената и система,
- доводе до оштећења изолације каблова који се додирују,
- проузрукују буку и
- изазивају оштећења и обољења човека.

На основу литературних извора [1, 6 – 12] у наставку биће дат преглед метода које се користе за анализу нивоа вибрација котрљајних лежајева, а самим тим и за откривање отказа котрљајних лежајева.

4.1 Анализа вибрација у временском домену

Мерење временског сигнала је најједноставнија форма вибрацијске анализе. Постоје бројне карактеристике (слика 4.1) за вредновање амплитуде (нивоа) вибрацијског сигнала:

- Вршна вредност (peak);
- Вредност од врха до врха (peak-peak);
- Срдња вредност (average);
- Ефективна вредност (RMS - root mean square);
- Фактор пораста (Crest factor);
- Периодичност/Понављање (Periodicity/ Repetition Rate);
- Трајање (Duration).



Слика 4.1 Карактеристике сигнала у временском домену [6]

Амплитуда вибрације је величина која указује на озбиљност вибрације и може се исказати различитим вредностима.

Вредност амплитуде од врха до врха индикује максималне амплитуде сигнала који описује вибрацију. Овај параметер је користан у ситуацијама када је вибрацијско померање делова машине значајно са становишта максималних напрезања или замора материјала у механичком систему. [6]

Вршна вредност амплитуде, A_z , је параметер нарочито користан за изражавање нивоа краткотрајних ударних вибрација. Овај параметер исказује само максималну вредност амплитуде, док не узима у обзир временску историју сигнала.

Средња вредност, A_{sr} , је параметер који узима у обзир временску историју сигнала. Употреба овог параметра је ограничене практичне вредности, јер нема директне корелације са неком физичком величином.

Ефективна вредност сигнала, A_{ef} , је најважнија мера амплитуде вибрације због тога што узима у обзир временску историју сигнала. На тај начин овај параметер даје амплитуди сигнала вредност која је директно повезана са енергетским садржајем сигнала, тј. деструктивном способности дате вибрације.

За хармонијски периодични сигнал важе релације:

$$A_{ef} = \frac{A_z}{\sqrt{2}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} A_{sr} \quad (4.1)$$

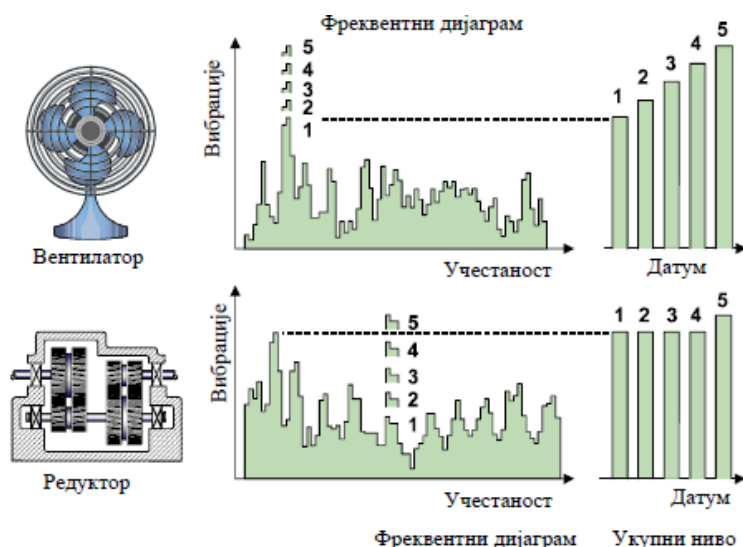
Приказане величине које описују временски сигнал не односе се само на једноставан синусоидни сигнал, него на све уобичајене вибрацијске сигнале који се могу добити на машинама, који су састављени од много синусоидних компонената.

4.2 Анализа вибрација у фреквентном домену

Анализа сигнала у фреквентном домену је најзначајнији алат који се примењује за откривање отказа преко мерења и анализе вибрација.

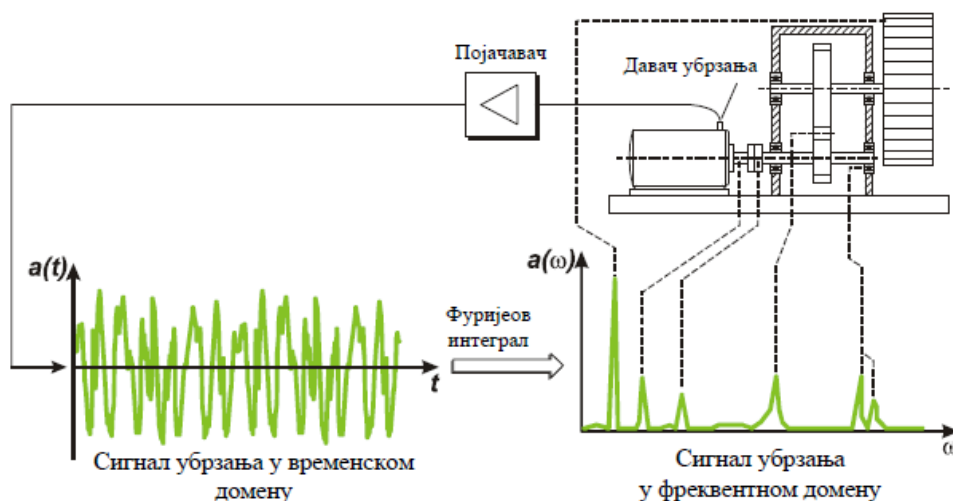
Фреквентна анализа је метода пребацивања сигнала снимљених у временском домену у фреквентни домен. Анализом сигнала у фреквентном домену могуће је открити различите отказе.

Да би одлучили како пратити вибрације у дужем временском интервалу, потребно је добро познавати посматрани технички систем. Код једноставнијих техничких система довољно је пратити само укупни ниво вибрација (пример вентилатора са слике 4.2). Међутим, код сложенијих техничких система (пример редуктора са слике 4.2), отказ неког елемента, који се манифестује у уском фреквентном опсегу, може бити маскиран осталим фреквентним компонентама. Тек позни стадијум поменутог отказа узроковаће повећање укупног нивоа вибрација. У том случају, праћењем сигнала вибрација у фреквентном домену предстојећи отказ ће бити примећен много раније. [1]



Слика 4.2 Значај фреквентне анализе [1]

Фреквентни дијаграм даје информације о нивоима вибрација које узрокује сваки појединачни елемент техничког система (слика 4.3). на тај начин је могуће лоцирати изворе вибрација и извршити процену утицаја сваког од њих.



Слика 4.3 Фреквентна анализа вибрација реалног техничког система [1]

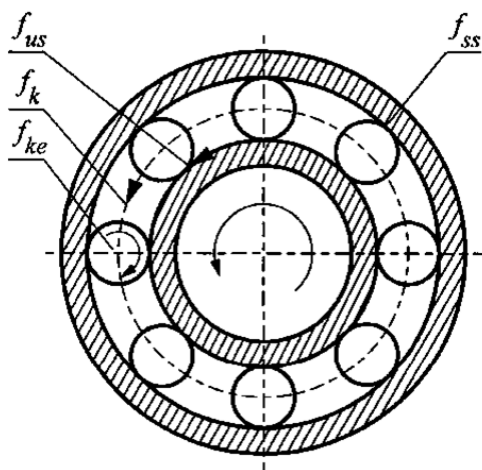
Након критичке анализе сигнала у фреквентном домену поставља се дијагноза и при томе се морају поштовати два основна правила:

- свакој карактеристичној учестаности у спектру мора да се придружи одређени део техничког система или физичка величина везана за извођење процеса и
- било која карактеристична амплитуда и учестаност не може се променити без разлога. Свака промена наведених величина указује на промену динамичког понашања техничког система. Било каква промена указује на промену стања техничког система.

Процес развоја оштећења котрљајних лежајева узрокује промене снимљених сигнала вибрација које се манифестују на деловима фреквентног спектра, који одговарају карактеристичним учестаностима вибрација котрљајних лежајева. Према томе, уколико

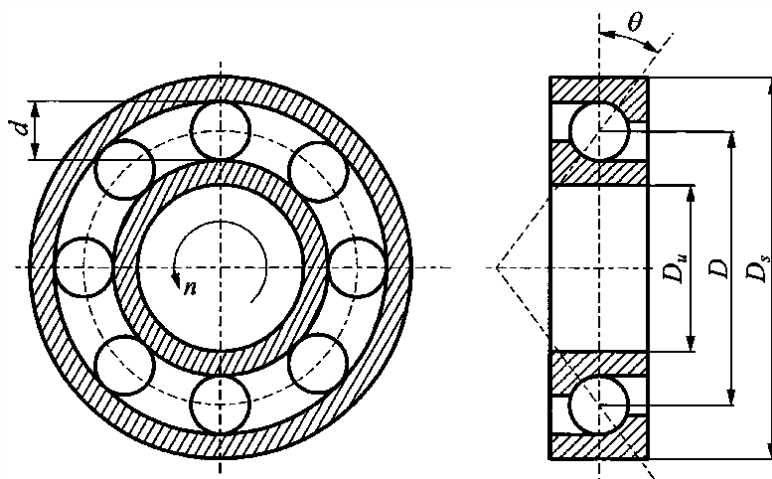
постоји оштећење неког од елемената лежаја јавиће се повећање интензитета амплитуде вибрација на одговарајућој карактеристичној учестаности. Карактеристичне учестаности (слика 4.4) котрљајних лежајева су следеће:

- карактеристична учестаност кавеза f_k ,
- карактеристична учестаност унутрашње стазе котрљања f_{us} ,
- карактеристична учестаност спољашње стазе котрљања f_{cs} и
- карактеристична учестаност котрљајних елемената f_{ke} .



Слика 4.4 Карактеристичне учестаности [1]

Карактеристичне учестаности вибрација котрљајних лежајева дефинисане су геометријским односима и кинематским параметрима кретања елемената лежаја, па се, према томе, могу аналитички одредити. На слици 4.5 приказане су величине које ће се користити за одређивање карактеристичних учестаности котрљајних лежајева.



Слика 4.5 Основне димензије котрљајног лежаја [1]

Следећи изрази који су дати су изрази за израчунавање карактеристичних учестаности котрљајног лежаја за случај ротације унутрашњег прстена, при непокретном спољашњем прстену, што је и најчешћи случај у пракси.

Карактеристична учестаност кавеза:

$$f_k = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \theta \right) \cdot f \quad (4.2)$$

где је: f – учестаност обртања вратила, d – пречник котрљајних елемената, D – средњи пречник лежаја, θ – угао додира.

Средњи пречник се рачуна према обрасцу:

$$D \approx \frac{D_u + D_s}{2} \quad (4.3)$$

где је D_u – унутрашњи пречник, а D_s – спољашњи пречник лежаја.

Карактеристична учестаност унутрашње стазе котрљања f_{us} представља учестаност преласка котрљајног елемента преко једне тачке на унутрашњој стази котрљања и може се израчунати помоћу израза:

$$f_{us} = \frac{N}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \theta \right) \cdot f \quad (4.4)$$

где је N број котрљајних елемената.

Карактеристична учестаност спољашње стазе котрљања f_{ss} је учестаност преласка котрљајног елемента преко једне тачке на спољашњој стази котрљања. Ова учестаност се може израчунати помоћу израза:

$$f_{ss} = \frac{N}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \theta \right) \cdot f \quad (4.5)$$

Карактеристична учестаност котрљајног елемента f_{ke} је учестаност обртања котрљајног елемента око сопствене осе и може се израчунати помоћу израза:

$$f_{ke} = \frac{d}{2D} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cos \theta \right)^2 \right] \cdot f \quad (4.6)$$

У случају да тип и димензије лежаја нису познати, за израчунавање карактеристичних учестаности лежаја могу се користити следеће једноставне формуле:

$$\begin{aligned} f_k &\approx 0,4 \cdot f \\ f_{ss} &\approx 0,4 \cdot f \cdot N \\ f_{us} &\approx 0,6 \cdot f \cdot N \end{aligned} \quad (4.7)$$

Статистички посматрано, највећи број котрљајних лежајева има између 7 и 15 котрљајних елемената, док велики број њих има од 9 до 11 котрљајних елемената. Ако број котрљајних елемената није познат, за израчунавање карактеристичних учестаности помоћу израза 4.6 може се узети да је $N=10$.

