



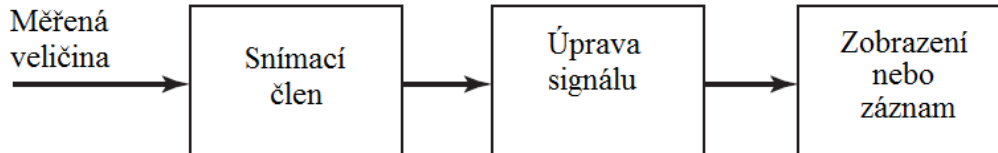
# Obecné charakteristiky měřicího systému

# Obsah přednášky

- Obecný měřicí systém nebo řetězec (co to je?)
- Oblast platnosti experimentu, hrubé určení chyby měření
- Obecné charakteristiky měřicích prvků
- Kalibrace (statická a dynamická)

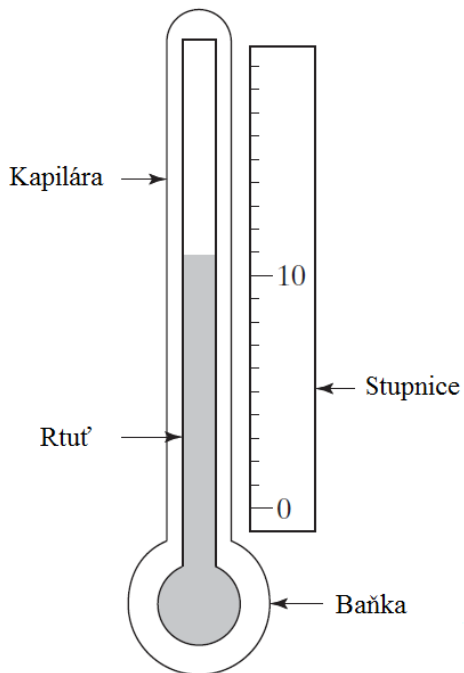
## Obecný měřicí systém (řetězec)

- Při každém experimentu se snažíme získat numerické hodnoty určitých fyzikálních veličin
- Říkáme jim měřené veličiny (tlak, teplota, rychlost, napětí ...)
- Obecný měřicí systém se skládá ze 3 částí: snímací člen, člen pro úpravu signálu a člen pro záznam nebo zobrazení hodnoty na displej



## Obecný měřicí systém (2)

- Měření teploty na základě teplotní objemové roztažnosti kapaliny



## Oblast platnosti měření a určení chyby

- Ve skutečnosti neexistuje dokonale přesné měření
- I z pomoci nejmodernějších a nejpřesnějších měřidel bude vždy určitý nesoulad mezi skutečnou (není obecně známa) a naměřenou hodnotou
- Každý experimentátor (inženýr) si musí být jist naměřenými daty
- Obecně platí, že čím je vyžadována vyšší přesnost měření, tím je také měřidlo dražší
- Skutečnou chybu měření nelze nijak určit, lze pouze sofistikovaně odhadnout

$$\text{CHYBA} = \text{MĚŘENÁ HODNOTA} - \text{SKUTEČNÁ HODNOTA}$$

## Oblast platnosti měření, určení chyby

- Co ale dokážeme relativně přesně určit je nejistota měření, respektive interval nejistot
- Nejistota je odhad limitů a omezeních při měření vždy s určitou mírou pravděpodobnosti
- Nejčastěji se určuje nejistota s 95% pravděpodobností
- Obecně platí, že čím je vyžadován užší interval nejistot, tím vyšší přesnost měření musí měřidlo mít a je také dražší

