



**Česká metrologická společnost, z.s.**

**Novotného lávka 5, 116 68 Praha 1**

Tel: 606 957 233

e-mail: [cms-zk@csvts.cz](mailto:cms-zk@csvts.cz)

[www.spolky-csvts.cz/cms](http://www.spolky-csvts.cz/cms)

**Metodika provozního měření**

**MPM 0.0.1/01/24**

**Analýza vhodnosti použití měřidel a měřicích systémů.**

Podtitul

**Metodika řešení způsobilosti měřidel a měření podle MSA**

**Praha**

říjen 2024

**Vzorový metodický postup** byl zpracován a financován ÚNMZ v rámci Plánu standardizace – Program rozvoje metrologie 2024

Číslo úkolu: VII/3/24

**Zadavatel:** Česká republika – Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, organizační složka státu

**Řešitel:** Česká metrologická společnost, z.s.

© ÚNMZ, ČMS

**Neprodejné:** Metodika je volně k dispozici na stránkách ÚNMZ a ČMS. Nesmí však být dále komerčně šířena.

## 1 Předmět metodiky

Tato metodika se zabývá specifikami při měření hluku průmyslových zařízení.

## 2 Související normy a metrologické předpisy

Číslo normy	Název	
ČSN 01 0250	Statistické metody v průmyslové praxi. Všeobecné základy	[L1]
ČSN 01 0252	Statistické metody v průmyslové praxi II. Závislosti mezi náhodnými veličinami - korelace a regrese	[L2]
ČSN 01 0253	Statistické metody v průmyslové praxi III. Základní neparametrické metody	[L3]
ČSN IEC 61650	Techniky analýzy dat o bezporuchovosti - Postupy pro porovnání dvou konstantních intenzit poruch a dvou konstantních parametrů proudu poruch (událostí)	[L4]
ČSN ISO 16269-4	Statistická interpretace dat - Část 4: Detekce a ošetření odlehlých hodnot	[L5]
ČSN ISO 16269-7	Statistická interpretace údajů - Část 7: Medián - Odhad a konfidenční intervaly	[L6]
ČSN ISO 16269-8	Statistická interpretace dat - Část 8: Stanovení předpovědních intervalů	[L7]
ČSN ISO 10017	Management kvality - Návod ke statistickým technikám pro ISO 9001:2015	[L8]
ČSN ISO 5479	Statistická interpretace údajů - Testy odchýlení od normálního rozdělení	[L9]
ČSN 01 0222	Aplikovaná statistika. Testy odlehlosti výsledků pozorování	[L10]
ČSN 01 0223	Aplikovaná statistika. Pravidla stanovení odhadů a konfidenčních mezí pro parametry normálního a logaritmicko-normálního rozdělení. Příklad úplných	[L11]

	výběrů	
ČSN 01 0224	Aplikovaná statistika. Pravidla stanovení odhadů a konfidenčních mezí pro parametry Weibullova rozdělení	[L12]
ČSN 01 0230	Aplikovaná statistika. Analýza rozptylu	[L13]
ČSN ISO 5725-1	Přesnost (pravdivost a preciznost) metod a výsledků měření - Část 1: Obecné zásady a definice	[L14]
ČSN ISO 5725-2	Přesnost (pravdivost a preciznost) metod a výsledků měření - Část 2: Základní metoda pro stanovení opakovatelnosti a reprodukovatelnosti normalizované metody měření	[L15]
ČSN ISO 5725-3	Přesnost (pravdivost a preciznost) metod a výsledků měření - Část 3: Mezilehlé míry preciznosti normalizované metody měření	[L16]
ČSN ISO 5725-4	Přesnost (pravdivost a preciznost) metod a výsledků měření - Část 4: Základní metody pro stanovení pravdivosti normalizované metody měření	[L17]
ČSN ISO 5725-5	Přesnost (pravdivost a preciznost) metod a výsledků měření - Část 5: Alternativní metody pro stanovení preciznosti normalizované metody měření	[L18]
ČSN ISO 5725-6	Přesnost (pravdivost a preciznost) metod a výsledků měření - Část 6: Použití hodnot měř přesnosti v praxi	[L19]
ČSN ISO 2854	Statistická interpretace údajů. Odhady a testy středních hodnot a rozptylů	[L20]
ČSN EN ISO 9001:2016	Systémy managementu jakosti – Požadavky.	[L21]
ČSN ISO 10012:2003	Systémy managementu měření – Požadavky na procesy měření měřicí vybavení.	[L22]
ČSN ISO 3534-1	Statistika - slovník a značky: Pravděpodobnost a obecné termíny.	[L23]

ČSN ISO 3534-2	Statistika - slovník a značky: Statistické řízení jakosti.	[L24]
ČSN ISO 7873	Regulační diagramy pro aritmetický průměr s výstražnými mezemi	[L25]
ČSN ISO 22514	Statistické metody v managementu procesu - Způsobilost a výkonnost -3: 2010 Část 3: Studie výkonnosti stroje pro měřitelná data na diskretních dílech -7:2014 Část 7: Způsobilost procesů měřen	[L26]
ČSN ISO 11462	Směrnice pro uplatňování statistické regulace procesu (SPC) – část 1: 2002 Prvky SPC – část 2: 2011 Katalog nástrojů a postupů	[L27]
ČSN ISO 7870	Regulační diagramy - 2: 2018 Shewhartovy regulační diagramy - 3: 2014 Přejímací regulační diagramy - 4: 2015 Regulační diagramy CUSUM	[L28]
VDA 5	Způsobilost kontrolních procesů, ČSJ 2004.	[L29]
MSA ČSJ Praha	Analýza systému měření, příručka ČSJ	[L30]
Bosch 2003	Bosch R.: Způsobilost měřicích a kontrolních procesů	[L31]
ČSN EN ISO/IEC 17025:2018	Všeobecné požadavky na kompetenci zkušebních a kalibračních laboratoří.	[L32]

### 3 Kvalifikace pracovníků provádějících měření

Kvalifikace pracovníků provádějících analýzu vhodnosti použití měřidel a měřicích systémů je dána příslušným předpisem organizace. Tito pracovníci se seznámí s metodickým postupem upraveným na konkrétní podmínky daného pracoviště provádějícího měření a případnými (interními) souvisejícími předpisy.

Doporučuje se potvrzení odborné způsobilosti těchto pracovníků prokázat vhodným způsobem, například osvědčením o interním zaškolení, o absolvování odborného kurzu, nebo certifikátem odborné způsobilosti. Úroveň školení závisí na zařazení pracovníka a důležitosti prováděné měřicí operace.

## 4 Názvosloví, definice

### 4.1 Charakteristika a princip statistické regulace

Statistická regulace je nejvýhodnější způsob kontroly mezioperační hromadné a sériové výroby. Statistický charakter metody se projevuje tím, že jak časový rozvrh kontrol, tak způsob výběru ke kontrole a rozhodování o kvalitě se řídí předpisy, založenými na předběžném rozboru uvažovaného výrobního/měřicího procesu a na teoretických základech matematické statistiky.

Statistická regulace znamená udržování výrobního nebo technologického procesu v ustáleném nebo požadovaném stavu, představuje sledování a řízení výrobního procesu statistickými metodami tak, aby byla udržena kvalita výrobků na žádoucí úrovni.

Hodnocení kvality provádíme formou regulačních diagramů. **Regulační diagramy se využívají i při hodnocení způsobilosti měřidel, operátorů nebo procesu měření.**

Teorie regulačních diagramů rozlišuje dva typy variability:

- variabilitu 1. typu, působí-li na regulovanou veličinu jen náhodné vlivy, má regulovaná veličina stálé rozdělení pravděpodobností s parametry v požadovaných mezích. Takový proces je ve statisticky zvládnutelném stavu.
- variabilitu 2. typu, pokud na regulovanou veličinu působí i systematické vlivy, regulovaná veličina nemá parametry rozdělení pravděpodobnosti na trvale požadovaných úrovních. Příčiny mohou být různé, takový proces není ve statisticky zvládnutém stavu.

