

Matematická analýza nejistot měření hluku a vibrací

Jan Novák

7. prosince 2012

Tato prezentace je spolufinancována Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.



Technická diagnostika – vědní obor zabývající se studiem racionálních postupů pro určení technického stavu zařízení a stojů. Identifikace procesů založena pouze zjišťování charakteristik chování vně sledovaného zařízení; podle jednotlivých charakteristik vnějšího chování a podle vnějších dějů se systematicky odvozují pravděpodobné příčiny změn typického chování systému i místa v systému s pravděpodobným výskytem poruchového elementu.





Jakou metodu zvolit ?

- *Je metoda dostatečně univerzální ?*
- *Lze lokalizovat místo poškození ?*
- *Je metoda dostatečně preventivní ?*
- *Vyžaduje metoda provozní omezení ?*
- *Lze diagnostikovat bezkontaktně ?*

- *Hodí se pro všechny stroje ?*
- *Je pracovní cyklus stroje periodický ?*

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Vstupní energie

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none">• <i>Není univerzální</i>• <i>Zřídka lokalizační</i>• <i>Málo preventivní</i>• <i>Chod stroje nutný</i> | <ul style="list-style-type: none">+ <i>Nízké náklady</i>+ <i>Jednoduchost</i>
– <i>Nevhodné pro velké celky</i>– <i>Nevhodné při kombinaci energií</i>– <i>Nutná přesnost nastavení režimu práce</i> |
|--|--|

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Výrobek

- **Není univerzální**
 - **Není lokalizační**
 - **Málo preventivní**
 - **Chod stroje nutný (!)**
- + **Nízké náklady**
 - + **Není nutné udržovat stálý režim**
 - **Nevhodné pro stroje bez výrobků**

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Záření (teplota)

- **Částečně univerzální**
 - **Dobře lokalizační**
 - **Dobře preventivní**
 - **Chod stroje nutný**
- + **Vhodné pro ložiska**
 - + **Bezkontaktnost (?)**
 - + **Rychlost, jednoduchost**
 - + **Využití smyslů**
 - + **Lze zařadit do systému trvalého sledování**
 - + **Není nutný stejný režim**
 - **Termovize drahá**
 - **Pomalá reakce na změny**
 - **Nevhodné pro tepelně izolované stroje (chlazené)**
 - **Pozor na popáleniny !!**

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Emise (plynné)

- Není univerzální
 - Málo lokalizační
 - Není preventivní
 - Chod stroje nutný
- + **Využití smyslů**
 - + **Lze aplikovat v chemické výrobě**
 - + **Vysoká úroveň měřidel**
 - **Vhodné pro málo strojů**
 - **Vysoká cena měřidel**
 - **Zvláštní podmínky pro odběr vzorků**

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Mechanické změny

- Není univerzální
 - Dobře lokalizační
 - Dobře preventivní
 - Nutná odstávka stroje a demontáž dílu (defektoskopie)
 - Nutný chod stroje (tenzometrie)
- + **Vysoká úroveň měřidel**
 - + **Tradice**
 - + **Není vliv jiných signálů**
 - + **Pomůcka konstruktéra**
 - **Časová náročnost**
 - **Vysoká kvalifikace obsluhy**
 - **Nelze odhalit vůle a uvolnění**

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Provozní tekutiny (Tribologie)

- Není univerzální
 - Dobře lokalizační
 - Dobře preventivní
 - Vyžaduje chod stroje (?)
- + *Nižší náklady na měřidla*
 - + *Vysoká citlivost*
 - + *Další informace (o stavu maziva)*
 - + *Není nutný konstantní režim*
 - *Nevhodné pro všechny stroje*
 - *Pomalá reakce na změny*
 - *Nutná dokonalá evidence*
 - *Odběr vzorku může omezit stroj*

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Hluk

- Není univerzální
 - Dobře lokalizační
 - Dobře preventivní
 - Vyžaduje chod stroje
- + *Bezkontaktní*
 - + *Špičková měřicí technika*
 - + *Metodické zázemí*
 - + *Hluk garantován výrobcem*
 - + *Vztah k hygieně práce*
 - + *Využití smyslů*
 - *Rušivé signály*
 - *Nevhodné pro izolované stroje*
 - *Odbornost obsluhy*
 - *Nevhodné pro hlučné stroje*
 - *Nutný přesný režim*

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Vibrace

- Dobře univerzální
 - Dobře lokalizační
 - Dobře preventivní
 - Vyžaduje chod stroje
- + *Špičková měřicí technika*
 - + *Metodické zázemí*
 - + *Vibrace garantovány výrobcem*
 - + *Vztah k hygieně práce*
 - + *Využití smyslů*
 - + *Možnost zapojení do systému trvalého sledování*
 - *Vysoká vstupní investice*
 - *Odbornost obsluhy*
 - *Nutný přesný režim*

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Jakou metodu zvolit?

- Je metoda dostatečně univerzální ?
- Lze lokalizovat místo poškození ?
- Je metoda dostatečně preventivní ?
- Vyžaduje metoda provozní omezení ?
- Lze diagnostikovat bezkontaktně ?
- Hodí se pro všechny stroje ?
- Je pracovní cyklus stroje periodický ?

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





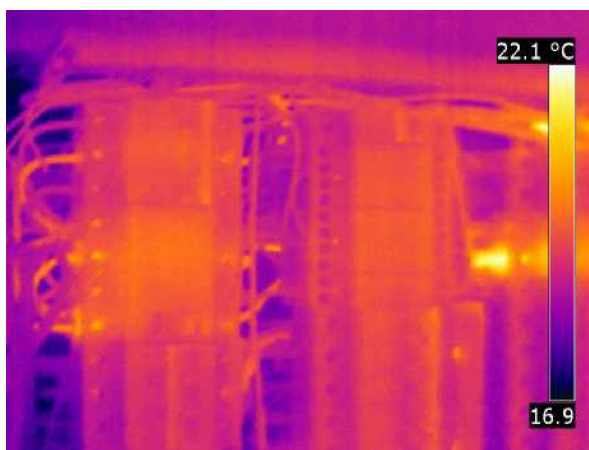
Celkové hodnocení metod

	Univerzálnost	Lokalizace	Preventivnost	Omezení chodu stroje
Vstupní energie	<i>Nesplněno</i>			
Výrobek				
Emise				
Mechanické změny				
Provozní tekutiny				
Hluk				
Vibrace				<i>Splněno</i>

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Možnosti prezentace výsledků? teplota



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





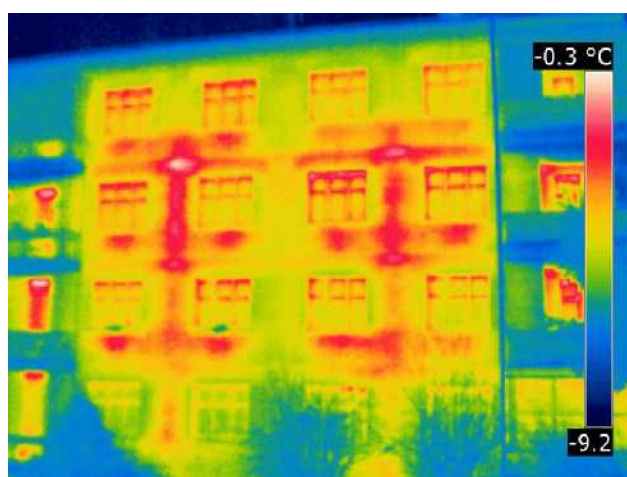
Možnosti prezentace výsledků? teplota



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Možnosti prezentace výsledků? teplota



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





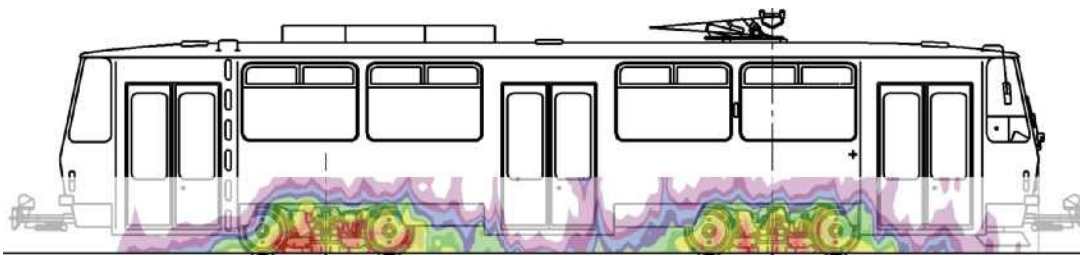
Možnosti prezentace výsledků? zvuk



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Možnosti prezentace výsledků? zvuk

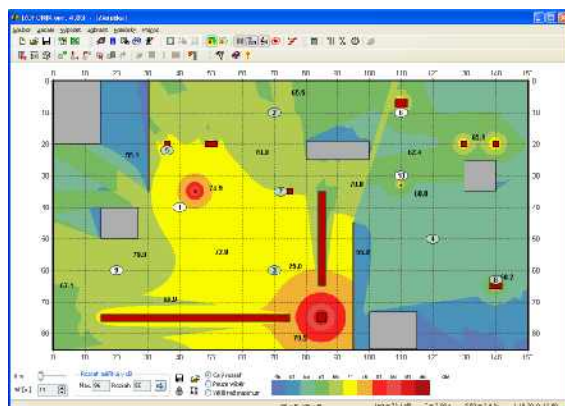
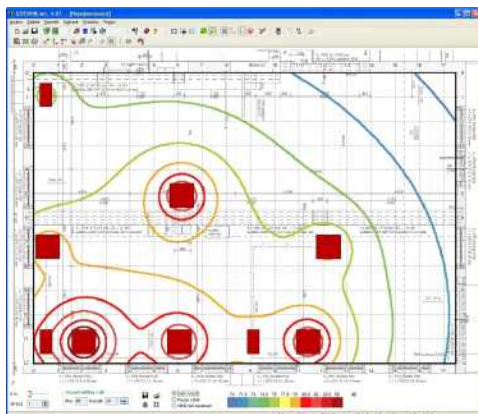


INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





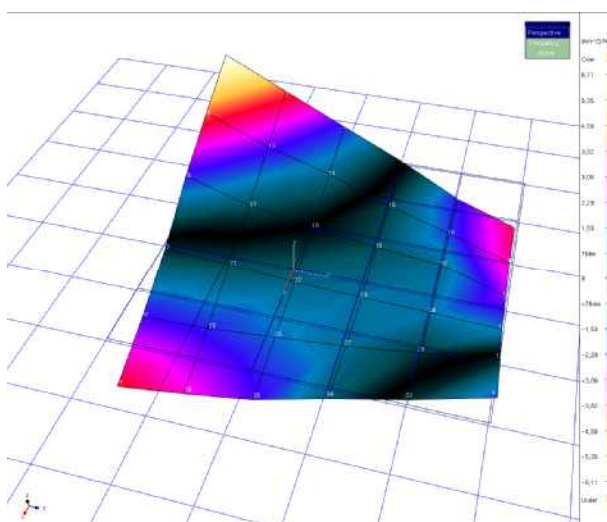
Možnosti prezentace výsledků? zvuk



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



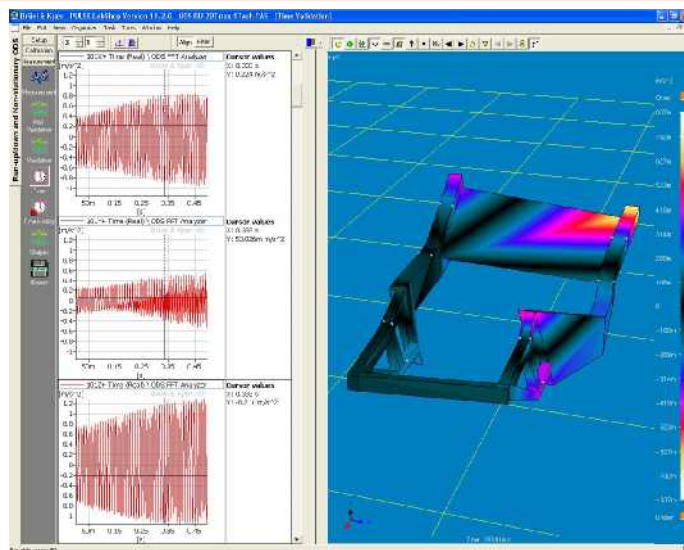
Možnosti prezentace výsledků? vibrace



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



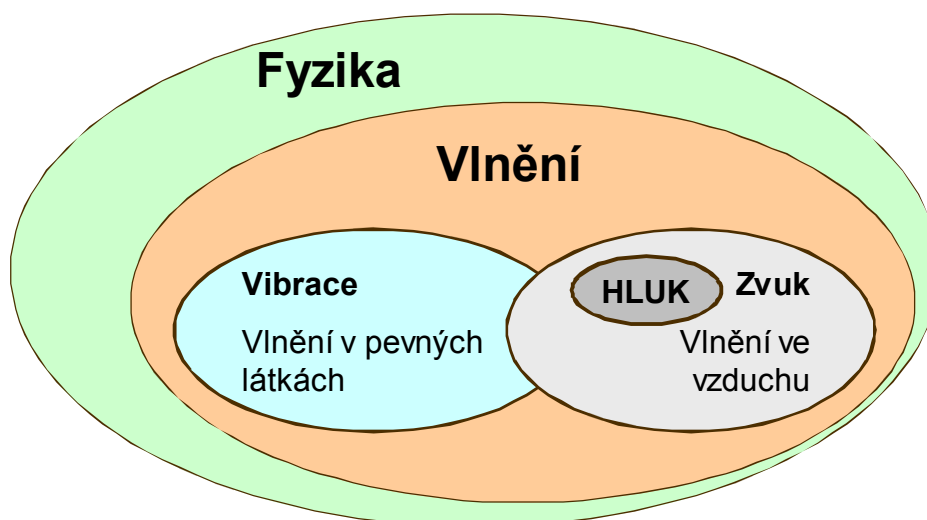
Možnosti prezentace výsledků? vibrace



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Zvuk a vibrace



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Monitorování stavu

- Hodnocení zařízení a stanovení priorit
- Návrh programu pro monitorování
- Určení referenčních stavů, trendy
- Plánování pochůzky

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

EVROPSKÁ UNIE esf MŠMT



Hodnocení zařízení a stanovení priorit

Zařízení se pro účely diagnostiky hodnotí podle:

- Významu ve výrobě
- Využití ve výrobě
- Ceně zařízení
- Jeho zálohovatelnosti
- Jeho diagnostikovatelnosti
- Dostupnosti informací

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Hodnocení zařízení a stanovení priorit

Prioritní z hlediska diagnostiky jsou:

- Zdroje energie a její transformátory
- Stroje s významným postavením v řetězci strojů ve výrobě
- Unikátní stroje
- Nenahraditelné stroje

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Analýza trendu

Hlavní nástroj vibrační diagnostiky = analýza trendu

- Jedná se o rekonstrukci vanové křivky, která popisuje technický život diagnostikovaného uzlu mezi přejímkou a obnovou
- Z předchozího vývoje odhaduje vývoj budoucí
- Její konstrukce je unikátní pro každý diagnostikovaný uzel

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Období záběhu

- Začíná přejímkou, ta je z pohledu provádění diagnostiky:
 - Zdrojem informací o stroji
 - Odhadem startovacích hodnot
- V období záběhu se stabilizují trendované hodnoty
- Vibrace postupně klesají
- V období záběhu se zkracuje perioda sběru dat
- V období záběhu se testují parametry stroje (záruka)
- Délka období závisí na
 - Kvalitě konstrukce stroje
 - Jakosti výroby stroje
 - Zatížením při záběhu

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Období bezporuchového provozu

- Období stabilizace diagnostické veličiny
- Perioda sběru dat se prodlužuje
- Nejdelší období ve vanové křivce
- Délka období závisí na
 - Kvalitě konstrukce stroje
 - Dodržení návodu k použití
 - Autonomní údržbě

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Období rozvoje poškození

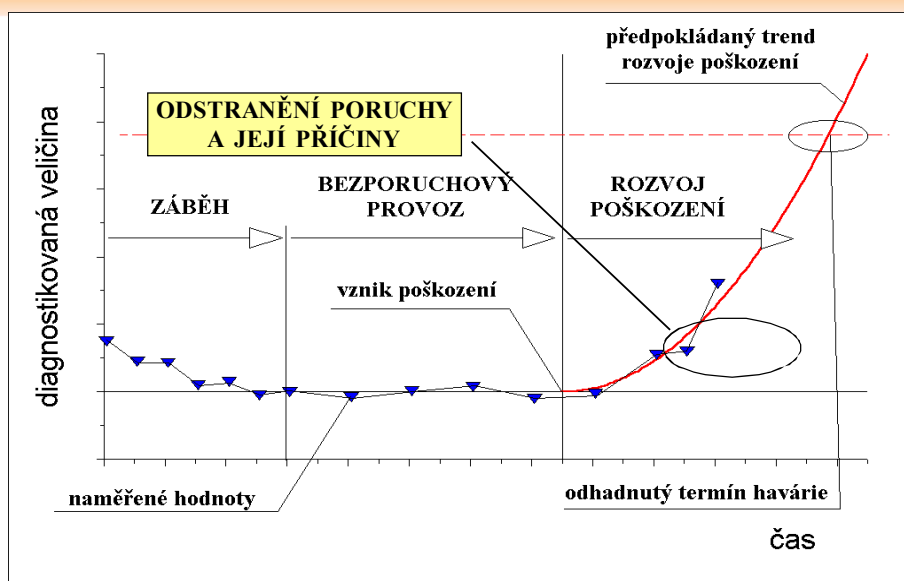
- Začíná vznikem poškození (v neznámém okamžiku)
- Po překročení **meze výstrahy** je s vysokou pravděpodobností indikováno poškození
- Zkrátí se perioda sběru dat
- Analyzuje se trend
- Neustálým měřením se trend upřesňuje
- Trendovou křivkou je přímka nebo parabola
- V době, kdy křivka trendu protne **havarijní mez** stoupá riziko havárie nad akceptovatelnou mez

