



Obečné charakteristiky měřicích systémů

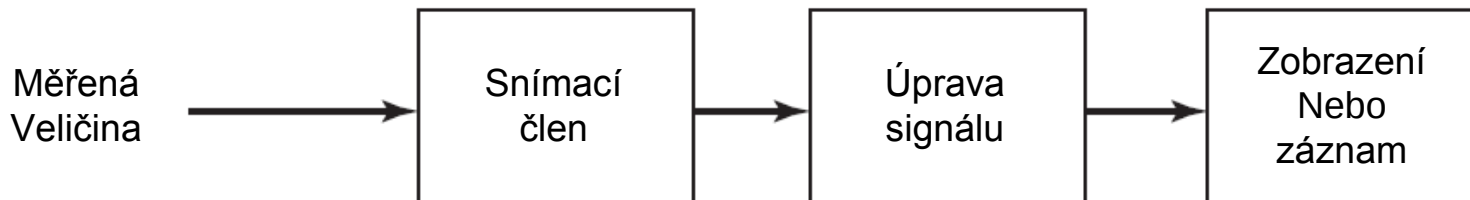
Obsah přednášky

- **Obecný měřicí systém**
- **Platnost měření a jeho základní (statické) charakteristiky**
- **Dynamická měření (obecné charakteristiky)**

Obsecný měřicí systém

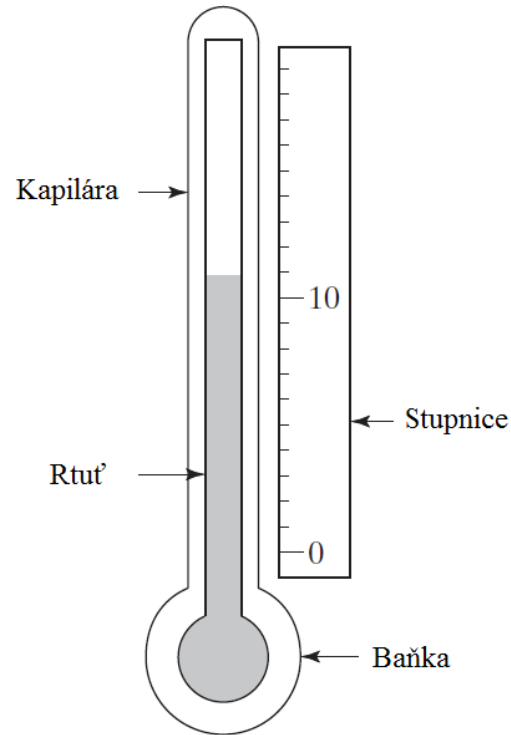
Obecný měřicí systém

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



Oběcný měřicí systém (2)

- Příklad: měření teploty na základě teplotní objemové roztažnosti kapaliny



Platnost měření a jeho základní (statické) charakteristiky

Ověření platnosti (přesnosti, správnosti) měření

- Dokonalé měření neexistuje, **vždy bude nějaká odchylka mezi měřenou a „správnou“ hodnotou**
- Cílem experimentátora je vyhodnotit, jak může být tato odchylka velká a navrhnout metodiky měření
- Obecně většinou **platí, že čím je tato odchylka menší, tím je dražší měřicí přístroj**

Chyba měření a další parametry

- Platnost měření lze určit zavedením specifických parametrů
- **Chybu měření lze definovat jako rozdíl mezi měřenou a správnou hodnotou**

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

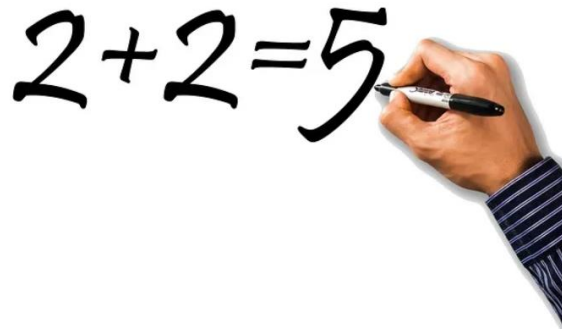
- Skutečnou chybu měření nelze nijak určit, lze pouze sofistikovaně odhadnout tzv. nejistotu měření s určitou pravděpodobností (např. $10 \text{ V} \pm 1 \text{ V}$ na intervalu spolehlivosti 95 %)
- **CHYBA** měření je **rozdíl naměřené a skutečné hodnoty**
- **NEJISTOTA** měření je **interval, ve kterém leží naměřená hodnota s určitou mírou pravděpodobnosti**

Základní typy chyb při měření

- Obvykle rozlišovány pouze 2 základní typy chyb: **náhodné** a **systematické** (stálé)
- Náhodné chyby značíme P (random or precision errors)
- Systematické chyby značíme B (systematic or bias errors)

Základní typy chyb při měření

- Obvykle rozlišovány pouze 2 základní typy chyb: **náhodné** a **systematické** (stálé)
- Náhodné chyby značíme P (random errors)
- Systematické chyby značíme B (systematic errors)
- Občas se uvádí ještě třetí typ, tzv. **hrubé chyby** (nepřípustné!)



Náhodné chyby při měření

- Náhodné chyby značíme P (nejistoty obvykle značíme u_A)
- **Souvisejí s nedostatečným počtem opakování měření**

$$\text{NÁHODNÁ CHYBA} = \text{MĚŘENÁ HODNOTA} - \text{PRŮMĚR}$$

- Průměr by měl být získán z dostatečného počtu měření (doporučeno 30 a více)
- Tento typ chyb může souviset s měřicím přístrojem, celým měřicím systémem nebo také s vlivy okolního prostředí

Náhodné chyby při měření (2)

- Často **způsobeny nekontrolovatelnými vlivy** během měření
- Například výkon zesilovače může být závislý na teplotě (nutno zohlednit)
- Dalším příkladem je vliv elektrického šumu na elektrické měřicí přístroje
- Elektrická a magnetická pole mohou ovlivnit napětí indikované měřicím systémem a tím zkreslovat hodnotu měřené veličiny
- Je snahou minimalizovat výše zmíněné vlivy (uzemnění, odstínění, ...)

Systematické chyby při měření

- Systematické chyby značíme B (nejistoty obvykle značíme u_B)
- Jsou **konzistentní, stálé při opakovaném měření**

$$\text{SYSTEMATICKÁ CHYBA} = \text{PRŮMĚR} - \text{SKUTEČNÁ HODNOTA}$$

- Při opakovaném měření např. měřidlo udává stále o 10 % vyšší hodnotu
- Příkladem je chyba vlivem kalibrace, tzv. **kalibrační chyba**
- Dalším příkladem je ovlivnění měřené veličiny přítomností měřicího přístroje, tzv. **chyba zátěže** (loading error)

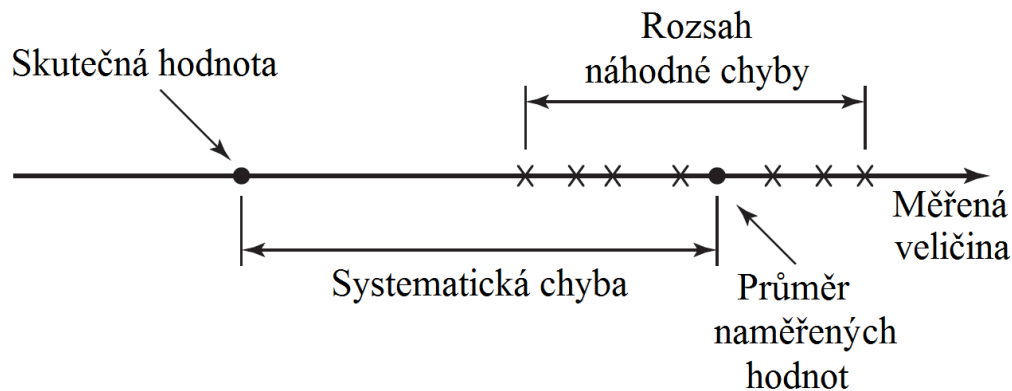
Systematické chyby při měření (2)

- Tento typ chyby může být způsoben také dalšími vlivy (radiace, rozložení v prostoru apod.)
- Tento druh chyb často není zřejmý na první pohled a je obvykle nutné jej určit na základě zkušenosti
- Lze do jisté míry minimalizovat provedením **kalibrace přístroje**, která **by vždy měla předcházet vlastnímu měření!**
- V některých případech lze ošetřit analyticky korekcí naměřených dat

Náhodné a systematické chyby – shrnutí

NÁHODNÁ CHYBA = MĚŘENÁ HODNOTA – PRŮMĚR

SYSTEMATICKÁ CHYBA = PRŮMĚR – SKUTEČNÁ HODNOTA



Obečné (statické) charakteristiky měřicích přístrojů

- **Měřicí rozsah**
- **Rozpětí**
- **(Ne)přesnost**
- **Preciznost**
- **Hystereze**
- **Rozlišení**
- **Čitelnost (chyba odečtu)**
- **Opakovatelnost**
- **(Ne)linearita**
- **Chyba nuly**
- **Citlivost**
- **Nestálost (drift)**
- **Teplotní stabilita**

Měřicí rozsah a rozpětí

- Každý přístroj je navržen tak, aby pracoval optimálně pouze za určitých podmínek a v určitém **měřicím rozsahu** (measuring range) měřené fyzikální veličiny
- Například voltmetr s rozsahem ± 10 V nebude pracovat optimálně při měření hodnoty +15 V nebo -20 V
- **Rozpětí** (span) je rozdíl mezi horní a dolní hodnotou rozsahu
- Například pro voltmetr výše je rozpětí 20 V

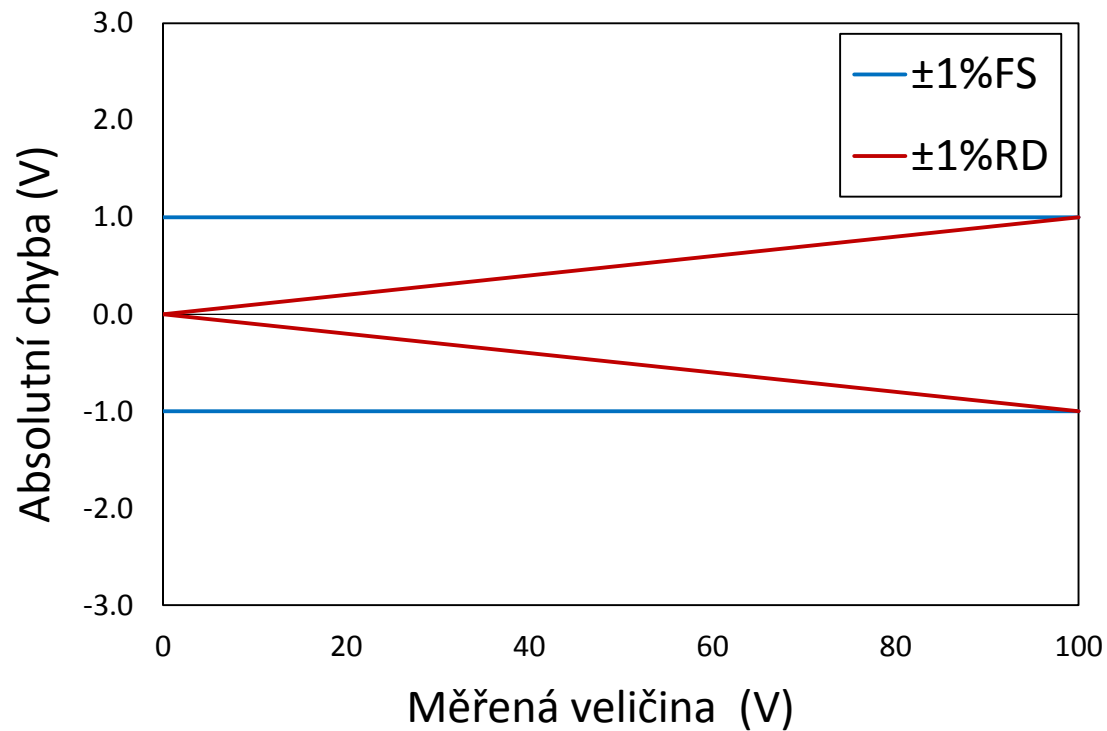
Přesnost

- **Přesnost** (accuracy) je mírou přiblížení se naměřené hodnoty ke „skutečné“ hodnotě
- Často udávána výrobcem přístroje jako tzv. celková přesnost (accuracy)
- Používá se pro stanovení nejistoty měření
- V podstatě se jedná o nepřesnost měřicího přístroje
- Může zahrnovat **linearitu, hysterezi a opakovatelnost** (záleží na výrobci)

