

**Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Ústav automatizace a informatiky**

SPOLEHLIVOST A TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA

(Text pro podporu výuky v kombinovaném studiu)

Ing. František Vdoleček, CSc.

Brno 2002

OBSAH

1. Úvod	4
2. Spolehlivost obecně	5
2.1. Stavy a poruchy výrobků	5
2.2. Dvoustavový model, neobnovované a obnovované systémy	6
3. Základy teorie spolehlivosti	8
3.1. Teoretické modely rozdělení ukazatelů spolehlivosti	8
3.2. Exponenciální rozdělení	9
3.3. Jiná rozdělení	10
4. Spolehlivost systémů	12
4.1. Rozklad systému na prvky	12
4.3. Paralelní systém (paralelní poruchový model)	13
4.4. Kombinovaný sériově-paralelní systém	15
4.5. Složité systémy	16
5. Zvyšování spolehlivosti	17
5.1. Zvyšování spolehlivosti systému bez využití nadbytečnosti	17
5.2. Zvyšování spolehlivosti zálohováním	17
5.2.1. Stálé zálohování	18
5.2.2. Substituční zálohování	18
6. Technická diagnostika	20
6.1. Základní pojmy	20
6.2. Diagnostické modely	22
6.3. Poruchy a jejich příčiny	23
7. Vibrodiagnostika	25
7.1. Základy mechanického kmitání a snímačů vibrací	25
7.2. Senzory výchylky, polohy a posuvu	28

7.3	Senzory rychlosti	28
7.4	Senzory zrychlení – akcelerometry	29
7.5	Analýza signálu v časové oblasti	30
7.6	Analýza signálu ve frekvenční oblasti	31
7.7	Frekvenční analýza periodických signálů	32
8.	Diagnostika analogových a číslicových obvodů	35
8.1.	Automatické funkční testery	35
8.2.	Testery typu „In Circuit“	36
8.3.	ASA tester	37
9.	Další metody používané v technické diagnostice	39
9.1.	IR systémy	39
9.2.	Defektoskopické systémy	39
9.3.	Hluková diagnostika	40
10.	Technická diagnostika a spolehlivost v automatizačních systémech	42
10.1.	Regulovaná soustava	42
10.2.	Regulátory, převodníky a přenosová zařízení	45
10.3.	Akční členy a měřicí řetězce	46
10.4.	Aplikace spolehlivosti v automatizačních systémech	47
	Literatura	49

1. Úvod

Spolehlivost a technická diagnostiky jsou v dnešní době velmi významnými obory nejen v technických aplikacích. V posledních desetiletích je velká pozornost upřena především ke kvalitě výroby, ale také služeb a všech činností. Součástí celkové – globální - jakosti se mimo jiné právě spolehlivost sledovaného prvku, systému výrobku apod.

Teorie spolehlivosti je metodou přispívající k zabezpečení bezporuchovosti jednotlivých výrobků (systémů). Při podcenění jejího významu se mohou vyskytnout výrobky a systémy, které pak v vyžadují nákladnou údržbu, časté opravy a v některých případech i předčasné vyřazení z provozu. Zkušenosti ukazují, že správné docenění významu spolehlivosti se odráží v konkurenceschopnosti výrobků a podstatně ovlivňuje i ekonomickou stránku výroby.

Pro zjištění okamžitého skutečného stavu spolehlivosti pak poslouží diagnostika, v oblasti techniky, strojírenství a příbuzných oborů je to samozřejmě technická diagnostika.

Technická diagnostika se zabývá zjišťováním technického stavu strojů, zařízení, přístrojů aj. technických systémů, převážně bezdemontážními a nedestruktivními postupy. Pouze při dobrém technickém stavu je zařízení schopné vykonávat svou funkci a plnit stanovené podmínky, ke kterým je určeno.

Kromě ekonomických důvodů je třeba mezi výsledky působení spolehlivosti i diagnostiky zohlednit také ochranu zdraví a života osob i prostředí. Proto je stejnojmenný předmět zařazen také do studijního plánu oboru Aplikovaná informatika a řízení. Zejména u řídicích systémů, ale obecně u všech členů systémů provozovaných v automatickém režimu, bude spolehlivost jednou ze základních sledovaných vlastností.

2. Spolehlivost obecně

Spolehlivost, jako jedna z nejdůležitějších vlastností jakosti je podle normy definována takto: „Spolehlivost je obecná vlastnost objektu spočívající ve schopnosti plnit požadované funkce při zachování hodnot stanovených provozních ukazatelů v daných mezích a v čase podle stanovených technických podmínek“. Technickými podmínkami rozumíme specifické technické vlastnosti, předepsané pro požadovanou funkci výrobku, způsob jeho provozu, skladování, přípravy, údržby a oprav. Samotnou spolehlivost je možno rozčlenit na její dílčí vlastnosti sloužící k bližšímu vyjádření a lepšímu pochopení:

- Bezporuchovost: schopnost objektu plnit nepřetržitě požadované funkce po stanovenou dobu a za stanovených podmínek.
- Opravitelnost: způsobilost objektu ke zjišťování příčin vzniku jeho poruch a odstraňování jejich následků opravou.
- Udržovatelnost: způsobilost objektu k předcházení jeho poruch předepsanou údržbou.
- Životnost: schopnost objektu plnit požadované funkce do dosažení mezního stavu při stanoveném systému předepsané údržby a oprav; mezní stav objektu je stav, ve kterém musí být další využití objektu přerušeno; kritéria mezního stavu pro daný objekt stanoví jeho technická dokumentace.
- Pohotovost: komplexní vlastnost objektu, zahrnující bezporuchovost a opravitelnost objektu v podmínkách provozu.
- Skladovatelnost: schopnost objektu zachovávat nepřetržitě bezvadný stav po dobu skladování a přepravy při dodržení předepsaných podmínek.

2.1. Stav a poruchy výrobků

- Výrobek (pod tímto názvem si představujeme stroj, zařízení, automatizační systémy) má při své činnosti stav provozu nebo prostoje. Pokud je výrobek schopen plnit dané funkce a dodržuje stanovené parametry, nazýváme tento stav bezporuchový. V opačném případě stav poruchový. Přejít mezi bezporuchovým (bezvadným) a poruchovým stavem nastane v okamžiku výskytu poruchy.
- Vada - změna stavu výrobku, nemající podstatný vliv na jeho činnost.
- Závada (poškození) je jev spočívající v narušení bezvadného stavu, ale výrobek je i nadále v provozuschopném stavu; tj. je schopen plnit stanovenou funkci a dané parametry v mezích určených technickou dokumentací, ale není již zpravidla jasné, jak se zachová v dalším čase. Velmi často je takovýto stav nazýván stavem mezním, kdy je ale
- Porucha je jev jehož následkem ztrácí výrobek schopnost plnit požadovanou funkci.
- Havárie je zpravidla porucha, spojená s výraznými ztrátami na materiálu, zdraví, popř. i životech, pracovním a životním prostředím.

Samotné poruchy lze třídit podle řady hledisek:

- podle příčiny vzniku poruchy
 - poruchy z vnějších příčin
 - poruchy z vnitřních příčin
- podle časového průběhu změn
 - poruchy náhlé
 - poruchy postupné
 - poruchy občasné
- podle stupně porušení provozuschopnosti
 - poruchy úplné
 - poruchy částečné
- podle původu
 - konstrukční
 - technologické
 - provozní
- odstranitelné a neodstranitelné poruchy.

Pokud se jedná o nejčastější a nejběžnější mechanismy vzniku poruch u systémů (technických zařízení), jsou jimi především:

- proces stárnutí, koroze, tj. nevratné děje dílčích poškození, které vedou k dosažení mezního stavu a další používání výrobku je nemožné
- výskyt špičkových zatížení, tj. náhodný výskyt krátkodobých přetížení majících za následek např. vznik křehkého lomu u mechanických prvků a přerušení vodiče, zkrat u elektrotechnických prvků
- vliv okolního prostředí, tj. krátkodobě se změny parametry okolního prostředí, mimo povolené meze stanovené pro užívání výrobku
- nestabilita zdrojů energie, tj. krátkodobý pokles nebo výpadek napájecí energie
- náhodné krátkodobé porušení pravidel pro obsluhu a údržbu výrobků při provozu
- nedostatky a chyby při projektování a konstruování
- nedostatky a chyby při výrobě a montáži.

2.2. Dvoustavový model, neobnovované a obnovované systémy

K určení spolehlivosti jednotlivých prvků systému se velmi často použije tzv. dvoustavový model. Pro tento model se množina všech technických stavů prvků rozkládá na dva stavy - stav provozuschopný a stav poruchový. Prvek se nachází v jednom z nich a

přechod z jednoho stavu do druhého probíhá skokově. Náhodnost vzniku poruchy vede k možnosti hodnocení spolehlivosti pomocí pravděpodobnosti.

Při vícestavovém modelu se používá podstatně složitější aparát. Další důležitá klasifikace systému je jeho rozdělení na neobnovované a obnovované. Obnovou se rozumí obnovení schopnosti systému plnit požadované funkce. K obnově může dojít opravou nebo výměnou porouchaného prvku. Obnovované systémy mají schopnost plnit požadovanou funkci i po poruše. K těmto patří systémy s plánovanou údržbou a opravami (např. automatické řídicí systémy). Neobnovované systémy jsou hodnoceny pouze z hlediska vzniku poruchy a jejich další osud nás nezajímá. Jako příklad lze uvést elektronické součástky (odpory, kondenzátory, tranzistory, IO), elektrotechnické součástky (pojistky, žárovky), strojírenské konstrukční díly a součástky (ložiska, šrouby, řemeny, apod.). U těchto prvků je buď oprava nemožná nebo je ekonomicky velmi náročná. Dalšími příklady mohou být systémy pro jednorázové použití např. družice, kosmické sondy, rakety apod.

3. Základy teorie spolehlivosti

Kritériem k hodnocení spolehlivosti je pravděpodobnostní charakter přístupu. Z této vlastnosti plyne, že spolehlivost systémů je určována nebo ovlivňována náhodnými jevy a činiteli. Proto ukazatele spolehlivosti mají náhodný charakter. Používaným aparátem je teorie pravděpodobnosti a matematická statistika. Dále budou popsány pouze ukazatele bezporuchovosti, které jsou nejvýznamnějšími parametry spolehlivosti.

Zavedme proměnnou ξ - doba do poruchy (náhodný okamžik vzniku poruchy), jejím definičním oborem je teoreticky $\langle 0, \infty \rangle$, prakticky se uvažuje $\langle 0, T \rangle$, kde $\xi = t$, $t \in \langle 0, \infty \rangle$, resp. $\langle 0, T \rangle$, kde T je doba technického života objektu.

Pravděpodobnost poruchy

$$F(t) = P(\xi \leq t), \text{ v intervalu } \langle 0, T \rangle \quad (3.1)$$

Pravděpodobnost bezporuchového provozu

$$R(t) = P(\xi > t) = 1 - F(t), \text{ v intervalu } \langle 0, T \rangle \quad (3.2)$$

Hustota pravděpodobnosti poruch

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (3.3)$$

Intenzita poruch

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (3.4)$$

Současně musí platit že součet pravděpodobností bezporuchového chodu a pravděpodobnosti poruchy musí být roven jedné (100%)

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (3.5)$$

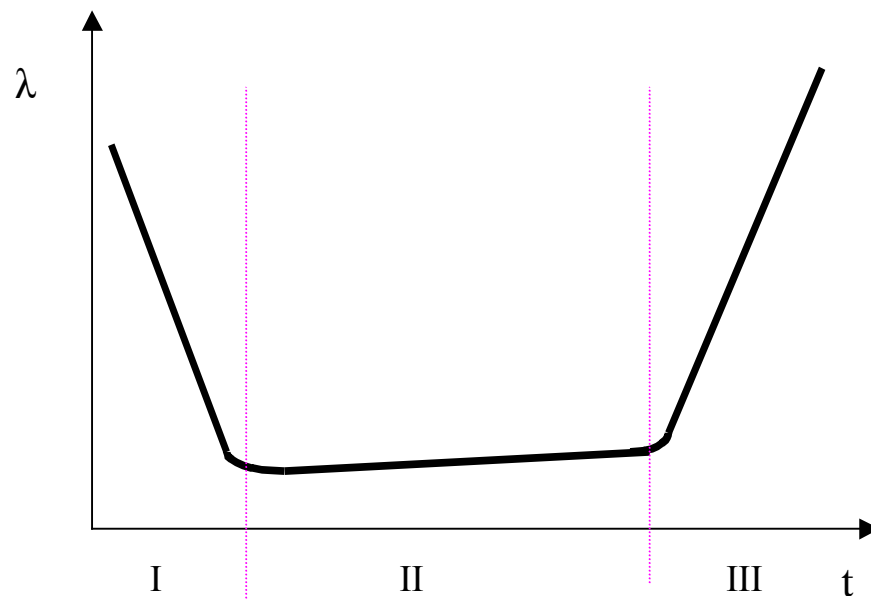
3.1. Teoretické modely rozdělení ukazatelů spolehlivosti

Nejčastěji používané teoretické modely rozdělení jsou exponenciální, Weibullův, normální (Gaussův) a jejich kombinace. Pro jednodušší obecné přiblížení se pak používá především rozdělení exponenciální, které je vlastně speciálním případem rozdělení Weibullova.

