

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Индустијски инжењеринг

Предмет: Инжењеринг безбедности и управљања ризиком

Број индекса: 399 / 2014

Петар М. Пејатовић

**Техничка дијагностика и њена примена за
идентификацију опасности и штетности на
радном месту**

мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. **Др Иван Мачужић - ментор**
2. _____
3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да

- проучи одговарајућу литературу везану за техничку дијагностику у индустрији
- на основу прикупљених и систематизованих података из препоручене и друге литературе ове области прикаже и методолошки изложи најзначајније методе техничке дијагностике
- укаже на могуће елиминисање потенцијалних опасности коришћењем ових метода

Препоручена литература:

- 1) Јеремић Б., Тодоровић П., Мачужић И., Коковић В. *Техничка дијагностика*, Машински факултет Крагујевац, Србија 2006..
- 2) Томовић Д., Мачужић И. *Приручник за полагање стручног испита о практичној оспособљености лица за обављање послова безбедности и здравља на раду и послова прегледа и испитивања опреме за рад и испитивања услова радне средине*, Машински факултет у Крагујевцу у сарадњи са „TDF PREVING“ из Крагујевца, Крагујевац , Србија 2006.
- 3) Јеремић Б., Мачужић И., Тодоровић П., *Стратегија одржавања техничких система и квалитет радног места и радне околине*, Фестивал квалитета, Крагујевац, Србија 2007

Крагујевац, Новембар, 2016.

ментор:

Др Иван Мачужић, доцент

Резиме

Генерално посматрано, техничка дијагностика представља грану машинства која се бави препознавањем техничког стања система. У техничком смислу, овај термин се користи за идентификацију насталог или потенцијалног проблема применом адекватних метода. Данас постоји велики број развијених метода техничке дијагностике од којих се највише примењује метода инфрацрвене термографије за испитивање стања система. У овом раду је извршен опис појединих метода, а највећа пажња је посвећена управо инфрацрвеној термографији и методама визуелног испитивања. У раду су такође описане и методе праћења стања техничког система. Поред тога, дати су примери како инфрацрвена термографија и остале методе активно учествују у откривању опасности и штетности на радном месту.

Кључне речи: техничка дијагностика, термографија, сигнал

Abstract

Generally speaking, technical diagnostics is a branch of mechanical engineering that deals with the identification of the technical condition of the system. In technical terms, this term is used to identify the resulting or potential problems by using appropriate methods. Today there are a number of developed methods for technical diagnostics of which is mostly applied method of infrared thermography for examining the state of the system. In this paper, the description of the individual methods is given, and the greatest attention was paid to the methods of infrared thermography and method of visual tests inspection. The paper also describes the methods of monitoring the state of the technical system. In addition, there is word about few examples of how infrared thermography and other methods actively participate in the detection of dangers and hazards in the workplace.

Key words: technical diagnostics, thermography, signal

Садржај:

1. Увод	4
2. Техничка дијагностика	5
2.1 Технички систем	10
2.2 Системски приступ техничкој дијагностици.....	12
3. Концепти, методе и технике техничке дијагностике	15
3.1. Анализа начина и ефекта отказа - FMEA Анализа	15
3.2 Анализа стабла отказа - FTA Анализа	16
3.3 Мониторинг стања конструкције - Structural Health Monitoring	16
3.4 Оцена без разарања	17
4. Праћење стања техничких система и појам сигнала	18
4.1. Генерално о концепту	18
4.2 Процедуре пројектовања МСК система	19
4.3 Сигнал и анализа сигнала	21
4.3.1 Фреквентна анализа сигнала	22
4.3.2 Процес прикупљања сигнала	25
5. Основне методе техничке дијагностике	28
5.1 Принципи и карактеристике метода оцене без разарања	29
5.2 Испитивање течним пенетрантима	31
5.3 Испитивање магнетним честицама	32
5.4 Испитивање вртложним струјама.....	33
5.5 Инфрацрвена термографија	35
5.5.1 Приступи у инфрацрвеној термографији	35
5.5.2 Методе побуде у активној термографији	37
5.5.3 Активне термографске технике.....	39
5.5.4 Инфрацрвено зрачење	41
5.5.5 Бесконтактне методе и инструменти који се користе.....	43
5.6 Системи за визуелни преглед стања унутрашњих и скривених површина	46
5.6.1 Крути бороскопи.....	47

5.6.2 Фиберскопи.....	48
5.6.3 Видеоскопи	50
5.7 Ултравучно испитивање	52
5.7.1 Опрема за ултразвучно испитивање	54
5.8 Вибрације.....	58
5.8.1 Мерење вибрација и инструментација	62
6.Опасности и штетности на радном месту	69
6.1 Примена инфрацрвене термографије у циљу идентификације опасности и штетности на радном месту.....	70
6.1.1 Опасности и штетности везане за електричне компоненте	71
6.1.2 Штетност од микроклиматских услова.....	74
6.2. Примена метода без разарања у циљу идентификације и опасности на радном месту	76
7. Закључак	79

1. Увод

У данашње време не постоји производна делатност која за остваривање производних задатака не користи техничку дијагностику. Због веома широке примене, техничка дијагностика је од изузетног значаја при улагању напора да се опасности на радном месту сведу на минимум, а такође и да се по сваку цену избегне ризик. Под ризиком се подразумевају сви штетни утицаји на безбедност и здравље људи [1].

Основни задатак техничке дијагностике представља праћење и утврђивање стања машине у процесу њеног рада. Праћење стања је неопходно како би се на време утврдило постојање одређених аномалија у раду машине, а и како би се на време избегла појава отказа.

Осим што има велики утицај на животни век машина, техничка дијагностика такође може да помогне у очувању здравља радника проналажењем узрока настајања многих болести пре него што се она развија у озбиљније стање које може имати фаталне последице по човека. Правовременим испитивањем могуће је одржати радно место безбедним и здравим и зато се данас све више инсистира на повећању безбедности у оквиру радног места.

У овом раду ће бити представљене основне карактеристике техничке дијагностике и биће дат преглед њених основних метода, које се користе у циљу идентификације опасности и штетности. Правовременим откривањем ових опасности и штетности, могуће је деловати адекватним методама за спречавање њених даљих ширења.

У другом и трећем поглављу ће бити дата опширан одговор на то шта је техничка дијагностика и чиме се све карактерише и биће представљене њене главне технике и концепти на којима се заснива.

У четвртом поглављу ће бити речи о физичкој варијабли која се испитује техничком дијагностиком, односно сигналу. Дат је опис и фреквентне анализе сигнала која има велику корист код испитивања вибрацијама.

У петом поглављу су наведене главне методе испитивања без разарања међу којима су најраспрострањеније инфрацрвена термографија, вибродијагностика и метода визуелног прегледа.

У шестом поглављу је дат преглед могућих опасности и штетности које се могу појавити на радном месту, а такође је и дат пример како инфрацрвена термографија може да помогне у идентификацији ових проблема и спречавању даљег ширења

2. Техничка дијагностика

Техничка дијагностика, као саставни део процеса одржавања према стању, треба да утврди техничко стање саставног дела система са одређеном тачношћу у одређеном тренутку времена. То је, заправо, наука која се бави препознавањем техничког стања система[1]. Примери техничких система, који се испитују техничкој дијагностиком су представљени на слици 1. Реч “дијагностика” је првенствено настала у медицинском пољу и користила се да би се идентификовала природа здравственог проблема и касније класификовала уз помоћ прегледа и евалуације тог истог проблема. У техничком смислу, дијагностика се користи како би се идентификовао потенцијални проблем или већ настали проблем како би се касније применом адекватних метода тај проблем отклонио.



Слика 1. Објекти техничких система

Термин “дијагностички критеријум” означава комбинацију знакова, симптома и резултата тестова који се користе како би се установио проблем. Дијагноза представља резултат дијагностичког процеса, а техничка дијагностика представља процес испитивања и праћења симптома и синдрома како би се утврдила природа грешке или отказа посматраног техничког објекта. Термини “симптом” и “синдром” се дефинишу на следећи начин:

- Симптом је перцепција, створена помоћу људског опажања и мерења, која може да укаже на присуство абнормалног стања са одређеном вероватноћом.
- Синдром је група симптома која колективно указује или карактерише абнормално стање техничког система.

Симптом или скуп симптома могу да проузрокују отказ [1]. Термини “грешка” и “отказ” се дефинишу на следећи начин:

- Грешка (оштећење): Стање предмета које се јавља када једна или више његових компоненти или склопова показују абнормално понашање, односно одступање од жељеног понашања.
- Отказ: Престанак способности предмета да обавља своју жељену функцију, односно своју функцију рада. Отказ представља догађај, а разликује се од грешке пошто грешка карактерише стање које се јавља. Начин отказа представља феномен којим се посматра ефекат отказа. Након отказа, системско испитивање предмета у циљу идентификовања начина отказа и одређивања механизма отказа, као и одређивање основног узрока отказа, назива се анализа корена узрока.

Идентификација грешке и отказа представља веома важан задатак техничке дијагностике. Ово се може илустровати примерима карактеристика отказа, који су дефинисани међународним стандардима из различитих области технологије и других индустријских грана. Врсте отказа, које се могу открити путем техничке дијагностике, могу бити [2]:

- престанак способности структуре да обавља своју функцију рада када је једна или више компоненти структуре у неисправном стању (ISO 16587);
- губитак способности делова структуре да обављају одређену функцију (ISO 15686);
- преурањени застој или отказ функције компоненте или читавог мотора (ISO 2710);
- изненадни или неочекиван застој компоненте или опреме и спречавање у обављању своје функције (ISO 3977);
- стварно стање предмета који не обавља своју одређену функцију под одређеним условима (ISO 8927);
- појава пуцања, цурења или губитка притиска (ISO 7509);
- губитак структурног интегритета и/или цурење течности кроз валл компоненте или система (ISO 14692);
- појава која узрокује губитак или смањење номиналног сервисирања (ISO 11994);
- недовољна носивост или неадекватно сервисирање структуре или структурног елемента (ISO 2394); и
- стање система које доводи до неиспуњења или смањења перформанси као резултат неисправности хардвера или софтвера (ISO 17287).

Ови примери из различитих технолошких области и индустријских сектора показују да различите грешке и откази веома штетно утичу на стање техничких предмета. Идентификација оштећења техничког дијагностиком мора узети у обзир четири основна аспекта:

- постојање оштећења,
- место оштећења,
- тип оштећења и
- озбиљност оштећења.

Вероватноћа да ће технички предмет да обавља своју функцију рада без отказа за одређени временски период (животни век), када се користи под одређеним условима, назива се поузданост. Ризик представља комбинацију вероватноће доласка одређене појаве и њених последица. Термин "ризик" обично се користи само када постоји бар најмања могућност за настајање негативних последица. Безбедност представља слободу од неприхватљивог ризика.

Приликом избора и примене одређене методе техничке дијагностике, особине предмета који се разматра, његова дужинска скала и временска скала повезани са појавом и развојем оштећења морају се узети у обзир. Дужинска скала техничких предмета, у зависности од примене техничке дијагностике, може да варира у распону од више од десет димензија, као што је то приказано на слици 2. Очигледно је да техничка дијагностика, која се конвенционално примењује у макро технологији, данас такође има и велику примену у микро технологији и нано технологији. Сходно томе, поузданост разматрања мора да се прошири на микро-нано поузданост. Што се тиче временске скале од настанка грешке и отказа у техничким предметима, следећи аспекти су од општег значаја:

- време које означава период развоја грешке, које указује на промену у озбиљности отказа током времена;
- време трајања отказа, које може бити веома кратко (крти лом) или се може продужити током временског периода (време утовара које траје док не дође до замора). Катастрофални отказ је изненадан, неочекиван отказ предмета који доводи до знатних оштећења у предмету и/или повезаним компонентама; и
- време до појаве отказа, које представља укупно време трајања рада предмета од тренутка када се први пут пусти у рад па све до појаве отказа, тј. представља време за које је одређени предмет обављао своју функцију рада до појаве отказа. Овај временски период такође рачуна и време које протекне од поправке па до следећег отказа.

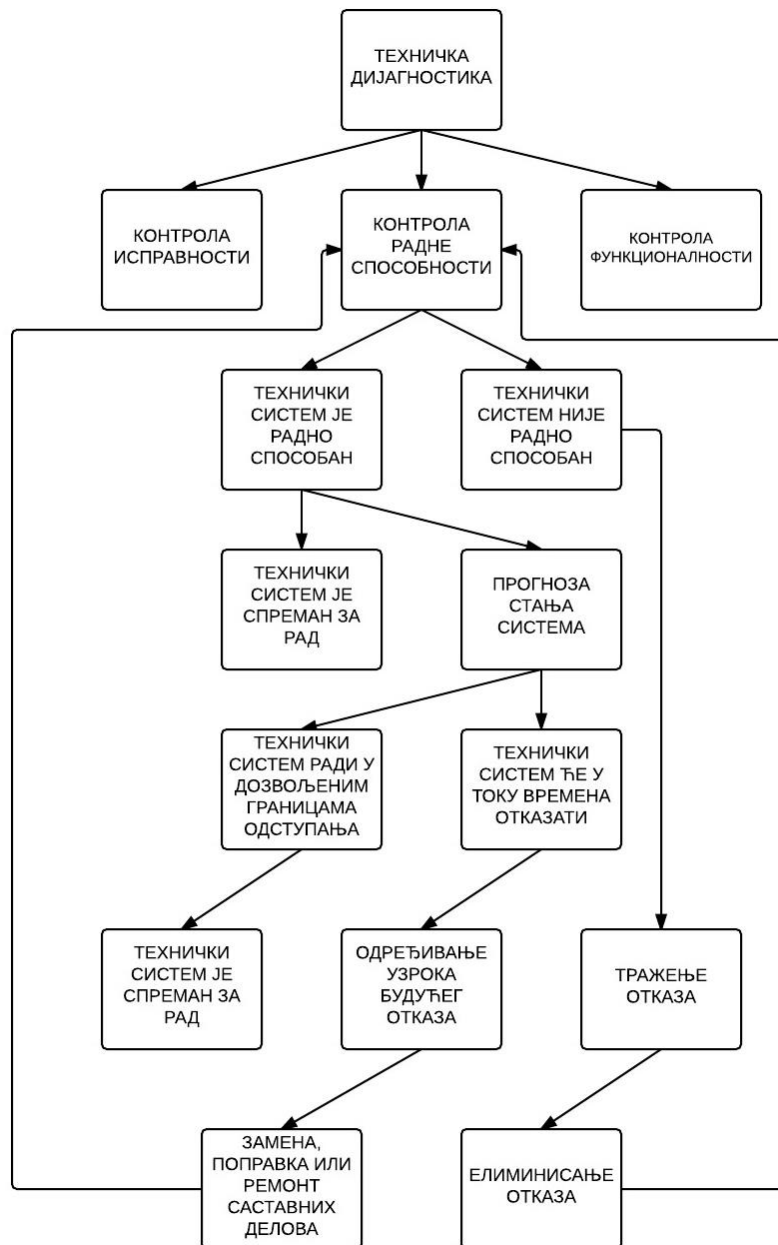


Слика 2. Дужинска скала објеката техничке дијагностике

Техничком дијагностиком је могуће извршити:

- контролу исправности,
- контролу радне способности,
- контролу функционалности и
- истраживање отказа (анализа места, облика и узрока).

На слици 3 је дат шематски приказ процеса техничке дијагностике.



Слика 3. Дијагностика техничког стања система

Процес откривања и прикупљања информација и података који указују на стање предмета се зове праћење стања. Примена праћења стања техничких објеката и система омогућава предузимање активности како би се избегла појава евентуалног отказа пре него што се отказ догоди. Процес праћења стања се састоји из следећих главних фаза:

- детекција проблема, односно детекција сваког одступања од нормалних радних услова;
- дијагноза отказа и његових узрока;
- прогноза развоја будућег отказа; и
- препорука активности које ће се спроводити.

Одржавање представља комбинацију свих техничких и административних активности намењених да одрже предмет у стању (или да га поврате у то стање) у којем може да обавља своју одређену функцију рада.

- проактивно одржавање наглашава предвиђање отказа и предузимање мера на основу стања опреме како би се спречио потенцијални отказ.
- превентивно одржавање се врши у складу са фиксним распоредом или у складу са прописаним критеријумима који детектују и спречавају нарушавање функционалне структуре система или компоненте у циљу одржавања и продужавања радног века.
- корективно одржавање се врши након што до отказа дође, а циљ је да се предмет врати у стање рада како би могло да обавља жељену функцију.



Слика 4. Врсте одржавања

Превентивно одржавање, према дефиницији, представља планиран скуп активности, које се спроводе с циљем спречавања појаве оштећења и стања отказа машине или неке њене компоненте. Главни циљ овог вида одржавања представља очување и унапређење стања опреме. Неки основне методе превентивног одржавања представљају: промена уља, подмазивање, промена филтера и стезање каишева. Углавном, ту спадају све

методе, које за циљ имају повећање животног века опреме и повећање њене ефикасности. Предности превентивног одржавања: повећање животног века опреме, смањење броја отказа и оштећења(дефеката), смањење времена застоја и смањење трошкова замене.

Проактивно одржавање, према дефиницији, представља скуп техника које се користе како би се описало стање опреме с циљем предвиђања када би требало предузети неопходне мере одржавања. Главни циљ овог вида одржавања представља смањење ометања нормалног рада система, док у исто време омогућава спровођење свих активности унапред планираних поправки. Неке основне методе предиктивног одржавања представљају: анализа вибрација, инфрацрвена термографија, анализа уља и визуелна инспекција. Предности предиктивног одржавања: повећање оперативног радног века машине, смањење времена застоја, омогућавање планираног застоја и смањење залиха резервних делова.

Корективно одржавање, према дефиницији, представља спровођење активност поправки с циљем постављања машине у стање рада, односно враћање у првобитно стање. Код овог вида одржавања, трошкови одржавања машине су занемариви или уопште не постоје.

2.1 Технички систем

Понашање техничких система које се односи на његову употребу и успешност представља његову особину или перформансу. У нискоградњи, перформанса представља могућност објекта (нпр. зграде у целини) да подржи или да се одупре оптерећењу. У машинству, перформанса представља радну способност машине, која се дефинише са једном или више карактеристика попут снаге, брзине, протока или ефикасности. Грешке и откази су честе појаве. Радни параметри и утицајни фактори животне средине на технички предмет проистичу из његових функционалних задатака, а одређује их њихова структура и дизајн. Материјали техничког предмета подлежу механичким и термичким радним притисцима, који се обично зову оптерећења, што значи да било какав физички процес може да делује на компоненте. Пример представљају механички притисак, напон или температура. Материјали су, такође, у контакту и са другим чврстим, гасним, течним и другим биолошким агрегатним стањима и увек су у интеракцији са својим окружењем. Сваки од ових утицаја може, у великој мери, да утиче на интегритет материјала. Корисна својства материјала, која су садржана у техничким системима, су углавном одзив на надржај у условима примене. Надражај оптерећења и стање животне средине морају бити у потпуности наведени како би се развио изводљив одговор и добиле поуздане карактеристике и подаци.

Општи термин "систем" се користи у разним областима технологије и индустрије, али обично има разне дефиниције у зависности од области примене. Према међународним стандардима, систем се може дефинисати као [3]:

- Скуп реалних елемената организованих са одређеном сврхом. Систем се карактерише његовом структуром и понашањем (ISO 15704).
- Скуп међусобно повезаних елемената груписаних у целину у циљу обављања одређене функције (ISO 7967).

- Скуп компоненти које обављају одређену функцију повезаних сензорима, актуаторима и међусобним везама (ISO 9141).
- Саставни део нуклеарне електране, који се састоји од електричних, електронских и механичких компоненти којим може да се управља као засебним ентитетом како би се обавила одређена функција процеса (ISO 6527).
- Распоред међусобно повезаних компоненти, које преносе и контролишу енергију флуида за пренос снаге (ISO 4413).
- Делови инсталације који, заједно са пумпом, одређују функционалне перформансе инсталације (ISO 17769).
- Склоп међусобно зависних елемената, који је конструисан како би остварио одређени циљ обављајући одређене функције (ISO 16901).
- Група међусобно повезаних објеката у сталној интеракцији, која се процењује на потенцијални ризик (ISO 13824).

Овај скуп дефиниција показује да се различите формулације речи "систем" користе како би се дефинисао скуп разних индустријских система у разним инжењерским областима. Тако, општа теорија система мора да се посматра као основа за методологију техничке дијагностике, која се може применити у објектима, системима и компонентама у свим областима технологије и индустрије. Међународно прихваћена општа дефиниција техничког система се дефинише као скуп међусобно повезаних елемената који имају заједничку структуру и функцију.

Технички систем се карактерише:

- E - сетом елемената (компоненти) a_i ; $E = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$
- O - релевантним особинама елемената; $O = \{O(a_i)\}, i = 1 \dots n$
- R - релацијама (интеракцијом) између елемената; $R = \{R_{(a_i \leftrightarrow a_j)}\}, i, j = 1 \dots n, j \neq i$

Општа структура система се представља скупом $S_0 = \{E, O, R\}$. Уколико се структура система мења у току времена t , нпр. због штетних промена особина елемената (O) или релација (R) због радног оптерећења L (нпр. температуре или снаге), структура система постаје зависна од оптерећења и времена и дата је скупом:

$$S(t, L) = \{E, O(t, L), R(t, L)\} \quad (2.1)$$

Везе између структуре и њене околине се класификују као:

- Улази (Y): оперативни улази, радна оптерећења, помоћни улази, поремећаји
- Излази (I): функционални излази, губици, бука

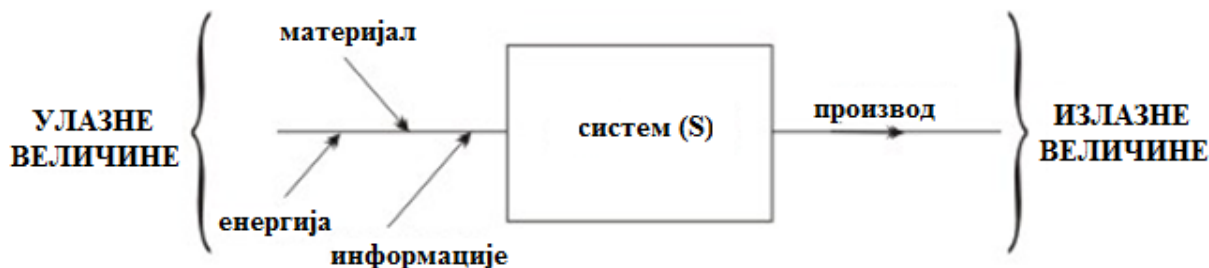
Улаз је нешто што се ставља у систем или нешто што се троши у његовом раду како би се постигао одређени излаз, односно резултат. Излази су информације које производи систем или процес из посебног улаза. У контексту теорије система, улази су оно што се ставља у систем, а излази представљају резултате добијене након завршетка читавог процеса или само малог дела процеса. Пошто излази могу да буду и резултат индивидуалних делова већих процеса, излази једног дела процеса могу уједно да буду и

улази за други део процеса. Сви улази и излази се могу категоризовати да припадају кибернетичким категоријама енергије, материја и информација.

Основне функције техничких система су:

- подршка радних оптерећења и
- пренос или трансформација оперативних улаза у функционалне излазе.

Функција система је одређена његовом структуром. Подршка радним оптерећења захтева постојање одговарајућих особина (O) код релевантних елемената система. Пренос или трансформација оперативног улаза у функционални излаз (T) захтева постојање одговарајућих веза (релација, R) између релевантних елемената система како би се омогућило обављање одређене функције. Основни шематски приказ техничког система је дат на слици 5.



Слика 5. Шематски приказ техничког система

Два општа стања техничког система у неком временском интервалу могу бити [4]:

- у раду, приказано помоћу израза:

$$I = \varphi(U, S, t) \quad (2.2)$$

- у отказу, приказано помоћу израза:

$$I^* = \varphi^*(U^*, S^*, t) \quad (2.3)$$

где је t време.

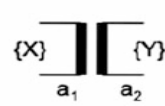
Стање у раду означава да није дошло до одступања унутрашњих величина система, односно улазних величина, од дозвољене границе и да је излаз функционалан и да се може мерити. Стање у отказу означава да је до промена унутрашњих величина дошло, што аутоматски доводи и до промене излазних величина које више не могу да се контролишу па долази до великих одступања и самим тим до доспевања система у ово стање рада.

2.2 Системски приступ техничкој дијагностици

Примена концепта система за карактеризацију техничких предмета је приказана на слици за најједноставнији случај два техничка система који раде заједно, односно пара зупчаника који карактеришу механички систем и трансформатора, који карактерише електрични систем. Физичке величине које су присутне у процесу обављања функције

циља техничког система могу послужити као карактеристични (дијагностички) параметри за праћење стања техничког система[4].

Функција оба система, који су илустровани на слици 6, је да пренесе оперативне улазе снагу и обртни момент механичког система, односно напон и струју код електричног система, у функционални излаз за предвиђене техничке сврхе. У оба система, енергија улаза се расипа због трења и ефекта вртложних струја, а однос између корисног излаза и улаза представља ефикасност конверзије енергије.