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Trend



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

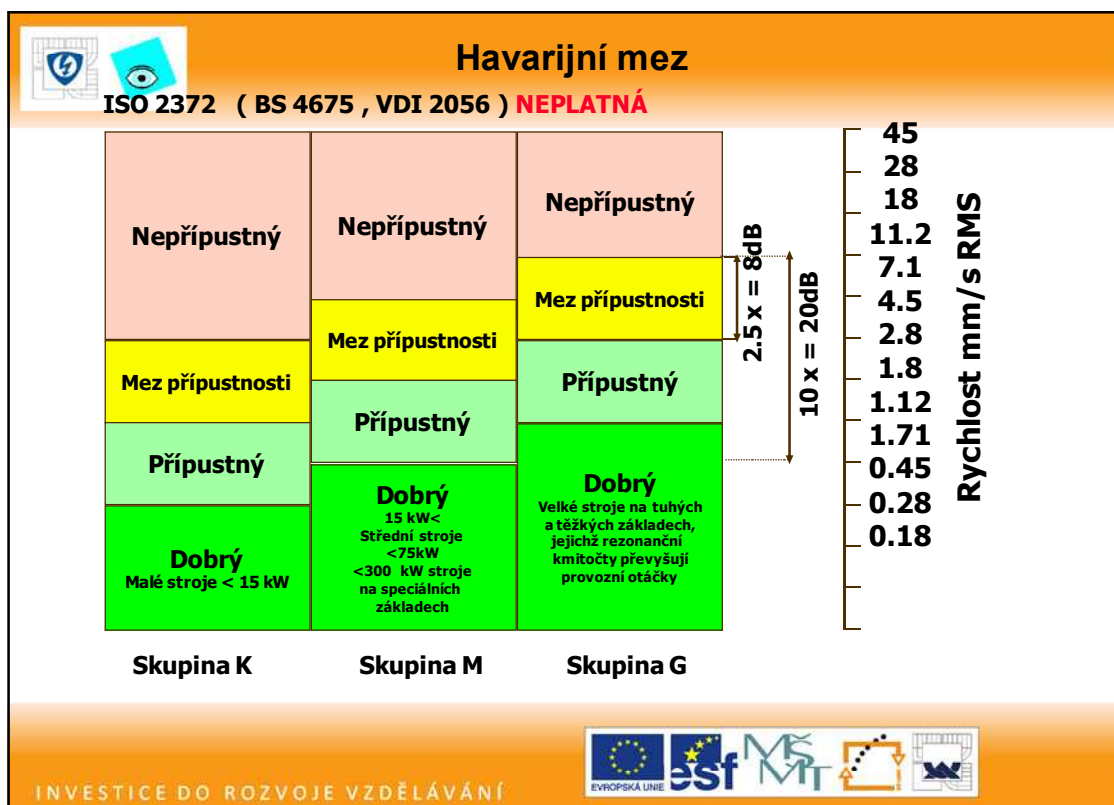


Havarijní mez

- Mez, při jejímž překročení lze konstatovat, že riziko havárie překročí akceptovatelnou mez
- Určuje se z období bezporuchového provozu (6 až 10 násobek)
- Může se určit:
 - Ze zkušenosti
 - Z normy
 - Z doporučení výrobce stroje
 - Z experimentu

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



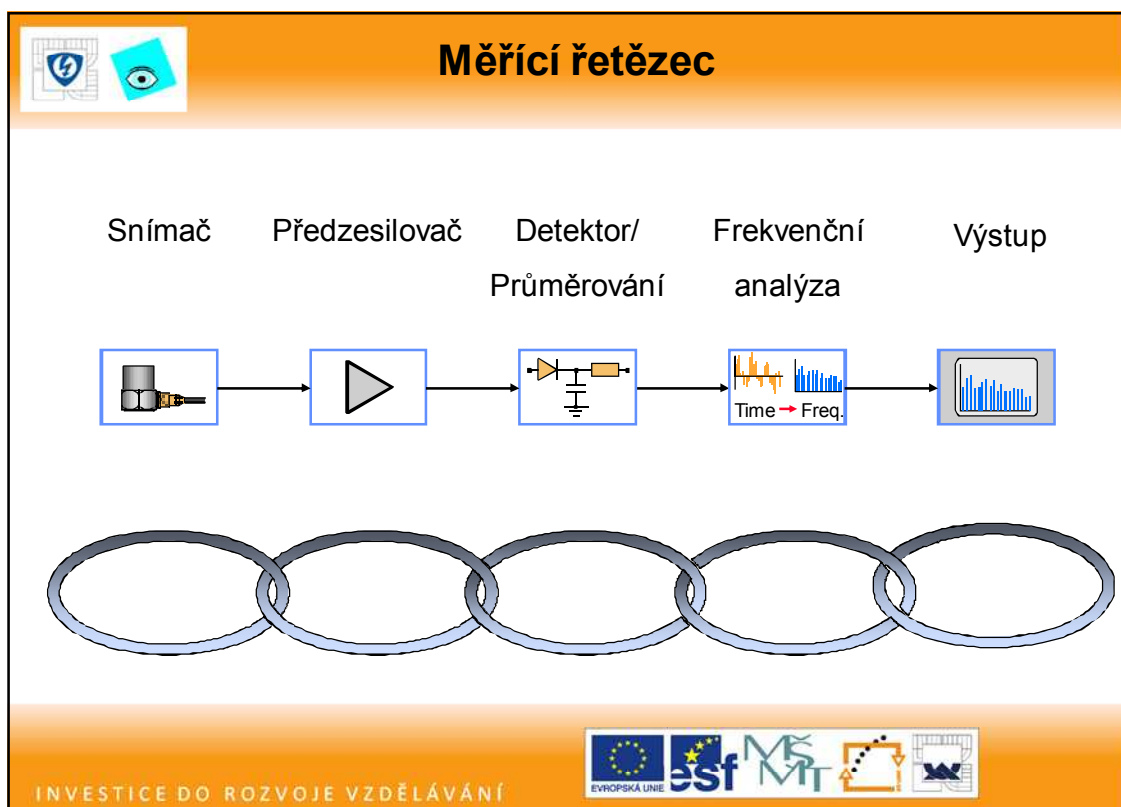


Období mezi spolehlivou identifikací poškození a překročením havarijní meze

- Zkrátí se perioda sběru dat
- Identifikuje se poškozená součást naplánuje se odstávka
- Objedná se náhradní díl
- Zorganizuje se oprava
- Provede se oprava
- Vyhodnotí se provedený zásah
- Přijmou se nápravná opatření
- Provede se převjímka po opravě
- Vanová křivka začíná znovu (po jiné trajektorii)

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

EVROPSKÁ UNIE esf MŠMT



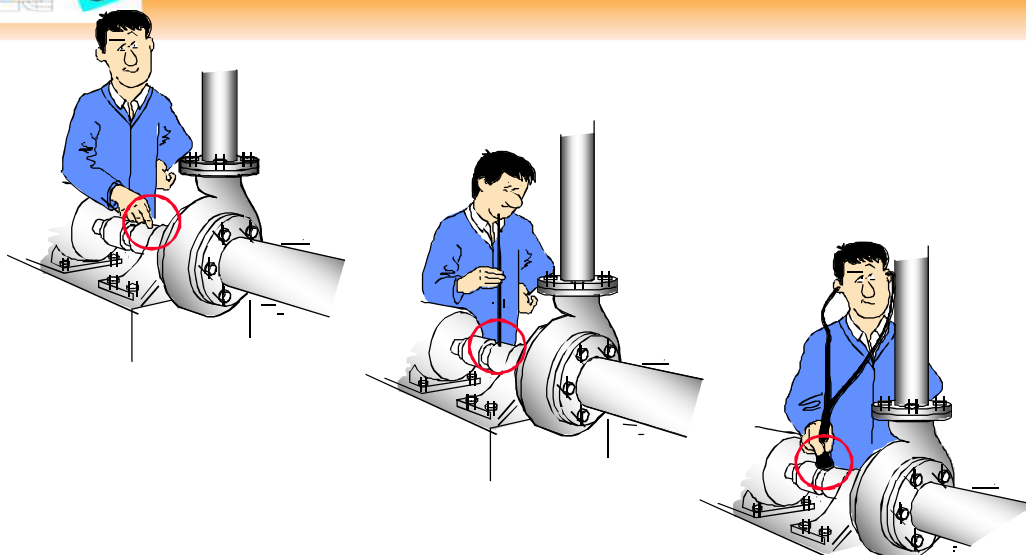


Snímače vibrací

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Dřívější metody “měření” vibrací

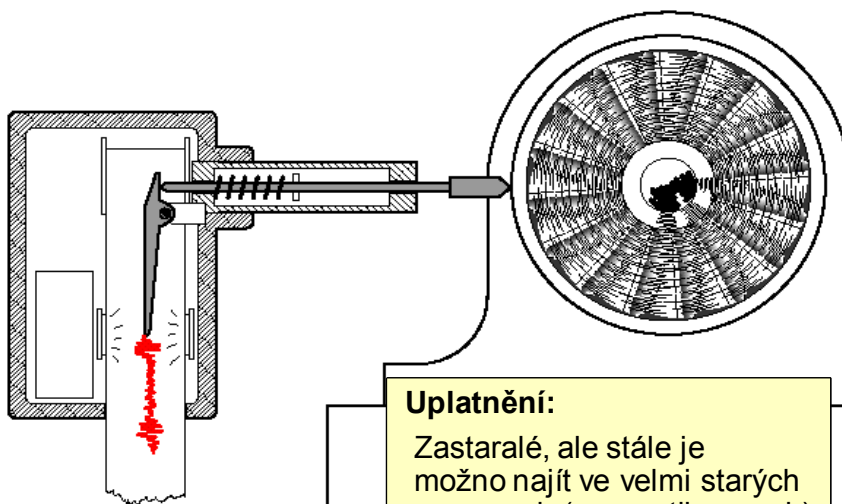


INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Mechanický pákový snímač výchylky



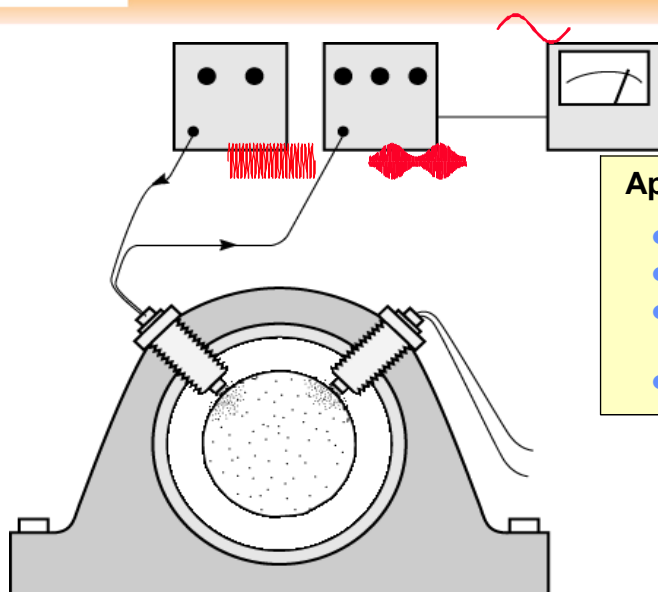
Uplatnění:

Zastaralé, ale stále je možno najít ve velmi starých provozech (energetika apod.)

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Bezkontaktní snímače "Eddy Current - Proximity"



Aplikace:

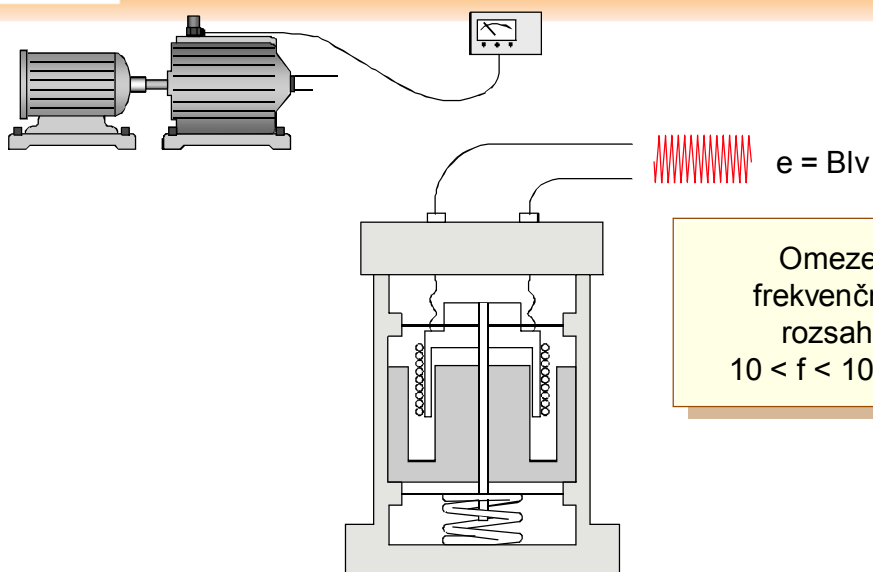
- Relativní pohyby
- Excentricita hřídelí
- tloušťka olejového filmu
- atd.

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Indukční snímač rychlosti (pohyblivé tělísko)

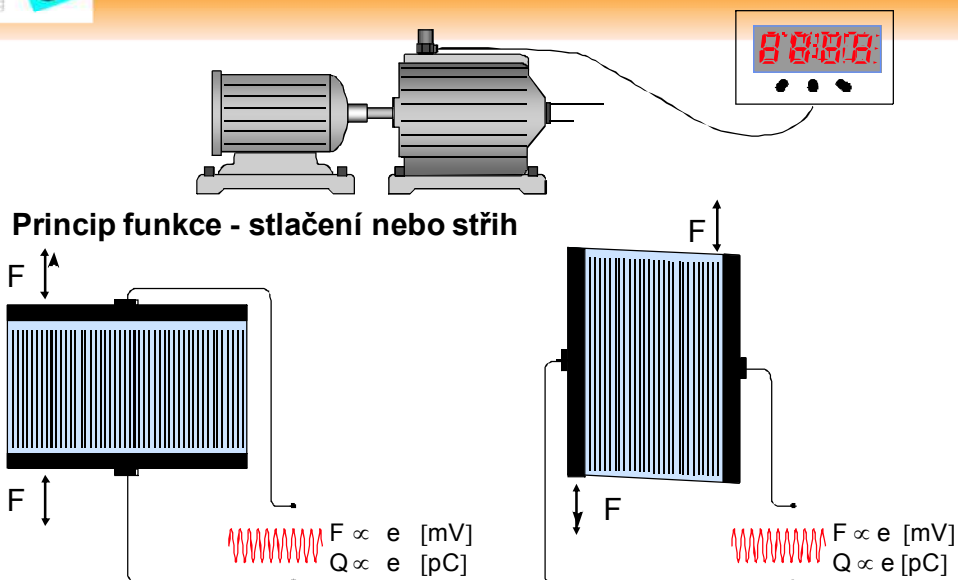


Omezení
frekvenčního
rozsahu:
 $10 < f < 1000 \text{ Hz}$

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Piezelektrický akcelerometr



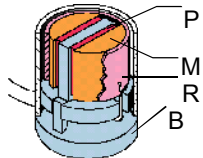
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



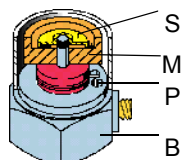


Typy akcelerometrů

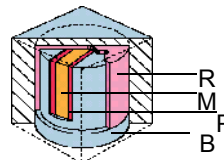
Planar Shear



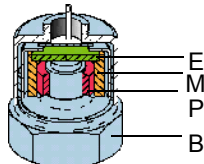
Centre-mounted Shear



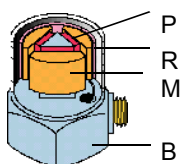
ThetaShear®



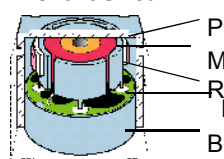
Annular Shear



Delta Shear®



OrthoShear®



P: Piezoelektrický člen

E: Zabudovaná elektr.

