



Česká metrologická společnost, z.s.

Novotného lávka 5, 110 00 Praha 1

Tel: 221 082 254, 606 957 233

e-mail: cms-zk@csvts.cz

www.spolky-csvts.cz/cms

Metodika provozního měření

MPM 5.1.1/03/25

ASPEKTY PROCESŮ MĚŘENÍ

Praha

Říjen 2025

Vzorový metodický postup byl zpracován a financován ÚNMZ v rámci Plánu standardizace – Program rozvoje metrologie 2025

Číslo úkolu: VII/3/25

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

Metodika řeší vhodnost měřicích systémů a procesů měření pro případ, kdy je pro měřený znak předepsaná tolerance. Základem pro výpočet vhodnosti je nejistota měření, která je následně zohledněna při prokazování shody se specifikovanými požadavky.

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 výběrů	[L11]
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, 3. vydání, 2021	Procesy měření a zkoušení	[L29]
MSA, 4. vydání, 2001	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]
Vydavatelství ZČU 2005	Elektrická měření – metody	[L33]
BEN 2009	Metrologie a hodnocení procesů	[L34]
MPM 0.0.1/01/24	Metodika řešení způsobilosti měřidel a měření podle MSA	[L35]
MPM 0.0.1/02/24	Řešení vhodnosti měřidel a měření podle VDA	[L36]

3 Kvalifikace pracovníků provádějících analýzy procesů měření

Kvalifikace pracovníků provádějících analýzu vhodnosti použití měřidel, měřicích systémů a procesů měření 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, zároveň by měli mít i určité teoretické znalosti, které jim umožní lépe rozpoznat správné řešení.

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

4 Názvosloví, definice

4.1 Obecně o měření

Průkopníkem svobodného vědeckého zkoumání a zakladatelem měření/experimentu je **Galileo Galilei** (15. 2. 1564, Pisa – 8. 1. 1642, Arcetri, Toskánsko), jehož citát zní:

" Měř, co měřitelné je a co není, měřitelným učin. "

Významným pokračovatelem v oboru experimentů byl **Michael Faraday** (22. 9. 1791, Newington, Anglie – 25. 8. 1867), který za svůj život provedl více než 3400 experimentů z různých oborů.

Ve 20. a 21. století jsou vědci opatrnější, jak uvádí např. **John von Neumann** (28. 12. 1903 Budapešť, Rakousko-Uhersko - 8. 2. 1957 Washington, D.C., USA):

" Jediné, co je jisté v experimentu, je výstupní (sekundární) informace z měřeného řetězce, z níž se naší ideovou konstrukcí a transformací dobíráme požadované primární informace na vstupu měřicího řetězce." [L33]

Měření je obvykle chápáno jako soubor experimentálních, popř. výpočetních operací, kterými získáváme pomocí měřicího zařízení (jakožto prostředku měření) za určitých měřicích podmínek hodnotu měřené veličiny.

Na měření jako technickou disciplínu je možno se dívat ze dvou hledisek. Na jedné straně to je teorie poznání, na druhé straně teorie informací. Odtud také vyplývá dosavadní nejednotnost v definování předmětu měření:

a) Měřením se rozumí proces kvantitativního určení dané veličiny v jednotkách

kvalitativně stejné veličiny (např. elektrický proud procházející vodičem v ampérech), výsledek měření uvádí jako součin číselné hodnoty a jednotky (např. 220,5 V).

b) Měřením se rozumí proces jisté transformace tvaru vstupní informace na jiný tvar výstupní informace. [L34]

Informace je třetí základní univerzální veličinou v současném světě vedle hmoty a energie. S informacemi se v různé podobě setkáváme v technických i přírodních oblastech, v živých i neživých systémech. Informace a jejich zpracovávání je běžné v měřicí i regulační technice, v lidské komunikaci i v biologických systémech včetně přenosu dědičné informace pomocí DNA. Informace má ve své podstatě nehmotný charakter, podobně jako myšlenka, nápad, apod. [L34]

V procesu získávání informace, při komunikaci mezi zdrojem a příjemcem informace dochází k určitým ztrátám. Tyto ztráty mají charakter ztráty energie nebo hmoty a jsou základní příčinou chyb, odchylek nebo nejistot. Vnější cizí energetická a hmotná pole navíc ovlivňují tento proces a způsobují jeho rušení.

Zdrojem chyb je také pozorovatel svými představami o měřeném objektu či jevu, předpoklady o modelech, použitých pro zjednodušení reality, a zvolených technických prostředcích. V neposlední řadě hraje roli i interpretace výsledků měření.

Nositelé žádaných informací jsou signály se svými parametry. Ve fyzikálně-technických měřeních mají signály na začátku a na konci procesu měření obecně různou povahu. Na příklad v [L34] se uvádí soubor osmi různých druhů signálů, označený zkratkou CO-METMAN (Chemické, Optické, Mechanické, Elektrické, Tepelné, Magnetické, Akustické a Nukleární). Jiným hlediskem může být rozdělení signálů na periodické, aperiodické a náhodné, nebo dle jejich tvaru na analogové, frekvenční a digitální.

4.2 Měření a neurčitost

Součástí vědy a vědeckého poznání je experiment, jeho realizace a vyhodnocení. Jedná se o metodu vědeckého poznání, při které se za určitých předem daných nebo řízených podmínek zkoumají jevy reálného světa. Experiment se uskutečňuje na základě určité teorie, jejíž platnost ověřujeme. Ve vědě se využívají různé typy experimentů, přičemž nejjednodušší je kvalitativní experiment, jehož cílem je zjištění přítomnosti či nepřítomnosti určitého jevu. Složitější jsou pak kvantitativní experimenty, které zahrnují měření vlastností zkoumaných jevů.

Musíme si uvědomit, že při realizaci experimentů se některé problémy zjednodušují a idealizují, abychom byli schopni realitu matematickými prostředky popsat a technickými prostředky realizovat. Tím ale zaměňujeme naše představy za skutečnost.