System characteristics	Mechanical 2-body system: gear pair	Electrical 2-body system: transformer
System pictogram		
Structure A Elements	a ₁ driving wheel a ₂ driven wheel	a ₁ primary coil a ₂ secondary coil
P Properties P(a ₁), P(a ₂)	gear type (e. g. spur, helical, hypoid) pitch diameters, modules, etc	coil type (e. g. single, bifilar) number of turns, etc.
R Relations R(a ₁ / a ₂)	Hertzian tribo-contact mechanics traction, friction, pitting, etc.	inductive coupling eddy current effects, etc.
Function X Inputs	input speed n _x input torque τ _x	input voltage u _x input current i _x
Y Outputs	output speed n _y output torque τ _y	output voltage u _y output current i _y
T Transfer function	T: (n _x , τ _x) → (n _y , τ _y)	T: (u _x , i _x) → (u _y , i _y)

Слика 6. Примена концепта система за карактеризацију техничких предмета

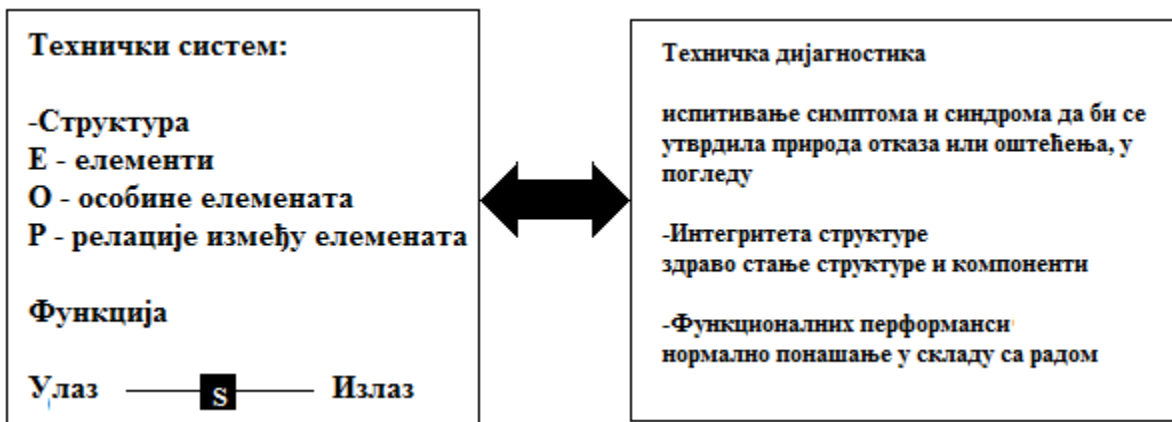
Што се тиче структуре система, основна разлика између електричних и механичких система се огледа у томе што:

У електричном систему, функција система се остварује кроз микроскопске електронске процесе, али (макроскопска) структура система остаје константна током времена. Уколико је овај услов испуњен, функција преноса (T) се може разрадити математички. За праћење стања ових система, контрола функционалних релација између улаза и излаза може бити сасвим довољна.

У механичком систему, међутим, структура система може да се мења током времена због међуповршинског трења између зупчаника. Триболошки процеси могу изазвати хабање пара зупчаника и ове унутрашње структурне промене могу довести до мерљивих спољашњих вибрација и хабања. Ово ремети функцију преноса (T). Због тога, улази (U) и излази (I) система, као и структура система (S) и његове промене морају да буду константно праћене.

Концепт система подразумева да ће се у оквиру техничке дијагностике објеката, система и компоненти спровести приступи оцене интегритета конструкција (енг. *Structural Integrity Assessment* - *SIA*) и оцене функционалних перформанси (енг. *Functional*

Performance Assessment - FPA). Ово је шематски приказано на слици 7 кроз дијаграм користећи симболе апстрактног система.



Слика 7. Системски приступ у примени техничке дијагностике

Као што је приказано на слици 8, технички систем, окарактерисан својом структуром и функцијом, може имати оштећења, као што је то пример пукотина у критичним компонентама. Повезани симптоми оштећења могу да се испитају анализом вибрација (мерење магнитуде/фреквенције, помераја, брзине и убрзања стационарних и покретних делова машине). Дијагноза се може поставити и након анализе корена узрока и обраде података. Уколико се узроци оштећења или отказа могу повезати са карактеристикама система, онда се могу применити поступци оцене интегритета структуре и оцене функционалних перформанси.



Слика 8. Примена системског размишљања у техничкој дијагностици машине

3. Концепти, методе и технике техничке дијагностике

Основне методе техничке дијагностике су мониторинг стања конструкција - МСК (енг. *Structural Health Monitoring* - *МСК*) и оцена без разарања у комбинацији са индуктивним и дедуктивним концептима. Индуктивни концептуални приступ (концепт логичког закључивања) се састоји од претпоставке да је одређени део система у стању отказа и онда се приступа анализи како ће се то одразити на рад система. Индуктивни приступ се започиње претпоставком који је главни узрок отказа и затим се анализира резултујући ефекат. Основни индуктивни метод представља Анализа Начина (Облика) и Ефеката Отказа (енг. *Fault Mode and Effects Analysis* - *FMEA*). Дедуктивни концептуални приступ (аналитичан концепт) претпоставља да је систем доспео у стање отказа на одређени начин и затим се приступа покушају да се пронађе које одступање од нормалног понашања система или подсистема (компоненте) је довело до отказа. Основни дедуктивни метод представља Анализа Стабла Отказа (енг. *Fault Tree Analysis* - *FTA*).

3.1. Анализа начина и ефекта отказа - FMEA Анализа

FMEA је структурирана процедура која се врши како би се утврдиле функције опреме и функционални откази, тако што се сваки облик отказа оцењује у оквиру узрока отказа и ефекта отказа на целокупни систем. Облици отказа представљају све грешке или оштећења у процесу, дизајну или предмету и могу бити потенцијални и стварни. Ова техника се може применити на нов систем заснован на анализама или на постојећи систем заснован на историјским подацима. FMEA метода помаже да се идентификују потенцијални облици отказа на основу претходног искуства са сличним производима и процесима.

FMEA може да идентификује, са одређеном тачношћу, оне компоненте у отказу које имају "некритичан" ефекат, али је број могућих отказа компоненти који се може посматрати ограничен. Циљеви анализе су да се идентификују појединачни облици отказа и да се одреди број ових облика. FMEA табела за компоненте система садржи следеће информације:

- ознаку компоненте,
- вероватноћу за појаву отказа,
- облике отказа компоненте,
- проценат укупног броја отказа за сваки облик,
- ефекат на целокупни систем, класификован према разним категоријама, где су две најједноставније категорије - критична и некритична.

Анализа ефеката односи се на проучавање последица тих отказа.

3.2 Анализа стабла отказа - FTA Анализа

FTA има за циљ да моделира и анализира процесе отказа. Као дедуктивни приступ, FTA започиње са нежељеним догађајем, као што је отказ мотора, и затим се одређује његов отказ користећи систематски повратни процес. ФТ је конструисан као логичка илустрација догађаја и њихових веза које су неопходне и довољне да резултирају у нежељеном догађају.

FTA се у основи састоји из логичких дијаграма који приказују стање система и конструисан је уз помоћ техника графичког дизајна. Стабло успеха (енг. Success tree - ST) представља логичну допуну помоћу које се FTA може трансформисати. Стабло успеха показује специфичне начине како се нежељени догађаји могу спречити пре него што до дође до њихове појаве. Стабло успеха обезбеђује услове који, ако су осигурани, гарантују да до нежељених догађаја сигурно неће доћи.

3.3 Мониторинг стања конструкције - Structural Health Monitoring

представља процес имплементирања детекције оштећења и карактеризационе стратегије за инжењерске конструкције. Циљ МСК је да на лицу места прецизно и ефикасно прати понашање структуре, да процену њене перформансе под различитим оптерећењима, да открије оштећење или погоршање и да утврди стање структуре. МСК је процес који подразумева посматрање система током времена узимајући периодичне узорке динамичких мерења из низа сензора, извлачење могућих штетних узорака из мерења и статистичку анализу ових узорака како би се оценило тренутно стање система.. Информације се касније могу припојити у стратегије одржавања и управљања и тиме побољшати смернице за дизајн. Непосредност и осетљивост МСК могу да омогуће краткорочну верификацију иновативних дизајна, рано откривање проблема, избегавање катастрофалних отказа, ефикасну алокацију ресурса и смањење трошкова одржавања.

.На основу опсежне литературе која се развила у пољу МСК у последњих 20 година, може се рећи да је ово поље сазрело до те тачке да се појавило неколико основних аксиома, односно општих принципа. Основни аксиоми су[5]:

1. Сви материјали имају инхерентне мане или дефекте; Према науци о материјалима, следећи дефекти у решетки, одступања од идеалне кристалне структуре, се могу јавити:
 - Тачкасти дефекти: ваканција и интерстиција,
 - Линијски дефекти: рубне и спиралне дислокације,
 - Површински дефекти: утиснута раван и границе зрна,
 - Запремински дефекти: отворена/затворена порозност и шупљине;

2. Процена оштећења захтева поређење између два стања система;
3. Утврђивање постојања и локације оштећења може да се уради у режиму без надзора, али утврђивање врсте оштећења и озбиљности оштећења могу да се ураде само у режиму под надзором;
4. Сензори не могу да мере оштећење. Даља екстракција путем обраде сигнала и статистичке класификације је неопходна за претварање сигнала податка у информацију о оштећењу
5. Без интелигентне екстракције, што је већа осетљивост мерења на оштећење, то је осетљивије и на промену оперативних и околних услова;
6. Дужинске и временске скале повезане са појавом оштећења и њеног развоја директно диктирају потребне особине система МСК за мерење;
7. Величина оштећења која се може детектовати из промена у динамици система је обрнуто пропорционална фреквентном опсегу побуде.

За дугорочни МСК, излаз ово процеса је периодично ажурирана информација о способности структуре да обавља своју намењену функцију у светлу неизбежног старења и деградације услед оперативног окружења.

3.4 Оцена без разарања

Оцена без разарања је термин за неинвазивне методе испитивања, процене и карактеризације заснован на принципима опажања и процењивања. Оцена без разарања је важна метода за контролу перформанси и праћење стања. У инжењерским системима, мане и пукотине у материјалима структурних компоненти система могу да буду круцијалне за настанак озбиљних оштећења. Због тог разлога, откривање дефеката и макро/мирко/нано анализе узрока отказа су битни делови контроле квалитета за инжењерске структуре и системе и њихово сигурно и успешно коришћење. Утврђене недеструктивне методе за техничку дијагностику су [6]:

- радиографија,
- ултразвучна испитивања,
- метода испитивања вртложним струјама,
- метода испитивање магнетним честицама,
- метода испитивања пенетрантима,
- термографија,
- методе визуелног прегледа.

Са брзим напретком сензора, инструментације и роботике, заједно са развојем нових материјала, оцена без разарања је у последњим деценијама постала разноврсна што је резултовало појавом многих техника које се користе за техничку дијагностику овом методом. Индустијска примена сензора и неинавазивних метода су разноврсне као и саме технологије где се користе попут машинства, електропривреде, нафтне индустрије, грађевинског инжењерства и слично. Примена НДЕ техника у неколико индустрија је стандардна пракса, нпр. за праћење стања за правилно свакодневно функционисање електричне енергије, гаса или течности где се користе судови и цеви под притиском и где правилан рад компоненти под примењеним стресом игра велику улогу у очувању безбедности и поузданости.

4. Праћење стања техничких система и појам сигнала

Ово поглавље представља и описује концепт мониторинга стања структуре (МСК). Описује основне принципе за интеграцију и спровођење мерења и технологију обраде сигнала у контексту МСК за дијагнозу стања, перформанси и здравља техничке структуре. Нуде се и информације и препоручене методе за креирање инструментације, прикупљање података, обраду података и анализу података за структуру која се испитује.

4.1. Генерално о концепту

Испитивање симптома и синдрома техничких система може се спровести кроз континуална испитивања (тзв. онлине-праћењем, као што је то пример са сензорима и мерним системима) и планираним испитивањем (као што је то пример са методама испитивања без разарања). Што се тиче праћења стања, техничка дијагностика може да се поделе у две типичне области примене, које се зову праћење стања СМ (енгл. *Condition Monitoring* - СМ) и испитивање стања конструкције SHM (енг. *Structure Health Monitoring* - МСК). Према ISO 13372, праћење стања представља детекцију и прикупљање информација и података, који указују на стање машине [7]. Машина, у овом смислу, је механички систем дизајниран изричито за обављање одређеног задатка, као што је то на пример металопреда метала или пренос и трансформација кретања, силе или енергије. Стање машине се погоршава уколико дође до оштећења или појаве стања отказа.

Док се СМ јасно фокусира на машине, МСК је посвећен континуираном надзору структуре. Циљ МСК је да прати понашање структуре тачно и ефикасно, да процени своје перформансе под различитим оптерећењима, да открије оштећење или погоршање стања структуре. МСК систем треба да буде у стању да пружи, на захтев, поуздане информације које се односе на безбедност и интегритет структуре. Информација се затим може припојити стратегијама одржавања и управљања и смерницама за побољшани дизајн. Физички дијагностички алат МСК је свеобухватна интеграција различитих сензорских уређаја и помоћних система, укључујући и сензорски систем, систем за прикупљање података, систем за обраду података, систем за комуникацију и систем за откривање оштећења и моделирање.

МСК је дизајниран да буде дугорочна континуирана активност, али може се подржати и краткорочним активностима као што су контролисана тестирања и периодична праћења.

Контролни тестови имају за циљ примену контролисаних оптерећења и/или мерење улазног оптерећења на структуру приликом мерења одговарајућих одзива. Ово контролисано тестирање се може обавити под контролом статичког оптерећења (нпр. камионом са дефинисаном тежином, хидрауличним средствима) или динамичког оптерећења (нпр. помоћу природних фреквенција због ветра, или помоћу вештачких фреквенција)[8].

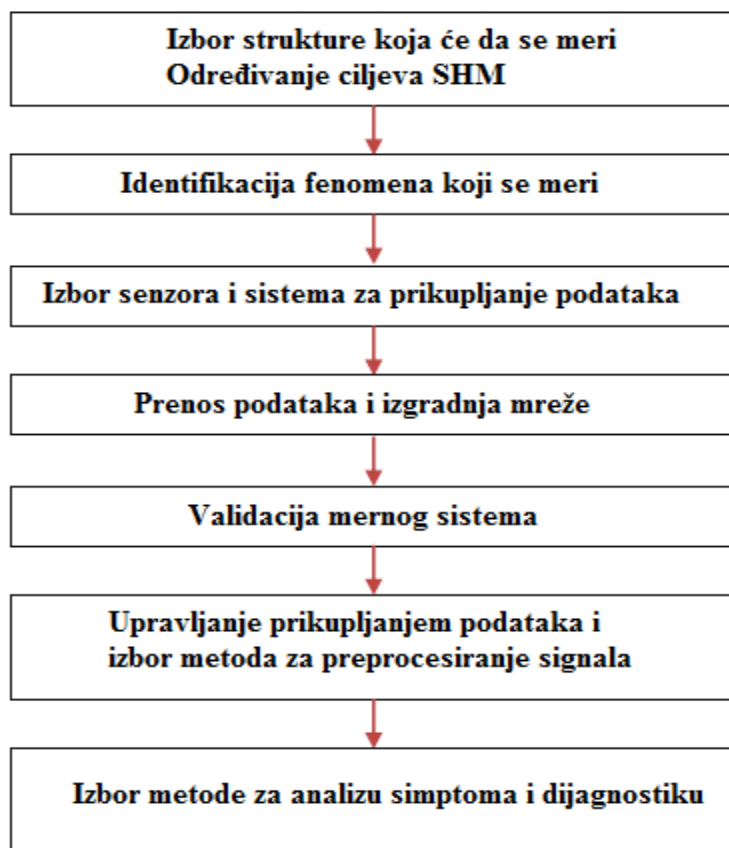
Данас, периодично праћење се углавном врши геометријским мерењем. Најубочијенији циљ је да се прате промене у геометрији, као показатељу феномена попут померања темеља, промене геометрије у кабловима или пратећим системима и слично. Мерни системи, који се више користе, су ипак оптички системи као што је то 3D ласерско

скенирање, ласерско праћење и поравнање мерења, глобално позиционирање (ГПС), мерења на бази положаја, фотограметрија и слично.

Периодично праћење такође може укључити методе контроле без разарања. Методе контроле без разарања попут радиографског испитивања, ултразвука, термографије, магнетског испитивања и сличних омогућавају локално испитивање унутрашње структуре у вези са феноменима попут пукотина, корозије, линијских одступања структурних елемената и слично.

4.2 Процедуре пројектовања МСК система

У овом поглављу ће бити описане процедуре пројектовања МСК система. Првобитно је развијен за потребе праћења стања мостова, али је уз пар измена постао примењив за све врсте МСК. Главни кораци у дизајнирању су сажети у дијаграму илустрованим на слици 9[9].



Слика 9. Процедуре дизајнирања МСК система

1. Избор структуре која ће да се мери и утврђивање циљева МСК

Овај први корак обухвата дубок преглед информација и података (укључујући нумеричке прорачуне и FEM (метода коначних елемената (енг. Finite Element Method)) симулације о дизајну, радним оптерећењима и еколошким оптерећењима, резултатима

претходних инспекција, било ком виду значајног претходног одржавања или модификовања и слично. Оправдања за очекиване резултате програма за праћење треба јасно да се идентификују и анализирају у сарадњи са власником/оператером структуре. Типични МСК циљеви су разјашњење неизвесности у вези са структурним процесима, пружање информација у вези понашања структуре или њених перформанси, допуна налаза из визуелних инспекција, оцена ефективности активности одржавања и модификација, пружање објективне процене садашњег и будућег стања, детекција оштећења или погоршања за оптимално планирање одржавања и процена могућих сценарија у случају опасних догађаја или незгода.

2. Идентификација феномена који се мери

Други корак обухвата идентификацију утицаја унутрашњих и спољашњих оптерећења и других сродних параметара које треба пратити како би се испунили МСК циљеви. Сходно томе, идентификовани су појединачни механички, хемијски, електрични и оптички параметри које ће сензори мерити. Потребна тачност за сваки мерени параметар и његов процењени опсег се мора одредити пре почетка мерења. На крају, морају се одредити физичке локације на којима ће се параметри мерити.

3. Избор сензора и система за прикупљање података

Сензори и компоненте за прикупљање података су изабрани из групе од комерцијално доступних и проверених сензора, сигнал цондитионинг и система за прикупљање података на основу његових физичких, електричних и термодинамичких карактеристика. Детаљан сет спецификација инсталација треба припремити за сваки тип сензора и компоненте података које ће се користити.

4. Валидација мерног система

Основни циљ овог корака у дизајнирању је валидација подобности и перформанси компонената система за мерење појединачно, а такође и као интегрисаног систем под контролисаним условима пре него што се расподеле на структуру. Калибрација се обавља у овој фази у сврси опште валидације и није замена за периодичне и знатно ригорозније калибрације које се врше према мерним стандардима из SI система.

5. Управљање прикупљањем података и избор метода за препроцесирање сигнала

Управљање прикупљањем података је засновано на траженим карактеристикама феномена који се мери и ограничењу дизајнираног система за мерење. Оно мора узети у обзир и могућност да рукује широким спектром ефеката који временско зависни. МСК системи са великим бројем сензора морају да имају стратегију за временску просторну синхронизацију свих података и свих секвенци података. Када су подаци из различитих

сензора прикупљени, препроцесирање је први важан корак у целој анализи сигнала и њиховој интерпретацији. Укључује две важне операције и то су: нормализација и чишћење. Посебно за чишћење, одговарајући алгоритми морају бити одабрани из велике селекције добро познатих метода за препроцесирање.

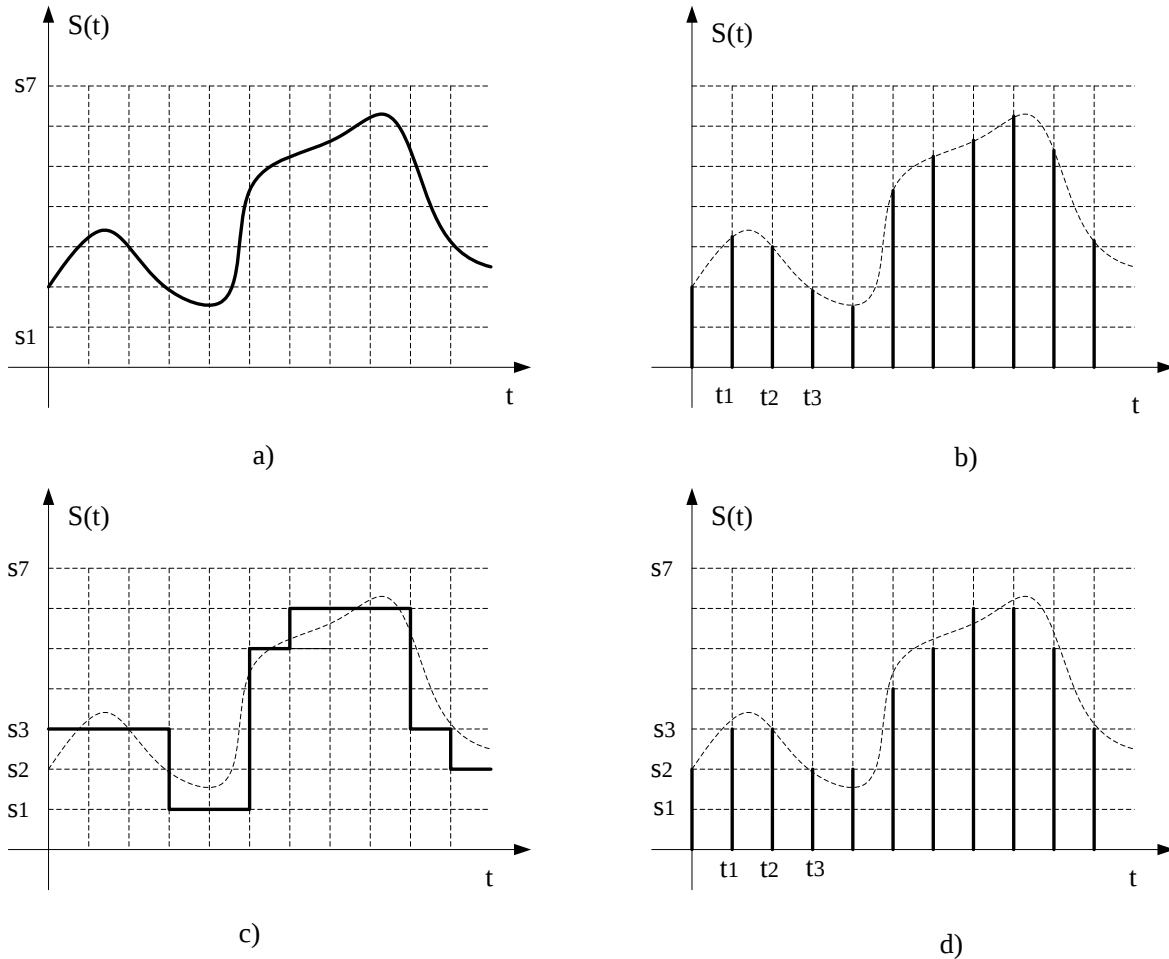
6. Избор методе за анализу симптома и дијагностику

Структурна оштећења доводе до промена неких од мерљивих особина. Један од задатака МСК система јесте да анализирају прикупљене податке у вези са аномалијама због оштећења (анализа симптома) и класификује локације, величину и врсту оштећења (дијагностика). Коначан исход савршених МСК система ће бити препорука за одржавање и поправке, ограничења за даљи рад и предвиђање оперативног времена рада у вези са тренутним статусом структуре.

4.3 Сигнал и анализа сигнала

Систем дизајниран да изврши одређен задатак често користи мерења добијена из окружења и/или улаз који је обезбедио корисник. Ова мерења се касније могу претворити у друге облике. Физичке варијабле које меримо се генерално називају сигнали. У електричном систему, физичке варијабле које меримо, односно сигнали, могу да буду напон, струја, снага и слично. У механичком систему, те варијабле могу да буду брзина, маса, запремина и остале вредности неког објекта. У обављању својих задатака, систем мора да манипулише или комбинује различите сигнале, извлачи информације или да на други начин обрађује сигнале. Ове активности се зову још и процес обраде сигнала или анализа сигнала. У току већине мерења често се обавља више узастопних мерења, а не само једно. У овом случају, сигнал представља функцију времена $f(t)$. На пример, $f(t)$ може да буде ниво напона или брзине неког објекта у времену t .

Сигнали могу бити континуални и дискретни. Континуални сигнали се увек јављају као функције времена које имају све могуће вредности које се налазе између неких одређених граница. Под дискретним сигнаlima подразумевају се оне поруке које се појављују као низови одвојених елемената који имају коначан број различитих вредности [10].



Слика 10. Сигнали: а) амплитудски и временски континуалан, б) амплитудски континуалан а временски дискретан, ц) амплитудски дискретан а временски континуалан, д) дискретан и по амплитуди и по времену.

4.3.1 Фреквентна анализа сигнала

Анализа сигнала у фреквентном домену представља основу за анализу сигнала и система. Од свих математичких алата који се користе у инжењерству, фреквентна анализа сигнала је без икакве сумње једна од најзаступљенијих метода која се користи. Заправо, ова метода је толико распрострањена да се користи чак и у појединим областима математике.