Zvolení určitého teoretického modelu rozdělení odráží také naše zkušenosti. Čím více se chceme přiblížit skutečnosti, tím zpravidla bývá teoretický model rozdělení komplikovanější. Vodítkem pro volbu teoretického modelu rozdělení je typický průběh intenzity poruch $\lambda(t)$, uváděný na základě dlouhodobých zkušeností. Dle svého tvaru je tento průběh nazýván „vanová křivka“. Můžeme ji rozdělit na tři významné oblasti:

- doba záběhu
- doba provozu

➤ doba doběhu (dožívání)



Obr.3.1 Charakteristický průběh intenzity poruch – vanová křivka
 λ - intenzita poruch, p – poruchový parametr, t – čas.
 I – doba záběhu, II – doba provozu, III- doba doběhu

3.2. Exponenciální rozdělení

V praxi spolehlivosti je velmi často používaným modelem exponenciální rozdělení. V charakteristickém průběhu intenzit poruch můžeme interval $\langle t_1; t_2 \rangle$ považovat za definiční obor náhodné veličiny s exponenciálním rozdělením pravděpodobnosti. Má-li náhodná veličina exponenciální rozdělení je intenzita poruch rovna konstantě. Potom intenzita poruch je $\lambda(t) = \lambda = \text{konst.}$, $\lambda > 0$. Důsledkem této vlastnosti je, že pravděpodobnost vzniku poruchy nezávisí na době, po kterou je zařízení v bezporuchovém stavu. Je tedy stejná v libovolném okamžiku bezporuchového provozu. Toto vše je splněno právě v etapě provozu dle obr. 3.1., kdy intenzita poruch je skutečně přibližně rovná konstantě. V předchozí kapitole uvedené vztahy pak dostanou podobu

Pravděpodobnost poruchy

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (3.6)$$

Pravděpodobnost bezporuchového provozu

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\lambda t} \quad (3.7)$$

Hustota pravděpodobnosti poruch

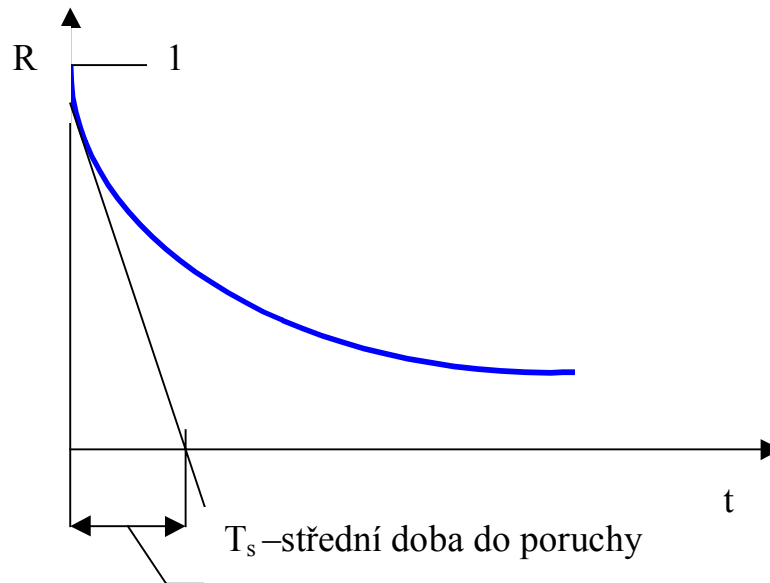
$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \lambda \cdot e^{-\lambda t} \quad (3.8)$$

Střední doba bezporuchového provozu

$$T_s = \int_0^{\infty} R(t) dt = \frac{1}{\lambda} \quad (3.9)$$

Zaručená doba bezporuchového provozu vychází ze vztahu

$$R(T_\alpha) = \alpha \quad \Rightarrow \quad T_\alpha = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{1}{\alpha} \quad (3.10)$$



Obr.3.2 Průběh $R(t)$ pro exponenciální rozdělení.

3.3. Jiná rozdělení

Zkušenosti ukázaly, že optimálním teoretickým modelem vyhovujícím provozu strojírenských výrobků je obecnější rozdělení Weibulovo, kde se veškeré vztahy odvíjejí od pravděpodobnosti poruchy

$$F(t) = 1 - \exp(1 - \lambda t)^m, \text{ kde } t \geq 0 \quad (3.11)$$

Pro $m = 1$ je Weibulovo rozdělení shodné s exponenciálním.

Přehledně bychom mohli ve stručnosti konstatovat, že se v teorii spolehlivosti budou používat především tato možná rozdělení pro popis ukazatelů:

➤ Spojitá

- Exponenciální
- Weibulovo

- Normální
 - Gaussovo
 - Studentovo
- Diskrétní
 - Binomické
 - Poissonovo

Binomické rozdělení se používá především tam, kde je použita jistá nadbytečnost, zálohování a pro spolehlivou funkci systému je třeba, aby bylo v činnosti několik zařízení ze všech. Poissonovo rozdělení pak modeluje především takové případy, u nichž je velmi malá (ojedinělá) pravděpodobnost výskytu poruchy, tj. pravděpodobnost, že nastane jedna, dvě poruchy v početném souboru prvků.

4. Spolehlivost systémů

Při zjišťování spolehlivosti systému využíváme možnosti jeho rozdělení na menší funkční celky nebo jednotlivé prvky. Spolehlivost tak velmi často využívá i všech systémových přístupů a metod.

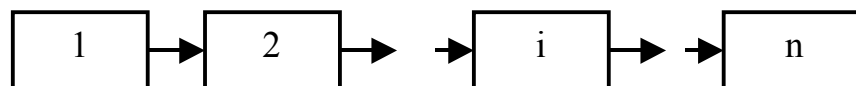
4.1. Rozklad systému na prvky

Rozložením systému na prvky využíváme skutečnosti, že jednotlivé spolehlivosti prvků jsou nám známy nebo jsou zjistitelné. Potom nám určují spolehlivost celého systému společně. Rozklad systému na prvky je možný na několika úrovních. Jednou z nich je dělení na základní prvky, tedy z hlediska spolehlivosti na dále nedělitelné (základní součástky). Tento rozklad se u složitých systémů používá k určení složitosti, ale i k řádovému odhadu spolehlivosti. Proto se jako prvky volí dílčí konstrukční nebo funkční části systému, které jsou o řád jednodušší než systém.

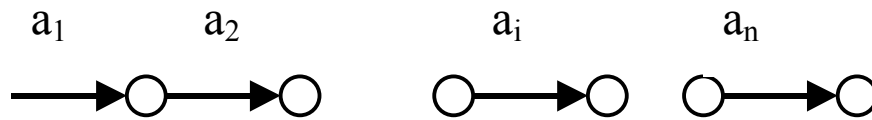
Při volbě rozkladu systému na prvky z hlediska hodnocení spolehlivosti se navíc uvažuje požadavek vzájemně nezávislých poruch jednotlivých prvků. Pro spolehlivost prvků můžeme použít vše, co bylo uvedeno dříve, zatímco v dalším se stručně zaměříme na to, jak stanovíme výslednou spolehlivost systému z těchto prvků setaveného.

4.2. Sériový systém (sériový poruchový model)

Sériový systém je zapojení n prvků v sérii (za sebou), kdy porucha libovolného prvku má za následek poruchu celého systému. Blokové schéma je na obr.4.1. Bloky v zapojení odpovídají jednotlivým prvkům. Mezi vstupem a výstupem existuje jediné spojení, které prochází všemi bloky. Tento systém můžeme také zobrazit orientovaným grafem na obr.4.2.



Obr.4.1 Blokové schéma sériového systému.



Obr.4.2 Spolehlivost sériového systému zobrazeného orientovaným grafem.
Orientované hrany odpovídají prvkům, uzly signálům

Pravděpodobnost bezporuchového stavu sériové soustavy je dána vztahy

$$R(t) = P(A) = P\left(\bigcap_{i=1}^n A_i\right) \quad (3.12)$$

pro předpokládanou vzájemnou nezávislost poruch prvků, potom platí, že pravděpodobnost bezporuchového stavu soustavy sériově seřazených prvků je rovna součinu dílčích pravděpodobností jednotlivých prvků:

$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (3.13)$$

Pravděpodobnost stavu poruchy $F(t)$: použijeme vztah

$$R(t) = 1 - F(t), R_i(t) = 1 - F_i(t), \text{ kde } i = 1, \dots, n$$

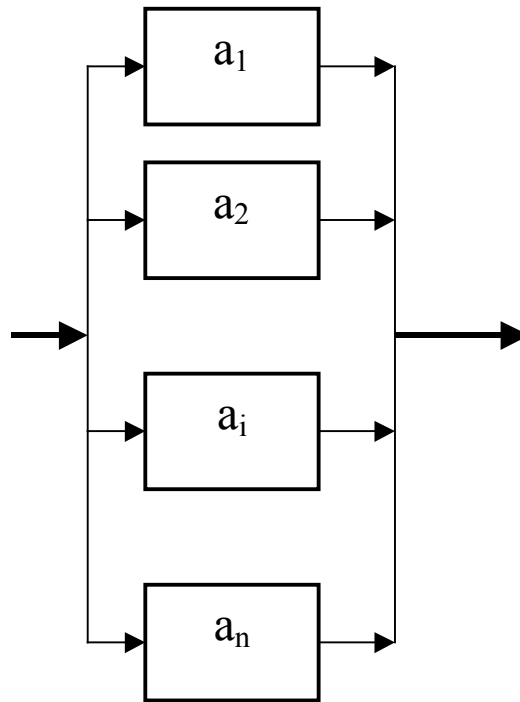
pak platí také pro pravděpodobnost poruchy vztah:

$$F(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - F_i(t)) \quad (3.14)$$

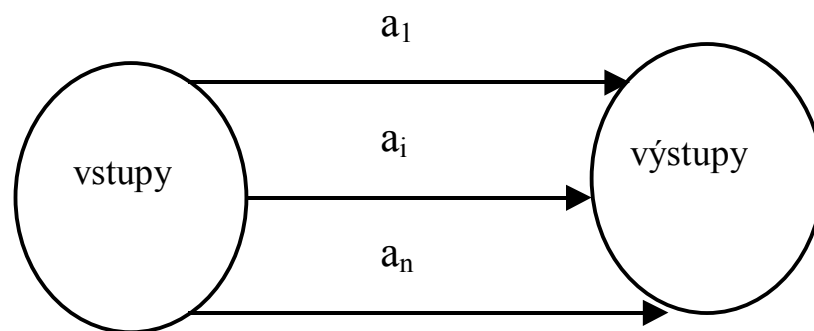
4.3. Paralelní systém (paralelní poruchový model)

Paralelní systém je zapojení n prvků paralelně (vedle sebe). Porucha systému nastane, dojde-li k poruše všech jeho prvků. Blokové schéma a orientovaný graf paralelní soustavy jsou na obr. 4.3 a obr. 4.4.

K bezporuchovému provozu paralelního systému stačí jeden provozuschopný prvek. Potom můžeme označit takové spojení za nadbytečné nebo záložní a skutečně se ho také velmi často používá právě pro zálohování.



Obr. 4.3. Blokové schéma paralelního systému

Obr.4.5 Spolehlivost paralelního systému zobrazeného orientovaným grafem.
Orientované hrany odpovídají prvkům, uzly signálům

Podobně jako v předchozím případě teď lze psát, že porucha nastane, pokud nastane porucha všech prvků, tedy

$$P(\bar{A}) = P\left(\bigcap_{j=1}^n \bar{A}_j\right) \quad (3.15)$$

Předpokládáme-li vzájemnou nezávislost poruch prvků, potom

$$P(\bar{A}) = \prod_{j=1}^n P(\bar{A}_j) \quad (3.16)$$

takže platí zcela analogicky, že výsledná pravděpodobnost poruchy paralelního systému je rovna součinu dílčích pravděpodobností poruch jednotlivých prvků. Protože pravděpodobnost je vždy číslo menší než jedna, bude platit, že u tohoto řazení prvků se pravděpodobnost poruchy s počtem prvků snižuje.

$$F(t) = \prod_{j=1}^n F_j(t) \quad (3.17)$$

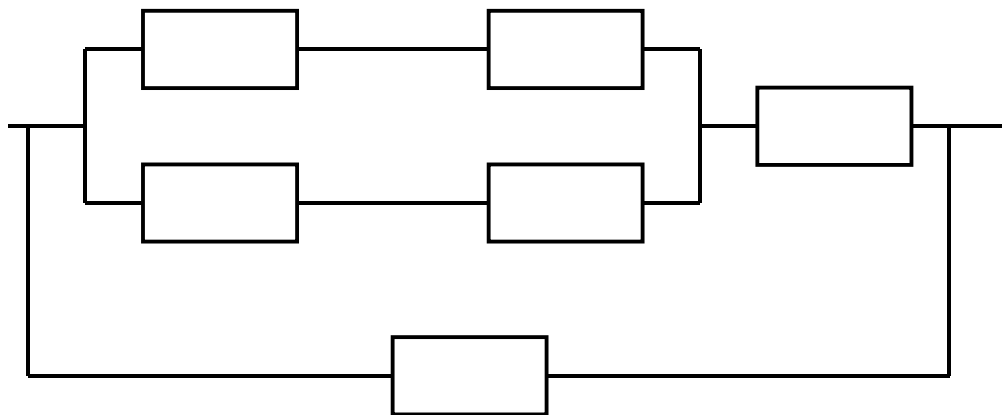
Pro pravděpodobnost bezporuchového stavu potom platí:

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \prod_{j=1}^n (1 - R_j(t)) \quad (3.18)$$

4.4 Kombinovaný sériově-paralelní systém

Vzniká kombinací sériových a paralelních zapojení prvků ve spolehlivostním blokovém schématu. Výpočet jednotlivých ukazatelů bezporuchovosti se provádí postupným zjednodušováním dílčích sériových a paralelních zapojení až do úplného zjednodušení. Na obr.4.5 je příklad kombinovaného systému.

Při řešení musíme postupně řešit jednotlivé paralelně uspořádané prvky i sériové řetězce a nesmíme přitom zaměnit postup správné metodiky násobení pravděpodobností poruchy či bezporuchového chodu. Převod z jednoho parametru do druhého se provádí jednoduchým odečtem od jedničky.



Obr. 4.5 Příklad uspořádání kombinovaného systému

4.5 Složité systémy

Pokud se v praxi vyskytne systém, který není možno jednoduše převést na sérioparalelní uspořádání, označuje se zpravidla jako složitý a lze ho řešit třemi možnými způsoby. Tyto metody označujeme jako

- Metoda seznamu
- Metoda rozkladu
- Metoda drah a řezů

Metoda seznamu předpokládá výpis všech možných kombinací, které mohou pro systém s n prvky nastat. Pro takový systém je to 2^n možností. U všech je třeba analyzovat, zda celek je či není funkční, zda se signál ze vstupu dostane na výstup, a pak toto patřičně ohodnotit pravděpodobnostním výpočtem, jehož výsledkem je celková výsledná pravděpodobnost bezporuchového chodu či poruchy.

Metoda rozkladu nebo také někdy označovaná jako metoda klíčového prvku spočívá v rozkladu na sériové a paralelní obvody, které nahradí původní složité schéma. Metoda spočívá ve zvolení klíčového prvku (volíme nejlépe takový, kterým prochází nejvíce spojení ze vstupu na výstup). Předpokládá se nejprve bezporuchový stav klíčového prvku a posléze jeho porucha. Použitím věty o úplné pravděpodobnosti se blokové schéma převede na dvě jednodušší struktury.

Při překreslování výchozí struktury se za předpokladu bezporuchového stavu nahradí klíčový prvek plnou čarou, při poruchovém stavu se vynechá. Rozklad lze provádět opakovaně, dokud nezískáme jednodušší strukturu, kterou již dokážeme sériovým a paralelním popisem řešit. V případě, že klíčový prvek není zvolen optimálně jsou výsledky sice správné, ale rozkladem nemusí vzniknout podstatně jednodušší struktura než původní.

Metoda drah a řezů spočívá v tom, že vypíšeme všechny „cesty“, kterými se dostane vstupní signál na výstup systému. Aby byla soustava funkční, musí být funkční alespoň jediná z drah. Dobře provedená analýza pravděpodobnosti všech možných kombinací funkčnosti jediné z možných cest včetně nejruznějších jejich kombinací musí opět dát stejný výsledek jako předchozí metody

5. Zvyšování spolehlivosti

5.1. Zvyšování spolehlivosti systému bez využití nadbytečnosti

Jedním ze základních prostředků zvyšování spolehlivosti systémů je zvyšování jejich bezporuchovosti. Při návrhu systému se volí minimální nutný soubor technických prostředků, aby stačily k realizaci požadovaného rozsahu a kvality jeho funkcí. Nezavádí se žádná nadbytečnost. Pro výpočet ukazatelů bezporuchovosti pak platí sériový spolehlivostní model.