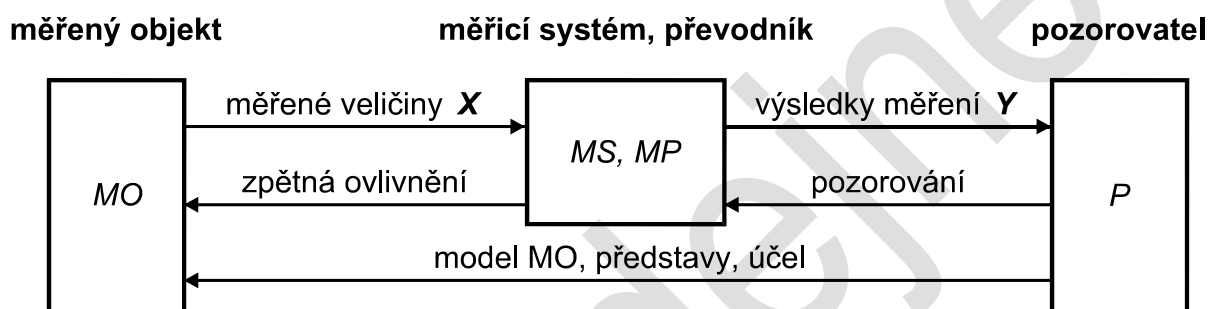
Na druhé straně je provedení experimentu i jeho vyhodnocení zatížené jistou neurčitostí, chybou či nejistotou, čímž může být omezena platnost požadovaného potvrzení dané hypotézy. Do této problematiky patří i respektování konečného rozlišení prostředků měřicí techniky, ale i nemožnost realizovat požadované opakování experimentu ve stejném čase. Proto už v minulosti byla podmínka opakování experimentu za „stejných“ podmínek provedena s vyloučením podmínky času a hodnocena statistikou výsledků.

Měření má přirozeně značný význam nejen ve výrobě a výzkumu, ale i v každodenním životě. V souvislosti s rozvojem moderní techniky a jejího řízení vzrůstá význam elektrických měření, zvláště tam, kde výstupní informace o měřených veličinách jsou, nebo je lze snadno převést na tvar vhodný pro přenos na velké vzdálenosti a pro hromadné zpracování moderní výpočetní technikou. [L34]

4.3 Model procesu měření a měřicího systému

Proces měření (obr. 4.1) lze obecně charakterizovat jako určitou transformaci souboru vstupních veličin X do souboru výstupních veličin Y , který představuje výsledek měření. V tomto modelu jsou obsaženy ovlivňující veličiny:

- připojení k měřenému objektu, a tím jeho zpětné ovlivnění,
- vnější rušení měřícího signálu,
- nedostatky a chyby transformace vstupní veličiny na výstupní $X \rightarrow Y$,
- subjektivita pozorovatele (způsobená představami o měřeném objektu, tvorbě modelu objektu, apriorními informacemi atd.).



Obr. 4. 1: Obecný model procesu měření [L34]

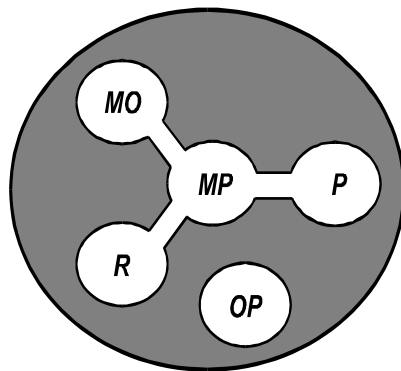
Pro vlastní měřicí systém se vytvářejí z různých hledisek různé modely. Z hlediska funkce jednotlivých modulů, které dohromady tvoří tzv. funkční model měřicího systému, se provede sériové řazení modulů pro sběr dat a informací, úpravu signálů, jejich zpracování, analýzu, prezentaci a archivaci výsledků měření.

Při měření je důležitý i lidský faktor. Často mohou vzniknout chyby pozorovatele způsobené nesprávným čtením údaje, chybným zaokrouhlením výsledku měření apod. Způsob měření má velký význam na pracovištích, kde mohou vznikat havarijní situace. Zde má význam nasazení automatizované výpočetní techniky.

Výsledek měření je údaj měřicího přístroje nebo výsledek získaný vyhodnocením údajů několika přístrojů. Tato hodnota nemůže být nikdy skutečnou hodnotou měřené veličiny, protože každé reálné měření je zatíženo nejméně chybou měřicího přístroje a chybou měřicí metody. Proto se pracuje s výsledky měření jako s přibližnými hodnotami.

Při analýze procesů měření je nutné řešit zejména chyby a nejistoty jednotlivých měřicích přístrojů, měřicích řetězců i celého procesu měření.

Objektově orientovaný přístup k tvorbě modelu měřicího systému obsahuje pět hlavních objektů – subsystémů, které reagují navzájem mezi sebou (obr. 4.2).



MOměřený objekt

MP.....měřicí přístroj, převodník apod.

Ppozorovatel

Rreference, etalon, standard

OPokolní pracovní prostředí

Obr. 4. 2: Hlavní objekty měřicího systému [L34]

4.4 Přesnost měření a měřicích přístrojů

Úvodem je třeba zdůraznit všeobecný rys měření: měřicím zařízením a zvolenou metodou se na měřeném objektu určuje velikost jisté veličiny. Vlivem zpětného působení měřicího zařízení na měřený objekt dochází vždy ke změnám poměrů v měřeném objektu. To je důvod, proč nelze změřit skutečnou hodnotu dané veličiny. Při každém reálném procesu měření dochází k chybám. S výsledky měření se pak musí zacházet vždy jako s přibližnými hodnotami a v tom smyslu je také zpracovávat.

Otázkám určování chyb přibližných výpočtů, numerickým a grafickým metodám matematické analýzy je věnována řada příruček a monografií. Proto je zde uveden jen stručný souhrn, nezbytně nutný pro většinu měření.

Přesnost celého měřicího procesu je souhrnem přesnosti měřidla, přesnosti měřicí 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 měřicího zařízení na měřený objekt dochází vždy ke změnám 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 proto musí zacházet vždy jako s náhodnými (přibližnými) hodnotami**, a v tom smyslu je také zpracovávat. [L33]

4.4.1 Rozdělení chyb podle příčiny vzniku

a) Chyby metody (Δ_m, δ_m): jsou většinou korigovatelné, neboť jde o systematické chyby (způsobené volbou postupu měření, provedením zapojení apod.), které vznikají vzájemným působením měřicího přístroje a měřeného obvodu:

- zapojením přístroje do obvodu se připojí do obvodu přidavný rezistor, kondenzátor nebo cívka (podle charakteru daného měřicího přístroje),
- měřicí přístroj koná v obvodu práci, a proto odebírá energii z měřeného signálu.