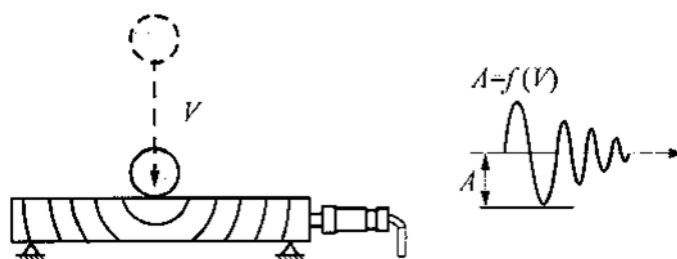
Аналитички одређене вредности карактеристичних учестаности котрљајних лежајева често, у извесној мери, одступају од реално уочених вредности на снимљеним фреквентним дијаграмима вибрација. Разлози за та одступања су следећи:

- одступање декларисаног од стварног броја обртаја техничког система;
- произвођачи котрљајних лежајева задржавају право на промене геометријских карактеристика котрљајних лежајева, као што су пречници стаза котрљања и котрљајних елемената, па чак и броја котрљајних елемената;
- значајно аксијално оптерећење коме је изложен лежај може да узрокује промену, односно смањење путање котрљајних елемената;
- присутно хабање елемената лежаја утиче на промену, односно повећање путање котрљајних елемената;
- уколико котрљајни лежајеви раде у условима великих брзина и малих оптерећења, одступања могу настати као последица клизања у зони контакта елемената лежаја.

4.3 Метода ударног импулса – SPM (Shock Pulse Method)

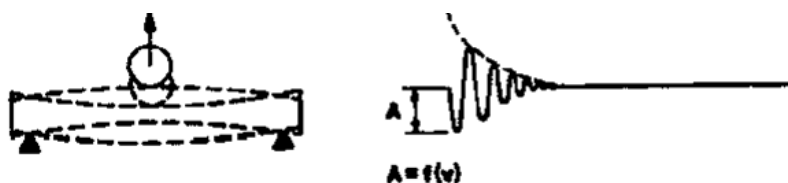
SPM метода детектује развој механичких ударних таласа узрокованих сударом две масе. У тренутку удара, долази до молекуларног контакта и компресионог таласа на обе масе. SPM метода је базирана на појавама у материјалу које се дешавају у екстремно кратком временском периоду непосредно након првог контакта честица тела. Молекуларни контакт производи изузетно велико убрзање честица у тачки удара.

На примеру са слике 4.6 може се објаснити појава који се догађа у тренутку удара лоптице у шипку. Пре удара, шипка се налази у стању мировања док се куглица креће одређеном брзином (v). У тренутку удара површине шипке и куглице ће доживети спајање при брзини једнакој брзини куглице. У тачки удара покренуто је велико убрзање материјала. У току иницијалне фазе контакта, интензитет овог убрзања зависи искључиво од брзине куглице док масе куглице и шипке као ни спољне вибрације немају утицаја на то. Убрзање материјала у тачки удара генерише компресиони талас који се простире ултразвучно у свим правцима кроз шипку. Други талас се такође простире и кроз куглицу. При томе је мерење интензитета фронта таласа индиректно мерење брзине ударца (v). [7, 8]



Слика 4.6 Генерисање ударних импулса [1, 7, 8]

У току друге тазе удара (слика 4.7), енергија куглице ће савити шипку што ће изазвати вибрације на њој. Ове вибрације могу се детектовати анализом вибрација.



Слика 4.7 Вибрације шмишке након импулсног удара [7, 8]

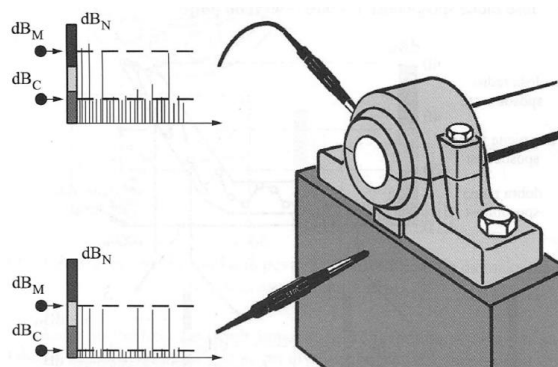
SPM метода детектује и мери интензитет механичког удара, детектовањем и мерењем резултантног фронта компресионог таласа. За ову врсту мерења користе се пиезо-електрични акцелерометар за мерење механичких удара без утицаја других фактора као што су позадинске вибрације и шумови. Овај сензор је механички и електронски подешен тако да је његова резонантна фреквенција 32 kHz. Компресиони талас узрокован механичким ударима генерише осцилације у сензору на његовој резонантној фреквенцији. То је приказано на слици 4.10 као транзиентни електрични сигнал узрокован ударом. Максимална амплитуда (A) ових осцилација директно је пропорционална брзини удара (v). Пошто је природа овог сигнала добро позната и дефинисана, сигнал са акцелеромера може се електронски филтрирати чиме се искључују сви остали утицаји и шумови. [7]

Контактна површина лежаја никада није идеално глатка. На њој су увек присутне одређене неравнине и неправилности. При ротацији лежаја те неравнине или оштећења генеришу механичке ударе, који даље производе ударне таласе. Другим речима, лежај се понаша као генератор ударних импулса. Интензитет ових импулса зависи од стања контактне површине и обимне брзине лежаја, која је у функцији број обртаја и димензија лежаја.

У пракси, при проласку лежаја кроз његове животне фазе, од новог лежаја до фазе у којој су истрошени сви ресурси лежаја и неопходна његова замена, интензитет ударних импулса повећава се и до 1000 пута.

SPM је методологија која омогућује детекцију оштећења и његову квантификацију што је од великог значаја за планирање одржавања.

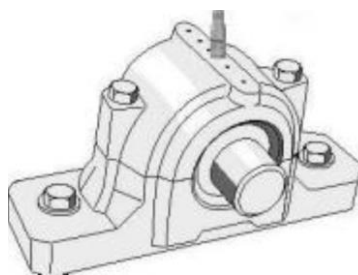
Приликом примене методе ударног импулса посебну пажњу треба посветити правилном избору меног места (слика 4.8). Ударни талас који се генерише услед судара контактних површина елемената лежаја мора доћи до изабраног мерног места са довољним интензитетом. Да би се то постигло, мерење треба вршити на страни лежаја са једним прелазним материјалом. Поред тога, мерно место треба да буде сто је могуће ближе лежају и у зони оптерећења лежаја. [1]



Слика 4.8 Избор мерног места [1, 7]

4.4 Метода енvelope убрзања вибрација

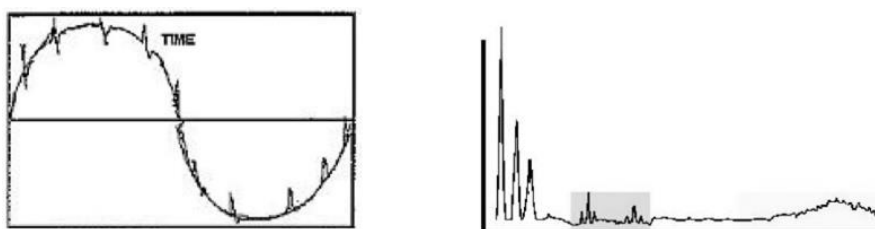
Отказ лежаја је увек праћен појавом буке, вибрација и повећањем температуре лежаја. На слици 4.9 приказано је кућиште у коме се налази лежај са оштећењем на спољашњој котрљајној стази. На кућишту је постављен акцелерометар који мери вибрације које се преносе кроз лежај и кућиште. Приликом сваког проласка котрљајног елемента преко оштећења на котрљајној стази, појавиће се удар. Интензитет тих удара је прилично мали у поређењу са осталим вибрацијама које су присутне на лежају. У зависности од унутрашње геометрије лежаја и броја котрљајних тела појавиће се од 6 до 10 удара за један обрт. Ти мали импулси изазивају побуду структурне резонанције лежаја и кућишта. [7]



Слика 4.9 Кућиште лежаја са сензором [7, 9]

Временски сигнал који се добија са сензора (слика 4.10 лево) састоји се од периодичних сигнала високих фреквенција насталих ударом котрљајних елемената у оштећење и нискофреквентних сигнала који су последица неуравнотежености, несаосности или других проблема. Фреквентни приказ оригиналног сигнала приказан је на слици 4.10 десно. [7]

На спектру се јасно уочава први и други хармоник који су последица неуравнотежености и несаосности. У средишњем делу спектра налазе се хармоници који су последица резонанције структуралних елемената побуђених малим импулсима, док се у зони високих вибрација (десни део спектра) присутне вибрације које потичу од самих удара котрљајних тела по оштећењима. [7]



Слика 4.10 Временски и фреквентни сигнал [7]

Оштећења лежаја генеришу вибрацијски сигнале врло мале амплитуде и фреквенције веће од радне фреквенције машине. Стандардним методама анализе сигнала, сигнали генерисани малим оштећењима лежајева тешко се препознају, јер су вишеструко слабији од осталих сигнала (сигнал од неуравнотежености, несаосности...). Методологија енvelopeирања сигнала убрзања подразумева филтрирање нижих фреквенција чиме се елиминишу сигнали који потичу од неуравнотежености, несаосности и других механичких проблема. Енергија сигнала је на овај начин умањена али је њен карактер непромењен. У таквом филтрираном сигналу, импулси се појављују

у једнаким временским интервалима, управо онако како се одвија физички процес преласка котрљајних елемената преко оштећења.

На следећој слици приказани су примери мерних уређаја за енвелоп методу.



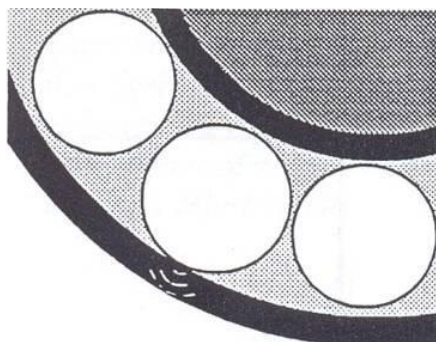
Слика 4.11 Уређаји за енвелоп методу [9]

4.5 SEE метода (Spectral Emitted Energy)

Специјална метода процене стања котрљајућих лежаја која омогућава детекцију дефекта лежаја у врло раној фази јесте SEE метода коју је развила компанија SKF. SEE је скраћеница од енглеског израза Spectral Emitted Energy.

SEE је метода за детекцију отказа лежајева и зупчаника у раној фази отказа. Заснива се на мерењу акустичне емисије генерисане металним контактом. Узроци који могу да генеришу акустичну емисију су: отказ лежаја, недовољна количина мазива, запрљаност мазива, преоптерећење, микроклизање, кавитација, електрични шум итд.