Најчешћи и најпознатији пример фреквенције код сигнала је аудио сигнал. Сви смо упознати са концептима високих и ниских нота у музици и тачно је да високе ноте имају већу фреквенцију, али шта то тачно значи? Да би се размотрио овај проблем треба почети од разматрања синусоида. Општи израз за синусоиде на фреквенцији је [11]:

$$x(t) = \alpha \sin(\omega t + \phi) = \alpha \sin(2\pi f t + \phi) \quad (3.1)$$

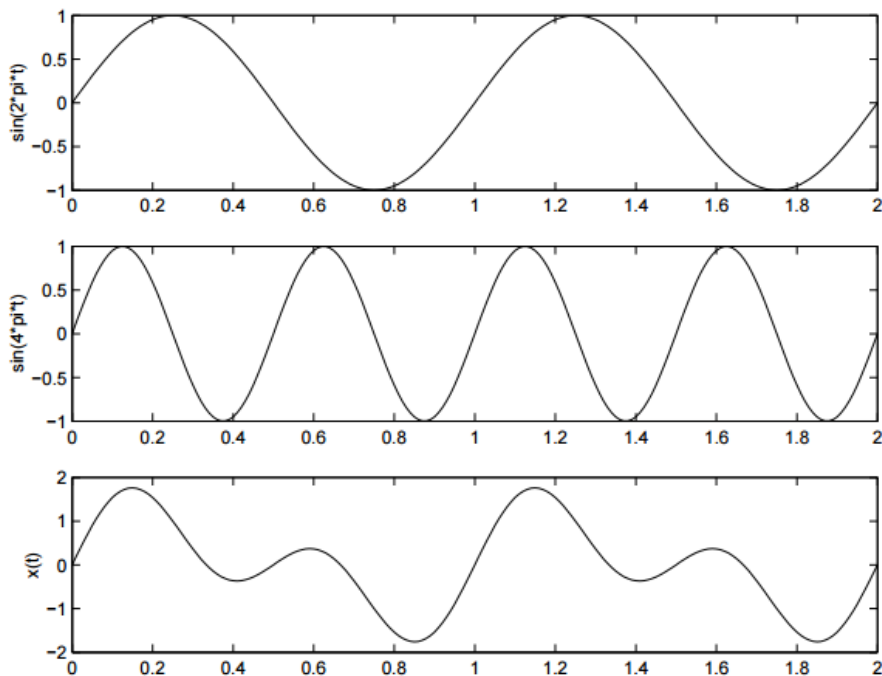
Када се посматра као аудио сигнал, $x(t)$ указује на промену ваздушног притиска у нашим ушима као функцију времену. Оно што је важно овде јесте време варијације ваздушног притиска од неке амбијенталне вредности више него од амбијенталне вредности самог притиска. Негативна вредност се односи на ону количину испод основног (амбијенталног) притиска, а позитивна вредност се односи на притисак већи од основног.

Дакле, пошто је $x(t)$ синусоида, то значи да притисак ваздуха на наше уши варира периодично. Звук који чујемо у овом случају се зове чист тон. Чист тон често звучи вештачки, односно електронски. Фреквенција синусоиде одређује висину тона, док амплитуда одређује гласност. Испоставља се да фаза синусоиде не утиче на нашу перцепцију тона, што не може бити изненађујуће за чист тон, али је донекле изненађујуће кад почнемо да комбинујемо синусоиде.

Можемо комбиновати две синусоиде додавањем сигнала на уобичајен начин. На пример:

$$x(t) = \sin(2\pi t) + \sin(4\pi t) \quad (3.2)$$

је комбинација синусоиде са фреквенцијом од 1Hz и синусоиде са фреквенцијом од 2Hz. Амплитуда обе синусоиде је 1, а фаза је 0. Комбиновање ових синусоида се може видети на слици 11.



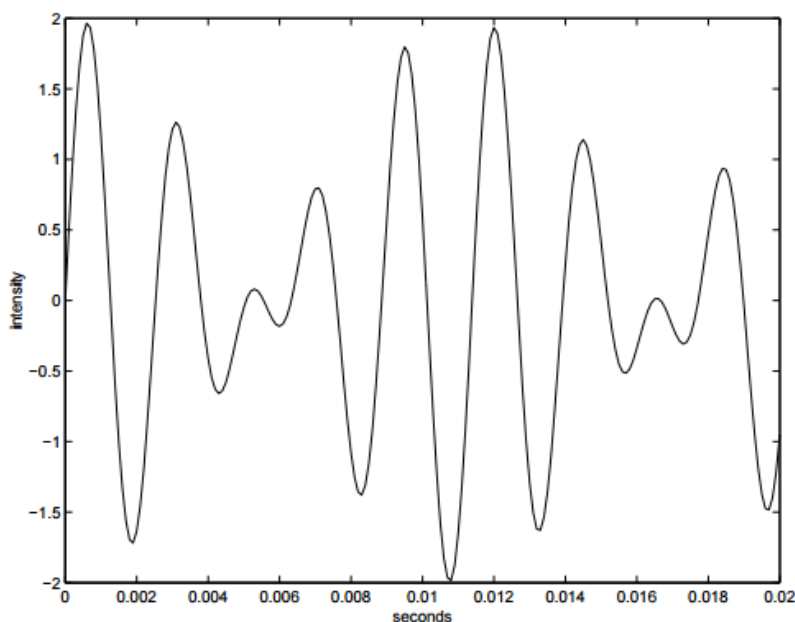
Слика 11. Комбиновање синусоида

"Звук" који ствара $x(t)$ је комбинација два чиста тона који праве $x(t)$. Нажалост, људско ухо не може да детектује чисте тонове који се налазе у сигналу $x(t)$ јер је фреквенција веома ниска.

Међутим, можемо направити сличну комбинацију са сигнаlima на фреквенцији које људи могу да чују. На пример, размотримо сигнал:

$$d(t) = \sin(2\pi * 350 * t) + \sin(2\pi * 440 * t) \quad (3.3)$$

Обе синусоиде (на фреквенцијама од 350 Hz и 440 Hz) одговарају на чист тон који може да се чује у нормалном опсегу за људско ухо. Њихова комбинација, тј. сигнал $d(t)$ прави веома познат звук, а то је звук тона за бирање. Сигнал $d(t)$ је приказан на слици 12. Може се приметити да је на слици приказан само стоти део од 2 секунде. Због тога што су фреквенције високе, уколико би била приказана читав секунда, сигнал би осциловао толико пута да се ништа не би могло јасно видети.

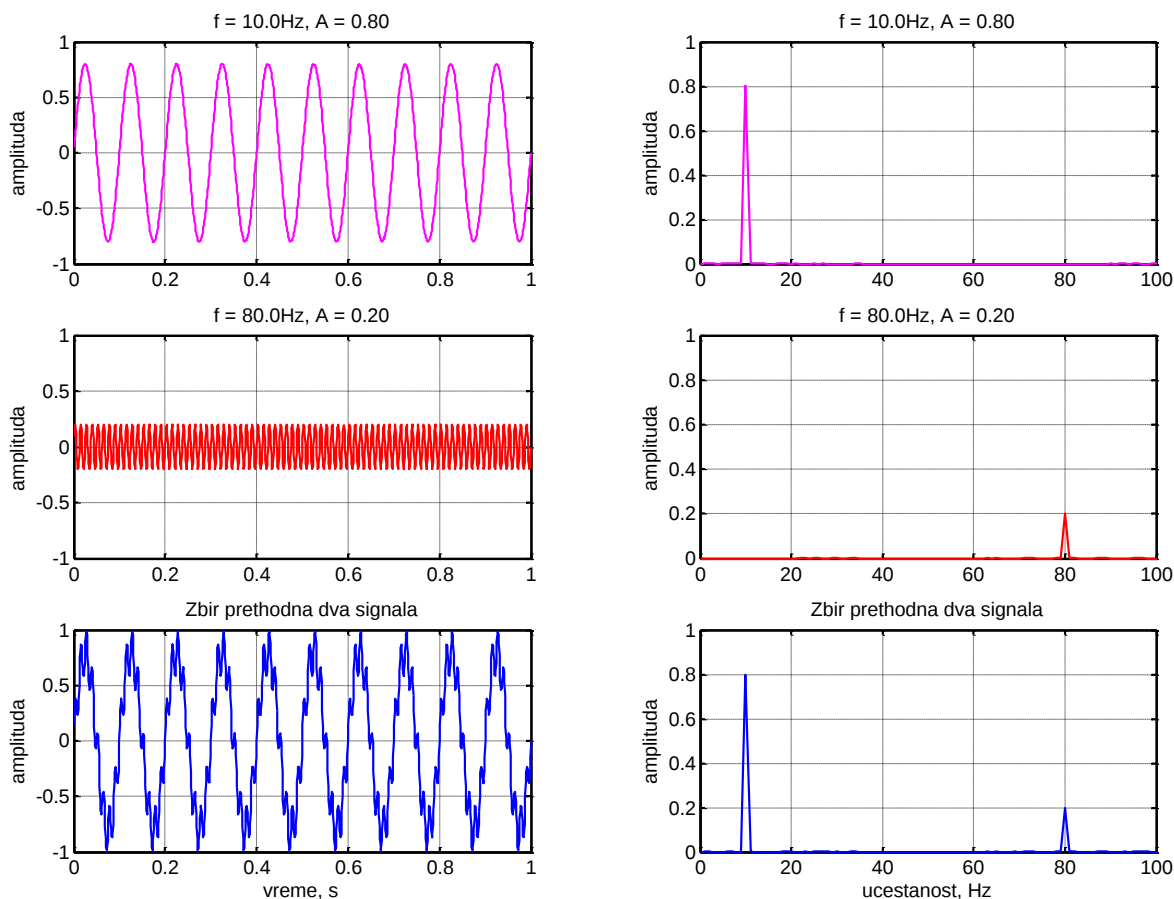


Слика 12. Графикон тона за бирање

Иако је тон за бирање једноставан пример звука који звучи вештачки, комбиновањем више синусоида на различитим фреквенцијама можемо добити мноштво других звукова. Музичке ноте, које су углавном угодне, се углавном састоје од чистих тонова, али садрже и друге фреквенције које сваком инструменту дају посебан квалитет. Глас и други природни звуци се такође састоје од великом броја чистих тонова.

Као што се сви звуци могу направити од чистих тонова, тако се и сви сигнали могу направити комбиновањем синусоида. Слично, почевши од општег временског сигнала, можемо раставити овај сигнал на његове саставне синусоиде.

Фреквентна анализа је метода пребацивања сигнала снимљених у временском домену у фреквентни домен. Анализом сигнала у фреквентном домену могуће је открити различите отказе. Пребацивање у фреквентни домен (слика 13) представља приказ спектра фреквенција сигнала и одговарајућих амплитуда [12].



Слика 13. Пример фреквентне анализе сигнала

4.3.2 Процес прикупљања сигнала

Након што смо установили шта је сигнал и чиме се карактерише, приступа се избору сензора који треба да детектује сигнал који треба да мери.

Први корак у одабиру сензора за представља утврђивање објекта који се мери и околине у којој ће радити. Ово укључује спровођење следећих активности:

- идентификацију свих физичких величина које ће да се мере (температура, брзина, убрзање, проток, померај, итд.),
- одређивање номиналне вредности и очекиваног домета мереног објекта,
- анализу просторних и временских особина мереног објекта и мерења
- одређивање потребне тачности мерења за свако мерење
- анализу услова животне средине у којима ће се извршити мерења. У већини МСК, животна средина обично садржи високу температуру и влажност, прскајућу или стајаћу воду, електромагнетне и радиоталасне интерференције (ЕМИ/РТФ), вибрације, отровне соли и остале нечистоће као што су уље, прашина и сл.
- пружање информације о животном веку сензора засновану на дефинисаном периоду трајања надзора

Након што су објекти који се мере и околина у којој се врши праћење утврђени, можемо извршити одабир колекције могућих сензора. У циљу проналажења оптималних сензора, морају се узети у обзир још пар важних критеријума. Ови критеријуми могу бити сврстани у неку од три основне категорије: радне карактеристике сензора, ограничење животне средине и економска разматрања. Свака категорија критеријума садржи неколико описа који карактеришу најважније особине сензора, као што је то приказано у табели 1.

Радне карактеристике сензора	Ограничења животне средине	Економска разматрања
Осетљивост	Распон температуре	Трошкови
Резолуција	Распон влажности	Доступност
Дискриминација	Величина	Поузданост
Распон	Паковање	Лакоћа инсталације
Линеарност	Потреба изолације од поремећаја	Потребе за прикупљање података
Хистерезис	Термални ефекти	
Тачност		
Прецизност		
Стабилност		
Време одзива		
Фреквентни одзив		

Табела 1. Критеријуми за избор сензора

Ово осигурава да одабрани сензори максимизирају поузданост и ефикасност мерења, док у исто време минимизирају несигурности повезане с мерењем. Након одабира адекватног сензора, приступа се одабиру система за прикупљање података.

Прикупљање података је процес током којег се, помоћу сензора, информације прикупљају, обрађују и затим, преко разних компоненти, преносе за даљу анализу и интерпретацију. Сензори генеришу аналогни или дигитални сигнал који представља физичку варијаблу која се мери или прати. Систем за прикупљање података прикупља ове сигнале, кондиционира их и конвертује у одговарајући формат и преноси сигнале у компјутер ради даље обраде, анализе, складиштења, итд.

Овакав систем се састоји од следећих компоненти:

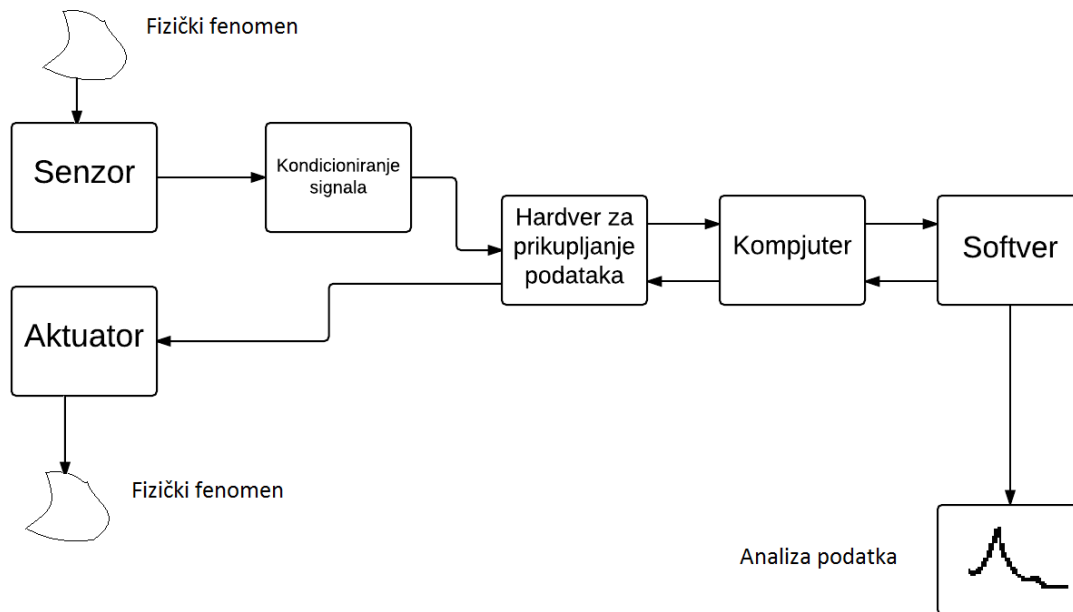
- хардвера за прикупљање података,
- периферија за прикупљање података и
- софтвера за прикупљање података

Хардвер за прикупљање података се састоји од великог броја електронских компоненти, које прикупљају, кондиционирају, конвертују и преносе сигнале сензора у компјутер. Типични представници су следеће компоненте: сигнални уређај, аналого-дигитални конвертор, интегрисано коло, меморија, комуникациони интерфејс и напајање. Сигнални уређај обрађује сигнал са сензора како би га учинио компатибилним са аналого-дигиталним конвертором (ADC, енг. *Analog-to-Digital Converter*). Аналого-дигитални конвертор конвертује сигнал у дигитални формат. Интегрисано коло (нпр. процесор, односно централно управљачка јединица (енг. *Central Processing Unit - CPU*))

или микроконтролер) контролише друге хардверске компоненте и одговорно је за извршавање свих операција програмираних од стране оператера. Меморија служи као привремена база или складиште за дугорочно чување мерних података. Комуникациони интерфејс омогућава систему за прикупљање података за комуницира са компјутером директно или преко мреже. Напајање напаја струјом унутрашње електронске компоненте, а у неким случајевима чак и сензоре.

Периферије за прикупљање података укључују каблове, терминалне блокове и конекторе, кућишта и разводне кутије потребних за физичко конектовање сензора са хардвером за прикупљање података и за заштиту хардверских компоненти од утицаја животне средине.

Софтвер за прикупљање података је важна компонента сваког система за прикупљање података. Генерално, постоје два типа софтвера који се користе у комбинацији са системима за прикупљање података, управљачким програмима (драјверима) за софтвер и апликативним софтвером. Драјвер олакшава комуникацију између хардвера за прикупљање података, системског софтвера и апликативног софтвера. Апликативни софтвер обезбеђује везу између корисника и система за прикупљање података. То омогућава кориснику да конфигурише и контролише хардвер за прикупљање података и да прочита, прикаже, ускладишти и анализира мерне резултате. На слици је приказан општи модел система за прикупљање података.



Слика 14. Општа шема система за прикупљање података

5. Основне методе техничке дијагностике

У овом поглављу ће бити дат кратак и основни преглед различитих дијагностичких метода и техника које се користе у циљу оцењивања стања система. То су углавном методе оцене без разарања NDE (eng. *Non-Destructive Methods*), попут ултразвучних испитивања, испитивања вртложним струјама, акустичног испитивања, термографије, испитивање вибрацијама и сличних. Технике су описане како би изразиле развојне напоре који се улажу у процени квалитета израде и детекције раних оштећења кроз промене у микроструктури материјала и развојних оптерећења који доводе до прераних отказа. Ово поглавље описује физичке принципе ових метода у разматра њихове предности, ограничења и могућности за откривање отказа.

У овој ери глобализације и континуарног напретка, квалитет је лозинка за успех. Квалитет се најбоље може постићи разумном применом оцене без разарања и вредновањем резултата у синергији са гранама знања из пројектовања, производње, оцене перформанси материјала, одржавања и осталих. Осигурање квалитета у току израде и термичке обраде користећи технике оцењивања без разарања је од суштинског значаја за безбедан, поуздан и дуготрајан рад компоненти и система. Учинак индустријских компоненти, система и постројења зависи од њиховог фабричког квалитета, услова у којем обављају своју функцију рада, познавања краткорочне и дугорочне стабилности микроструктура и варијација између жељених и стварних услова, повратних информација из постројења, анализе отказа и слично. Строго управљање квалитетом током израде и процене учинка кроз оцене без разарања и осталих техника оцењивања, осигуравају избегавање превремених и/или катастрофалних отказа и неочекиваних затварања постројења.

Оцена без разарања, као што и само име каже, односи се на науку и технологију процене чврстине процеса, производа, машине, система или постројења неинвазивним начинима испитивања без угрожавања перформанси и сервисирања. Технике, углавном, укључују преношење енергије ка материјалу. Одзив материјала се анализира користећи погодне сензоре без угрожавања његове функционалности или вредности. Међутим, пасивне технике контроле без разарања се односе на прикупљању емитоване енергије користећи погодне сензоре током динамичких процеса који се дешавају у материјалу попут деформације, корозије, цурења и осталих. Оцена без разарања је термин који се често користи наизменично са термином контроле без разарања. Док се термин контроле без разарања односи на означавање контроле или испитивања материјала на квалитативни начин, термин оцена без разарања се односи на испитивање повезано са прецизним мерењима и њиховим корелацијама са перформансама и стога је по природи квантитативан метод. Кроз оцењивање без разарања, могуће је не само утврдити локацију дефекта већ и његову величину и облик. Квантитативне корелације са перформансама се постижу кроз одређивање особина материјала попут чврстоће микроструктуре, тврдоће прелома и осталих физичких карактеристика које омогућавају оцењивање перформанси.

Јасно је да учестаност и интензитет варирају од производа до производа у великој мери, а чак и од индустрије до индустрије истог производа. Може се видети да техник оцењивања без разарања представља есенцијалну компоненту за управљање процесом производње и животног циклуса производа у циљу осигуравања квалитета производа. Иако је индиректна по својој природи, оцена без разарања у појединим областима где се

примењује има већу осетљивост, тачност и поузданост од скупљих и знатно прихваћенијих метода испитивања са разарањем попут механичких испитивања. Оцена без разарања има јединствену способност откривања насумичних неповезаности које доводе до превремених отказа материјала и компоненти. Неуспех при искоришћавању адекватних метода без разарања за оцену производа доводи до неодговарајућих перформанси квалитета и губитак репутације када индустријске фирме настоје да развију нове области примене за њихове производе и да помере инжењерске компоненте до лимита њихових перформанси. Откази могу да доведу до великог губитка капитала и због тога се морају избећи по сваку цену у инжењерским системима. Са порастом комплексности и озбиљности инжењерских система, долази и до значајног повећања последица ефекта отказа. Неуспех да се користе одговарајуће оцене без разарања како би се осигурали интеритет и поузданост нису прихватљиве у производњи и инжењерском менаџменту.

Историјски гледано, оцена без разарања се користила још у античко доба. Пример за то је класично ударање руком у земљани ћуп како би се испитала његова чврстоћа. Међутим, савремене оцене без разарања које користе научне и математичке методе за узимање мера своје порекло воде из краја 18. века када су се неки од основних концепта струје и магнетизма појавили..

У раним данима, примарна сврха оцене без разарања је било откривање дефеката. Критични делови су се производили са дизајном који је био фокусиран на омогућавање њиховог дугог животног века. Откривање дефеката током сервиса је резултовало у уклањању те компоненте. Појава прелома механичких концепта 1970. године је довела до промене ове филозофије и створена је нова филозофија која је омогућила одступање од грешке у дизајну у одређеним границама. У овој филозофији, компоненте које имају дефекте настављају да се користе колико год могу уколико се утврди да ови дефекти неће даље да се развијају до те мере која би резултовала појавом отказа. Стога је могуће прихватити дефектну структуру све док је могуће пратити стање дефекта у циљу осигуравања да је структура у границама безбедности. Због тога је дошло до стварања нових захтева у области оцене без разарања. Сама детекција мана није била довољна. Било је неопходно окарактерисати дефект и прикупити информације о његовој величини, облику и локацији. Са развојем сензора, електронике, инструментације, компјутера и роботике, многе конвенционалне методе оцене без разарања су постале знатно квантитативније. Током 80их и 90их година прошлог века, дошло је до развоја визуелних NDE техника попут ултразвучног “пхасед arraу” испитивања, дигиталне радиографије, компјутерске томографије и сличних. Ово је довело до стварања оцене без разарања као нове дисциплине са побољшаним способностима за дијагностику и праћење стања. Велики број развојних програма је такође произашао из области оцене без разарања за супротстављање новим изазовима и припремању за будуће захтеве.

5.1 Принципи и карактеристике метода оцене без разарања

Савремени принцип оцене без разарања је започет са 6 метода и то методама испитивањем пенетрантима, испитивањем магнетским честицама, радиографијом, ултразвуком, испитивањем вртложним струјама и визуелним испитивањем, а данас имамо 14 NDE метода и више од 40 добро успостављених NDE техника доступних за испитивање и карактеризацију. Четрнаест основних NDE метода су [13]:

1. визуелно испитивање,
2. испитивање пенетрантима,
3. испитивање магнетним честицама,
4. радиографија,
5. ултразвук,
6. испитивање вртложним струјама,
7. испитивање цурења,
8. испитивање вибрација,
9. испитивање буке,
10. термографија,
11. ласерска техника,
12. Баркхаусенов магнетни ефекат,
13. Испитивање расипањем магнетног флукса и
14. рендгенска дифракција

Напредак у методама оцене без разарања је био могућ због развоја различитих области попут науке о материјалима, сензорима и технологије за разумевање интеракције између медијума који се тестира и са материјалом за испитивање кроз моделирање и симулацију, развојем компјутера, електронике, инструментације, роботике, система за прикупљање података, обрадом слика и сигнала и разних софтвера. Технике оцене без разарања укључују слање неког облика енергије кроз материјал за испитивање и анализу одзива како би се разумела њена интеракција са материјалом за испитивање. Неке од техника методе оцене без разарања, попут акустичне емисије и термографије, су пасивне и не захтевају никакав извор енергије. Материјали за испитивање емитују енергију због динамичке појаве и такви облици енергије се детектују путем одговарајућих сензорских система и анализирају како би се пружиле информације о материјалу за испитивање. Скоро сви облици енергије се користе за карактеризацију материјала без разарања, заснованих на приступу примене одговарајућих сензора и анализе сигнала у циљу конвертовања енергије у сигнал/слику и пружања мноштва информација о стању материјала. Различити облици енергије који се користе за NDE укључују оптичку, магнетску, електричну, електромагнетну, радијациону и акустичну енергију.