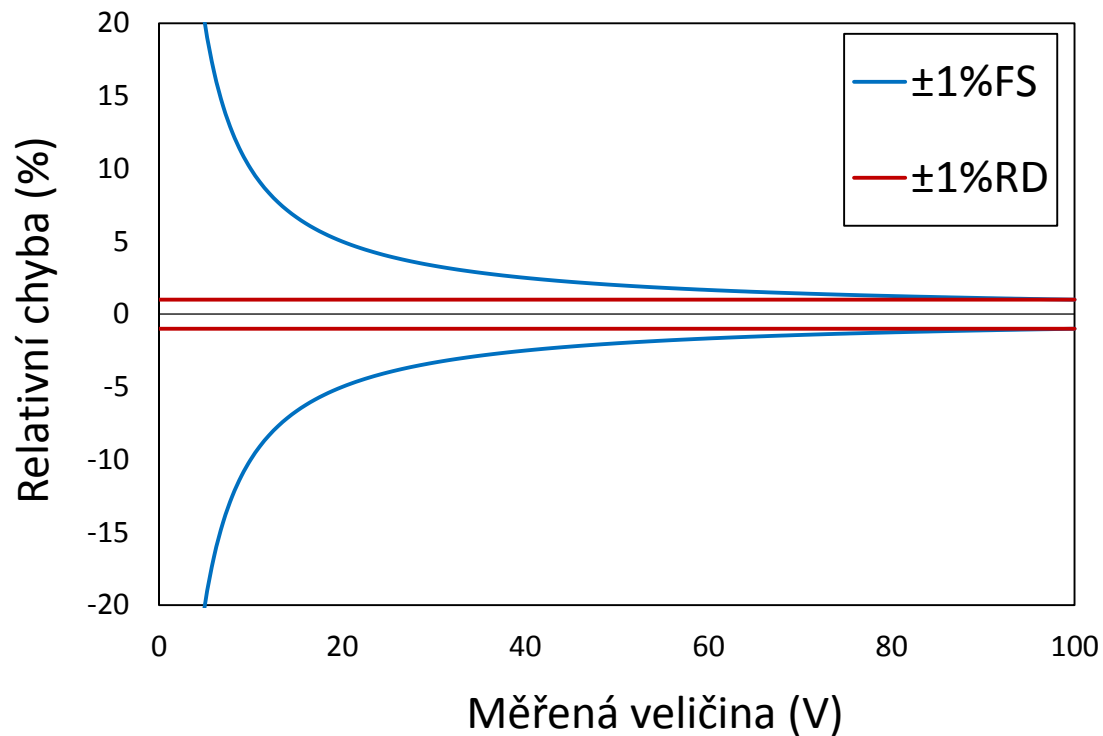
Přesnost (2)

- Je to tzv. zbytková (ne)přesnost pro důkladné kalibraci a správném nastavení přístroje
- Výrobce většinou udává přesnost 2 způsoby: **%FS** nebo **%RD**
- **%FS** (někdy také %FSO) je **přesnost v % z celkového udávaného rozpětí/rozsahu**
- **%RD** nebo (někdy také %RDG) je **přesnost v % z aktuálně naměřené hodnoty**

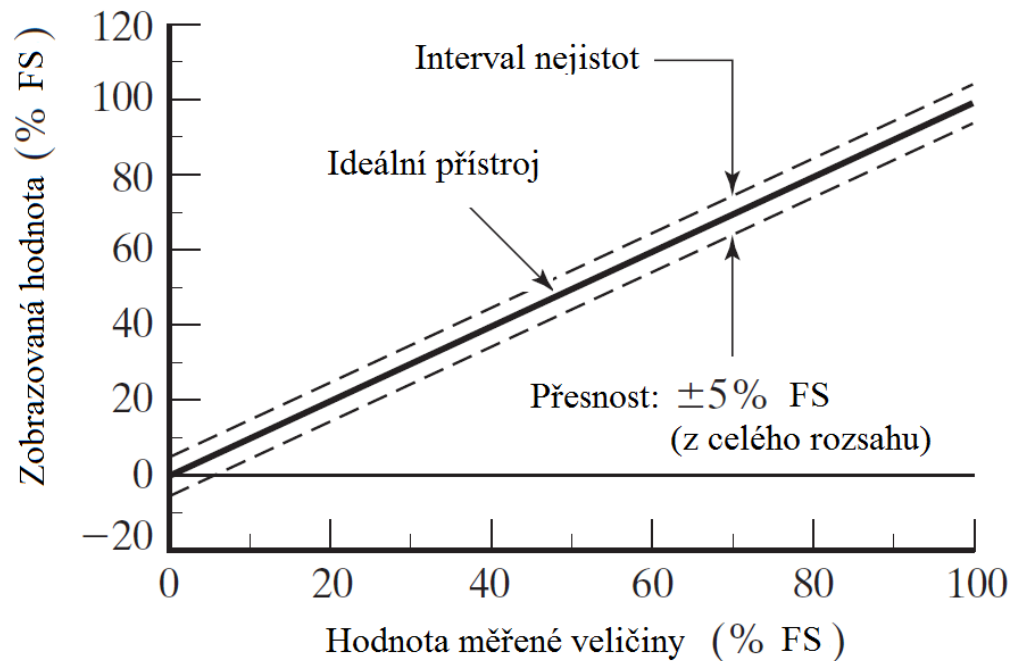
Přesnost (3)



Přesnost (4)



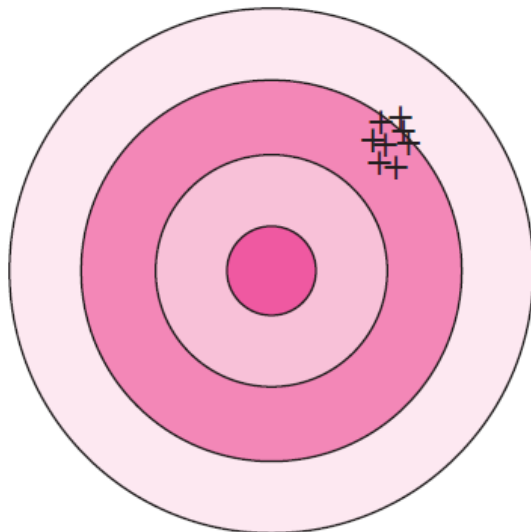
Přesnost (5)



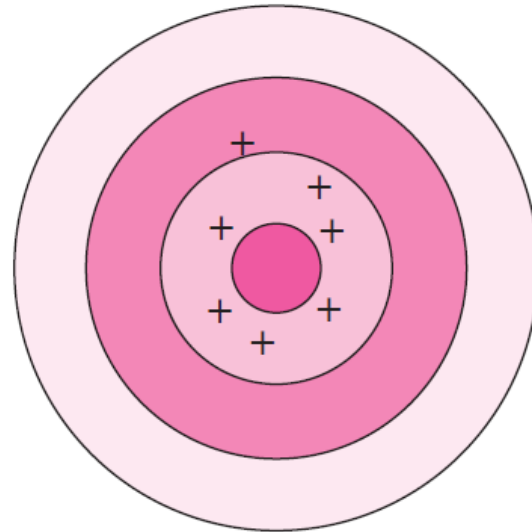
Preciznost

- **Preciznost** (precision) je mírou opakovatelnosti měření a do jisté míry souvisí s náhodnou chybou
- Měření může být precizní, avšak nepřesné (viz příklad dále)
- Spolu s přesností patří mezi dvě nejdůležitější charakteristiky měřicího přístroje