За мерење SEE користе се специјални акустични сензори који региструју ултразвучне таласе опсега 150-500 kHz. SEE представља једну од најбољих метода за детекцију оштећења лежаја, јер може де региструје микроскопска оштећења површина. Вибрације које се генеришу при таквим оштећењима не могу се мерити стандардним методама вибро-дијагностике. Истовременим праћењем SEE, енvelope убрзања, температуре и нивоа вибрација стичу се услови за поуздану анализу и процену правог тренутка за предузимање корективних акција. [7]

Слика 4.12 *Spectral Emitted Energy* [7]

4.6 HFD метода (High Frequency Detection)

HFD обезбеђује рано упозорење за оштећење лежаја. Метода приказује нумеричку вредност укупних вибрација високог спектра (5 kHz – 60 kHz), генерисану малим оштећењима. Због ширине мерног опсега и карактеристике давача, при мерењу HFD методом користе се акцелерометри чија се резонантна фреквенција налази унутар мерног опсега. Карактеристика ове методе је појачавање врло слабих сигнала генерисаних малим ударима. Измерене вредности изражавају се у g. [7]

4.7 Метода крест фактора

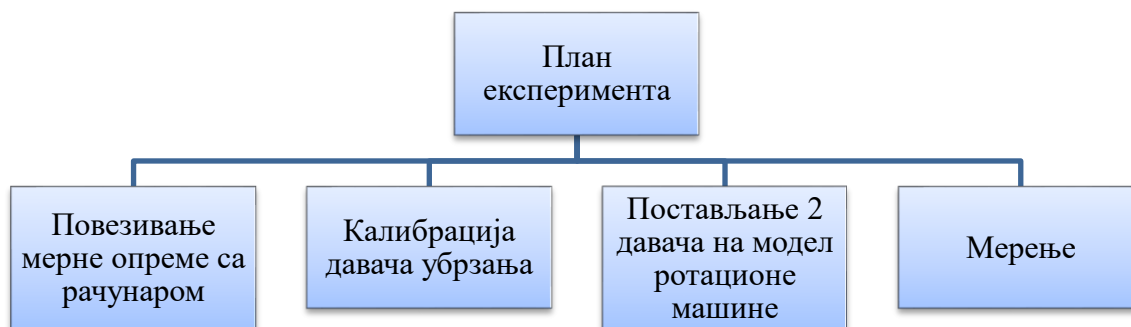
Метода крест фактора се реализује тако што се помоћу вибросензора мере вибрације лежаја, а затим се електронским путем одређује и индицира крест фактор сигнала. Крест фактор (Crest Factor) се дефинише као однос Peak и RMS износа амплитуде вибрација. [8]

$$CF = \frac{Peak}{RMS} \quad (4.8)$$

RMS је скраћеница од енглеских речи Root Mean Squared и представља ефективну вредност амплитуде вибрација по истом принципу као што је 220 [V] ефективни напон мрежне електричне струје, а истовремено Peak мрежног напона износи 311 [V]. У случају чисто синусног облика сигнала, као што је најчешћи случај код мрежне електричне струје крест фактор је једнак $\sqrt{2} = 1,41$, међутим крест фактор сигнала вибрација је обично у распону од 1,5 до 5. Повећање крест фактора вибрација са појавом дефекта лежаја је узроковано ударима изазваним од стране дефекта лежаја. Са временом како се дефект лежаја увећава крест фактор вибрација лежаја почиње да опада, јер се оштећења лежаја временом изгладе. У моменту када крест фактор опадне на нормалну вредност дефект лежаја је већ толики да се може детектовати једноставнијим методама као што је нпр. мерење температуре лежаја. Метода крест фактора је брза, јефтина и једноставна метода, а главни недостатак јој је осетљивост на сметње од других извора вибрација као што су нпр. зупчаници. [8]

5. ЕКСПЕРИМЕНТ

У овом раду урађено је експериментално истраживање у оквиру ког је извршено упознавање са мерном опремом и моделом ротационе машине, идентификација карактеристичних учестаности котрљајних лежајева у сигналу вибрација. На слици 5.1 приказан је план експеримента.



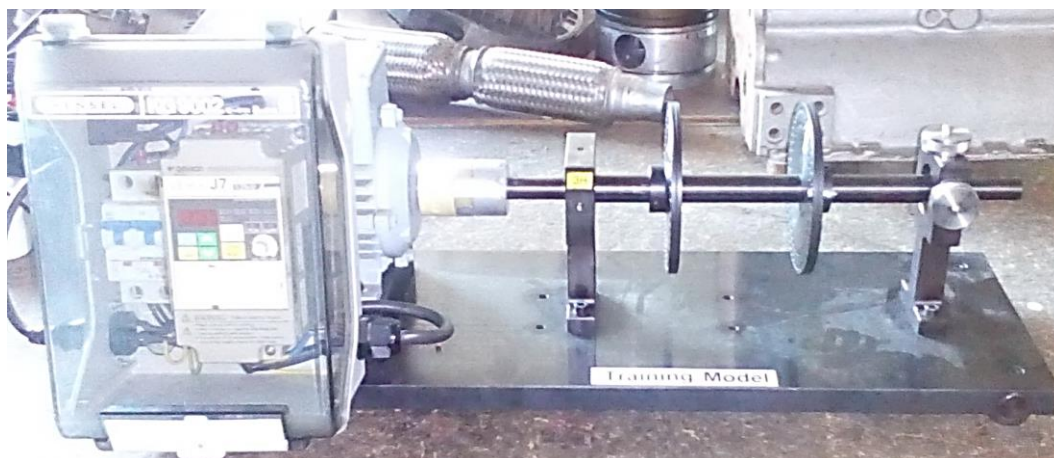
Слика 5.1 План експеримента

Експеримент је извођен за 4 различите вредности учестаности, на 2 места су били постављени давачи, мерење за сваку учестаност је трајало 5 секунди, а учестаности за које је вршено мерење су следеће: 20, 40, 60 и 80 Hz.

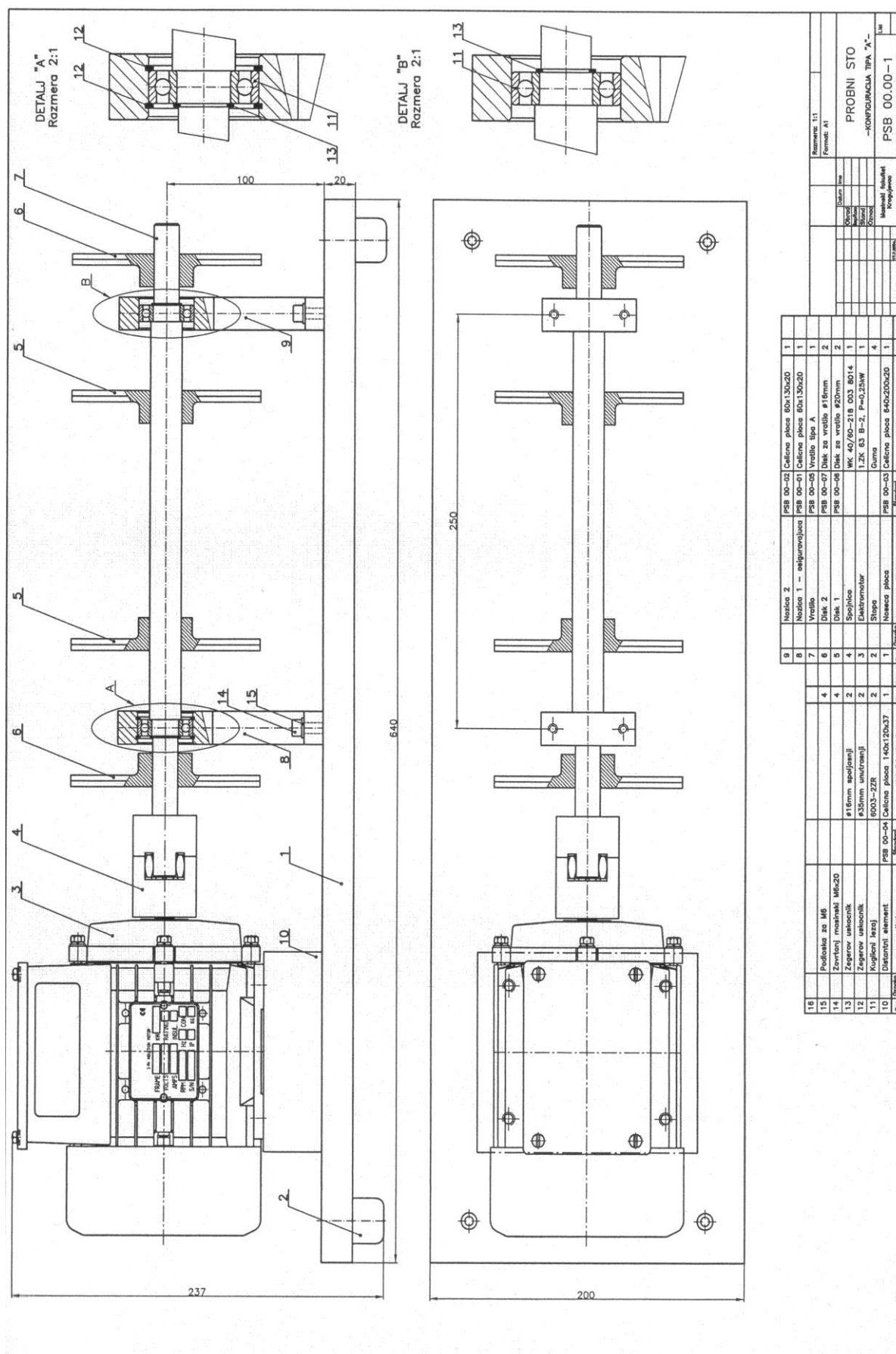
5.1 Опрема за извођење експеримента

Опрема која је коришћена је следећа:

- пробни сто – модел ротационе машине, слика 5.2 и слика 5.3,
- давачи убрзања, слика 5.4
- уређај за аквизицију података Netdb12, слика 5.5 и
- рачунар.

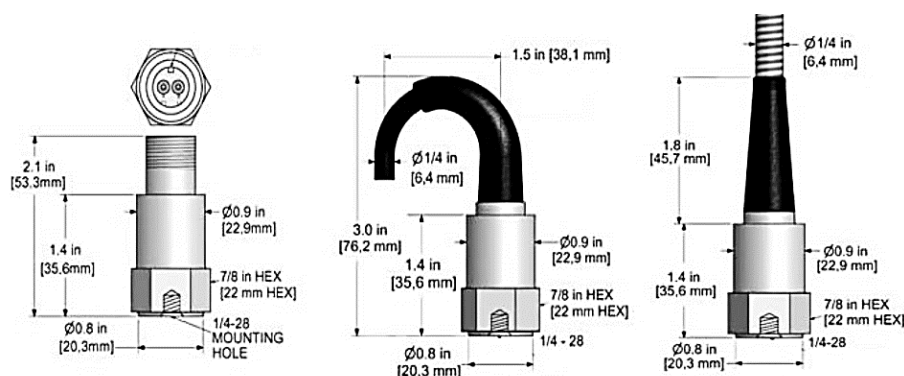


Слика 5.2 Пробни сто



Слика 5.3 Технички цртеж склопа пробног стола [13]

За погон пробног стола поседује стандардни 3-фазни асинхронни мотор са кратко спојеним ротором. Електромотори овог типа имају веома широку примену за погон ротационих машина у индустрији. Инвертор који поседује пробни сто има могућност подешавања доста параметара. Најважнији параметри са аспекта примене на пробном столу за комплексну дијагностику ротора су: максимална учестаност (износи 80 Hz), време залетања и време успоравања. Конструкција пробног стола је таква да може да обезбеди симулацију узрочника који доводе до отказа као што су: дебаланс, појава и развој прслина и несаосност. [13]



Слика 5.4 Давач убрзања [14]

Табела 5.1 Карактеристике давача убрзања

Осетљивост $\pm 10\%$: 100 mV/g	Околина: Температурни опсег.....-50-121 °C Максимална заштита од вибрација.....5000 g/вршној вредности Заптивање.....Решено заваривањем
Фреквенција одзива: $\pm 3\text{dB}$0,5-15000 Hz $\pm 10\%$2,0-10000 Hz	Физичке карактеристике: Осетни елемент.....PZT керамика Тежина.....90 g Материјал.....316 L Нерђајући челик Рупа за монтирање.....1/4-28 Конектор.....2 Pin MIL-C-5015 Инегрални кабл.....CB103

Аквизиција података је процес прикупљања сигнала из реалног света у рачунар ради његове даље обраде, анализе и чувања. Основни елементи система за аквизицију података:

- Давачи (мерни претварачи) који врше претварање физичких величина, које се мере у електрични сигнал.
- Кондиционер сигнала врши појачање, слабљење, филтрирање, линеаризацију и сл.

- A/D конвертор врши претварање континуалних сигнала у дискретне.
- Софтвер за аквизицију управља картицом или уређајем за аквизицију података који врши дискретизацију сигнала. Софтвер често омогућавају и даљу обраду сигнала који су снимљени.