Избор технике за одређену примену зависи од великог броја фактора попут материјала, геометрије, типа и локације дефекта, применљивости, приступачности и подобности. Понекад може бити неопходно користити две или више техника, које допуњују једна другу, у циљу побољшања поузданости испитивања. Детаљно моделирање је од суштинског значаја пре стварне инспекције, како би се извршила оптимизација параметара опреме и технике, радних услова, како би се извршила адекватна селекција сензора и процедура за снимање и процену података како би се дошло до жељене осетљивости и поузданости.

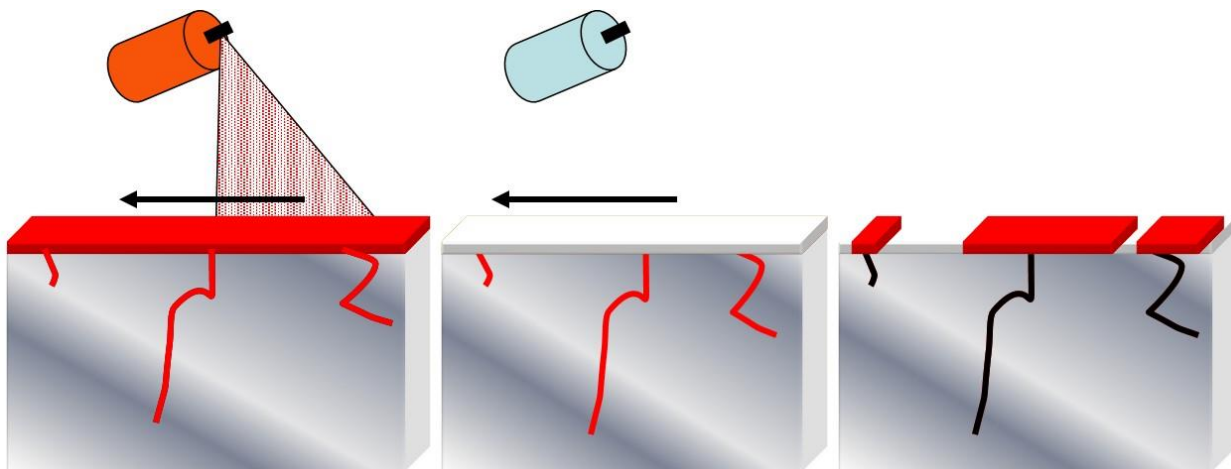
Сензори су срце сваке технике оцене без разарања и делују као мост између распрострања енергије у материјалу за испитивање и корисне, разумљиве и значајне слике/сигнала. Континуиран развој сензорске технологије током година у циљу побољшања њихове осетљивости и отпорности, довела је до повећања осетљивости и поузданости постојећих техника оцене без разарања и до могућности стварања нових техника. У овом поглављу, само ће се укратко указати на принципе одређене групе

главних метода попут испитивања пенетрантима, испитивања магнетним честицама и ултразвучне методе, а биће дат мало опширнији појам о вибрацијама, инфрацрвеној термографији и визуелним методама испитивања.

5.2 Испитивање течним пенетрантима

Испитивање течним пенетрантима (енг. *Liquid penetrant evaluation*) је једна од најједноставнијих, али и најосетљивијих метода без разарања која се користи за детекцију дефеката на отвореној површини. Ова метода се може применити на скоро свакој компоненти без обзира на величину и сложеност конфигурације. Користи се за испитивање кованих и ливених производа обојених и необојених метала и легура, керамике, стакла и неких полимерних компоненти. У овој методи, површина компоненте је добро очишћена, а видљива или флуоресцентна боја под називом пенетрантска течност се наноси на систематски начин. Пенетрантској течности је дозвољено да остане на површини за неки одређени временски период, који се назива период задржавања. Током овог времена, пенетрантска течност попуњава површинска оштећења. Након што истекне период задржавања, вишак пенетрантске течности се уклања са површине. Затим се користи развијач (мокри или сув) који се равномерно наноси преко целе површине. Развијач затим извлачи пенетрантску течност из оштећења на површину. Ово се у пракси назива "крварење"[14]. Са видљивом бојом, контраст између пенетрантске течности и развијача чини оштећење јасно видљивим под природним или вештачким осветљењем. Са флуоресцентним бојама, ултраљубичасто зрачење се користи како би се "крварење" видело флуоресцентно јарко што омогућује оштећењу да се јасније види(слика 15).

Пенетрантска течност може се класификовати као видљива или флуоресцентна зависно од природе боје која се користи. Док видљива пенетрантска течност користи контраст између боја, флуоресцентна пенетрантска течност користи боју која флуоресцира под црним светлом. Флуоресцентна пенетрантска течност има већу осетљивост у поређењу са видљивом бојом пенетрантске течности. Велики број пенетрантске течности је развијен за широк спектар услова испитивања који се могу јавити у пракси. Главне врсте су системи који се могу прати водом, емулговани системи и системи на бази растварача. Сви наведени системи се разликују један од другог у зависности од начина на који се уклања вишак пенетрантске течности. Код система који се могу прати водом, пенетрантска течност се уклања испирањем воде. Емулговани системи захтевају посебан додатни корак емулговања који ће учинити пенетрантску течност растворљивом у води. Код система на бази растварача, растварач се користи за уклањање вишка пенетрантске течности. У погледну осетљивости, системи који могу да се перу водом имају најмању осетљивост, док емулговани системи имају највећу осетљивост



Слика 15. Процес наношења пенетрантске течности, развијача и резултат испитивања

Испитивање течним пенетрантима је добро прилагођена метода за откривање свих врста пукотина, порозности, ламинације и области скупљања као и других дефеката на отвореној површини. Може се применити на било који материјал без обзира на величину, облик, дебљину и састав. Представља осетљиву методу, подложну да опише величину, облик и природу дефекта и веома је исплатива метода и зато има широку примену.

Главни недостатак ове методе јесте тај што не може да детектује потповршинске дефекте и тешко је применити је на грубим и порозним површинама. Недавни напредак у испитивању пенетрантским течностима је укључио примену система за снимање заједно са роботским уређајима за аутоматизацију испитивања и евалуацију читавог процеса. Примена техника препознавања облика је такође спроводена са великим успехом. Специјалан, веома осетљив процес испитивања коришћењем радиоактивних маркера је такође спроведен, али ова техника захтева доношење веома строгих безбедносних процедура.

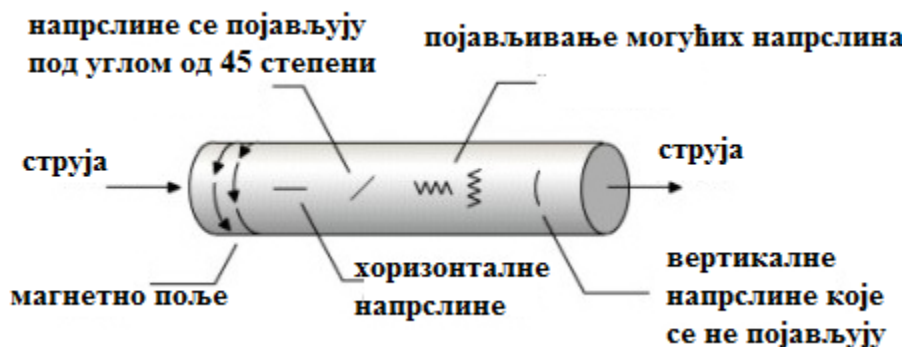
5.3 Испитивање магнетним честицама

Испитивање магнетним честицама је једноставна и једна од најпоузданијих и најпродуктивнијих NDE метода велике осетљивости, која даје јасне индикације о површинским и потповршинским физичким оштећењима магнетних материјала. Када се феромагнетна компонента намагнетише, линије магнетног поља (магнетни флукс) су претежно унутар материјала. Међутим, када постоји пуцање површине или оштећење потповршине, поље се криви што доводи до “цурења” магнетног поља (слика 16). Ово цурење се детектује прскањем ситно подељеним феромагнетним прахом[15]. Због додатне предности методе испитивањем магнетним честицама у односу на методу испитивањем течним пенетрантима, које се тиче детектовања потповршинских дефеката, ова метода се широко препоручује за испитивање свих феромагнетних компоненти. Испитивање магнетним честицама се може користити за детекцију пукотина, прслина, преклопа, неметалне инклузије, сегрегације и слично. Осетљивост методе испитивањем магнетним честицама зависи од начина магнетисања и од електромагнетних особина материјала који се испитује, као и од величине, облика и локације дефекта. Метода испитивањем магнетним честицама се широко користи за испитивање пукотина код транспортних индустрија као што су то радилице, точкови, лопатице парних турбина и слично.

Аутоматска магнетна процена се кориси за котрљајуће лежајеве, мале одливке и отковке и слично.

Метода се може употребити само за феромагнетне материјале и испитивање треба да се изврши са магнетним пољима управним на главну раван оштећења. Две или више узасопних процена је потребно да би се покрила читава област дефекта. Неопходан захтев, који мора да се испуни након испитивања, је да се изврши демагнетизација компоненти. Испитивање магнетним честицама се користи у скоро свакој индустријској грани: металургији, машиноградњи, авиоградњи, бродоградњи, током производње у железари, код инсталације цеви и сличним гранама. Укратко, метода испитивање магнетним честицама се спроводи у 5 фаза и то су:

1. припрема површине предмета који се испитује;
2. магнетизација предмета;
3. примена магнетних честица на предмет;
4. испитивање предмета;
5. демагнетизација.



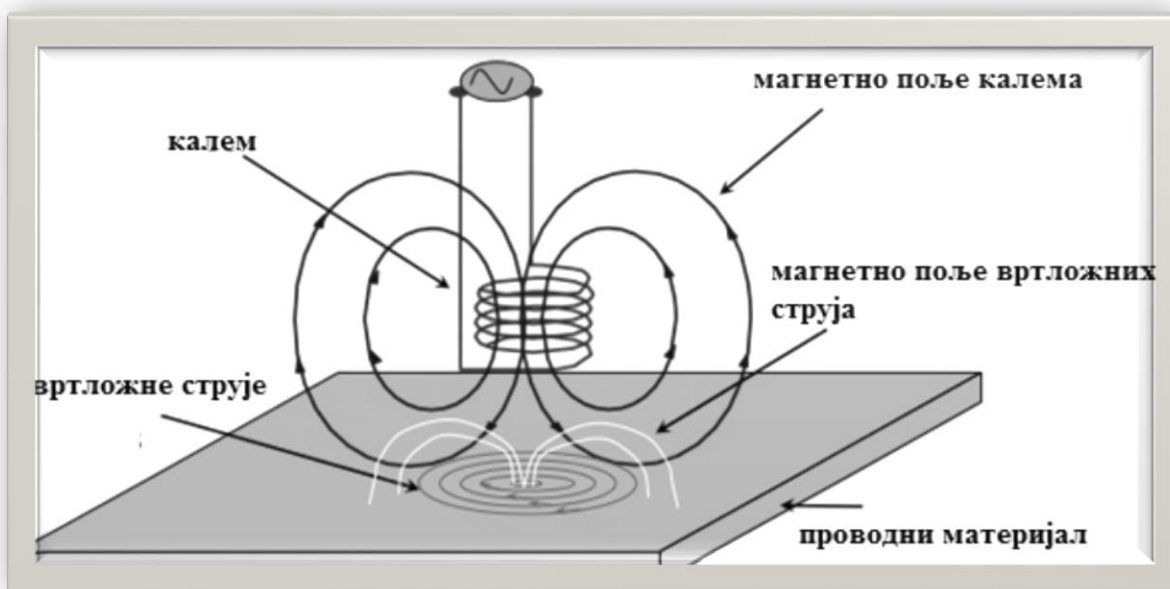
Слика 16. Мерење магнетним честицама

5.4 Испитивање вртложним струјама

Ова техника се базира на индукцији струја у електрично проводљиви (кондуктивни) материјал који се испитује и посматра се интеракција између ових струја и материјала. Када се магнетски флуks око проводника промени, изазване струје су уређене у затвореним стазама на површини проводника. Ове струје су усмерене у правцу нормалним на магнетски флуks и зову се вртложне струје. Када наизменична струја пролази кроз калем, долази до стварања магнетског поља око њега. Смер кретања магнетног поља варира од сваког циклуса наизменичне струје и овај феномен је познат као поље побуде. Када се проводник доведе близу ове области, у њему се индукују вртложне струје. Смер кретања вртожних струја се мења са смером кретања магнетског поља током сваког циклуса наизменичне струје. Ове вртложне струје производе сопствено магнетско поље које се противи пољу побуде [16]. Због тога се мења резултујуће поље, које даље мења импедансу калема. Ова промена импедансе се прикладно приказује помоћу метра или монитора са катодном цеви, а промена импедансе указује на то да је дошло до промене у проводљивости, што се тумачи као присуство оштећења у облику порозности, пукотине и сличних дефеката. Дигитална обрада сигнала је благодет за прикупљање информација о врсти и величини оштећења.

Тест калем, такође познат и као сонда, је главна веза између инструмента за тестирање и објекта који се испитује и има две важне функције. Прва је да успостави електромагнетско поље како би се индуковале вртложне струје у објекат који се испитује, а друга је да омогући одзив систему за дигиталну обраду сигнала. Различите врсте сонди су доступне за испитивање равних површина и цевастих производа. Испитивање вртложним струјама се користи како би се идентификовао или разликовала различита физичка, структурна и металуршка стања проводљивих материјала.

Испитивање вртложним струјама има широку примену у мерењу и идентификовању појединих особина материјала попут електричне проводљивости, магнетне проводљивости, величине зрна, чврстоће и физичких димензија. Може да открије дефекте попут пукотина, празнина, инклузије и осталих површинских оштећења код проводних материјала. Налази велику примену у областима сортирања материјала и мерење дебљине превлаке. Главни недостатак се огледа у њеној слабој пенетрацији у испитиване делове и зато је ограничена на делове са танком дебљином и/или дефекте близу површине. Добро практично знање је потребно за развој техника испитивања, пројектовање специфичних сонди и за оцену испитаних података.



Слика 17. Испитивање вртложним струјама

5.5 Инфрацрвена термографија

Инфрацрвена термографија, позната и као термално снимање, или једноставно термографија, представља методу без разарања, која је добила огромну и добија све већу пажњу у пољу дијагностике и мониторинга у последњих неколико деценија. Ово је углавном последица чињенице да се комерцијалне инфрацрвене или термалне камере, главни инструменти за обављање инфрацрвене термографије, стално побољшавају у смислу осетљивости и просторне резолуције и постају све брже и јефтиније. Сваке године или мало дуже, могуће је добити бољи модел камере по сличној цени као и претходни модел из претходне године. Слична ствар се дешава и са компјутерима неопходних за контролу, обраду података и приказивање слике, који пружају све већу рачунарску снагу по све нижој цени из године у годину.

Термин "инфрацрвено" потиче из латинског префикса "*infra*" што значи "испод" и речи "*red*", која представља положај инфрацрвеног спектра на фреквенцији нижој од видљивог спектра, као што се може видети на слици. Термин "термографија" потиче од грчке речи "*thermos*" што значи "вруће" и грчког суфикса "*graphein*", што значи "писати"[17]. Стога, инфрацрвена термографија може да се посматра као метода снимања којом се представља температурно поље објекта.

Формална дефиниција се може наћи у "Приручнику о испитивању без разарања применом инфрацрвене технологије" и гласи[18]:

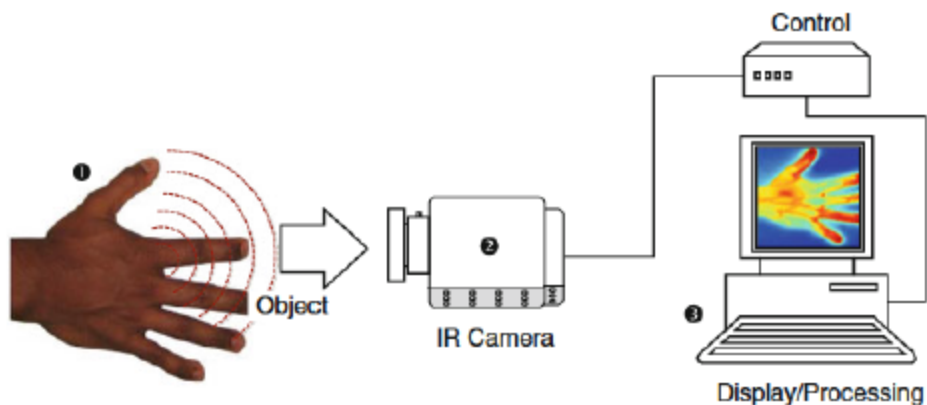
“Инфрацрвена термографија представља бесконтактну методу испитивања без разарања која омогућава мапирање термалних образаца, тј. термограма, на површини објекта, тела или система кроз употребу неког инфрацрвеног инструмента попут инфрацрвене камере.”

Ова дефиниција има за циљ да обухвати широк спектар поља примене укључујући биологију, грађевинарство, ваздушно-космички простор и слично. Различити термографски приступи се могу усвојити у зависности од ситуације, као што је описано даље у овом поглављу.

5.5.1 Приступи у инфрацрвеној термографији

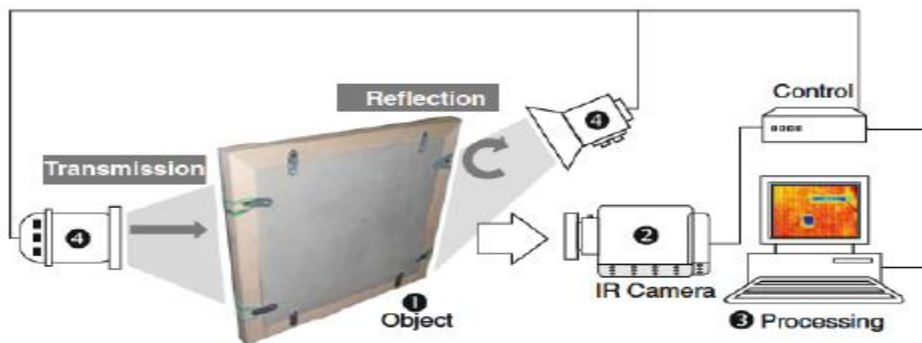
Инфрацрвена термографија се може поделити на два приступа: пасивни, код којег је температура материјала и конструкција у природном опсегу и различита од собне; и активни, код којег је потребан спољашњи стимуланс како би се индуковао термални контраст.

Експериментална конфигурација за пасивну инфрацрвену термографију је илустрована на слици 18. Као што се може видети са слике, објекат или систем (1) који има препознатљив термални контраст у односу на околину, може да се прати помоћу инфрацрвене камере (2). Контролна јединица и компјутерски систем (3) се користе како би се слике приказале и обрадиле уколико је потребно.



Слика 18. Експериментална конфигурација за пасивни приступ

Пасивни приступ је често квалитативан, као што је то дијагностика присуства дате абнормалности у односу на околину. Типична област примене обухвата праћење рада електронских компоненти или откривање влажности и изолационих проблема у зградама. Ипак, такође постоје и занимљиви термографски квантитативни приступ, који укључује преглед грађевинских објеката користећи соларне циклусе, детекцију продирања воде у авионима при слетању и слично. Активна термографија налази велику примену у области коришћења метода без разарања пошто се практично било који облик енергије може искористити, под условом да су термофизичке карактеристике довољно различите како би се произвео мерљив термални контраст. Штавише, због чињенице да се време за примену спољашњег стимуланса може прецизно контролисати, квантитативна карактеризација је могућа. Експериментална конфигурација за активну инфрацрвену термографију је слична као код пасивног приступа, као што се то може видети на слици 2, али се главна разлика огледа у постојању извора енергије (4) који је потребан да се генерише топлотни контраст објекта или система (1). Као што је приказано на слици 19, извор енергије може се налазити на истој страни као и камера (2), тј. у рефлексији (одразу); или са супротне стране од камере, тј. у трансмисији. Контролна јединица је потребна за синхронизацију извора енергије са систем за прикупљање и компјутерским системом (3) који може да се искористи за приказивање и/или обраду слика. У случају активне термографије, обрада сигнала је често обавезна јер доприноси побољшању контраста, као и због квантификације.



Слика 19. Експериментална конфигурација за активни приступ

Генерално, конфигурација одраза је најпогоднија за детектовање недостатака који се налазе близу загрејане површине, док конфигурација трансмисије омогућава детекцију недостатака близу краја површине због термичког ефекта ширења на почетку површине. Очигледно, преносни приступ није увек лако извести, а понекад то чак није ни могуће. Ипак, могуће је пронаћи занимљива поља примене. На пример, када је део шупаљ, може бити од користи применити интерну стимулацију протоком течности (воде) или гаса (ваздуха). У овој конфигурацији, промена температуре протока (топло ка хладном или обрнуто) омогућава откривање абнормалних варијација дебљине зиода или блокираних пролаза због одложеног доласка термалног поремећаја. Међутим, треба напоменути, да дубинско оштећење не може да се одреди преносним приступом с обзиром на то да топлота пређе исто растојања без обзира на то да ли постоји оштећење или не и ма колика год да је његова дубина

5.5.2 Методе побуде у активној термографији

Као што је поменуто раније, практично било који тип извора енергије може да се искористи како би се произвео термални контраст између чврстог материјала и површинског или потповршинског оштећења. Енергија може да се доведе коришћењем једног од следећих механизма:

- кондукција: ћебад за грејање, кесе са топлотом/хладном водом, снег или лед;
- конвекција: топли/хладан ваздух, топла/хладна вода;
- зрачење: халогене лампе, инфрацрвени грејачи;
- електромагнетно зрачење: микроталасно грејање;
- механичка стимулација: звучне и ултразвучне вибрације;
- електрични;
- хемијски; и
- други механизми.

Термичка стимулација ледом, снегом, хладним ваздухом или хладном водом је изводљива. Међутим, ове конфигурације не омогућавају лаку аутоматизацију или понављање. Из овог разлога, у вечини случајева, примењује се извори грејања. Извори грејања се могу поделити на:

1. Оптичке: Фотографски трепери представљају класичну конфигурацију познату као блиц или импулсну термографију. Такође је уобичајено користити халогене лампе за загревање на дужи период. Инфрацрвене лампе се такође користе, нпр. за линијско скенирање великих поршина уз помоћ транспортера, ху столова или робота. У свим случајевима, светлост (која садржи ултраљубичасто, видљиво или инфрацрвено зрачење) се пројектује на површину где се трансформише у топлоту и проводи кондукцијом унутар узорка.
2. Механичке: Претварачи се користе за убацивање звучних или ултразвучних таласа у узорак, који се раширују кроз узорак и стварају топлоту трењем (трљањем или

ударањем површина) углавном у дефектним областима. Ово је веома корисно за значајно смањење неуједначености грејања и унапређење видљивост дефеката.

3. Индукција: калем се користи за генерисање струјања на дубини обрнуто пропорционалној фреквенцији електромагнетног поља, које се користи за њихово генерисање. Овај тип извора грејања је ограничен на проводне материјале. Као што је случај за механичке побуде, индукционо грејање је мање угрожено од неуједначеног загревања пошто је топлота локално произведена.
4. Микроталаси: микроталасни извор уводи топлоту у узорак и, за хомогене узорке, ово омогућава детекцију потповршинских микроталаса апсорбујућих карактеристика (као што су области испуњене водом, металне жице или влакна). Квантитативне информације ових карактеристика, укључујући њихову дубину и топлотну дифузију, су могуће анализом временске и просторне зависности од температуре површине.

Не постоји извор побуде који се може универзално усвојити како би решио све случајеве, он мора бити изабран у складу са проблемом који се анализира. Нпр. фотографски трепери пружају снажан и брз (2 - 10 мс) топлотни пулс, а резултати су увек конзистентни чак и након више тестирања. Они представљају савршен избор за детекцију потповршинских раздвајања угљеничних влакана код композитних материјала, нпр., поред бројних других примера. Ипак, фотографски трепери можда и нису најбоље решење за проверу малих површинских или потповршинских пукотина у металним деловима, пошто би неуједначеност грејања у великој мери омело дефекте. Уместо тога, ултразвучно или индукционо грејање је прикладнија техника јер се, према овим конфигурацијама, топлота производи само на подручју с дефектом (а не на читавој површини) и тиме знатно смањујући утицај неуједначености грејања.