Z obecného hlediska můžeme dosáhnout zvýšení bezporuchovosti systému např.

- zvýšením bezporuchovostí prvků systému
- volbou co nejnižšího počtu prvků sériového spolehlivostního modelu.

Zvyšování bezporuchovosti systému zvyšováním bezporuchovostí jeho prvků nazýváme zvyšováním pasivní bezporuchovosti. Možnosti, jak zvýšit hodnoty bezporuchovosti jsou:

- vhodný způsob aplikace prvků, tj. správná volba pracovního režimu (např. u elektronických a elektrických prvků, nepřetěžování elektrickými, tepelnými a chemickými vlivy) a dodržování provozních režimů prvků
- použití prvků lepších než jsou standardní, tj. buď přímo od výrobce (prvky, u kterých jsou provedeny zkoušky spolehlivosti) a nebo vytřídění prvků (třídícími zkouškami odhalíme prvky se zjevnými i skrytými vadami).

Pokud chceme získat prvky s vyšší bezporuchovostí, možností je zavedení dokonalejší technologie výroby, protože právě ta určuje meze pasivní bezporuchovosti systému.

5.2. Zvyšování spolehlivosti zálohováním

Pro zvyšování bezporuchovosti u složitých systémů se zároveň s metodou zvyšování pasivní bezporuchovosti využívá tzv. nadbytečnost. Dále bude označována jako záloha. Je to v podstatě využívání prvků (technických prostředků), které nejsou pro realizaci systému nutné. Jsou použity pouze pro zvýšení bezporuchovosti. Dále je popsáno nejpoužívanější dělení zálohování :

- podle vzájemného vztahu základního a záložního prvku. Rozlišujeme dvě možnosti. Struktura základního a záložního prvku je stejná nebo je různá, ale funkce je zachována stejná
- podle způsobu připojení zálohy na stálé (statické) a substituční (dynamické)

- podle provádění obnovy. Rozlišujeme na zálohování, kdy provozuschopnost základního ani záložního prvku není obnovována a zálohování, kdy v určitém okamžiku po vzniku poruchy je provedena obnova jejich provozuschopnosti.

Při výběru a rozsahu zálohování je nutné vycházet z přípustnosti krátkodobého narušení provozuschopnosti systému, tedy povolené doby prodlevy, která vznikne po narušení provozuschopnosti. Pokud systém po stanovenou dobu musí mít nepřetržitý provoz bez jakékoliv poruchy, používá se nejčastěji stálé zálohování. Jestliže je dovoleno krátkodobé přerušení, které se nehodnotí jako porucha, ale jako tzv. selhání, potom použijeme substituční zálohování.

U životně důležitých systémů se zpravidla používá zálohování celým nezávislým systémem, i když mnohem lepší výsledky dává zálohování jednotlivých prvků. Pak je vhodné vybrat zejména kritické prvky a zálohovat pouze nejslabší místa systému.

5.2.1. Stálé zálohování

Při stálém zálohování (též nazývaném statické) jsou zálohované i záložní prvky trvale zapojeny v systému a plní stejné funkce. Jako příklad uveďme zdvojené pojistné ventily, zdvojené spojovací linky apod. Při vzniku poruchy nedochází ke změně struktury systému. Poruchový prvek zůstává nadále zapojen v systému. Proto je nutné vždy analyzovat následky poruch prvků.

Spolehlivostní modely stálého zálohování jsou nejčastěji vyjadřovány paralelní nebo smíšenou sériově-paralelní strukturou spolehlivostních blokových schémat. Tohoto zálohování především používáme na úrovni rozkladu na součástky, jednoduché obvody, tj. nižší úroveň rozkladu. U některých případů z hlediska následků poruch prvku nemůžeme provést rozklad pouze paralelním modelem. To je příklad některých elektronických součástek. Jako příklad uveďme diodu. Protože mohou nastat dva typy poruch - zkrat a přerušení, musíme tento prvek nahradit čtveřicí diod v sériově-paralelním zapojení. Při takovémto zapojení se žádná z poruch (zkrat, přerušení) neprojeví ve funkci prvku (jediným důsledkem je změna vnitřního odporu prvku).

5.2.2. Substituční zálohování

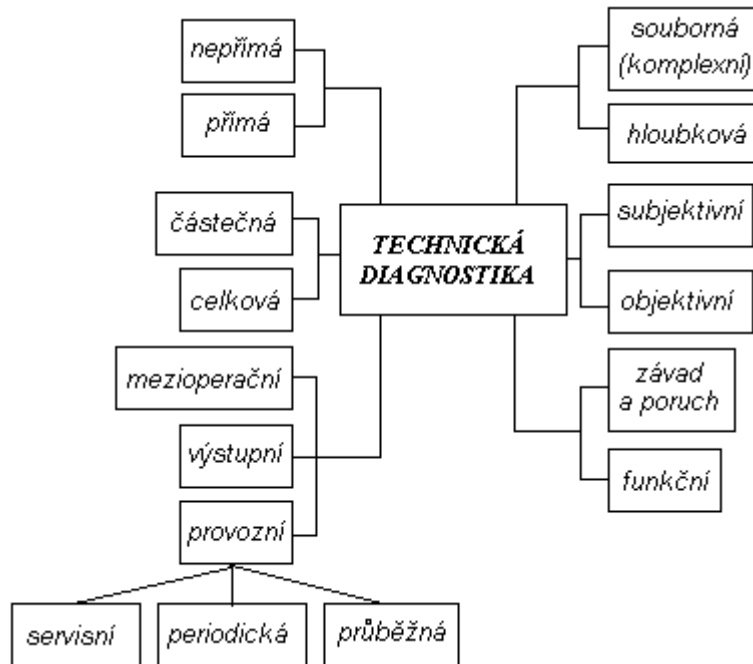
Substituční (též dynamické) zálohování při vzniku poruchy systému mění svoji strukturu tak, aby se obnovil bezporuchový stav. Nejjednodušší způsob provedení je odpojení poruchaného prvku a připojení záložního. K automatickému provedení takové změny je potřeba technický prostředek, kontrolně přepínací prvek. Tento prvek detekuje poruchu základního prvku, provede jeho odpojení a připojí prvek záložní. Substituční zálohování můžeme podle pracovních režimů záložních prvků dělit:

- zatížené zálohování, tj. základní i záložní prvky začnou pracovat současně a všechny prvky jsou stejně provozně zatížené
- odlehčené zálohování, tj. základní prvek je v plném pracovním režimu a záložní prvek je v odlehčeném pracovním režimu (např. je mu přiváděna napájecí energie)
- nezatížené zálohování, tj. v plném pracovním režimu je pouze základní prvek, záložní prvek v pracovním režimu není (při poruše a převodu záložního prvku do plného pracovního režimu se musí přivést napájecí energie, nastavit pracovní hodnoty apod.). Tyto nevýhody vyrovnává úspora energie a vyšší bezporuchovost záložních prvků.

6. Technická diagnostika

Technická diagnostika je obor zabývající se metodami a prostředky zjišťování stavu objektů. Ve většině případů jde o bezdemontážní a nedestruktivní postupy. Informace o zkoumaném objektu jsou získávány vyhodnocením jeho vnějších projevů.

Technickou diagnostiku můžeme rozdělit podle různých hledisek. Jistou obecně pojatou variantu rozdělení ukazuje obr. 6.1.



Obr. 6.1 Rozdělení technické diagnostiky

6.1. Základní pojmy

Diagnóza je vyhodnocení provozuschopnosti objektu za daných podmínek (okamžitý stav objektu). Diagnóza vede k řešení dvou základních úloh :

- detekce poruchy, tj. identifikace poruchy objektu nebo jeho části. Rozlišujeme stav poruchový a bezporuchový z hlediska použitelnosti objektu
- lokalizace poruchy, tj. určení místa poruchy objektu. S lokalizací souvisí diagnostické rozlišení, které udává počet detekovaných poruch daným diagnostickým algoritmem.

Prognóza je určení budoucího vývoje technického stavu objektu. Přitom vycházíme ze statistických vyhodnocení pravděpodobnosti bezporuchového stavu.

Geneze je analýza příčin poruch nebo předčasného zhoršení technického stavu objektu.

Diagnostické prostředky jsou technická zařízení (senzory, testery, ...) a pracovní postupy pro analýzu a vyhodnocení diagnostikovaného objektu. Pracovní postupy jsou diagnostické algoritmy počínaje studiem objektu, definicí systému, seznamem sledovaných poruch, realizací modelu, volbu diagnostického algoritmu až po volbu diagnostických prostředků a realizaci diagnostického systému. Diagnostické prostředky můžeme rozdělit na vnitřní a vnější. Vnějšími rozumíme oddělení diagnostického zařízení od diagnostikovaného objektu. Používá se při příliš složitých a rozměrných diagnostických zařízeních nebo pokud diagnostické zařízení využíváme pro více diagnostikovaných objektů. Vnitřní diagnostika je založena na použití diagnostického zařízení, které je zabudované do diagnostikovaného objektu. Použití této varianty je žádoucí tehdy, chceme-li diagnostiku provádět velmi často a bez zásahu do chodu diagnostikovaného objektu. Obě varianty se mohou dle potřeby kombinovat, protože vnitřní diagnostika je méně přesná v lokalizaci poruch. Vnější diagnostika poté přesně určí místo poruchy.

Diagnostickým systémem nazýváme diagnostické prostředky, diagnostikované objekty a obsluhu. Diagnostické systémy rozdělujeme na :

- ON-LINE, tyto vyhodnocují technický stav objektu za provozu. Příkladem ON-LINE systému je např. monitorovací systém, který je k diagnostikovanému objektu trvale připojený, trvale sleduje jeho stav a průběžně vyhodnocuje mezní stavy objektu.
- OFF-LINE, nejčastěji pod tímto pojmem rozumíme systémy, u kterých je během diagnostikování testem objekt mimo provoz. Algoritmy diagnostikování testem se dělí na nezávislé (kombinační) a závislé (sekvenční). U nezávislých testů je sled jednotlivých kroků testu nezávislý na výsledcích předcházejících kroků testu. Závislý algoritmus testu realizuje kroky testu v závislosti na výsledcích předcházejících kroků. Závislý test je časově méně náročný. Oproti systémům ON-LINE umožňují systémy OFF-LINE snadněji lokalizovat poruchy, detekovat poruchové stavy, které se při provozu objektu neprojeví. OFF-LINE také nazýváme postup, při kterém se pomocí přenosných zařízení naměří, částečně zpracují a uloží data do paměti. Vlastní vyhodnocení stavu objektu, porovnání s minulým stavem a prognózování se realizuje mimo diagnostikovaný objekt na centrálním počítači.

Diagnostický systém se liší podle toho, ve které fázi technického života bude objekt diagnostikován. Rozhodující fáze jsou výroba, provoz, servis a údržba objektu. Údržbu realizujeme třemi způsoby :

- údržbou po poruše
- údržbou dle časového plánu
- údržbou dle skutečného stavu

První způsob údržbou po poruše je nejméně vhodný. Dojde při něm k výpadku technologického procesu a možnosti porušení dalších objektů, bezpečnosti provozu (nejčastěji se používá u elektronických, analogových a číslicových obvodů). Druhý způsob údržbou dle časového plánu je ekonomicky nevýhodný. Opravy se dějí dle časového plánu, vyměňují se i díly nepoškozené nebo dojde k údržbě příliš pozdě. Tento způsob se praktikuje z bezpečnostních důvodů (letectví, jaderná energetika). Ekonomicky nejvýhodnější je varianta údržbou dle skutečného stavu.

Technický stav diagnostikovaného objektu je jeho schopnost vykonávat požadované funkce za stanovených podmínek užívání.

Diagnostická veličina je nositelem informace o technickém stavu diagnostikovaného objektu nebo jeho částí. Největším problémem diagnostiky je nemožnost přímého měření měřících bodů bez nežádoucí demontáže. Proto se musíme spokojit s přístupnými výstupnými prvky systému. Z nich potom více či méně přesně odhadnout vnitřní parametry pomocí diagnostických algoritmů. Musíme si také uvědomit, že jedné příčině může odpovídat několik následků a naopak.

Provozoschopný stav - objekt je schopen vykonávat stanovené funkce podle technických podmínek.

Poruchou končí provozuschopnost objektu.

Funkčnost objektu - objekt je schopen vykonávat některou svoji funkci.

6.2. Diagnostické modely

Model, tedy zjednodušené zobrazení originálu se využívá ke sledování chování systému a také k jeho simulaci (tj. řízené sledování vlastností originálu volbou vstupních veličin na modelu). Simulaci nahrazujeme nákladný nebo nerealizovatelný experiment na skutečném systému.

Diagnostický model je zobrazení bezporuchových a poruchových stavů prvků originálu nebo bezporuchového a poruchového chování objektu. U složitých systémů provádíme dělení na dílčí subsystémy, které se modelují postupně tzv. víceúrovňové modelování. Základní dělení diagnostických modelů je na :

- fyzikální, tj. hmotný a reálný objekt, sestavený na stejném principu jako originál (zmenšený model strojního zařízení) nebo analogickém principu (např. elektrický model tepelného nebo hydraulického systému)
- abstraktní, tj. matematický model.

Podrobnějším členěním lze modely rozdělit do následujících skupin:

- Matematické modely jsou tvořeny nejčastěji soustavou rovnic a nerovnic a vztahů mezi diagnostikovanými veličinami můžeme dále dělit :
- Analytický model - popisuje systém soustavou algebraických (statický model) nebo diferenciálních a diferenčních rovnic (dynamický model). Další možná dělení jsou na modely procesního chování a modely strukturní, lineární a nelineární, deterministické a stacionárně nebo nestacionárně stochastické, spojité a diskrétní, parametrické a nparametrické.
- Model procesního chování (tj. funkční model) je dán pouze vstupními, stavovými a výstupními veličinami systému. Pokud má pouze vstupy a výstupy modelujeme tzv. černou skříňku.
- U fyzikálně matematického modelu je nutná perfektní znalost fyzikálních a chemických zákonitostí pro daný systém. Pro neznalost těchto předpokladů a značnou složitost se tento model téměř nepoužívá.
- Empirický model vychází z experimentálně naměřených dat na vstupech a výstupech reálného systému.