Spotřeba přístroje bývá udána výrobcem ve wattech, VA, Ω/V , apod.).

b) Chyby měřicích přístrojů (základní a přídavné) jsou dány vlastnostmi přístrojů a nedokonalostí jejich výroby i vlivem okolí.

Základní chyby měřicích přístrojů jsou zahrnuty v třídě přesnosti. Je to maximální možná chyba, pokud se přístroj používá podle pokynů a za podmínek udaných výrobcem (teplota, tlak, a vlhkost vzduchu, cizí elektromagnetické pole, poloha, druh měřených veličin apod.). Pokud nejsou nebo nemohou být dodrženy podmínky stanovené výrobcem, dochází k přídavným chybám, které mohou i několikanásobně převýšit chyby základní.

c) Chyby členů měřicího obvodu jsou způsobeny nepřesnostmi vyrovnání a kalibrace etalonů (napětí, odporu, kapacity). 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 apod.

e) Chyby čtení jsou způsobeny pozorovatelem, který čte údaj měřicího přístroje.

f) Celkové chyby měření jsou výsledkem většího počtu dílčích chyb. Obvykle se počítá s největšími možnými chybami měření $\Delta_{\max}$. Skutečná hodnota S se vyskytuje v intervalu $S = N \pm \Delta_{\max}$, s pravděpodobností $P=100\%$.

4.4.2 Rozdělení chyb podle zdrojů

Tyto chyby se dělí na objektivní, protože jsou způsobené objektivními příčinami a na chyby subjektivní, které jsou zaviněné obsluhou.

4.4.3 Rozdělení chyb podle způsobu výskytu

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

Při opakování téhož experimentu mají **systematické chyby** stále stejné matematické znaménko, zůstávají konstantní nebo se mění předvídatelným způsobem. Teoreticky můžeme tyto chyby eliminovat buď zavedením početních korekcí při zpracování výsledků měření, nebo úpravou měřicího systému, tj. odstraněním příčin vzniku této chyby či zavedením potřebné korekční veličiny. Prakticky jsou ovšem systematické chyby korigovatelné jen tehdy, známe-li příčiny a zákonitosti jejich vzniku nebo pokud je můžeme s jistou přesností určit kontrolním měřením. Obvykle jsou způsobeny členy v měřicím řetězci a měřicí metodou (např. spotřebou přístrojů, nepřesností etalonů, vlivem teploty, kmitočtu atp.). V praxi se ovšem setkáváme se systematickými chybami, které mohou být značně velké a přitom nejsou korigovatelné. To nastává, pokud není k dispozici

přesnější kontrolní metoda a nelze-li ani teoretickým rozbořem bezpečně určit příčiny systematické chyby. Referenční hodnotou veličiny pro systematickou chybu měření je pravá (nebo konvenční) hodnota veličiny nebo naměřená hodnota veličiny etalonu.

Příčiny **náhodných chyb** nejsou známy a jejich vliv lze zmenšit pouze opakovaným měřením za stejných měřicích podmínek. Při opakovaných měřeních se tyto chyby mění nepředvídatelným způsobem. Jsou způsobeny např. nepravidelným kolísáním teploty, změnou odporu vlivem oteplení vodiče průchodem proudem atd. Při opakování měření jsou tyto chyby rozloženy při normálním rozdělení symetricky kolem pravé (nebo konvenční) hodnoty veličiny. Referenční hodnotou veličiny pro náhodnou chybu měření je aritmetický průměr, který se získá teoreticky z nekonečného počtu opakovaných měření téže měřené veličiny.

Chyby hrubé (omyly) dosahují někdy takové velikosti, že zcela zkreslí a znehodnotí výsledek. Zpravidla jsou snadno rozeznatelné od ostatních chyb, a proto je nutné vyloučit je ze souboru naměřených hodnot.

4.4.4 Vyhodnocení náhodných chyb $N(0, \sigma^2)$

Gaussova křivka je grafickým vyjádřením rozložení náhodných chyb (viz obr. 4.3), má normální rozdělení $N(0, \sigma^2)$ a předpokládá, že platí Gaussův zákon, popsáný vztahem:

$$y = \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2(\Delta X)^2} \quad (4.4.1)$$

Kde: y je hustota rozdělení pravděpodobnosti, že nastane chyba velikosti ΔX ,

ΔX je velikost náhodné chyby,

h je míra přesnosti ($h = 1/\sqrt{2}\sigma$),

σ^2 je rozptyl normálního rozdělení.

Pro náhodnou chybu měření je referenční hodnotou veličiny aritmetický průměr, který by se získal z nekonečně velkého počtu opakovaných měření téže veličiny. Proto lze při velkém počtu opakovaných měření téže veličiny stanovit střední hodnotu, o které se očekává, že je rovna 0.

$$\text{Střední hodnota náhodných chyb: } \sum_{i=1}^n \Delta X_i = 0 \quad (4.4.2)$$

Pravděpodobná chyba určuje interval $\pm \Delta_p$, kde leží pravé hodnoty veličiny měřené veličiny s pravděpodobností $P = 50 \%$ platí:

$$\Delta_p = 0.675 \sigma \cong 0.675 \Delta_s \quad (4.4.3)$$

Směrodatná odchylka σ (ve starší literatuře zvaná střední kvadratická chyba Δ_s) určuje interval $\pm 1\sigma$, kde leží pravá hodnota měřené veličiny s pravděpodobností $P = 68,27 \%$ a

určuje polohu inflexního bodu.