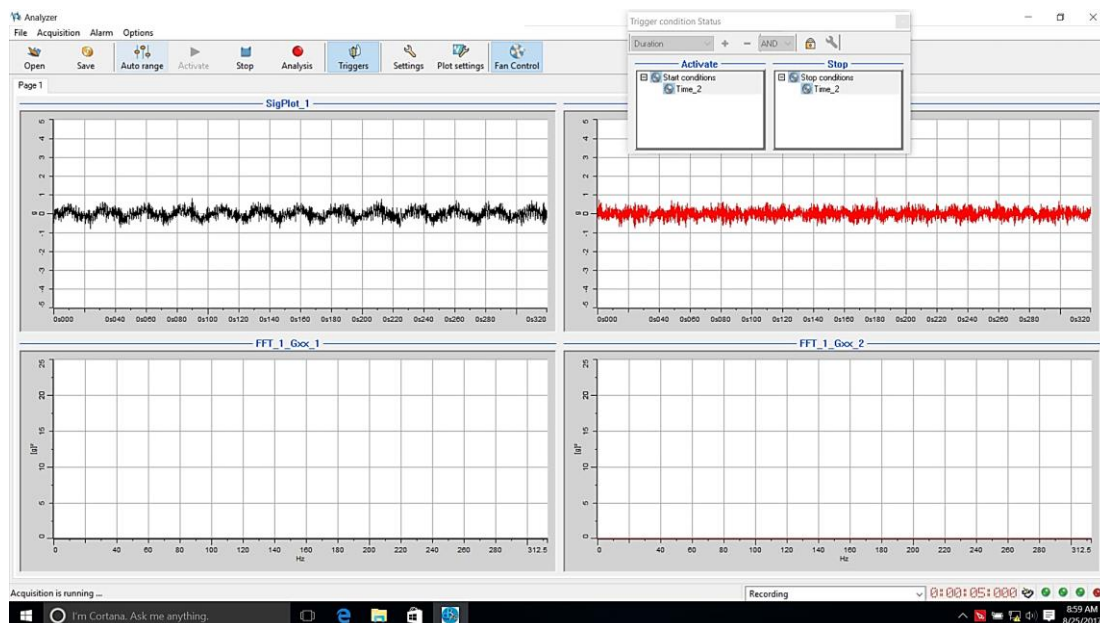
Најбитнији уређај за успешно мерење је уређај за аквизицију података. Конкретно у овом случају је коришћен уређај Netdb12 (слика 5.5). Уређај поседује 12 канала за пријем сигнала и са рачунаром се повезује преко мрежног кабла. Изглед софтвера за аквизицију приказан је сликом 5.6.



Слика 5.5 Уређај за аквизицију (Netdb12) [14]

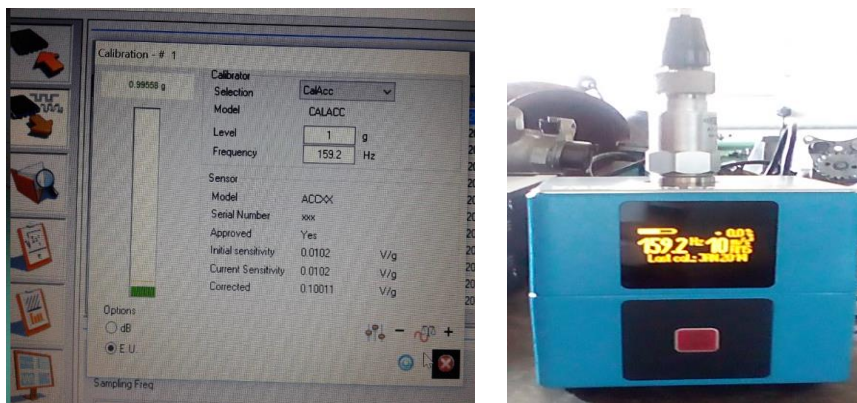
Карактеристике уређаја за аквизицију:

- PC прикључак: Интернет кабл R145 100 Mbits, 2 USB прикључка у задњем делу PDA прикључак и WiFi 802.11 g 54 Mbits;
- Складиштење података: 100 GB HDD (12 сати /континуалног мерења са 12 канала на 51.2 kHz 24 bit);
- Повезивање: 12 канала који се могу везати до 51.2kHz 24bit на сваком каналу NetdB-DAQ12 јединице;



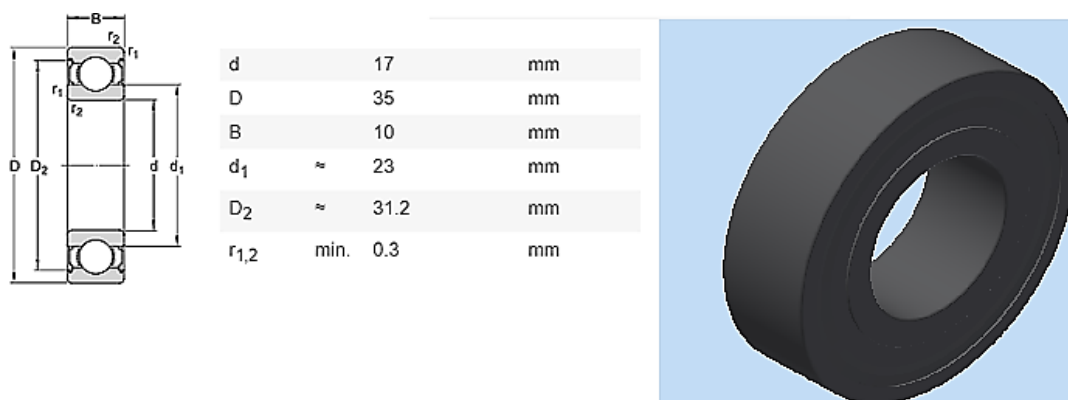
Слика 5.6 Прозор софтвера за аквизицију

Пре самог мерења потребно је извршити калибрацију давача који ће се користити. Калибрација је извршена помоћу поменутог софтвера. Калибрациони уређај и калибрација давача убрзања приказани су сликом 5.7. Карактеристика калибрационог уређаја за давач убрзања је да на фреквенцији од 159,2Hz, даје вредност убрзања од 1g, што се може и видети са слике 5.7.



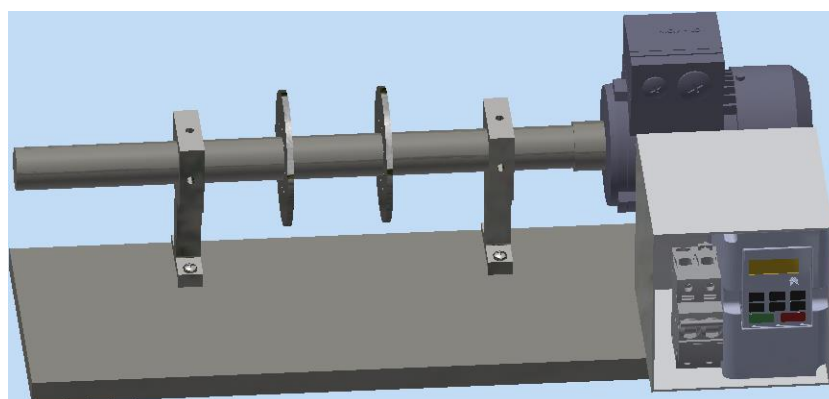
Слика 5.7 Калибрација давача

Лежај који је уграђен у пробном столу тј. лежај који је испитиван је лежај са ознаком 6003 2ZR. Димензије лежаја и 3D модел лежаја приказани су сликом 5.8.



Слика 5.8 Лежај 6003 2ZR [15]

На слици 5.9 приказан је пример 3D модела пробног стола ротационе машине.



Слика 5.9 3D модел пробног стола

5.2 Резултати експеримента

Експеримент је извођен за 4 различите вредности учестаности фреквентног регулатора. Два давача вибрација су била постављена на удаљеније улежиштење и то у радијалним мерним правцима (вертикалном и хоризонталном). Мерење за сваку учестаност фреквентног регулатора је трајало 5 секунди, а учестаности за које је вршено мерење су следеће: 20, 40, 60 и 80 Hz.

Дијаграми који су приказани у наставку представљају спектар вибрација у временском и фреквентном домену. Сигнал је снимљен из помоћ опреме која је описана у претходном делу, затим добијене вредности приликом експеримента даље су обрађени у програму „Origin Pro 2017“ у циљу добијања дијаграма.

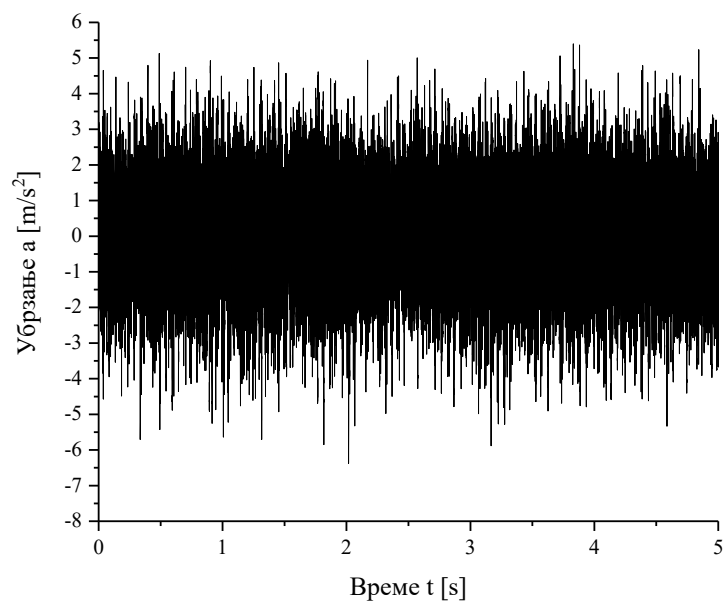
На дијаграмима приказаним у наставку могу се уочити пикови који одступају од остатка спектра снимљеног сигнала и пикови се могу јавити као последица: сопствених фреквенци пробног стола, дебаланса, ротирајућих делова, несаосности, недовољног причвршћења за постоље или лошег и оштећеног лежаја.

Приказани су и дијаграми на којима су назначене карактеристичне учестаности спољашње стазе котрљања, f_{ss} . Вредности које су израчунате за учестаности спољашње стазе котрљања и које су очитане са дијаграм за учестаности спољашње стазе котрљања су следеће:

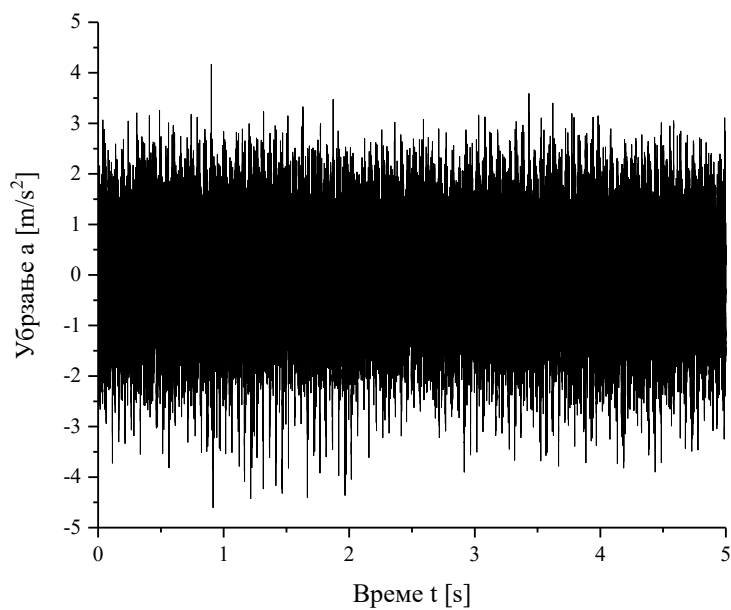
- При учестаности од 20 Hz рачунски је добијено за $f_{ss}=87,1$ Hz, док на дијаграму је очитана вредност 101,15493 Hz.
- При учестаности од 40 Hz рачунски је добијено за $f_{ss}=174,2$ Hz, док на дијаграму је очитана вредност 200,30986 Hz.
- При учестаности од 60 Hz рачунски је добијено за $f_{ss}=261,3$ Hz, док на дијаграму је очитана вредност 260,40154 Hz.
- При учестаности од 80 Hz рачунски је добијено за $f_{ss}=348,4$ Hz, док на дијаграму је очитана вредност 340,52592 Hz.

Карактеристичне учестаности на дијаграмима мало одступају од вредности које су добијене математичким путем. Разлози због којих може доћи до одступања наведени су у поглављу 4.2 овог рада.