- Parametrický model má konstanty (koeficienty, parametry) předem odhadnutých rovnic získány identifikačními algoritmy. To provádíme buď statistickým vyhodnocením naměřených dat nebo z dynamických odezev. V praxi nejčastěji používáme kombinovaný způsob.
- Logický model je modelování systému pomocí matematické logiky. U tohoto modelu se nevyskytují fyzikální proměnné, ale pouze vstupní, výstupní a stavové veličiny. Tyto nabývají pouze binárních hodnot log 0 a log 1. Při konstrukci logického modelu využíváme logických funkcí a Booleovské algebry. Pro sestavení modelu je vhodná výchozí tabulka s dvouhodnotovým popisem vlastností každého funkčního bloku. Obvykle bývá provozuschopnost definovaná logická „1“ a neprovozuschopnost (porucha) jako logická „0“.

Aplikace matematické logiky je vhodná pro objekty s vyznačenou funkční a blokovou strukturou. Každý blok musí mít definované vstupy a výstupy. Pro modelování vztahů mezi strukturálními parametry je logické modelování nevhodné. Logický model lze zadat ve tvaru grafů, tabulek a matic přechodů.

- Topologický model. Protože uvedené matematické modely jsou u složitějších systémů velmi náročné na matematický popis, používáme s výhodou pro popis vlastností a chování jednotlivých reálných prvků topologický model ve formě orientovaného grafu.

Použití modelů v diagnostice lze obecně rozdělit také do kombinací objektů a podmínek. Nejen samotné diagnostické objekty lze modelovat, v praxi se velmi často modelují zejména podmínky provozu, které umožňují uskutečnit nejrůznější zrychlené zkoušky nových či inovovaných strojů, přístrojů a zařízení. Diagnostika a modelování se takto dá dělit na:

- Reálný objekt v reálných podmínkách
- Model v reálných podmínkách
- Reálný objekt v modelových podmínkách
- Model v modelových podmínkách

6.3. Poruchy a jejich příčiny

Žádné zařízení nelze konstruovat tak, aby se u něj dříve či později neobjevily vady, závady a poruchy. Vada nám funkční spolehlivost neovlivňuje, to však nelze říct o závadách a poruchách. Každá závada a porucha má svoji příčinu a jejich znalost nám umožňuje navrhovat vhodný diagnostický systém.

Poruchy mohou vznikat z vnějších nebo vnitřních příčin. Vnějších příčinám přičítáme poruchy vzniklé nedodržením stanovených provozních podmínek a předpisů pro zatěžování, obsluhu a údržbu. Vnitřní příčiny mají svůj původ v nedostatcích výrobku. Závady a poruchy můžeme třídit z následujících hledisek:

- druh porušení (opotřebení, zadření, únava, přetížení apod.)
- okamžik vzniku (za provozu, při demontáži, při obsluze apod.)
- časová charakteristika (náhlá, postupná, občasná apod.)

- místo vzniku (konstrukce, technologie, provoz, vada materiálu apod.)
- stupeň nebezpečnosti
- rozsah (částečná, úplná apod.)
- následky
- způsob odstranění (za provozu, nutnost odstavení stroje, vyřazení z provozu apod.).

Příčiny poruch mohou mít svůj počátek v projekční přípravě (špatná formulace zadávaného úkolu, neověřené znalosti provozních podmínek, zanedbání skutečných vnějších faktorů působících na objekt), konstrukci (nevhodná volba materiálu, nesprávné dimenzování součástí, neodhadnutí působících sil, nevyváženost rotujících součástí, únava materiálu), výrobě (nedodržení rozměrových tolerancí, nedůsledná kontrola, špatná montáž, zanedbání úchylek tvaru a polohy, zavádění zvýšených namáhání a vnitřních pnutí jednotlivých dílů), provozu, obsluze, údržbě (nedodržení podmínek provozu, přetěžování, nesprávná, nedostatečná nebo zanedbaná údržba, nedovolené zásahy do chodu strojů, nedostatečná a nesprávná oprava), dopravě a zacházení s objektem.

Provozní poruchy mohou být způsobeny nejčastěji:

- mechanickým lomem
- nadměrným opotřebením
- změnami geometrického tvaru (deformace)
- změnou mechanických vlastností materiálu (přehřátí)
- změnou zátěžných sil atd.
- způsobem zatížení součásti –
 - statické: na správně dimenzované součásti nemá podstatný vliv. Při dlouhodobém působení mohou vznikat rozměrové změny tzv. „creep“
 - dynamické: náhlé nebo rázové zatížení. Jejich vlivem vznikají vibrace
 - periodické: příčinou vynucené vibrace a z toho plynoucí únavový lom
 - únavový jev, vyvolaný cyklickým napětím v součásti a je podmíněn růstem trhliny. Výsledkem je zeslabení průřezu součásti, přetížení a následný mechanický lom. Zdrojem vzniku může být stopa po obrábění, koncentrace napětí atd.
- opotřebením povrchu vzájemně se stýkajících a po sobě se pohybujících funkčních ploch součástí. Příčiny vzniku opotřebením jsou abrazivní (následek stírání povrchu tvrdými částicemi), záděr (porušení mazacího filmu), únavové opotřebením, molekulární opotřebením (tj. odtrhávání místních svarových mikrospojů, děje se hlavně v oblasti vysokých tlaků), korozní opotřebením (v přítomnosti agresivního prostředí)
- korozi, která je v podstatě chemickým (elektrochemickým) jevem, probíhajícím na povrchu kovů v agresivním prostředí. Koroze napadá povrch součásti a postupuje do hloubky materiálu. Vlivem koroze se zhoršuje jakost povrchu, vznikají trhlinky, které se rozšiřují a tím zeslabují nosný průřez. Mnohem zálučněji však působí „hloubková“ koroze interkrystalická (na hranicích zrn struktury materiálu).

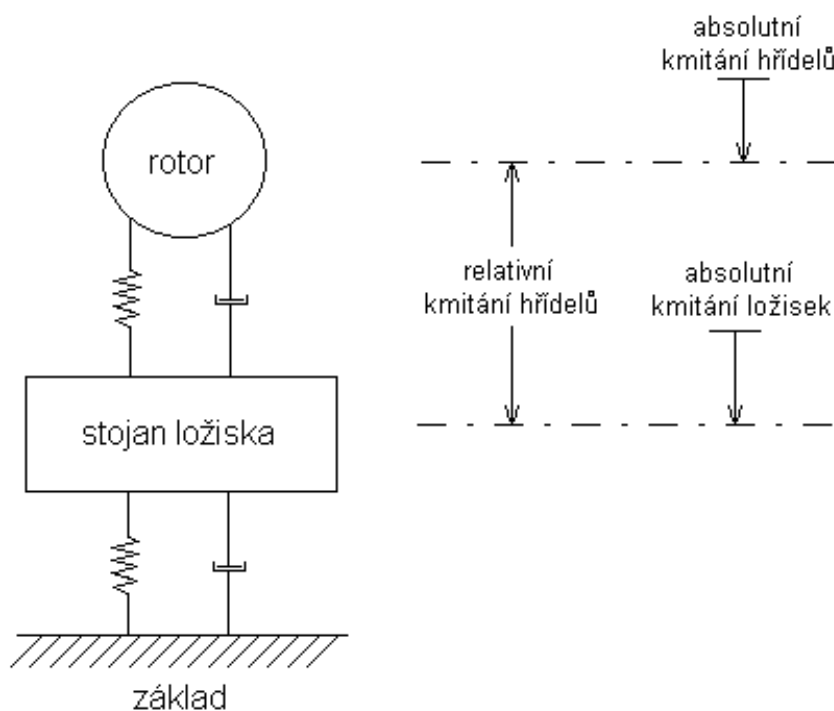
7. Vibrodiagnostika

7.1. Základy mechanického kmitání a snímačů vibrací

Žádný stroj nelze vyrobit, aby za provozu nebyl doprovázen vibracemi. Tyto mechanické kmity jsou pro každý stroj charakteristickou veličinou a odráží jeho vnitřní vazby a stavy a také spojení s okolím. Protože vibrační diagnostika je velice propracovaná metoda zjišťování stavu strojů, jsou vibrace vhodnými diagnostickými signály pro komplexní informace o technických stavech objektů. Mimo informací o vnitřních stavech jednotlivých uzlů a dílů mohou vibrace podat údaje o místě a příčině poruchy s vysokou přesností.

Kmitání je spojeno s dynamickým namáháním stroje a technickým stavem ložisek, hřídelí převodovek, klikových ústrojí, vačkových mechanismů, nevyvážených rotujících součástí, vůlemi v kluzných ložiscích atd. Technický stav je dán opotřebením, uvolněním spojů, únavovými lomy, korozi atd.

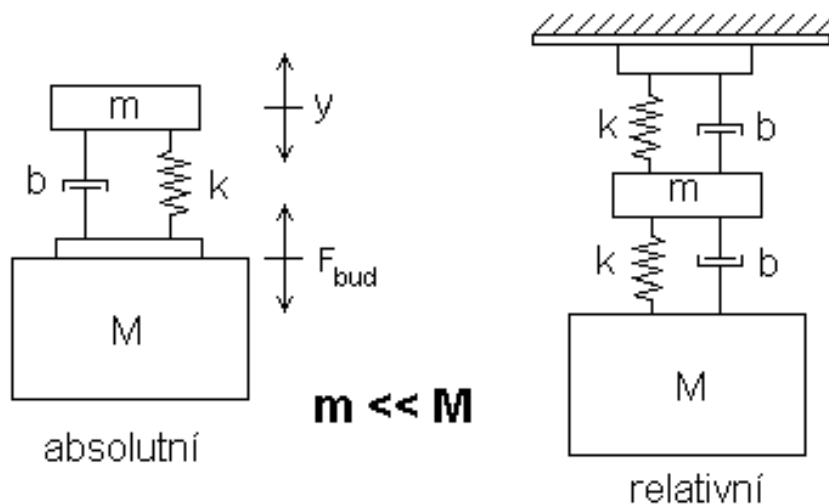
Kmitání dělíme na periodické, neperiodické a náhodné. Pokud periodické kmitání obsahuje jedinou frekvenci, nazýváme ho harmonické. Další rozlišení u strojů a zařízení je na absolutní a relativní kmitání (Obr. 7.1). U absolutního kmitání tělesa je jeho pohyb vztahován k pevnému bodu (gravitační pole zeměkoule), relativní je vyhodnocováno vůči zvolenému reálnému bodu. Potom můžeme rozlišit senzory kmitání na



Obr.7.1 Absolutní a relativní kmitání hřídele

- senzory absolutní
- senzory relativní

Snímače obou typů pak názorně schématicky přibližuje obr. 7.2.



Obr.7.2 Mechanický model absolutního a relativního snímače vibrací

Diferenciální rovnice, kterou lze popsat zjednodušeně kmitání seismické hmoty snímače nabývá podoby:

$$m\ddot{y} + b\dot{y} + ky = Ma = F_b \quad (7.1)$$

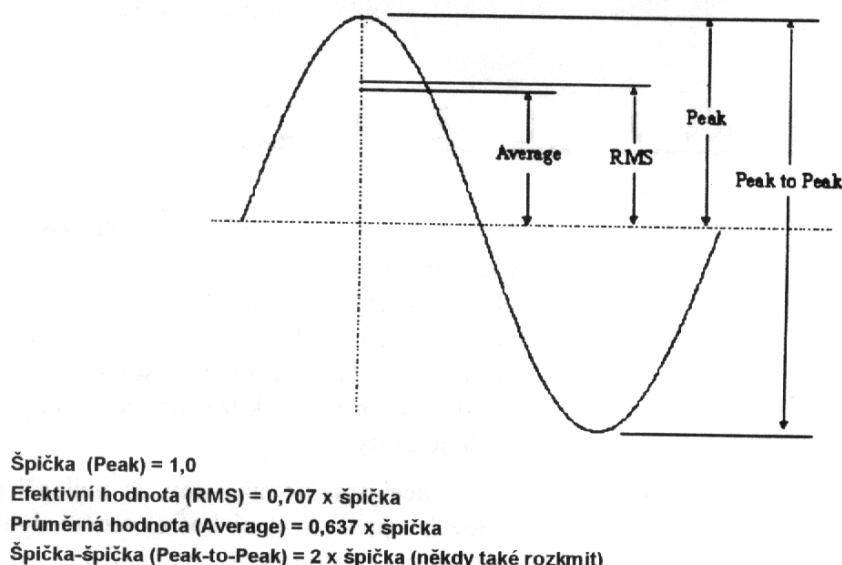
Principiálně může být snímač vibrací řešen jako snímač výchylky kmitů, rychlosti kmitů nebo zrychlení kmitů – akcelerometr, což je dnes také nejčastější případ. Snímání diagnostických signálů se děje při elektronickém zpracování dat senzory, které převádějí mechanickou veličinu na elektrický signál. Elektrické senzory neelektrických veličin dělíme do dvou skupin na aktivní (nepotřebují ke svému provozu zdroj elektrické energie) a pasivní (ke své funkci potřebují napájení z vnějšího zdroje elektrické energie).

Celkové vibrace představují celkovou vibrační energii měřenou v jistém frekvenčním rozsahu. Měřením celkových vibrací stroje nebo jeho částí a porovnáním této hodnoty s její normální úrovní se získají informace o stavu stroje.

Měření celkových vibrací používá tato vyjádření: špičková hodnota (peak), špička – špička (peak to peak), průměrná hodnota (average) a efektivní hodnota (RMS)

Špičková hodnota (výkmit) určuje vzdálenost mezi vrcholem vlny a nulovou úrovní. Hodnota *špička – špička* udává největší rozkmit hodnoceného sinusového kmitu a její použití je výhodné tam, kde pro hodnocení chvění je závazná výchylka chvění. *Průměrná hodnota* je průměrnou hodnotou amplitudy průběhu vlny. U ideálního sinusového průběhu se průměrná hodnota rovná nule (průběh v kladném i v záporném stavu je shodný). Většina průběhu vln však nemá ideální sinusovou charakteristiku. *RMS (efektivní hodnota)* je odvozena matematickou cestou, porovnávání energií nebo výkonu

stejnoseměrného a střídavého proudu. Ideální sinusové křivky je efektivní hodnota rovna 0,707 ze špičkové hodnoty. Vše názorně ukazuje obr. 7.3.



Obr. 7.3 Ideální harmonický pohyb

Je-li základní harmonický pohyb popsateľný rovnicí

$$x(t) = X_0 \cdot \sin \omega t \quad (7.2)$$

pak střední hodnota veličiny je

$$\bar{x} = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt \quad (7.3)$$

a efektivní hodnota této veličiny

$$x_{ef}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt = RMS \quad (7.4)$$

Měření vibrací je vlastně měřením periodického pohybu. U měření vibrací jsou důležité tři měřitelné veličiny (charakteristiky), a to výchylka, rychlost a zrychlení. K získání správné poruchové charakteristiky se musí k měření vibrací zvolit vhodný způsob měření a typ snímače.

Výchylka určuje změnu vzdálenosti nebo polohy objektu vzhledem k referenční poloze. Ve vibrační diagnostice jsou dnes nejrozšířenější indukční snímače využívající závislosti indukčnosti cívky na proudové hustotě vířivých proudů. Snímač výchylky je bezdotykové zařízení, které měří relativní vzdálenost mezi dvěma povrchy.