S: Pružina

R: Připevňovací kroužek

B: Základna

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Vibrometr

Rozdělení podle :

- frekvenční analýzy
- počtu měřicích kanálů
- typu konstrukce
- formy výstupu
- možnosti rozšíření
- podpory v software



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Zvukoměr

Rozdělení podle :

- frekvenční analýzy
- počtu měřících kanálů
- typu konstrukce
- formy výstupu
- možnosti rozšíření
- podpory v software



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Mikrofon

- nejdůležitější část měřícího řetězce
- převodník změny akustického tlaku na změnu jiné veličiny

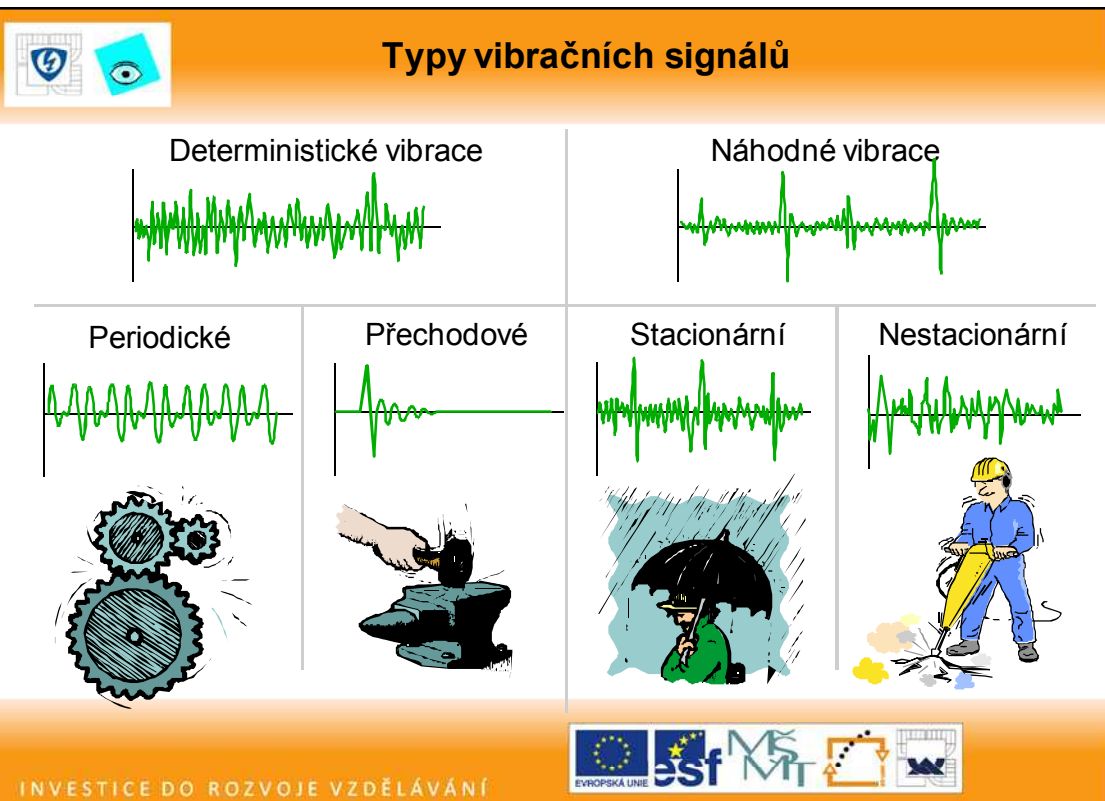
kondenzátorové mikrofony :

- konstrukční jednoduchost
- vysoká citlivost
- provozní stálost



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Deterministické signály

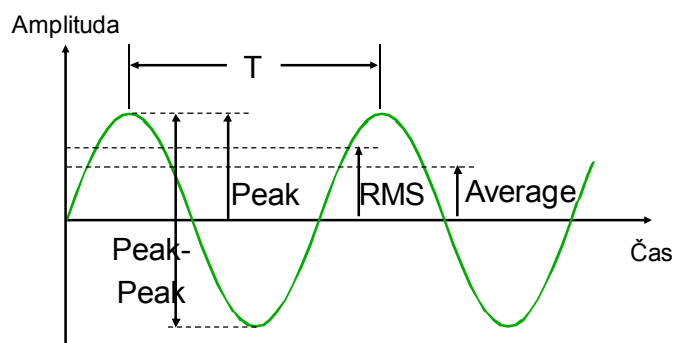
- Lze je popsat v čase matematickou funkcí $x = f(t)$
- **Periodický signál** = signál, jehož časový průběh se každou periodu opakuje.
 - Je signálem, který produkují stroje s periodickým principem práce.
 - Je vhodný pro frekvenční analýzu
- **Harmonický signál** = zvláštní případ periodického signálu, lze jej popsat funkcí:

$$x = A \cos(2\pi f t + \varphi)$$
 - Periodický signál lze rozdělit frekvenční analýzou na dílčí harmonické signály
- **Přechodový signál** = signál, který je odezvou na silový časově omezený impuls

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Popis časového signálu



$$RMS = \frac{Peak}{\sqrt{2}} = 0,707 Peak$$

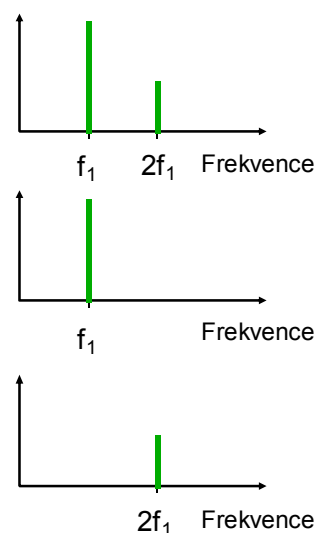
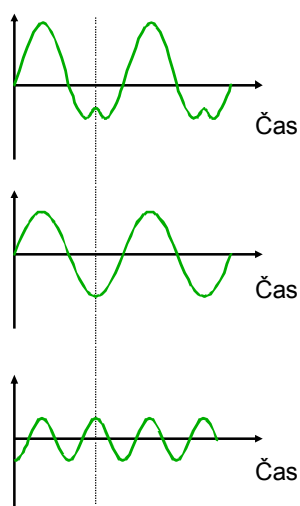
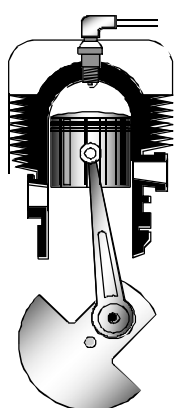
$$Average = \frac{2Peak}{\pi} = 0,637 Peak$$

$$Crest Factor = \sqrt{2} = 1,414$$

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Deterministické signály harmonické

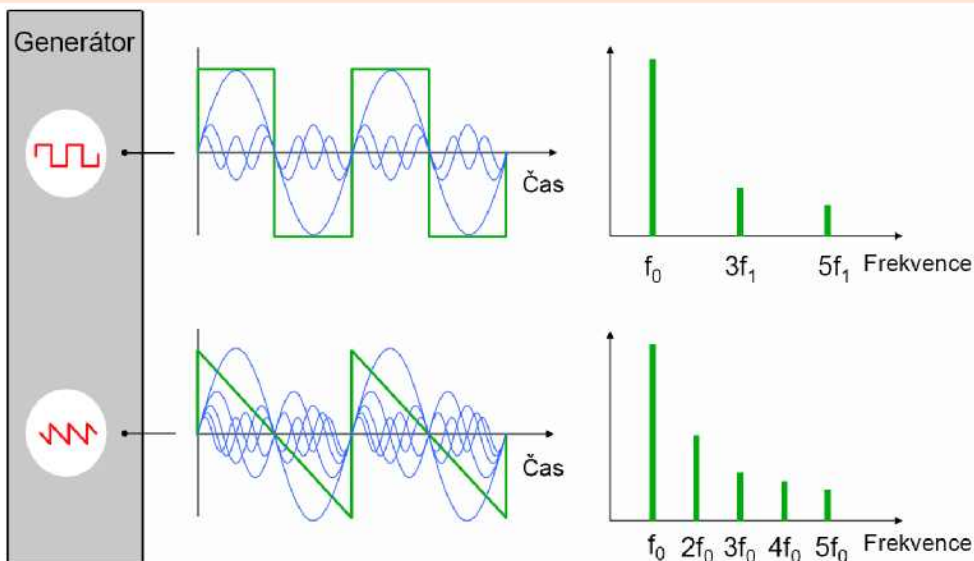


INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Deterministické signály



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Zpracování signálů

- Analogové a digitální vzorkování
- Aplikace FFT
- Časová okénka
- Frekvenční filtry
- Antialiasing
- Šířka pásma, rozlišení
- Průměrování
- Dynamický rozsah
- Řádová analýza

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Analogové a digitální vzorkování

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Zobrazení dat

- Lineární x Logaritmické osy
- Amplituda v dB?
- Frekvence lineárně a logaritmicky

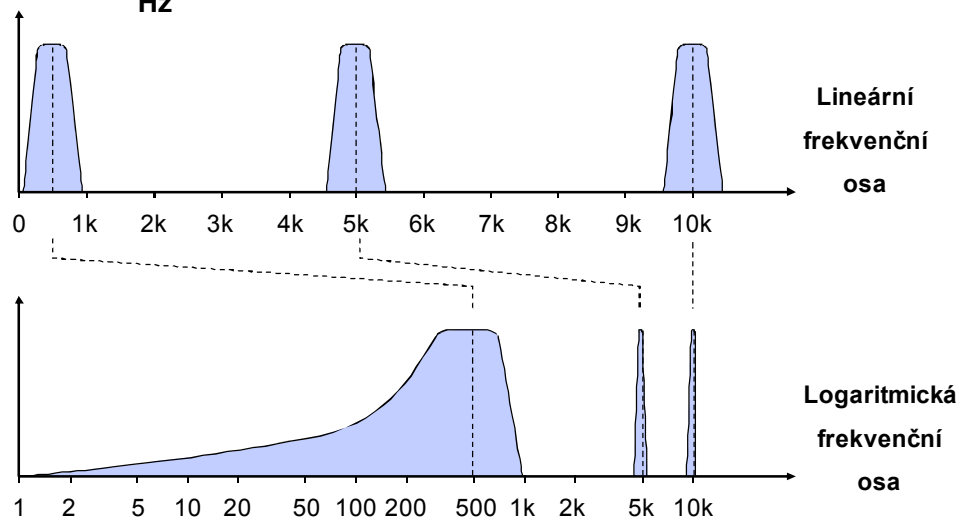
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Filtrace s konstantní šířkou pásma (CB)

Šířka pásma (Bandwidth) = 400 Hz

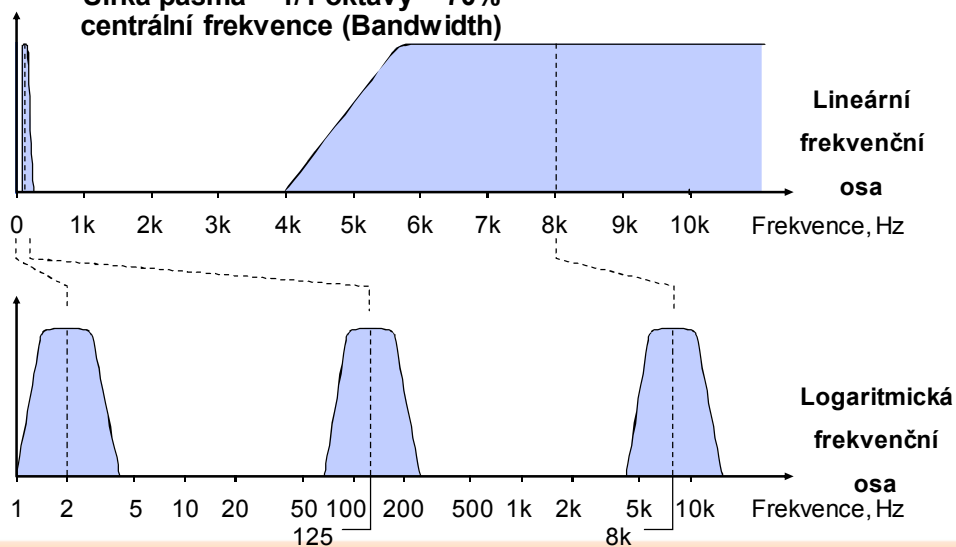


INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



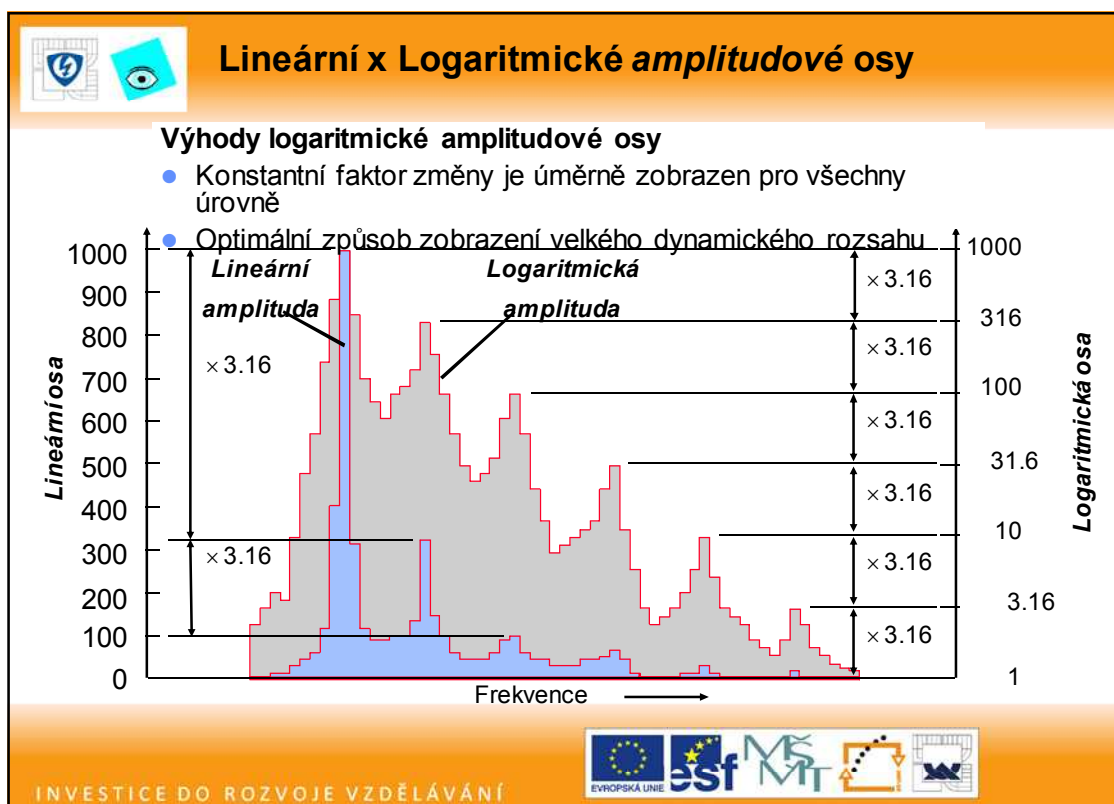
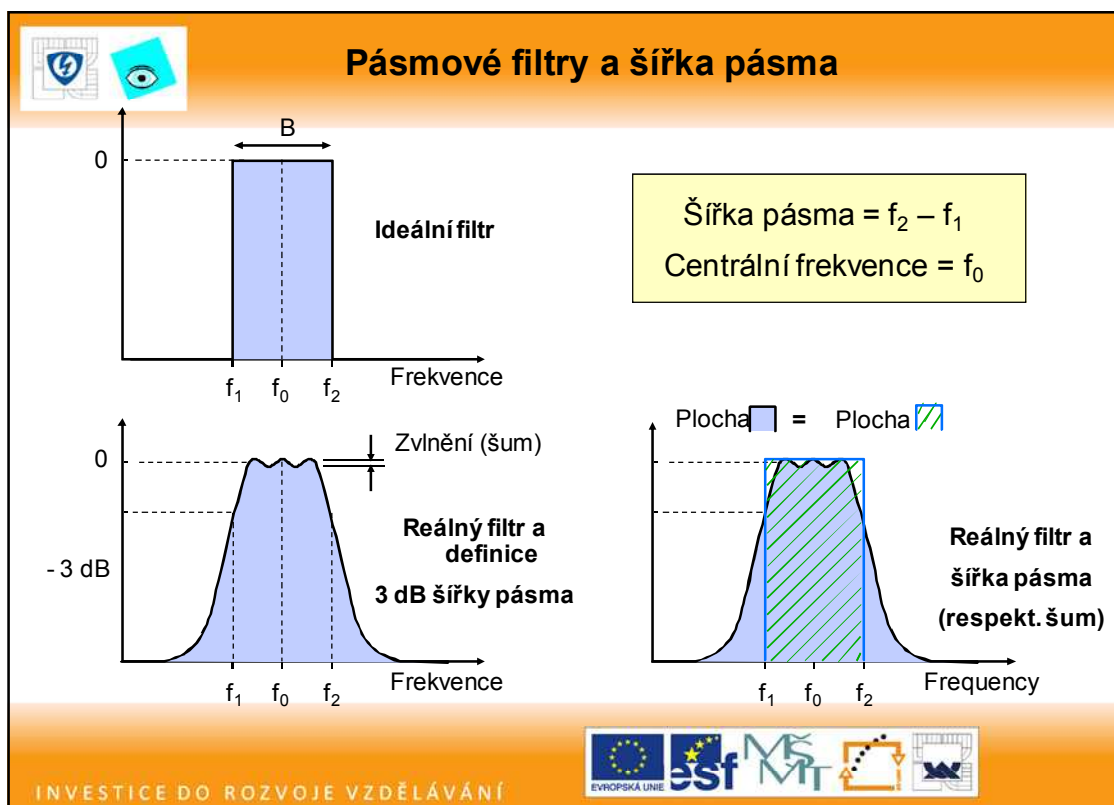
Filtrace s konstantní *relativní* šířkou pásma (CPB)

Šířka pásma = 1/1 oktávy = 70%
centrální frekvence (Bandwidth)



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ







Ukázka

- Lin vs. Log

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Aplikace FFT

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Rychlá Fourierova transformace

- Fourierova Transformace (FT)
- Diskrétní Fourierova Transformace (DFT)
- Rychlá Fourierova Transformace (FFT)

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Fourierova Transformace

- Definována jako:

$$F(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i2\pi ft} dt$$

- Nutné znát funkci $f(t)$
- Složitá pro výpočet
- Kvůli mezím nepoužitelná v měřidlech

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Diskrétní Fourierova Transformace

- Definována jako:

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-i2\pi nk / N}$$

- Převádí integrál na sumu
- Zdlouhavý pro výpočet
- Základ pro FFT

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Rychlá (Fast) Fourierova Transformace

- Formou procesoru v analyzátorech
- Zrychluje algoritmus DFT
- Je nutné nastavit:
 - Frekvenční rozsah
 - Dělení frekvenčního pásma (počet čar)
 - Časovou váhovou funkci
 - Průměrování