Přesnost vs preciznost

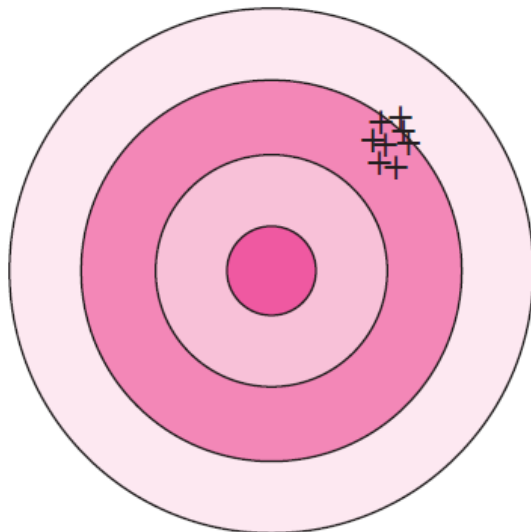


A



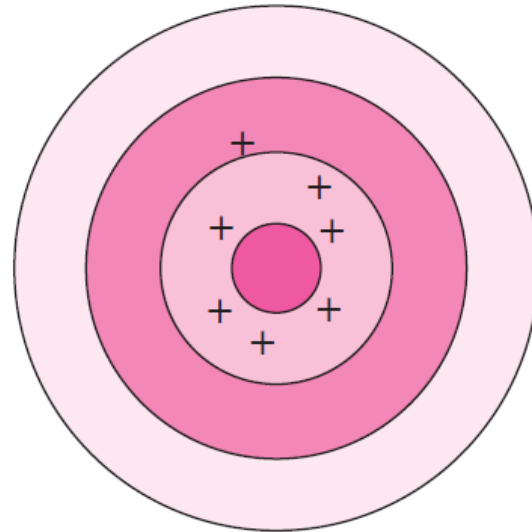
B

Přesnost vs preciznost



A

**Nepřesné
Precizní**



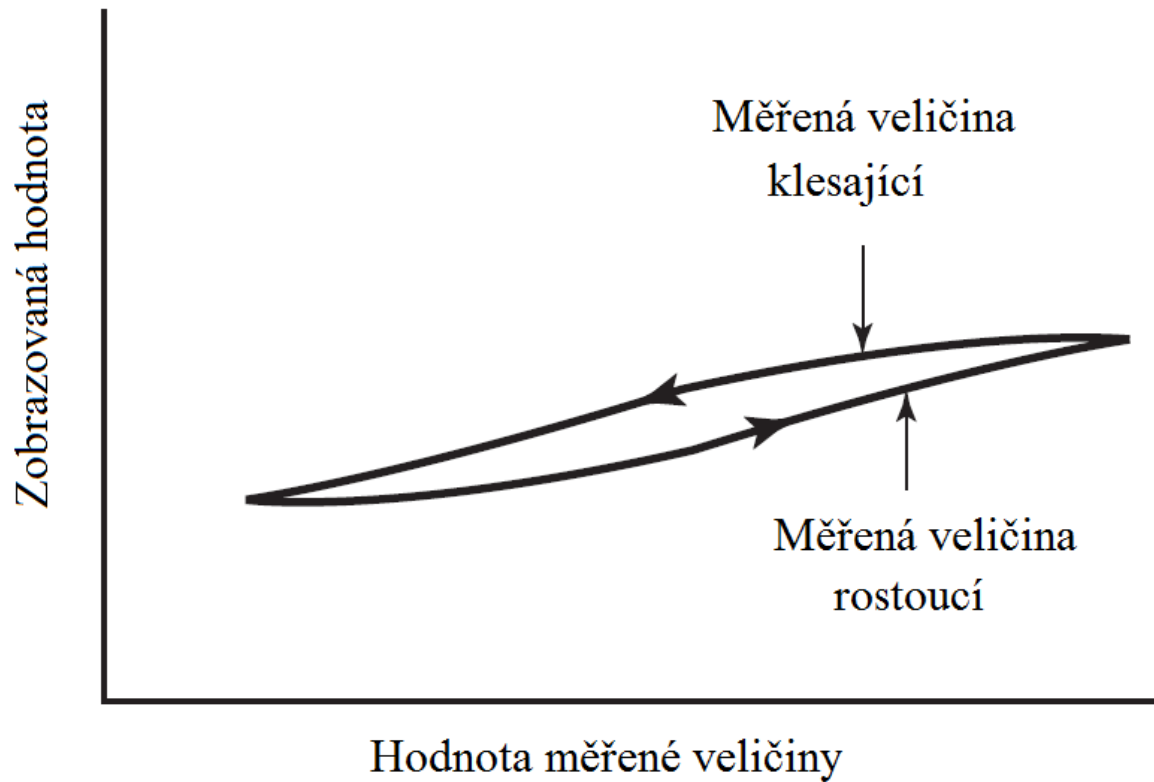
B

**Přesné
Neprecizní**

Hystereze

- Přesnost přístroje je také často degradována jevem zvaným **hystereze**, tj. chyba vlivem hystereze (hysteresis error)
- Projevuje se tím, že **přístroj ukazuje odlišnou hodnotu v závislosti na tom, jestli měřená veličina těsně před odečtem rostla nebo klesala**
- Způsobena např. vnitřním třením, mechanickým opotřebením, nebo elektrickou kapacitou přístroje
- **Často nelze rozlišit, jestli se jedná o náhodnou či systematickou chybu**
- Obvykle je již obsažena ve výrobcem uváděné celkové přesnosti (accuracy)

Hystereze (2)

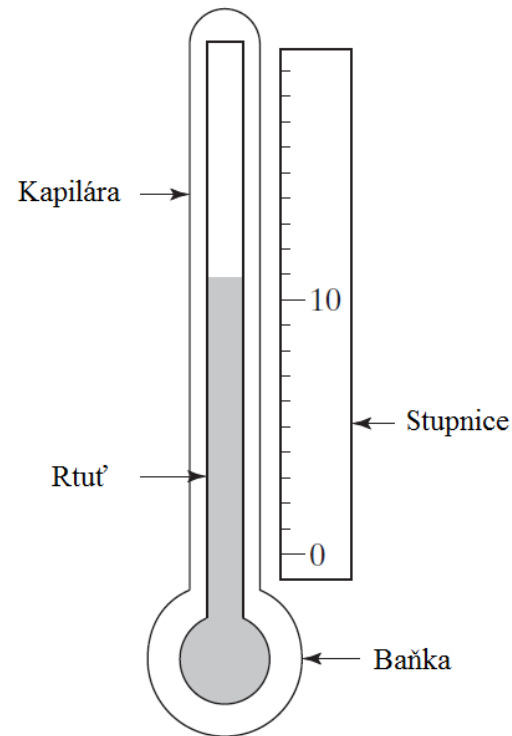


Rozlišení

- I přesto, že se může měřená veličina měnit spojitě, měřicí přístroj může zaznamenávat tyto změny pouze v určitých diskretních krocích
- Neschopnost přístroje reagovat na změny měřené veličiny je označována jako **chyba rozlišení** (resolution error)
- **Obvykle patří do náhodných chyb**
- Rozlišení je limitováno konstrukčním uspořádáním přístroje a fyzikálním principem na jehož základě přístroj pracuje
- Záleží také na druhu přístroje (analogový, digitální)

Čitelnost (chyba odečtu)

- Relevantní pro analogové měřicí přístroje
- Především se jedná o čitelnost stupnice přístroje apod.
- Například na rtuťovém teploměru odpovídá 1 dílek jednomu stupni Celsia (1°C)
- Lze přibližně odhadnout nejistotu čtení $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ (1 dílek rozdělíme na 2 stejné dílky)
- Nejistotu lze prakticky ještě snížit, pouhým okem můžeme provést rozdělení dílku např. na 5 stejných dílků, nejistota čtení je pak $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$



Opakovatelnost

- Jedná se o schopnost přístroje produkovat jednu a tu samou hodnotu při opakovaných měřeních
- Neschopnost přístroje produkovat tutéž hodnotu pro stejné hodnoty měřené veličiny je označována jako **chyba opakovatelnosti** (repeatability error)
- Souvisí s náhodnou chybou přístroje
- Obvykle je již obsažena ve výrobcem uváděné celkové přesnosti (accuracy)
- Jedná se o jiný druh chyby než je hystereze!

Linearita

- Je žádoucí, ale ne vždy je možné, aby vztah mezi vstupem a výstupem měřidla měl lineární závislost
- Změna zobrazované hodnoty na přístroji je pak přímo úměrná změně měřené fyzikální veličiny
- Lineární závislost značně zjednodušuje proces kalibrace přístroje
- Při lineárním chování přístroje lze kalibraci provést pouze 2 body
- V případě nelineárních přístrojů je nutné provést kalibraci pro více bodů

Linearita (2)

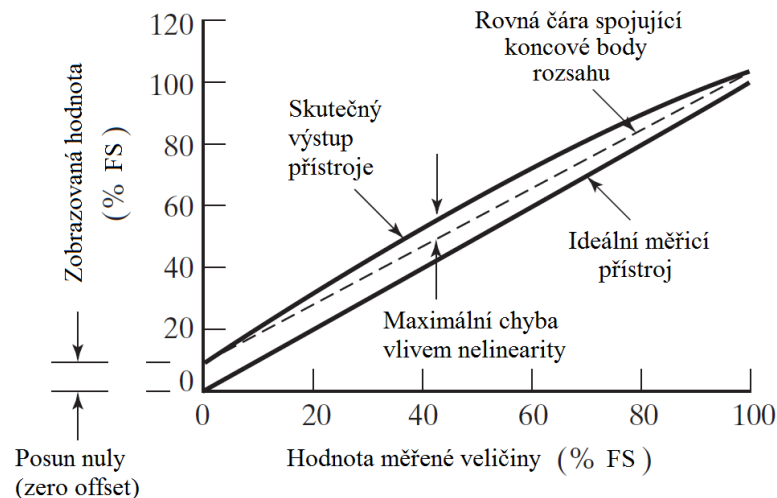
- Odchylka skutečně zobrazované hodnoty od hodnoty, kterou by přístroj zobrazoval, pokud by byl dokonale „lineární“ je označována jako **chyba (ne)linearity** (linearity error)
- Obvykle udávána maximální chyba (ne)linearity
- Často je již obsažena ve výrobcem uváděné celkové přesnosti (accuracy), především společně s hysterezí a opakovatelností
- Udávána jako %FS, tedy % z celkového rozpětí

Chyba nuly

- **Chyba** nebo také **posun nuly** (zero offset)
- Většina měřicích přístrojů má na zvoleném rozsahu nulový bod (někdy též referenční bod)
- Pokud přístroj v nezatíženém stavu neukazuje tuto referenční hodnotu (nulu), jedná se o tzv. chybu nuly (systematická chyba)
- Výrobce obvykle udává celkovou přesnost za předpokladu správně nastavené nuly, tedy **není zahrnuta v celkové přesnosti udávané výrobcem!**

Chyba nuly (2)

- Výrobce může udávat také maximální očekávanou chybu nuly (zero balance)
- **Vždy by měla být ověřena před započítím měření**
- Velké výkyvy mohou znamenat poškozený přístroj



Citlivost

- Je definována jako poměr mezi změnou výstupu ku změně vstupu

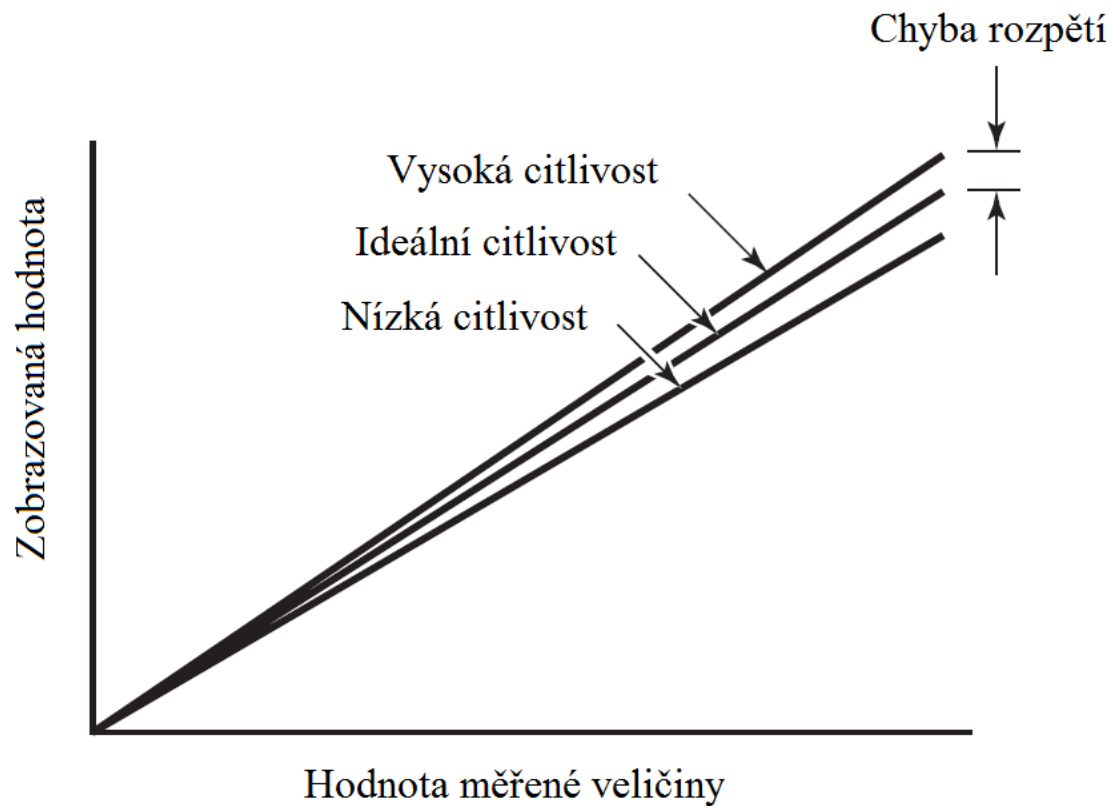
$$\text{citlivost} = K = \frac{d(\text{výstup})}{d(\text{vstup})} \approx \frac{\Delta \text{výstup}}{\Delta \text{vstup}} = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

- Říkám vám tedy jak se změní zobrazovaná hodnota na přístroji (pokud vůbec), když se změní hodnota měřené veličiny
- Například pro rtuťový teploměr se jedná o změnu výšky rtuťového sloupce při změně teploty o 1 °C
- Pro „lineární“ přístroje je konstantní v celém rozsahu přístroje
- Je důležitou, avšak omezující charakteristikou u mechanických měřicích přístrojů

Citlivost (2)

- V případě přístrojů s elektrickým výstupem lze do určité míry zvýšit použitím zesilovače signálu
- U elektrických přístrojů mohou nastat další omezující faktory, např. poměr signálu k šumu (signal-to-noise ratio)
- Citlivost se získává při kalibraci přístroje (**chyba vlivem citlivosti**)
- Patří do skupiny systematických chyb a má vliv na chybu rozpětí (span error)
- Používáme také parametr **práh citlivosti**

Citlivost (3)



Teplotní stabilita a nestálost

- Měřicí přístroj může postupně s časem zobrazovat odlišné hodnoty při měření stejné hodnoty fyzikální veličiny, a to i přesto, že se podmínky okolního prostředí nezměnily
- Souvisí se stárnutím a degradací materiálů ze kterých je přístroj vyroben
- Jedná se o určitou nestabilitu v přesnosti naměřených hodnot
- Tuto nežádoucí vlastnost nazýváme **nestálost** nebo také **drift**