$$\Delta_s = \sqrt{\frac{\Delta X_1^2 + \Delta X_2^2 + \dots + \Delta X_n^2}{n(n-1)}} \cong \sigma \quad (4.4.4)$$

kde n počet naměřených hodnot,

$\Delta X_i^2 = (\bar{X} - X_i)^2$ kvadrát rozdílu odchylek,

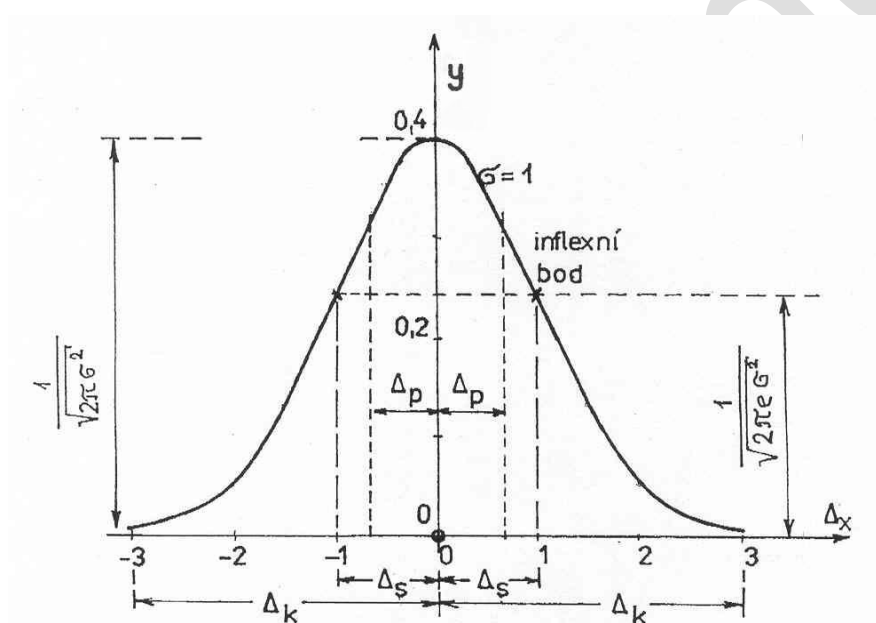
X_i i-tá naměřená hodnota,

$\bar{X}$ aritmetický průměr.

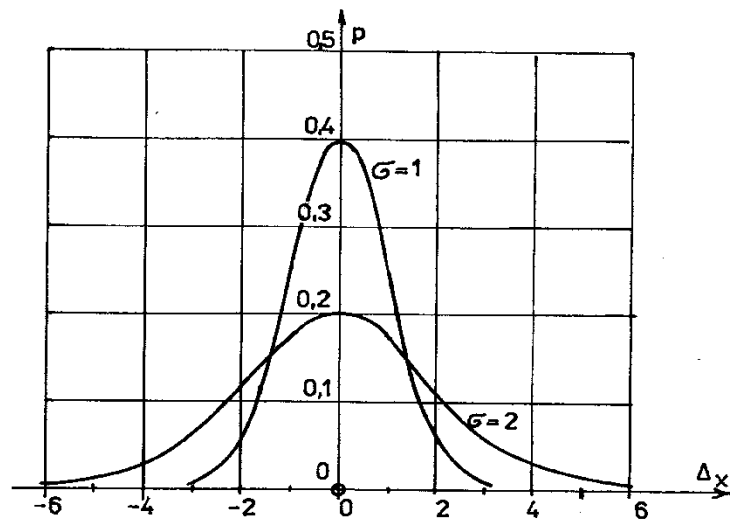
Krajní chyba Δ_K je obvykle definována:

$$\Delta_K = 3\sigma \cong 3\Delta_s \quad (4.4.5)$$

a určuje interval, kde leží pravá hodnota měřené veličiny s pravděpodobností $P = 99,7 \%$.



Obr. 4. 3: Gaussova křivka náhodných chyb s intervaly pravděpodobné chyby, směrodatné odchylky (střední kvadratické chyby) a chyby krajní [L33]



Obr. 4. 4: Gaussova křivka normálního rozložení náhodných chyb $N(O, \sigma^2)$, průběh výsledků měření se směrodatnými odchylkami ($\sigma = 1$) a ($\sigma = 2$). [L33]

4.5 Chyby měření

Výsledky měření se získávají buď přímo, tj. čtením měřicího přístroje, nebo nepřímo, tj. dosazením zjištěných hodnot do příslušného matematického vztahu. Podle toho se měření dělí na přímá a nepřímá.

4.5.1 Chyby naměřených hodnot

Hodnotu veličiny, kterou zjistíme danou měřicí metodou a která reprezentuje výsledek měření, značíme jako naměřenou N . Hodnotu pravou (skutečnou), kterou zjistíme přesnější metodou, teoretickým výpočtem nebo je dána definicí veličiny, označíme S . [L33]

Mezi nimi existuje vztah:

$$S = N - \Delta \quad (4.5.1)$$

Absolutní chyba naměřené veličiny: je definovaná jako naměřená hodnota veličiny minus referenční hodnota:

$$\Delta = N - S \quad (4.5.2)$$

Korekce (oprava) vyjadřuje kompenzaci systematického vlivu a vyjadřuje vztah mezi naměřenou a pravou (skutečnou) hodnotou:

$$K = S - N = -\Delta \quad (4.5.3)$$

Skutečná relativní chyba měření

$$\delta = \frac{\Delta}{S} 100 \quad (\%) \quad (4.5.4)$$

Aby mělo měření smysl, volíme takovou měřicí metodu, kdy předpokládáme, že $\delta \rightarrow 0$.

Při přesnějším měření je $N \cong S$, takže relativní chybu lze pak počítat i podle vztahu:

$$\delta = \frac{\Delta}{N} 100 \quad (\%) \quad (4.5.5)$$

Relativní chyba může být udána i v ppm.

Pravá (skutečná) hodnota S měřené veličiny obvykle není předem známa a nelze potom přímo ani určit velikost chyby. Pokud je výsledkem měření řada přibližných hodnot, jejichž mezní velikosti jsou N_l a N_n , lze použít místo skutečné hodnoty S hodnotu S' ,

$$S' = 0,5 (N_l + N_n) \quad (4.5.6)$$

která se nazývá střední aproximace.

V některých případech lze jako odhad skutečné hodnoty využít medián Me .

4.5.2 Chyby přímých měření

Protože výsledek přímých měření se získá čtením údaje příslušného měřicího přístroje, je i největší možná absolutní chyba měření Δ_T rovna součtu absolutní chyby údaje měřicího přístroje Δ_u a absolutní chyby metody Δ_m :

$$|\Delta_T| = |\Delta_u| + |\Delta_m| \quad (4.5.7)$$

Největší možná relativní chyba měření je ale vztažena k naměřené hodnotě N :

$$\delta_T = \frac{\Delta_T}{N} \cdot 100 \quad (\%) \quad (4.5.8)$$

4.5.3 Chyby nepřímých měření

Při nepřímém měření je výsledek dán nějakou matematickou funkcí několika nezávisle proměnných. Jejich hodnoty jsou obvykle zjištěny přímými měřeními, která jsou zatížena určitými chybami.