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Časová okénka

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Časové váhové funkce

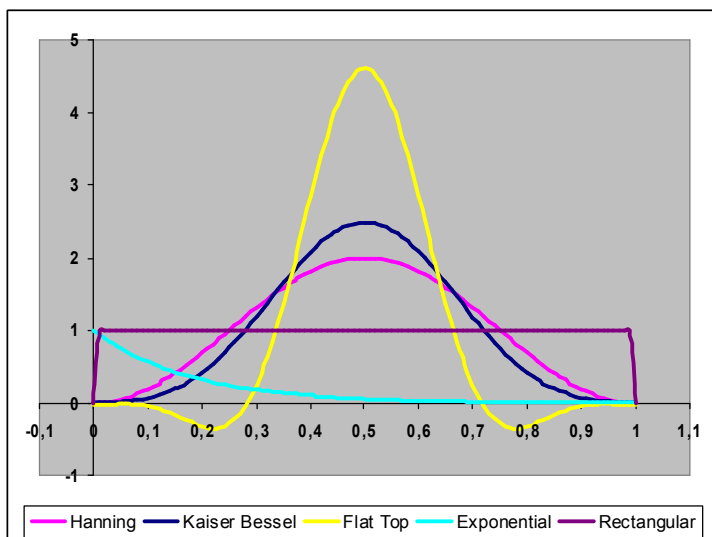
- Z nekonečného časového průběhu „vystřihují“ realizaci
- Upravují začátek a konec signálu
- Nutný pečlivý výběr z nabídky měřidla
- Časová okénka:
 - Pevná
 - Nastavitelná (čas)

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Časové váhové funkce



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Časová okénka

Ukázkový příklad

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Frekvenční filtry

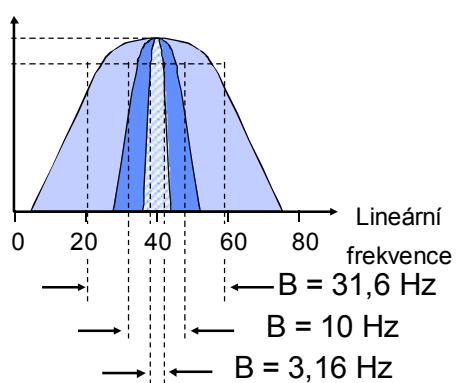
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Typy filtrů

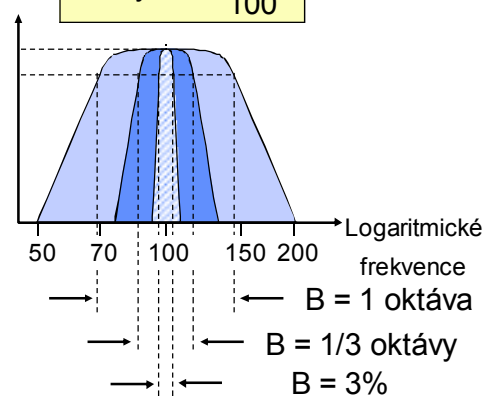
Konstantní šířka pásma

$$B = x \text{ Hz}$$



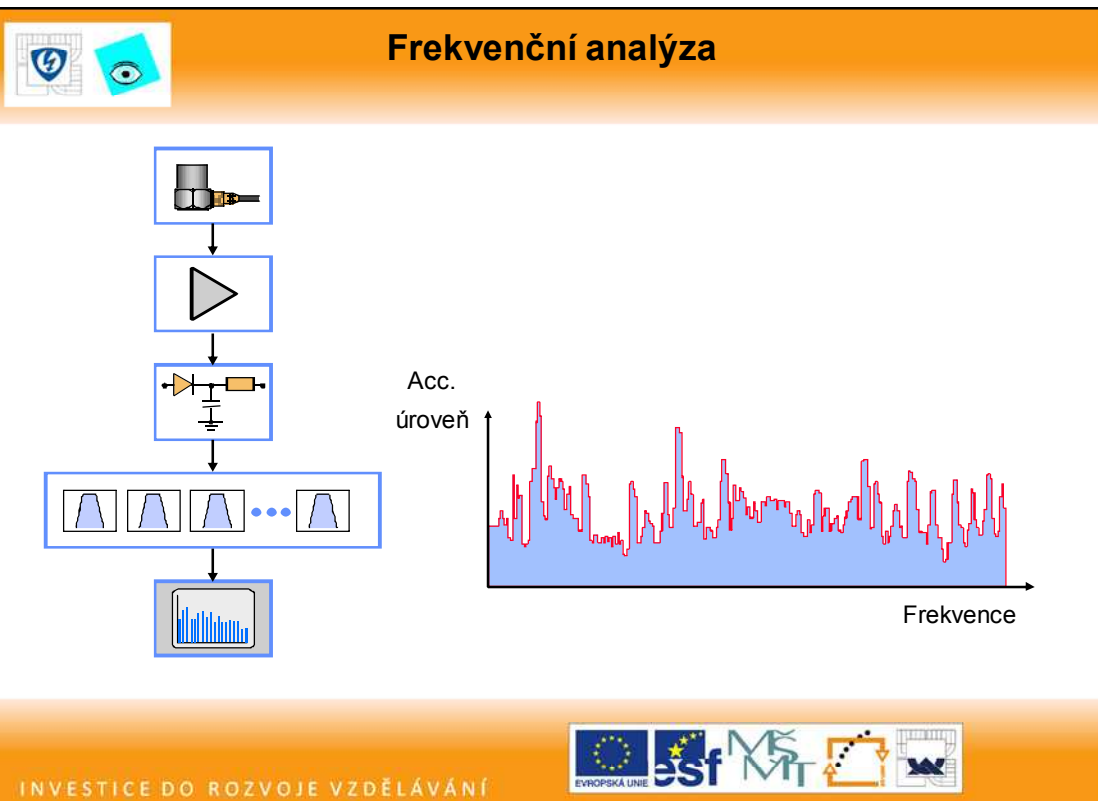
Konstantní procentuální nebo relativní šířka pásma

$$B = y\% = \frac{y \times f_0}{100}$$



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Antialiasing

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

EVROPSKÁ UNIE **esf** **MS MT**



Aliasing ve vzorkovaném signálu

Mezi maximální posuzovanou frekvencí ve spektru, získaného ze vzorkovaného signálu, a frekvencí samotného vzorkování je určitý vztah.

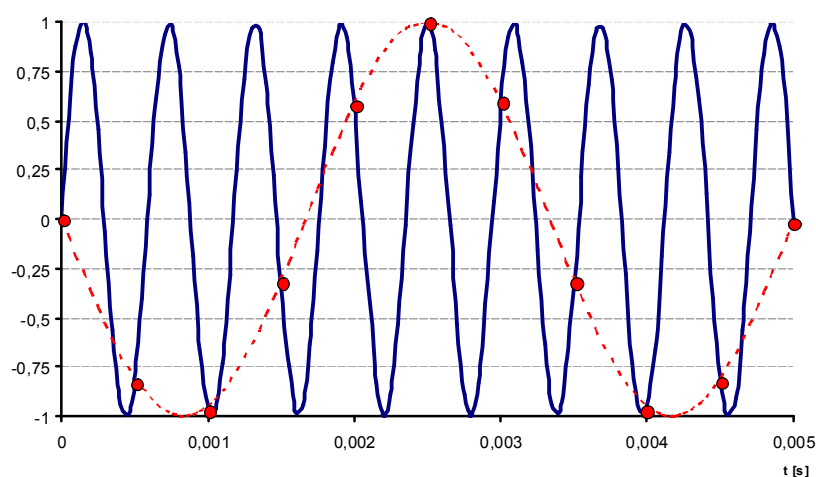
Vzorkovací frekvence f_s musí být minimálně dvojnásobná, než maximální posuzovaná frekvence f , resp. maximální posuzovaná frekvence musí být menší než $f_s/2$ (Nyquistova frekvence).

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Chyba vzorkování vlivem aliasingu

$f = 1,7 \text{ kHz}$, $f_s = 2 \text{ kHz}$, $f' = 300 \text{ Hz}$



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





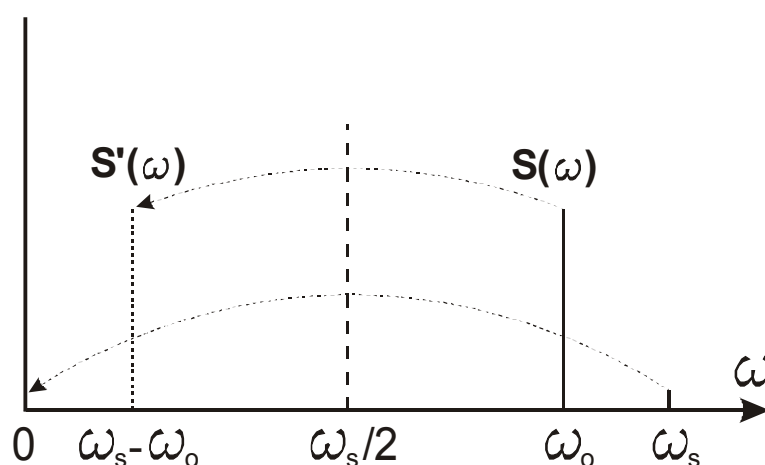
Zdánlivé a skutečné složky spektra

Poloha zdánlivé složky ve spektru je frekvenčně symetrická kolem Nyquistovy frekvence. Jestliže $f_0 = f_s$, tj. skutečný harmonický signál má frekvenci shodnou s frekvencí vzorkování, pak frekvence zdánlivého signálu bude 0.

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Skutečná a zdánlivá složka spektra



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





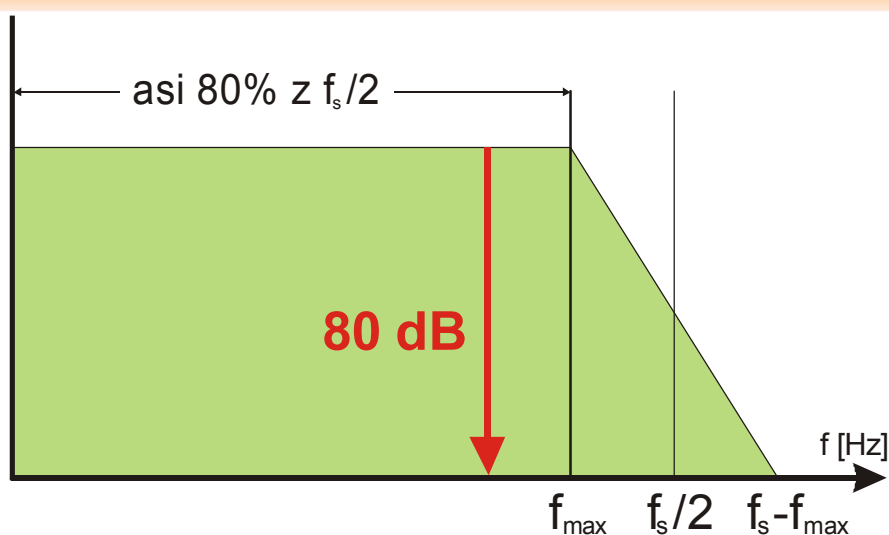
Antialiasingový filtr

Aliasing je zdrojem častých chyb měření, resp. chybné interpretace výsledků, v případě, když není před A/D převodník vložen antialiasingový filtr a signál obsahuje složky s frekvencí, které jsou větší než vzorkovací frekvence.

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Antialiasingový filtr



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Aliasing ve vzorkovaném signálu

Pro délku záznamu N je u reálných signálů počet teoreticky různých složek Fourierova spektra $N/2$. Jestliže je použit antialiasingový filtr, pak mezi frekvencí vzorkování a maximální frekvencí spektra $f_{\max}$ platí:

$$f_{\max} = \frac{f_s}{2,56}$$

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Šířka pásma, rozlišení

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Frekvenční filtr

Pomocí současných frekvenčních filtrů, lze v reálném čase přímo vyhodnotit úroveň složek z jistého frekvenčního rozsahu s tím, že ostatní složky spektra jsou výrazně potlačeny.

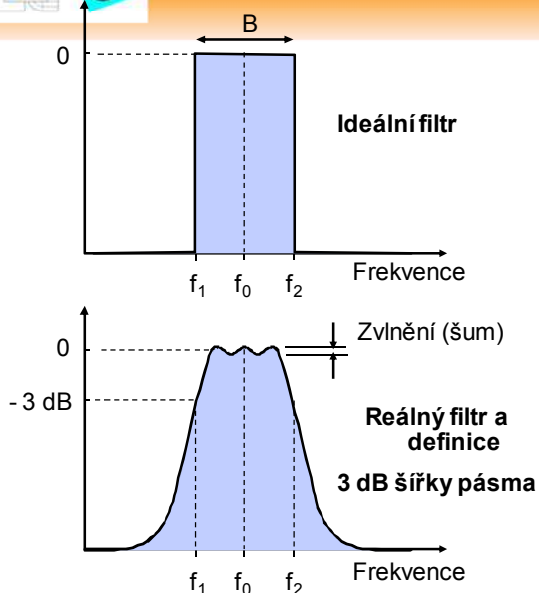
U fyzikálně realizovaných filtrů časového průběhu signálu neexistuje jediná hraniční frekvence mezi propustným a nepropustným pásmem frekvencí, ale celé přechodové pásmo.



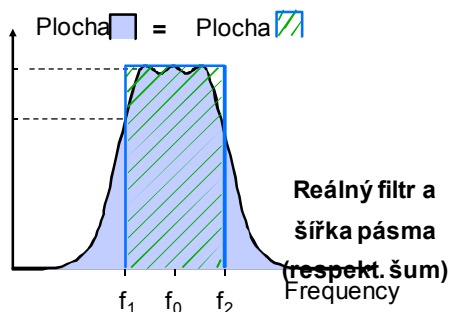
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Pásmové filtry a šířka pásma



Šířka pásma = $f_2 - f_1$
Centrální frekvence = f_0



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Frekvenční filtry

Pro případ zjednodušení můžeme uvažovat ideální filtr bez přechodového pásma, tj. se spodní f_1 a horní f_2 mezní frekvencí.

S jejich pomocí, lze pak definovat střední frekvenci propustného pásma

$$f_c = \frac{(f_1 + f_2)}{2}$$

nebo relativní šířku pásma

$$f_c = \sqrt{f_1 \cdot f_2}$$

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Analyzátory FFT

Analyzátory s konstantní absolutní šířkou pásma (FFT)

V technické diagnostice je pro přesné určení frekvence výhodné, aby analyzátor pracoval v celém frekvenčním rozsahu s konstantní a velmi malou šířkou propustného pásma, Δf . U konce frekvenčního rozsahu nabývá poměr $\Delta f/f_R$ (1/400, 1/800, 1/1600, 1/3200 a 1/6400).

f_R je počet jednotlivých frekvenčních filtrů připravených pro frekvenční rozbor signálu (počet čar).

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Analyzátory FFT

Se zvyšujícím se f_R se zvyšuje i frekvenční rozlišitelnost analýzy.

Analyzátory FFT je vhodné používat pro běžné frekvenční rozsahy užívané v technické diagnostice. Se zvyšující se maximální požadovanou frekvencí analýzy, klesá výrazně frekvenční rozlišitelnost analýzy.

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Analyzátory CPB

Analyzátory s konstantní relativní šířkou pásma (CPB)

Konstrukce filtrů umožňuje snadno realizovat filtr s podmínkou, že relativní šířka propustného pásma, tj. poměr $\Delta f / f_C$ je konstantní.

Vzdálenost středních frekvencí sousedních pásem je volena jedna oktáva (zdvojnásobení kmitočtu) nebo zlomek oktávy, daný číslem ve jmenovateli, n . Střední a mezní frekvence sousedních pásem se liší o násobek

$$\sqrt[n]{2}$$

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Analyzátory CPB

Spektra s odstupem středních frekvencí, který je dán zlomkem $1/n$ jsou označována jako $1/n$ -oktávová spektra, kde n je voleno nejčastěji

1, 3, 6, 12, 24 což odpovídá spektrům $1/1$, $1/3$,

Logaritmická stupnice pro frekvenci u CPB analyzátorů dává při znázornění ve sloupcovém tvaru konstantní rozmístění jednotlivých složek spektra, což je výhodné např. v akustice nebo vibracích hlavně pro měření, které předepisují hygienické normy.

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Analyzátory CPB

V technické diagnostice je jejich frekvenční stupnice zvláště pro vysoké frekvence nepříjemně hrubá.

Na počátku frekvenčního rozsahu je jejich frekvenční rozlišení výhodné.

V technické diagnostice vhodné pro specifické účely.