Teplotní stabilita a nestálost (2)

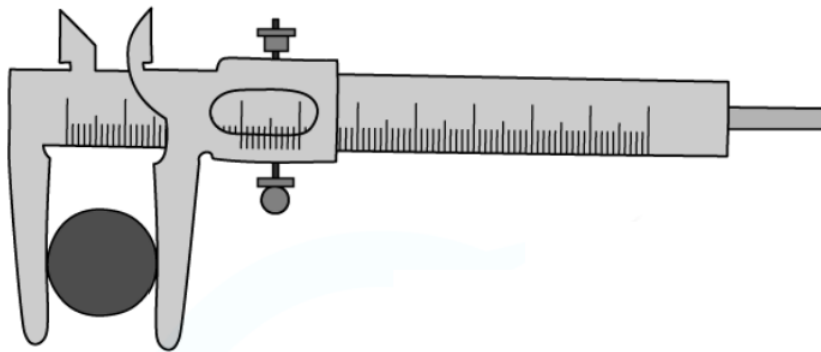
- Některé přístroje jsou citlivé na změny okolní teploty
- Tuto opět nežádoucí vlastnost nazýváme **teplotní stabilita** (thermal stability)
- Teplotní stabilita ani drift obvykle **NEJSOU** obsaženy ve výrobcem uváděné celkové přesnosti, a chybu měření vlivem těchto vlastností je nutné vždy dopočítat (jsou-li významné)

Kalibrace měřicích přístrojů

- Kalibraci etalonů a pracovních měřidel zajišťuje Český metrologický institut (ČMI) nebo specializované kalibrační laboratoře
- Dle závislosti měřené veličiny na čase rozlišujeme 2 základní druhy kalibrace:

1) Statická kalibrace

2) Dynamická kalibrace



Statická kalibrace

- Použití pro fyzikální veličiny, které se s časem nemění nebo se mění velmi pomalu
- Principem je **porovnání aktuální zobrazované hodnoty měřicím přístrojem se „skutečnou“** a „správnou“ hodnotou měřené fyzikální veličiny
- Musí být volen dostatečně velký počet hodnot měřené veličiny, aby byl přístroj kalibrován v celém rozsahu (nebo jeho požadované části)
- Využití primárních a sekundárních etalonů, stanovených měřidel (Vyhláška č. 345/2002 Sb.)

Statická kalibrace (2)

- Postup při provádění kalibrace měřidla není sjednocen, obvykle lze provést podle normy, např. ISO, ANSI, ISA, ...
- Obecný (zjednodušený) postup při statické kalibraci měřidla:
 - 1) ***Záznam zobrazovaných hodnot jako funkce „správných“ hodnot měřené veličiny***
 - 2) ***Získání kalibrační křivky nebo korelační funkce (lineární, nelineární, ...)***
 - 3) ***Určení důležitých statických parametrů***
 - 4) ***Odhad celkové nejistoty kalibrovaného přístroje***

Statická kalibrace (3)

- Při kalibraci se obvykle postupuje směrem od minimální hodnoty do maximální hodnoty rozsahu/rozpětí
- Takto se provede **několik úplných cyklů**
- Hodnoty se obvykle začínají zaznamenávat až po nějaké době, aby se přístroj tzv. „zahřál“
- Dle předem zvolené metodiky se pak z naměřených hodnot **vyhodnocuje chyba vlivem nonlinearity, hystereze, opakovatelnosti a odhad celkové přesnosti**
- Postup kalibrace nemusí vždy odpovídat postupu při reálném používání měřicího přístroje, ale je to preferováno

Statická kalibrace - Příklad

- Pružinová váha



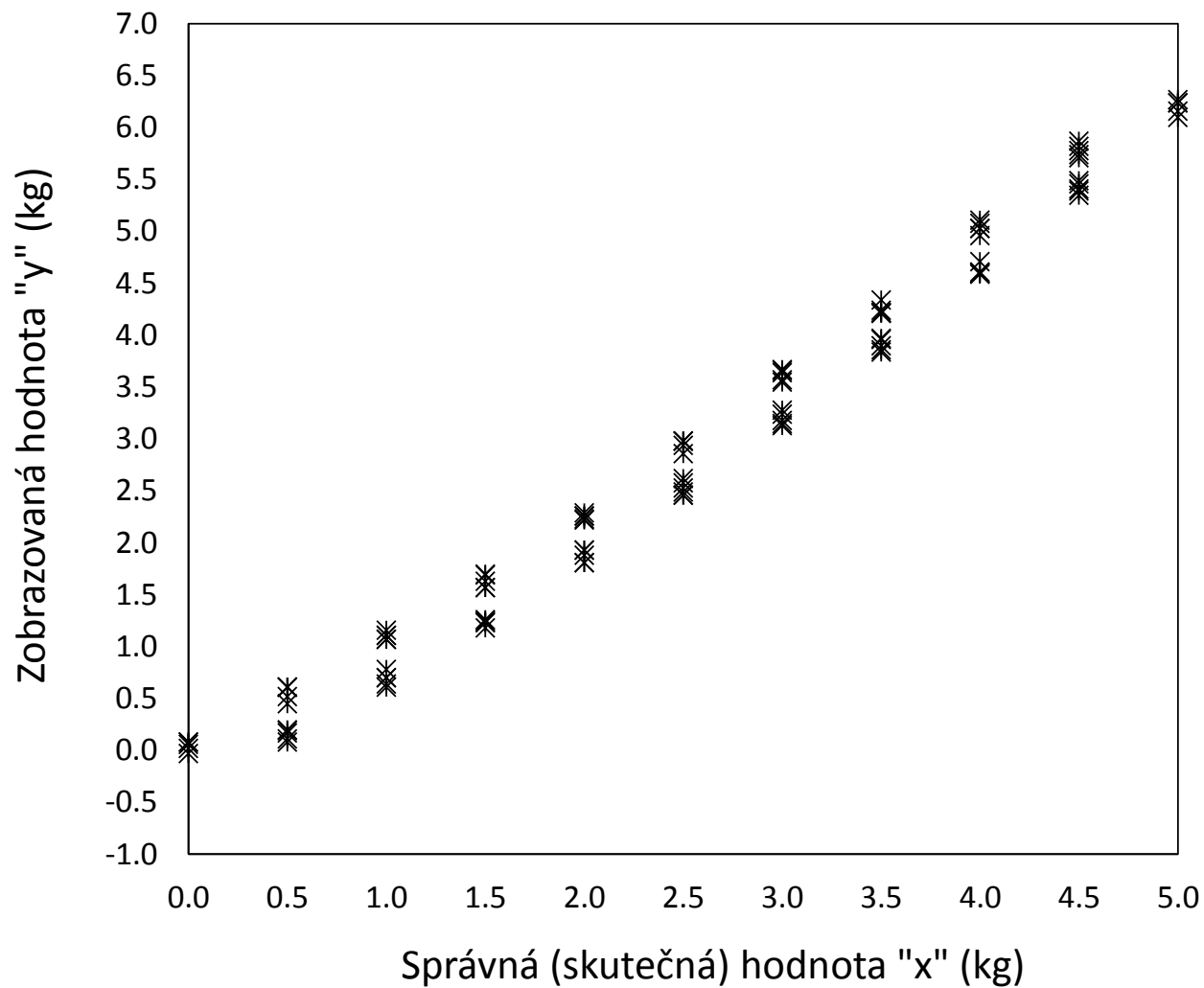
Statická kalibrace – Příklad (2)

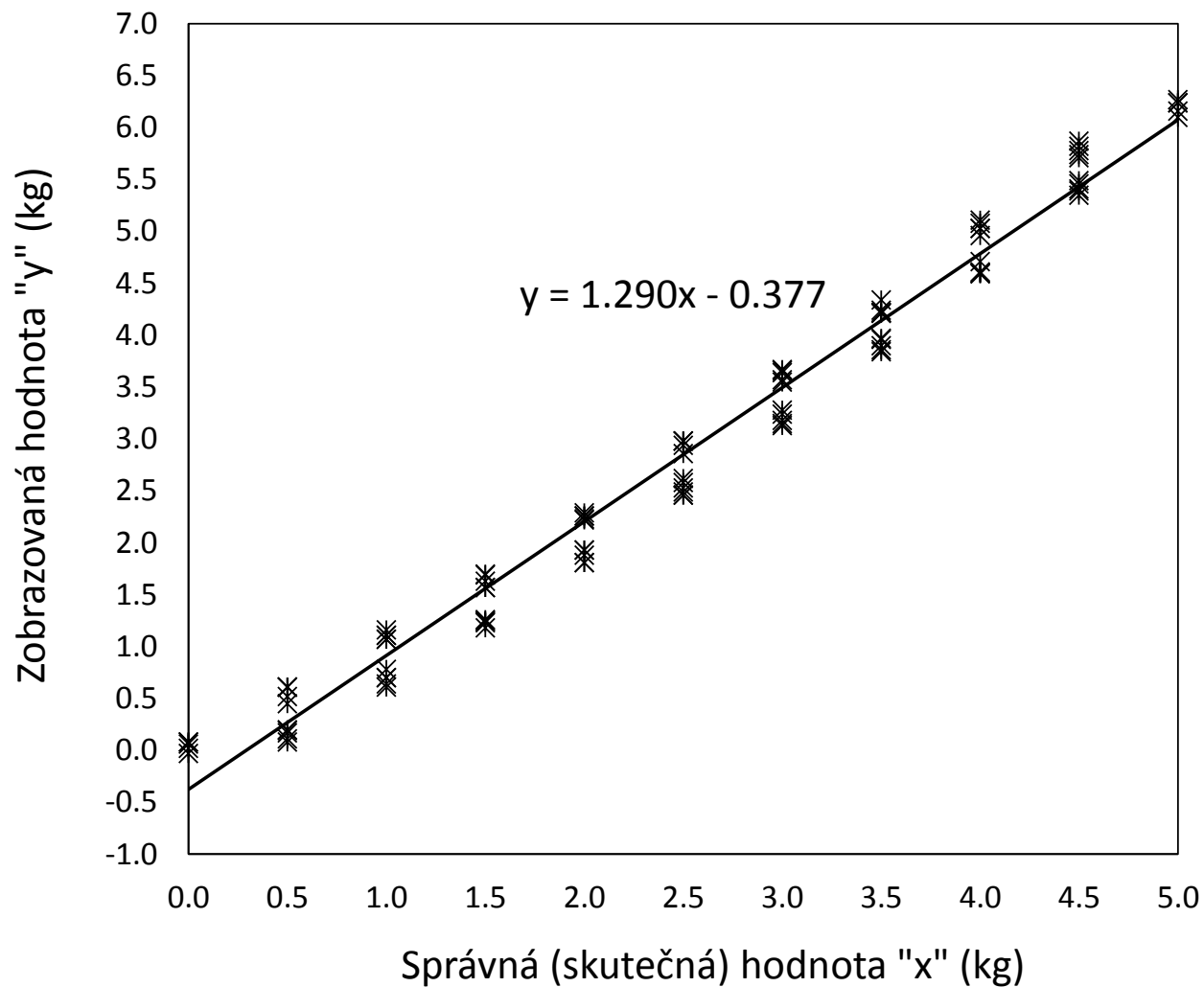
- Pružinová váha – kalibrace na rozsahu 0 – 5 kg



Kalibrační data (Pružinová váha)