Je-li měřená veličina Y dána funkcí $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$, pak absolutní chyba měřené veličiny Y je přibližně rovna vztahu:

$$|\Delta_{(Y)}| = \left| \frac{\partial f}{\partial X_1} \Delta_{(X_1)} \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial X_2} \Delta_{(X_2)} \right| + \dots + \left| \frac{\partial f}{\partial X_n} \Delta_{(X_n)} \right| \quad (4.5.9)$$

Z dané rovnice lze určit pravidla pro určení absolutních nebo relativních chyb při základních matematických operacích.

Tab. 4.1: Stanovení relativních chyb u nepřímých měření funkce $Y = f(A, B)$

Funkce	Relativní chyba
$Y = A + B$	$\delta_Y = \frac{\Delta_A + \Delta_B}{A + B}$
$Y = A - B$	$\delta_Y = \frac{\Delta_A + \Delta_B}{A - B}$

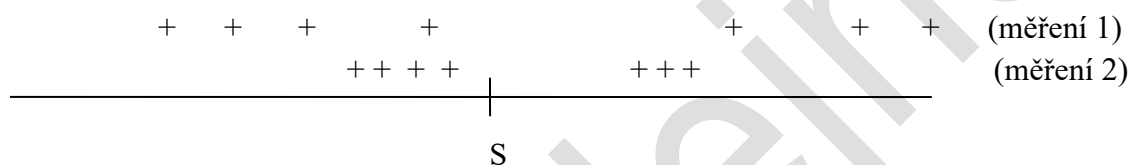
$Y = A \cdot B$ nebo $Y = A / B$	$\delta_Y = \delta_A + \delta_B$
$Y = A^n$	$\delta_Y = n \cdot \delta_A$
$Y = \sqrt[m]{A}$	$\delta_Y = \frac{1}{m} \delta_A$

4.5.4 Výsledky opakovaných měření

Pro zpřesnění měření (abychom určili výsledek co nejbližší pravé hodnotě S), opakuje se měření za stejných podmínek několikrát. Výsledky jednotlivých měření (označené $+$) mohou být vůči pravé hodnotě S různé.

Příklady některých uspořádání výsledků měření.

a) **výsledky nejsou přesné**, je-li shoda naměřených hodnot s pravou hodnotou veličiny špatná.



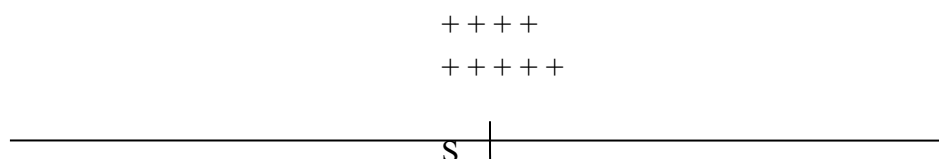
Poznámka: je patrné, že výsledky měření 1 i měření 2 budou mít přibližně stejnou střední hodnotu, ale kvalita měření je odlišná. Proto je důležitější směrodatná odchylka měření než aritmetický průměr výsledků. A to je také důvod, proč regulační diagramy měřením (viz MPM 5.1.1/01/25) vyhodnocují nejen střední hodnotu podskupiny, ale i variabilitu jednotlivých podskupin.

b) **výsledky jsou sice precizní ale nesprávné**, jestliže je těsnost shody mezi naměřenými hodnotami, ale jejich aritmetický průměr se výrazně liší od skutečné hodnoty S .



Poznámka: pokud není srovnání s výsledky získanými přesnější metodou a neznáme teoretický výpočet, nemusíme zjistit systematickou chybu měření.

c) **výsledky jsou pravdivé (správné)**, protože existuje těsnost shody mezi aritmetickým průměrem a referenční (pravou) hodnotou veličiny S .



d) **výsledek odlehlý** (výrazně se liší od ostatních).

+++++

+

$\bar{S}$

Poznámka: zjišťuje se, zda krajní výsledek patří/nepatří do souboru naměřených dat (např. metoda $\pm 4s$) a podle výsledku se postupuje dál.

Jak je uvedeno již v odst. 4.4.3 opakováním měření za stejných podmínek snižujeme součet náhodných chyb na minimum (neznáme jejich původ ani zákonitost), při $n \rightarrow \infty$ je jejich součet roven 0.

Výběrový aritmetický průměr naměřených hodnot veličiny, pokud není zatížen systematickou chybou metody, je definován jako nejlepší odhad pravé hodnoty μ (konvenční hodnoty) měřené veličiny:

$$\bar{X} = \frac{1}{n}(X_1 + X_2 + \dots + X_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \approx \mu \quad (4.5.10)$$

kde n počet prvků ve výběru,
 i i-tý prvek náhodného výběru.

Stejným způsobem lze určit i aritmetický průměr náhodných chyb:

$$\Delta \bar{X} = \frac{1}{n}(\Delta X_1 + \Delta X_2 + \dots + \Delta X_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta X_i \quad (4.5.11)$$

4.6 Měřicí přístroje analogové a digitální

Výrobce garantuje určité meze chyb měřicích přístrojů (tzv. **chyby základní**), pokud jsou tyto přístroje používány podle stanovených metrologických požadavků a za specifických podmínek udaných výrobcem. Pokud nejsou nebo nemohou být dodrženy podmínky stanovené výrobcem, dochází k **přídavným chybám**, které mohou i několiknásobně převýšit chyby základní.

Chyby měřicích přístrojů (absolutní Δ_p i relativní δ_p) jsou dány vlastnostmi měřicích přístrojů a nedokonalostí výroby. [L33]

4.6.1 Chyby analogových přístrojů

Základní chyby analogových měřicích přístrojů jsou zahrnuty v třídě přesnosti. **Třída přesnosti** je vyjádřena jako maximální možná relativní chyba, pokud se přístroj používá podle stanovených metrologických požadavků výrobce určených k udržení chyb měření a za specifických vztažných podmínek udaných výrobcem 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 přídavnou chybou změn údaje:

$$\delta_u = \delta_p + \sum \delta_z \quad (4.6.1)$$

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.

Třída přesnosti měřicího přístroje TP udává mez dovolené poměrné chyby přístroje δ (%), určené za tzv. vztažných podmínek.