# Druhy chyb při měření

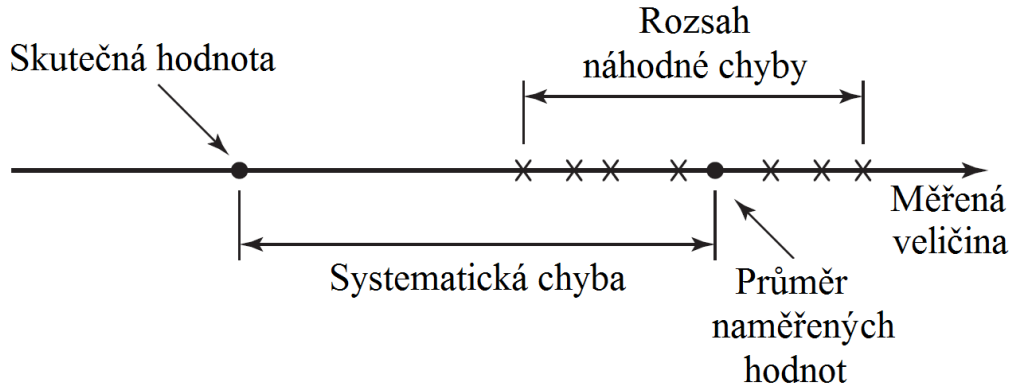
## Náhodné chyby

- Jejich příčinou je primárně nedostatečný počet opakování měření
- Mohou být důsledkem měřidla samotného, experimentálního systému nebo vlivu okolí
- Obvykle je způsobují vlivy, které nedokážeme eliminovat
- Závislost některých měření na teplotě, elektrický šum
- Minimalizace dostatečně velkým počtem opakování měření
- Poté aplikace statistických metod a vyhodnocení

## Systematické (stálé) chyby

- Obvykle se s opakovatelností měření nemění a zůstává stálá
- Mohou být důsledkem kalibrace měřidla (kalibrace má také svoji chybu), i po pečlivé kalibraci bude stále zbývat určitá zbytková systematická chyba (kalibrační chyba)
- Dalším příkladem může být nelinearita měřidla, které je většinou podkládáno za lineární
- Přítomnost měřidla v prostředí, kde probíhá měření má rovněž vliv na systematickou chybu měření (chyba vlivem přítomnosti měřidla, tzv. „loading error“)
- Další vlivy okolí, např. radiace apod.
- Minimalizace pečlivou kalibrací měřidla nebo také analytickými korekcemi

## Druhy chyb při měření (2)

$$\text{NÁHODNÁ CHYBA} = \text{MĚŘENÁ HODN.} - \text{PRŮMĚR}$$
$$\text{SYSTEMATICKÁ CHYBA} = \text{PRŮMĚR} - \text{SKUTEČNÁ HODN.}$$




# Charakteristiky měřicího prvku (měřidla, snímače)

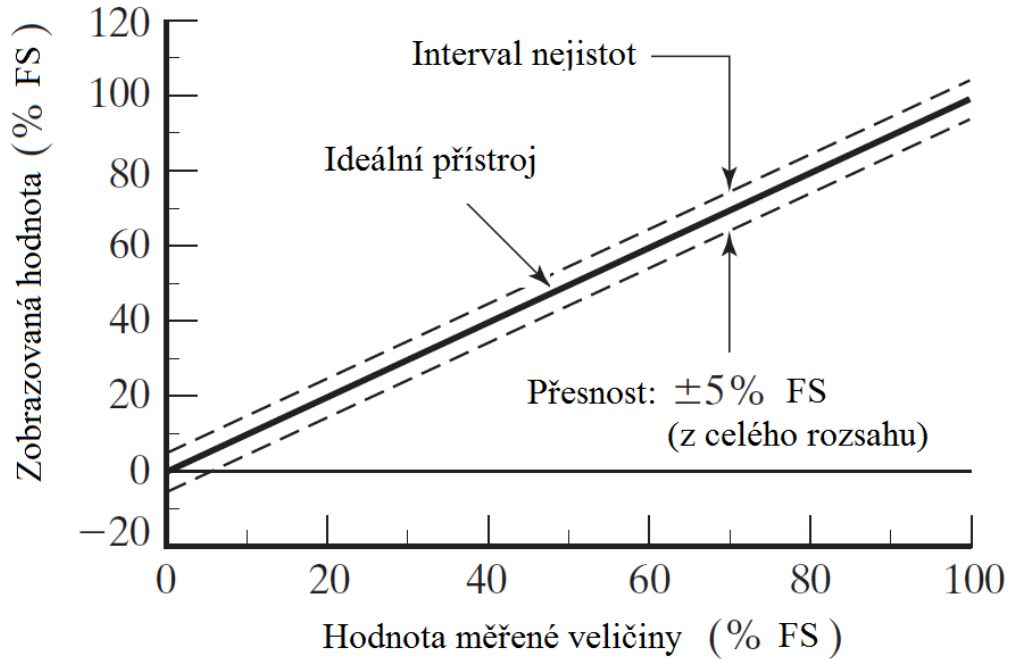
## Rozsah (Range)