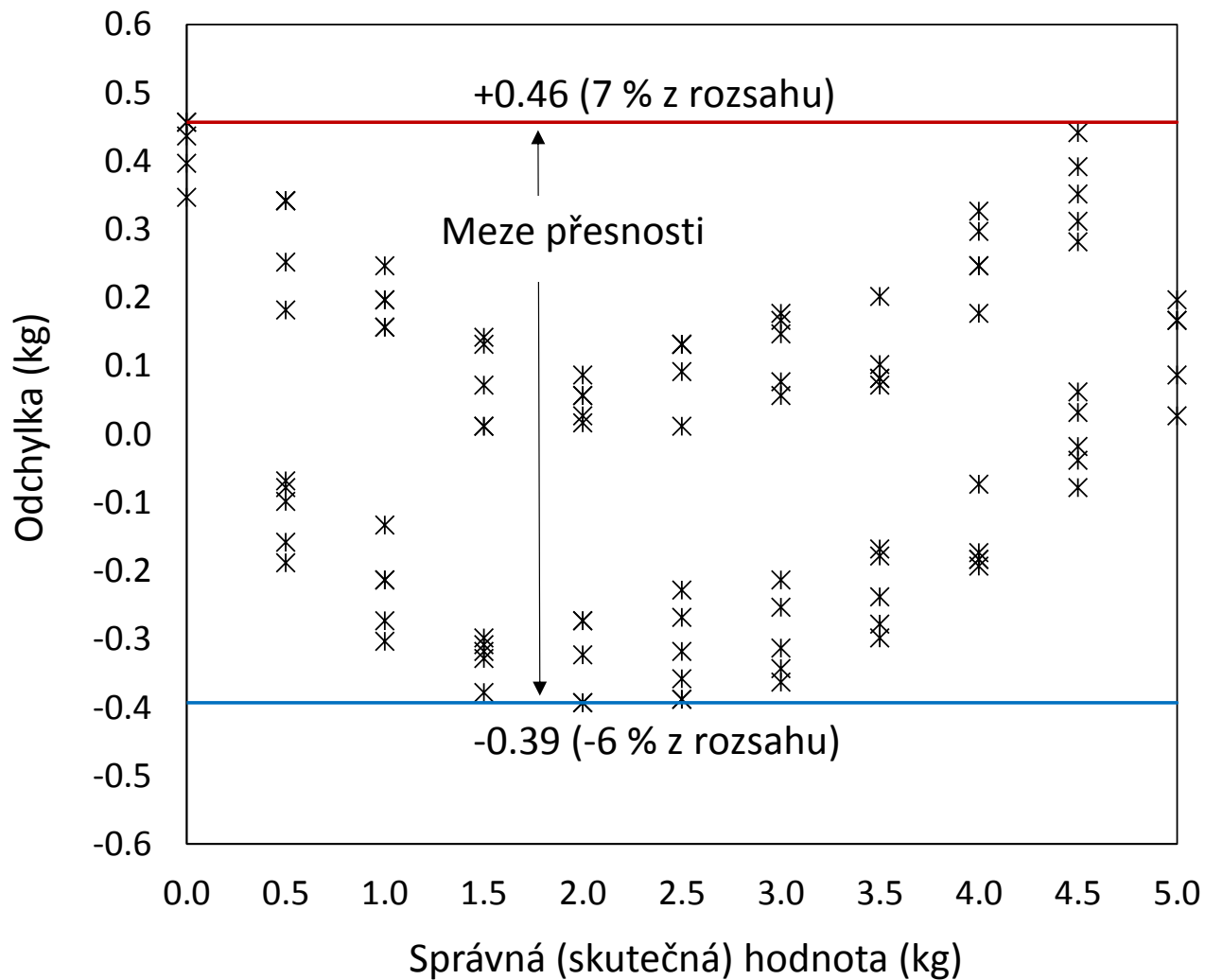
Skutečná hodnota		Zobrazovaná hodnota (kg)					
	(kg)	Cyklus 1	Cyklus 2	Cyklus 3	Cyklus 4	Cyklus 5	Cyklus 6
Zátěž "nahoru"	0.5		0.20	0.08	0.17	0.19	0.11
	1.0		0.70	0.78	0.64	0.61	0.70
	1.5		1.18	1.26	1.25	1.24	1.23
	2.0		1.81	1.93	1.81	1.93	1.88
	2.5	2.62	2.49	2.46	2.46	2.58	2.53
	3.0	3.15	3.18	3.24	3.28	3.13	
	3.5	3.90	3.84	3.86	3.97	3.96	
	4.0	4.59	4.71	4.61	4.60	4.60	
	4.5	5.41	5.35	5.49	5.46	5.39	
	5.0	6.24	6.27	6.10	6.24	6.16	
Odlehčení "dolů"	4.5	5.71	5.74	5.78	5.87	5.82	
	4.0	4.96	5.11	5.08	5.03	5.03	
	3.5	4.22	4.34	4.21	4.22	4.24	
	3.0	3.57	3.64	3.66	3.55	3.67	
	2.5	2.98	2.86	2.98	2.98	2.94	
	2.0	2.22	2.23	2.26	2.29	2.26	
	1.5	1.57	1.70	1.69	1.63	1.57	
	1.0	1.07	1.07	1.11	1.16	1.11	
	0.5	0.52	0.61	0.61	0.61	0.45	
	0.0	0.02	0.08	0.08	-0.03	0.06	

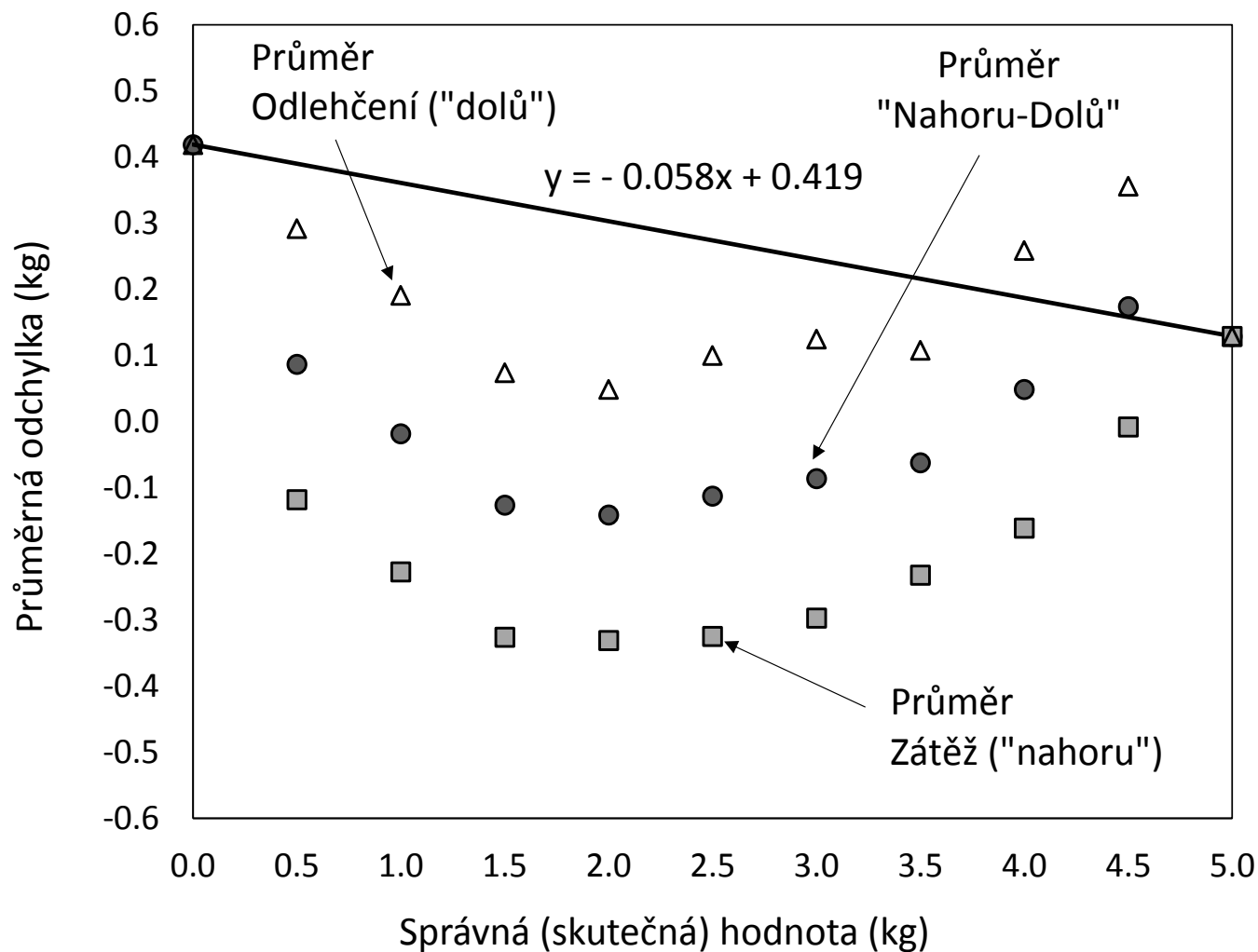




Odchyly (Pružinová váha)

Skutečná hodnota (kg)	Odchyly (kg)						Průměr z cyklů	Průměr nahoru-dolů	Opakování
	Cyklus 1	Cyklus 2	Cyklus 3	Cyklus 4	Cyklus 5	Cyklus 6			
0.0								0.42	
0.5		-0.07	-0.19	-0.10	-0.08	-0.16	-0.12	0.09	0.12
1.0		-0.21	-0.13	-0.27	-0.30	-0.21	-0.23	-0.02	0.17
1.5		-0.38	-0.30	-0.31	-0.32	-0.33	-0.33	-0.13	0.08
2.0		-0.39	-0.27	-0.39	-0.27	-0.32	-0.33	-0.14	0.12
2.5	-0.23	-0.36	-0.39	-0.39	-0.27	-0.32	-0.32	-0.11	0.16
3.0	-0.34	-0.31	-0.25	-0.21	-0.36		-0.30	-0.09	0.15
3.5	-0.24	-0.30	-0.28	-0.17	-0.18		-0.23	-0.06	0.13
4.0	-0.19	-0.07	-0.17	-0.18	-0.18		-0.16	0.05	0.12
4.5	-0.02	-0.08	0.06	0.03	-0.04		-0.01	0.17	0.14
5.0	0.17	0.20	0.03	0.17	0.09		0.13	0.13	0.17
4.5	0.28	0.31	0.35	0.44	0.39		0.36		0.16
4.0	0.18	0.33	0.30	0.25	0.25		0.26		0.15
3.5	0.08	0.20	0.07	0.08	0.10		0.11		0.13
3.0	0.08	0.15	0.17	0.06	0.18		0.13		0.12
2.5	0.13	0.01	0.13	0.13	0.09		0.10		0.12
2.0	0.02	0.03	0.06	0.09	0.06		0.05		0.07
1.5	0.01	0.14	0.13	0.07	0.01		0.07		0.13
1.0	0.16	0.16	0.20	0.25	0.20		0.19		0.09
0.5	0.25	0.34	0.34	0.34	0.18		0.29		0.16
0.0	0.40	0.46	0.46	0.35	0.44		0.42		0.11





Statická kalibrace – Výsledky

- **Odhad celkové systematické nejistoty** -0.33 kg (-5.1 %) a +0.42 (+6.5 %)
- **Odhad celkové náhodné nejistoty** ± 1.3 % (opakovatelnost)

Statická kalibrace – Výsledky

- **Odhad celkové systematické nejistoty** -0.33 kg (-5.1 %) a +0.42 (+6.5 %)
- **Odhad celkové náhodné nejistoty** ± 1.3 % (opakovatelnost)
- Doporučení pro snížení určených nejistot:

Statická kalibrace – Výsledky

- **Odhad celkové systematické nejistoty** -0.33 kg (-5.1 %) a +0.42 (+6.5 %)
- **Odhad celkové náhodné nejistoty** ± 1.3 % (opakovatelnost)
- Doporučení pro snížení určených nejistot:
 - 1) *Použití nelineární korelační funkce*