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

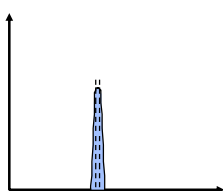
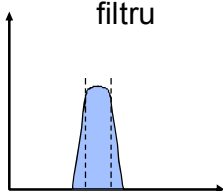




Volba šířky pásma

Charakteristika

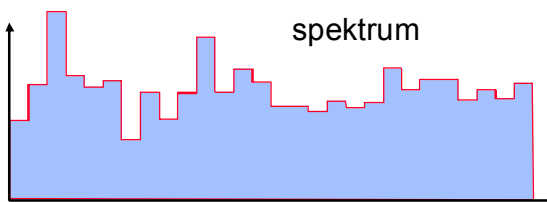
filtru



Frekvenční

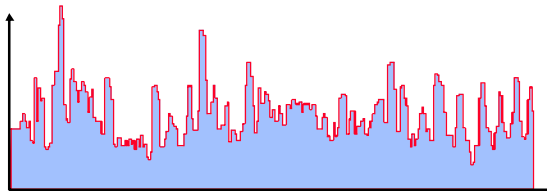
spektrum

Acc.
úroveň



Frekvence

Acc.
úroveň



Frekvence

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Analyzátor FFT a CPB

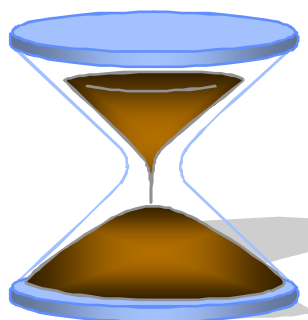
Ukázkový příklad

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





To nejdůležitější ve frekvenční analýze



B = šířka pásma
T = čas

$$BT \geq 1$$

(často nazývané jako “Princip nejistoty”)

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Průměrování

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





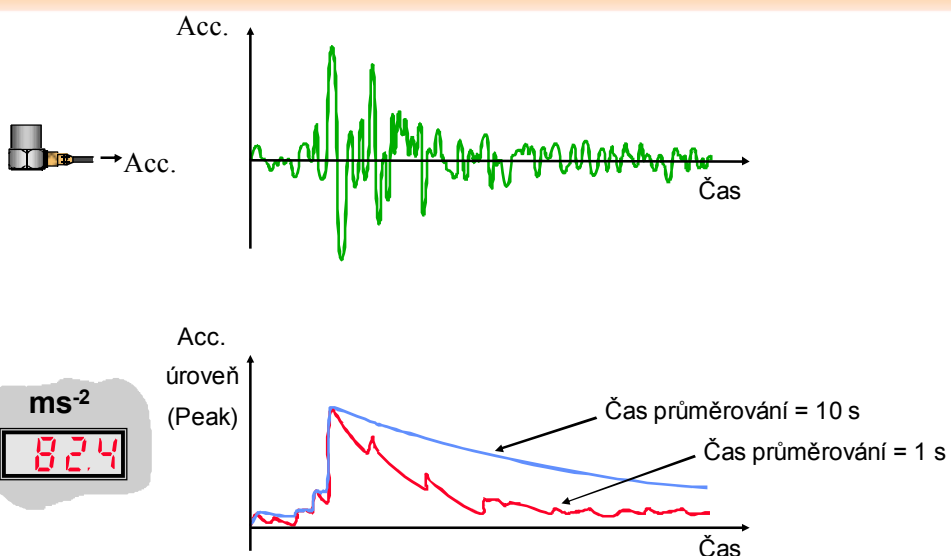
Průměrování

- Lineární
 - V pásmové analýze pomocí času
 - V FFT pomocí počtu spekter
- Exponenciální
 - V pásmové analýze pomocí časových konstant
 - V FFT pomocí počtu spekter

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Průměrování - v čase



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Dynamický rozsah

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Nastavení vhodného dynamického rozsahu

Pro frekvenční analýzu v FFT analyzátoch je nutné nejprve navzorkovat zpracovávaný signál. Nastavení vhodného rozsahu A/D převodníku pro převod měřeného analogového signálu na vzorkovaný digitální signál je důležitým krokem. Špatné nastavení dynamického rozsahu může změnit zpracovávaný signál.

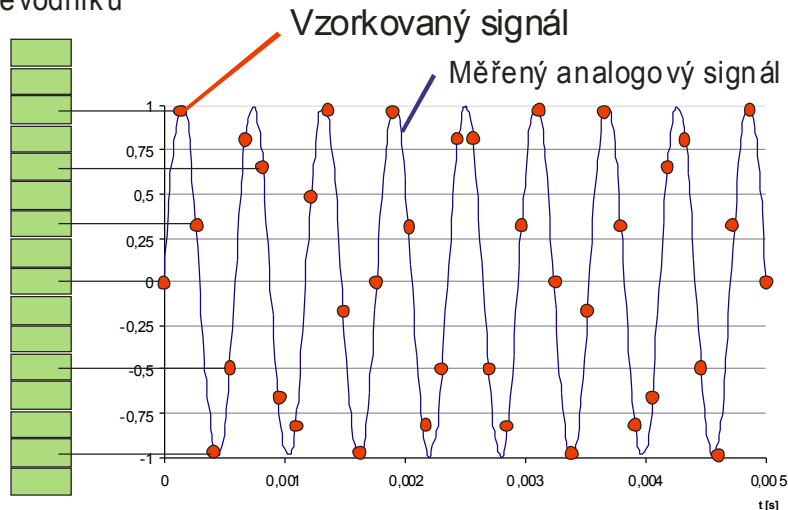
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Činnost A/D převodníku

úroveň A/D
převodníku



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Nevhodné nastavení dynamického rozsahu I.

Dynamický rozsah nastavený na nižší úroveň než je běžná úroveň měřeného signálu.

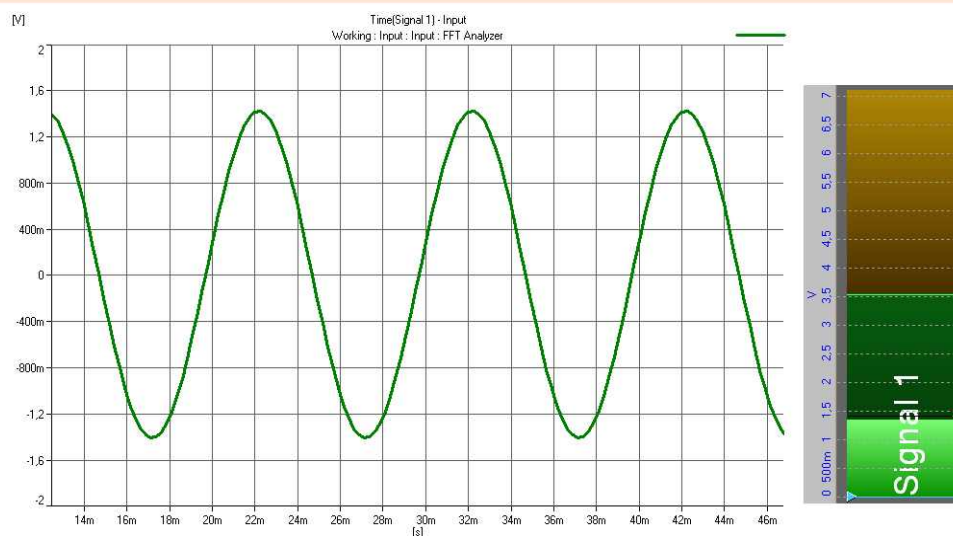
Na následujících obrázcích je vidět následek nastavení A/D převodníku na příliš malou úroveň. Z obrázků je patrná i deformace měřeného signálu.

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





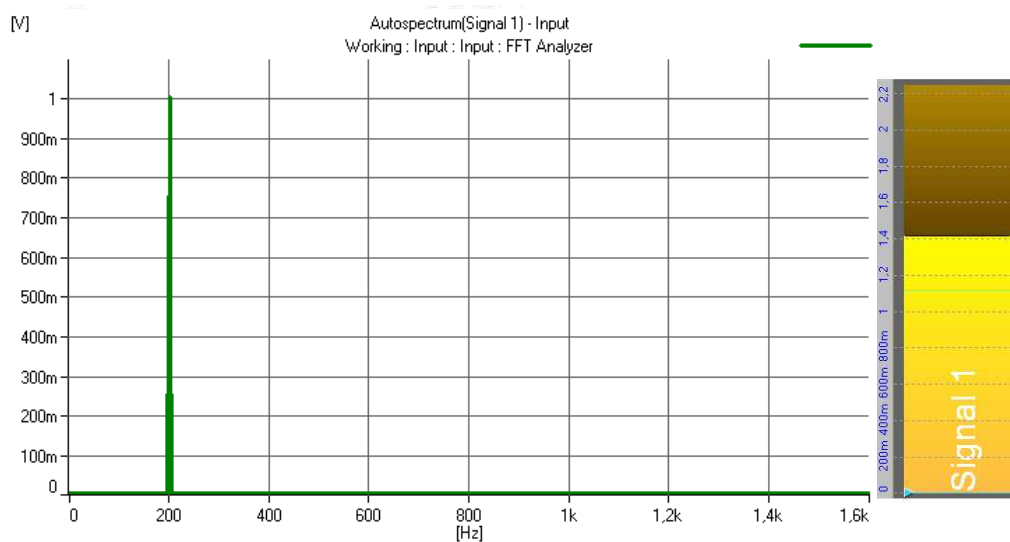
Malé využití rozsahu A/D převodníku



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Optimální využití A/D převodníku

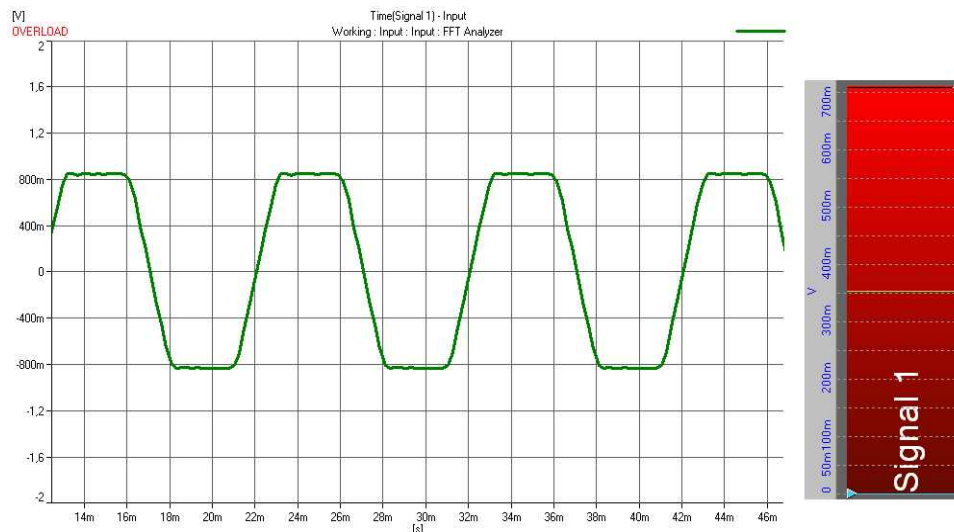


INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





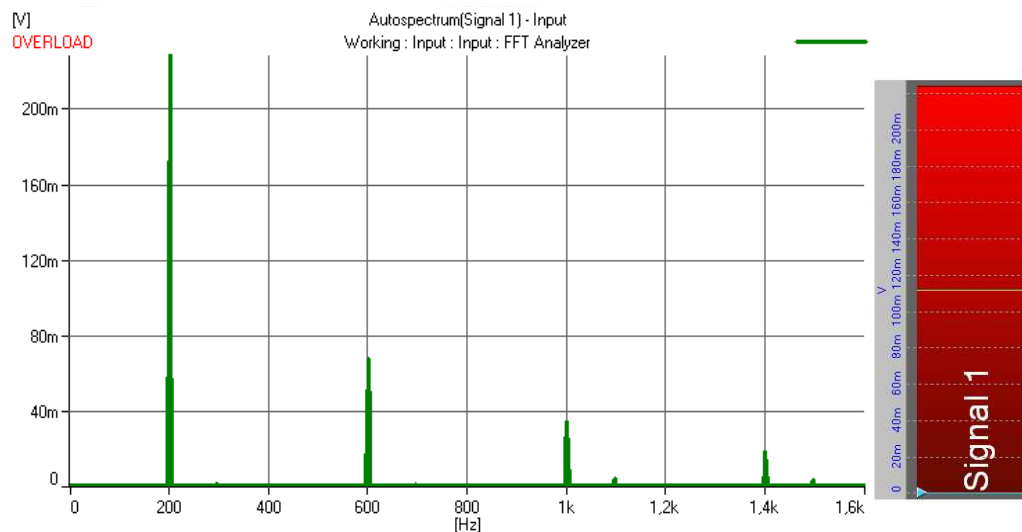
Přebuzený signál



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Přebuzený signál



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Nevhodné nastavení dynamického rozsahu II.

Dynamický rozsah nastavený na mnohem vyšší úroveň než je běžná úroveň měřeného signálu.

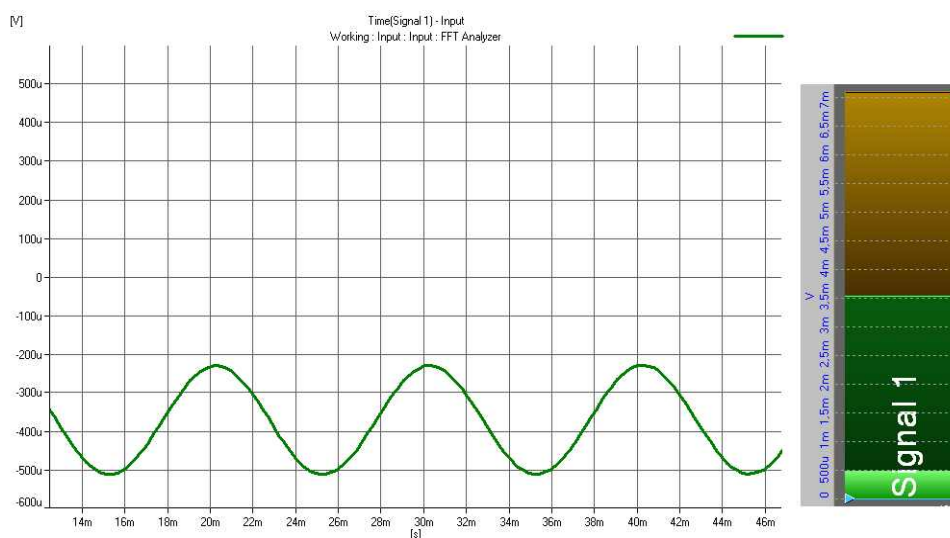
Na následujících obrázcích je vidět velmi malé využití A/D převodníku a možná deformace měřeného signálu.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



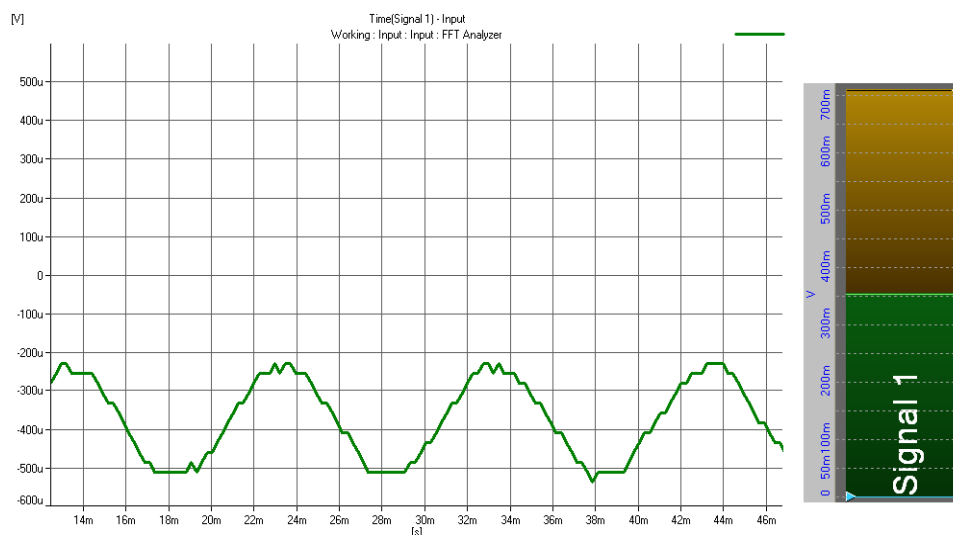
Malé využití rozsahu A/D převodníku



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



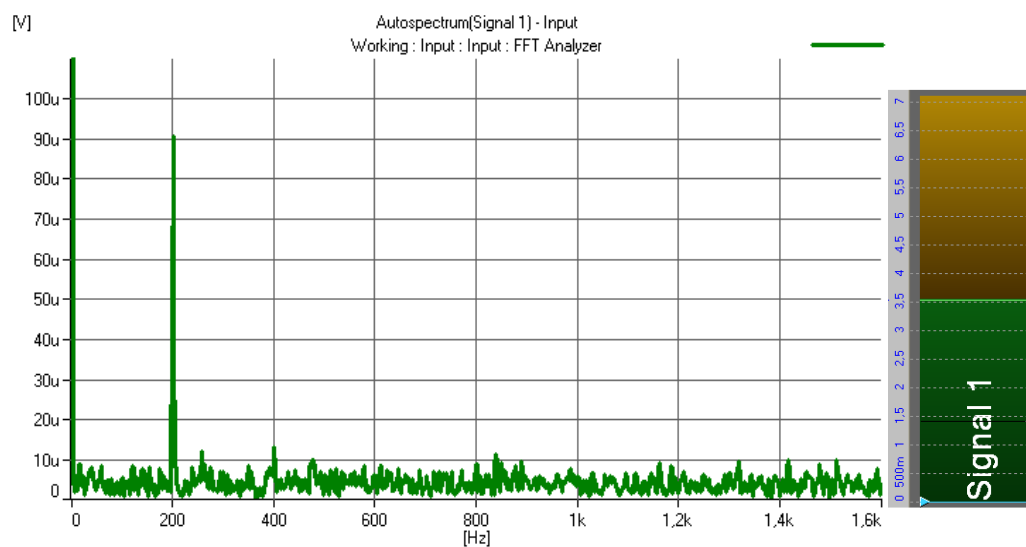
Velmi malé využití rozsahu A/D převodníku



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Velmi malé využití rozsahu A/D převodníku



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





AUTORANGE

Měřicí rozsah lze na mnoha přístrojích s FFT analýzou nastavit i automaticky. Funkce AUTORANGE funguje tak, že nastaví maximální vstupní úroveň signálu, aby byla o 3 až 6 dB vyšší než zjištěná špičková hodnota.

Překročení hodnoty $\sqrt{21}$ z nastaveného rozsahu je indikováno překročením rozsahu.