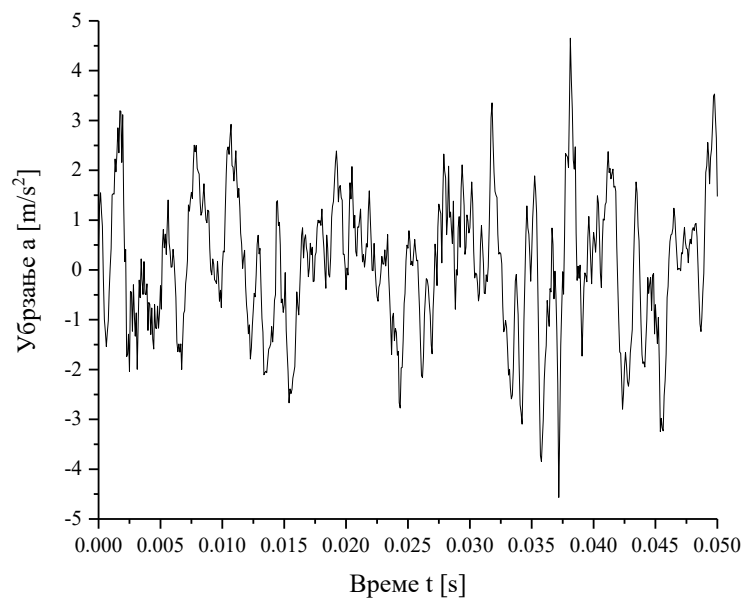
5.2.1 Резултати за учестаност од 20 Hz



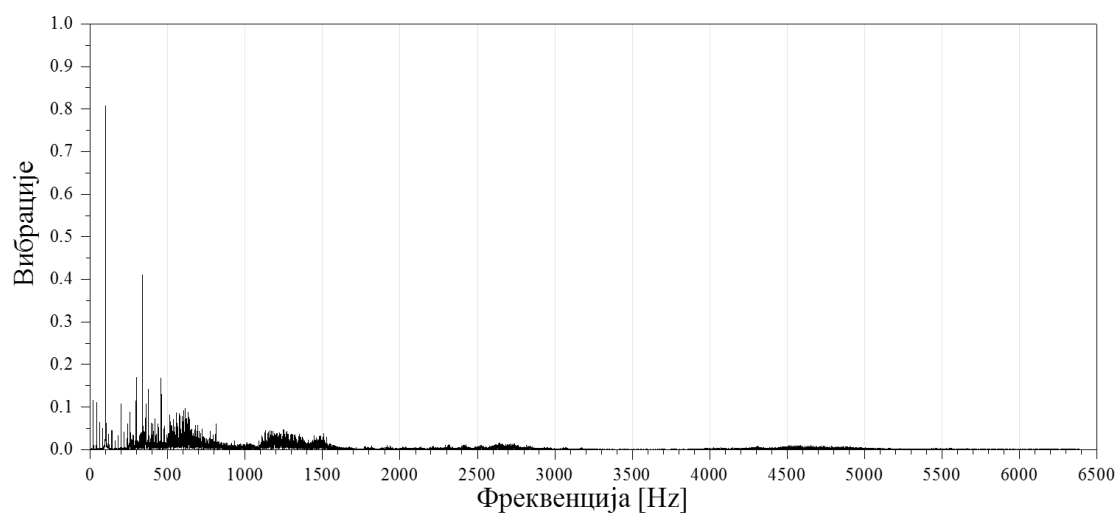
Дијаграм 5.1 Временски дијаграм за први сигнал



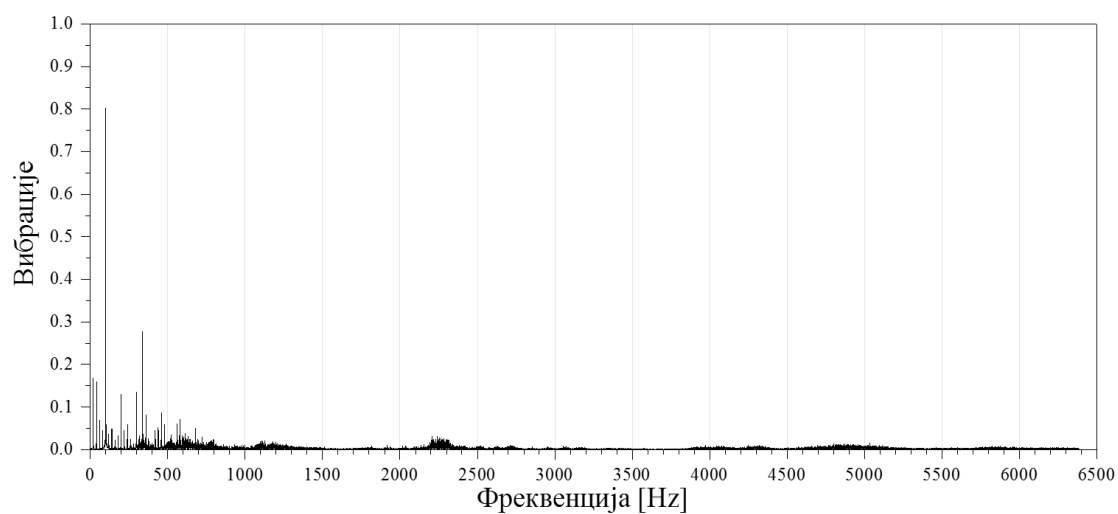
Дијаграм 5.2 Временски дијаграм за други сигнал



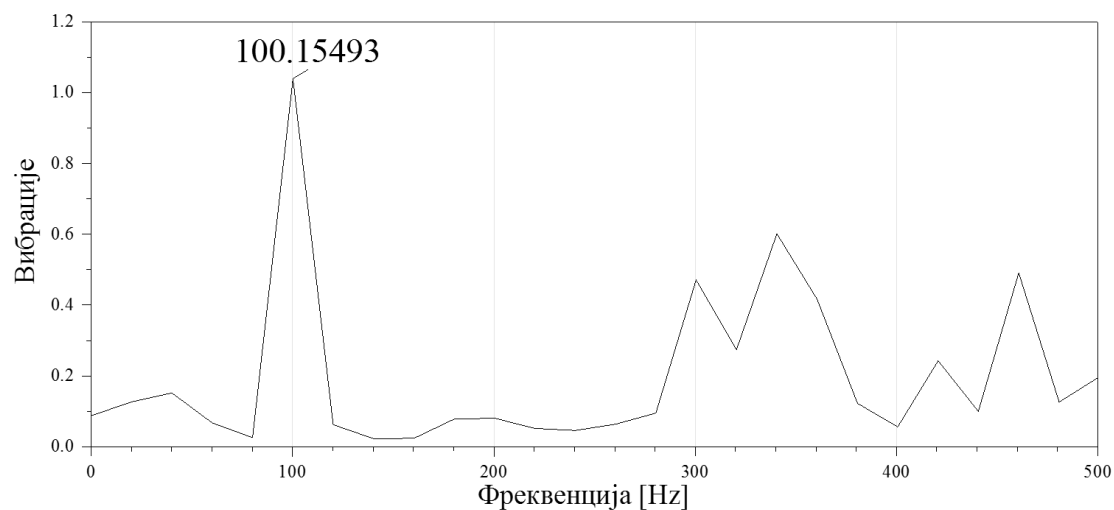
Дијаграм 5.3 Временски дијаграм за први сигнал – сегмент до 0.05 s



Дијаграм 5.4 FFT дијаграм за први сигнал

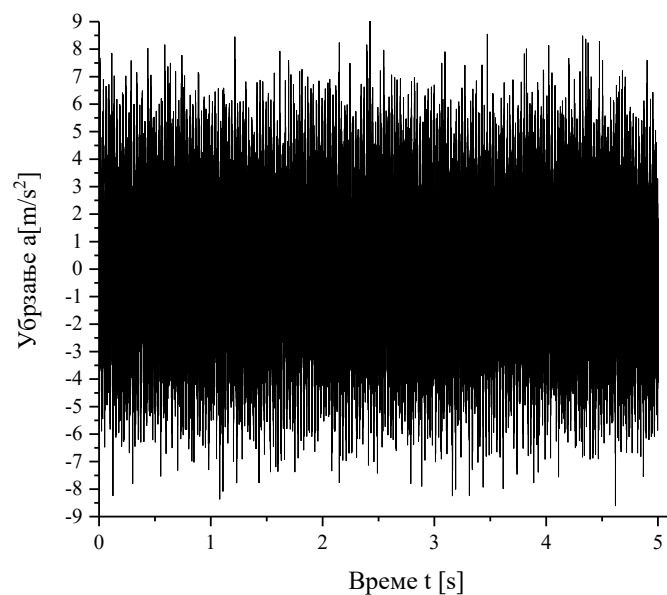


Дијаграм 5.5 FFT дијаграм за други сигнал

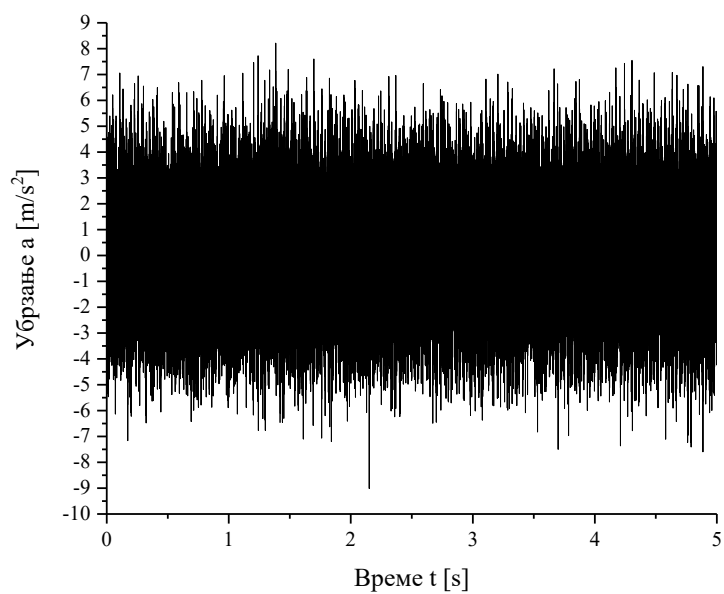


Дијаграм 5.6 FFT дијаграм са назначеном карактеристичном учестаношћу

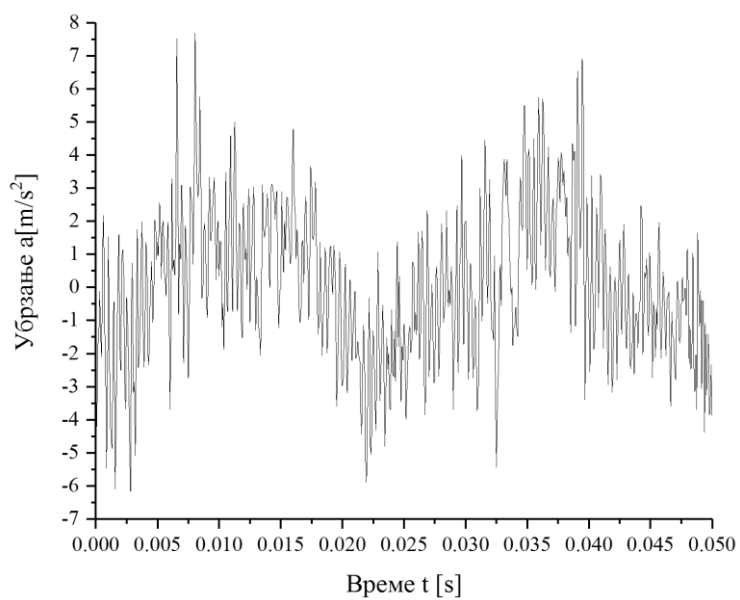
5.2.2 Резултати за учестаност од 40 Hz



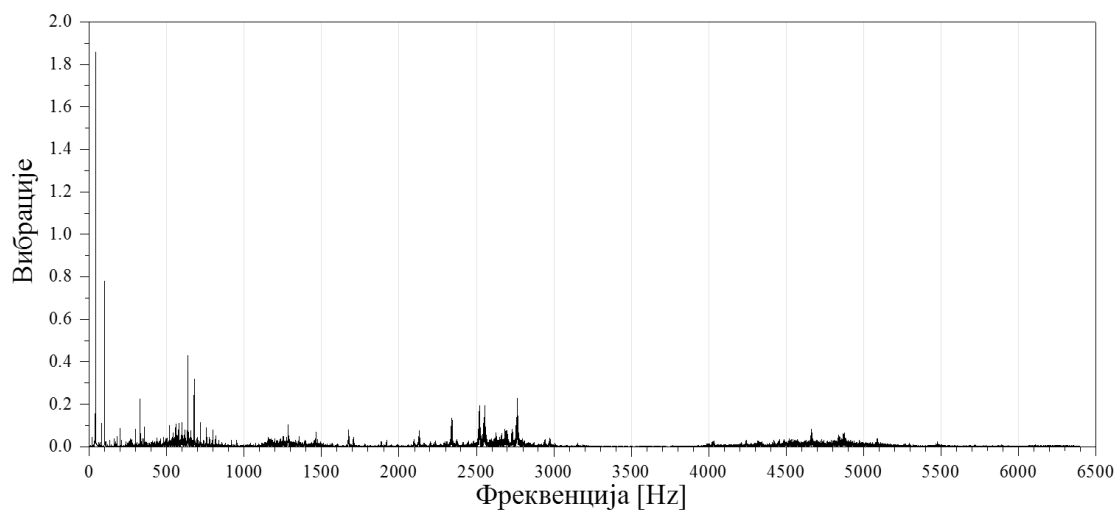
Дијаграм 5.7 Временски дијаграм за први сигнал