### 4.2 Hodnocení způsobilosti procesu

Způsobilost výrobního/měřicího procesu je určena celkovým kolísáním zjišťovaných údajů, které je dáno pouze náhodnými příčinami. Dříve než je stanovena způsobilost procesu, musí být tento proces uveden do statisticky zvládnutého stavu. Pomocí  $X$ - a  $R$ -diagramů se identifikují tzv. vymežitelné příčiny kolísání. O statisticky zvládnutelném procesu hovoříme, pokud je alespoň posledních 25 podskupin/hodnot ve statisticky zvládnutém stavu.

#### Určení indexů způsobilosti

- Index způsobilosti  $C_p$  charakterizuje možnosti procesu dané jeho variabilitou.

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \quad (4.1)$$

- kde
- |          |                                      |
|----------|--------------------------------------|
| USL      | horní specifikační (toleranční) mez, |
| LSL      | dolní specifikační (toleranční) mez, |
| $\sigma$ | směrodatná odchylka.                 |

b) Index způsobilosti  $C_{pk}$  zohledňuje variabilitu i umístění hodnot znaku v tolerančním poli, charakterizuje skutečnou způsobilost procesu dodržovat předepsané toleranční meze:

- je-li předepsána horní toleranční mez:

$$C_{pk} = C_{pU} = \frac{USL - \mu}{3\sigma} \quad (4.2)$$

- je-li předepsána dolní toleranční mez:

$$C_{pk} = C_{pL} = \frac{\mu - LSL}{3\sigma} \quad (4.3)$$

- jsou-li předepsané obě meze:

$$C_{pk} = \min\{C_{pU}, C_{pL}\} \quad (4.4)$$

kde  $\mu$  je střední hodnota sledovaného znaku.

Pokud není variabilita charakterizována rozptylem kolem střední hodnoty ale kolem optimální hodnoty (která musí ležet ve středu tolerančního rozpětí):

$$C_{pm} = \frac{USL - LSL}{6\sqrt{\sigma^2 + (\mu - T)^2}} \quad (4.5)$$

kde  $T$  je cílová hodnota tolerančního pole.

Pokud cílová hodnota neleží ve středu tolerančního pole nebo je specifikována jen 1 toleranční mez, zavádí se index

$$C_{pm} = \min\left\{\frac{T - LSL}{3\sqrt{\sigma^2 + (\mu - T)^2}}, \frac{USL - T}{3\sqrt{\sigma^2 + (\mu - T)^2}}\right\} \quad (4.6)$$

Porovnání indexů  $C_{pm}$  a  $C_p$  umožní zjistit, nakolik je dosažený výsledek ovlivněn variabilitou hodnot a nakolik posunem střední hodnoty  $\mu$  vůči cílové hodnotě  $T$ .

Tab.1: Hodnota indexů  $C_p$  a  $C_{pk}$  v závislosti na tolerančních mezích

Toleranční meze	Hodnota indexů $C_p, C_{pk}$	Pravděpodobnost vzniku neshodných jednotek při rozdělení $N(\mu, \sigma^2)$ [ppm]
$\mu \pm 3\sigma$	1,00	2700
$\mu \pm 4\sigma$	1,33	63,4
$\mu \pm 5\sigma$	1,67	0,7
$\mu \pm 6\sigma$	2,00	$1 \cdot 10^{-3}$

Proces se považuje za způsobilý, dosahuje-li hodnota indexů alespoň 1,33. Některé firmy mají vyšší požadavky na způsobilost procesu (kdy  $\mu$  je uprostřed tolerančního pole), např. při metodě „six sigma“.

### 4.3 Přesnost měření a měřících přístrojů

Přesnost celého měřícího procesu je souhrnem přesnosti měřidla, přesnosti měřící metody a přesnosti operátora, který s měřidlem zachází. Je třeba zdůraznit všeobecný rys měření: měřicím zařízením a zvolenou metodou se na měřeném objektu určuje velikost jisté veličiny. Vlivem zpětného působení měřícího zařízení na měřený objekt dochází vždy ke

změnam poměrů v měřeném objektu. To je důvod, proč nelze změřit pravou (skutečnou) hodnotu dané veličiny. Při každém reálném procesu měření dochází k chybám. S výsledky měření se pak musí zacházet vždy jako s náhodnými (přibližnými) hodnotami, a v tom smyslu je také zpracovávat.

#### 4.3.1 Rozdělení chyb podle příčiny vzniku

- a) **Chyby metody** ( $\Delta_m, \delta_m$ ): jde většinou o systematické chyby (způsobené volbou postupu měření, provedením zapojení apod.), které vznikají vzájemným působením měřicího přístroje a měřeného obvodu.
- b) **Chyby měřicích přístrojů** (základní a přídatné) jsou dány vlastnostmi přístrojů a nedokonalostí jejich výroby i vlivem okolí.
- c) **Chyby členů měřicího obvodu** jsou způsobeny nepřesnostmi vyrovnání a kalibrace etalonů a dalších členů. Pro velmi přesná měření je udána největší dovolená odchylka od jmenovité hodnoty (absolutní nebo relativní).
- d) **Chyby způsobené rušivými vlivy** jsou obtížně korigovatelné. Tyto chyby způsobují rušivá napětí, kapacitní a induktivní vazby, odpory vodičů, změny teploty, polohy apod.
- e) **Chyby čtení** jsou způsobeny pozorovatelem, který čte údaj měřicího přístroje.
- f) **Celkové chyby měření** jsou výsledkem většího počtu dílčích chyb.

#### 4.3.2 Rozdělení chyb podle způsobu výskytu

- a) chyby systematické (soustavné),
- b) chyby náhodné (nahodilé),
- c) chyby hrubé (omyly).

### 4.4 Měřicí přístroje analogové a digitální

#### 4.4.1 Chyby analogových přístrojů

**Základní chyby** analogových měřicích přístrojů jsou obvykle zahrnuty v třídě přesnosti. Třída přesnosti je vyjádřena jako maximální možná relativní chyba, pokud se přístroj používá podle stanovených metrologických požadavků výrobce za specifických vztažných podmínek ve specifikovaných mezích (teplota, tlak a vlhkost vzduchu, cizí elektromagnetické pole, poloha, druh měřených veličin apod.).

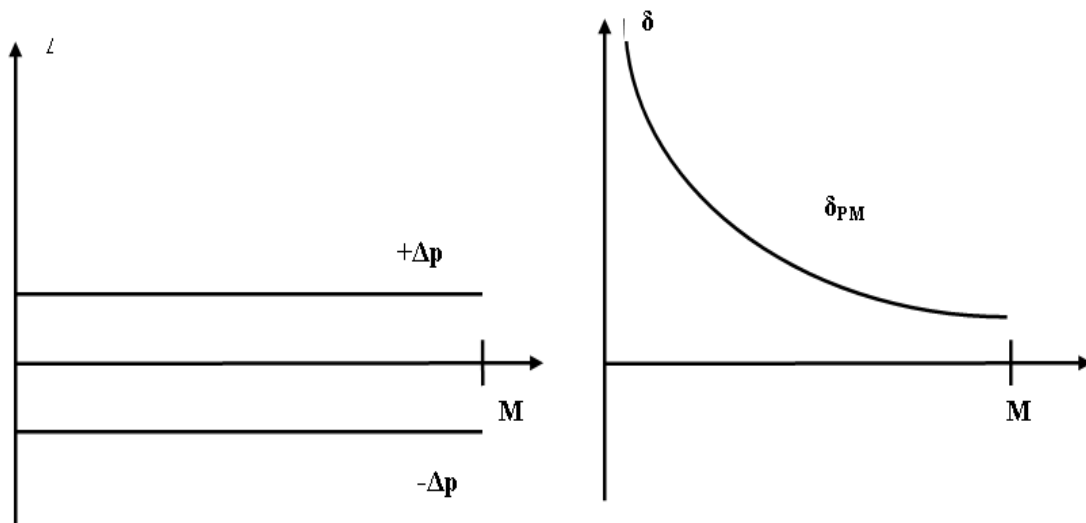
Nejsou-li dodrženy vztažné podmínky, je poměrná chyba údaje přístroje dána součtem poměrné chyby přístroje (za vztažných podmínek) a poměrnou chybou změn údaje (které vznikají, pokud přístroj nepracuje za vztažných podmínek):

$$\delta_u = \delta_p + \sum \delta_z \quad (4.7)$$

kde  $\sum \delta_z$  je souhrn změn údaje přístroje (při měření za jiných než vztažných podmínek), udaný v % skutečné hodnoty  $S$ .