- Každý měřicí prvek je navržen pro optimální funkci v určitém rozsahu
- Například multimetr při nastaveném rozsahu  $\pm 5V$  (celkové rozpětí je  $10V$ ) by pro hodnoty  $-7V$  nebo  $12V$  neudával správné hodnoty

## Přesnost (Accuracy)

- Definována jako vzdálenost měřené hodnoty od skutečné (správné) hodnoty
- Jedná se o celkovou zbytkovou chybu (náhodná a systematická) po řádné kalibraci přístroje
- Správněji se jedná o nepřesnost přístroje
- Udávána výrobcem přístroje, předpoklad správného použití
- Často udávána jako % z maximálního nebo nastaveného rozsahu (%FS nebo %FSO)
- Pro rozsah  $0$  až  $5V$  je uvedena přesnost  $\pm 5\%$  FS, tedy  $\pm 0,25V$  bez ohledu na to, jakou hodnotu měříme, tj. v jaké části celkového rozsahu měření probíhá
- Pro měřenou hodnotu  $1V$  je  $\pm 0,25V$ , tedy  $25\%$  z měřené hodnoty !!!
- Někdy je také udávána jako % z měřené/zobrazované hodnoty (%RD nebo %RDG)
- Pro rozsah  $0$  až  $5V$  je uvedena přesnost  $\pm 5\%$  RD, tedy pro měřenou hodnotu  $1V$  je  $\pm 0,05V$ , avšak pro měřenou hodnotu  $5V$  je nejistota  $\pm 0,25V$

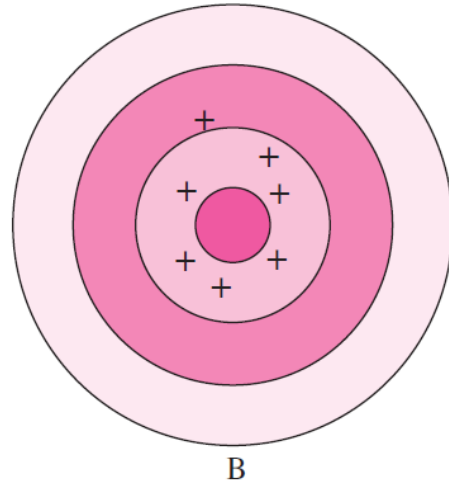
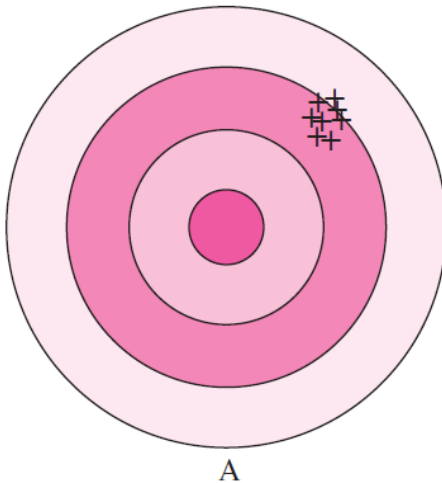
## Přesnost z celkového rozsahu (% FS)