Třída přesnosti se určí jako poměr absolutní chyby a naměřené hodnoty vyjádřené v %. Touto naměřenou hodnotou může být:

- | | |
|--------------------------------------|---|
| a) měřicí rozsah | M (používá se nejčastěji) |
| b) skutečná hodnota měřené veličiny | S (např. vibrační kmitoměry) |
| c) délka stupnice měřicího přístroje | l (poměrové přístroje a přístroje se stupnicí logaritmickou nebo hyperbolickou) |

Podle toho se provádí i značení:

$$a) \quad TP = \delta_{pM} = \frac{\Delta_p}{M} 100 \text{ (%)}$$

např. 1,5 (4.6.2)

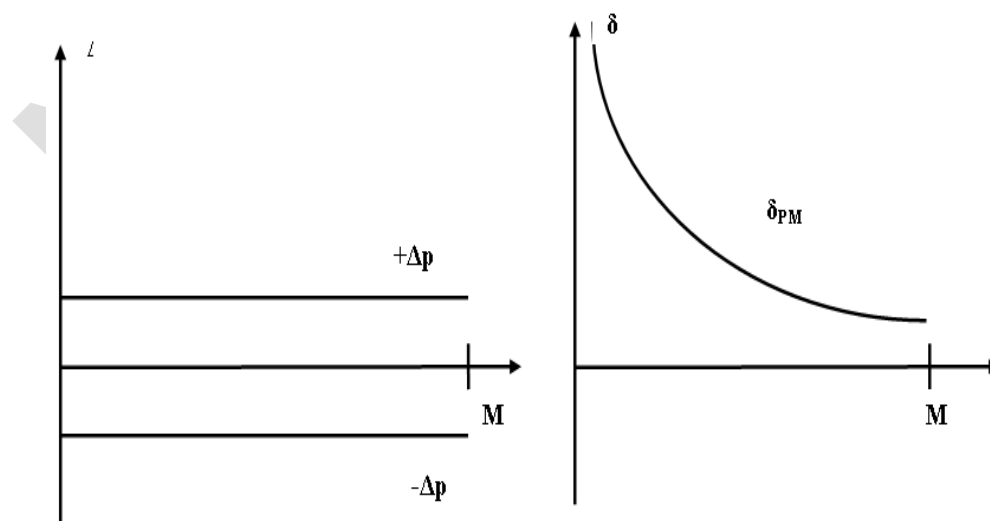
$$b) \quad TP = \delta_{pS} = \frac{\Delta_p}{S} 100 \text{ (%)}$$

1,5 (4.6.3)

$$c) \quad TP = \delta_{pl} = \frac{\Delta_l}{l} 100 \text{ (%)}$$

1,5 (4.6.4)

V praxi se setkáme nejčastěji s třídou přesnosti typu a).



Obr. 4. 5: Závislost absolutní a relativní chyby analogového přístroje (třída přesnosti vztažena k rozsahu M) [L33]

4.6.2 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:

$$\Delta_{\text{celk}} = \Delta_{\text{čtení}} + \Delta_{\text{rozsahu}} = \pm (x \% \text{ z údaje měřené hodnoty} + y \% \text{ z měřicího rozsahu}) \quad (4.6.5)$$

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

Základní chyba relativní:

$$\delta_{\text{celková}} = \delta_{\text{čtení}} + \delta_{\text{rozsahu}} \quad (4.6.6)$$

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 (měsíc, 3 měsíce nebo 1 rok).

Absolutní chybu digitálních přístrojů lze vyjádřit dvěma způsoby, a to:

$$a) \quad |\Delta_{\text{celková}}| = \left| \frac{\delta_1}{100} \cdot U_x \right| + \left| \frac{\delta_2}{100} \cdot U_M \right| = |\Delta_1| + |\Delta_2| \quad (4.6.7)$$

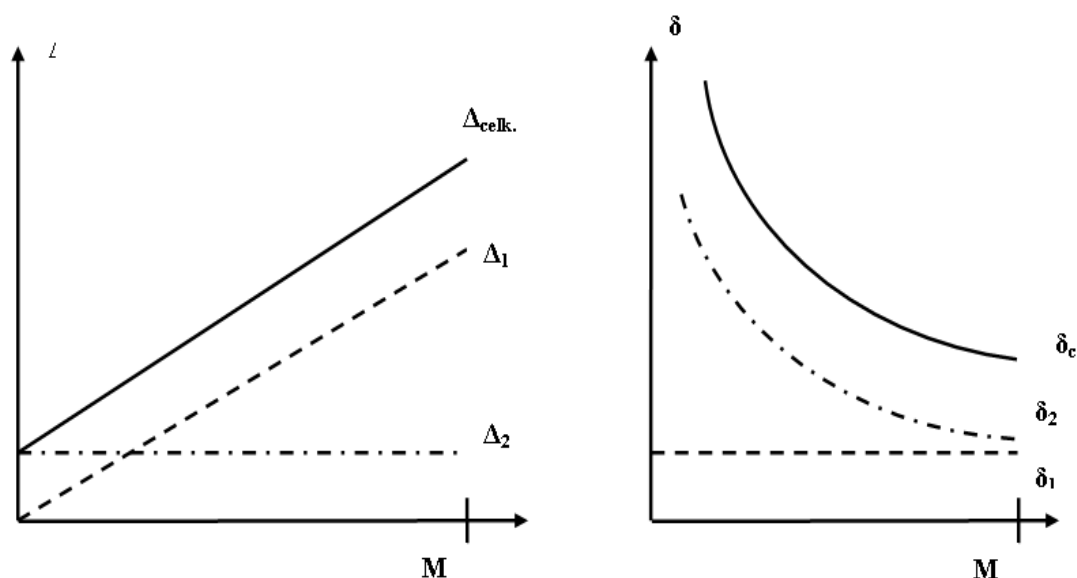
kde δ_1 je relat. chyba v % U_x (údaje měřené veličiny),

δ_2 je relat. chyba v % U_M (hodnoty měřicího rozsahu).

$$b) \quad \Delta_{\text{celková}} = \pm \left(\frac{\delta_1}{100} \cdot U_x + \Delta_3 \cdot k \right) \quad (4.6.8)$$

kde δ_1 je relat. chyba v % U_x (údaje měřené veličiny),

Δ_3 je absolutní chyba udaná v počtu jednotek posledního místa číslicového zobrazovače, tj. počet kvantovacích kroků.