Dovolené chyby jsou uvedeny např. v normách ČSN IEC 51, třídy přesnosti bývají u většiny analogových měřidel normalizovány nebo jsou uvedeny v návodu přístroje.





Obr.1: Závislost absolutní  $\Delta$  a relativní  $\delta$  chyby analogového přístroje (třída přesnosti vztažena k rozsahu  $M$ )

#### 4.3.2 Chyby digitálních přístrojů

**Základní chyby digitálních přístrojů** se skládají ze dvou složek:

1. část chyby je udána v % údaje měřené veličiny (MH nebo rdg – of reading) a
2. část chyby je vztažena k maximální hodnotě měřicího rozsahu. (MHMR nebo FS – full scale).

**Základní chyba absolutní:**

$$\begin{aligned} \Delta_{\text{celk}} &= \Delta_{\text{čtení}} + \Delta_{\text{rozsahu}} = \\ &= \pm (x \% \text{ z údaje měřené hodnoty} + y \% \text{ z měřicího rozsahu}) \end{aligned} \quad (4.8)$$

Chyba rozsahu může být též vyjádřena počtem kvantovacích kroků (digitů).

**Základní chyba relativní:**

$$\delta_{\text{celková}} = \delta_{\text{čtení}} + \delta_{\text{rozsahu}} \quad (4.9)$$

Je dána součtem relativní chyby měřené hodnoty a relativní chyby vztažené k maximální hodnotě rozsahu vyjádřené v procentech.

Chyby digitálních přístrojů mohou být rozšířeny o chyby, které garantuje výrobce za určitý časový úsek (1 měsíc, 3 měsíce nebo 1 rok).

Převod mezi absolutní a relativní chybou digitálních přístrojů lze vyjádřit dvěma způsoby, a to:

a)

$$|\Delta_{\text{celková}}| = \left| \frac{\delta_1}{100} \cdot U_x \right| + \left| \frac{\delta_2}{100} \cdot U_M \right| = |\Delta_1| + |\Delta_2| \quad (4.10)$$

kde  $\delta_1$  je relat. chyba v %  $U_x$  (údaje měřené veličiny),

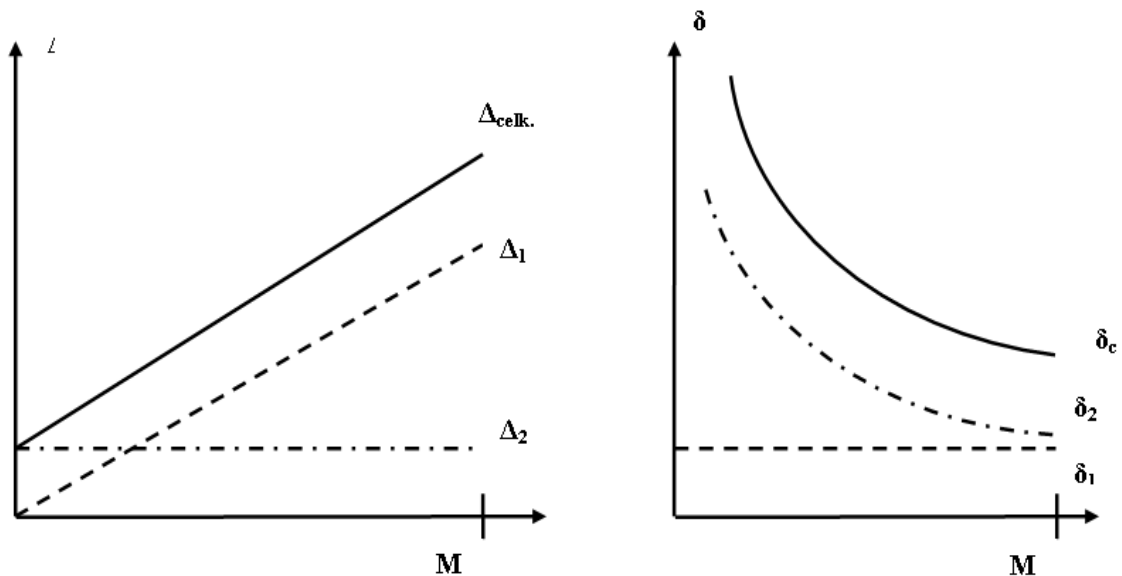
$\delta_2$  je relat. chyba v %  $U_M$  (hodnoty měřicího rozsahu).

$$\Delta_{\text{celková}} = \pm \left( \frac{\delta_1}{100} \cdot U_x + \Delta_3 \cdot k \right) \quad (4.11)$$

b)

kde  $\delta_1$  je relat. chyba v %  $U_x$  (údaje měřené veličiny),

$\Delta_3$  je absolutní chyba udaná v počtu jednotek posledního místa číslicového zobrazovače, tj. počet kvantovacích kroků.



Obr.2: Závislost absolutní a relativní chyby digitálního přístroje

#### 4.4 Nejistoty měření

**Nejistota měření** (výsledku měření) je takový nezáporný parametr, který charakterizuje rozptýlení hodnot přiřazených k měřené veličině na základě určité použité informace. Nejistota se udává nejen u výsledku měření, ale i u parametrů měřidel, u hodnot použitých konstant, atd.

Nejistota měření se obecně skládá z mnoha složek. Základem určování nejistot je statistický přístup k vyhodnocení. Předpokládá se určité (např. normální) rozdělení pravděpodobnosti, které udává, jak se může měřená hodnota odchylovat od skutečné (konvenční) hodnoty, popř. je uvedena pravděpodobnost, s jakou se skutečná hodnota může nacházet v intervalu daném nejistotou. Mírou nejistoty je **směrodatná odchylka**.

**4.4.1 nejistoty typu A** (značené  $u_A$ ), které jsou způsobeny většinou náhodnými chybami, a určí se statistickou analýzou naměřených hodnot získaných za přesně definovaných podmínek měření. Zde se uplatňuje přístup matematicko-statistický.

**4.4.2. nejistoty typu B** (značené  $u_B$ ) jsou způsobeny známými nebo odhadnutelnými příčinami. Stanoví se postupy, které nejsou přímo definovány ve standardu. U složitějších zařízení při požadování zvýšené přesnosti je nutné provést podrobný rozbor vzniku chyb a z nich stanovit nejistotu způsobem B. Příčin vzniku standardních nejistot hodnocených způsobem B může být více a výsledná standardní nejistota  $u_B$  je dána jejich geometrickým součtem. Pokud jsou zdroji nejistot různé veličiny, musíme stanovit koeficienty převodu (označované  $c$  nebo  $A$ ) tak, aby všechny dílčí nejistoty měly stejné jednotky / rozměry.

Výpočet dílčích nejistot  $u_B$  závisí jen na pravděpodobnostním přístupu.

#### 4.4.3 Kombinovaná standardní nejistota – $u_c$

je dána geometrickým součtem standardní nejistoty typu A a standardní nejistoty typu B.

Při normálním rozdělení hustoty pravděpodobnosti  $N(\mu, \sigma^2)$  měřené veličiny za daných

podmínek udává interval, ve kterém se vyskytuje pravá hodnota měřené veličiny s pravděpodobností  $P = 68,27\%$ :

$$u_X = \sqrt{u_{AX}^2 + u_{BX}^2} = \sqrt{u_{AX}^2 + \sum_{J=1}^m c_J^2 \cdot u_{ZJ}^2} \quad (4.12)$$

#### 4.4.4 Rozšířená (celková) nejistota – U

se zavádí, pokud je požadována větší pravděpodobnost výskytu skutečné hodnoty

$$U = k_U \cdot u_X, \quad (4.13)$$

kde  $k_U$  koeficient rozšíření (pokrytí) platí pro normální rozdělení hustoty pravděpodobnosti.