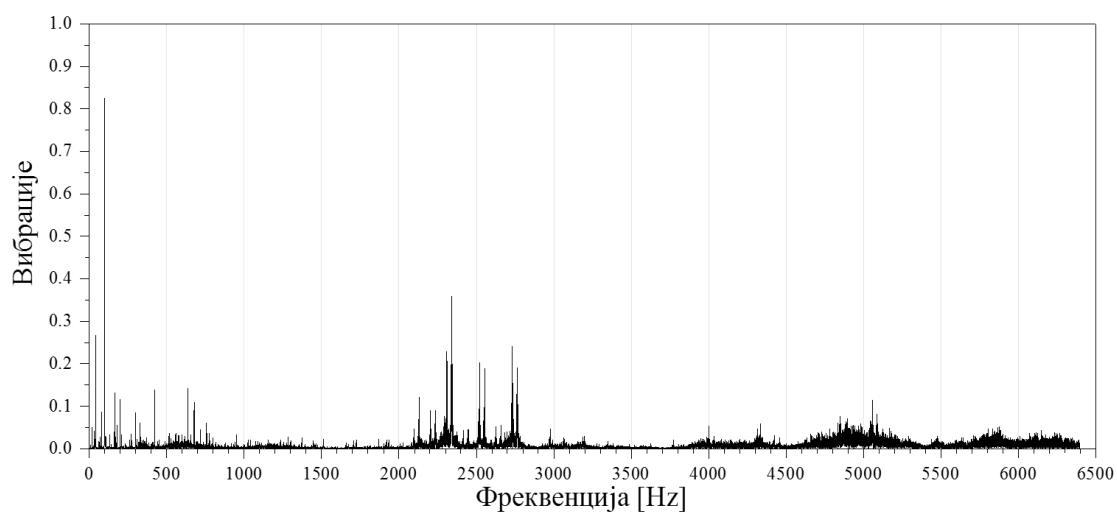
Дијаграм 5.8 Временски дијаграм за други сигнал



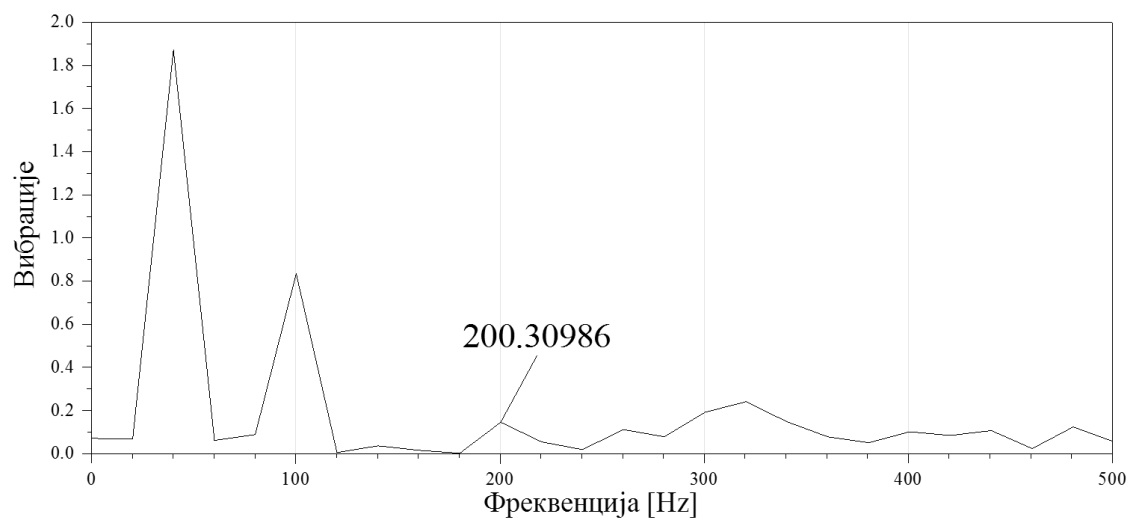
Дијаграм 5.9 Временски дијаграм за први сигнал – сегмент до 0.05 s



Дијаграм 5.10 FFT дијаграм за први сигнал

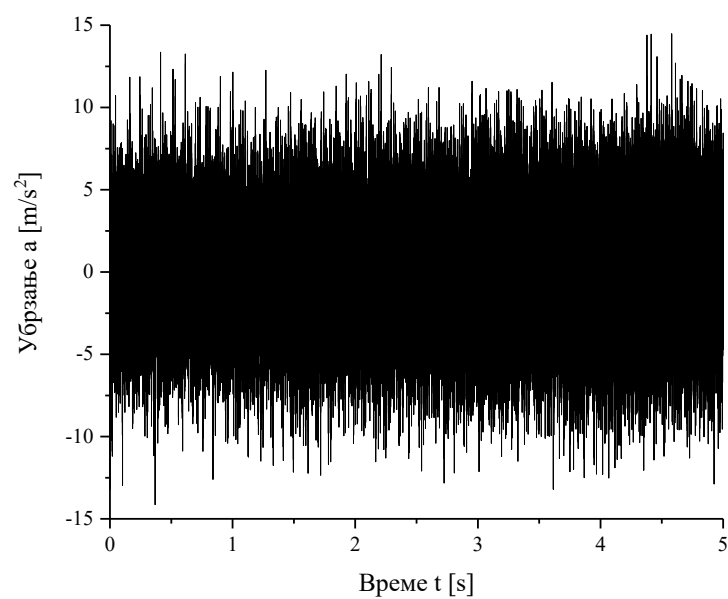


Дијаграм 5.11 FFT дијаграм за други сигнал

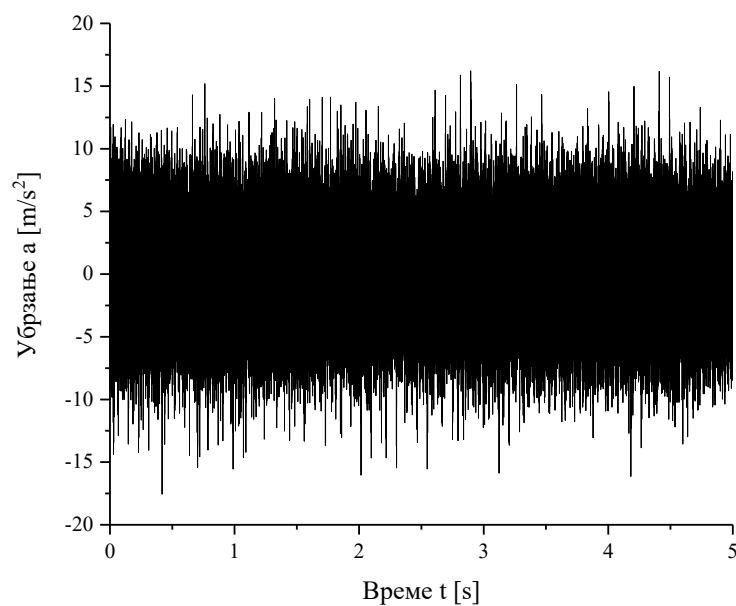


Дијаграм 5.12 FFT дијаграм са назначеном карактеристичном учестаношћу

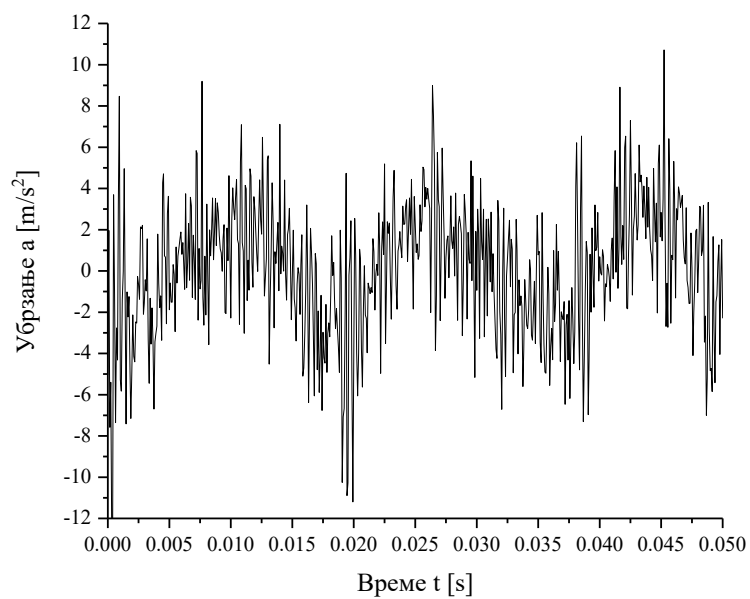
5.2.3 Резултати за учестаност од 60 Hz



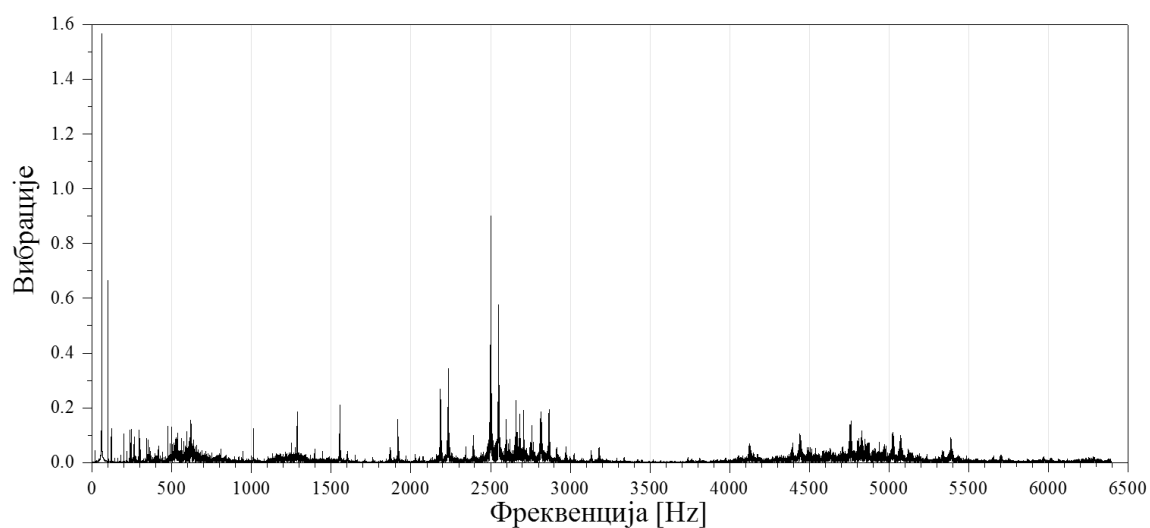
Дијаграм 5.13 Временски дијаграм за први сигнал