# Přesnost a preciznost

## Preciznost (Precision)

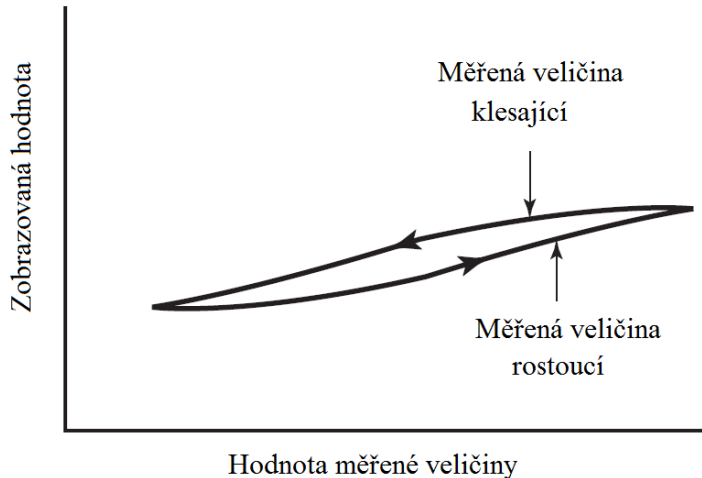
- Charakterizuje náhodnou chybu
- Precizní měření udává jednu a tu samou hodnotu při opakovaném měření
- To neznamená, že je přesné



# Hystereze

## Hystereze (Hysteresis)

- Přesnost je v důsledku hystereze často snížena
- Pro stejnou hodnotu měřené veličiny zobrazuje přístroj 2 různé hodnoty podle toho, jestli měřená veličina před odečtem roste nebo klesá
- Je způsobena účinky tření nebo ohybem vnitřních mechanických částí přístrojů, nebo elektrickou impedancí
- Podle postupu při měření může být náhodnou nebo systematickou (častěji) chybou
- Často je obsažena ve specifikaci celkové přesnosti výrobcem přístroje



# Rozlišení a čitelnost

## Rozlišení (Resolution)

- Většina měřicích přístrojů zobrazuje hodnotu měřené veličiny nespojitě (diskrétně), a to i přesto, že se měřená fyzikální veličina mění spojitě (kontinuálně)
- Právě míra schopnosti přístroje reagovat na malé změny fyzikální veličiny se označuje jako rozlišení
- Obvykle považováno za náhodnou chybu
- Charakter technického řešení přístroje obvykle limituje míru rozlišení
- Většina přístrojů převádí signál z analogové do digitální formy, což do jisté míry klade omezení na rozlišení

## Chyba odečtu (Readability)

- Relevantní pouze u některých přístrojů (analogové), např. klasický rtuťový teploměr
- Jedná se o tzv. chybu odečtu ze stupnice přístroje (lidské oko obvykle nedokáže rozlišit rozměr menší než 0,3 mm)
- Někdy bývá zahrnuta v celkové přesnosti udávané výrobcem