Tab. 2: Hodnoty koeficientu rozšíření  $k_U$  v závislosti na intervalu rozdělení hustoty pravděpodobnosti  $N(\mu, \sigma^2)$

Rozdělení $N(\mu, \sigma^2)$ pravděpodobnost $P$ (%)	Koeficient rozšíření $k_U$ (-)
68,27	1
95,45	2
99,00	2,58
99,73	3

V rámci WECC platí dohoda, že se používá  $k_U = 2$ , tzn., že skutečná hodnota se nachází v daném intervalu s pravděpodobností  $P = 95\%$ .

Určení nejistot výsledků měření (uncertainty of measurement) neřeší veškerou variabilitu měřicího procesu. Nejistota měření souvisí s dalšími termíny, které vyhodnocujeme při zjišťování pravé (konvenční) hodnoty měřené veličiny:

**přesnost** (accuracy), **správnost** (trueness), **shodnost** (precision), **opakovatelnost** (repeatability), **reprodukovatelnost** (reproducibility), **analýza systémů měření** (Measurement Systems Analysis - MSA), **způsobilost měřicích přístrojů**.

#### 4.5 Řešení podle MSA (Analýza systému měření)

Protože proces měření vnáší do skutečného výrobního procesu další variabilitu, byla vypracována obecná metodika, která je návodem pro posouzení systému měření, získávání informací o potenciačních odchylkách od požadavků až po identifikaci těchto potenciačních odchylek a možné přijetí nápravných opatření. MSA se zabývá systémem měření. Nastavení úrovně systému managementu měření závisí na několika faktorech, které dělíme do dvou základních skupin:

- stabilita a způsobilost výrobního procesu,
- způsobilost měřidel a měřicího procesu.

Základní vztah mezi variabilitou skutečného výrobního procesu a procesem pozorovaným lze popsat jako:

$$\sigma_I^2 = \sigma_{II}^2 + \sigma_{III}^2 \quad (4.14)$$

kde  $\sigma_I^2$  rozptyl pozorovaného procesu (ovlivněn chybou systému měření),  
 $\sigma_{II}^2$  rozptyl skutečného výrobního procesu,  
 $\sigma_{III}^2$  rozptyl systému měření.

Je patrné, že systém měření ovlivňuje výsledky výrobního procesu.

Zásady neustálého zlepšování, které jsou podmínkou systému kvality, vedou k tendenci plynulého zmenšování variability procesů jak výrobních, tak měřicích. Tomu se musí přizpůsobit zlepšující se rozlišovací schopnost měřicích systémů a minimální variabilita měřicího zařízení. Všechna měřicí zařízení však vykazují určitou míru chyby a nejistoty. MSA se týká variability procesů, hodnocení opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měření, následně pak i statistické regulace procesů a hodnocení způsobilosti.

Při řešení MSA se sleduje [L.30]:

- **variabilita polohy** (resp. změna polohy vůči skutečné hodnotě, souvisí se systematickou chybou měření); stanoví se zjišťováním přesnosti, strannosti, stability a linearity,
- **variabilita rozptylu** (souvisí s náhodnou chybou měření); stanoví se zjišťováním shodnosti, opakovatelnosti, reprodukovatelnosti, citlivosti měřidla a konzistence,
- **variabilita systému**, která se hodnotí zjišťováním způsobilosti, funkčnosti měřicího systému a nejistoty měření.

### **Základní pojmy a charakteristiky**

**Přesnost** (accuracy) je těsnost shody mezi výsledky po sobě následujících měření téže měřené veličiny provedených za stejných podmínek.

**Pravdivost, správnost** (trueness) je těsnost shody mezi průměrnou hodnotou získanou z řady výsledků a přijatou referenční hodnotou.

**Precisnost, shodnost** (precision) je těsnost shody mezi nezávislými výsledky zkoušek, které byly získány za předem specifikovaných podmínek.

**Rozlišovací schopnost systému** (resolution) znamená schopnost měřicího systému detekovat a věrohodně indikovat změny měřeného znaku. Rozlišovací schopnost měřicího systému je nízká, pokud není schopna zjistit variabilitu výrobního procesu a nevhodná pro regulaci a řízení, pokud není schopná odhalit systematické vlivy regulovaného výrobního procesu.

### **Stabilita** (stability)

Je charakterizována jako celková variabilita v měření získaná měřicím systémem při měření jedné charakteristiky na identickém vzorku v delším časovém úseku. Kontroluje tak změnu strannosti za delší časový interval.

### **Homogenita** (homogeneity)

sleduje opakovatelnost měřidla v jeho běžném rozsahu. Někdy je uváděna ve dvou složkách, a to jako konzistence (consistency), která stanoví stupeň změny opakovatelnosti v čase a uniformita (uniformity), která představuje změnu opakovatelnosti v běžném provozním rozsahu.

**Strannost, vychýlení (bias)**

představuje podle MSA celkovou systematickou chybu. Rozdíl mezi střední hodnotou pozorované veličiny a skutečnou hodnotou sledovaného znaku kvality je střední hodnotou  $\mu_\varepsilon$  normálního rozdělení hustoty pravděpodobnosti chyb měření.

Zjišťování statistické významnosti se provádí testováním statistické významnosti rozdílu mezi aritmetickým průměrem provozního měření  $\bar{x}$  a referenční hodnotou měřeného znaku kvality  $x_{ref}$  (tj. hodnota získaná teoreticky, přesnější měřicí metodou nebo předpisem).

Je formulována hypotéza  $H_0$ :

$$H_0: \bar{x} = x_{ref} \quad (4.15)$$

proti alternativní hypotéze

$$H_1: \bar{x} \neq x_{ref} \quad (4.16)$$

Hypotéza  $H_0$  se zamítá na hladině významnosti  $\alpha$  v případě, když platí

$$|t| > t_{1-\alpha/2}(n-1), \quad (4.17)$$

kde  $t_{1-\alpha/2}(n-1)$  je  $(1-\alpha/2)$ -ní kvantil t-rozdělení s  $(n-1)$  stupni volnosti, vypočtená testovací statistika podle vztahu

$$t = \frac{\bar{x} - x_{ref}}{s} \sqrt{n}, \quad (4.18)$$

kde  $s$  je výběrová směrodatná odchylka

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.19)$$

Je-li hypotéza  $H_0$  zamítnuta, je strannost statisticky významná na hladině významnosti  $\alpha$  a je třeba ji korigovat.

Bodový odhad strannosti:

$$\bar{x}_\varepsilon = \bar{x} - x_{ref} \quad (4.20)$$

**Linearita (linearity)**

je dána rozdílem mezi hodnotami strannosti na pracovním rozsahu měřidla. V praxi se jedná o linearitu měřicího systému, pokud je střední hodnota systematické chyby  $\mu_\varepsilon$  v každém místě pracovního rozsahu konstantní.

Systematická chyba (strannost) se určí pro každý výsledek měření:

$$x_{\varepsilon(i,j)} = x_{i,j} - x_{ref(i)},$$

kde  $i = 1, \dots, g$

$j = 1, \dots, m$

$x_{i,j}$  hodnota naměřená na  $i$ -tém vzorku při  $j$ -té replikaci,

$x_{ref(i)}$  referenční hodnota  $i$ -tého vzorku.

Vyhodnocení linearity je možné provést:

- grafickou metodou pomocí regresní přímky,
- numerickou metodou pomocí testu statistické významnosti koeficientů regresní přímky,
- numerickou metodou pomocí analýzy rozptylu.