Obr. 4. 6: Závislost absolutní a relativní chyby digitálního přístroje [L33]

Rozlišitelnost AD/DA převodníků v měřicích systémech

AD a DA převodníky jsou důležitou součástí digitálního měřicího přístroje/měřicího systému.

LSB (Least Significant Bit) je u převodníků nejméně významný bit digitálního čísla, který má nejnižší váhu v jeho hodnotě a určuje jeho nejmenší možný přírůstek nebo pokles, např. o hodnotu 1 LSB, která u D/A převodníku odpovídá jedné jednotce referenčního napětí.

Tab. 4.2: Rozlišení měřicích systémů (AD a DA převodu)

počet bitů	počet úrovní 2^n	digit $D = \log 2^n$	LSB %	LSB ppm	LSB mV z $1V$	Dynam. rozsah - dB
n						
1	2	0,3	50,0000	500000,00	500,0000	6,0
2	4	0,6	25,0000	250000,00	250,0000	12,0
3	8	0,9	12,5000	125000,00	125,0000	18,1
4	16	1,2	6,2500	62500,00	62,5000	24,1
5	32	1,5	3,1250	31250,00	31,2500	30,1
6	64	1,8	1,5625	15625,00	15,6250	36,1
7	128	2,1	0,7812	7812,50	7,81250	42,2
8	256	2,4	0,3906	3906,25	3,90625	48,2
9	512	2,7	0,1952	1952,12	1,95212	54,0
10	1024	3,0	0,0976	976,56	0,97656	60,0
11	2048	3,3	0,0488	488,28	0,48828	66,0
12	4096	3,6	0,0244	244,14	0,24414	72,0

4.6.3 Ostatní elektrické měřicí přístroje

Do této skupiny se řadí všechny přístroje, které nepatří do skupiny ukazovacích přístrojů dle ČSN IEC 51 nebo do skupiny číslicových měřicích přístrojů.

U elektronických a speciálních přístrojů závisí vyjádření údaje chyby/nejistoty na výrobcí. Pokud mají tyto přístroje v sobě zabudován ukazovací přístroj (pro čtení údaje) s udanou třídou přesnosti, vztahuje se tato třída přesnosti pouze na ukazovací přístroj (indikátor), nikoliv na celý měřicí přístroj (např. měřič zkreslení apod.). Chyby/nejistoty této skupiny měřicích přístrojů je nutné vyhledat vždy v technické dokumentaci výrobce. [L33]

4.7 Nejistoty měření

V současné době se používá kromě termínu "chyba měření" častěji termín "nejistota měření". Již v roce 1992 vydaly ISO, IEC, OIML a BIPM: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, který je průběžně aktualizován.

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 odchýlovat od skutečné (konvenční) hodnoty, popř. je uvedena pravděpodobnost, s jakou se skutečná hodnota může nacházet v intervalu daném nejistotou. Mírou nejistoty je **směrodatná odchylka**.

4.7.1 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.

Výběrový aritmetický průměr, pokud není zatížen chybou metody, je definován jako nejlepší odhad střední hodnoty μ (konvenčně správné hodnoty) měřené veličiny:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} (X_1 + X_2 + \dots + X_n) = \sum_{i=1}^n X_i \quad (4.7.1)$$

Odhad rozptylu naměřených hodnot X_i náhodného výběru (výběrový rozptyl):

$$\hat{\sigma}^2(X_i) = s^2(X_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (4.7.2)$$

kde n je celkový počet prvků,
 i je i -tý prvek náhodného výběru.

Nejllepší odhad rozptylu střední hodnoty $\bar{X}$:

$$\hat{\sigma}^2 = s^2(\bar{X}) = \frac{s^2(X_i)}{n} = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (4.7.3)$$

Výběrová směrodatná odchylka s je definována jako druhá odmocnina z rozptylu, charakterizuje rozptýlení naměřených hodnot kolem výběrového průměru.

Směrodatná odchylka naměřených hodnot X_i náhodného výběru:

$$s(X_i) = \sqrt{s^2(X_i)} \quad (4.7.4)$$

Směrodatná odchylka výběrových průměrů = **nejistota typu A**

$$u_{AX} = s(\bar{X}) = \sqrt{\frac{s^2(X_i)}{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (4.7.5)$$

Pokud je počet opakovaných měření < 10 a není možné udělat kvalifikovaný odhad na základě zkušeností, je nejistota typu A určena vztahem

$$u_{AX} = k_S \cdot s(\bar{X}), \quad (4.7.6)$$

kde k_S je koeficient, jehož hodnota závisí na počtu měření.

Tab. 4.3: Závislost koeficientu k_S na počtu měření

POČET MĚŘENÍ	9	8	7	6	5	4	3	2
koeficient k_S	1.2	1.2	1.3	1.3	1.4	1.7	2.3	7.0

4.7.2. 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 zdroje 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. Pokud známe pravděpodobnostní rozdělení dílčího zdroje, pak provedeme výpočet nejistoty pomocí směrodatné odchylky tohoto rozdělení; pokud tomu tak není, pak využijeme pravděpodobnostní rozdělení rovnoměrné.

4.7.3 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 $P = 68,27 \%$:

$$u_X = \sqrt{u_{AX}^2 + u_{BX}^2} = \sqrt{u_{AX}^2 + \sum_{J=1}^m c_J^2 u_{ZJ}^2} \quad (4.7.7)$$

4.7.4 Rozšířená (celková) nejistota – U

se zavádí, pokud je požadována větší pravděpodobnost výskytu skutečné hodnoty

$$U = k_U \cdot u_X, \quad (4.7.8)$$

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

Tab. 4. 4: 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 $P = 95$ %. Pokud se použije $k_U = 3$, skutečná hodnota se nachází v daném intervalu s pravděpodobností $P = 99,73$ %.

4.8 Způsobilost procesů, přístrojů a strojů

4.8.1 Způsobilost výrobního procesu C_p a C_{pk}

a) Index způsobilosti C_p charakterizuje možnosti procesu dané jeho variabilitou.

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \quad (4.8.1)$$

kde USL horní toleranční mez,
LSL dolní toleranční mez,
 σ 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:

$$C_{pk} = C_{pU} = \frac{USL - \mu}{6\sigma} \quad (4.8.2)$$

- je-li předepsána dolní toleranční mez:

$$C_{pk} = C_{pL} = \frac{\mu - LSL}{6\sigma} \quad (4.8.3)$$

- jsou-li předepsané obě meze:

$$C_{pk} = \min\{C_{pU}, C_{pL}\} \quad (4.8.4)$$

kde μ je střední hodnota sledovaného znaku.