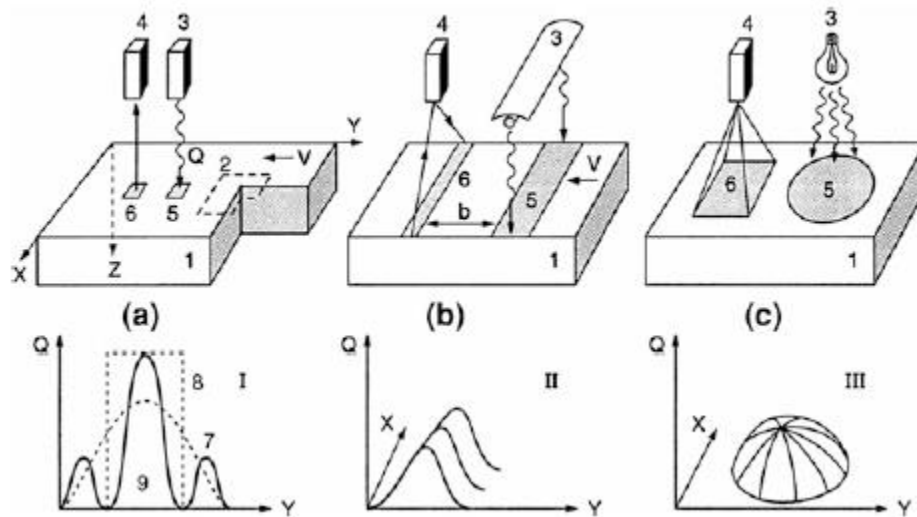
Неке од најзначајнијих карактеристика извора побуде су[19]:

- понављање, за поређење резултата добијених на више идентичних делова;
- униформност, за смањење неједнаких топлотних стимуланса који би могли да произведу лажна топла или хладна места који би се могли тумачити као потповршински недостаци;
- правовременост, пошто је адекватна синхронизација потребна између извора побуде и система за прикупљање слика у циљу обављања анализе слике; и
- трајање, које би требао прилагодити у складу са термалним својствима објекта који је под анализом, нпр., потребан је дужи период грејања за дебље и мање дифузне материјале који имају дубоке недостатке.

Без обзира на извор топлоте, загревање се може извести под различитим режимима, као што је то приказано на слици 20:

- тачкасто: само једна тачка на површини објекта се загрева, нпр. читава површина која се испитује може бити скенирана ласером;

- **линијски:** вертикална или хоризонтална линија се пројектује на површину која се испитује, нпр., ласером или инфрацрвеном лампом; и
- **површински:** читаво подручје испитиваног објекта се загрева одједном.



Слика20. Режији загревања; а) тачка, б) линија, ц) површина

Поред тога, топлота може бити испоручена коришћењем различитих стимулативних таласастих облика:

- **модулација:** користећи периодичне сигнале, нпр., синусоиде;
- **импулс:** кратак импулс у трајању од неколико милисекунди;
- **квадратни импулс:** дуг импулс у трајању од неколико секунди па чак и неколико минута;
- **корак:** континуирано грејање у трајању од неколико секунди; и
- **скенирање:** континуирана стимулација на статички објект из извора који се креће (или обрнуто, извор може бити статички, а објект да се креће).

5.5.3 Активне термографске технике

Неколико активних термографских техника је проистекло користећи специфичне конфигурације прилагођених одређеним областима примене. Главне активне технике су [20]:

1. Lock-in (синхрона) термографија (LT), код које се периодично загревање на датој фреквенцији користи у сталном режиму за мерење амплитуде термичког одзива.
2. Импулсна термографија(енг. Pulsed thermography, PT), код које се кратак енергијски импулс (од свега пар милисекунди) користи да би се загрејао објект који се испитује, температура површине се прати по принципу да се дефектно подручје хлади на другој брзини од недефектних области.
3. Квадратна импулсна термографија (Square pulse thermography, SPT), која је слична импулсној термографији, али се користи нешто дужи импулс (у трајању од неколико секунди до неколико минута), температура површине се прати током грејања и хлађења.

4. Корачно грејање (Step heating, SH), где се објекат загрева неколико секунди или неколико минута, слично као код квадратне импулсне термографије, али је разлика у томе што је само фаза загревања од интереса.
5. Термографија са тачкастим или линијским скенирањем (Лине Сцан Тхермограпху, ЛСТ), код које се тачкасти (нпр. ласер) или линијски (нпр. ИЦ лампа) извор топлоте креће по површини испитиваног узорка док загрева површину, а инфрацрвена камера прати загревање површине на фиксној удаљености и при истој брзини.

Неке од ових техника ће бити детаљно описане у наставку ове тачке. Све оне имају неке занимљиве предности и ограничења у односу на остале технике испитивања без разарања, о којима ће бити речено више у наредном делу.

Предности и ограничења инфрацрвене термографије

Све технике испитивања без разарања имају своје предности и мане. У случају термографије, неке од предности су [20]:

- брза инспекција;
- бесконтактност - нису потребне никакве спојнице при испитивању као код конценционалних метода испитивања ултразвуком. Треба напоменути, међутим, да вибротермографија захтева спојнице између претварача и узорка и да калемови код индукционе термографије морају бити релативно близу површине која се испитује.⁹+;
- безбедност особља - не постоје штетна зрачења као што је то случај код радиографије, коај се базира на примени Х зрака. Међутим, велике снаге спољашњег стимуланса (као што су то моћни блицеви) захтевају заштиту за очи. док топлотно инкуковани ултразвук захтева заштитне чепиће за уши.;
- могућност за снимање - резултати се могу релативно лако протумачити јер су (често) добијени у облику слике или видео формату;
- област примене је разноврсна и бројна; и
- јединственост - пошто представља алат за преглед појединих објеката који није могуће испитати коришћењем других метода за испитивање без разарања.

С друге стране, постоје и одређене недостаци који су специфични за инфрацрвену термографију и то су:

- неравномерно грејање - постоје тешкоће у добијању брзе, униформне и веома енергичне термалне стимулације на великој површини (нарочито за импулсивно акиван приступ). Због тог разлога, неколико техника прераде је поменуто у наставку
- топлотни губици, конвекција и топлотна радијација који се могу појавити и изазвати контраст који утиче на поузданост читавања података
- цена опреме, инфрацрвене камере и јединица за термалну стимулацију за активну термографију. Ово је релативно, активна термографија је знатно скупља од много скупља метода испитивања од неких других метода испитивања без разарања

(визуелна инспекција, ултразвучни уређаји и слично), али има веома конкурентне трошкове у поређењу са знатно софистициранијом опремом као што су поједини системи који се базирају на раду уз употребу ултразвука или вртложних струја.

- способност да детектује само дефекте који резултирају у мерљивој промени термичких својстава са инспекције површине
- способност да испита само ограничену дебљину материјала испод његове површине

варијације емисивности - нискоемисиони материјали снажно рефлектују термална зрачења из околине, површина објекта може да се користи за повећање или изједначавање емисије када је то могуће

5.5.4 Инфрацрвено зрачење

Инфрацрвено зрачење је тип електромагнетног зрачења, као што су то радио таласи, ултраљубичасто зрачење, X зраци, γ зраци и микроталаси. Инфрацрвено светло је део електромагнетног спектра, које људи сусрећу највише у свакодневном животу иако велики део тога прође незапажено. Оно је невидљиво људском оку, али људи га могу осетити као топлоту.

Инфрацрвено зрачење представља један од три начина како се топлота пренести са једног места на друго, а преостала два су конвекција и кондукција. Све са температуром изнад -268°C емитује инфрацрвено зрачење. Сунце одале половину своје купуне енергије у облику инфрацрвеног зрачења и велики део видљиве светлости се апсорбује и поново емитује као инфрацрвено зрачење.

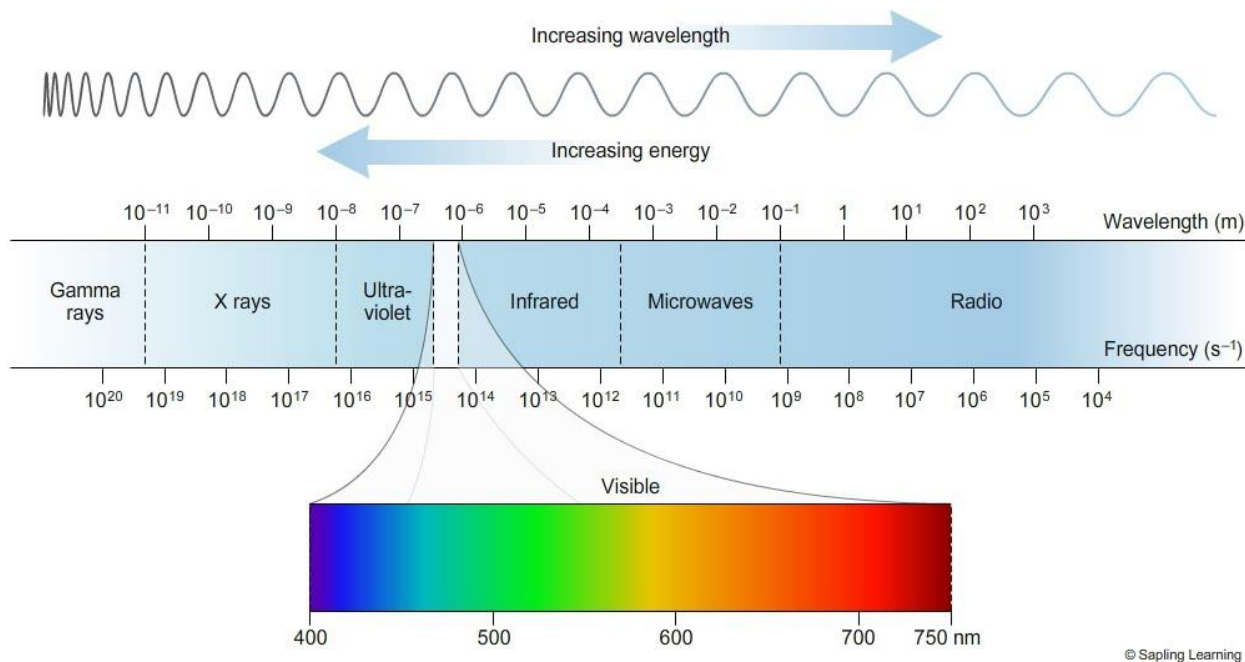
Према разним подацима, ужарена сијалица претвара само 10 процената своје електричне енергије у видљиву светлостну енергију, а преосталох 90 процената се претвара у инфрацрвено зрачење. Кућни апарати, као што су грејне лампе и тостери, користе инфрацрвено зрачење за пренос топлоте, као и индустријски грејачи попут оних који се користе за сушење и јачање материјала. Ови уређаји обично емитују зрачење црног тела са енергијом на излазу испод видљиве таласне дужине, мада се један део енергије емитује у виду црвеног светла.

Даљински управљач користи инфрацрвене таласе како би променио канал на ТВ-у. У даљинском управљачу, инфрацрвене светлеће диоде (eng. *Light-Emitting Diode* - LED) или ласер шаље бинарно кодиране сигнале као брзе он/офф импулсе. Детектор у ТВ-у конвертује ове светлосне импулсе који микропроцесору "говоре" да промени канал, промени јачину звука или обави неку другу функцију. Инфрацрвени ласери се могу употребити за двопунктну (енг. *Point-to-point*) комуникацију на удаљености од неколико стотина метара.

Електромагнетно зрачење се преноси у таласима на различитим таласним дужинама и фреквенцијама. Овај широк спектар таласних дужина је познат и као електромагнетни спектар [21]. Спектар је обично подељен на седам делова, поређаних према смањењу таласне дужине и повећању енергије и фреквенције. Ових седам облика

зрачења су: радио-таласи, микроталаси, инфрацрвено, видљива светлост, ултраљубичасто (UV), X зраци и γ зраци и приказани су на слици 21.

Инфрацрвени таласи нису дужи од таласа видљиве светлости, али су одмах за црвеног краја видљивог спектра. Инфрацрвено зрачење спада у опсег електромагнетног зрачења између микроталаса и видљиве светлости. Има фреквенцију од око 3 GHz па до 400 THz и таласну дужину од око 30 cm, иако ове вредности нису фиксне.



Слика 21. Спектар електромагнетског зрачења

Успешно и ефикасно коришћење машина често захтева комплетно разумевање како ће машина термички да реагује током свог рада. Особине материјала, које су зависне од температуре, термички индукованих деформација и температурних варијација, морају се озбиљно узети у обзир током разматрања при постављању безбедоносних прописа за управљање машином.

Топлотна енергија се често генерише и преноси када машина почне да испољава лоше карактеристике током рада најчешће због појаве трења, преоптерећења, хемијских реакција или оштећења изолације. Манифестује се неочекиваним порастом температуре, а правовременом акцијом је потребно утврдити узрок. Методе термалног праћења, које су на располагању приликом утврђивања дијагнозе, можемо поделити у две категорије: контактне и бесконтактне, а инфрацрвено термографија спада у групу бесконтактних метода.

5.5.5 Бесконтактне методе и инструменти који се користе

Бесконтактни приступ мерењу температуре користи принципе према којем сви објекти емитују електромагнетне таласе од њихове површине сразмерно њиховој топлоти. Фокусирањем овог вида зрачења од извора на сензор, његов интензитет може да се протумачи и прикаже као температура. Основна предност ове методе, која се користи у пирометрији и инфрацрвеном снимању, се огледа у томе што се велике површине могу брзо испитати са безбедне удаљености.

Пирометар (слика 22) је уређај са сензорима, који прихвата енергију таласних зрачења од видљивог дела светлости до инфрацрвеног дела електромагнетног спектра. Детектор, обично фокусиран на одабрану тачку површине која се мери кроз одговарајући објектив, конвертује енергију зрачења, коју емитује површине, у електрични сигнал који се касније тумачи како би се очитала вредност температуре. Једна врста пирометра, оптички или монохроматски пирометар, захтева ручна подешавања у зависности од тога шта се посматра кроз екран уређаја. Други тип, двобојни оптички пирометар, упоређује спектрално зрачење на две таласне дужине како би одредио температуру. Оба уређаја су веома сложена и обично се користе при лабораторијским испитивањима



Слика 22. Пирометар

Термалне фотографије представљају слике топлоте направљене користећи енергију зрачења, коју емитују објекти који се посматрају. Оне су створене помоћу инфрацрвене термовизијске камере, уређаја који бележи део зрачне енергије кроз различите технике

камера за скенирање стварајући просторну мапу на којој су приказане температуре. Инструмент обично садржи и систем за хлађење како би се елиминисали ефекти система буке који стварају детекцију сопствене температуре. Инфрацрвени термовизијски системи су доступни са широким опсегом могућности, функција и цене. Брзина скенирања може да варира у распону од неколико минута па све то само пар секунди по слици. Прецизност мерења температуре зависи од емисивности предмета, удаљености предмета и правилне употребе поуздане методе за лоцирање тачке интереса на слици.

Најновији тренд у инфрацрвеној термовизији представља спајање термовизијских камера са компјутерима. Електроника се налази на картици која може да се убади директно у компјутер и искористи предност приказивања резултата мерења на екрану велике резолуције, способности за обраду и чување података.

Инфрацрвени термометар

Брза провера температуре неких од кључних компоненти и опреме може да открије потенцијалне проблеме и спречи катастрофалне отказе. Инфрацрвени термометар(слика 23) је првобитно развијен да мери температуру објекта где обични термометри нису могли да се користе, попут објекта који се померају, објекта који су у вакууму или објекта чије мерење температуре захтева ограничен приступ..

Сва материја емитује енергију у форми топлоте. Уколико постоји температурна разлика између објекта, укључујући у окружење, онда се овај градијент може мерити. Уколико објекат који се испитује има исту температуру као и околина, размена енергије зрачења ће бити једнака нули. У сваком случају, карактеристика спектра зрачења зависи од апсолутне температуре објекта и околине. Ручни инфрацрвени термометри користе ту "зависност зрачења" температуре како би очитали вредност циљаног објекта и приказали резултате.

Инфрацрвена светлост делује као видљива светлост, тј. може се усмеравати, рефлектовати и апсорбовати. Ручни инфрацрвени термометар обично користи објектив како би усмерио светлост са једног објекта на детектор и овај тип термометра се зове термоспрега. Термоспрега апсорбује инфрацрвено зрачење и претвара га у топлоту. Што је већа инфрацрвена енергија, то ће термоспрег да буде топлији. Ова топлота се претвара у електричну енергију. Енергија се шаље на детектор, који је користи да би одредио температуру било чега где је термометар уперен. Што је већа енергија, објекат који се испитује је све топлији. Што је већа температура, више енергије се шаље детектору.. Ручни инфрацрвени термометри су брзи, прецизни и идеални за мерење на даљину. Бесконтактна функција омогућава мерење температуре без потребе да се додирне објекат који се тестира. Ово је веома важно не само за безбедност радника већ и за ограничавање потенцијалне контаминације производа.



Слика 24. Инфрацрвени термометри

Термографске камере

Термографске камере су уређаји који врше транслацију термалне енергије (топлоте) у видљиву светлост како би се анализирали одређени објекти. Добијена слика се назива термална слика или термограм и анализира се кроз процес који се зове термографија. Термографске камере су софистицирани уређаји који обрађују снимљене слике и приказују их на екрану. Ове слике могу да се користе за непосредну дијагнозу или обрађују кроз специјализовани софтвер за даљу комплетнију процену. Термографске камере(слика 25) доводе мерење температуре на виши ниво; уместо од добијања броја који би означио вредност температуре, добија се слика која показује температурну разлику од површине. Ови уређаји скупљају инфрацрвено зрачење из објекта и креирају електронску слику формирану на основу информација о температурној разлици.



Слика 24. Термографске камере

Термалне фотографије представљају слике топлоте направљене користећи енергију зрачења, коју емитују објекти који се посматрају. Оне су створене помоћу инфрацрвене

термографске камере, уређаја који бележи део зрачне енергије кроз различите технике камера за скенирање стварајући просторну мапу на којој су приказане температуре. Инструмент обично садржи и систем за хлађење како би се елиминисали ефекти система буке који стварају детекцију сопствене температуре. Инфрацрвени термовизијски системи су доступни са широким опсегом могућности, функција и цене. Брзина скенирања може да варира у распону од неколико минута па све то само пар секунди по слици. Прецизност мерења температуре зависи од емисивности предмета, удаљености предмета и правилне употребе поуздане методе за лоцирање тачке интереса на слици.

Термографске камере се могу купити са основним функцијама које омогућавају читавање температуре предмета на који је постављен фиксирани централни нишан на екрану, али и са додарним функцијама које омогућавају кориснику да одабере више покретних нишана и да одреди да сваки од њих показује високу, ниску или средњу температуру на екрану. Термографске камере имају вишеструку палету боја попут црно/беле палете, iron (гвожђе) палете или палете дугиних боја. Црно/бела палета боја помаже да се идентификују ситни детаљи на слици, а палета дугиних боја има највећу топлотну осетљивост за приказивање разлика у температури. Примери ове три групе палета и њихова разлика је дата на слици 25.



Слика 25. Приказ објекта испитивања у 3 палете: а) iron, б) црно/бела палета, ц) палета дугиних боја

Због чињенице да се топлотна енергија може рефлектовати од сјајних површина, термографске камере не могу да гледају кроз стакло. Термографске камере могу да се искористи за добијање информација о унутрашњости зида, али не могу да гледају кроз зид. Такође је веома важно зати да термографске камере као једини одлучујући фактор за потврду да проблем постоји. Коришћење других инструмената би такође требало бити заступљено приликом утврђивања да ли постоји проблем или не.

5.6 Системи за визуелни преглед стања унутрашњих и скривених површина

Визуелни преглед представља методу техничке дијагностике која се користи за испитивање оних области које су визуелно неприступачне. Визуелни преглед омогућава кориснику да визуелно испита неприступачне области користећи одговарајуће инструменте, који омогућавају да се испитивање уради на даљину и који омогућава да се види иначе невидљиви делови цеви, мотора, мењача или сличних делова, односно склопова. Без коришћења методе визуелног прегледа, корисник би морао да у потпуности

размонтира читав један склоп само како би могао да приђе делу који жели да испита при чему се губи време и повећава комплексност.

Метода визуелног прегледа има веома широку област примене. Користи се за једноставна испитивања, попут испитивања блокаде цеви, и комплексних делова, као што је то испитивање мотора авиона. Метода визуелног прегледа има кључну улогу у овим областима јер у великој мери утиче на повећање безбедности опреме, коју користе милиони потрошача. Поред тога, применом ове методе се може уштедети огромна количина ресурса пошто не захтева растављање на делове или модификацију опреме како би се извршио адекватан преглед оком.

Постоје два веома важна концепта која треба размотрити у вези са методом визуелног испитивања. Први се односи на аспект удаљености мерења. Потребна је могућност приступа области која треба да се испита. Други концепт се односи на аспект визуелне инспекције. Потребна је способност да се ефективно види и анализира област која се испитује. Постоји мноштво опција, модела и прибора који су доступни у области испитивања применом методе визуелног прегледа[22].

Постоје три главне групе опреме за визуелни преглед стања и то су:

- крути бороскопи;
- фибероскопи; и
- видеоскопи.

Иако може постојати значајан број физичких разлика између ове три категорије, све оне се односе на два основна концепта методе визуелног испитивања. У циљу приласка области која треба да се испита, сви ови инструменти имају уграђену тзв. цев за убацивање. Цев за убацивање представља део опреме која се убацује у предмет док се не постави поред или близу области која треба да се испита. Да би се ефикасно видела и анализирао област, сваки од ова три инструмента има јединствен начин за генерисање слике која се затим преноси до корисника. Главни фактор од којег зависи колико јасно ће се видети слика је светлост и због тога сви ови инструменти захтевају довођење спољашње светлости.

5.6.1 Крути бороскопи

Крути бороскопи представљају најстарију групу која се користи у овој методи, а уједно и најједноставнији тип бороскопа. Основне компоненте овог типа бороскопа представљају шупља крута цев и оптички систем, који је уграђен у ову круту цев. Светлосни извор се доводи преко круте цеви и усмерава на област која се испитује. Слика се фокусира и усмерава дуж цеви кроз прави пут док не дође до корисника на увид, који слику посматра кроз уграђени окулар.

Као што и само име каже, крути бороскопи нису флексибилни. Они су прави и крути што значи да захтевају праволинијску линију посматрања области која се испитује. Треба напоменути да само цев за убацивање захтева ову линију посматрања. Крајњи део цеви може да садржи и сочива која се налазе са стране како би корисник могао да види и

шта се налази поред области коју испитује и уопште како би могао лакше да убаци цев. Најнапреднији бороскопи имају могућност промене угла посматрања, а неки чак имају и способност зумирања где се сочиво може померати и самим тим мењати фактор увећања.

Крути бороскопи се углавном упарују са извором светлости који се налази поред корисника. Светлост путује дуж цеви за убацивање кроз сноп оптичких влакана, која се затим усмерава ка области испитивања чиме се та област правилно осветљава.

Напреднији бороскопи поседују могућност повезивања камере, које се могу везати за окулар путем додатака за стезање сочива. Међутим, ове камере нису типичне за индустријска окружења у којима се крути бороскопи обично користе. Поред тога, ове камере су првенствено дизајниране за сликање и снимање из неког другог извора.

Имајући у виду два главна концепта методе визуелног испитивања (приступ области, посматрање и анализирање области), крути бороскопи нису веома ефикасни у могућности приступа области која треба да се испита. Када је потребан најмањи или најнежнији покрет како би се приступило области, крути бороскопи нису у могућности да јој приступе на лак начин баш због непостојања могућности флексибилности цеви за убацивање. Ипак, они су веома добри у огледању области која се испитује пошто само сочиво раздваја корисника и област. На слици 27 је приказан изглед крутих бороскопа, као и слика коју генеришу.



Слика 27. Бороскоп и пример бороскопске фотографије

5.6.2 Фиберскопи

Фиберскопи такође поштују два основна концепта, као и крути бороскопи, а разликују се од њих због веће дужине цеви за убацивање и због флексибилности исте цеви. Фиберскоп преноси слику објекта испитивања натраг до корисника путем снопа оптичких влакана. Влакна у снопу су распоређена једнако на оба краја и у идентичном распореду. Светлост путује од слике, преко лукова сваког влакна појединачно који су организовани у мозаичком облику помоћу којег стварају слику, натраг до корисника.

Захваљујући флексибилној природи фиберскопа, цев за убацивање може да се савија и да на тај начин знатно лакше приступи тешко приступачним областима, док бороскопи не могу и ту се огледа њихова највећа предност. Рад фиберскопа се такође заснива и на принципима могућности манипулације кретања оптичког врха фиберскопа на све четири стране. Манипулација кретања се једноставно контролише закривљењем краја цеви за убацивање путем могућности окретања од 360 степени. Једноставним окретањем цеви, фибероскопи могу детаљно приказати област која се испитује, као и њену околину. Флексибилна цев за убацивање омогућава кориснику да брже и лакше приђе области која треба да се испита. Манипулисањем цеви могу да се врше фини покрети у циљу што бољег постављања на одређени део области која се испитује.

Неки фибероскопи имају оптички врх, који може да се замењује, који су заправо обични објективи који се могу уклонити са краја цеви за убацивање. На овај начин, корисник може да изабере различите путање за кретање, одабере дубину поља и угао под којим ће прићи области коју жели да испа. Ово се може урадити једноставним мењањем малог оптичког врха што знатно убрзава процес испитивања пошто би у случају крутих бороскопа било потребно приближити читав бороскоп. Фибероскопи се обично користе у комбинацији са посебним извором светлости и камере, као што је то случај и код крутих бороскопа.

Док фибероскопи имају предности у погледу флексибилности, највећи недостатак се огледа у томе што су снопови оптичких влакана обично крти по природи. Због тога, услед савијања цеви за убацивање, влакна почињу да се ломе током неког временског периода. Последице лома су јасно изражене на генерисаној слици у облику црних тачкица јер ова влакна више нису у стању да правилно преносе светлост. Фибероскопи такође производе слике најлошијег квалитета, а то је последица природе снопа оптичких влакана. Генерисана слика има препознатљив облик саћа где свако оптичко влакно представља једно саће, као што је јасно изражено на слици 28.