# Nelinearita a chyba nuly

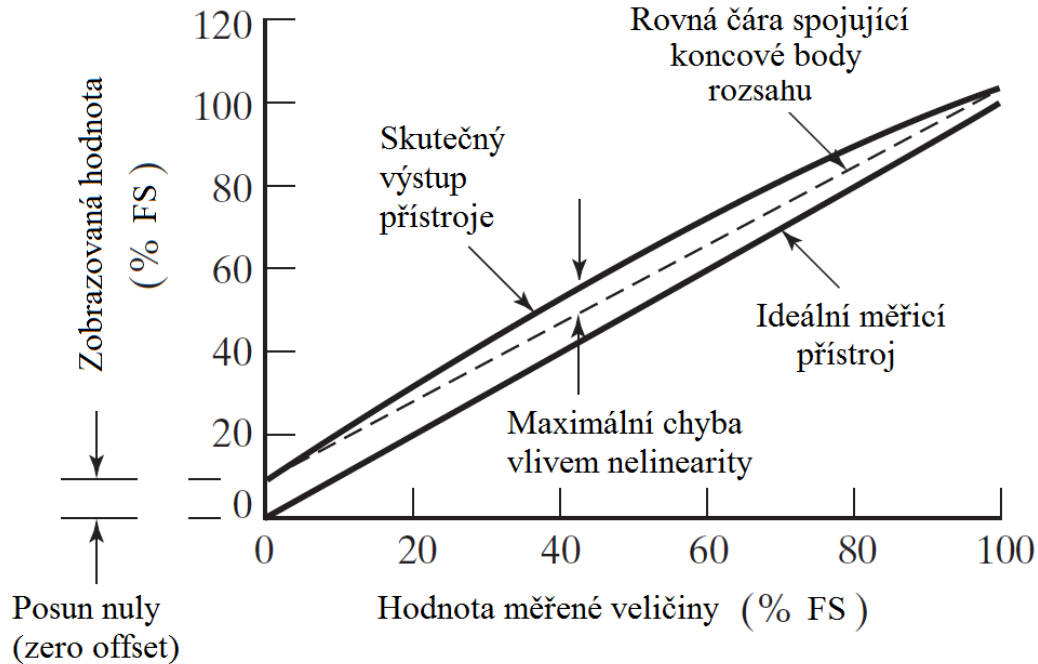
## **Nelinearita (Nonlinearity)**

- Je žádané, pokud přístroj vykazuje lineární chování při měření (není to samozřejmostí)
- Pokud si jsme jisti, že se přístroj chová lineárně, je to výhodné pro jeho kalibraci, protože stačí provést kontrolu pouze ve 2 bodech na daném rozsahu
- Přístroj vykazující vysoce nelineární závislost musí být kalibrován v několika bodech na daném rozsahu v závislosti na požadované přesnosti
- Spadá do systematických chyb
- Udávaná chyba vlivem nelinearity je obvykle maximální rozdíl mezi rovnou čarou spojující koncové body rozsahu a zobrazovaným výstupem přístroje
- Obvykle udávána ve formě % z celkového rozsahu nebo rozpětí přístroje

## **Chyba nebo posun nuly (Zero offset)**

- Většina měřicích přístrojů má na zvoleném rozsahu nulový bod (někdy též referenční bod)
- Pokud přístroj v nezátíženém stavu neukazuje tuto referenční hodnotu (nulu), jedná se o tzv. chybu nebo posun nuly (systematická chyba)
- Výrobce obvykle udává celkovou přesnost za předpokladu správně nastavené nuly

## Nelinearita a chyba nuly (2)



# Citlivost a opakovatelnost

## Citlivost (Sensitivity)

- Velice důležitá vlastnost měřicího přístroje (systematická chyba)
- Vyjadřuje jeho schopnost reagovat na změny měřené fyzikální veličiny
- Chyba v citlivosti (sensitivity error) ovlivní celkové rozpětí přístroje, což může mít za následek vznik chyby rozpětí (span error)
- V případě lineárních přístrojů je citlivost konstantní v celém rozsahu