Statická kalibrace – Výsledky

- **Odhad celkové systematické nejistoty** -0.33 kg (-5.1 %) a +0.42 (+6.5 %)
- **Odhad celkové náhodné nejistoty** ± 1.3 % (opakovatelnost)
- Doporučení pro snížení určených nejistot:
 - 1) *Použití nelineární korelační funkce*
 - 2) *Určení samostatné nejistoty pro jednotlivé intervaly rozsahu*

Dynamická měření (obecné charakteristiky)

Dynamická měření

- Obecně dochází k tomu, že se měřená fyzikální veličina s časem mění a měřicí přístroj nezobrazuje její okamžitou hodnotu
- V takových případech se jedná o dynamická měření a je nutné uvažovat další specifické (dynamické) charakteristiky přístrojů a zohlednit je při kalibraci (dynamická kalibrace)
- Dynamické charakteristiky nezávisí pouze na měřicím přístroji, ale také na způsobu provádění měření, okolním prostředí apod.
- I přesto výrobci mohou uvádět parametry, které je nutné brát v úvahu při dynamickém měření

Dynamické charakteristiky měřicích přístrojů

- Časová konstanta
- Reakční doba (rychlost odezvy)
- Doba (čas) náběhu
- Doba (čas) ustálení
- Vlastní frekvence
- Přechodová odezva
- Frekvenční odezva

Dynamické systémy dle řádu diferenciální rovnice

- Dynamická měření dělíme dle jejich odezvy na:

1) Systémy Nultého řádu

$$a_0 y = b_0 x$$

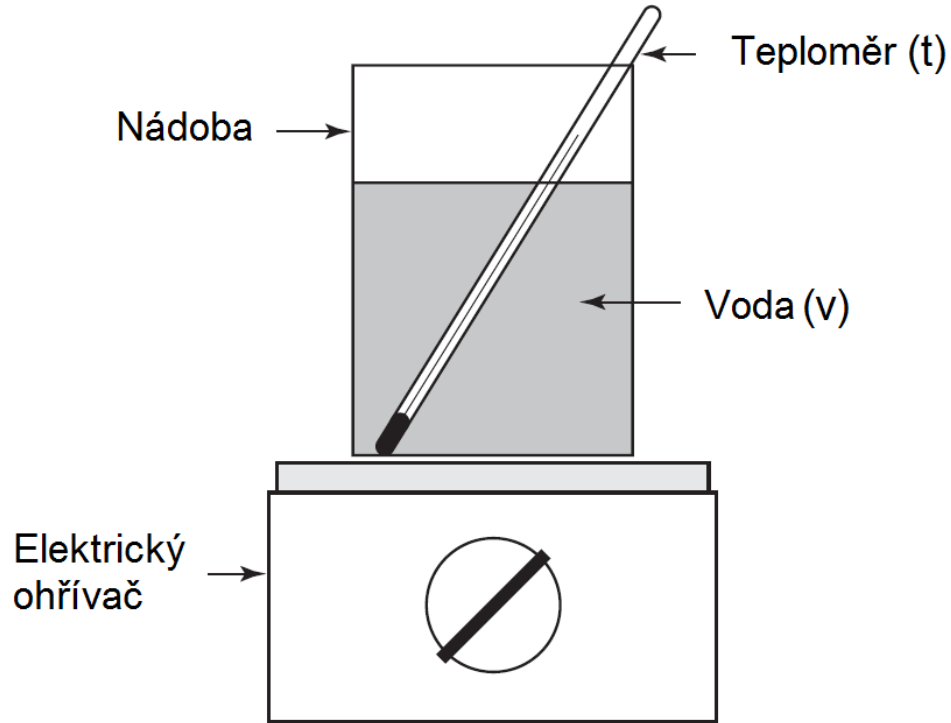
2) Systémy Prvního řádu

$$a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x$$

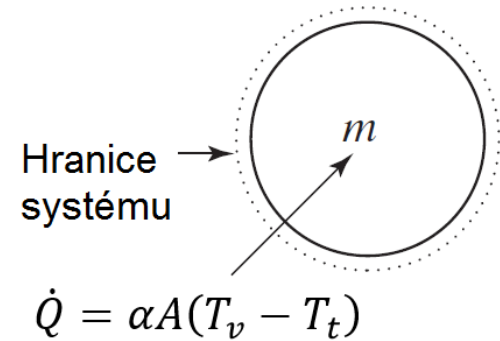
3) Systémy Druhého řádu

$$a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x$$

Dynamická měření – příklad



(a)



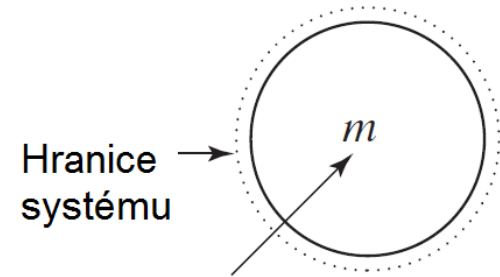
Baňka teploměru = systém

(b)

Dynamická měření – příklad (2)

$$\dot{Q} = \alpha A(T_v - T_t) = mc \frac{dT_t}{dt}$$

$$(T_v - T_t) = \frac{mc}{\alpha A} \frac{dT_t}{dt} = \tau \frac{dT_t}{dt}$$



$$\dot{Q} = \alpha A(T_v - T_t)$$

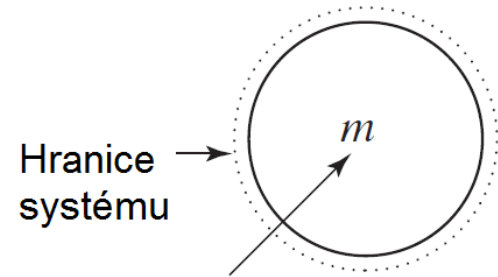
Baňka teploměru = systém

Dynamická měření – příklad (3)

$$\dot{Q} = \alpha A (T_v - T_t) = mc \frac{dT_t}{dt}$$

$$(T_v - T_t) = \frac{mc}{\alpha A} \frac{dT_t}{dt} = \tau \frac{dT_t}{dt}$$

Časová konstanta (s)

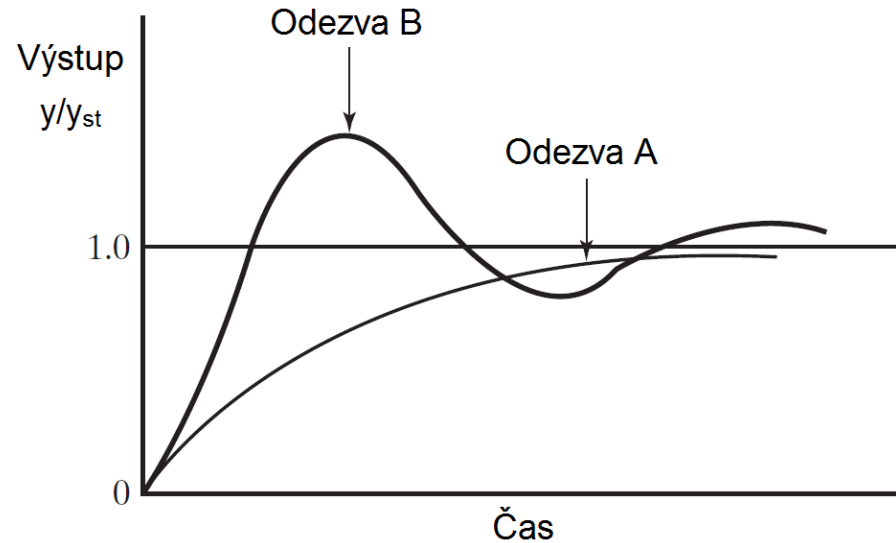
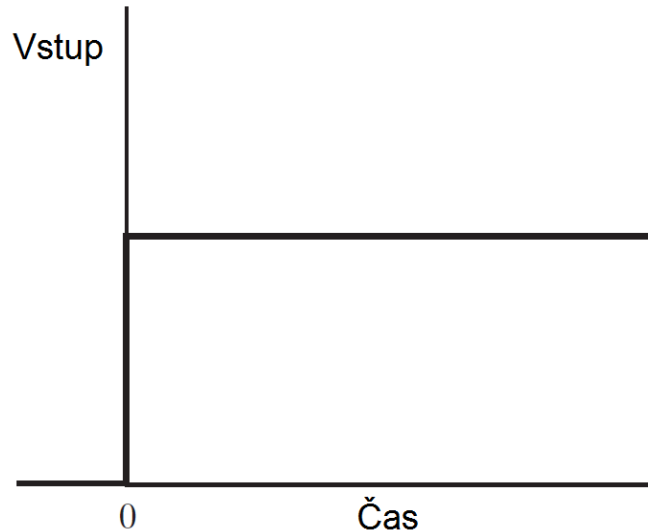


$$\dot{Q} = \alpha A (T_v - T_t)$$

Baňka teploměru = systém

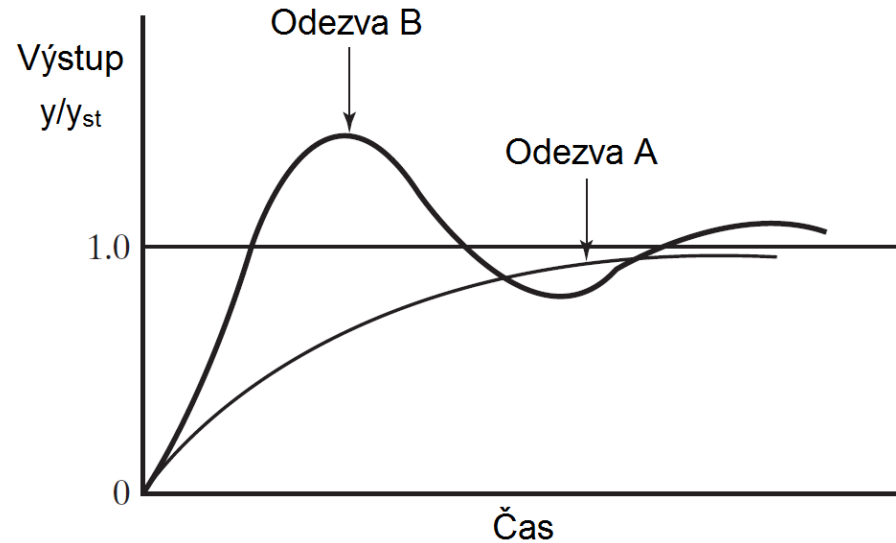
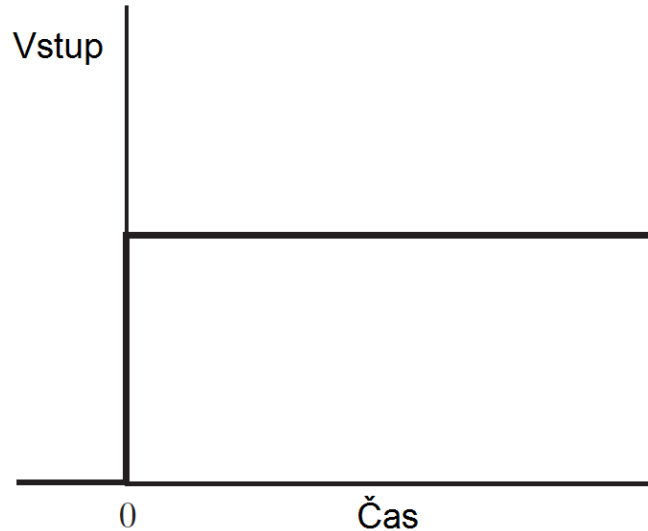
Časová konstanta

- y je okamžitá hodnota výstupu a y_{st} je hodnota výstupu po dostatečně dlouhé době (po ustálení)