Што се тиче два основна концепта, фибероскопи су веома добри што се тиче приступа области која треба да се испита, али нису превише адекватни када корисник треба да види и анализира област. Главни разлог за ово је низак квалитет слике коју фибероскопи генеришу. На слици 28 је приказан изглед фиберскопа, као и пример слике коју они генеришу.



Слика 28. Фибероскоп и пример фиберскопске фотографије

5.6.3 Видеоскопи

Видеоскопи представљају најновију еволуцију у пољу опреме за визуелни преглед. Они су се драстично побољшали од средине '90их година овог века када су се уједно и први пут појавили па све до данас. Ова врста опреме за визуелни преглед поседује дугачку, флексибилну цев за убацивање и знатно напредније измењиве оптичке врхове за разлику од оних који се користе код фиберскопа. Главна разлика у којима се огледа рад видеоскопа у односу на претходне две групе представља начин преношења слике јер се код видеоскопас уместо преношења слике путем снопа оптичких влакана, она преноси електричним средствима јер се слика области која се испитује пројектује на чип камере. Постоје два типа чипова за камере, и то су CCD (енг. *Charged Couple device*) чипови и CMOS (енг. *Complementary metal-oxide-semiconductor*) чипови. Генерално, CCD чипови се користе код најнапреднијих система због веродостојније осетљивости на светлост и знатно боље препродукције слике[23].

CMOS чипови имају тенденцију да буду бучни и да обезбеде лошији квалитет слике, али су зато знатно јефтинији и захтевају много мање енергије за рад и зато оба врста ових чипова има своје карактеристично поље примене. Обе врсте чипова конвертују слику у електрични сигнал, који путује кроз цев за убацивање путем електричних жица. Робусност цеви за убацивање је знатно већа од крутих бороскопа и фибероскопа пошто су електрични каблови сами по себи знатно робуснији.

Увођење чипова за камере је омогућило и увођење дигиталних видео сигнала на ову врсту опреме за визуелно испитивање. Видео сигнал који се преноси кроз цев за убацивање путем електричних жица се приказује на монитору који се налази поред корисника. Да би ово било могуће, електрични сигнал се мора обрадити уз помоћ процесора који се налази у бази јединице која је обично повезана са монитором. Током овог процеса, многа побољшања и функције се могу додати видео снимку. Једна од најбитнијих функција је могућност видеоскопа да сами створе и ускладиште слике и видео снимке без додавања било каквих додатака.

Остале функције укључују хватање бележака, штампање времена и датума и обележавање подручја које се испитује. Додатна функција, која у великој мери може да побољша успешност мерења, је могућност да се на даљину провере било какви дефекти који се виде на слици користећи технологије попут мерења на даљину, која представља технологију код које оптички врхови имају два сочива, која омогућавају прецизно мерење у три димензије под било којим углом. Мерење на даљину омогућава мерење дужине, удаљености, дубине и површину дефекта.

Видео снимак се такође побољшава када се дигитални сигнал конвертује у слику на монитору. Ово укључује опције попут контроле осветљења, повећање ивице дефекта како би се јасније анализирао проблем, смањење буке и аутоматско "white balance" подешавање. "White balance" подешавање подразумева правилно балансирање боја, односно омогућава стварање топлијих и хладнијих слика у зависности од јачине светлости која се користила приликом испитивања.

Велико унапређење, које је могуће остварити применом CCD технологије, представља могућност прилагођавања параметара. Повећање прамтераских вредности за CCD чип чини га осетљивијим на светлост, а ово је важно јер се многа испитивања врше у

врло мрачном окружењу. Напредни алгоритми и побољшања попут ширег домета омогућују подешавања најмрачнијих области слике, која није могуће урадити помоћу бороскопа и фиброскопа.

Још једна карактеристика омогућена кроз видеоскоп је употреба ЛЕД (енг. *Light-emitting diode*) технологије. Најјефтиније LED диоде углавном имају плаву нијансу, али најнапреднији телескопи користе топлије и природније бело светло LED диода. LED технологија се користи у две методе и на два начина. Неки трансмићују LED кроз танка влакна која су ефикасна за краће удаљености, али у случају слабе заштићености може доћи до лома тих влакана. Друга метода представља постојање микро LED диода инсталираних на самом крају цеви. Ово омогућава велику олакшицу за дуже цеви јер представља најбољи и најефикаснији метод преношења светлости. Видеоскопи са својом дугом, флексибилном и робусном цеву за убацивање свакако омогућују лак приступ области коју треба испитати. Висок квалитет слике коју генеришу мали CCD чипови или јефтинији CMOS чипови, омогућују кориснику да јасно види област коју испитује. Побољшања и разна функције које се могу искористити (поготово опција мерења на даљину) у великој мери омогућују кориснику да детаљно анализира област.

Јасно је да видеоскопи имају знатно више могућности и предности у односу на круте бороскопе и фиброскопе, међутим, они су знатно скупљи од поменуте групе и због тога имају мању употребу. Применом техничке дијагностике методом визуелног испитивања кроз ове технологије, индустрије су у стању да економично и безбедно продуже живот опреме која покреће модеран свет. На слици 29 се је дат изглед видоскопа, као и пример слике коју ова група инструмената за визуелно испитивање генерише.



Слика 29. Видеоскоп и пример видеоскопске фотографије

5.7 Ултравучно испитивање

Ултравучно испитивање представља методу испитивања без разарања код које се високе фреквенције звучних таласа усмеравају на материјал који се мери, а звук који излази из узорка се затим детектује и анализира. Већина ултравучних испитивања се обавља на фреквенцији између 0.5 и 25 MHz изнад фреквенцијског опсега чујности људског уха, које износи од 2 Hz до 20 kHz. Ултравучни таласи представљају механичке вибрације честица медијума у који они путују. Таласи су представљени синусоидалним таласима одређене амплитуде, фреквенције и брзине. Амплитуда представља померање честица медијума од њиховог главног равнотежног положаја. Фреквенција је број циклуса у секунди и дужина једног циклуса се назива таласна дужина. Мерна јединица за таласну дужину, према SI систему је метар [m]. Веза између фреквенције, таласне дужине и брзине је дата једначином:

$$v = \lambda * f \quad (4.1)$$

где је:

v - брзина таласа

λ – таласна дужина

f – фреквенција

Сваки медијум кроз који звучни таласи путују се карактерише акустичном импедансом означеном са “Z” која представља отпор којим се медијум супротставља продирању звука који путује кроз њега. Пошто је вредност акустичне импедансе различита за различите материјале, брзина звучних таласа је такође различита за различите материјале. Брзина такође зависи и од еластичних особина медијума и задата је једначином:

$$v \cong \left(\frac{q}{\rho}\right)^{1/2} \quad (4.2)$$

где је:

q – модул еластичности

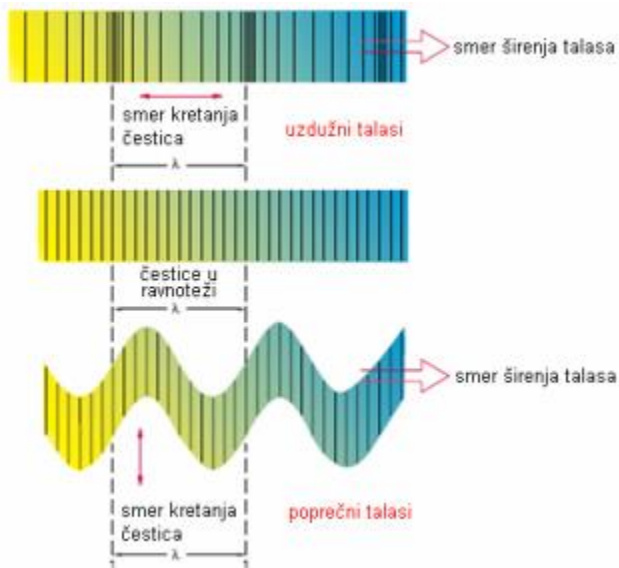
ρ – густина

Такође важи и једначина:

$$Z = q * \rho$$

Постоје два основна типа ултравучних таласа и то су лонгитудинални (уздужни) таласи и трансверзални (попречни) таласи, а остали типови ове врсте таласа представљају површински и тзв. треперави таласи. Пример уздужних и попречних таласа је дат на слици 30. Уздужни ултравучни таласи су они таласи код којих се зоне компресије и разређености стварају вибрацијом честица. Смер осциловања честица је паралелан смеру правцу простирања таласа. Због своје лаке генерације и детекције, овај тип ултравучних

таласа има највећу примену у ултразвучним испитивањима. Скоро сва ултразвучна енергија која се користи за испитивање материјала потиче се ствара у овом режиму и касније се конвертује у друге режиме за специјална испитивања. Овај тип таласа се може ширити кроз тела са чврстим, течним и гасовитим агрегатним стањем. Код попречних таласа, смер померања честица је под правим углом у односу на правац простирања.



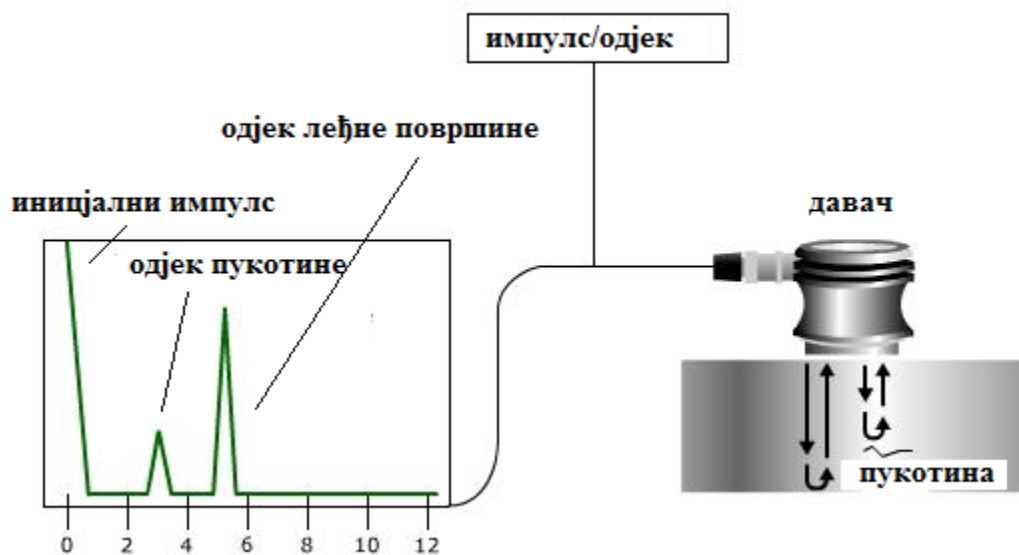
Слика30. Уздужни и попречни таласи

За све практичне сврхе, попречни таласи се могу ширити само кроз тела са чврстим агрегатним стањем. То је последица тога што је раздаљина између молекула и атома толико велика у течностима и гасовима да привлачност између њих довољна да омогући кретање атома у односу на молекуле више од делића сопственог кретања и због те неспособности таласи убрзо слабе. У одређеном медијуму, брзина попречних таласа представља половину брзине уздужних таласа.

Ултразвучно испитивање користе високе фреквенције енергије звука за обављање прегледа и узимање мера. Ултразвучно испитивање може да се користи за детекцију/евалуацију мана, мерење димензија, испитивање особина материјала и још много тога. Типична метода која функционише на принципу импулс и одјека (енг.pulse-echo) је дата на слици 31.

Типичан систем за испитивање ултразвуком се састоји од неколико функционалних целина као што су пријемник, давач и уређаја за приказивање резултата. Пријемник је електронски уређај који може да произведе електричне импULSEсе високог напона. Вођен пријемником, давач (трансдуктор) генерише високе фреквенције ултразвучне енергије. Енергија звука се затим уводи и шири кроз материјал у форми таласа. Када талас на свом путу наиђе до неког оштећења попут пукотине, део енергије се са површине материјала се враћа[24]. Рефлектовани таласни сигнал се трансформише у електрични сигнал путем

давача и приказује се на екрану. Јачина сигнала се приказује у односу на време када је први пут примљен одјек[18].

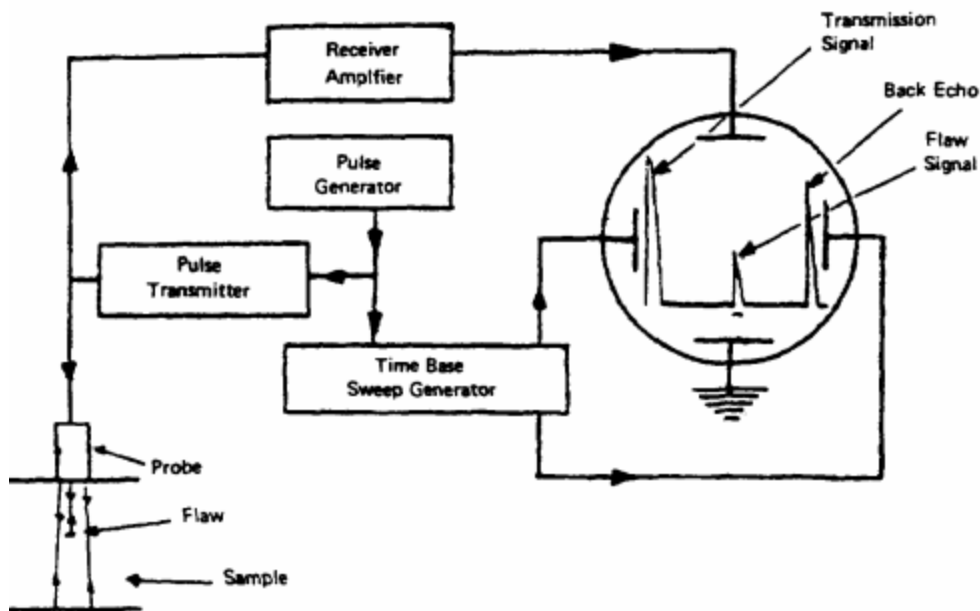


Слика 31. Ултразвучно мерење

Из сигнала се могу сазнати информације о локацији, величини, оријентацији и осталим особинама оштећења.

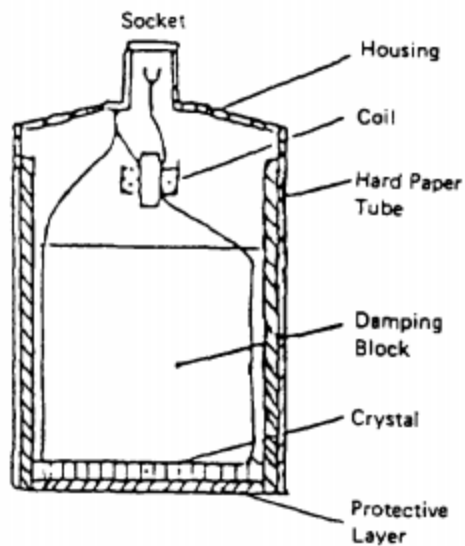
5.7.1 Опрема за ултразвучно испитивање

Опрема за ултразвучно испитивање се углавном састоји од детектора грешке, претварача и блокова за калибрацију. На слици 32 је дат шематски принцип испитивања коришћењем ултразвучне методе. Генератор импулса генерише импулсе наизменичних напона који побуђују кристал у сонди за генерисање узорка спајањем сонде на њега. Таласи се рефлектују са било ког облика дисконтинуитета и враћају се натраг у сонду. Дисконтинуитет представља термин који се користи када још није са сигурношћу утврђено да ли је дошло до неког дефекта. Овде се кроз обрнути пиезоелектрични ефекат, ултразвучни таласи претварају у напонске импулсе и преносе се до катодне цеви преко појачала. Ови импулси се затим приказују на CRT екрану као импулси крајњих амплитуда и могу да се тумаче као сигнали узорка са дисконтинуитета унутар њега.

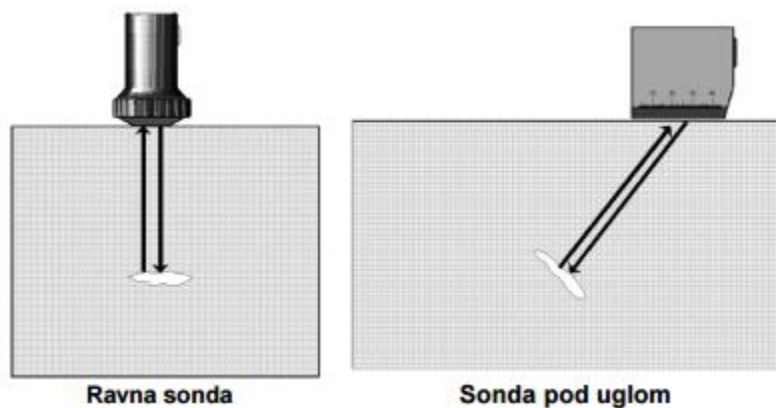


Слика 32. Типична опрема за ултразвучно испитивање

Ултразвук се генерише у неким природним или вештачки направљеним кристалима који показују ефекат пиезоелектрицитета, односно производе наелектрисање због подвргнутости механичком притиску. Стога на примени електричних импулса, фреквенција ових кристала производи ултразвучне импласе који су заправо механичке вибрације. Најчешће коришћени материјали су кварц, литијум сулфат, баријум титанат и олово метаниобат. Правилно исечени кристали се налазе у кућишту, а читав склоп се назива ултразвучна сонда. На предњој страни кристала (странице која долази у контакт са узорком) се налази акрилни комад који служи да се избегне хабање и кидање кристала. На другој страни кристала се налази дампинг материјал попут волфрам аралдита. Дампинг материјали су потребни како би се смањиле вибрације кристала након преношења ултразвучних импулса и како би кристал био ефикаснији као пријемник звучне енергије. Дампинг материјали су стога неопходни како би се побољшала резолуција сонде. Типични пример сонде која се користи код ултразвучних испитивања је дат на слици 33. Сонда генерише ултразвук одређене фреквенције која зависи од дебљине пиезоелектричног кристала. Звук излази из сонде у облику зрака који има облик купе, који има два различита опсега који се називају даља зона и ближа зона. Већина тестова се спроводи користећи опсег далеке зоне зрака. Сонде које шаљу ултразвучни зрак у узорак под правим угловима на површину се називају равне сонде, док се оне које шаљу зракове у узорак под одређеним угловима зову сонде под углом и представљене су на слици 34.



Слика33. Типичан изглед сонде



Слика 34. Основне сонде

Поља примене ултразвучног испитивања

1. мерење дебљине
2. детекција дефеката (ултразвучна дефектоскопија)
3. остала испитивања

Мерење дебљине

Мерење дебљине користећи ултразвук се изводи тако што се користе технике резонанце или техника одбијања импулсног еха (слика 35). Неке типичне области примене су:

- мерење дебљине судова под притиском, цевовода, резервоара за хемикалије и прецизно процењивање ефеката хабања и корозије без потребе демонтажа;
- мерење дебљине бродских корита за контролу корозије;
- контрола операција машинске обраде;

- мерење дебљине материјала током производње; и
- испитивање топлотних цеви у нуклеарним реакторима.



Слика 35. Инструменти за мерење дебљине

Детекција дефеката

Типични дефекти на оје се налази у индустријским материјалима су пукотине, порозност, ламинација, шупљине, корозија и слични.

Испитивање заварених спојева у посудама под притиском, контејнерима за индустријске течности и гасове, цевоводима, челичним мостовима, рамовима и крововима. Типичне области примене су:

- испитивање ливеног алуминијума, челика и других одливака
- испитивање ваљаних полуга
- ултразвучна испитивања легура челичних одливака за велике роторе турбина
- испитивање ротора млазних мотора
- откривање пукотина насталих услед корозије



Слика 36. Инструменти за дефектоскопију

Остала испитивања

Поред поменутих поља примене, постоји још велики број других примера где се користи овај вид испитивања. Значајнија поља примене су она чије се испитивање заснива на мерењу звучне брзине. Нека од тих поља су:

- процена густине и затезе снаге керамичких производа
- утврђивање разлика између различитих врста легура
- детекција раста зрнаца услед прекомерног загревања
- процена вредност еластичних модула метала у широком посегу температуре и притиска
- мерење нивоа течности у контејнерима за индустријске течности

Предности коришћења ултразвучне методе:

- супериорнија снага продирања која омогућава детекцију дефеката који се налазе дубоко у делу;
- висока осетљивост која омогућава детекцију изузетно малих дефеката;
- већа прецизност у односу на друге методе без разарања у одређивању положаја дефекта;
- потребна доступност само са једне површине;
- испитивање се изводи електронским путем што омогућава читавање података дефеката у исто време кад се открије што чини ову методу веома ефикасном;
- лака преносивост опреме за мерење;
- нема опасности по оператера или непосредног особља и нема никаквог утицаја на опрему и материјале у близини.

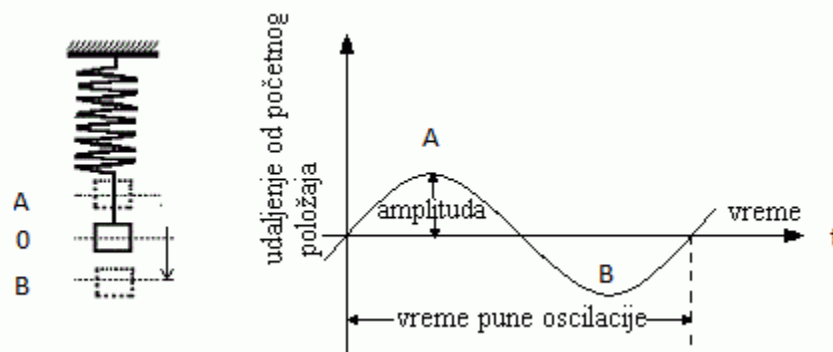
Недостаци коришћења ултразвучне методе:

- ручно управљање захтева посебну пажњу искусних техничара;
- потребно је обимно техничко знање за развој процедуре испитивања;
- веома је тешко испитати делове који су груби, неправилног облика, веома мали или танки;
- може доћи до прекида у танком слоју одмах испод површине који се не могу детектовати;
- потребан је флуид за обезбеђивање ефикасног преноса ултразвучне енергије таласа између претварача и делова који се испитују;
- потребни су референтни стандарди за калибрацију опреме и карактеризацију дефеката.

5.8 Вибрације

Према ISO 2041:2009, вибрације се дефинишу као механичке осцилације око равнотежног положаја. Осцилације могу бити периодичне и непериодичне (насумичне). Такође могу бити присилне и слободне (резонантне), које се јављају природном фреквенцијом вибрирајућег објекта. Ротирајући електрични вентилатор, којег покреће мотор са константном брзином, је пример присилне вибрације. Вибрирајућа жица од гитаре или

звоно које звони су примери резонанце. Осцилације могу бити веома једноставне и у облику синусоиде, као што је пример жица од гитаре, и у комплексном таласастом облику, који се састоје од много различитих фреквенција и различитих стопа пригушења, као што је звук столице која се вуче по поду. Већина индустријских вибрација од интереса су сложене и састоје се од много фреквенција и амплитуда, као што су вибрације које се јављају у великом вишестепеном компресору. Амплитуда представља највеће растојање од равнотежног положаја. Клипни компресори садрже клипове, вентиле, главне покретаче (нпр. мотор), филтере, серво системе, програмибилне логичке контролере (енг. *Programmable Logic Controllers - PLC*), цеви и мноштво затварача и оквира. Све ове компоненте вибрирају задатом фреквенцијом компресора, фреквенцијом главног покретача и резонантном фреквенцијом каишева, снопова, зупчаника и осталих компоненти. Оне такође вибрирају на високим фреквенцијама које су повезане са брзим ваздушним покретима, на фреквенцији разлике, суме и секундарних фреквенција. На слици је приказан синусоидни талас где су сликовити објашњени појмови амплитуде и осцилације, као и време трајања.



Слика 37. Параметри вибрација

Вибрација се може описати кроз следеће параметре:

1. Фреквенција
2. Померај
3. Брзина
4. Убрзање

Фреквенција, f , се односи на периодичну промену неке величине, односно представља број пуних осцилација у јединици времена. У међународном систему јединица, тј. SI систему, мерна јединица за фреквенцију је херц (Hz), који представља једну осцилацију (промену) у секунди. Фреквенција напона, који се користи у домаћинствима широм Европе, је 50 херца. Поред ове мерне јединице, фреквенција вибрација се такође може описати бројем и циклуса у секунди CPS (енг. *Cycle per second*). Опсег фреквенција се креће од 400 Hz до 20000 Hz. Реципрочна вредност фреквенције, $1/f$, се зове период осциловања и изражава се у секундама, милисекундама или другим јединицама. Фреквенција се такође може изразити у радијанима по секунди, што се понекад назива и

угаона фреквенција и обележава се грчким словом “ ω ”. Радијан представља угао код центра круга затворен луком кружности, који је једнак у дужини полупречнику круга. Пошто обим круга износи 2π пута његов радијус, закључујемо да постоји 2π радијана у кругу, а пошто круг има 360 степени даље следи:

$$2\pi \text{ rad} = 360^\circ; \text{rad} = \frac{360}{2\pi}; \text{rad} = \frac{360}{2 \cdot 3.14}; \text{rad} \approx 57.29578^\circ \quad (4.2)$$

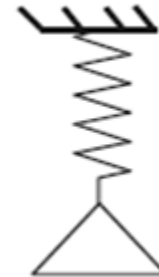
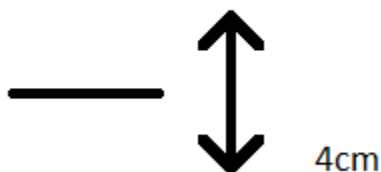
Из једначине закључујемо да радијан има приближну вредност од 57 степени.