Rychlost se měří v $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$, jako rychlost změny výchylky vibračního signálu. Je to nejběžnější způsob měření vibrací. Nejčastěji se používají poměrně levné akcelerometry, z nichž se hodnota rychlosti získává integrováním hodnot zrychlení.

Vibrace ve formě **zrychlení** se měří pomocí akcelerometru. Akcelerometr obvykle obsahuje jeden nebo více piezoelektrických krystalů a hmotné těleso. Je-li piezoelektrický krystal deformován vzniká elektrický signál úměrný zrychlení. Krystal je deformován hmotným tělesem, když těleso kmitá spolu s částí, ke které je akcelerometr uchycen.

7.2 Senzory výchylky, polohy a posuvu

Senzory výchylky, polohy a posuvu realizujeme na indukčním, indukčnostním, kapacitním, magnetickém aj. principu. Ve vibrodiagnostice jsou nejrozšířenější indukčnostní senzory. Vzhledem k vysokofrekvenčnímu principu jsou tyto senzory náchylné na parazitní vlivy (např. délka kabelu k měřicím obvodům, vnější elektromagnetické pole). Z těchto důvodů se vyrábějí jako integrované (v kovovém stíněném krytu je kromě cívky zabudována také základní část elektroniky). Tyto senzory mají obvykle kmitočtový rozsah 0 - 10 000 Hz.

Snímače výchylky kmitů zpravidla vynikají vysokou hmotností oproti nízké tuhosti a tlumení. V praxi se vyskytují dosti často, avšak v této skupině snímačů nalezneme i všechny ostatní snímače posunutí, což je velmi důležitý parametr například u délkových teplotních dilatací tepelně energetických strojů apod.

7.3 Senzory rychlosti

Pro měření rychlosti kmitání se používají buď senzory zrychlení a výstupní signál z tohoto senzoru se integruje nebo senzor elektrodynamický. Snímač rychlosti kmitů by měl vynikat vysokým tlumením oproti nízké hmotnosti a tuhosti. Výhody elektrodynamických senzorů rychlosti:

- nízká cena
- vysoká úroveň výstupního signálu i při nízkých kmitočtech kmitání
- velmi malý vnitřní odpor
- možná aplikace bez zdroje napájení.

Nevýhody:

- omezení horního kmitočtu (max. 3 500 Hz)
- citlivost na parazitní magnetická pole.

I přes uvedené výhody se dnes v naprosté většině moderních diagnostických systémů používají piezoelektrické akcelerometry s integrovanou elektronikou.

7. 4 Senzory zrychlení - akcelerometry

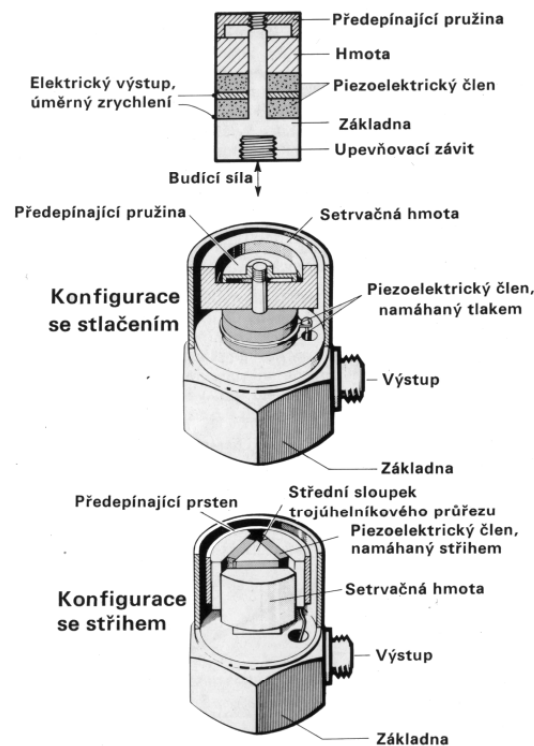
Kromě nejužívanějších piezoelektrických akcelerometrů lze pro měření zrychlení kmitání použít integrované tenzometrické nebo kapacitní akcelerometry nebo elektrodynamické senzory rychlosti doplněné derivačním obvodem.

Výhody piezoelektrických akcelerometrů:

- velký dynamický rozsah senzorů od 5 000 do 10 000 Hz, se speciální aparaturou lze měřit od 0,01 Hz do 20 000 Hz
- malé rozměry a hmotnost akcelerometrů
- necitlivost na parazitní magnetické pole.

Nevýhody:

- vyšší pořizovací cena měřicího řetězce
- nízká úroveň výstupního signálu, nelze aplikovat bez zesilovače a tedy bez napájecího zdroje.



Obr. 7. 4 Možná uspořádání piezoelektrických akcelerometrů

7.5 Analýza signálu v časové oblasti

Tabulka 7. 1. Přehled vybraných veličin a vztahů ve vibrodiagnostice

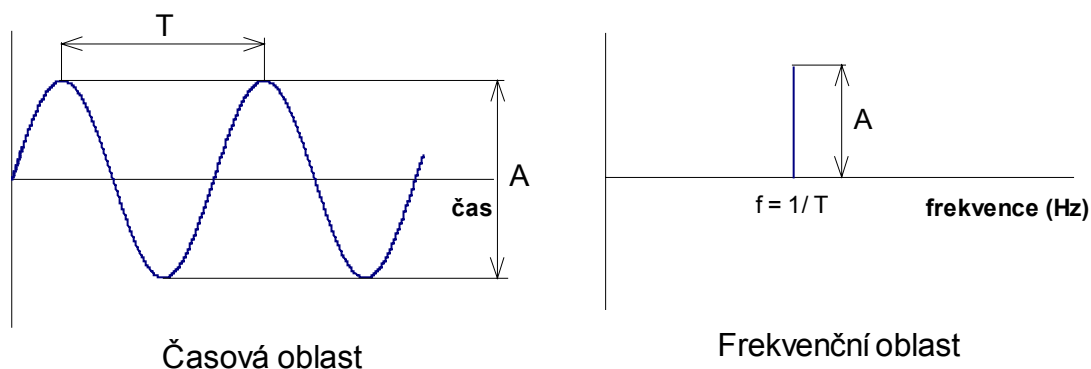
Značka	Jednotka	Název a vysvětlení
S	m	okamžitá výchylka kmitů, tj. vzdálenost kmitajícího bodu (tělesa) od zvoleného bodu (displacement)
x_0	m	amplituda kmitání, tj. maximální hodnota určující veličiny harmonického kmitání (amplitude)
x_r	m	rozkmit, tj. maximální rozdíl výkmitů v daném časovém intervalu (peak to peak)
φ	rad	fáze harmonické veličiny v čase $t = 0$; (phase angle)
ω	rad.s ⁻¹	úhlový kmitočet, úhlová frekvence (angular frequency), (phase angle), $\omega = 2\pi f$
T	s	perioda, tj. nejkratší doba, po níž se kmitavý děj a tedy také každá hodnota určující veličiny pravidelně opakuje (period); (pozn.: základní perioda kmitání je z hlediska spektrální analýzy nejdelší perioda kmitání) (period of vibration)
F	Hz	frekvence, kmitočet, platí: $f = 1/T$ (frequency)
V	m.s ⁻¹	rychlost kmitání $v = ds/dt$ (velocity); pro harmonické kmitání platí $v_m = s_m \omega$; složené periodické kmitání lze po rozkladu na jednotlivé harmonické složky definovat efektivní hodnotou rychlosti dle vztahu: $v_{ef} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n v_{0i}^2$
U	m.s ⁻¹	mohutnost kmitání, tj. maximální efektivní hodnota rychlosti kmitání v daném časovém intervalu na vybraných místech (severity)
A	m.s ⁻²	zrychlení kmitání $a = dv/dt$ (acceleration); pro harmonické kmitání měřeného objektu platí: $a_0 = \omega \cdot v_0 = \omega^2 \cdot s_0$ $a_{ef} = \omega \cdot v_{ef}$
B	m.s ⁻³	ryv, tj. veličina udávající časovou změnu zrychlení $b = da/dt$ (jerk)
\bar{x}		střední hodnota určující veličiny (mean value) $\bar{x} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad \bar{x} \doteq \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i(t) $ $x(t)$ je určující veličina mechanického kmitání; $x_i(t)$ jsou diskrétní hodnoty veličiny; T je daný časový interval pro $x(t)$; (platí jak pro periodické, neperiodické tak i náhodné kmitání)
x_{ef}		Efektivní hodnota určující veličiny (RMS...root-means-square) $x_{ef}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt \quad \bar{x}_{ef}^2 \doteq \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2(t)$ $x(t)$ je určující veličina mechanického kmitání (většinou rychlost nebo zrychlení); $x_i(t)$ jsou diskrétní hodnoty veličiny; T je daný časový interval pro $x(t)$; (platí jak pro periodické, neperiodické tak i náhodné kmitání)
L	dB	hladina určující veličiny kmitání $L = 20 \log \frac{A}{A_0}$, kde A_0 je referenční hodnota určující veličiny
Poznámka: Některé referenční (vztažné) hodnoty vibrací. Odpovídají hladině $L = 0$ dB.		
	- rychlost kmitavého pohybu	$v = 1,00 \cdot 10^{-9} [m/s]$
	- zrychlení kmitavého pohybu	$a = 1,00 \cdot 10^{-6} [m/s^2]$
	- síla	$F = 1,00 \cdot 10^{-6} [N]$

Vyhodnocení signálu v časové oblasti dělíme na vyhodnocení celkového kmitání a časových průběhů signálů. Celkové kmitání souvisí se všemi frekvencemi kmitání v daném měřicím bodě. Porovnává se naměřená hodnota celkového kmitání s předchozím měřením, kdy stroj pracoval bez poruchy. Další srovnání je s nastavenými kritickými hodnotami. Diagnostikování stroje pomocí celkového kmitání je standardní metoda, výhodou je rychlost vyhodnocení a nízké pořizovací náklady. Nevýhodou je, že signály s malou amplitudou se ztrácejí ve vibračním šumu (z převodovek, ze sousedního stroje) a tato metoda neumožňuje lokalizovat příčinu kmitání stroje.

Pomocí databáze výsledků měření celkového kmitání byly sestaveny doporučení mezních hodnot kmitání, prostřednictvím efektivní rychlosti kmitání v kmitočtovém pásmu 10 - 1000 Hz. Příkladem je vyhodnocení mohutnosti kmitání podle ISO 2372. Mechanické kmitání se měří při jmenovitých otáčkách stroje na ložiskových víkách, případně na ložiskových štítech nebo kostře a to ve třech vzájemně kolmých směrech.

7.6 Analýza signálu ve frekvenční oblasti

Správná aplikace frekvenční analýzy odstraňuje nevýhody analýzy v časové oblasti. Její pomocí můžeme lokalizovat vznikající poruchy jednotlivých částí objektu. Úplná frekvenční analýza je reprezentována jak amplitudovým tak fázovým spektrem. Fázové spektrum je zvláště důležité pro indikaci typu nevyváženosti a samozřejmě pro metody vyvažování. Frekvenční spektrum tvoří podklad pro rozlišení závad na rotujícím stroji (např. nevyváženosti, ozubená soukolí, ložiska a pod.) Průběžné monitorování, zobrazení rozběhů a doběhů strojů a trendy postupného zhoršování technického stavu je možné analyzovat na trojrozměrných diagramech.



Obr. 7.3 Grafické znázornění převodu z časové do frekvenční oblasti

7.7 Frekvenční analýza periodických signálů

Řada současných měřicích přístrojů používá ke kmitočtové analýze matematického postupu, kdy se ze změřeného časového komplexního signálu vypočítají jednotlivé kmitočtové složky využitím rychlé Fourierovy transformace (Fast Fourier Transform, FFT).

Z matematiky víme, že každou periodickou funkci $f(t)$ s periodou T lze vyjádřit nekonečnou sumou řady funkcí sinus a kosinus. Frekvence každé funkce sinus a kosinus je dána celočíselným násobkem frekvence původní funkce. Jedná se o Fourierovy řady, které lze vyjádřit ve tvaru

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n2\pi \frac{t}{T}) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n2\pi \frac{t}{T}) \quad (7.5)$$

kde koeficienty jsou dány vztahy

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \sin(n2\pi \frac{t}{T}) dt, \quad a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n2\pi \frac{t}{T}) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n2\pi \frac{t}{T}) dt \quad (7.6)$$

Zde koeficienty a_n a b_n udávají amplitudy jednotlivých kmitočtových složek komplexního časového signálu $f(t)$.

Zásadním omezením Fourierovy řady je, že ji můžeme použít jen pro periodické signály. Reálné signály při kmitočtové analýze vibračních a akustických soustav jsou však většinou neperiodické. V tomto případě roste $T \rightarrow \infty$ a frekvence kmitočtových složek nejsou celočíselnými násobky nějaké základní frekvence, nýbrž mohou nabývat spojitého spektra hodnot. Pro výpočet kmitočtových složek je pak třeba použít Fourierovu transformaci, kterou můžeme vyjádřit následující dvojicí integrálů:

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (\text{přímá transformace}), \quad (7.7)$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S(f) e^{+j2\pi ft} df \quad (\text{inversní transformace}). \quad (7.8)$$

Funkce $S(f)$ je obecně komplexní (má reálnou a imaginární složku) a obsahuje informace o amplitudách a fázích všech harmonických frekvencí, které jsou obsaženy v $x(t)$.

Fourierova transformace je dána spojitým analytickým integrálem. Časový signál akustických a vibračních detektorů lze však zaznamenat pouze v diskretních časových okamžicích vzdálených o Δt (časový interval vzorkování). Známe tedy pouze diskretní hodnoty funkce $x(t)$ a integrály Fourierovy transformace je třeba počítat numericky:

$$S'(f) = \Delta t \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n\Delta t) e^{-j2\pi f n \Delta t} \quad (7.9)$$

V tomto případě ale nejsou informace o amplitudách a fázích všech kmitočtových složek přesné. Funkce $S'(f)$ popisuje přesně pouze složky s frekvencí nižší, než je jistá hraniční frekvence f_{max} (maximální frekvence), která souvisí s velikostí vzorkovacího intervalu Δt .