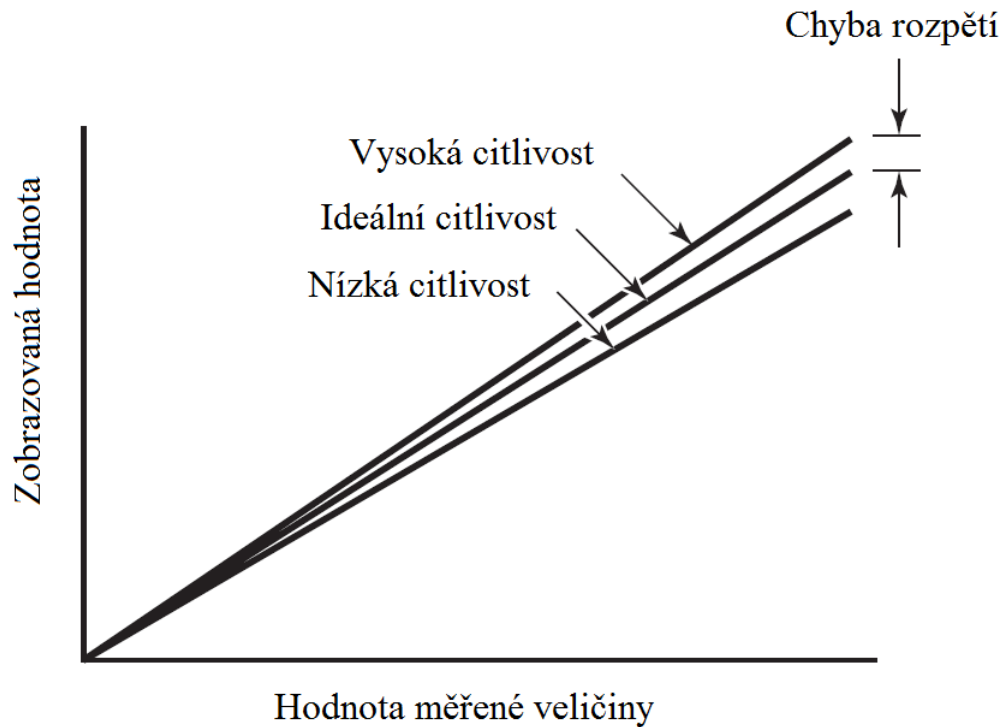
$$\text{citlivost} = \frac{d(\text{výstup})}{d(\text{vstup})} \approx \frac{\Delta \text{výstup}}{\Delta \text{vstup}} \quad (1)$$

## Opakovatelnost (Repeatability)

- Schopnost dostávat stále jednu a tu samou hodnotu při opakování naprosto shodného měření
- Neschopnost získat stejnou hodnotu je chyba vlivem opakovatelnosti (náhodná)
- Neplést s hysterezí, ta je samostatnou chybou
- Především je spojena s ostatními nekontrolovatelnými faktory, než s přístrojem jako takovým



## Citlivost a chyba rozpětí



# Drift a teplotní stabilita

## **Nestálost (Drift)**

- Měřicí přístroj může postupně s časem zobrazovat odlišné hodnoty při měření stejné hodnoty fyzikální veličiny, a to i přesto, že se podmínky okolního prostředí téměř nezměnily
- Nežádoucí vlastnost

## **Teplotní stabilita (Thermal stability)**

- Měřicí přístroje jsou citlivé na změny teplot okolí
- Jedná se o dodatečnou chybu k již uvedeným chybám (posun nuly, nelinearita, ...)
- Drift ani teplotní stabilita nejsou obvykle součástí výrobce uváděné celkové přesnosti přístroje, avšak výrobce často uvádí dodatečné informace, které slouží jako podklad ke stanovení celkové náhodné nejistoty přístroje pracujícího za určitých podmínek (vždy důkladně nastudovat pokyny výrobce měřicího přístroje!)

## Kalibrace měřicího přístroje

- Každý měřicí přístroj vyžaduje čas od času kalibraci (nové přístroje kalibrovány obvykle výrobcem)
- Pro kalibraci je nutné znát „skutečné“ hodnoty měřené fyzikální veličiny
- Kalibrace je prováděna pro ty hodnoty fyzikální veličiny, které mohou být určeny nezávisle na kalibrovaném přístroji
- Získání těchto hodnot se provádí pomocí zavedených standardů/etalonů (spolehlivější, méně praktické) nebo přesnějších měřicích přístrojů o známé přesnosti (praktičtější, méně spolehlivé)
- Etalony mohou být primární nebo sekundární (byly někdy v minulosti porovnány s etalonem primárním)
- Různé organizace mají různé předpisy a postupy, např. ISO (International Organization for Standardization), ANSI (American National Standards Institute), ISA (International Society of Automation), ...
- Druhy kalibrace: **Statická** a **Dynamická**