Numerická metoda vyhodnocení linearity pomocí analýzy rozptylu, výpočet se provádí klasickou metodou ANOVA. Podle zvoleného modelu se vypočítá součet čtverců  $SS_G$ , reziduální součet čtverců  $SS_E$ , celkový (totální) součet čtverců  $SS_T$  popisující celkovou

variabilitu uvnitř skupin, způsobenou náhodnými vlivy a pro jednotlivé zdroje měnlivosti se vypočítají odpovídající počty stupňů volnosti:

vzorky	$SS_G$	počet stupňů volnosti	$f_G = g - 1$
reziduum	$SS_E$	počet stupňů volnosti	$f_e = g(m - 1)$
celkový	$SS_{TOT}$	počet stupňů volnosti	$f_T = gm - 1$

kde  $x_{\varepsilon(i,j)}, x_{\varepsilon(i)}$  jsou definovány

$$\bar{x}_{\varepsilon} \quad \text{je průměrná strannost určená vztahem } \bar{x}_{\varepsilon} = \frac{1}{g} \sum_{i=1}^g x_{\varepsilon(i)}$$

Pak se vypočítají odhady rozptylů pro vzorky a reziduum a testová veličina  $F$ , která se porovná s hodnotou kritickou  $F_{krit}$ .

Pokud je  $F > F_{krit}$ , dojde k zamítnutí hypotézy  $H_0$  na hladině významnosti  $\alpha$ . [L8]

Na vyhodnocení linearity aplikujeme jednofaktorovou analýzu rozptylu, kde úrovněmi faktoru jsou jednotlivé vzorky (jejich pozorované hodnoty leží v závislosti na rozptylu procesu v celém pracovním rozsahu měřidla). Příslušné hodnoty odezev pro jednotlivé úrovně jsou strannosti.

Obecný model měřeného výsledku je ve tvaru

$$x_{\varepsilon(i,j)} = \mu + G_i + \varepsilon_{ij} \quad (4.21)$$

kde	$i$	počet vzorků $i = 1, \dots, g$
	$j$	počet měření $j = 1, \dots, m$
	$\mu$	skutečná strannost (ideálně nulová)
	$G_i$	efekt $i$ -tého vzorku ( $i$ -té úrovně faktoru)
	$\varepsilon_{i,j}$	nezávislá náhodná chyba s normálním rozdělením $N(0, \sigma^2)$

Protože jsou úrovně faktoru výběrem z většího souboru, jedná se o model s náhodnými efekty. V takovém modelu je efekt  $i$ -tého vzorku  $G_i$  náhodnou veličinou, pro kterou předpokládáme  $G_i \approx N(0, \sigma_G^2)$ .

Hypotéza  $H_0$ , kterou se testuje statistická významnost efektu  $G_i$  na naměřené hodnoty strannosti  $x_{\varepsilon(i,j)}$  má tvar

$$H_{0(G)} : \sigma_G^2 = 0$$

oproti

$$H_{1(G)} : \sigma_G^2 \neq 0$$

(4.22)

### Opakovatelnost (Repeatability, Evaluation Variation *EV*)

je těsnost shody mezi výsledky při stejném postupu měření, stejným pozorovatelem, při měření je použitý stejný měřicí přístroj za stejných podmínek, na stejném místě měření a opakování měření v průběhu krátkého časového intervalu. Je extrémním případem shodnosti, neboť popisuje nejmenší variabilitu výsledků způsobenou náhodnými chybami měření.

Opakovatelnost zahrnuje kromě vlastní variability měřicího zařízení i veškerou další variabilitu (tj. vzorku, etalonu, metody, operátora, prostředí atd.).

Data pro určení statistické významnosti mezi dvěma opakovatelnostmi získanými jedním měřicím systémem lze získat stejným postupem jako data pro vyhodnocování statistické významnosti strannosti.

Statistická významnost mezi dvěma opakovatelnostmi s počtem naměřených hodnot  $n_1$  a  $n_2$

se testuje F-testem shody rozptylů ( $\sigma_1^2, \sigma_2^2$ ).

Formuluje se hypotéza  $H_0$ :

$$H_0 : (\sigma_1^2 = \sigma_2^2) \quad (4.23)$$

oproti oboustranné hypotéze

$$H_1 : (\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2) \quad (4.24)$$

Je-li  $s_1^2 > s_2^2$  hypotéza  $H_0$  se zamítá na hladině významnosti  $\alpha$ , jestliže platí:

$$\frac{s_1^2}{s_2^2} > F_{1-\alpha/2}(n_1 - 1, n_2 - 1)$$

kde  $F_{1-\alpha/2}(n_2 - 1, n_1 - 1)$  je  $(1-\frac{\alpha}{2})$ -ní kvantil F-rozdělení se stupni volnosti  $(n_1 - 1)$  a  $(n_2 - 1)$

$s_1^2$  a  $s_2^2$  jsou výběrové rozptyly výběrů  $n_1$  a  $n_2$ .

Je-li hypotéza  $H_0$  zamítnuta, pak jsou jednotlivé opakovatelnosti tak odlišné, že není možné systém měření pro daný účel použít. Pro testování statistické významnosti mezi více než dvěma výběry se použije Barlettův test.

Bodový odhad opakovatelnosti je dán vztahem:

$$\sigma_\varepsilon^2 = EV^2 \approx s_1^2 \quad (4.25)$$

**Reprodukovatelnost** (Reproducibility, Appraiser Variation **AV**),

je těsnost shody mezi výsledky měření téže veličiny provedených za změněných podmínek měření (je extrémním případem shodnosti - popisuje největší variabilitu výsledků).

Jsou 2 možnosti pojetí:

- Variabilita průměrů měření provedených různými operátory za použití stejného měřidla při měření znaku kvality u jednoho vzorku, to představuje změnu rozptylů průměrů měření prováděných různými operátory, kdy střední hodnota (hodnota znaku u stejného vzorku) se považuje za konstantní.
- Pod termínem reprodukovatelnosti je zahrnován také vliv různých pracovišť s různým přístrojovým zařízením nebo vliv různého prostředí.

Z tohoto důvodu se reprodukovatelnost nazývá průměrnou variabilitou mezi měřicími systémy nebo podmínkami měření. Zde se předpokládá jak změna střední hodnoty, tak i rozptylů, které do naměřených hodnot vnášejí přístrojová zařízení, měřicí pracoviště nebo prostředí.

Data jsou opět získána v krátkém časovém úseku, na identických vzorcích, pevně stanoveným postupem, na definovaném zařízení a definovaných pracovištích se specifikovanou obsluhou. [L30]

**Kombinované charakteristiky**

- R&R měřidla, tj. kombinovaná charakteristika opakovatelnosti a reprodukovatelnosti.
- Strannost a linearita – tj. kombinovaná charakteristika vzniklá stranností a linearitou systému měření.
- Hodnocení systémů měření pomocí ukazatelů způsobilosti měřících přístrojů  $C_g$  a  $C_{gk}$  - tj. kombinovaná charakteristika strannosti a opakovatelnosti.

Systém měření lze popsat i kombinacemi jiných charakteristik, jako je přesnost, shodnost, konzistence, způsobilost nebo výkonnost.

**R&R měřidla** (Gage repeatability and reproducibility)

Zahrnuje kombinovanou charakteristiku opakovatelnosti (označovanou také *Evaluation Variation EV*) a reprodukovatelnosti měřidla (označovanou v literatuře také *Appraiser Variation AV*):

$$\sigma_{\text{GRR}}^2 = \sigma_{\text{opakovatelnost}}^2 + \sigma_{\text{reprodukovatelnost}}^2 = \sigma_r^2 + \sigma_R^2 \quad (4.26)$$

Pro určení R&R měřidla (**GRR**) se používají:

- R-metody, založené na rozpětí naměřených hodnot (poskytují rychle potřebné výsledky bez hlubších znalostí matematické statistiky). Umožňují zjistit rychle jak R&R měřidla, i její jednotlivé složky opakovatelnost a reprodukovatelnost.
- s-metody, založené na výběrové směrodatné odchylce  $s$  (s-metoda je výpočetně náročnější, ale poskytuje kromě výše uvedených výsledků ještě pohled na složku interakcí (mezi díly a operátory).