Požadovanou sumaci přes nekonečný počet diskretních hodnot nelze také splnit. Měření časového signálu proběhne v konečném časovém intervalu T (celková doba měření) a máme tedy k dispozici pouze omezený počet diskretních hodnot $x(n\Delta t)$, $n = 0, 1, 2 \dots N-1$, $N = T / \Delta t$ (N – počet vzorků). To v podstatě znamená, že můžeme stanovit amplitudy a fáze pro nekonečně mnoho hodnot frekvencí a intervalu mezi 0 a f_{max} . Dostáváme diskretní kmitočtové složky s krokem Δf . Tuto skutečnost si můžeme představit tak, že digitální (diskretní) Fourierova transformace představuje vlastně soustavu m pásmových filtrů s šířkou pásma Δf (interval mezi kmitočtovými složkami, $\Delta f = 1/T$). Omezením počtu diskretních hodnot $x(n\Delta t)$ dostáváme vztah

$$C(m\Delta f) = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} x(n\Delta t) e^{-j2\pi m \Delta f n \Delta t} \quad (7.10)$$

$$\text{pro } m = 0, 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1$$

Efektivní algoritmus pro výpočet tohoto vztahu pro diskretní transformaci se nazývá rychlá Fourierova transformace (FFT). Je k dispozici zpravidla ve všech programech pro PC, využitelných pro technické výpočty. Při použití algoritmu FFT jsme zpravidla omezeni pouze na hodnoty N , které jsou rovny mocnině čísla 2, tj. 256, 512, ... Tato podmínka neplatí obecně pro diskretní Fourierovu transformaci, ale je to cena, kterou musíme zaplatit za rychlost algoritmu FFT, která je při frekvenční analýze ve většině případů mnohem důležitější. Počet hodnot kmitočtového spektra je poloviční vzhledem k počtu hodnot časového signálu, přičemž f_{max} je rovna polovině vzorkovací frekvence $f_{vz} = 1 / \Delta t$. To souvisí se Shannonovým vzorkovacím teorémem, podle kterého musí být vzorkovací frekvence alespoň dvakrát větší (Nyquistova frekvence), než je frekvence nejvyšší harmonické složky, obsažené v měřeném signálu (i když nás tak vysoké frekvence nezajímají). V digitální Fourierově transformaci se tato skutečnost projeví tím, že jen $N/2$ hodnot funkce $C(m\Delta f)$ ve vztahu (7.10) je nezávislých. Při reálném měření obsahuje signál z detektoru různé rušivé složky. Některé mívají náhodný charakter, někdy se jedná o harmonické složky vyšších frekvencí, než je maximální frekvence kmitočtových složek daná Shannonovým vzorkovacím teorémem. *Náhodný rušivý signál neovlivňuje významně výsledek kmitočtové analýzy. V druhém případě, kdy vzorkovací frekvence je nižší, než by*

bylo žádoucí vzhledem k nejvyšší frekvenci měřeného signálu (Shannonův teorém), objevuje se v kmitočtovém spektru „nepravé“ výrazné maximum („špička“). Obecně platí, že každá složka s frekvencí $f_s > f_{max}$ vytvoří v kmitočtovém spektru FFT maximum u frekvence $f = |f_{vz} - f_s|$. Uvedený efekt se nazývá kmitočtové zkreslení (aliasing).

PARAMETRY FFT (Fast Fourier Transform):

- *Frekvenční rozsah* je základní pásmo od 0 Hz do $f_{vz}/2$, přičemž je toto pásmo nezávislé na počtu vzorků N .
- „Zoom“ faktor M udává při frekvenční lupě kolikrát je frekvenční rozsah menší.
- *Počet spektrálních čar* je obvykle $N/2$, kde N je počet vzorků signálu. Toto neplatí pro tzv. nedestruktivní zoom.
- *Pořadové číslo spektrální čáry* odpovídá číslu časového odměru.
- *Rozlišitelnost frekvenční analýzy* udává interval, tj. rozestup mezi spektrálními čarami. Je dán vztahy:

$$r = \frac{1}{T} = \frac{1}{N \cdot T_{vz}} = \frac{f_{vz}}{N} \quad (7.11)$$

- *Šíře pásma* je kromě pravoúhlého okna obecně širší než rozlišitelnost a to dle volby okna.

8. Diagnostika analogových a číslicových obvodů

V této kapitole budou popsány některé základy metod diagnostikování desek s analogovými a číslicovými obvody

Logická porucha je model poruchy, která mění logickou funkci daného obvodu resp. desky s číslicovými obvody. Logickou poruchou nemusí být změna náběžné a sestupné hrany logického obvodu, odběr proudu, tvar signálu, doba zpoždění, svod, hodnota napětí při různých logických úrovních atd. Celá problematika se zjednodušuje zavedením pouze několika modelů poruch.

Základní typy poruch:

t_0 ... trvalá logická nula

t_1 ... trvalá logická jednička

z ... porucha typu zkrat

t_y ... porucha typu trvale přerušeno

Uvedené typy poruch se přiřazují vodičům spojujícím logické obvody, ale ve skutečnosti jimi lze modelovat převážnou většinu poruch logických členů. Většina testovacích algoritmů vychází z poruch typu t_0 a t_1 . Poruchy typu zkrat se obvykle testem poruch typu t_0 a t_1 odkryjí. Poruchy typu trvalého přerušeni se týkají obvodů s technologií CMOS. Zcela specifické modely poruch jsou např. u paměti typu RAM nebo u PLA.

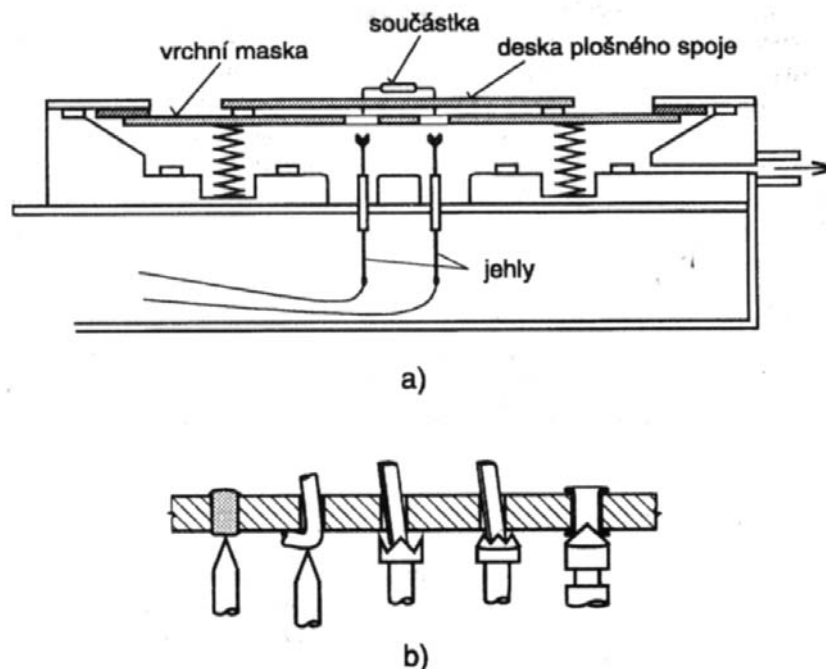
8.1. Automatické funkční testery

Funkční testery diagnostikují činnost celé desky jako uzavřeného systému. Prostřednictvím procesních a případně pomocných diagnostických konektorů přivádíme na uživatelsky přístupné vstupy dvouhodnotové signály a následně signály z uživatelských výstupů porovnáváme s modelem bezchybové desky. Modelem je obvykle matematický logický model v paměti počítače nebo fyzikální model tvořený bezchybovou deskou (v jednodušších případech). Nevýhodou funkčních testerů je nedostatečná lokalizace poruch, neboť testování probíhá pouze přes uživatelské vývody a vnitřní uzly desky jsou nepřístupné. Protože požadujeme lokalizaci s přesností na vadnou součástku, používáme u funkčních testerů metodu slovníku poruch nebo řízenou sondu (nebo kombinaci obou metod). Slovník poruch je v podstatě tabulka, která přiřazuje jednotlivým poruchám desky odezvy na vstupní test pro všechny možné poruchové stavy obvodu. Rozlišitelnost je při použití slovníku poruch omezená a také je tato metoda velmi náročná na čas a paměť testeru. Algoritmus řízené sondy je založen na programovém vybavení testeru. Program vede pomocí obrazovky operátora, aby přiřkládal sondu na jednotlivé vnitřní uzly desky. Po každém přiložení se spustí test a na základě jeho odezvy se stanoví další diagnostikovaný uzel na desce.

8.2. Testery typu „In Circuit“

Testery „In Circuit“ se dají přeložit jako testery prvků v obvodě. Tyto testery, jak název napovídá, umožňují přesnou lokalizaci poruch jak propojovací sítě, tak jednotlivých analogových a číslicových součástek. Metoda spočívá na postupném testování spojů tištěného spoje a testování jednotlivých prvků, umístěných na desce při maximálně možném potlačení vlivů ostatních součástek. Hlavním rozdílem oproti funkčním testerům je připojení diagnostikované desky. Princip těchto testerů je založen na přímém kontaktování jednotlivých uzlů obvodů speciálním měřícím adaptérem s odpruženými hroty (obr. 8.1). Přitlačení adaptéru s jehlami se u jednoduchých testerů realizuje ručně a u větších pak pneumaticky, a to odčerpáním vzduchu pod deskou.

Programové vybavení testerů umožňuje postupně provést několik testů, jako např. test kontaktů jehel adaptéru k uzlům desky a test zkratů mezi jehlami, test plošných spojů neboli test propojovací sítě na zkraty a přerušení, test hodnot pasivních prvků (odpory, kondenzátory, indukčnosti aj.), test aktivních polovodičových prvků (diody, tranzistory aj.) a test logických obvodů.



Obr. 8.1 Měřicí jehlový adaptér a) uspořádání b) vybrané typy jehel

Testery „In Circuit“ neboli testery prvků v obvodě umožňují přesnou lokalizaci poruch jak propojovací sítě, tak jednotlivých pasivních a aktivních (analogových a

číslicových) součástek. Algoritmus testů „In Circuit“ spočívá v postupném testování jednotlivých spojů tištěného spoje a testování jednotlivých prvků, umístěných na desce při maximálním možném potlačení vlivu okolních součástek. Pod pojmem „In Circuit“ je celá řada metod od statických až po dynamické, funkční, parametrické, polyfunkční a „Cluster-test“. Statické metody testují obvody bez vztahu k ostatním součástkám, většinou za účelem zjistit, zda byla součástka vůbec osazena nebo není-li osazena chybně. U pasivních součástek statický test stanoví, zda součástka je ve stanovené toleranci. Funkční testy ověřují základní funkci součástky, tento test může být statický i dynamický, tj. s ověřením funkčnosti při provozních kmitočtech hodinových pulsů. Parametrické metody již měří parametry součástek (např. náběžnou a sestupnou hranu impulsu, dobu zpoždění, zesílení, vstupní klidové proudy atd., tedy vyhodnocují chyby postupného poškození struktury součástek, které zatím nevykazují poruchu. Polyfunkční testy jsou kombinované parametrické a dynamické testy.

„Cluster“ testy se používají u testování celků, které nelze rozčlenit na jednotlivé součástky nebo je nutné provést ověření jako celku (např. analogovo číslicové převodníky, převodník napětí - kmitočet, apod.).

Programové vybavení testerů umožňuje samoučení, tj. uložení odezev pro dané vstupní signály do paměti. Rozdíl oproti funkčním testerům je v připojení diagnostikované desky. „In Circuit“ test je založen na přímém kontaktování jednotlivých uzlů obvodu speciálním měřicím adaptérem s odpruženými měřicími hroty. Hroty lze rozmisťovat od rozteče 1.25 mm.

Programové vybavení testerů umožňuje postupně provést:

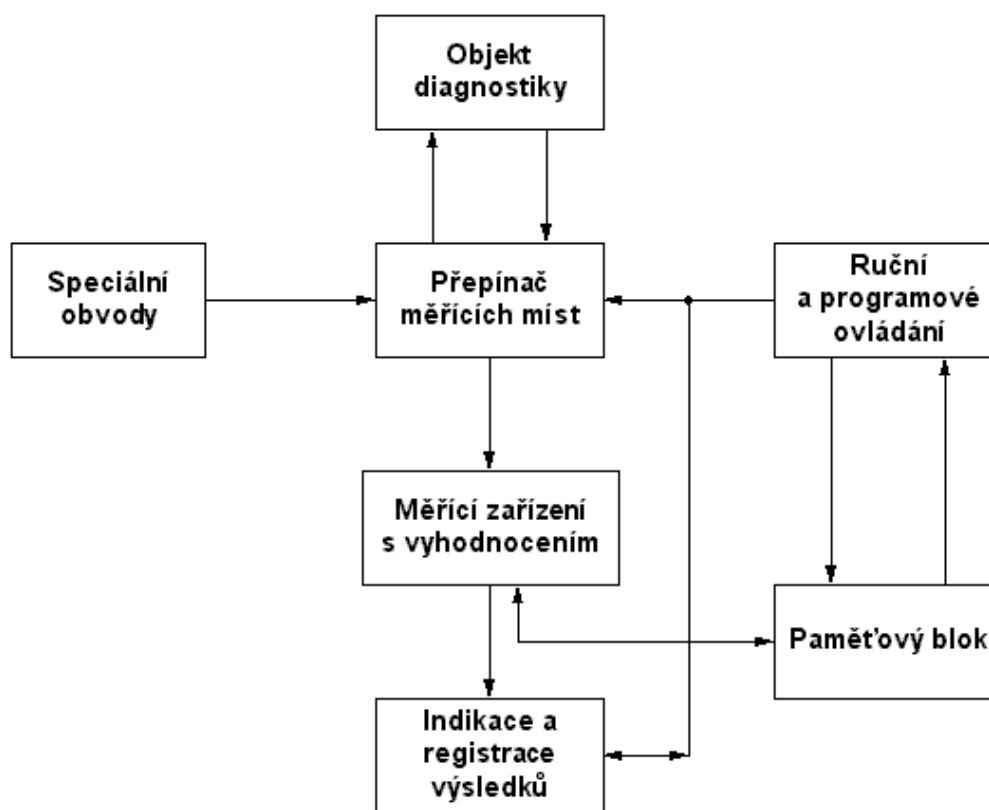
- test kontaktů jehel adapteru k uzlům desky a test zkratů mezi jehlami
- test plošných spojů neboli test propojovací sítě na zkraty a přerušeni
- test hodnot pasivních prvků (odpory, kondenzátory, indukčnosti apod.)
- test aktivních polovodičových prvků (diody, tranzistory, zesilovače apod.)
- test logických obvodů.

8.3. ASA tester

ASA lze přeložit jako analogová příznaková analýza nebo impedanční příznaková analýza. Princip metody spočívá v zobrazení voltampérových charakteristik, označované jako impedanční příznaky (nebo ASA příznaky) a to jak pasivních tak aktivních součástek a integrovaných obvodů umístěných na desce. Testování probíhá při odpojeném napájecím napětí desky. Měřené součástky a obvody se k testeru připojí vícekontaktní sondou nebo pomocí jehlového adaptéru.

Metodu ASA lze aplikovat bez znalostí katalogových hodnot součástí, jejich vnitřních struktur a schéma zapojení desky. Tyto testery mají také samoučící mechanismus, je také možná kombinace s testerem „In Circuit“.

Obecně lze automatické diagnostické zařízení – tester – pro funkční diagnostiku elektronických obvodů schématicky znázornit obr. 8.2.