# Základní veličiny SI

Fyzikální veličina	SI jednotka
Hmotnost	kg
Čas	s
Délka	m
Termodynamická teplota	K
Elektrický proud	A
Látkové množství	mol
Svítivost	Cd

## Základní veličiny SI (2)



## Konstanty definující základní veličiny SI

Konstanta	Značení	Numerická hodnota	Jednotka
Frekvence přechodu mezi dvěma hladinami velmi jemného rozštěpení neporušeného základního stavu atomu Cesia-133	$\Delta\nu_{\text{Cs}}$	9 192 631 770	Hz
Rychlost světla ve vakuu	$c$	299 792 458	$\text{m s}^{-1}$
Planckova konstanta	$h$	$6,62607015 \times 10^{-34}$	$\text{J Hz}^{-1}$
Elementární náboj	$e$	$1,602176634 \times 10^{-19}$	C
Boltzmannova konstanta	$k$	$1,380649 \times 10^{-23}$	$\text{J K}^{-1}$
Avogadrova konstanta	$N_{\text{A}}$	$6,02214076 \times 10^{23}$	$\text{mol}^{-1}$
Světelná účinnost (ideální monochromatický zdroj)	$K_{\text{cd}}$	683	$\text{lm W}^{-1}$

# Druhy kalibrace

## Statická kalibrace

- Používá se v případech, kdy se měřená fyzikální veličina s časem nemění nebo jen pomalu a nepatrně
- Přístroj musí být kalibrován v celém měřicím rozsahu (lineární/nelineární)
- Výsledkem je kalibrační křivka (proložení bodů a získání vztahu ve tvaru  $y = y(x)$ )

## Dynamická kalibrace

- Používá se v případech, kdy se měřená fyzikální veličina mění rychle a my se snažíme tyto změny zaznamenat (v takových případech je statická kalibrace nedostačující)
- Obvykle se jedná o komplikovaný proces, jehož přesný postup často závisí na kalibrovaném přístroji a specifické aplikaci
- Často je prováděna výhradně pomocí analytických metod

## Statická kalibrace

- Čas v tomto případě nemá významný vliv na výsledky
- Prvním krokem je získání skutečných (známých) hodnot  $x$  a výstupních (zobrazovaných) hodnot  $y$  z měřicího přístroje = kalibrační křivka ( $y = y(x)$ )
- Kalibrační křivka může být úsečka, parabola, polynom vyšších řádů atd.
- Obvykle je přímá křivka odhadnuta nebo získána lineární regresí
- Skutečné hodnoty jsou voleny v celém rozsahu od minimální hodnoty po maximální s definovaným krokem (např. pro napětí s rozsahem 0 až 5 V volíme krok 0,1 V, tj. hodnoty 0,0 V; 0,1 V; 0,2 V; 0,3 V; .....; 5,0 V)
- Takto je provedeno několik cyklů (nahoru/dolů, zatěžování/odlehčování), např. 5 cyklů
- Na základě získaných hodnot je proveden výpočet dílčích chyb jako je nelinearita, hystereze, opakovatelnost nebo celková přesnost
- Nakonec by měl být proveden odhad příspěvku kalibrace na celkové nejistotě měřicího přístroje (zbytková systematická a náhodná chyba)



## Shrnutí přednášky

- Chyby a charakteristické vlastnosti měřicího přístroje
- Nezbytnost kalibrace měřicího přístroje
- Etalony pro kalibraci
- Druhy kalibrace (statická a dynamická)



Děkuji za pozornost!