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Řádová analýza

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Souběhová filtrace x FFT analýza

Souběhová filtrace (řádová analýza)

- pro cyklicky pracující stroje
- vstup – měřený signál + tacho
- zaměřeno na otáčkovou freq. a její harmonické
- délka záznamu je celočíselným násobkem otáčkové frekvence
- časový záznam – počet otočení
- spektrum (závislost amplitudy na násobcích otáčkové frekvence)

Eliminován vliv skluzu otáček

FFT analýza

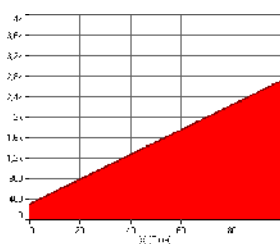
- pro obecnou analýzu signálů
 - vstup – měřený signál
- zaměřeno na všechny frekvence
 - pevná vzorkovací frekvence
 - délka záznamu T
 - časový záznam - čas [s]
- spektrum (závislost amplitudy na frekvenci)

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

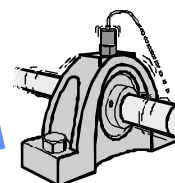


FFT analýza

Postupný nárůst otáček -rozběh



Měření vibrací



FFT

Časový záznam

Frekvenční spektrum

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





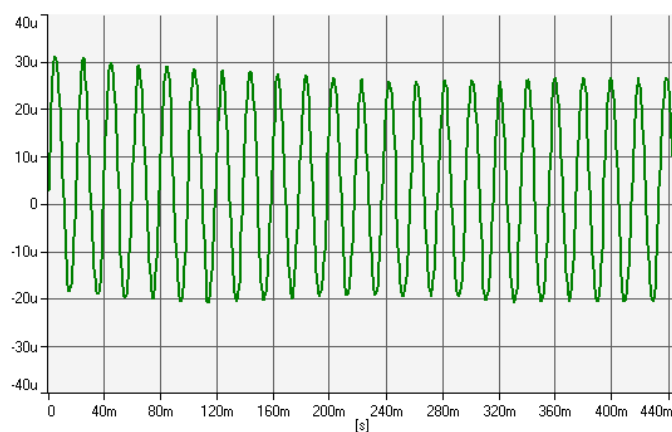
FFT analýza

FFT



Časový záznam

záznam v sekundách



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



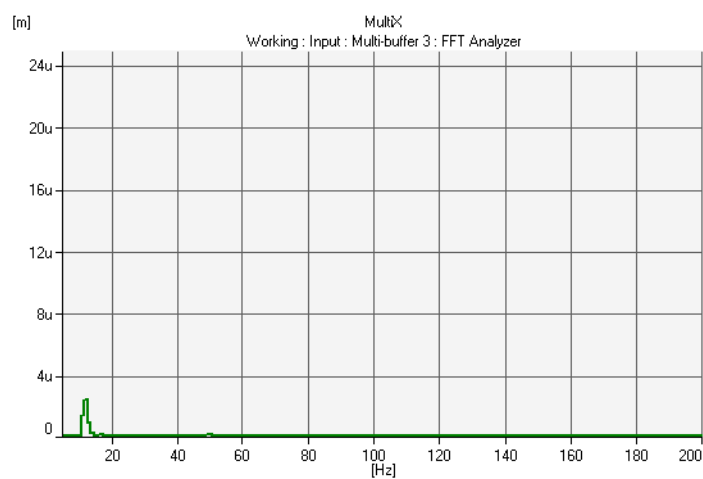
FFT analýza

FFT



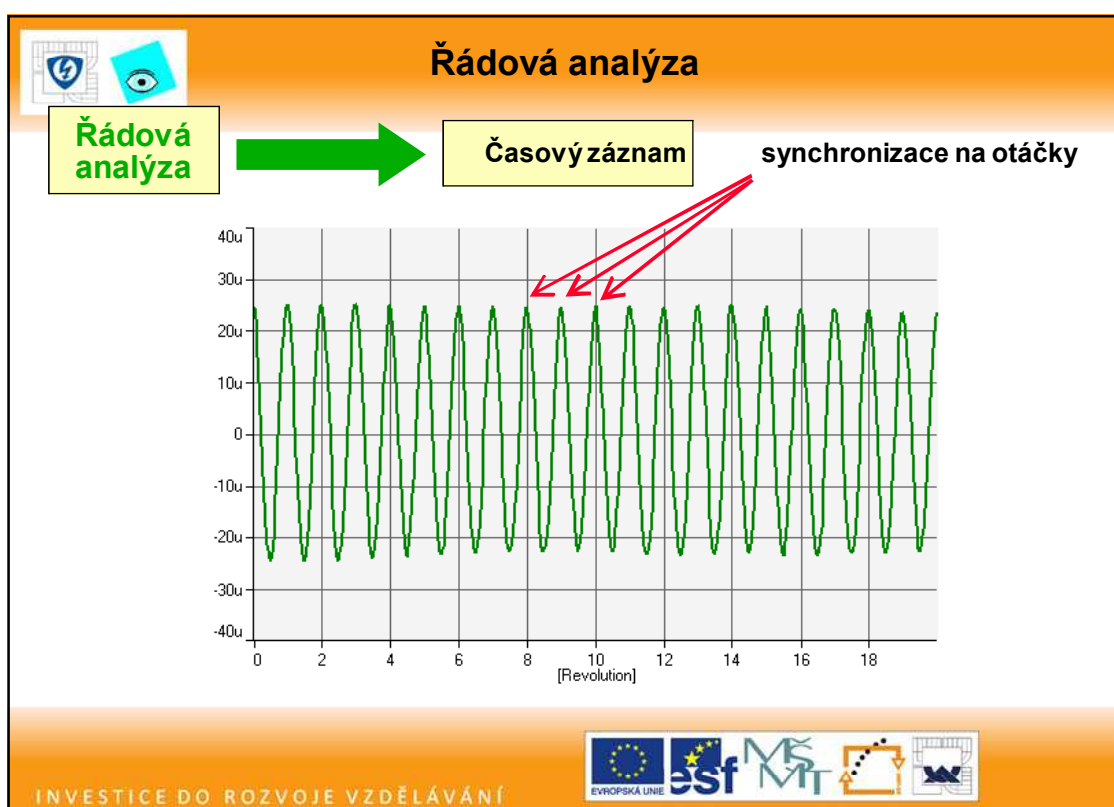
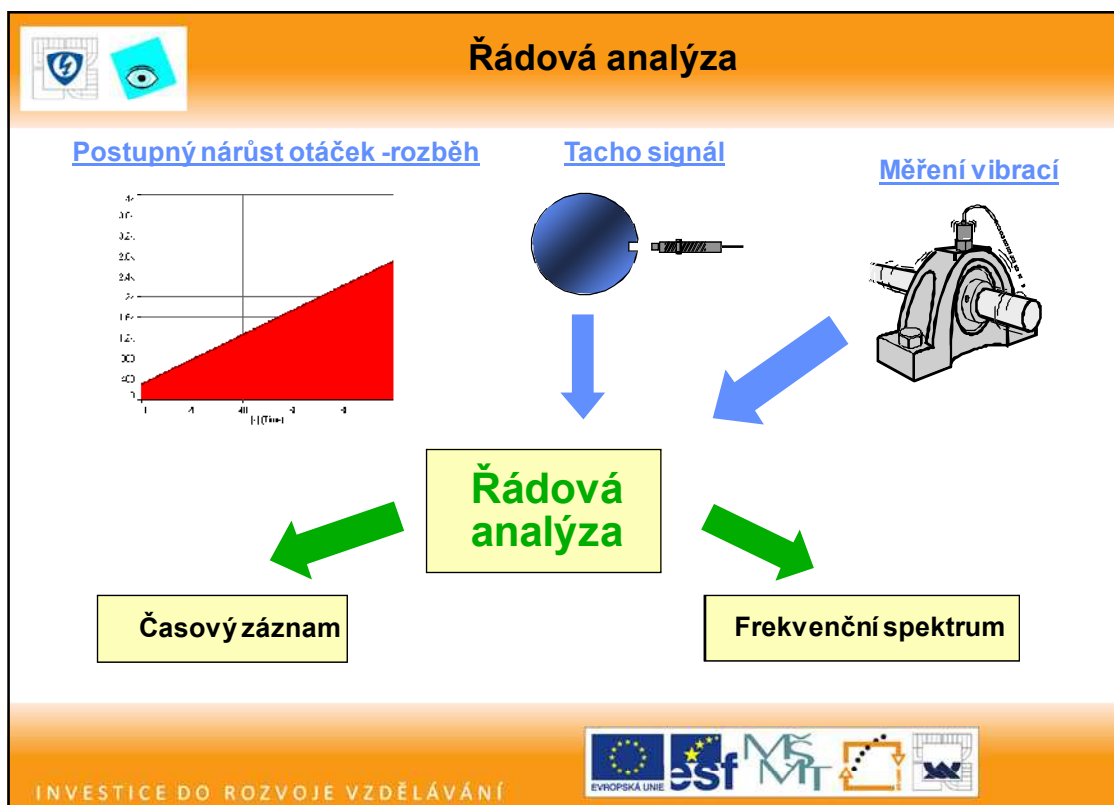
Frekvenční spektrum

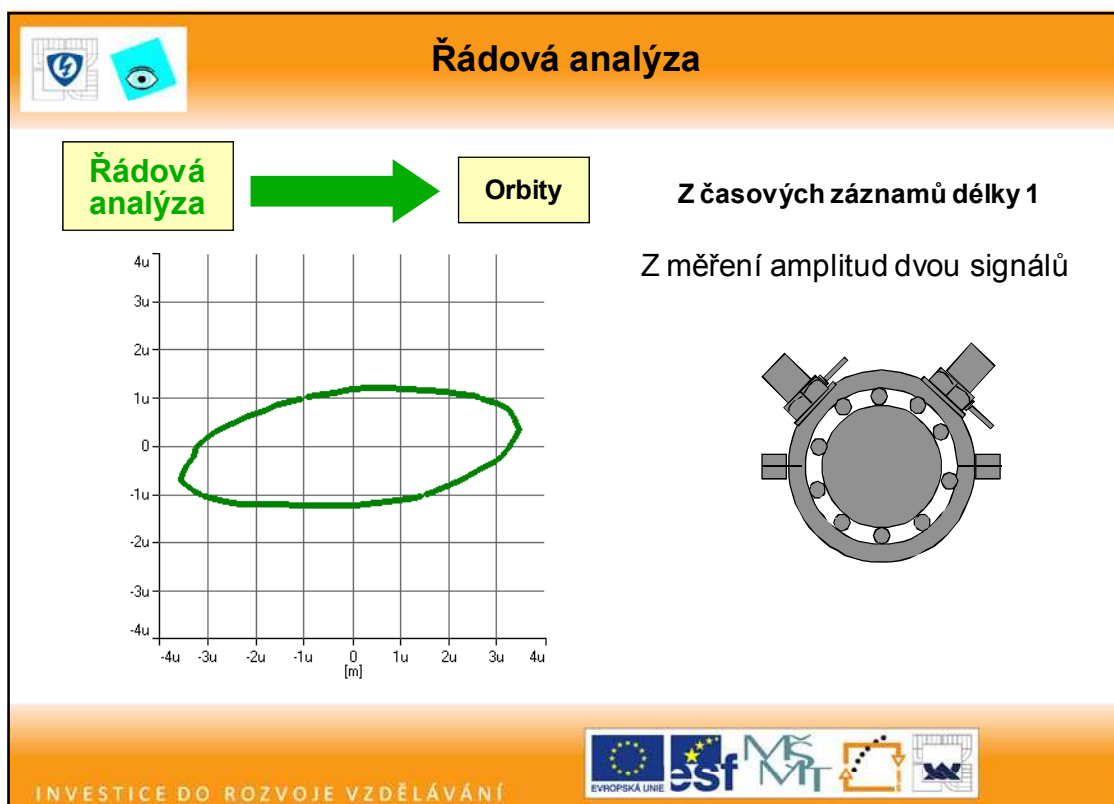
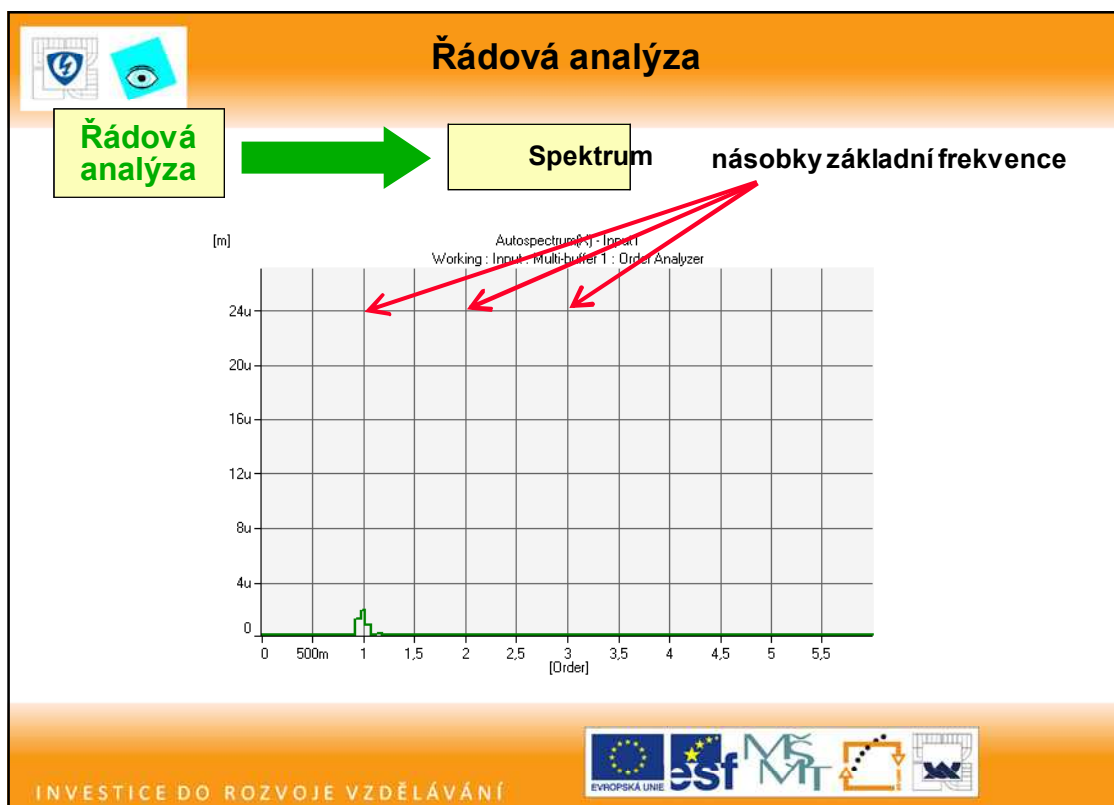
f [Hz]

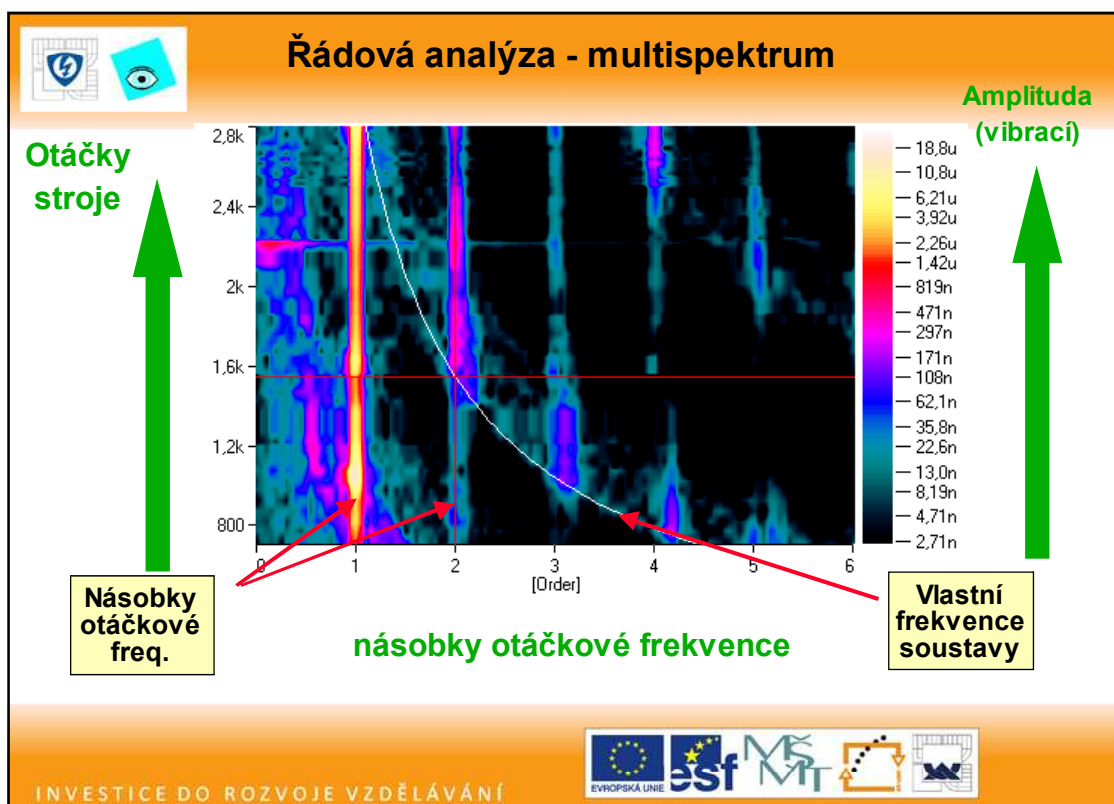
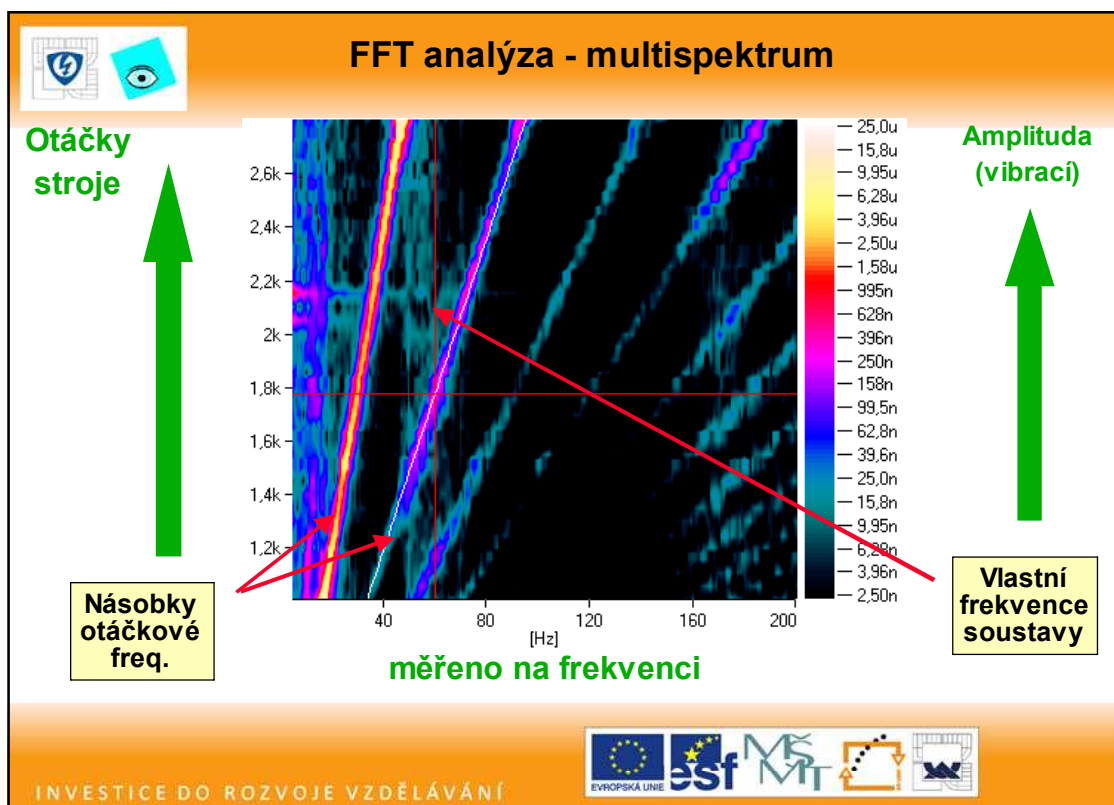


INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ











CEPSTRA – CEPSTRÁLNÍ ANALÝZA

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Jaký je účel cepster – cepstrální analýzy?