Замислимо да на опругу са слике 38 делује нека непокретна маса. Систем мирује и у равнотежи је. Ако повучемо масу на доле на раздаљину од 2 cm, за растезање опруге на дужину која је 2 cm већа од њене дужине када је систем у равнотежи, кажемо да је дошло до вертикалног померања у износу од 2 cm. Ако се маса затим пусти, опруга је вуче на горе у свој првобитни положај, тј. равнотежни положај, и опруга наставља да се креће све до позитивног највишег помераја око 2 cm изнад свог равнотежног положаја. Највиши померај, који се често назива и P_k (врх, енг. *peak*), се такође назива и померај амплитуде и представља максималну вредност од 0 до равнотежног положаја. Маса наставља да осцилује око тачке равнотеже док трење постепено не смањи њену вертикалну осцилацију до нуле и док не почне да мирује у свом првобитном равнотежном положају. Ово осциловање представља тип резонантне вибрације на "природној" фреквенцији система. Уколико би се вибрација присилила да се постави у стање мировања, P_k амплитуда се не би смањила, али би наставила да се креће у распону од -2 cm до 2 cm пошто би маса била приморана да осцилира између ове две тачке.

+2 cm pozitivni najveći pomeraj

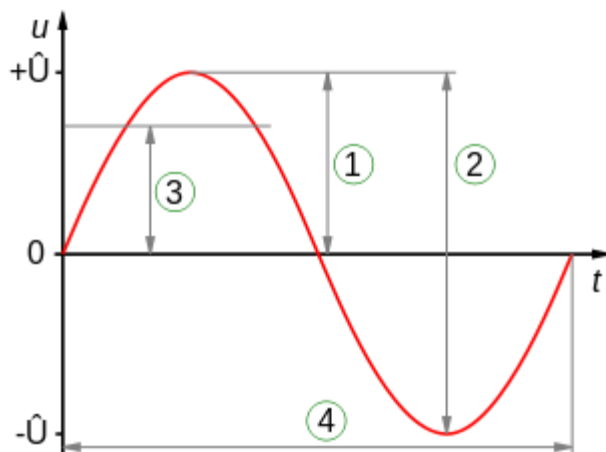
ravnotežni položaj

-2 cm negativni najveći pomeraj



Слика 38. Највећи и најмањи померај опруге

Врх-врх померај P_p (енг. *peak-to-peak*), представља удаљеност од највише до најниже тачке у циклусу, односно у овом случају 4 cm. На слици 39 испод су приказане вредности главни карактеристика амплитуде.



Слика 39. 1) нула-врх амплитуда, 2) врх-врх амплитуда, 3) средњи РМС, 4) период осциловања

Врло ниске фреквенције вибрација се често изражавају у мери помераја, док се веома високе фреквенције вибрација изражавају у погледу убрзања.

Вибрације нису ограничене на праволинијско кретање и могу бити ротациона (торзиона) као у случају радилице, моторног вратила или осовине точка. Ротационе, односно торзионе вибрације представљају осцилаторно увртање осовине слично као увртању корпе која виси са дрвета уз помоћ конопца. Полазећи од положаја мировања, уколико би се корпа окренула у смеру казаљке на сату око осе конопца и затим пустила, ротирала би у смеру супротном од смера казаљке на сату ка првобитном положају мировања и наставила би да ротира око свог положаја мировања док се не заустави. Затим би се ротирајући у смеру казаљке на сату вратила у свој положај мировања и наставила да се ротира час у смеру казаљке на сату, час у супротном смеру са све мањом амплитудом док се не би коначно зауставила у свом првобитном положају мировања. Код торзионих вибрација, угаони померај је аналоган праволинијском померању и може се изразити кроз јединице степена и радијана.

Други термин који се користи да би се описала количина вибрације је брзина, ϑ , која представља стопу промене помераја. Изражена математички, брзина представља први извод помераја, а пише се као:

$$\vartheta = \frac{dx}{dt} = d/d_t [x_{peak} \sin(\omega t + \phi)] \quad (4.3)$$

Код торзионог вибрирања, ротациона или угаона брзина, ω , је аналогна праволинијској брзини код праволинијског вибрирања. Уколико бисмо наставили са примером корпе обешеном на дрвету, ω представља стопу промене угла, θ , и може да се изрази у степенима у секунди, или радијанима у секунди.

Трећи термин, који се користи да би се описала количина вибрација, је убрзање, α , а то је заправо мера промене брзине у јединици времена. Изражена математички, убрзање је други извод помераја или први извод брзине. Треба напоменути да је убрзање

пропорционално негативном померају. То значи да је убрзање у највећем негативном домаћају, када је померај у највећем позитивном. и да је убрзање ван фазе у померају од 180° .

Код торзионих вибрација, ротационо или угаоно убрзање, α , је аналогно праволинијском убрзању. У већ поменутом примеру корпе која виси с конопца, угаоно убрзање представља стопу промене угаоне брзине и може се представити у јединицама радијана по секунди на квадрат, степенима по секунди на квадрат или броју орбртаја по минути на квадрат. Изражено математички, убрзање представља први извод брзине и пише се као:

$$\alpha = d_{\vartheta}/d_t[\omega X_{peak} \cos(\omega t + \phi)] \quad (4.4)$$

5.8.1 Мерење вибрација и инструментација

Пред започињање мерења вибрација, приликом одлучивања које машине ће се пратити, увек се приоритет даје критичним машинама. То је исти случај као са праћењем здравља људи јер је непримерено да се пажљиво прати здравље савршено здравих људи, а да се тек тако одрекне праћење здравља људи којима је то неопходно. Исто важи и када је у питању праћење машина.

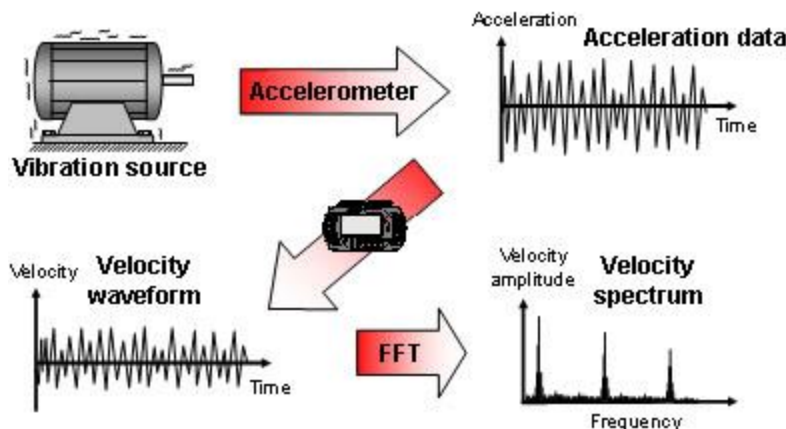
У принципу, следеће критичне врсте машина треба да се прате на редовној бази како би се избегли неочекивани и скупи проблеми:

1. машине које захтавају скупе, дуге и тешке поправке уколико доспеју у стање отказа
2. машине које су од кључног значаја за производњу
3. машине за које се зна да често трпе штету
4. машине које се процењују на њихову поузданост
5. машине које утичу на безбедност човека и безбедност животне средине

Пре него што се започне са мерењем вибрација, неопходно је прикачити сензор који може да детектује понашање вибрација на машину која се испитује. Различите врсте сензора за вибрације су доступне, али одређена врста сензора која се зове акцелерометар се углавном користи пошто нуди многобројне предности у односу на друге сензоре. Акцелерометар је сензор који ствара електрични сигнал који је пропорционалан убрзању компоненте која вибрира за коју је прикачен акцелерометар. Убрзање компоненте која вибрира је мера која показује колико брзо се брзина компоненте мења.

Сигнал убрзања који производи акцелерометар се преноси на инструмент који заузврат претвара сигнал у сигнал брзине. У зависности од избора корисника, сигнал се може приказати у облику таласа брзине или спектра брзине. Спектар брзине је изведен из таласа брзине помоћу математичког прорачуна познатог као Брза Фуријеова трансформација (енг. *Fast Fourier transform - FFT*).

Слика 40 испод представља веома поједностављено објашњење како се добијају подаци вибрација:



Слика 40. Добијање података вибрација

Већина машина има обртне механизме. Мотори, пумпе, компресори, вентилатори, покретне траке и мењачи сви имају ротационе механизме, који се веома често користе у машинама.

Већина ротационих механизма имају лежајеве који подржавају тежину ротационих делова и носе снагу повезану са ротационим кретањем и вибрацијама. У принципу, лежајеви носе велике количине силе. Није изненађујуће што су лежајеви најчешће места где долази до оштећења и где се симптоми прво развијају. Мерење вибрација се зато обично узима из лежајева машина уз помоћ акцелерометра који је монитран на или близу лежајева.

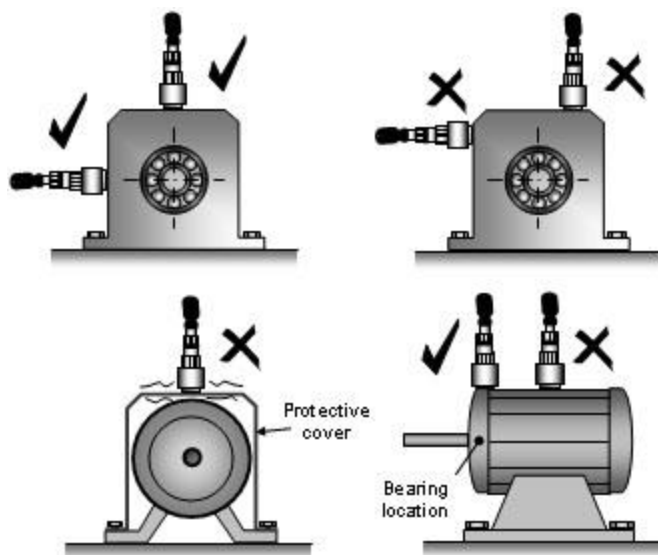
Будући да закључци у вези стања машина, и самим тим да ли су новац и безбедност људи под ризиком или не, зависе од тачности мерења, мора се осигурати да се мерења изводе веома пажљиво. Од велике је важности запамтити да од начина на који се монтира акцелерометар зависи тачност мерења и зато се он мора поставити према прописаној процедури за одређену компоненту.

Осигуравање да ће тачност мерења да буде поуздана се остварује кроз поштовање одређених смерница попут [26]:

1. монтирати што је ближе могуће лежајевима

Замислимо да доктор током рутинског послушкивања пулса срца, стетоскоп постави преко одеће и то ближе бубрегу него срцу. Вероватно бисмо посумњали у његову дијагнозу пошто би он пулс установио заснивајући се на звукове који су доспели од непотребног ометања и звукова других органа.

При мерењу вибрација, увек морамо монтирати акцелерометар што је ближе могуће лежају. Прецизније, морамо монтирати што је ближе могуће центру лежишта како би се избегло прикупљање искривљених сигнала. На слици 41 су дати примери правилно и неправилно монтираног акцелерометра.



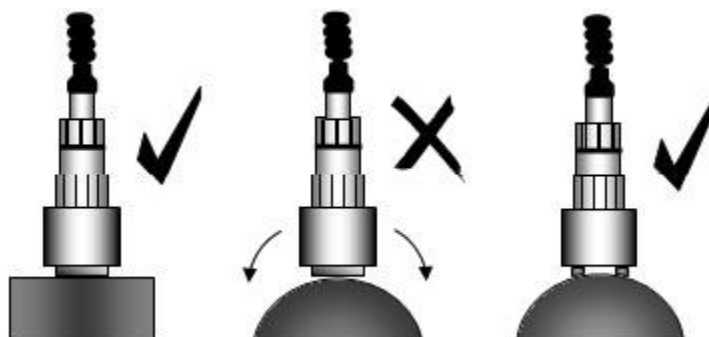
Слика 41. Примери правилно и неправилно монтираног акцелерометра

2. уверити се да је акцелерометар добро причвршћен

Ако желимо да акцелерометар открије право понашање вибрација, потребно је да прође кроз исте вибрационе покрете као и компонента коју меримо. Зато се акцелерометар мора добро причврстити за компоненту која вибрира како се не би померао независно од компоненте. Лабаво монтиран акцелерометар производи сигнале искривљене због сопствених покрета и због тога даје погрешна читавања.

Различите методе за монтирање постоје, али монтирање уз помоћ магнета је најпопуларнија јер нуди баланс између поузданости мерења и погодности за корисника. Магнетско монтирање омогућава кориснику да измери више машина користећи исти акцелерометар са минималним provedеним временом за монтажу и демонтажу акцелерометра.

Како би се осигурало да је акцелерометар добро причвршћен, мора се заглавити у магнетну монтажну површину која је равна. Магнетни носач мора чврсто да седне на површину са акцелерометром позиционираним у прописаној оријентацији. На слици 42 су приказани примери лоше и добро монтираног акцелерометра.



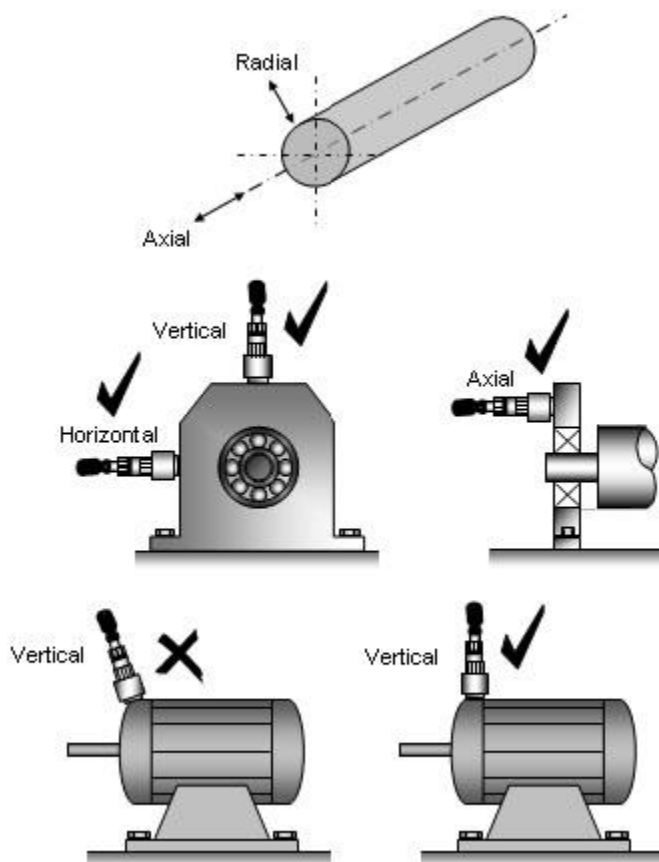
Слика 42. Примери лоше и добро монтираног акцелерометра

Да би површина била равна, мора бити без отпадака, рђе и без ољуштене боје. Површина за монтирање мора бити истински магнетна (легури гвођа, никла или кобалта). Магнетна површина не сме, на пример, бити везана за алуминијумску површину на основу гвођа испод алуминијумске површине. Да би се избегао губитак магнетизма, магнетно монтирани акцелерометар се не сме испустити или загрејати. Мора се такође обратити пажња да се случајно не одврне навој који држи акцелерометар и компоненту.

3. уверити се да је акцелерометар правилно оријентисан

Различите ситуације захтевају да акцелерометар буде различито оријентисан. На пример, да би се детектовао паралелно неслагање, акцелерометар се обично монтира у радијалном правцу лежајева, али да би детектовао угаоно неслагање, онда се мора монтирати да иде у аксијалном правцу (слика 43).

Сигнал који производи акцелерометар зависи од оријентације у којој је он монтиран пошто амплитуда (количина) вибрација варира у различитим правцима.



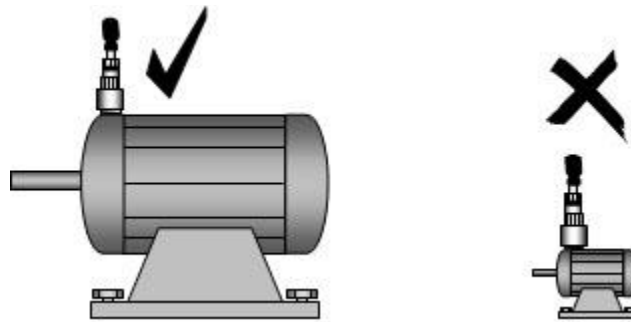
Слика 43. Примери добро оријентисаних акцелерометара

4. монтирати исти акцелерометар на исту локацију

За одређено мерно место је веома важно да акцелерометар буде монтиран на истој локацији како би се уклонила неусаглашеност мерења која може да доведе до погрешних закључака. Где је то могуће, увек је пожељно користити исти акцелерометар за одређено мерно место.

5. монтирати акцелерометар на нешто значајно за мерење

Акцелерометар се никада не сме монтирати на веома флексибилни део машине јер ће се спектар искривити од стране вијорења флексиблиног дела. Акцелерометар се никада не сме користити на структурама које су веома лаке јер би тежина акцелерометра нарушила понашање вибрација структуре. Уопштено, комбинована тежина акцелерометра и магнетне монтаже би требало да буде за око 10% мања од тежине вибрационе структуре.



Слика 44. Примери лоше постављеног акцелерометра

6. Водити рачуна о акцелерометру

Ако се акцелерометар не третира на прави начин, онда он може да почне да производи непоуздане сигнале. Због јачине магнетне монтаже, мора се водити рачуна приликом причвршћивања акцелерометра на површину на коју се монтира. Ово се може постићи приближавањем површини за монтажу под одређеним углом. Када се магнетна монтажа расклапа, акцелерометар се не сме грубо извадити како не би дошло до лома. Уместо тога, магнетна монтажа се треба чврсто згабити и затим нагнути на страну како би дошло до расклапања. Кабл акцелерометра се никада не сме уплетати, али се може утемељити на одређени начин који спечава да дође до његово оштећења. Уплетен или кабл који слободно виси могу нарушити измерени спектар.

7. Водити рачуна о личној заштити

У сваком тренутку се мора управљати опасностима. Када се узимају мере вибрација, три врсте опасности се јављају: повреда настала због покретних делова, струјни удар и магнетно индикована оштећења.

Прво, када се акцелерометар монтира, мора се водити рачуна о томе да се кабл не уплете са покретним деловима машине. Иако конектори који се брзо скидају минимизирају појаву ове опасности, не сме се ослањати на то као на замену за правилну инсталацију.

Друге ствари које се могу уплести са покретним деловима укључују широку одећу, дугу косу, каблове за пренос података и траке. Друго, акцелерометар се никада не сме повезати са било каквом површином која је под високим напоном јер то може довести до струјног удара. Треће, никада се не сме носити магнетна монтажа близу нило каквих објеката који су осетљиви на магнет попут кредитних картица, дискета, видео касета и сатова пошто се ови објекти могу оштетити због магнетног поља.

Мерач вибрација (слика 45) се користи за мерење вибрација у производњи и лабораторији. Користи се за мерење вибрација и осцилација у многим машинама и инсталацијама, као и у развоју производа попут алата или сличних компоненти. Мерење мерачем вибрација омогућује читавање следећих параметара: вибрације убрзања, вибрације брзине и вибрације помераја. На овај начин, вибрације се мере са великом прецизношћу. Вибрациони тестер је преносиви уређај и његова читавања се могу ускладиштити и касније опет анализирати. Калибрациони сертификат произвођача углавном долази у паковању са овим уређајем. Осим тога, мерач вибрација долази у паковању и са ИСО 9000 сертификатом, који омогућује годишњу рекалибрацију као што је то наведено у ИСО приручнику. Мерач вибрација је незаменљив алат за професионално обављање посла. Сваки испитивач вибрација може да изврши захтеван задатак без обзира на то каква је природа техничког проблема. Такође је могуће извршити у акустичну процену са мерачем звука (анализом фреквенције) који је уграђен у одређене типове ових уређаја. Критичне фреквенције могу изазвати оштећење и открити узнемирујући ниво буке. Главну ману уређајима овог типа представља немогућност анализе мерења резултата. Примери неки од инструмената који припадају овој групи су дати на слици:



Слика 45. Мерачи вибрација

Поред мерача вибрација, постоје и инструменти који осим тога што мере вибрације, имају и могућност вршења анализе тих вибрација. Све машине вибрирају и имају сопствени "потпис" који се мења са променом радних услова. Анализа вибрација може да помогне у откривању широког спектра стања отказа, а абнормале вибрације су обично први показатељ могућности настајања потенцијалног отказа машине. Када се открије поремећај у "потпису", подаци се прикупљају и то омогућава радницима да детектују и процене озбиљност отказа као што су дебаланс, асиметричност, лабавост делова, погоршање котрљајних елемената и слични. Инструменти и системи за анализу вибрација могу да помогну у окривању многих озбиљних проблема у раној фази, омогућавајући особљу да благовремено предузме проактивне мере одржавања пре него што дође до отказа. Најефикаснији су на опреми која ротира великом брзином. Вибрациони сензори могу да буду веома скупа компонента, али омогућавају процењивање стања опреме у сваком тренутку, као и избегавање могућих отказа и зато се може рећи да су исплативи. Ови инструменти обично садрже претварач, систем за прикупљање података и сопствени екран или неку врсту излаза за рачунар или друге компоненте где се приказују подаци. Вибрациони инструменти долазе у различитим облицима и могу бити стационални или преносни, а постоје чак и ручни уређаји који су довољно мали да стану у шаку и користе се за ефективнија мерења за разлику од инних инструмената са точковима или дршком који су знатно робуснији. Као компликован комад опреме, инструменти за мерење вибрација могу доћи са много других опција које повећавају њихову функционалност и употребљивост. Неки од њих су могућност аутоматске калибрације, самотестирања па чак и способност да издржи екстремне услове животне средине као што су превелика температура, влажност и прашина. На слици 46 је дат пример инструмената овог типа:



Слика 46. Системи за мерење и анализу вибрација

6. Опасности и штетности на радном месту

Постоји много дефиниција за реч "опасност", али она која се односи на безбедност и здравље на раду гласи:

Опасност је било који извор потенцијалне штете који може да изазове негативне ефекте по здравље на особу под одређеним условима.

У основи, опасност може проузроковати повреду или штетне ефекте било појединцу у смислу здравствених штетних ефеката или организацијама у смислу отказа опреме. Опасности на радном месту се могу појавити из различитих извора. Опти примери укључују било коју супстанцу, материјал, процес који имају способност да проузрокују штету или негативан утицај по здравље особе.

Радна места и опасности која се јављају чест укључују у стање ослобађања неконтролисане количине енергије попут[27]:

- објекат који би могао да падне са велике висине (гравитациона енергија)
- хемијске реакције (хемијска енергија)
- ослобађање гасова под притиском или паре (висока температура)
- заплетане косе или одеће у ротирајућу опрему (кинетичка енергија)
- контакт са електродама батерије или кондензатора (електрична енергија)

Ризик је вероватноћа да ће се особа повредити или доживети негативан утицај по здравље уколико је изложена опасности. Такође се може применити на ситуације са губитком опреме. На пример: Ризик од развоја рака због пушења цигара може да се искаже као "пушачи имају 12 пута више шанси да умру од рака плућа од непушача". Други начин извештавања ризика представља термин "одређени број, "х", пушача од 100,000 пушача ће да развије рак плућа. Фактори који утичу на степен ризика укључују:

- колико је особа изложена опасним стварима и опасним стањима
- на који начин је особа изложена (удисање паре, контакт с кожом)
- колико су озбиљни ефекти у условима излагања

Процена ризика представља процес где се врши:

- идентификација опасности
- анализа и оцена ризика повезаног са том опасношћу
- одређивање одговарајућих начина за елиминацију или контролу опасности

Ефекти се могу јавити непосредно, што значи да се повреда јавља истог тренутка кад особа дође у додир са опасним средством (нпр. прскање киселине у око). Неки ефекти могу бити одложени, као што је то пример изложености неким хемијским материјама након које се после 2-5 сати јавља оток на кожи. С друге стране, постоје и последице које се јављају знатно касније попут мезотелиме, врсте рака који се јавља у дисајном путу након 20 и више година изложености азбесту.

Уобичајен начин класификације опасности је према следећим категоријама[28]:

- биолошка - бактерије, вируси, инсекти, биљке, животиње и људи;
- хемијска - зависе од физичких, хемијских и токсичних својстава хемикалија;
- ергономска - покрети који се понављају, неправилно постављање радне станице;
- физичка - радијација, магнетно поље, висок притисак, бука и слично;
- психолошка - стрес, насиље и слично; и
- сигурносна - опасности проузроковане клизањем или саплитањем, неприкладно обезбеђене машине, неисправност или отказ опреме.