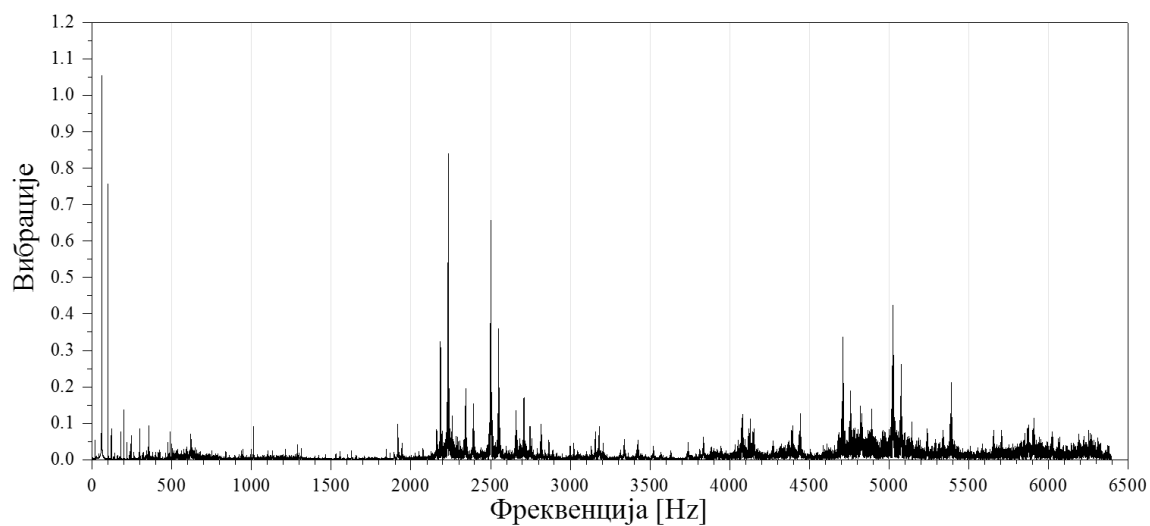
Дијаграм 5.14 Временски дијаграм за други сигнал



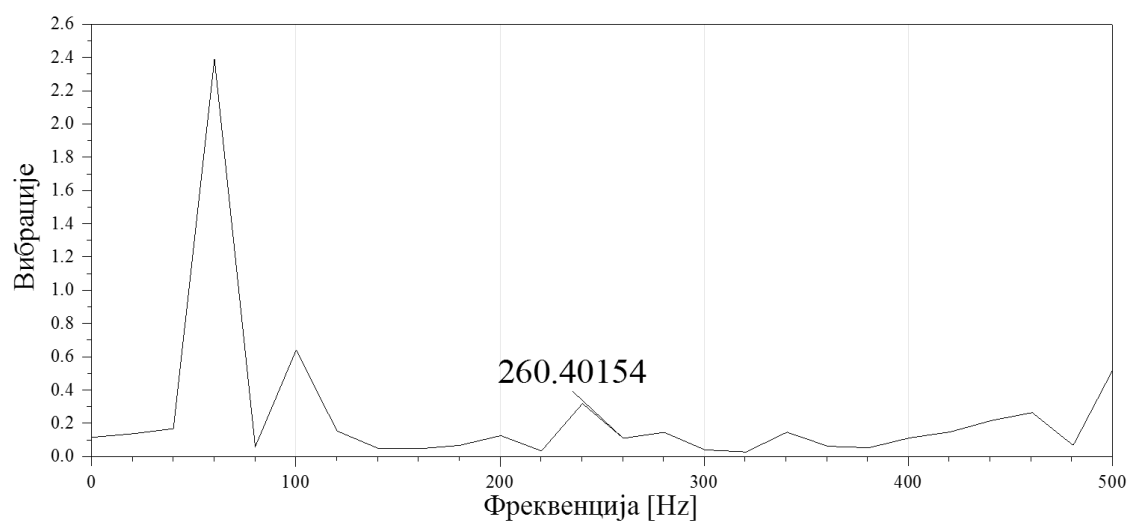
Дијаграм 5.15 Временски дијаграм за први сигнал – сегмент до 0.05 s



Дијаграм 5.16 FFT дијаграм за први сигнал

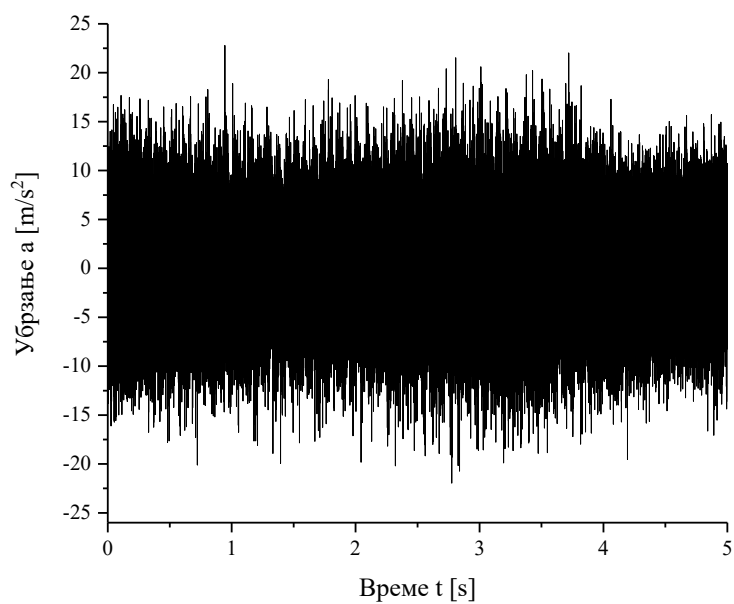


Дијаграм 5.17 FFT дијаграм за други сигнал

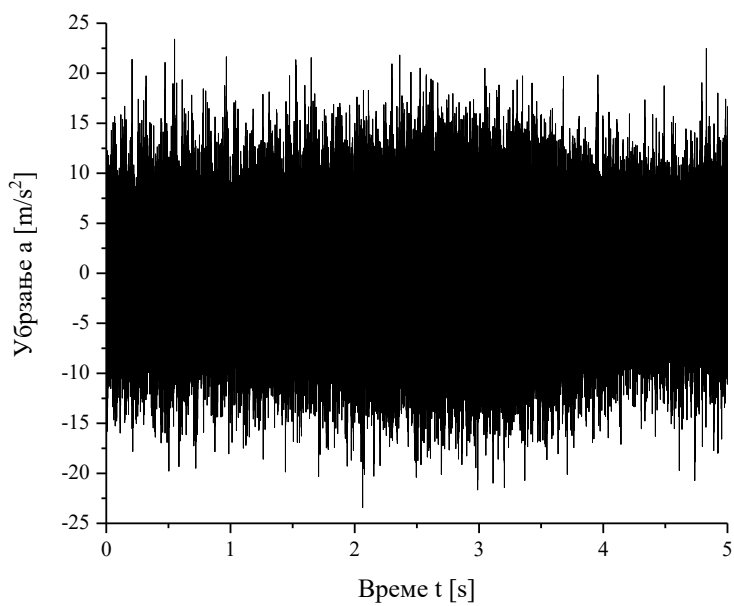


Дијаграм 5.18 FFT дијаграм са назначеном карактеристичном учестаношћу

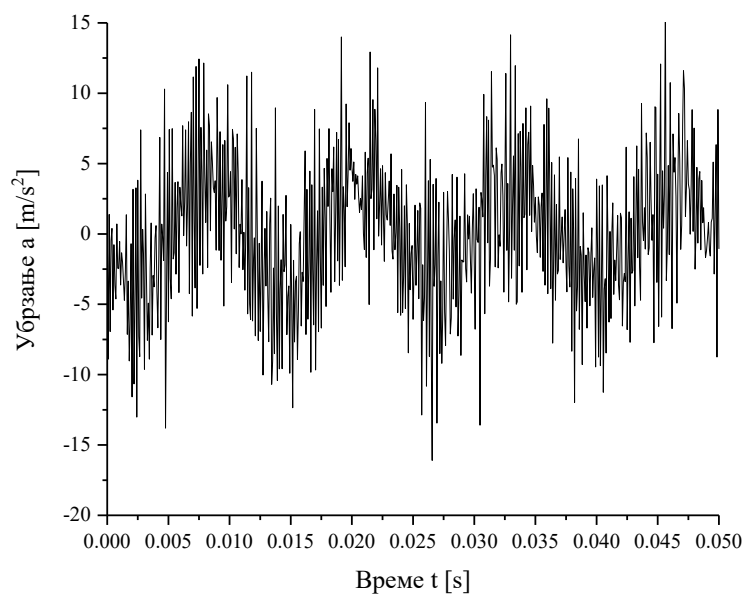
5.2.4 Резултати за учестаност од 80 Hz



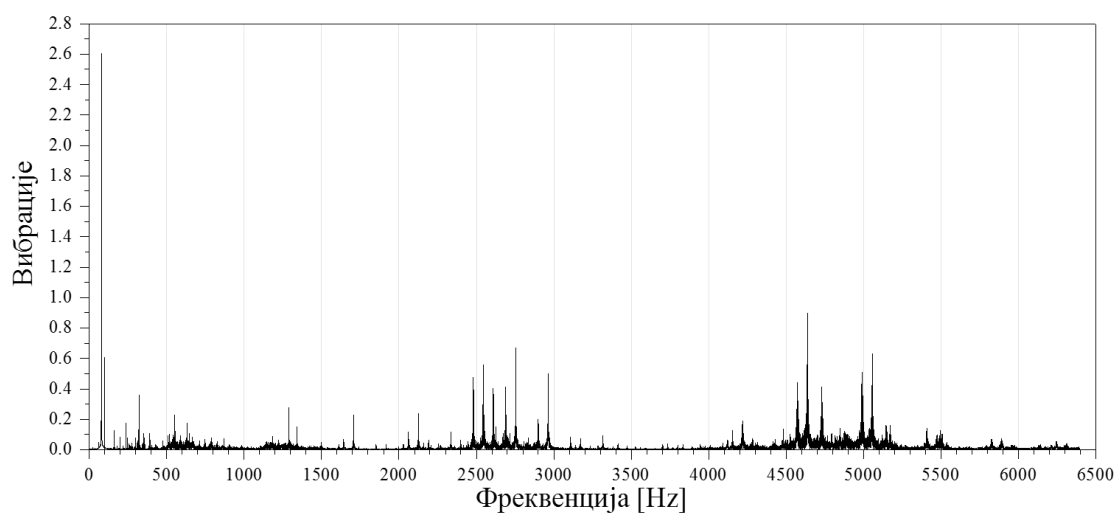
Дијаграм 5.19 Временски дијаграм за први сигнал



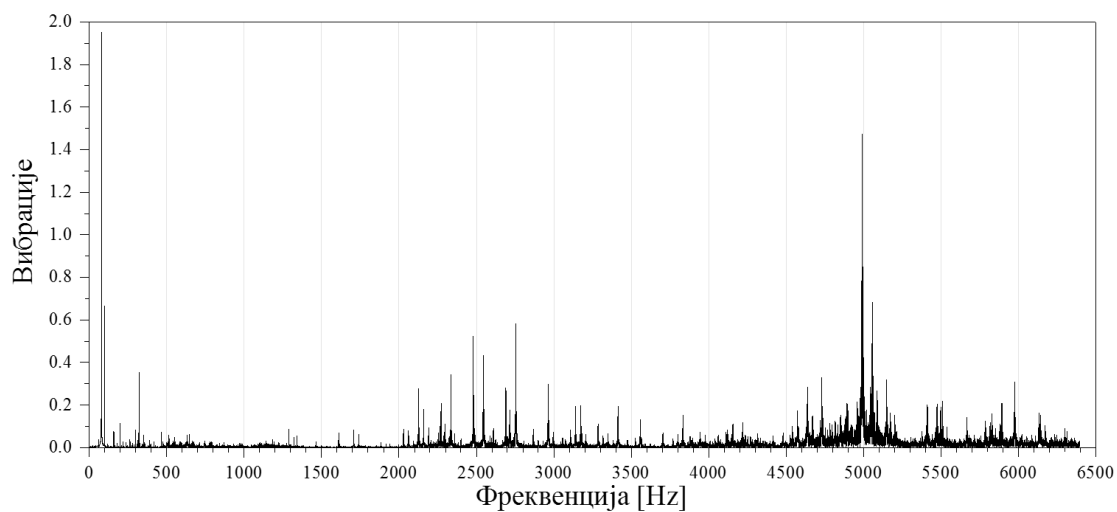
Дијаграм 5.20 Временски дијаграм за други сигнал