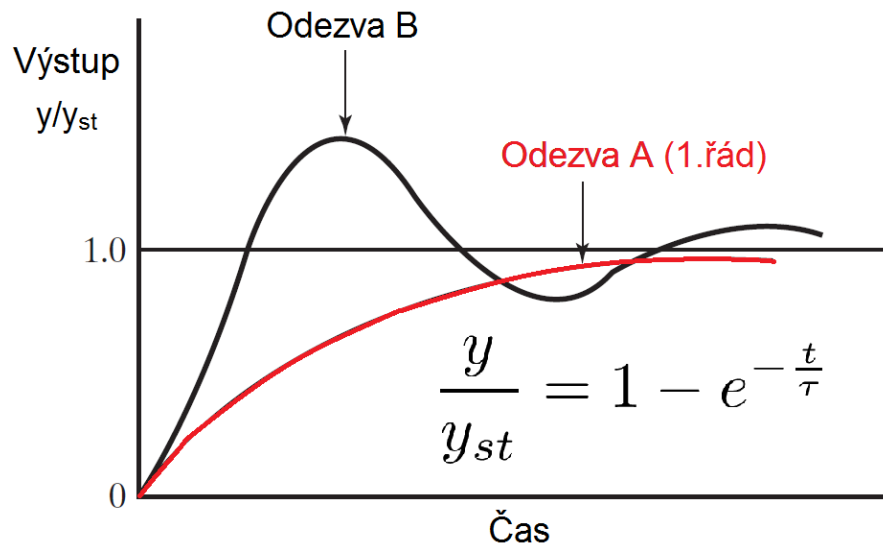
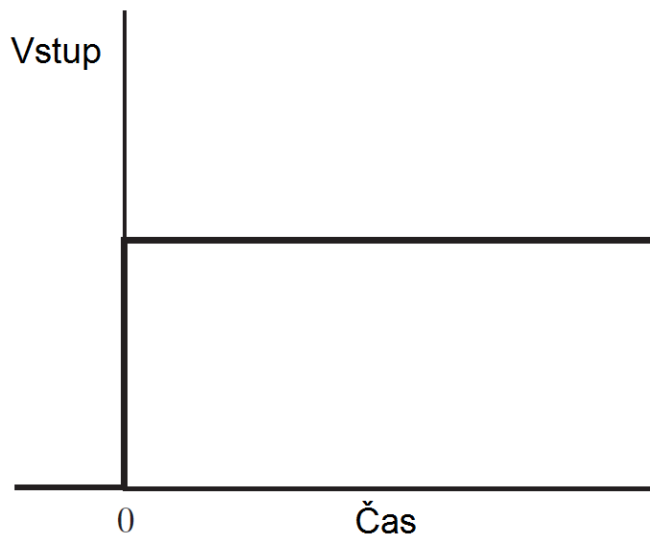
Časová konstanta (2)

- **Odezva A** odpovídá systému 1. řádu nebo nadkritickému systému 2. řádu
- **Odezva B** odpovídá podkritickému systému 2. řádu



Časová konstanta (3)

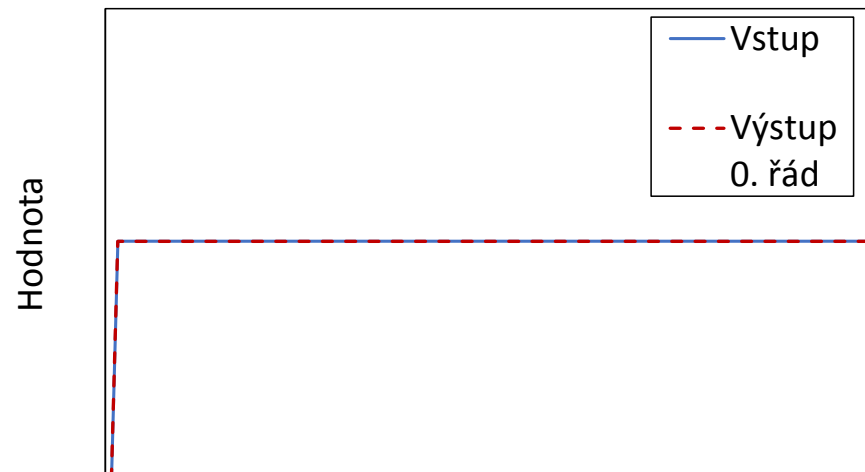
- **Odezva A** pro systém 1. řádu vykazuje asymptotickou závislost v exponenciální podobě
- **Tvar** této závislosti je **určen časovou konstantou** (čas, při kterém je $y/y_{st} = 0.632$)



Další dynamické charakteristiky

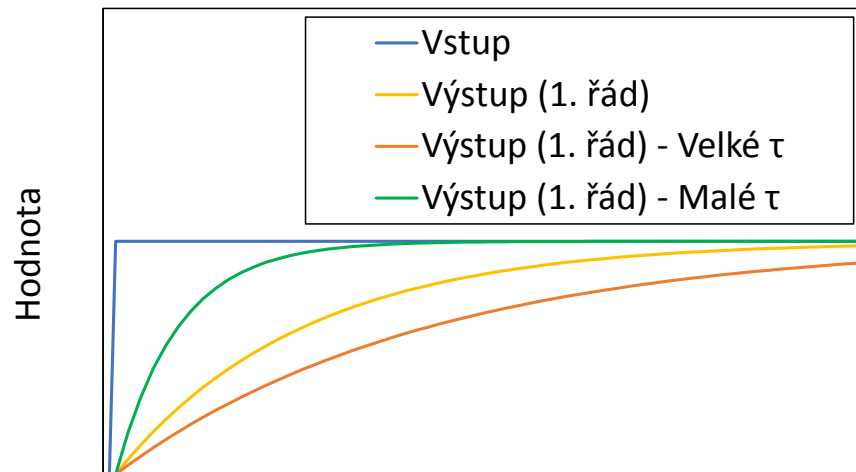
- Časová konstanta se používá výhradně pro systémy 1. řádu (pro systémy 2. řádu se nepoužívá)
- Obecnější pojem je tzv. **reakční doba** (vhodná pro systémy 1. a 2. řádu)
- Např. je uvedena 95% reakční doba (čas, při kterém je $y/y_{st} = 0.95$)
- Alternativou je tzv. doba nebo **čas náběhu** (čas, při kterém y/y_{st} vzroste o uvedenou hodnotu, obvykle je uváděn čas, kdy y/y_{st} vzroste z hodnoty 0.1 na hodnotu 0.9)
- Pro podkritické systémy 2. řádu se používá **čas ustálení**, což je obvykle doba za jakou amplituda oscilací klesne na určitou hodnotu ustáleného stavu (např. 10 %)

Systemy nultého a prvního řádu



Čas (s)

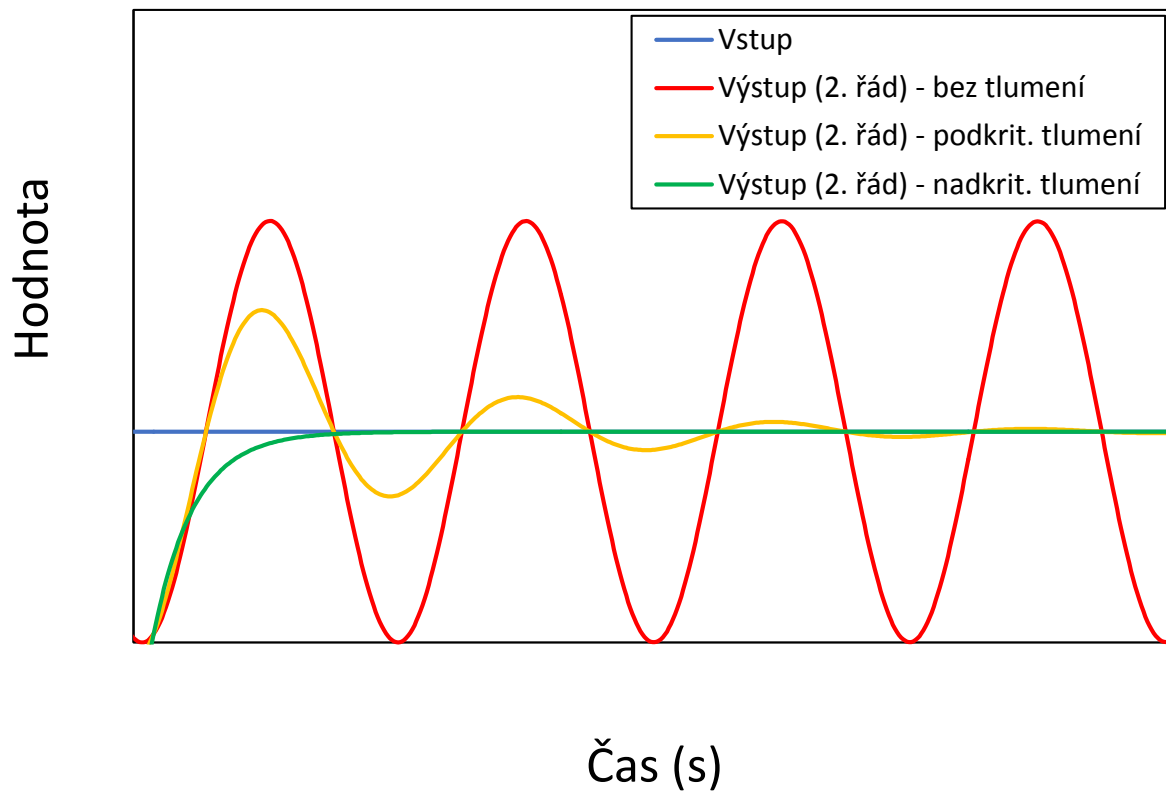
Nultý řád



Čas (s)

První řád

Systemy druhého řádu



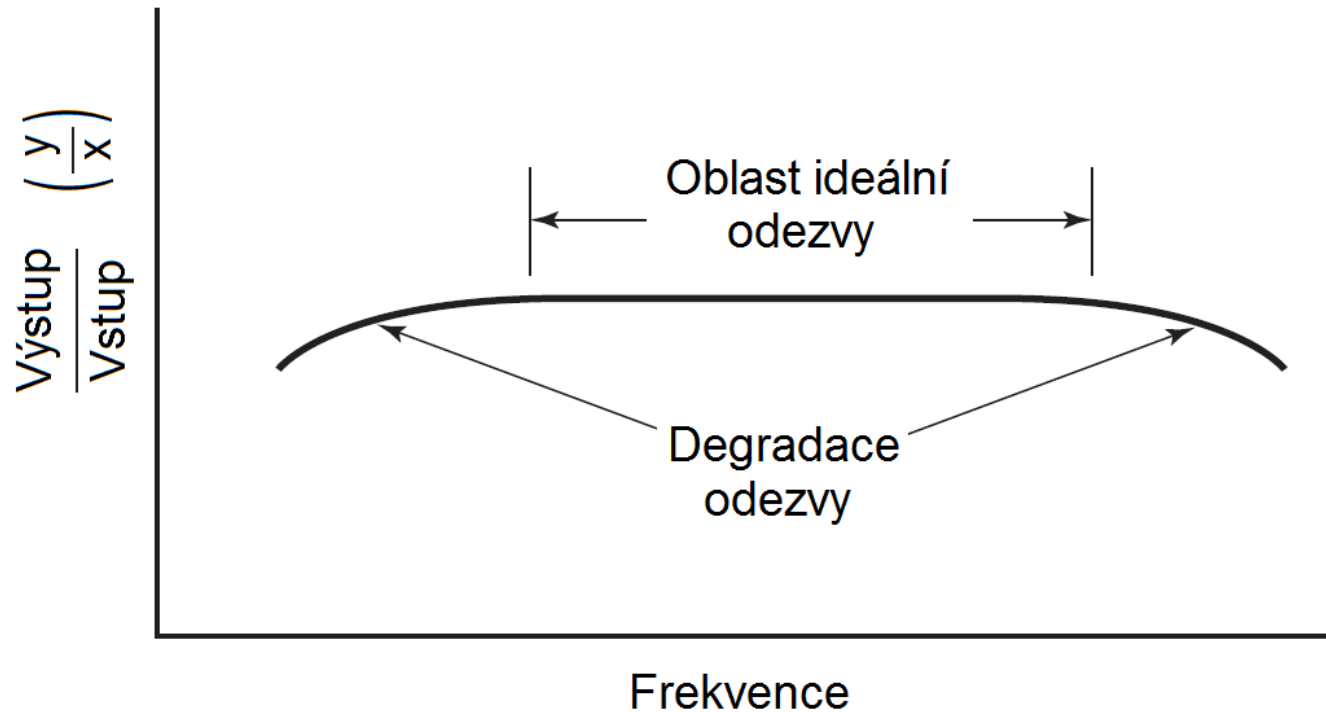
Frekvenční odezva

- Odezva měřicího systému (přístroje) na ideální sinusovou vlnu
- Proces se opakuje pro řadu různých frekvencí
- Výsledkem je frekvenční odezva pro určité spektrum frekvencí
- Oblast ideální odezvy nazýváme **šířkou pásma**
- Pokud je měřicí přístroj použit mimo tuto oblast, poměr amplitud výstupního a vstupního signálu nebude konstantní a bude vnášet do měření systematickou chybu