Pro každý vzorek  $i$  a operátora  $k$  se určí rozpětí  $R_{ik}$  z  $j$  naměřených hodnot:

$$R_{ik} = |\max(x_{ijk}) - \min(x_{ijk})|, \quad (4.27)$$

kde  $x_{ijk}$  je hodnota naměřená na  $i$ -tém vzorku při  $j$ -tém měření  $k$ -tým operátorem.

Průměrné rozpětí jednotlivých operátorů (každý změřil  $g$  vzorků)

$$\overline{R}_k = \frac{1}{g} \sum_{i=1}^g R_{ik} \quad (4.28)$$

a celkové průměrné rozpětí všech operátorů

$$\overline{\overline{R}} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \overline{R}_k \quad (4.29)$$

Aritmetický průměr měření jednotlivých operátorů (každý změřil  $g$  vzorků)

$$\overline{x}_k = \frac{1}{g} \sum_{j=1}^g x_{ik} \quad (4.30)$$

Aritmetický průměr  $\overline{x}_i$  každého  $i$ -tého vzorku

$$\overline{x}_i = \frac{1}{mn} \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ijk} \quad (4.31)$$

Celkový aritmetický průměr  $\overline{\overline{x}}$

$$\overline{\overline{x}} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \overline{x}_k = \frac{1}{g} \sum_{i=1}^g \overline{x}_i \quad (4.32)$$

Aritmetický průměr  $\overline{x}_{ik}$  každého vzorku a operátora z  $m$  replikací

$$\overline{x}_{ik} = \frac{1}{j} \sum_{j=1}^m x_{ijk} \quad (4.33)$$

Rozpětí  $R_k$  mezi operátory se určí z aritmetických průměrů

$$R_k = \max(\overline{x}_k) - \min(\overline{x}_k) \quad (4.34)$$

Rozpětí mezi vzorky

$$R_i = \max(\overline{x}_i) - \min(\overline{x}_i) \quad (4.35)$$

**Opakovatelnost měřidla  $EV$**  se určí podle vztahu

$$EV = K_1 \overline{\overline{R}} \quad (4.36)$$

kde  $K_1$  je faktor, který je funkcí počtu  $m$  opakování a součinu počtu  $g$



vzorků a  $n$  operátorů a je tabelizován v podobě  $d_2 = \frac{1}{K_1}$

**Reprodukovatelnost AV** je dána vztahem

$$AV = \sqrt{(K_2 R_k)^2 - \frac{(EV)^2}{gm}} \quad (4.37)$$

kde  $K_2$  je faktor, který je funkcí počtu vzorků  $g$  a operátorů  $n$  a je tabelizován v podobě  $d_2 = \frac{1}{K_2}$ ,

Protože je variabilita operátora ovlivněna opakovatelností, získá se reprodukovatelnost odečtením variability způsobené opakovatelností.

Kombinovaná opakovatelnost a reprodukovatelnost měřidla (GRR) se určí součtem opakovatelnosti a reprodukovatelnosti

$$GRR = \sqrt{(EV)^2 + (AV)^2} \quad (4.38)$$

**Variabilita mezi vzorky PV** (Part Variation)

$$PV = K_3 R_i \quad (4.39)$$

kde  $K_3$  je faktor, který je funkcí počtu vzorků  $g$  je tabelizován v podobě  $d_2 = \frac{1}{K_3}$

**Celková variabilita TV** (Total Variation) je dána součtem rozptylů opakovatelnosti, reprodukovatelnosti a variability mezi jednotlivými vzorky:

$$TV = \sqrt{(EV)^2 + (AV)^2 + (PV)^2} \quad (4.40)$$

Jednotlivé variability je někdy výhodnější vyjádřit procentuálně. V takovém případě jsou údaje vztaheny k celkové variabilitě  $TV$ .

Např. 
$$GRR = \left( \frac{GRR}{TV} \right) 100 [\%] \quad (4.41)$$

Uvedená metodika umožňuje zjistit kvalitu práce jednotlivých operátorů zajišťujících kontrolu především v organizacích s hromadnou výrobou.

Tab. 3: Kvalita systému měření a hodnota GRR

$GRR$ (%)	Kvalita systému měření
$GRR < 10$	systém měření je přijatelný
$10 \% < GRR < 30 \%$	systém může být přijatelný (doporučuje se provést analýzu nákladů)
$GRR > 30\%$	systém je nepřijatelný, je nutné jeho zlepšení

Tato kritéria se používají ve všech metodách pro stanovení kombinované opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měřidla  $GRR$ . [L30]

### Strannost a linearita

Tato kombinovaná charakteristika se zabývá analýzou linearity s respektováním jednotlivých stranností, které vznikají v systému měření.

### Způsobilost měřidel

a měřicích procesů lze hodnotit také stanovením ukazatelů způsobilosti  $C_g$  a  $C_{gk}$ . Tyto ukazatele  $C_g$ ,  $C_{gk}$  jsou výsledkem analýzy systému měření nejpoužívanější metodou pro dlouhodobá měření - metodou SPC.

Hodnocení měřidel se provádí před použitím měřicího zařízení. Měření provádí jeden pracovník jedním měřidlem v místě používání, při čemž provede 50 opakovaných měření (minimálně 25 měření). Indexy způsobilosti měřidel a měřicího procesu se stanoví z hodnot, zjištěných měřeními vzorků pomocí etalonu.

Ukazatele způsobilosti se obecně určí podle vztahů

$$C_g = \frac{k_1 T}{k_2 s} \quad (4.42)$$

$$C_{gk} = \frac{k_1 T - 2|x_{ref} - \bar{x}|}{k_2 s} \quad (4.43)$$

kde  $T$  je parametr tolerance, který se vypočte, pokud jsou uvedeny obě toleranční meze  $T = USL - LSL$ , pokud je jen jedna mezní hodnota, parametr  $T$  se nepočítá.

$x_{ref}$  je referenční hodnotou etalonu,

$s$  je výběrová směrodatná odchylka.

Index  $C_g$  zohledňuje pouze opakovatelnost měření,

Index  $C_{gk}$  zahrnuje strannost i opakovatelnost měření.

Tab. 4: Koeficienty pro stanovení ukazatele způsobilosti

Metodika podle	$K_1$	$K_2$	$C_{g \min}$	$\frac{6k_1}{C_{g \min}} 100$
Bosch (General Motors)	0,2	6	1,33	15 %
Ford	0,15	6	1	15 %
Předpisy pro automobilový průmysl	0,3	4	1,33	22,5 %

Uvedené ukazatele porovnávají podíl šířky tolerančního pole s šířkou pásma variability naměřených hodnot. Při porovnání indexů způsobilosti platí

$$C_{gk} \leq C_g \quad (4.44)$$

Systém měření se považuje za způsobilý, pokud:

$$C_{gk} \geq C_{g \min} \quad (4.45)$$

Ukazatele způsobilosti  $C_g$  charakterizují možnosti měřicího procesu dané jeho variabilitou, ukazatele  $C_{gk}$  zohledňují jak variabilitu procesu, tak i centrální umístění hodnot znaku v tolerančním poli, charakterizují skutečnou způsobilost procesu.

Při hodnocení měřicích procesů je neméně důležité sledování variability systému měření i pomocí následujících parametrů:

- funkčnost (performance) je variabilita naměřených dat získaných během dlouhého časového úseku,
- nejistota měření (uncertainty) představuje interval okolo výsledku měření, o kterém se s jistou pravděpodobností předpokládá, že uvnitř leží pravá hodnota.

Systémy a procesy měření musí být dostatečně a komplexně hodnoceny. Přitom nesmí být ignorovány vlivy, jako je nejistota při kalibraci etalonů a jejich návaznost na národní a mezinárodní etalony, vliv měřeného objektu nebo dlouhodobá stabilita procesu měření.

## 5 Měřidla a pomocná měřicí zařízení

### 5.1 Hlavní měřidla

Hlavní měřidla jsou ta, která měří veličinu vlastnosti příslušného dílu/produktu (např. posuvka délku, váhy hmotnost, multimetr odpor, teploměr teplotu atd.).