Cepstra umožňují identifikaci „periodických struktur“ - opakujících se složek – ve spektru

- Harmonické
 - Postranní pásma
 - Zážněje, odrazy
- Poškození ozubených kol,
převodových mechanismů
a valivých elementů ložisek

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Cepstrální analýza

Matematicky je kalkulace cepstra vyjádřena:

$$C(\tau) = F^{-1} \{ \log F(f) \}$$

kde $F(f)$ je frekvenční spektrum

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Cepstrální analýza

Cepstrum je zvláštním druhem

”Spektra ze spektra”

Ve skutečnosti se jedná o zpětnou transformaci Fourierova spektra do časové oblasti

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Cepstrální analýza

Terminologie Cepstrální analýzy:

Z pojmu:

Harmonic
Frequency
Phase
Filter

1/s (= Hz)

vzniká:

Rahmonic
Quefrequency
Saphe
Lifter

s

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Cepstrum

Ukázkový příklad

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Cepstra – Cepstrální analýza

Výhody - vlastnosti:

- Identifikace výskytu / nárůstu složek harmonických a postranních pásem
- Koncentrace informací do jedné („spektrální“) čáry v Cepstru
- Není ovlivnění umístěním měřicího místa
- Necitlivost na amplitudovou a frekvenční modulaci
- Necitlivost na změny v zatížení
- Identifikace – oddělení – „rodin“ harmonických a postranních pásem

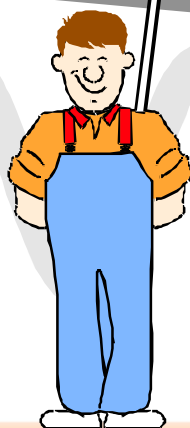
Ale ...

- Nevhodné pro celková a obecná diagnostická měření (použit spektra)
- Neumožňuje rozlišení lokálních a celkových poruch (celkové opotřebení)

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Analýza závad



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Analýza závad

- Analýza spekter
- Nevýváženost
- Nesouosost
- Mechanické uvolnění
- Závady ložisek
- Závady elektromotorů
- Analýza převodovek
- Rezonance a kritické otáčky

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Analýza frekvenčních spekter

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Spektrum jako nástroj vibrační diagnostiky

- Pracuje-li stroj periodicky, projevují se periodicky i jednotlivá poškození nebo změny technického stavu.
- Při znalosti frekvence buzení jednotlivých součástí stroje lze identifikovat jejich poškození
- Znalost budících frekvencí a změn amplitud na těchto frekvencích je základním nástrojem vibrační diagnostiky

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Ve frekvenčním spektru hledáme

Základní budící frekvence

- Odpovídají chybovým frekvencím stanoveným výpočtem z konstrukčních parametrů
- Jsou funkcí rotorových frekvencí hřídelí, které se otáčejí konstantní frekvencí
- Pohybují se v nízkofrekvenční oblasti spektra
- Jsou zásadní pro identifikaci zdroje poškození

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Ve frekvenčním spektru hledáme

Harmonické frekvence

- Jsou celočíselným násobkem základní frekvence
- Jsou důsledkem odchylek časového průběhu od tvaru funkce $\sin(t)$
- Obdélníkový časový průběh = velké množství harmonických frekvencí
- Jejich velikost ve vztahu k základní frekvenci jsou zásadním příznakem poškození

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Ve frekvenčním spektru hledáme

Subharmonické frekvence

- Jsou celočíselným podílem základní frekvence
- Jsou důsledkem odchylek časového průběhu od tvaru funkce $\sin(t)$
- Jejich velikost ve vztahu k základní frekvenci jsou zásadním příznakem poškození

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Ve frekvenčním spektru hledáme

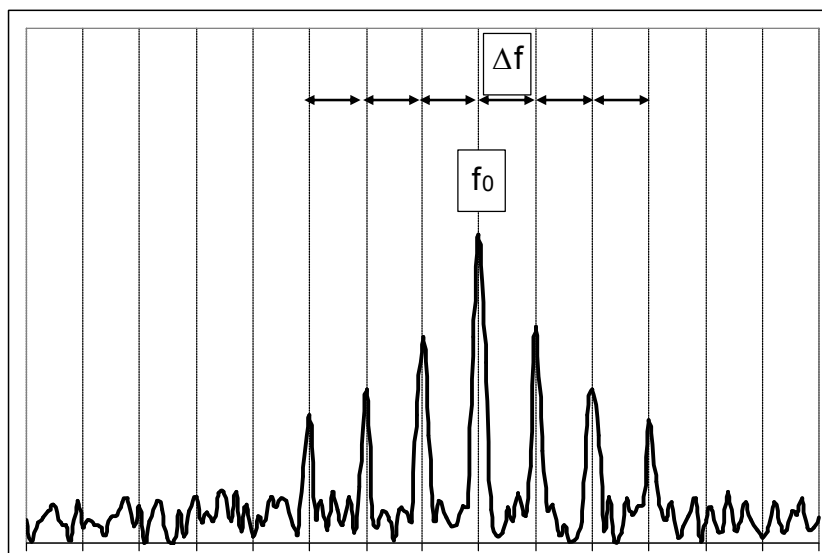
Frekvence na postranních pásmech

- Rozprostírají se kolem základní nebo harmonické složky
- Jsou od ní vzdáleny o konstantní vzdálenost na obě strany (směrem k vyšším i nižším frekvencím)
- Jejich amplituda se vzdáleností klesá
- Jejich množství a velikost jsou příznakem stádia poškození
- Přítomnost postranních pásem vyplývá z amplitudové modulace signálu (periodické změny amplitudy v čase)
 - Změna amplitudy bude souviset nejčastěji s rotorovou frekvencí

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Postranní pásma



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Další možnosti spektrální analýzy

Řádová analýza

- Určena pro stanovení kritických a optimálních oblastí
- Základní otázka: **Jaký je vývoj vibrací při změnách otáček na jednotlivých harmonických složkách?**
- Zobrazuje vibrace v závislosti na frekvenci a řádu (násobku) základní frekvence
- V doběhové (rozběhové) charakteristice je výřezem jednotlivých paprsků

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



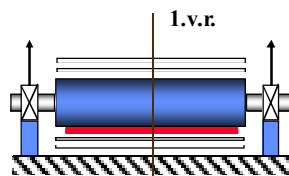
Nevyváženost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Nevývaha statická



Statická nevývaha

- V praxi se téměř nevyskytuje
- Vektor nevývahy je stabilní - amplituda a fáze
- Převládá chvění v radiálním směru
- Na ložiscích je shodná fáze 1H frekvence (+20°)
- Amplituda roste kvadraticky s otáčkami (2x vyšší otáčky => 4x větší amplituda 1H)
- Rotory se vyvažují pouze v jedné rovině
- Fázový posun mezi horizont. a vert. směrem na tomtéž ložisku je 90° (+20°)

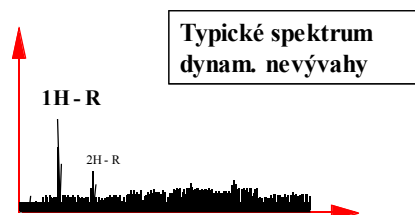
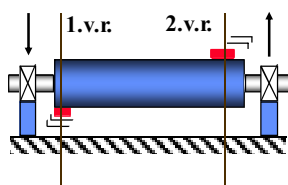
Poznámka:

- 1/ Silná nevyváženost způsobuje výskyt vyšších harmonických
- 2/ Platí pro podkritické otáčky

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Nevývaha dynamická



Párová nevývaha

- Nevývažky v obou vyvažovacích rovinách jsou shodné

Dynamická nevývaha

- Nevývažky v obou vyvažovacích rovinách jsou rozdílné
- Nejčastější typ nevyváženosti
- Převládá chvění v radiálním směru
- Amplituda roste kvadraticky s otáčkami (2x vyšší otáčky => 4x větší amplituda 1H)
- Rotory se musí vyvažovat ve dvou rovinách
- Vektor nevývahy je stabilní - amplituda a fáze. Na ložiscích je konstantní fáze 1x frekvence (+20°)
- Převládá chvění v radiálním směru

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



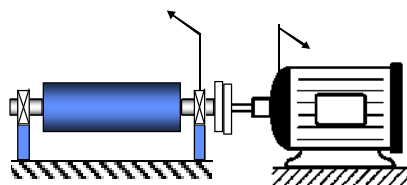


Nesouosost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

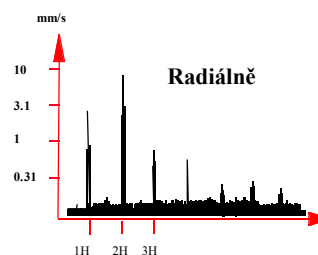


Nesouosost rovnoběžná



Rovnoběžná nesouosost

- Výrazné radiální vibrace
- Fázovým posun v radiálním směru na spojce $180^\circ (+/-20^\circ)$ - nejlepší indikátor nesouososti
- Obvykle převládá druhá harmonická otáčkové frekvence (záleží na typu a materiálu spojky)
- Může dojít k vybuzení i vyšších harmonických složek
- Na volném konci může být i větší odezva na nesouosost než na ložisku u spojky
- Vibrace mohou být směrové - větší v horiz. nebo vert. směru

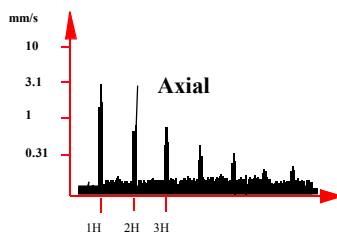
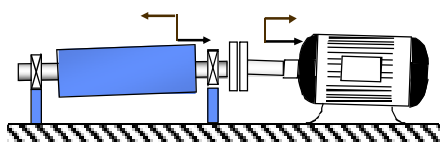


INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Nesouosost úhlová



Úhlová nesouosost

- Výrazné axiální vibrace
- Fázovým posun v axiálním směru na spojce $180^\circ (+/-20^\circ)$ - nejlepší indikátor nesouososti
- Výrazné složky 1H, 2H případně 3H otáčkové frekvence (2H překročí 50% 1H)
- Může dojít k vybuzení i vyšších harmonických složek
- Občas větší amplituda vibrací na volném konci

*Poznámka:
1/ Nesouosost se často
projevuje pouze na 1H.*

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



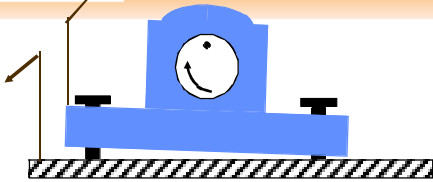
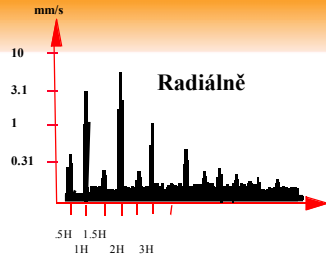
Mechanické uvolnění

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Mechanické uvolnění

Uvolněný základ:

- Zahrnuje:
 - strukturální vůle základů, podstavců apod.
 - deformace základu nebo rámu
 - uvolnění kotvicích šroubů apod.
- Výrazná 1H, případně i 2H otáčkové frekvence
- Menší subharmonické 0.5H, 1.5H...
- Vyšší vibrace jsou obvykle spojeny s jedním rotorem a na rozdíl od nevývahy nebo nesouososti se nepřenáší tolik na ostatní rotory
- V případě uvolněného základu je fáze mezi těmito objekty 180°
- U prasklého rámu apod. může být amplituda a fáze chaotická

Poznámka:
Mechanické uvolnění je vždy pouze důsledek jiné příčiny

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





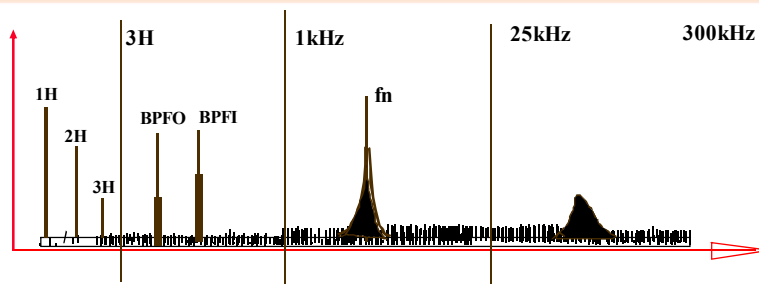
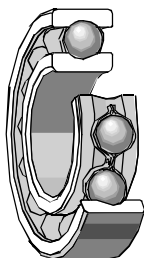
Závady ložisek

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Valivá ložiska



Postup rozvoje závady valivého ložiska:

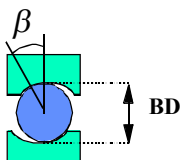
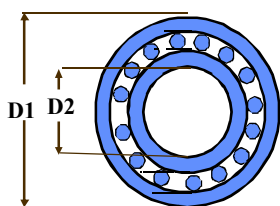
- První fáze: dochází k emitování akustické emise na 200-400kHz, potíže se zastíněním a odfiltrováním nežádoucích složek - obtížně určitelné
- Druhá fáze: generují se vlastní frekvence poškozených komponent ložiska, záleží na použité metodě, nejlepší je obálková analýza, protože provádí frekvenční analýzu demodulovaného signálu
- Třetí fáze: výskyt ložiskových frekvencí ve spektru, obvykle již velmi pozdě na - ložisko před havárií

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Valivá ložiska

- Výrazné složky na chybových frekvencích ložiska
- Vyšší harmonické na rotorové frekvenci



$$PD = \frac{D_1 + D_2}{2}$$

- n – počet valivých těles

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Valivá ložiska – chybové frekvence

- Vnější kroužek

$$f_{BPFO} = \frac{n}{2} f_R \left(1 - \frac{BD}{PD} \cos \beta \right)$$

- Vnitřní kroužek

$$f_{BPFI} = \frac{n}{2} f_R \left(1 + \frac{BD}{PD} \cos \beta \right)$$

- Valivé těleso

$$f_{BSF} = \frac{PD}{BD} f_R \left(1 - \left(\frac{BD}{PD} \cos \beta \right)^2 \right)$$

- Klec

$$f_{TF} = \frac{f_R}{2} \left(1 - \frac{BD}{PD} \cos \beta \right)$$

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Odhad vlivu změny dynamického zatížení (naměřených vibrací) na životnost ložiska

Uvažujeme jednořadé kuličkové ložisko bez axiální síly zatížené převládající nevyvážeností.

Při změně vibrací na dvojnásobek (z 2 m/s² na 4 m/s²)
klesne životnost ložiska

8x

Při změně vibrací na pětinasobek (z 2 m/s² na 10 m/s²)
klesne životnost ložiska

**Vliv vibrací
na životnost
ložiska**

125x

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



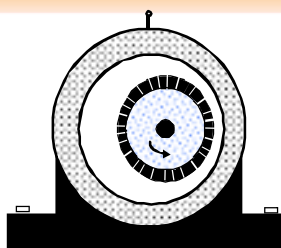


Závady elektromotorů

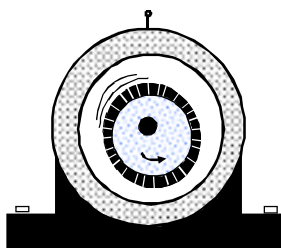
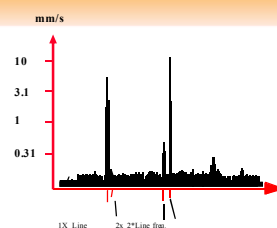
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



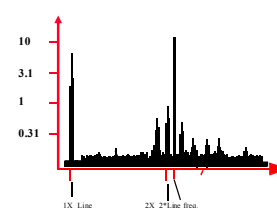
Problémy elektrických strojů



- Excentricita statoru**
Volné železo (vůle ve stat.)
Zkratované statorové plechy:
- druhá harmonická síťové frekvence
 - silní směrové vibrace



- Excentrický rotor:**
- 2x síťová frekvence s modulacemi frekvence průchodů pólů (PPF)



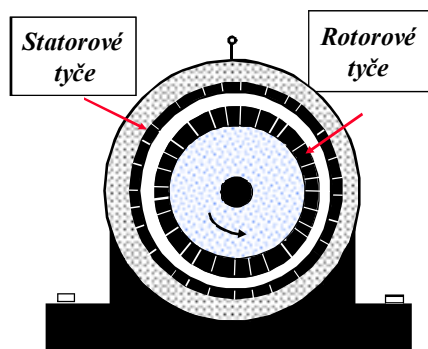
PPF = skluzová frekvence * počet pólů
 skluzová frekvence = synchronní otáčky - RPM

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





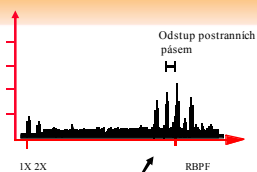
Prasklé rotorové tyče elektromotoru



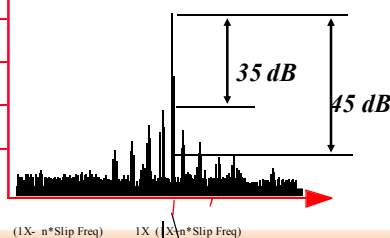
Prasklé rotorové tyče, uvolněné rotorové tyče, zkratované rotorové plechy, špatné spoje mezi rotorovými plechy:

- postranní pásma okolo frekvence průchodu rotorových tyčí (RBPF) s frekvencí skluzovou,
< - 35 dB = **vážné**
> - 45 dB = **OK**.