Према препорукама Европске агенције за безбедност и здравље на раду опасности и штетности могу се сврстати у 25 група. То су следеће опасности и штетности[29]:

1. Опасност од површина, објеката, предмета, алата или материјала са високим или ниским температурама,
2. Опасност од судова и инсталација под притиском,
3. Опасност везане за електроинсталације и електричне опреме,
4. Опасност од пожара,
5. Опасност од експлозије,
6. Опасност од хемијских штетности у ваздуху (цурење штетних флуида),
7. Опасност од коришћења опасних материја,
8. Опасност и штетност од повишеног нивоа буке,
9. Опасност и штетност од повишеног нивоа вибрација (руке или цело тело),
10. Штетност од зрачења (УВ, ИЦ, микроталасно),
11. Штетности везане за микроклиматске услове (температура, влажност и брзина струјања ваздуха),
12. Опасност и штетност од рада на отвореном или у неповољним климатским и атмосферским условима.

6.1 Примена инфрацрвене термографије у циљу идентификације опасности и штетности на радном месту

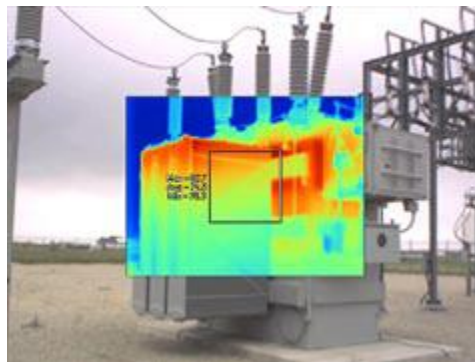
Термографска испитивања имају велику примену у многим областима због могућности мерења на даљину и давања поузданих резултата. Најчешће се користе при испитивању температуре критичних делова, као и делова који су у отказу или који испољавају симптоме отказа како би се проценило да ли је безбедно приступити њихов поправци. Такође се користе и при испитивању места појаве влаге, цурења, места пуцања изолације и много других области.

6.1.1 Опасности и штетности везане за електричне компоненте

Електричне компоненте које се испитују под поменутим временским интервалима укључују електричне плоче, трансформаторе, прекидаче и осигураче. Све ове компоненте се испитују са минималним размаком од 12 месеци између сваке инспекције и максималним размаком од 3 месеца. Учесталост испитивања одређују напон, радни услови, животна средина и остали параметри. Током инспекције се утврђује да ли је потребно извршити корективне акције истог тренутка ако су откривене неисправности или је могуће заказати поправку касније у будућности. Сви подаци се подnose одговарајућој особи, која из записује и чува у систему за прикупљање података. У подацима се такође наводе препоруке за корективне акције. Након што је корективна акција спроведена, компоненте које су биле обухваћене током ове акције се поново испитују како би се осигурао успех поправке.

ПРИМЕР - Термо снимање у оквиру предиктивног одржавања трафостанице

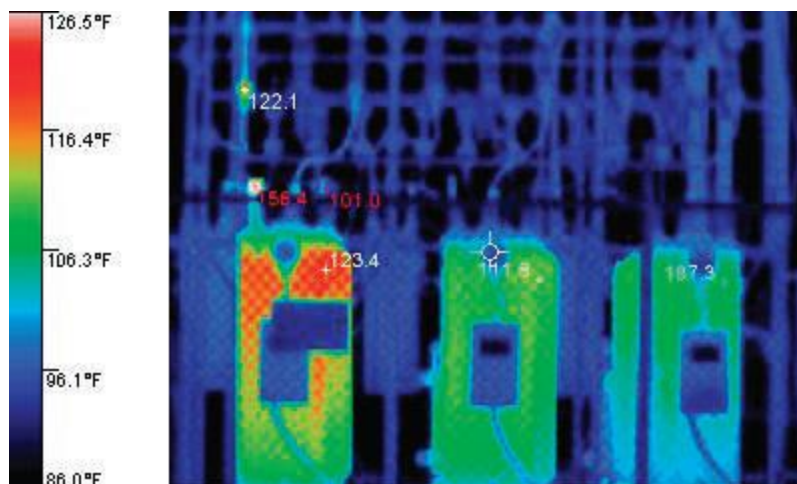
Трафостанице захтевају предиктивни приступ одржавања пошто отказ може бити катастрофалан у смислу изгубљене производње и прихода и непоуздане услуге. Деградација електричне компоненте се може појавити у виду прегревања и абнормално хладне радне температуре и због тога захтевају да се подвргну тестовима попут термографије [29].



Слика 47. Трафостаница снимљена инфрацрвеном камером

Велике трафостанице захтевају предиктивни тип одржавања ради побољшања поузданости и праћење рада опреме током времена како би се изоловали услови који указују на предстојећи отказ. Циљ је да се утврди да ли је потребно извршити корективне мере и, ако јесте, онда да се предузму што пре како не би дошло до отказа неке компоненте.

Трошкови повезани са трафостаницом у стању отказа могу да зависе од много фактора као што су број и врста корисника који су обухваћени због ове појаве и други. Неке процене показују да просечна цена застоја по једном сату у свим великим индустријским системима може да достигне вредност од чак милион евра.



Слика 48. Компоненте трафостанице сликане инфрацрвеном камером

Као део програма за предиктивно одржавање, тим за одржавање увек најпре саветује да се објекат испита термографијом када је у питању електрична компонента. Термовизијске камере снимају дводимензионалну репрезентацију површинских температура електричних компоненти и других објеката. Термлане камере комбинују визуелну, односно видљиву светлост, слику са инфрацрвениом сликом за бољу идентификацију, анализу и управљање сликом. Ова два типа слика се прецизно поравњавају тако да се сви детаљи преклапају што доводи до тога да се проблеми лакше уоче.

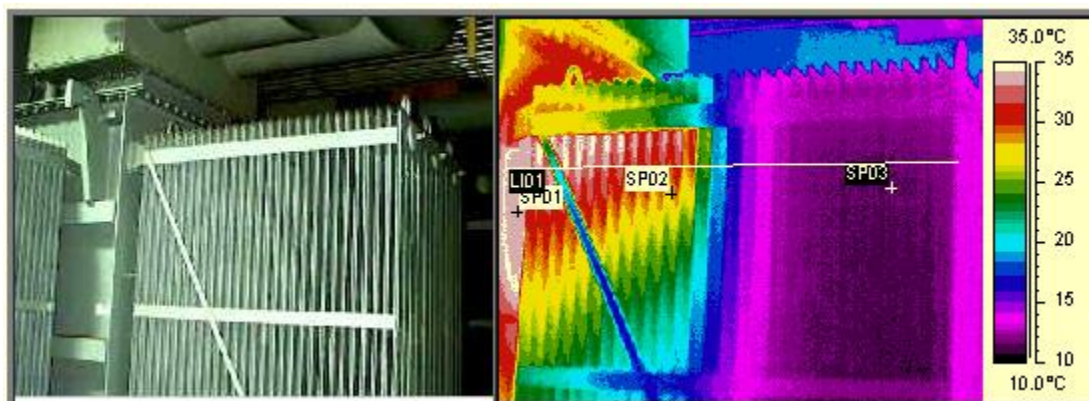
Термални инспектори обично прегледају трансформаторе, регулаторе, прекидаче, аутоматске прекидаче, кондензаторе и остале компоненте. Доба дана је такође важан фактор при прикупљању термалних слика компоненти трафостанице. Очитавањем раног јутра могуће је избећи ефекте соларног одраза и ветра, који могу да искриве очитавање температуре. Међутим, у праскозорје, оптерећења су углавном слабија тако да је могуће проблеме теже детектовати. Обука и искуство термографера такође може да утиче на мерење када се инфрацрвена скенирања врше на отвореном.

Тим за одржавање трафостанице је утврдио да је дошло до отказа једне од компоненти трафостанице, што се јасно види на слици због црвене боје која означава да је дошло до прептерећења компоненте. Након замене компоненте, тим је у временском интервалу од 24 сата опет испитао компоненту овог пута са позитивним исходом чиме се показало да је поправка била успешна и да је трафостаница тренутно у стању рада.

ПРИМЕР – Термо снимање високонапонског трансформатора у оквиру рутинске инспекције

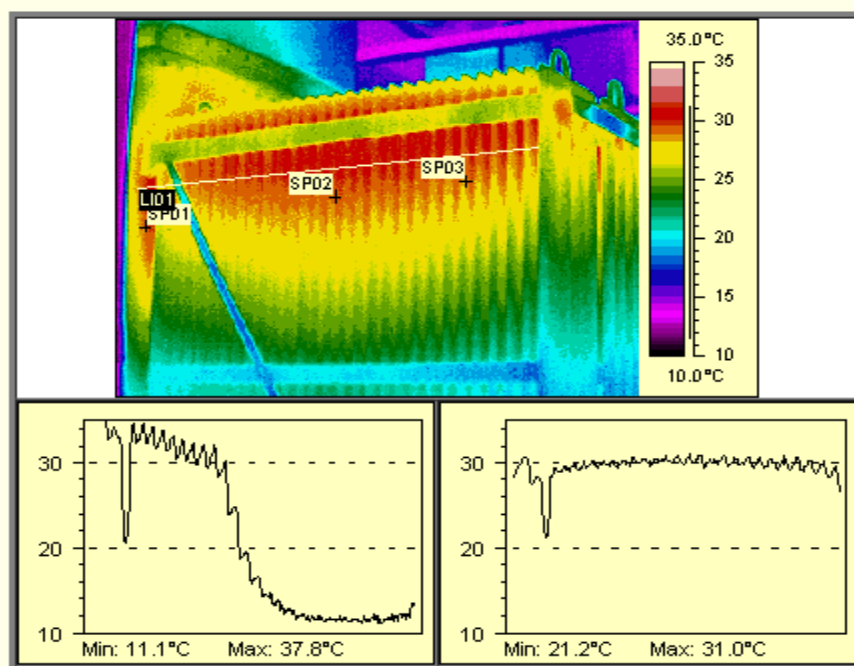
Високонапонски трансформатори су прегледани као део рутинске инспекције читаве имовине у предузећу. Уколико стандардни трансформатор који има напон од 13,800V ради на температури изнад 80°C током дужег временског периода, његов животни век ће се драстично смањити. Слика показује резултат инспекције овог трансформатора и ту се јасно може видети да се хлађење трансформаторског уља не одвија онако како је замишљено. Истрага о узроку неравномерног хлађења уља код

крилаца за хлађење је открила да је ниво уља у ствари недовољан да испуни заглавље крилаца за хлађење. Ово је довело до лоше дистрибуције флуида широм читаве јединице за хлађење, па самим тим и недовољног хлађења и до термо стања приказаног на слици.



Слика 49. Термална слика, која показује неједнаке термичке особине трансформатора

Након што је неопходна количина флуида додата у систем, систем се стабилизовао, а термовизијским испитивањем је установљено да је проблем успешно отклоњен.



Слика 50. Термална слика трансформатора након што је додата правилна количина течности за хлађење

6.1.2 Штетност од микроклиматских услова

Сврха испитивања присуства влаге је да се утврди присуство спора плесни(буђи) у унутрашњем окружењу. Инспекција на влагу ће утврдити каква врста плесни је пронађена, колика је количина пронађена у ваздуху или на површини уколико је видљива и да ли је количина пронађених спора у нормалном опсегу у односу на околину или је повишена. Још једна сврха испитивања за откривање влаге представља и утврђивање узрока унутрашњег проблема квалитета ваздуха, као и предлагање метода како га побољшати.

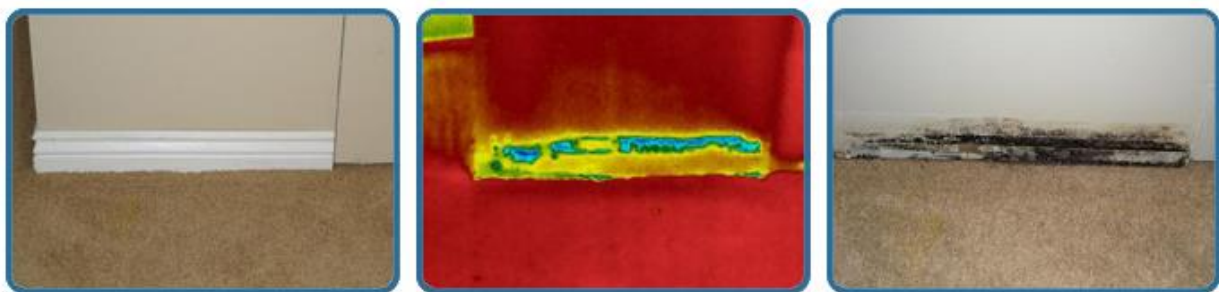


Слика 51. Испитивање буђи

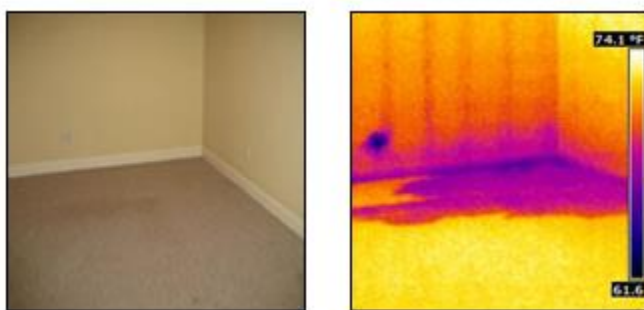
Ми смо изложени многим врстама буђи у затвореном и у отвореном простору. Изложеност је већа у влажним или мокрим условима, посебно када не постоји шанса да дође до благовременог сушења. Од хиљаде врсте буђи које постоје, неке су и познати алергени (који отежавају кожне, очне и дисајне проблеме) а неколико буђи ствара штетне микотоскине коју могу изазвати озбиљне здравствене проблеме. Али све буђи, у одговарајућим условима и у довољној концентрацији, су способне да изазову негативне последице по људско здравље. Потенцијални здравствени проблеми се појављују када људи удишу велику количину спора буђи. За неке људе, међутим, релативно мали број спора плесни може да изазове огромне проблеме.

Током времена, буђ може да уништи све на чему расте. Може уништити намештај, ормане и изазвати тешка оштећења по конструктивне елементе. Буђ је изузетно издржљива и прилагодљива на сваким температурама и може да опстане и у најтежим условима, а чак је и отпорна на најјача средства за дезинфекцију и избељивање. Елиминисање цурења и влаге може да успори ширење буђи, али тестирање да би се утврдио прави тип буђи је први корак у стварању ефикасног плана.

Области влаге које могу да доведу до цурења и оштећења структуре се могу лоцирати на основу очигледних температурних разлика.



Слика 52. Инфрацрвена инспекција буђи



Слика 53. Површина виђена кроз објектив обичног дигиталног фотоапарата и површина виђена кроз објектив инфрацрвене камере

У погледу откривања влаге, инфрацрвена камера може лоцирати:

- место цурења
- сакривене кровна цурења пре него што проузрокују озбиљнију штету
- оштећену или влажну изолацију
- место уласка воде и влаге, које могу довести до озбиљног оштећења структуре и појаве буђи

У смислу губитка енергије, инфрацрвена камера може да детектује:

- губитак топлоте и инфилтрацију ваздуха у зидове, плафоне, подове, прозоре и врата
- оштећење система за подно грејање
- цурење компресора климе
- структурна оштећења која могу довести до губита енергије
- поломљене заптивке код код прозора

6.2. Примена метода без разарања у циљу идентификације и опасности на радном месту

Системи за визуелни преглед стања површина се, као што је већ поменуто, користе у подручјима која су углавном визуелно недоступна, тј. у подручјима која се не могу опазати оком. Ови системи омогућују кориснику да открије скривена оштећења пре него што они проузрокују велике проблеме. Оштећења која се могу открити применом ових система су: лош квалитет варења, површинска оштећења, корозија, деградација, присуство страних тела, зарези, ломови, промена боје, оштећење електричне инсталације и бројни други. Опрема која се користи у овој методи омогућава продирање у објекат који се мери са удаљеног места, користећи мале отворе, затим и слање слике кориснику који то посматра преко монитора како би утврдио стање објекта.

Најновији видеоскопски системи са способношћу дигиталног удаљеног мерења су дизајнирани тако да омогућују прецизно тродимензионално мерење дефекта без обзира на то под којим углом се он налази. Коришћењем система за удаљено мерење, могу се мерити дубина и растојање одређених оштећења. Максимална дужина продирања износи 3.5 метара, а пречник цеви која се убацује износи максимум 6 милиметара. Управо због ових карактеристика, коришћење ових система је веома распрострањено јер представља једну од најпоузданијих метода за испитивање оштећења на великим дубинама која се не могу испитати оком због недостатка светлости, али и неприступачности. Ови системи представљају ручне даљинске системе дизајниране тако да се могу лако подесити за преглед иза зидова, малих посуда кроз отворе, недоступних области посуда, унутрашњости плафона, унутрашњост цеви и машина, као и цеви код возила и авиона.

Опрема има и светлосне системе, који се налазе у камери, који омогућују испитивање тамних и скривених површина. Пошто је камера дизајнирана тако да може да се ротира за 90° и са минималним пречником од 3.8 центиметара, ови уређаји имају велику примену при испитивању објеката који могу да доведу до озбиљних последица попут експлозије и пожара код електричних инсталација. Највећу примену имају у области испитивања мењача, квалитета заваривања, турбина и наслага.

Систем је у потпуности модуларан, тј. састоји се из више целина те се може расклапати. Алат који ће да се користи при испитивању је заснован на објекту који се испитује. Различита сочива, лампице и каблови су доступни и одговарају свим потребама. Рутинска испитивања се могу детаљно извршити према унапред утврђеним процедурама како би се осигурало да не дође ни до каквих проблема, који могу да доведу до катастрофалних и нежељених последица. Сlike и снимци које се добију приликом испитивања се могу чувати ради даље анализе.

Најкоришћенији инструмент представља видеоскоп који се користи за испитивање цеви, попут оплотних цеви, челичних цеви, дренажних цеви и цеви у постројењима. Поред тога, користе се за испитивање шупљина у унутрашњости резервара, мотора, котлова и слично.

Композитни материјали имају већу снагу и крутос и показују већу корозиону отпорност у поређењу са металним материјалима. Међутим, композитни материјали су осетљиви на ударце и структура им се веома лако ломи. Откривање појаве ламинације у

композитима се најчешће изводи применом ултразвучне методе. Рано откривање ламинације може да повећа животни век машине и да смањи ризик од настајања опасности услед лома материјала пошто то може да се одрази на целокупни процес.

Системи за визуелни преглед имају велику примену у испитивању ваздухопловних мотора пошто је цев довољно уска да би продрела у отворе. Рано откривање дефеката у мотору има немерљиви значај за безбедност авиона, а уједно и људи пошто отказ мотора може довести до катастрофалних последица.



Слика 54. Испитивање мотора авиона коришћењем бороскопа



Слика 55. Визуелни преглед цеви при испитивању на корозију

У случају да је немогуће приступити унутрашњости објекта због неспостојања отвора, прибегава се примени ултразвучне методе, која може да испита да ли је дошло до унутрашњих дефеката. Већина конструкција које подлежу унутрашњим дефектима направљена је од легура ниског квалитета и због тога се углавном врши испитивање челичних материјала, али варови у алуминијуму се такође могу испитивати. Ултразвучна детекција дефеката је дуги низ година била омиљена метода без разарања за испитивање у пољу заваривања. Ова безбедна, тачна, али и пре свега веома једноставна техника испитивања је довела ултразвучну методу на чело технологија које се бави испитивањем. Ултразвучна испитивања у заваривању се обично обављају коришћењем претварача правом сондом у комбинацији са претварачем са сондом под углом и клином. Претварач са правом сондом, који производи уздужни талас који усмерава ка узорку, се прво користи за лоцирање појаве ламинације у или близу зоне под утицајем топлоте. Ово је веома важно јер претварач са кривом сондом не би био у могућности да обезбеди повратни сигнал из ламинраног дефекта.



Слика 56. Ултразвучно мерење

7. Закључак

На данашњем степену развоја индустрије, техничка дијагностика има све запаженију улогу у њеном очувању, а и у омогућавању њеног даљег развоја. Будући да се код комплексних система његово стање не може поуздано утврдити субјективном анализом, мора се прибећи коришћењу техничке дијагностике.

Правилним коришћењем метода техничке дијагностике могуће је спречити појаву опасности и штетности на радном месту, а на оном местима где је већ дошло до ових појава, техничка дијагностика може са великом поузданошћу да утврди природу проблема као и да предложи могућа решења за њихово решавање. Периодичне провере ове врсте значајно смањују ризике оштећења имовине, ризике при којима може наступити и оштећење здравља људи који раде у техничким системима и у ближој и даљој околини.

Управљање ризиком може се остваривати на више начина. Интерес је власника ТС да се избором одговарајућих метода руковања, одржавања и техничке дијагностике и поузданости ризик сведе на најмању могућу меру. Правилно изабране методе и средства за техничку дијагностику са обученим кадровима и савесним спровођењем планираних активности стварају се услови да настајање ризика свих врста изостане или да се сведе на прихватљив ниво.

Литература

- [1] ISO 13372:2004(E): Condition monitoring and diagnostics of machines vocabulary
- [2] ISO Concept Database (ISO/CDB) (<http://www.iso.org/iso/c#4B3FB3>), приступљено новембра 2016.
- [3] ISO Concept Database (ISO/CDB) (<http://www.iso.org/iso/c#4B3FB3>), приступљено новембра 2016.
- [4] Јеремић Б., Тодоровић П., Мачужић И., Коковић В. *Техничка дијагностика*, Машински факултет Крагујевац, Србија 2006
- [5] Worden, K., Charles, R.F., Graeme, M., Gyuhae, P.: *The fundamental axioms of structural health monitoring*. Phil. Trans. Royal. Soc. Math. Phys. Eng. Sci.(2007)
- [6] Erhard, A.: Nondestructive evaluation. In: Czichos, H, Saito, T., Smith, L. (eds.) *Springer Handbook of Metrology and Testing*, Springer (2011)
- [7] ISO 13373 1:2002(E): Condition monitoring and diagnostics of machines vibration condition monitoring
- [8] Gutermann, M., Kosaka, Y., Matsuda, H.: *German proofloading method for bridges by BELFA*. In: Bridge and foundation, vol. 2, pp. 27 32, (2006)
- [9] Aktan, A.E., Catbas, F.N., Grimmelsman, K.A.,Pervizpour, M.: *Development of a model health monitoring guide for major bridges drexel intelligent infrastructure and transportation safety institute*. Drexel University, USA (2003)
- [10] https://www.princeton.edu/~cuff/ele201/kulkarni_text/signals.pdf, приступљено новембра 2016.
- [11] <http://nptel.ac.in/courses/117101055/downloads/Lec-6.pdf>, приступљено новембра 2016.
- [12] www.viser.edu.rs/download/uploads/5878.pdf, приступљено новембра 2016.
- [13] <https://www.asnt.org/MinorSiteSections/AboutASNT/Intro-to-NDT>, приступљено новембра 2016.
- [14] http://trimid.trimid.mycpanel.rs/proizvodi/ispitivanje_penetrantima.23.html, приступљено новембра 2016.
- [15] http://trimid.trimid.mycpanel.rs/proizvodi/ispitivanje_magnetnim_cesticama.22.html, приступљено новембра 2016.

- [16] <http://www.olympus-ims.com/en/eddycurrenttesting/>, приступљено новембра 2016.
- [17] https://en.wiktionary.org/wiki/Appendix:Ancient_Greek_words_with_English_derivatives, приступљено новембра 2016.
- [18] Maldague, X.P.V., Streckert, H.H, Trimm, M.W.: *Introduction to infrared and thermal testing: Part 1. Nondestructive testing*, ASNT Press, Columbus (2001)
- [19] Maldague, X.: *Theory and Practice of Infrared Technology for Non Destructive Testing*, Wiley, New York (2001)
- [20] Henneke, E.G., Reifsnider, K.L., Stinchcomb, W.W.: *Thermography, an NDI method for damage detection*. J. Metals 31(9), 11 15 (1979)
- [21] <https://socratic.org/questions/what-electromagnetic-spectrum-can-we-see>, приступљено новембра 2016.
- [22] <http://www.qualitymag.com/articles/91266-remote-visual-inspection-explained>, приступљено новембра 2016.
- [23] <http://optronics.com/products/industrial-remote-visual-inspection/>, приступљено новембра 2016.
- [24] <http://www.twi-global.com/capabilities/integrity-management/non-destructive-testing/ndt-techniques/manual-ultrasonic-testing/>, приступљено новембра 2016.
- [25] ISO 2041:2009 Mechanical vibration, shock and condition monitoring vocabulary, 3rd edn. [https:// cdb.iso.org/cdb/termentry!display.action?entry=211087& language=1.](https://cdb.iso.org/cdb/termentry!display.action?entry=211087&language=1.), приступљено новембра 2016.
- [26] <http://www.hansfordsensors.com/how-to-mount-a-vibration-sensor/>, приступљено новембра 2016.
- [27] https://www.ccohs.ca/oshanswers/hsprograms/hazard_risk.html, приступљено новембра 2016
- [28] <http://www.worksafe.vic.gov.au/safety-and-prevention/health-and-safety-topics/controlling-ohs-hazards-and-risks/about-hazards-and-risks/what-are-hazards-and-risks>, приступљено новембра 2016.
- [29] <http://thermalimagers.ie/thermal-imaging-assists-in-predictive-maintenance-for-substations/>, приступљено новембра 2016.