Některé vlastnosti jsou společné pro všechny měřicí systémy:

- systém měření musí být statisticky stabilní; tzn., že působí jen náhodné příčiny,
- variabilita měřicího systému musí být menší oproti variabilitě výrobního procesu a specifikované toleranci. V opačném případě by měření nemělo smysl.
- Jednotlivá měření postupují v menších krocích v porovnání s variabilitou výrobního procesu a specifikovanou tolerancí, teoreticky přírůstkový krok měření nemá být větší než 0,1 z menší hodnoty technické tolerance a variability výrobního procesu.
- Statistické vlastnosti systému měření se mohou měnit v závislosti na vlastnostech měřeného produktu, jak je uvedeno již dříve, i největší variabilita systému měření musí být malá vůči variabilitě výrobního systému.

### 5.2 Pomocná měřidla a pomůcky

Pomocná měřidla umožňují provádět interní měření za stejných podmínek, popř. se používají k interní kontrole měřidla před a po měření.

## 6 Obecné podmínky měření – veličiny ovlivňující výsledky měření

Požadavky na zabezpečování kvality měřicího zařízení jsou definovány v tomto rozsahu:

- systém managementu měření (zahrnuje i metrologický certifikační systém pro měřicí zařízení a požadavky na řízení procesů měření),
- analýza systému měření (MSA) nebo
- vhodnost kontrolních měřidel (VDA).

Efektivní systém managementu měření zabezpečuje odpovídající způsobilost měřicího zařízení i procesů měření a je významný z hlediska dosažení odpovídající kvality produktu a řízení rizika nesprávných výsledků měření.

Cílem systému managementu měření je schopnost řídit na přijatelné úrovni rizika, že výstupem měřicího zařízení a procesu měření by mohly být nesprávné výsledky. Riziko nesprávných výsledků musí být udržováno na úrovni přijatelné pro stabilní a způsobilý výrobní proces. [L21] [L22] [L32]

Monitorování procesů, jejich měření a vyhodnocování představuje důležitou složku realizace kvality. Často se požaduje schopnost prokázat, jakým způsobem je zabezpečena kvalita měřicího systému a jakým způsobem je řízen proces měření. Mnohdy již nestačí, aby se prokázala kvalita procesu měření aplikací požadavků na zabezpečování kvality měřicího zařízení podle norem [L22].

## 7 Metrologické meze využití metody měření

Celý měřicí systém obsahuje přístroje, které měří danou veličinu. Způsob, jak je měřicí systém instalován a provozován, může mít v některých případech velký vliv na hodnotu sledované veličiny. Proto se musí na stanovišti obsluhy (kontrola operátorů) zachovávat standardní podmínky, tj. musí být zajištěny stejné montážní (instalace) a provozní podmínky, aby byla zajištěna minimalizace rozdílů.

U veličin, kde je hodnota závislá na okolní teplotě, musí být okolní teplota ve zkušebním prostředí podle příslušné normy.

Použité přístroje mají mít práh citlivosti, který v případě přímého měření umožní naměření nejméně 10-krát citlivěji hodnotu než je očekávaná variabilita měřicího procesu (např. možnost měření napětí voltmetrem s přesností  $\pm 0,1$  V, je-li předpokládána variabilita procesu měření napětí řádově  $\pm 1$  V).

Metrologická confirmace musí zajistit, že metrologické charakteristiky měřicího zařízení budou splňovat metrologické požadavky na proces měření. Metrologické charakteristiky měřicího vybavení mohou být podle měřicího vybavení charakterizovány rozsahem, chybou správnosti/přesností, stálostí, hysterezí, driftem, rozlišitelností, prahem citlivosti atd.

## 8 Kontrola měřidla před použitím a příprava na měření

Každý měřicí i kontrolní systém (viz §3 zákona 505/1990 Sb. O metrologii v platném znění a vyhláška č. 345/2002 v platném znění) musí být kontrolovány ověřením nebo kalibrací. U stanovených měřidel je doba ověření uvedena ve vyhlášce č. 345/2002.

### 8.1 Shromáždění informací o měřeném výrobku

Při řešení MSA musí mít měřené výrobky, měřicí systémy i prostředí a operátoři po celou dobu experimentu zajištěné konstantní podmínky. Musí být omezeny takové podmínky, které mají nepříznivý vliv na výsledky měření (např. změny hluku, vysoké/nízké teploty, silná elektrická nebo magnetická pole).

### 8.2 Definování kontrolních bodů a polohy pozorovatele

Při řešení MSA pracují všichni operátoři ve stejné poloze vůči měřicímu zařízení i měřenému dílu.

### 8.3 Příprava měřené soustavy

Před měřením musí být připraven plán řešení MSA podle konkrétních podmínek (počet opakování, počet dílů, počet měřicích systémů, počet operátorů apod.)

### 8.4 Příprava měřicího přístroje

Měření se provádí stanovenými nebo pracovními měřidly, která mají platné ověření nebo kalibraci. Před měřením provádíme vizuální kontrolu přístroje a provede se v případě potřeby i interní kontrola nastavení přístroje.

## 9 Postup měření

### 9.1 Doplnkové měření

Toto měření se provádí pouze v případě, kdy je nutné doplnit nějaké chybějící informace.

### 9.2 Hlavní měření

Měření se provádí podle metodiky MSA, pro stanovení R&R měřidla je navržena metoda založená na hodnocení průměru a rozpětí, tj. způsob, kterým se získá jak odhad opakovatelnosti, tak reprodukovatelnosti systému měření.

1. **krátký experiment**, založený na rozpětí, kde se doporučuje:

počet vzorků  $g = 5$

počet operátorů  $k = 2$

počet měření  $j = 1$

Pro každý vzorek se určí rozpětí  $R_i$ .

Pro každý vzorek  $a$  a operátora  $k$  se určí rozpětí  $R_{ik}$  z  $j$  naměřených hodnot, viz (4.27)

Průměrné rozpětí jednotlivých operátorů (každý změřil  $g$  vzorků), viz (4.28)

Celkové průměrné rozpětí všech operátorů, viz (4.29)

Aritmetický průměr měření jednotlivých operátorů (každý změřil  $g$  vzorků), viz (4.30)

Aritmetický průměr  $\bar{x}_i$  každého  $i$ -tého vzorku, viz (4.31)

Celkový aritmetický průměr  $\bar{\bar{x}}$ , viz (4.32)

Aritmetický průměr  $\bar{x}_{ik}$  každého vzorku a operátora z  $m$  replikací, viz (4.33)

Rozpětí  $R_k$  mezi operátory se určí z aritmetických průměrů, viz (4.34)

Rozpětí mezi vzorky, viz (4.35)

Opakovatelnost měřidla  $EV$  se určí podle vztahu, viz (4.36)

Reprodukovatelnost  $AV$  je dána vztahem, viz (4.37)

Kombinovaná opakovatelnost a reprodukovatelnost měřidla ( $GRR$ ) se určí součtem opakovatelnosti a reprodukovatelnosti, viz (4.38)

Variabilita mezi vzorky  $PV$  (Part Variation), viz (4.39)

Celková variabilita  $TV$  (Total Variation) je dána součtem rozptylů opakovatelnosti, reprodukovatelnosti a variability mezi jednotlivými vzorky: viz (4.40)

Jednotlivé variability je někdy výhodnější vyjádřit procentuálně. V takovém případě jsou údaje vztaženy k celkové variabilitě  $TV$ ., viz (4.41)

Ukazatele způsobilosti se obecně určí podle vztahů, viz (4.42) a (4.43).

**2. úplný experiment**, založený na průměru a rozpětí (toto je experiment, kde se dá použít ANOVA a testovat interakce i mezi operátorem a jednotkou - vzorkem)

počet vzorků  $g = 10$ ,  
počet operátorů  $k = 3$   
počet měření  $j = 2$  nebo  $3$

*Poznámka:* Doporučuje se sice volit  $g > 15$ , ale obvykle se používá  $g = 10$ .

Výpočet se provádí pomocí stejných matematických vzorců, které jsou uvedeny v předchozím odstavci (krátký experiment).