PPF = skluzová frekvence * počet pólů
skluzová frekvence = synchron. otáčky - RPM
RBPF = počet rotorových tyčí * RPM



Uvolněné rotorové tyče mohou také způsobit postranní pásma s frekvencí síťovou okolo frekvence 1x a 2x RBPF.



(1X - n*Slip Freq) 1X (1X + n*Slip Freq)

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



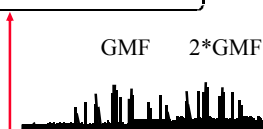
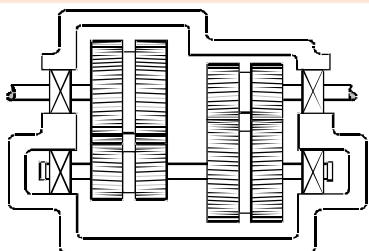
Analýza převodovek

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Převodovky



Spektrum převodovky

- Závady produkují postranní pásma okolo zubových frekvencí (GMF) a jejich harmonických.

Cepstrální analýza a průměrování v časové oblasti výrazně zjednodušují práci při odhalování závad ozubených převodů.



Cepstrum převodovky

- Energie každého postranního pásma (závady) je vyjádřena jednou čarou v cepstru.

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Rezonance a kritické otáčky

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Vlastní frekvence a rezonance

- Rezonanční frekvence je rovna:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

- Experimentální identifikace rezonance plyne z její definice (vlastní frekvence = budicí frekvence)

Princip identifikace :

- Buzení soustavy širokopásmovým signálem
- Na vlastní frekvenci dojde k jeho zesílení

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Vlastní frekvence a rezonance

Druhy buzení soustavy

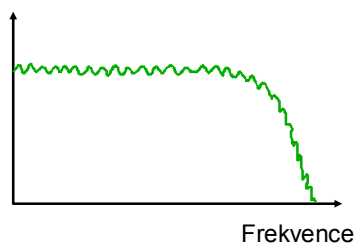
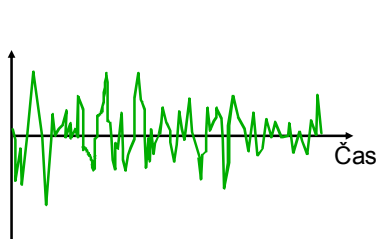
1. Bílý šum
 - Signál s konstantní amplitudou v širokém pásmu frekvencí
 - Vytvořen uměle
 - Nejčastěji nahrávka
2. Rázový impuls

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





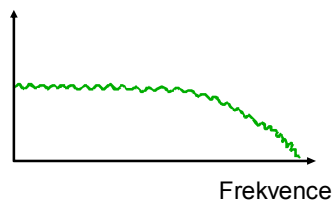
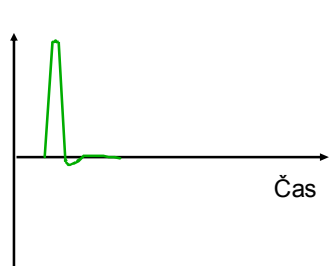
Bílý šum



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Buzení impulsem



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Kritické otázky - určení

- Lze určit výpočtem a měřením
 - Měříme vlastní frekvence
 - Vypočítáme budicí frekvence
- Nejlepší metodou identifikace je rozběhová a doběhová charakteristika
 - Určí celé kritické pásmo
 - Odhadne linearitu
 - Ryze experimentální metoda

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Kalibrace vibrometru

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Kalibrace vibrometru

- **KALIBRACE** = soubor úkonů, kterými se stanoví za specifikovaných podmínek vztah mezi hodnotami veličin, které jsou indikovány měřicím přístrojem nebo měřicím systémem nebo hodnotami reprezentovanými ztělesněnou mírou nebo referenčním materiálem a odpovídajícími hodnotami, které jsou realizovány etalony.
- **KALIBRACE** je metrologický úkon :
 - který probíhá podle písemně daného postupu,
 - ze kterého je vydán protokol,
 - který se provádí v konfirmačních lhůtách
 - jehož důležitým výsledkem je nejistota při kalibraci

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Obsah kalibračního postupu

- určení měřicího a zkušebního zařízení
- parametry veličin
- stanovení všech etalonů a doplňkového zařízení
- požadované podmínky prostředí
- popis vlastního postupu
- kritéria a/nebo normy pro prohlášení shody
- údaje, které musí být zaznamenány a
- metoda jejich analýzy a prezentace
- analýza nejistot měření

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Nejistoty při kalibracích

- **Jeden etalon** (amplituda + frekvence) – údaje vztaženy k celému frekvenčnímu a amplitudovému rozsahu
- **Kalibrační budič** – lze stanovit kalibrační křivku
- **Etalony musí být navázány** – zdroj nejistot

Hlavní zdroje nejistot při kalibraci vibrometru

- Nejistota opakovaných měření
- Nejistota etalonu
- Nejistota odečtu hodnoty
- Nejistota daná variabilitou podmínek prostředí

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Základní východiska

- **Metodika** : EA 4/02 (EAL R2 + EAL R2 S1)
- **Specifika** :
 - Nekoriguje se systematická chyba (nutno zajistit podmínkami měření)
 - Koeficient rozšíření $k = 2$
 - Příspěvek k nejistotě typu A by neměl být stanoven méně než z 10 opakovaných měření
 - Pro vyjádření nejistoty je dána přesná formulace

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Hlavní zásady

- Zvolit min. 5 hodnot z rozsahu měřidla (v případě použití kalibračního budiče)
- Zaměřit se především na často (nebo očekávané) měřené hodnoty
- Pracovat při referenčních podmínkách
- Zakreslit kalibrační křivku (kalibrovaný rozměr – základní chyba (strannost), nejistota)

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Formulace nejistoty v kalibračním listu

Uvedená rozšířená nejistota je součinem standardní nejistoty a koeficientu rozšíření $k=2$, což pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí asi 95 %. Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA 4/02.

Uvedená rozšířená nejistota je součinem standardní nejistoty a koeficientu rozšíření $k=XX$, což pro t-rozdělení s $v_{\text{eff}}=YY$ efektivními stupni volnosti odpovídá pravděpodobnosti pokrytí asi 95 %. Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA 4/02

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Justace

Ukázkový příklad

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



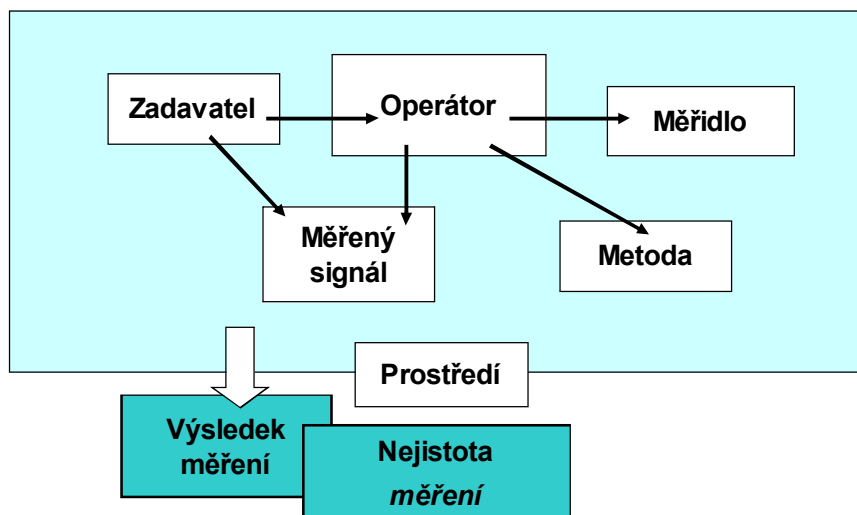
Nejistoty měření

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





System měření



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Proč je systém měření variabilní

- Variabilní je měřený signál $\Rightarrow$ měření usměrněných (integračních) hodnot.
- Variabilní je měřidlo.
- Variabilní jsou podmínky měření.
- Variabilní jsou etalony.
- Variabilní jsou vlastnosti operátora.
- Cíl = oddělit variabilitu signálu od ostatních zdrojů.

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





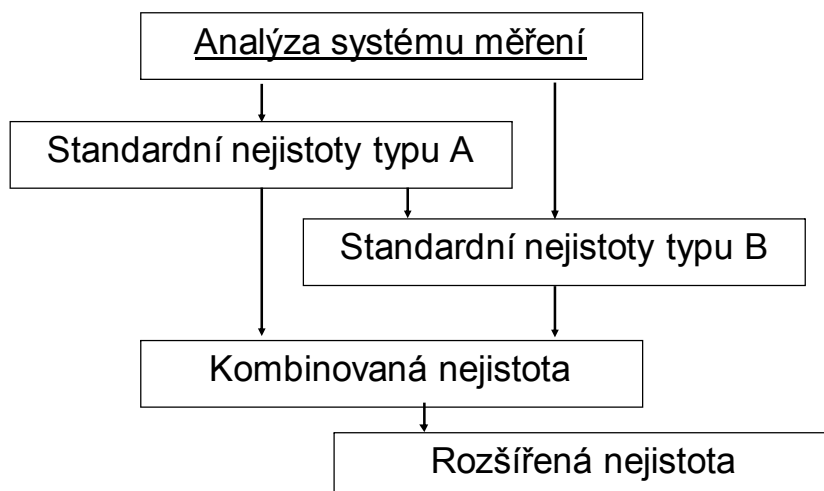
Co je nejistota?

- dle ČSN 01 0115 definována jako :
- ***parametr přidružený k výsledku měření, který charakterizuje rozptyl hodnot, které mohou být důvodně přisuzovány k měřené veličině***

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Postup určení nejistot



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Nejistota určená metodou typu A

- Nejistota získaná statistickými metodami z výběru naměřených hodnot
- Rozhodující vliv má počet opakovaných měření
- Předpokladem je Normální rozdělení

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Nejistota určená metodou typu B

- Metoda, která vychází z jiných, než statistických metod
- Váže se na známé zdroje, které lze při analýze identifikovat a kvantifikovat
- Variabilita musí být vyjádřena v jednotkách měřené veličiny
- Zdroje nejistot typu B jsou vázány především na :
 - měřicí prostředky
 - metodu měření
 - model měření
 - podmínky měření

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Nejistota určená metodou typu B

- Vyhodnocení vychází z kvalifikovaného odhadu variability a pravděpodobnostního rozdělení zdroje nejistoty.
- Informace lze nalézt především v :
 - předcházejících měřeních
 - zkušenostech a znalostech o systému měření
 - údajích výrobců měřidel
 - certifikátech a kalibračních listech
 - odborné literatuře a učebnicích

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Nejistota určená metodou typu B

Základní vztah pro stanovení i-té nejistoty typu B zní :

$$u_{Bi} = \frac{z_{max}}{\chi}$$

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Nejistota určená metodou typu B

Hodnoty χ	
Pravděpodobnostní rozdělení variability zdroje nejistoty typu B	χ
Normální	3 (P=99,7%) 2 (P=95%)
Rovnoměrné	$\sqrt{3}$
Trojúhelníkové	$\sqrt{6}$

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Nejistota určená metodou typu B

- Pokud je zdroj variability popsán již pomocí nejistoty U, je i-tá nejistota typu B :

$$u_{Bi} = \frac{U}{k}$$

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Postup

1. Určí se zdroje nejistot
2. Určí se variabilita zdroje $\pm z_{\max}$
3. Určí se pravděpodobnostní rozdělení pro $z_{\max}$.
4. Stanoví se vliv $z_{\max}$ na změnu měřené veličiny. Je nutné znát nebo odhadnout přepočít mezi změnou zdroje nejistoty a měřené veličiny. Lze využít koeficientu citlivosti c
5. Provede se výpočet u_{Bi}

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



6. Stanoví se nejistota typu B u_B z jednotlivých zdrojů dle vztahu :

$$u_B = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_{Bi}^2}$$

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Kombinovaná nejistota

Ze známých standardních nejistot A a B se stanoví kombinovaná nejistota u dle vztahu :

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

Kombinovaná nejistota má význam směrodatné odchylky

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Rozšířená nejistota

Rozšířením se nejistotě udá obvyklý pravděpodobnostní charakter

$$U = u \cdot k$$

$k = 2 \Rightarrow P = 95\%$

Zaokrouhlit nahoru na dvě platné číslice o desetinné místo lépe než je rozlišitelnost měřidla

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Zásady pro udávání nejistot

1. Výpočet nejistot je nedílnou součástí zpracování a vyhodnocování výsledků měření
2. Výsledek se sestává z odhadu naměřené hodnoty a rozšířené nejistoty ve tvaru :

$$Y = y[\text{jednotka}] \pm U[\text{jednotka}] (P = XX\%)$$

3. Číselná hodnota nejistoty se udává dle uvedených zásad pro zaokrouhlování a počet platných číslic.

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Formulace výsledku

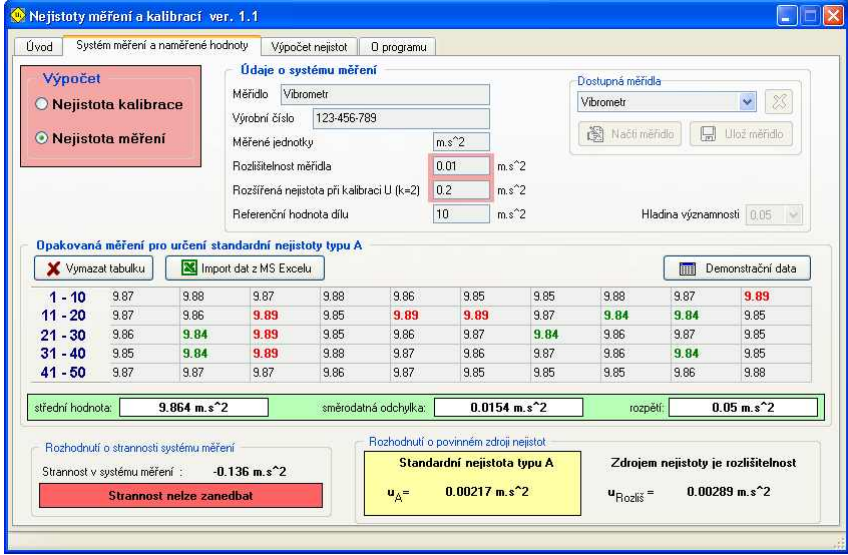
$$Y = y[\text{jednotka}] \pm U[\text{jednotka}]$$

Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření $k=2$, což pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí asi 95 %. Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA 4/02.

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



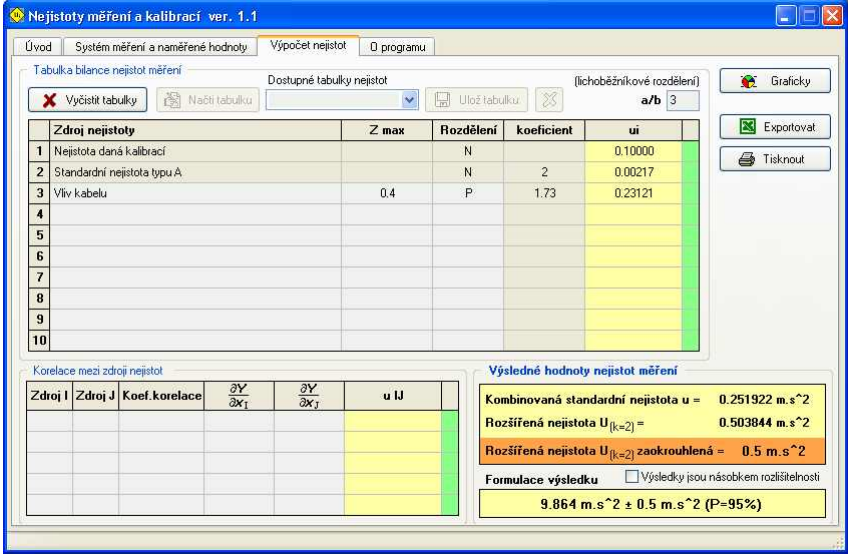






INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ







INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Zákon šíření nejistot

Výsledná kombinovaná nejistota :

$$u_Y^2 = \sum_{i=1}^m \left[\left(\frac{\partial Y}{\partial x_i} \right)^2 u_{xi}^2 \right] + 2 \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j>i}^m \left[\left(\frac{\partial Y}{\partial x_i} \frac{\partial Y}{\partial x_j} \right) \text{cov}(x_i, x_j) \right]$$

$$Y = f(x_1; x_2; x_3; \dots; x_m)$$

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Matematický základ

- Vychází se z funkční závislosti :

$$Y = f(x_1; x_2; \dots; x_M)$$

- Např. :

$$Y = \bar{x} + \Delta_{KAL} + l\alpha \Delta t + \Delta_{ROZ} + \dots$$

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Ukázka

- NEJISTOTY

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