Obr.8.2 Schéma automatického testeru elektronických obvodů

9. Další metody používané v technické diagnostice

Popis dalších metod je pouze informativní. Zahrnuje základní popis metod a jejich případné další rozdělení.

9.1. IR systémy

Základem infradiagnostických metod je bezdotykové měření teploty povrchu objektu a vyhodnocování části elektromagnetického vlnění (tepelného záření), které měřený objekt vyzařuje, a to s využitím IR oblasti záření. Podle rozložení teplotního pole diagnostikovaného objektu, můžeme kontrolovat jeho funkce, které jsou spojeny s vývinem nebo absorpcí tepla. Touto metodou můžeme lokalizovat různé materiálové vady, opotřebením způsobené třením (u ložisek) a jiné vady objektu, které ovlivňují povrchovou teplotu. Příkladem je diagnostika izolátorů vysokého napětí (prováděná za provozu), sledování teploty pláště elektromotoru atd.

Oblast elektromagnetického vlnění nazývaná infračervené záření je v oblasti $0.78\mu\text{m}$ - 1mm . Praktický rozsah je do $15\mu\text{m}$. Bezdotykové měření teploty je nazývané pyrometrie.

9.2. Defektoskopické systémy

Defektoskopické zkoušky materiálu jsou nedestruktivní zkoušky skrytých vnitřních a povrchových vad.

Metody rozdělujeme:

- povrchové metody, detekují trhliny a necelistvosti na povrchu nebo těsně pod ním. Patří sem metody:
 - kapilární
 - elektrické (odporové)
 - elektromagnetické (vířivé proudy)
 - magnetické
 - teplotní (infračervené, termobarvy)
- vnitřní metody, detekují trhliny a necelistvosti uvnitř objektu (např. svaru). Jsou to metody:
 - ultrazvukové
 - prozařovací (rentgenovo záření, záření gama, tok neutronů).

9.3. Hluková diagnostika

Hluk jako nežádoucí zvuk (20 Hz-20 kHz) může obsahovat informace o technickém stavu stroje. Hluk se šíří nejen kapalinou a pevnou hmotou, ale také na značné vzdálenosti vzduchem. Nevýhodou z hlediska diagnostiky je v uzavřených prostorách vznik odrazů a interferencí, a také zdroje hluku ostatních objektů, což komplikuje lokalizaci vlastního zdroje hluku.

U točivých strojů jako zdrojů hluku uveďme např. ložiska, převodovky, spalovací motory a kompresory, elektrické točivé stroje, transformátory.

Většina strojírenských objektů je provázána emisí akustických vln v pásmu frekvencí 20 Hz až 20 kHz. Jednoduché zvuky jsou většinou charakterizovány harmonickým kmitáním prostředí. Existují však i složené zvuky skládající se z harmonických složek. *Hluk* je širokopásmovým akustickým vlněním se spektrem složeným jak z diskrétních složek, tak i z části spojitě, dané impulsním hlukem. Na vytváření hluku se podílejí mikroskopické silové impulsy, způsobené vzájemným pohybem drsných, nepřesně opracovaných nebo opotřebovaných ploch v místě styku dvojic součástí.

V akustice se hlavně posuzují hodnoty určité akustické veličiny *hladinami* L , které jsou pro *intenzitu zvuku* I definovány vztahem

$$L_i = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (dB), \quad (9.1)$$

a pro akustický tlak

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad (dB). \quad (9.2)$$

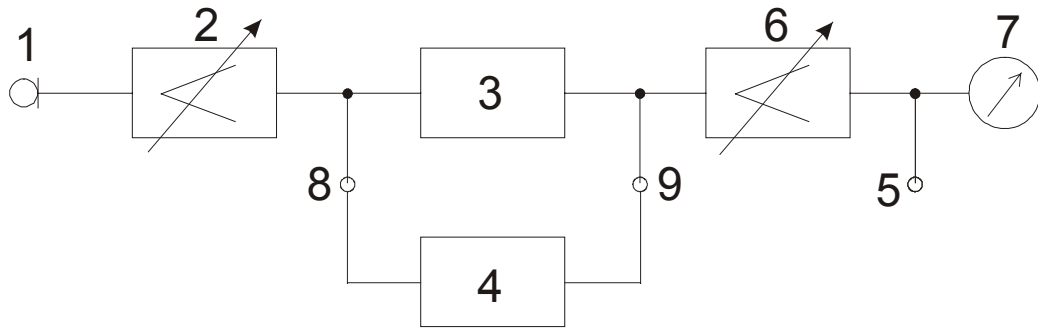
Nejdůležitější vztažné hodnoty akustických veličin podle ISO jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 9.1 Vztažné hodnoty akustických veličin

Název veličiny	Obvyklé označení	Vztažná hodnota
Akustický tlak	p_0	$2 \cdot 10^{-5}$ Pa
Intenzita zvuku	I_0	$1 \cdot 10^{-12}$ W.m ⁻²
Akustická rychlost	v_0	$1 \cdot 10^{-8}$ m.s ⁻¹
Akustický výkon	N_0	$1 \cdot 10^{-12}$ W

Základním přístrojovým vybavením pro měření zvuku a hluku jsou zvukoměry a pro speciální funkce hladinové analyzátoři, hladinové zapisovače a měřicí magnetofony.

Zvukoměry jsou vybaveny váhovými filtry, jejichž frekvenční charakteristiky včetně dovolených úchylek jsou dány normou. Zjednodušené blokové schéma běžného zvukoměru je na obr. 9.1.



Obr. 9.1 Blokové schéma zvukoměru

1 – mikrofon, 2 – zesilovač s řízeným ziskem, 3 – váhové filtry respektující subjektivní vnímání zvuku, 4 – speciální vnější filtry, 5 – pomocný výstup, na který jsou zapojeny osciloskop, analyzátor apod., 6 – zesilovač s usměrňovačem s převodníkem na efektivní hodnotu, 7 – indikátor hladin, 8,9 – pomocné výstupy

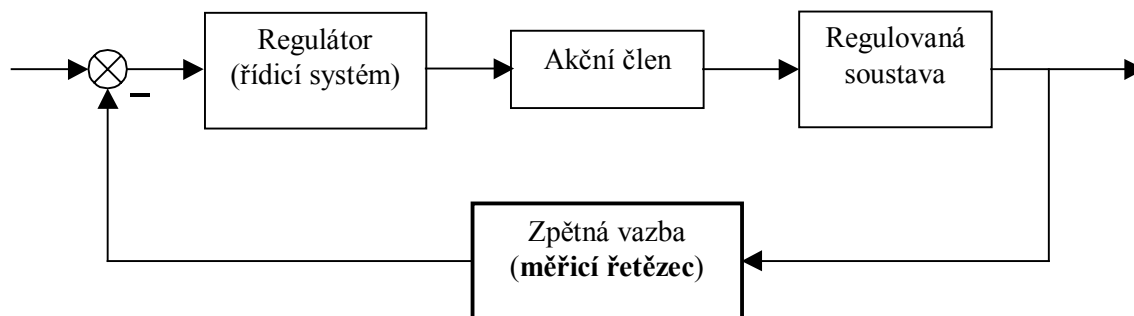
Měření jednoduchých zvuků je poměrně přesné, úzkopásmové zvuky jsou měřeny ještě s přípustnou chybou, ale hluk, širokopásmový signál, je možno identifikovat po změření výchozích hodnot zvukoměrem pouze následným výpočtem.

Diagnostické parametry při použití akustické diagnostiky jsou efektivní hodnoty akustického tlaku, změny hodnot frekvenčního spektra v určitých vybraných pásmech frekvencí a kompletní spektrální analýza vyzařovaného hluku.

Akustické diagnostiky se zejména využívá ke zjišťování netěsností a trhlin pneumatických obvodů, ke zjišťování intenzity hluku, který reprezentuje provozní režim stroje, v diagnostice lopatkových strojů, převodovek, atd.

10. Technická diagnostika a spolehlivost v automatizačních systémech

V této kapitole budou stručně popsány některé aplikace technické diagnostiky, vzhledem k rozsáhlosti této oblasti. Proto budeme vycházet z regulačního obvodu, viz. obr.10.1 a na jeho základních částech budou popsány některé možné metody diagnostiky.



Obr.10.1 schéma regulačního obvodu

Rozdělíme tedy regulační obvod na jednotlivé části, tj. regulovanou soustavu (technologický proces) a regulátor. Dalšími částmi regulačního obvodu jsou čidla pro snímání řízené veličiny, převodníky pro převádění této veličiny na elektrický signál (ve většině případů), akční členy, které využívají informací z regulátoru a ovlivňují resp. řídí regulovanou soustavu. Dalšími částmi jsou trasy pro přenos signálů mezi jednotlivými částmi regulačního obvodu a v neposlední řadě členy pro styk s obsluhou, tj. monitory, klávesnice apod. a členy pro záznam a uchování dat a informací, tj. paměti, zapisovače, pevné disky apod.

Prvním důležitým krokem je rozhodnutí, zda chceme diagnostické zařízení mít připojené k diagnostikovanému objektu trvale, tzv. ON-LINE nebo budeme diagnostikování provádět v pravidelných časových intervalech, tzv. OFF-LINE, přičemž daný objekt je většinou mimo provoz. Podrobnější vysvětlení bylo popsáno v kapitole 6.

10.1. Regulovaná soustava

Regulovaná soustava, resp. technologický proces. Předpokládejme, že je tvořen strojními součástmi. Mezi nedůležitější a z hlediska poškození stroje patří diagnostika stupně poškození rotujících součástí např. hřídelí, ložisek, spojek apod., jejich mazání. Důležitý je také způsob a množství maziva, protože jak nenamazání tak i přemazání má škodlivé účinky na stroj. Dále diagnostikujeme např. ozubená kola soukolí převodovek, elektromotory, monitorujeme nečistoty způsobující poruchu stroje apod. Protože téměř u všech technologických objektů se vyskytují vibrace, používáme k diagnostikování metod vibrodiagnostiky.

Snímače neumísťujeme na lakované povrchy, dělicí roviny, konstrukční mezery apod., ale měly by se přikládat na plochý povrch. Měření se vykonávají ve stejných bodech

pro zachování možnosti porovnání s předchozími měřeními. Senzor by vždy měl být v kolmé poloze k měřené ploše. Pokud je to možné, měly by se vibrace měřit ve třech směrech:

- axiálním (podélném)
- horizontálním
- vertikálním

Měření prováděná v horizontální rovině vykazují obvykle největší vibrace. To je způsobeno tím, že stroj je v horizontální rovině poddajnější. Nadměrné vibrace působící v horizontální rovině jsou dobrým indikátorem nevyváženosti.

Vertikální měření obvykle vykazují menší vibrace než předchozí. Je to způsobeno tuhostí, která je důsledkem konstrukce.

V axiálním směru by měla měření vykazovat velmi nízké vibrace. Nicméně tyto vibrace souvisí s nesouosostí a ohnutým hřídelem.

Protože většinou známe, který druh závady stroje způsobuje vibrace v jednotlivých rovinách, mohou nám hodnoty takto naměřené poskytnout informace o jejich příčině. Měření by také měla být prováděna co nejbližší ložiska, měření na skříni, pokud je to možné nedoporučuje, protože skříň může kmitat v důsledku rezonance nebo uvolnění. Měření se má provádět za chodu stroje v normálních podmínkách, tzn. za ustálených provozních teplot a při jmenovitých hodnotách (např. napětí, tlaku, zatížení, otáčkách apod.).

Hřídele diagnostikujeme na nesouosost, nevyváženost, mechanické uvolnění a ohnutí. O nesouososti mluvíme tehdy, když hřídele, spojky a ložiska nejsou vyrovnány do osy. Existují dva typy nesouosostí úhlová a paralelní, nebo jejich kombinace. Úhlová nesouosost je stav, kdy dva hřídele jsou spojeny ve spojce tak, že ve hřídeli vzniká ohybová síla. Paralelní nesouosost nastává tehdy, když jsou osy hřídelů sice rovnoběžné, ale vůči sobě posunuté.

Možné příčiny vzniku nesouososti jsou tepelná dilatace, k níž dochází následkem procesů, při nichž se pracuje s teplem (např. u turbín). Protože většina strojů je vyrovnávána do osy za studena a později, když za provozu teplota stoupá, způsobuje tepelná dilatace vznik nesouososti. Další příčiny mohou vycházet ze strojů, které jsou pevně spojené a nejsou správně vyrovnané, silami přenášenými na stroj potrubími a podporami apod. Následkem nesouososti jsou více zatěžována ložiska a tímto přetěžování vznikají na nich závady. K diagnostikování problémů spojených s nesouosostí se používá měření celkových vibrací, FFT spekter a měření fáze. Úhlová nesouosost způsobuje axiální vibrace při otáčkové frekvenci, paralelní nesouosost vyvolává radiální vibrace při dvojnásobku otáčkové frekvence. Protože většina případů nesouososti je kombinací úhlové a paralelní nesouososti, je třeba analyzovat jak základní otáčkovou frekvenci tak její dvojnásobek. Další nástroj sloužící k analýze nesouososti je měření fáze. Úhlová nesouosost má v axiálním směru z obou stran spojky nebo stroje fázový posun 180° , paralelní v radiálním směru bude z obou stran spojky nebo stroje existovat fázový posun 180° . Při kombinaci obou nesouosostí je v axiální i radiální poloze posun 180° .

K nevyváženosti dochází, když centrální hlavní osa setrvačnosti hřídele není totožná s její geometrickou osou. Existují tři druhy nevyváženosti; statická, momentová a dynamická nevyváženost (kombinace prvních dvou).

U statické nevyváženosti působí pouze jedna síla. Termín „statická“ znamená, že tento typ nevyváženosti lze pozorovat v klidovém stavu. Na rozdíl od statické nevyváženosti nelze momentovou nevyváženost v klidovém stavu měřit. V případě momentové nevyváženosti působí dvě totožné síly (hmoty) proti sobě (o 180°), což způsobuje, že v klidové poloze se rotor jeví jako vyvážený. Přesto při otáčení rotor vibruje (háže). Ve většině případů se v praxi setkáváme s dynamickou nevyvážeností, tedy kombinací statické a momentové. Při vyvažování stroje se nejdříve vyvažuje statická nevyváženost a pak se odstraňuje momentová (provádí se v několika rovinách). Nevyváženost je způsobena například výrobní nepřesností, nestejným rozložením nánosů na rotoru a lopatkách apod. Nevyváženost způsobuje větší dynamické zatížení ložisek a opět na nich vznikají poruchy. K diagnostikování se použijí měření jako u nesouososti.

Mechanické uvolnění nebo nesprávné uložení/lícování jednotlivých součástí, se obecně projevuje jako sled vysokých amplitud při harmonických násobcích otáčkové frekvence. Možnou příčinou může být uvolnění stroje od stojanu (základu), uvolnění komponentu stroje nebo došlo k poškození ložiska, což způsobilo jeho uvolnění. K diagnostikování se používá FFT spekter a měření fáze.