Je vhodné vypracovat regulační diagramy, kde se uvádí na ose  $x$  jednotlivé vzorky, na ose  $y$  jednotlivé odchylky nebo rozpětí operátorů. Porovnáním diagramů jednotlivých operátorů lze získat informaci o přesnosti a správnosti jejich měření.

### 9.3 Vyhodnocení měření

V praxi se měření vyhodnocuje obvykle některým z validovaných software. Může se také postupovat podle vzorců uvedených v odst. 4.5.

Kvalita systému měření se hodnotí podle vypočtené hodnoty  $GRR$  (%), viz (4.38) a Tab. 3:

$GRR$ (%)	Kvalita systému měření
$GRR < 10$	system měření je přijatelný
$10 \% < GRR < 30 \%$	system může být přijatelný (doporučuje se provést analýzu nákladů)
$GRR > 30\%$	system je nepřijatelný, je nutné jeho zlepšení

Ukazatele způsobilosti měřidel se určí podle vztahů, viz (4.42) a (4.43), při čemž se využívá Tab. 4 pro stanovení koeficientů podle daného výrobce. .

## 10 Stanovení nejistoty měření

### 10.1 Metodika stanovení nejistot měření

Nejistota měření se vyhodnocuje obvyklým způsobem podle druhu měřené veličiny (nejistota typu A, typu B, kombinovaná nejistota  $u_c$  a rozšířená nejistota  $U$ ).

Rozšířená nejistota závisí na pořadovém stupni konfidence. Pokud je konfidenční interval 95 % a předpokládáme pravděpodobnostní rozdělení normální, je činitel rozšíření  $k = 2$ .

### 10.2 Příklady výpočtu některých charakteristik

#### Rozlišovací schopnost měřicího systému

Je doporučeno, aby krok měření byl maximálně 0,1 šířky pásma  $6\sigma$  tohoto procesu.

#### Stabilita (stability)

Stabilizovaný proces měření je ve statisticky zvládnutém stavu vzhledem k parametru polohy, kontroluje se pomocí regulačních diagramů.

#### Homogenita (homogeneity)

Na  $g$  místech referenční hodnoty  $x_{ref(i)}$  provozního rozsahu měřidla se provedou opakovaná měření o rozsahu  $n_i = (25 - 50)$ , celkem je změřeno  $n = gn_i$  hodnot. [L30]

#### Strannost, vychýlení (bias)

Podmínka pro stanovení strannosti: data se získávají z provozního měření za podmínek opakovaného měření v krátkém časovém úseku, na identickém produktu/dílu, pevně stanoveným postupem, stejnou obsluhou, na stejném přístrojovém vybavení a stejném měřicím místě. Pro stanovení strannosti by mělo být provedeno  $n = 50$  měření (nejmenší počet měření = 25). [L30]

#### Linearita (linearity)

Pro odhad linearity musí být změřeno nejméně 5 vzorků, jejichž hodnoty měřené veličiny jsou v závislosti na rozptylu měřicího procesu rozloženy v celém pracovním rozsahu měřidla. Přesnějším měřidlem se zjišťují referenční hodnoty  $x_{ref(i)}$  všech  $i$  vzorků, kde  $i = 1 \dots g$ .

Každý vzorek musí být změřen následně nejméně 10 až 12-krát. [L30]

#### R&R měřidla

Metoda založená na hodnocení průměru a rozpětí je způsob, kterým se získá jak odhad opakovatelnosti, tak reprodukovatelnosti systému měření.

Measurement Systems Analysis Reference Manual uvádí dva typy návrhů.

1. krátký experiment, založený na rozpětí, kde se doporučuje:

počet vzorků  $g = 5$

počet operátorů  $k = 2$

počet měření  $j = 1$

Pro každý vzorek se určí rozpětí  $R_i$ .

2. úplný experiment, založený na průměru a rozpětí (toto je experiment, kde se dá použít ANOVA a testovat interakce i mezi operátorem a jednotkou - vzorkem)

počet vzorků	$g = 10,$
počet operátorů	$k = 3$
počet měření	$j = 2$ nebo 3.

### Způsobilost měřidel

Hodnocení měřidel se provádí před použitím měřicího zařízení. Měření provádí jeden pracovník jedním měřidlem v místě používání, při čemž provede 50 opakovaných měření (minimálně 25 měření). Indexy způsobilosti měřidel a měřicího procesu se stanoví z hodnot, zjištěných měření vzorků pomocí etalonu. Výpočet se provede dle rovnice (4.42) a (4.43) s využitím koeficientů v *Tab. 4*.

## 11 Záznamy o měření

**Protokol o provozním měření způsobilosti** má mít jedinečné kódové označení pro jeho jednoznačnou identifikaci. Jednotlivé strany protokolu mají být očíslovány.

Příklad struktury protokolu o provozním měření, viz níže.

### A. Identifikační údaje

- A1 Název projektu;
- A2 Druh měření (měřené veličiny, typ měření);
- A3 Objednatel;
- A4 Zpracovatel;
- A5 Osoby provádějící měření;
- A6 Datum a čas měření.

### B. Podklady

- B1 Seznam vstupních podkladů (projektová dokumentace, fotodokumentace);
- B2 Seznam použitých technických norem a právních předpisů.

### C. Prostředí, okolí

- C1 Popis posuzovaného místa, měřidel, popř. operátorů;
- C2 Výrobky, na kterých se měření provádí (typ, označení, atd.).

### D. Měřená soustava

- D1 Popis zdroje nebo zdrojů zahrnutých do referenčních hodnot;
- D2 Popis provozních podmínek.

### E. Parametry prostředí

- E1 Popis meteorologických podmínek, pokud to měření vyžaduje (tlak, vlhkost);
- E2 Teplota prostředí.



**F. Měřicí přístroje**

F1 Hlavní měřicí přístroje (podle druhu měřené veličiny, typ, výrobce, číslo, ověření nebo kalibrace);

F2 Pomocné měřicí přístroje (teploměr, vlhkoměr apod.).

**G. Měření**

G1 Stav měřené soustavy;

G2 Typ měření, časové intervaly měření (referenční, dlouhodobý);

G3 Měřené charakteristiky, u kombinovaných jejich složky;

G4 Kontrolní měření;

G5 Naměřené (popř. korigované) hodnoty (tabulka);

G6 Nejistoty měření;

G7 Stanovení požadovaných korigovaných hodnot s vyjádřením rozšířené nejistoty.

**H. Vyhodnocení měření**

H1 Odstraní se všechna data, která obsahují nežádoucí události;

H2 Provede se úprava neúplných nebo poškozených dat;

H3 Stanoví se kombinovaná nejistota u jednotlivých charakteristik pro konkrétní měření;

H4 Porovnání výsledků s požadavky legislativy;

H5 Zhodnocení měření (zda vyhovuje/nehovuje měřicí systém/operátor pro daný druh měření);

H6 Podpis zodpovědné osoby.

**12 Péče o metodický postup**

Originál metodického postupu je uložen u jeho zpracovatele, další vyhotovení jsou předána příslušným pracovníkům podle rozdělovníku (viz čl. 13.1 tohoto postupu).

Změny, popř. revize metodického postupu provádí jeho zpracovatel. Změny schvaluje vedoucí zpracovatele nebo metrolog organizace.

**13 Rozdělovník, úprava a schválení, revize**

Uvedený příklad je pouze orientační a subjekt si může tuto dokumentaci upravit podle interních předpisů o řízení dokumentů.

**13.1 Rozdělovník**

Metodický postup		Převzal		
Výtisk číslo	Obdrží útvar	Jméno	Podpis	Datum

**13.2 Úprava a schválení**

Metodický postup	Jméno	Podpis	Datum
Upravil			
Úpravu schválil			

**13.3 Revize**

Strana	Popis změny	Zpracoval	Schválil	Datum

**Upozornění**

Tento metodický postup je třeba považovat za vzorový. Doporučuje se, aby jej organizace přizpůsobila svým požadavkům s ohledem na své metrologické vybavení a konkrétní podmínky.