Frekvenční odezva (2)

- Reálné signály mají většinou obecný charakter - nutný rozklad na sinusové průběhy
- Dále bude mezi vstupním a výstupním signálem určitý fázový posun (závisí na frekvenci)
- Výrobce často shrnuje dynamické charakteristiky měřicího přístroje jedním parametrem – **vlastní frekvence**

Frekvenční odezva (3)



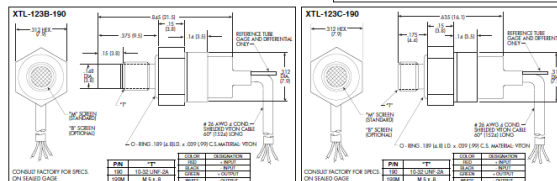
Praktická ukázka: Datasheet tlakového snímače



RUGGEDIZED AUTOMOTIVE PRESSURE TRANSDUCERS

XTL-123B-190 (M) SERIES XTL-123C-190 (M) SERIES

- Easy Installation
- High Natural Frequency
- 10-32 UNF or M 5 x .8 Thread
- Wide Temperature Range
- Compatible With All Automotive Fluids
- Patented Leadless Technology VIS®



		1.0 15	1.7 25	3.5 50	7 100	17 250	35 500	70 1000	210 3000
INPUT	Pressure Range	Absolute, Sealed Gage, Gage, Differential						Absolute, Sealed Gage	
	Over Pressure	2 Times Rated Pressure to a Maximum of 4500 PSI (315 BAR)							
	Burst Pressure	3 Times Rated Pressure to a Maximum of 4500 PSI (315 BAR)							
	Pressure Media	All Nonconductive, Noncorrosive Liquids or Gases (Most Conductive Liquids and Gases - Please Consult Factory)							
	Rated Electrical Excitation	10 VDC							
OUTPUT	Maximum Electrical Excitation	10 VDC							
	Input Impedance	1000 Ohms (Min.), 5000 Ohms (Max.)							
	Output Impedance	2000 Ohms (Max.)							
	Full Scale Output (FSO)	100 mV ± 10 mV							
	Residual Unbalance	± 5mV (Typ.)							
ENVIRONMENTAL	Combined Non-Linearity, Hysteresis and Repeatability	± 0.1% FSO BFS (Typ.), ± 0.5% FSO (Max.)							
	Resolution	Infinite							
	Natural Frequency of Sensor Without Screen (kHz) (Typ.)	Greater Than 175 kHz							
	Acceleration Sensitivity % FSG Perpendicular	6.5x10 ⁻⁴	5.0x10 ⁻⁴	3.0x10 ⁻⁴	1.5x10 ⁻⁴	1.0x10 ⁻⁴	6.0x10 ⁻⁵	4.5x10 ⁻⁵	2.0x10 ⁻⁵
	Insulation Resistance	100 Megohm Min. @ 50 VDC							
PHYSICAL	Operating Temperature Range	-60°F to +400°F (-65°C to +204°C)							
	Compensated Temperature Range	-60°F to +350°F (-40°C to +175°C)							
	Thermal Zero Shift	± 1% FSO/100°F (Typ.)							
	Thermal Sensitivity Shift	± 1%/100°F (Typ.)							
	Linear Vibration	100g Peak, Sine Up to 5000 Hz							
ENVIRONMENTAL	Humidity	100% Relative Humidity							
	Mechanical Shock	100g half Sine Wave 11 msec. Duration							
	Electrical Connection	4 Conductor 28 AWG Shielded Viton Cable 60" Long							
	Weight	5 Grams (Nom.) Excluding Cable							
	Pressure Sensing Principle	Fully Active Four Arm Wheatstone Bridge Dielectrically Isolated Silicon on Silicon Patented Leadless Technology							
PHYSICAL	Mounting Torque	15 Inch-Pounds							

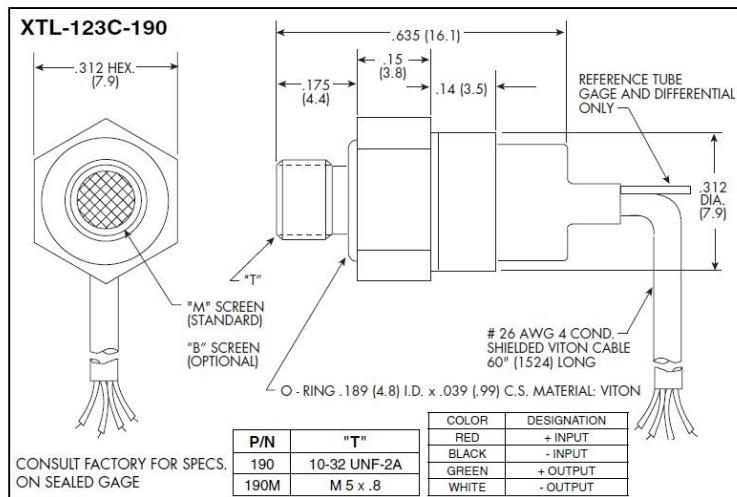
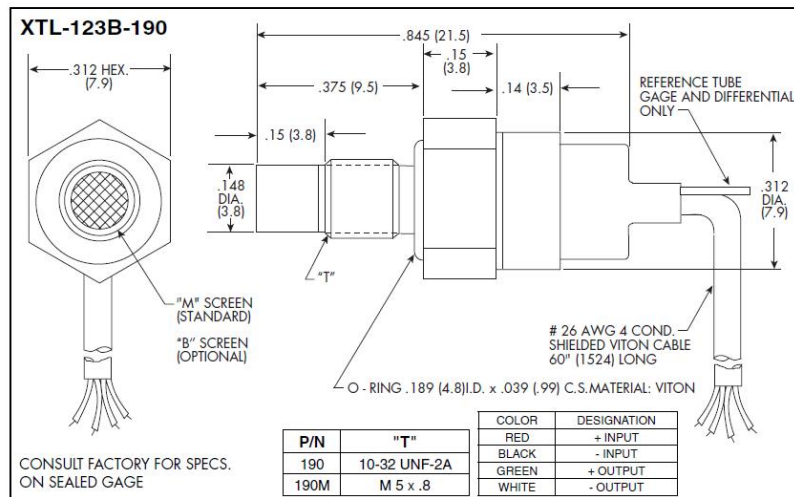
Note: Custom pressure ranges, accuracies and mechanical configurations available. Dimensions are in inches. Dimensions in parentheses are in millimeters. All dimensions nominal. (S) Continuous development and refinement of our products may result in specification changes without notice. Copyright © 2014 Kulite Semiconductor Products, Inc. All Rights Reserved. Kulite miniature pressure transducers are intended for use in test and research and development programs and are not necessarily designed to be used in production applications. For products designed to be used in production programs, please consult the factory.

KULITE SEMICONDUCTOR PRODUCTS, INC. • One Willow Tree Road • Larchmont, New Jersey 07638 • Tel 201 461-0302 • Fax 201 461-0300 • <http://www.kulite.com>

RUGGEDIZED AUTOMOTIVE PRESSURE TRANSDUCERS

XTL-123B-190 (M) SERIES XTL-123C-190 (M) SERIES

- Easy Installation
- High Natural Frequency
- 10-32 UNF or M 5 x .8 Thread
- Wide Temperature Range
- Compatible With All Automotive Fluids
- Patented Leadless Technology **VIS®**



Pressure Range	1.0 15	1.7 25	3.5 50	7 100	17 250	35 500	70 1000	100 1500	210 BAR 3000 PSI
----------------	-----------	-----------	-----------	----------	-----------	-----------	------------	-------------	---------------------

INPUT	Pressure Range	1.0 15	1.7 25	3.5 50	7 100	17 250	35 500	70 1000	100 1500	210 BAR 3000 PSI	
	Operational Mode	Absolute, Sealed Gage, Gage, Differential					Absolute, Sealed Gage				
	Over Pressure	2 Times Rated Pressure to a Maximum of 4500 PSI (315 BAR)									
	Burst Pressure	3 Times Rated Pressure to a Maximum of 4500 PSI (315 BAR)									
	Pressure Media	All Nonconductive, Noncorrosive Liquids or Gases (Most Conductive Liquids and Gases - Please Consult Factory)									
	Rated Electrical Excitation	10 VDC									
	Maximum Electrical Excitation	15 VDC									
	Input Impedance	1000 Ohms (Min.), 5000 Ohms (Max.)									
OUTPUT	Output Impedance	2000 Ohms (Max.)									
	Full Scale Output (FSO)	100 mV ± 10 mV									
	Residual Unbalance	± 5mV (Typ.)									
	Combined Non-Linearity, Hysteresis and Repeatability	± 0.1% FSO BFSL (Typ.), ± 0.5% FSO (Max.)									
	Resolution	Infinitesimal									
	Natural Frequency of Sensor Without Screen (KHz) (Typ.)	Greater Than 175 KHz									
	Acceleration Sensitivity % FS/g Perpendicular	6.5x10 ⁻⁴	5.0x10 ⁻⁴	3.0x10 ⁻⁴	1.5x10 ⁻⁴	1.0x10 ⁻⁴	6.0x10 ⁻⁵	4.5x10 ⁻⁵	3.5x10 ⁻⁵	2.0x10 ⁻⁵	
	Insulation Resistance	100 Megohm Min. @ 50 VDC									
ENVIRONMENTAL	Operating Temperature Range	-65°F to +400°F (-55°C to +204°C)									
	Compensated Temperature Range	-40°F to +350°F (-40°C to +175°C)									
	Thermal Zero Shift	± 1% FS/100°F (Typ.)									
	Thermal Sensitivity Shift	± 1% /100°F (Typ.)									
	Linear Vibration	100g Peak, Sine Up to 5000 Hz									
	Humidity	100% Relative Humidity									
	Mechanical Shock	100g half Sine Wave 11 msec. Duration									
PHYSICAL	Electrical Connection	4 Conductor 26 AWG Shielded Viton Cable 60" Long									
	Weight	5 Grams (Nom.) Excluding Cable									
	Pressure Sensing Principle	Fully Active Four Arm Wheatstone Bridge Dielectrically Isolated Silicon on Silicon Patented Leadless Technology									
	Mounting Torque	15 Inch-Pounds									

Dynamická měření – obecná doporučení

- Pro minimalizaci chyby při dynamickém měření by měly být **ČASOVÉ CHARAKTERISTIKY SNÍMAČE** (časová konstanta, doba náběhu, čas ustálení, ...) co **NEJMENŠÍ** v porovnání se změnami měřené fyzikální veličiny
- V případě systémů 2. řádu se snažíme být co nejdále od udávané vlastní frekvence snímače
- **V případě, že je jedna z těchto časových charakteristik srovnatelná se změnami měřené veličiny, dopouštíme se významné dynamické chyby!**



Děkuji za pozornost