Ohnutý hřídel se při měření celkových vibrací projevuje jako nesouosost. Abychom dokázali rozlišit, je třeba provést měření fáze. K ohnutí za studena dochází u hřídelů s velkým poměrem délky a průměru (v klidové poloze působením gravitace

může dojít k prohnutí), nesprávnou manipulací při transportu, vysoký kroutící moment. Obdobně jako nevyváženost způsobuje nadměrné dynamické zatěžování ložisek a tím vznikají jejich závady. K diagnostikování se používá měření celkových vibrací, spektrální analýza měření fáze.

Křivě nasazené ložisko podobně jako u nesouososti generuje výrazné vibrace v axiálním směru. Rozlišit tyto dva případy umožní měření fáze v axiálním směru. Pokud se hodnoty fáze měřené ve čtyřech polohách snímače výrazně liší, pak se jedná o křivě nasazené ložisko.

Vady ložisek. Je důležité připomenout, že defekty ložisek nejsou ve většině případů prvotní příčinou problému. Obvykle bývají závady ložisek následkem existence nějakého jiného poškození stroje. Proto by jsme při zjištění závady ložiska měli hledat příčiny jejich poškození a s výměnou poškozeného ložiska odstranit také příčinu poškození. Ke vzniku defektu na ložisku může dojít z několika důvodů: nedostatečné mazání, znečištění maziva, překročení předepsaného zatížení, nesprávné zacházení nebo montáž, stáří apod. Následkem působení smykového napětí vznikají trhlinky, které se postupně rozšiřují směrem po vrchu. Průchodem valivých částí přes tyto trhliny dochází k uvolňování (ulamování) drobných částic. Tento jev je známý jako drolení nebo odlupování. Drolení se postupně rozšiřuje a může případně způsobit, že se ložisko stane nepoužitelné. Další typ poškození ložiska je vyvolán přetížením povrchu. To způsobuje vznik trhlin na povrchu, které se rozšiřují dovnitř materiálu. Dochází k němu následkem nadměrného dynamického zatížení nebo nesprávným mazáním. V obou případech generuje poškozené ložisko hluk a vibrace, které pokud jsou detekovány, dovolují uživateli včas odstranit příčinu závady ložiska nebo vyměnit ložisko dříve než dojde k jeho úplnému zničení. Diagnostika stavu ložisek se může provádět vibrační analýzou. Další možností je analýza SEE (Spectral Emitted Energy). Technologie SEE poskytuje velmi včasnou detekci závad ložisek a převodů ozubených kol měřením akustické emise generované kovem. Okolnosti, které mohou vést ke vzniku akustické emise jsou:

- defekty ložisek
- nedostatečné mazání
- mikroprokluzu / tření
- znečištění mazacího tuku
- dynamické přetížení
- tření ložiska.

Technologie SEE používá speciální snímače akustické emise, které měří ultrazvukovou akustickou emisi vznikající následkem poškození elementů ložisek (tato akustická emise se objevuje ve frekvenční oblasti 150 - 500 kHz). Tento signál není ani tak vibračním signálem, jedná se spíše o zvuk vysoké frekvence. Díky schopnosti metody SEE měřit ultrazvukový signál vznikající následkem degradace kovu máme k dispozici nejlepší nástroj ke zjišťování defektu ložisek v jejich raném stádiu. To znamená v době, kdy se defekt nachází pod povrchem nebo je tak mikroskopický, že neemituje žádný měřitelný vibrační signál. Z tohoto důvodu je měření SEE velmi účinnou metodou zjišťování závad, jež jsou zdrojem akustické emise.

Na základě zkušeností z měření SEE a řešených případů v provozu z použitím této metody byla sestavena následující tabulka pro vyhodnocení měření:

Tabulka 10.1 hodnoty SEE technologie

Hodnota SEE	Možná závada
0 až 3 SEE	Není identifikována žádná závada
4 až 20 SEE	Závada mazání, znečištění, možné poškození ložiska
21 až 100 SEE	Poškození ložiska nebo silné znečištění
100 SEE a více	Vážné poškození ložiska.

Obecně lze ale říci, že regulovaná soustava může být asi nejrůznorodějším zařízením co do typu, principu atd., takže se k její diagnostice musí případ od případu přistupovat zcela individuálně a lze s větší či menší četností předpokládat použití kterékoli metody a prostředků s nimiž se v technické diagnostice setkáváme.

10.2. Regulátory, převodníky a přenosová zařízení

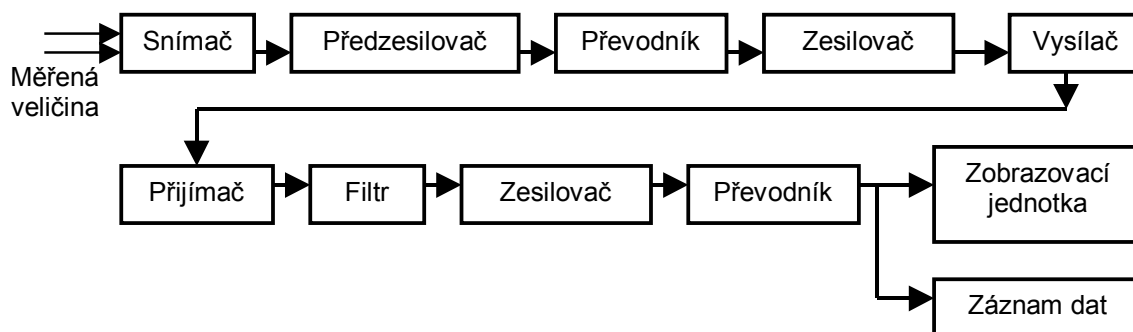
Regulátor, převodníky, sběrnice a přenosová zařízení jsou ve většině případů tvořeny elektronickými prvky. Základním testem je test funkčními testery. Ty diagnostikují celé zařízení jako uzavřený systém, výsledkem je tedy zjištění bezchybné

nebo poruchové funkce diagnostikovaného zařízení. Pokud při zjištění poruchy chceme přesně lokalizovat vadnou součástku nebo dále nedělitelný modul, použijeme testery typu „In Circuit“ nebo „ASA“, které byly popsány v kapitole 8. V současné době se opravy dějí výměnou celých bloků zařízení, tedy testujeme jednotlivé bloky systému. U integrovaných obvodů s vyšší hustotou integrace tranzistorů a hradel (300 a více) a malé vzdálenosti vývodů (0.125 mm) se diagnostické prostředky zabudovávají přímo do integrovaných obvodů, pomocí nichž je prováděn test (tzv. „Boundary Scan“ testery). Nevýhodou je, že tyto přidávané diagnostické prostředky snižují plochu využitelnosti čipu pro vlastní obvod (většinou zabírají asi 20 % plochy čipu). U mikroprocesorových systémů se již v etapě návrhu počítá s jejich možnou diagnostikou a dle toho jsou navrhovány. Jedna z možností jejich testování je využít speciálních procesorových diagnostických systémů (doplňkové obvody tzv. preprocesory, které umožňují snadnou diagnostiku většiny běžně rozšířených procesorových systémů např. Intel 80186 - 80486, řady Pentium, řady Motorola 68000 - 68060, apod.). Kromě elektronických prvků je také třeba kontrolovat kvalitu pájení desek, ve kterých jsou tyto prvky namontovány.

10.3. Akční členy a měřící řetězce

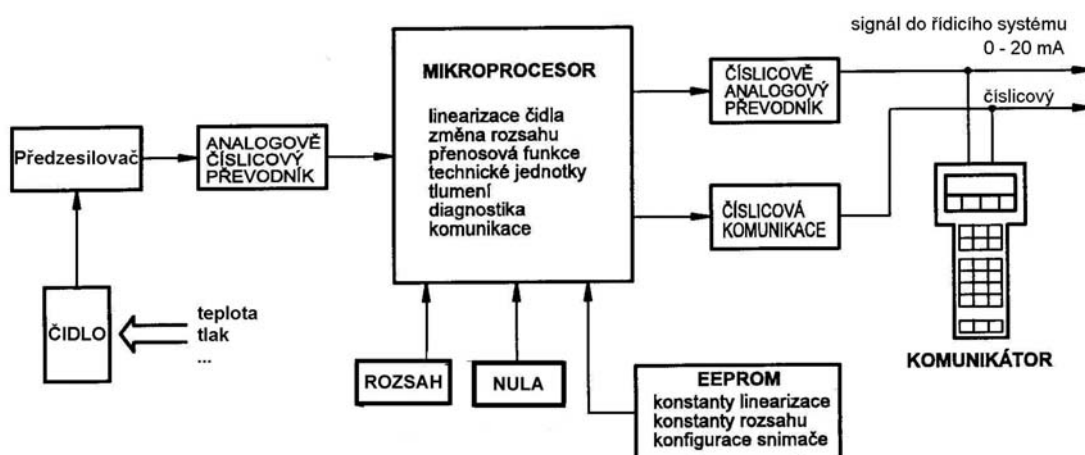
Akční členy považujeme za jednodušší regulované soustavy (z hlediska diagnostiky), a proto diagnostika akčních členů je v podstatě shodná s diagnostikou regulované soustavy. Za akční členy považujeme pohony, které zajišťují zásahy do regulované soustavy. Jako příklad můžeme uvést otevírání a přivírání regulačních ventilů, a tím řízení tlaku nebo průtoku.

K měřícím řetězcům přiřazujeme tu část regulačního obvodu, která zajišťuje snímání a měření regulované veličiny. Diagnostika těchto částí se bude dělit na funkční testy, tedy zda je dané zařízení funkční nebo nefunkční a na kalibraci, tedy ověření, s jakou přesností daná měření provádí. Kalibrace se může provádět testováním diagnostikovaného zařízení a porovnáváním výsledků se zkušebním etalonem nebo na vstup přivedeme kontrolní signál a výstupní signál porovnáme s očekávaným výstupním signálem a zjišťujeme odchylku. Základem zpětnovazebních informačních řetězců je skutečně především kvalitní měřicí technika a pro její kalibraci platí vše, co souvisí s metrologií a jejími předpisy. Značnou pozornost je přitom potřeba věnovat především snímači, který je úvodním členem měřicího řetězce. Jen kvalitně pracující snímač zajistí, že se až do regulátoru – řídicího systému dostanou potřebné a přesné informace. Další členy řetězce mají velmi často ve srovnání se snímačem podstatně vyšší přesnost, ale nedokáží rozhodně napravit škody, způsobené jeho chybami na vstupu do řetězce, jak ho přibližuje např. Obr. 10.2.



Obr. 10.2 Obecné schéma měřicího řetězce

Oproti klasické měřicí technice má podstatné výhody především tzv. inteligentní měřicí technika. Při použití moderní měřicí technika, která bývá také označována jako inteligentní „SMART“ je možné výhodně kombinovat vnitřní paměť a řídicí procesor ke kompenzacím, korekcím, autodiagnostice a autokalibraci takového snímače, což ve svých důsledcích velmi zpřesní měření a také celkový výsledek regulace. Schéma možného uspořádání inteligentního snímače ukazuje obr. 10.3.



Obr. 10.3. Obecné schéma inteligentní měřicí techniky

10.4. Aplikace spolehlivosti v automatizačních systémech

Popsanou teorii spolehlivosti aplikujeme opět na regulačním obvodu. Regulované soustavy mohou být od jednoduché soustavy až po velmi složitou soustavu. Podle složitosti soustavy potom pro určení spolehlivosti použijeme spolehlivostní model. Pro jednoduché regulované soustavy vystačíme se sériovým nebo paralelním systémem, u

složitějších použijeme kombinovaný sériově-paralelní systém a pro složité některý ze složitějších spolehlivostních modelů popsaných v kapitole 4. Regulátor můžeme pomocí kombinovaného sériově-paralelního spolehlivostního blokového schématu. Zpětnou vazbu a měřící členy nahradíme sériovým modelem a stejným spolehlivostní model použijeme u akčního členu. Použití paralelního zapojení je většinou známkou zálohování některé části regulačního obvodu. Zálohujeme některé části regulované soustavy, regulátory se většinou nezalohují. Pro výpočet ukazatelů spolehlivosti ve většině případů vystačíme s exponenciálním rozdělením, které je popsáno v kapitole 3.

Již z uvedeného vyplývá, že se z výhodou mohou použít zejména modely logické, kdy jednotlivé prvky nahradíme vstupy do logických součtů a součinů podle typu uspořádání, poruchu pak realizuje jednoduchá negace. Pracujeme s jednoduchou funkční diagnostikou a modely dvoustavovými. Složitější fyzikální diagnostiku je třeba použít tam, kde chceme získat obraz dokonaleji pokrývající celou situaci a nevystačíme s dvoustavovým modelem, tam kde je opravdu třeba zachovat přehled o plynule se zhoršujícím stavu sledovaného objektu.

Pro tu kterou metodu diagnostiky a postupy analýzy spolehlivosti je třeba se rozhodnout také na základě použitého principu sledovaného zařízení. Jiné metody budou převažovat u mechanických uzlů, jiné naopak u elektrotechniky a elektroniky, zcela odlišné pak u tekutinových pneumatických a hydraulických systémů. Zatímco z tohoto pohledu u zpětnovazebních a řídicích systémů převažuje dnes elektronika, u akčních členů je to často i pneumatika a hydraulika, kombinovaná i s významnými uzly mechanickými. Regulovanou soustavou může být z pohledu automatického řízení doslova cokoli, takže v tomto směru se uplatní nejrůznorodější kombinace metod a přístupů.

Literatura

1. KREIDL, M.: *Diagnostické systémy*. Praha: Vydavatelství ČVUT Praha, 2001, 352. ISBN 80-01-02349-4.
2. LIŠKA, M. - SLÁDEK, Z.: *Spolehlivost a technická diagnostika*. Skriptum VUT Brno, ES VUT 1989. 146. ISBN 80-214-1047-7.
3. MYKISKA, A.: *Spolehlivost technických systémů*. Skriptum ČVUT Praha, vydavatelství ČVUT 2000. 177. ISBN 80-01-02079-7.
4. SMETANA, C. a kol.: *Hluk a vibrace*. Praha: Sdělovací technika, 1998, 188. ISBN 80-90-1936-2-5.
5. VAŇKOVÁ, M. a kol.: *Hluk, vibrace a ionizující záření v životním a pracovním prostředí - část I*. Brno: PC-DIR, 1995, 140. ISBN 80-214-0695-X.
6. VAŇKOVÁ, M. a kol.: *Hluk, vibrace a ionizující záření v životním a pracovním prostředí - část II*. Brno: PC-DIR, 1996, 162. ISBN 80-214-0818-9.
7. Firemní literatura ADASH
8. Firemní literatura Brüel Kjaer
9. Firemní literatura CMMS s.r.o
10. Firemní literatura SKF
11. www.adash.cz
12. www.cmms.cz
13. www.nbn.cz
14. www.skf.cz
15. www.spectris.cz