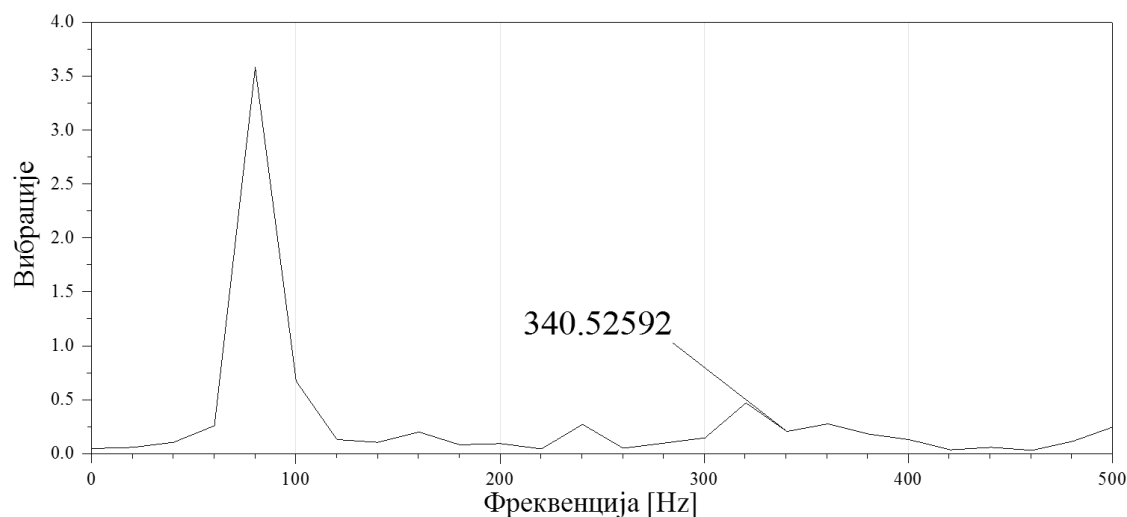
Дијаграм 5.21 Временски дијаграм за први сигнал – сегмент до 0.05 s



Дијаграм 5.22 FFT дијаграм за први сигнал



Дијаграм 5.23 FFT дијаграм за други сигнал



Дијаграм 5.24 FFT дијаграм са назначеном карактеристичном учестаношћу

5.2.5 Аналитичко одређивање карактеристичне учестаности

Лежај је испитиван при следећим учестаностима:

- 20 Hz,
- 40 Hz,
- 60 Hz и
- 80 Hz.

За лежај 6003 2ZR могу се наћи следећи подаци неопходни за рачунање карактеристичних учестаности:

- унутрашњи пречник: $D_u = 17 \text{ mm}$
- спољашњи пречник: $D_s = 35 \text{ mm}$
- пречник котрљајног елемента: $d = 4,762 \text{ mm}$
- број котрљајних елмената: $N = 10$
- угао дорира: $\theta = 45^\circ$

Користећи изразе 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 и 4.6 приступа се одређивању карактеристичних учестаности.

Средњи пречник се рачуна према обрасцу:

$$D \approx \frac{D_u + D_s}{2} = \frac{17 + 35}{2} = \underline{26 \text{ mm}}$$

Карактеристична учестаност кавеза:

$$3a \ 20 \text{ Hz: } f_k = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \theta \right) \cdot f = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{4,762}{26} \cos 45 \right) \cdot 20 = \frac{1}{2} \cdot 0,871 \cdot 20 = \underline{8,71 \text{ Hz}}$$

$$3a \ 40 \text{ Hz: } f_k = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \theta \right) \cdot f = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{4,762}{26} \cos 45 \right) \cdot 40 = \frac{1}{2} \cdot 0,871 \cdot 40 = \underline{17,42 \text{ Hz}}$$

$$3a \ 60 \text{ Hz: } f_k = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \theta \right) \cdot f = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{4,762}{26} \cos 45 \right) \cdot 60 = \frac{1}{2} \cdot 0,871 \cdot 60 = \underline{26,13 \text{ Hz}}$$

$$3a \ 80 \text{ Hz: } f_k = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \theta \right) \cdot f = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{4,762}{26} \cos 45 \right) \cdot 80 = \frac{1}{2} \cdot 0,871 \cdot 80 = \underline{34,84 \text{ Hz}}$$

Карактеристична учестаност унутрашње стазе котрљања:

$$3a \ 20 \text{ Hz: } f_{us} = \frac{N}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \theta \right) \cdot f = \frac{10}{2} \left(1 + \frac{4,762}{26} \cos 45 \right) \cdot 20 = 5 \cdot 1,129 \cdot 20 = \underline{112,9 \text{ Hz}}$$

$$3a \ 40 \text{ Hz: } f_{us} = \frac{N}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \theta \right) \cdot f = \frac{10}{2} \left(1 + \frac{4,762}{26} \cos 45 \right) \cdot 40 = 5 \cdot 1,129 \cdot 40 = \underline{225,8 \text{ Hz}}$$

$$3a \ 60 \text{ Hz: } f_{us} = \frac{N}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \theta \right) \cdot f = \frac{10}{2} \left(1 + \frac{4,762}{26} \cos 45 \right) \cdot 60 = 5 \cdot 1,129 \cdot 60 = \underline{338,7 \text{ Hz}}$$

$$3a \ 80 \text{ Hz: } f_{us} = \frac{N}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \theta \right) \cdot f = \frac{10}{2} \left(1 + \frac{4,762}{26} \cos 45 \right) \cdot 80 = 5 \cdot 1,129 \cdot 80 = \underline{451,6 \text{ Hz}}$$

Карактеристична учестаност спољашње стазе котрљања:

$$3a \ 20 \text{ Hz: } f_{ss} = \frac{N}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \theta \right) \cdot f = \frac{10}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos 45 \right) \cdot 45 = 5 \cdot 0,871 \cdot 20 = \underline{87,1 \text{ Hz}}$$

$$3a \ 40 \text{ Hz: } f_{ss} = \frac{N}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \theta \right) \cdot f = \frac{10}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos 45 \right) \cdot 45 = 5 \cdot 0,871 \cdot 40 = \underline{174,2 \text{ Hz}}$$

$$3a \ 60 \text{ Hz: } f_{ss} = \frac{N}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \theta \right) \cdot f = \frac{10}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos 45 \right) \cdot 45 = 5 \cdot 0,871 \cdot 60 = \underline{261,3 \text{ Hz}}$$

$$3a \ 80 \text{ Hz: } f_{ss} = \frac{N}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \theta \right) \cdot f = \frac{10}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos 45 \right) \cdot 45 = 5 \cdot 0,871 \cdot 80 = \underline{348,4 \text{ Hz}}$$

Карактеристична учестаност котрљајног елемента:

$$3a \ 20 \text{ Hz: } f_{ke} = \frac{d}{2D} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cos \theta \right)^2 \right] \cdot f = \frac{4,762}{2 \cdot 26} \left[1 - \left(\frac{4,762}{26} \cos 45 \right)^2 \right] \cdot 20$$

$$f_{ke} = 0,092 \cdot 0,9834 \cdot 20 = \underline{1,809 \text{ Hz}}$$

$$3a \ 40 \text{ Hz: } f_{ke} = \frac{d}{2D} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cos \theta \right)^2 \right] \cdot f = \frac{4,762}{2 \cdot 26} \left[1 - \left(\frac{4,762}{26} \cos 45 \right)^2 \right] \cdot 20$$

$$f_{ke} = 0,092 \cdot 0,9834 \cdot 40 = \underline{3,619 \text{ Hz}}$$

$$\begin{aligned} 3a \ 60 \text{ Hz: } f_{ke} &= \frac{d}{2D} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cos \theta \right)^2 \right] \cdot f = \frac{4,762}{2 \cdot 26} \left[1 - \left(\frac{4,762}{26} \cos 45 \right)^2 \right] \cdot 20 \\ f_{ke} &= 0,092 \cdot 0,9834 \cdot 60 = \underline{5,428 \text{ Hz}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 3a \ 80 \text{ Hz: } f_{ke} &= \frac{d}{2D} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cos \theta \right)^2 \right] \cdot f = \frac{4,762}{2 \cdot 26} \left[1 - \left(\frac{4,762}{26} \cos 45 \right)^2 \right] \cdot 20 \\ f_{ke} &= 0,092 \cdot 0,9834 \cdot 80 = \underline{7,238 \text{ Hz}} \end{aligned}$$

6. ЗАКЉУЧАК

Лежаји су машински елементи чија се основна функција састоји у обезбеђивању услова за релативно кретање обртних делова и за преношење оптерећења између њих.

Помоћу метода вибродијагностике могуће је открити механичке промене које се догађају при раду техничких система, отклонити њихове узроке и спречити отказе техничких система.

Вибродијагностика као рутинска метода превентивног одржавања техничких система знатно смањује трошкове одржавања, повећава сигурност, поузданост и животни век техничког система.

Са мерних места лежајева снимамо фреквентни спектар вибрације и временски запис при раду. Анализом и вредновањем тих снимака одређујемо стање лежајева и механичка оштећења истог, ако их има. Идентификацију неисправности машина одређујемо на основу доминантних фреквенција на фреквентним снимцима и на основу неједнакости на временским записима.

Познато је да свака неисправност изазива вибрације на одређеној фреквенцији. Амплитуда, која припада датој фреквенцији, је сразмерна мери неисправности. Према томе, снимањем амплитудо-фреквентних карактеристика вибрација можемо одредити: врсту (на основу фреквенције вибрација), меру неисправности (на основу припадајуће амплитуде).

Фреквентна анализа је ефикасно средство при дијагностици стања техничких система. На снимљеном фреквентном спектру вибрација за ротирајућу машину уочавају се на појединим фреквенцијама појачане вибрације (пикови) и анализом тих пикова и њиховим поређењем са фреквенцијом ротирајућих делова машине може се доћи до стања машине односно постројења.

Било која карактеристична амплитуда и учестаност не може се променити без разлога. Свака промена указује на промену динамичког понашања техничког система. Било каква промена указује на промену стања техничког система.

У раду је урађен и експеримент који је извођен за 4 различите вредности учестаности фреквентног регулатора. Два давача вибрација су била постављена и то у радијалним мерним правцима (вертикалном и хоризонталном). Мерење за сваку учестаност фреквентног регулатора је трајало 5 секунди, а учестаности за које је вршено мерење су следеће: 20, 40, 60 и 80 Hz.

На дијаграмима приказаним у оквиру резултата експеримента уочавају се пикови који одступају од остатка спектра снимљеног сигнала и пикови се могу јавити као последица: сопствених фреквенци пробног стола, дебаланса, ротирајућих делова, несаосности, недовољног причвршћења за постоље или лошег и оштећеног лежаја.

7. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Тодоровић П., Мачужић И., Јеремић Б.: Техничка дијагностика, Машински факултет Крагујевац, 2009.
- [2] Николић В.: Машински елементи, Машински факултет Крагујевац, 2004.
- [3] Митровић С.: Трибомеханички системи, материјал са предавања, Факултет инжењерских наука Крагујевац, 2015.
- [4] Коковић В. Дијагностика и одржавање котрљајних лежајева, Факултет инжењерских наука Крагујевац, 2014.
- [5] SKF: Bearing damage and failure analysis, 2014.
- [6] Голубовић В.: Бука и вибрације, Машински факултет Бања Лука, 2010.
- [7] Шиниковић Г.: Детекција лежаја у ултразвучном домену, докторска дисертација, Машински факултет Београд, 2012.
- [8] Tautas B.Vytautas Ž., Kestutis Ž., Zigmantas P., Mažeika P.: Condition monitoring of roller bearings using different diagnostic methods, Kaunas University of Technology Lithuania
- [9] SKF: Vibration Monitoring: Envelope Signal Processing, 2014.
- [10] SKF: Early warning fault detection in rolling element bearings using SKF microlog enveloping, 2011.
- [11] SKF: A guide to the interpretation of vibration frequency and time spectrums, 2011.
- [12] Tandon N., Choudhury A.: A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings, Tribology International, Volume 32, Issue 8, Pages 469-480, August 1999.
- [13] Јеремић Б., Тодоровић П.: Комплексна дијагностика ротора, Машински факултет Крагујевац, 2007.
- [14] Грујић И.: Обрада сигнала притиска и вибрација мотора СУС, семинарски рад, Факултет инжењерских наука Крагујевац, 2017.
- [15] SKF: <http://www.skf.com/sg/products/bearings-units-housings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/index.html?designation=6003-2Z>
Пристапљено: 27.08.2017.