4.8.2 Způsobilosti měřidel se hodnotí ukazateli C_g a C_{gk} .

Index způsobilosti C_g , často nazývaný potenciál měřicího systému, nebo opakovatelnost je pak dán výpočtem výběrové směrodatné odchylky:

$$s_g = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_g)^2} \quad (4.8.5)$$

je následně dán výpočtem

$$C_g = \frac{0,2 \cdot (USL - LSL)}{4 \cdot s_g} \quad (4.8.6)$$

$$C_{gk} = \frac{0,1 \cdot (USL - LSL) - B_i}{2 \cdot s_g} \quad (4.8.7)$$

kde hodnota B_i = systematická chyba (absolutní hodnota mezi $\bar{X}_g$ a X_m).

$$B_i = |\bar{X}_g - X_m|$$

X_m ...skutečná hodnota etalonu

Poznámka:

Některé firmy používají místo $4s_g$ resp. $2s_g$ (pravděpodobnost pokrytí $P = 95,45\%$) hodnoty $6s_g$ resp. $3s_g$ (pravděpodobnost pokrytí $P = 99,73\%$):

$$C_g = \frac{0,2 T}{6 s}$$

$$C_{gk} = \frac{0,2 T - |\bar{x} - x_m|}{6 s}$$

kde T = rozdíl horní a dolní toleranční meze,
s je výběrová směrodatná odchylka.

Index způsobilost C_g , je často nazývaný **potenciál měřicího systému**, nebo **opakovatelnost**.

4.8.3 Způsobilost strojů se hodnotí ukazateli C_m a C_{mk} .

a) výpočet těchto ukazatelů pomocí aritmetického průměru a směrodatné odchylky:

Aritmetický průměr je odhadem střední hodnoty

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.8.8)$$

výběrová směrodatná odchylka

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.8.9)$$

Výpočet ukazatele způsobilosti C_m je dán vztahem

$$C_m = \frac{USL - LSL}{6s} \quad (4.8.10)$$

Ukazatel způsobilosti, je-li známa jen dolní toleranční mez:

$$C_{mL} = \frac{\bar{x} - LSL}{3s} \quad (4.8.11)$$

Ukazatel způsobilosti, je-li známa jen horní toleranční mez

$$C_{mU} = \frac{USL - \bar{x}}{3s} \quad (4.8.12)$$

Ukazatel způsobilosti C_{mk} je dán minimální hodnotou z údajů C_{mL} a C_{mU} .

$$C_{mk} = \min\{C_{mL}, C_{mU}\} \quad (4.8.13)$$

b) výpočet ukazatelů způsobilosti strojů C_m a C_{mk} pomocí mediánu a kvantilů (tato metoda je doporučována jako vhodnější) na hladině významnosti α :

$$C_m = \frac{USL - LSL}{Q_{1-\alpha/2} - Q_{\alpha/2}} = \frac{USL - LSL}{Q_{0,99865} - Q_{0,00135}} \quad (4.8.14)$$

kde Q kvantil pro hladinu významnosti, obvykle $\alpha = 5\%$.

Je-li známa dolní toleranční mez

$$C_{mL} = \frac{\tilde{x} - LSL}{\tilde{x} - Q_{\alpha/2}} = \frac{\tilde{x} - LSL}{\tilde{x} - Q_{0,00135}} \quad (4.8.15)$$

Nebo je-li známa horní toleranční mez

$$C_{mU} = \frac{USL - \tilde{x}}{Q_{1-\alpha/2} - \tilde{x}} = \frac{USL - \tilde{x}}{Q_{0,99865} - \tilde{x}} \quad (4.8.16)$$

Ukazatel způsobilosti C_{mk} je opět dán minimální hodnotou z C_{mL} a C_{mU} .

$$C_{mk} = \min\{C_{mL}, C_{mU}\} \quad (4.8.17)$$

Ukazatele způsobilosti C_g a C_m charakterizují možnosti procesu dané jeho variabilitou, ukazatele C_{gk} a C_{mk} 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 jistotou pravděpodobností předpokládá, že uvnitř leží pravá hodnota.

4.9 Řešení procesu měření 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 potencionálních odchylkách od požadavků až po identifikaci těchto potencionálních 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:

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

MSA řeší charakteristiky:

variabilita polohy, variabilita rozptylu, variabilita systému, R&R měřidla (Gage repeatability and reproducibility), která zahrnuje kombinovanou charakteristiku opakovatelnosti (*Evaluation Variation EV*) a reprodukovatelnosti měřidla (*Appraiser Variation AV*), MSA řeší také pojmy linearita, strannost, vychýlení a jejich kombinace:

$$\sigma_{GRR}^2 = \sigma_{opakovatelnost}^2 + \sigma_{reprodukovatelnost}^2 = \sigma_r^2 + \sigma_R^2 \quad (4.9.1)$$

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

$$\sigma_I^2 = \sigma_{II}^2 + \sigma_{III}^2 \quad (4.9.2)$$

kde σ_I^2 rozptyl pozorovaného procesu (ovlivněn chybou systému měření),

σ_{II}^2 rozptyl skutečného výrobního procesu,

σ_{III}^2 rozptyl systému měření.

Je patrné, že systém měření ovlivňuje výsledky výrobního procesu. Více o metodice MSA v [L35].

4.10 Řešení procesu měření podle VDA (způsobilost kontrolních procesů, procesy měření a zkoušení)

Postupuje se ve 2 krocích:

- a) analýza způsobilosti systému měření
- b) analýza způsobilosti procesu měření

K posouzení metrologických požadavků na systém měření a proces měření jsou zavedeny:

ukazatele vhodnosti Q_{MS} pro systém měření $Q_{MS} = \frac{2 \cdot U_{MS}}{TOL} \cdot 100 \%$ (4.10.1)

ukazatele vhodnosti Q_{MP} pro proces měření $Q_{MP} = \frac{2 \cdot U_{MP}}{TOL} \cdot 100 \%$ (4.10.2)

kde U = rozšířená nejistota systému/procesu měření
 TOL = tolerance (např. podle ČSN ISO 14253-1)
 MPE = max. dovolená odchylka, chyba.

Ukazatelům se stanovují limitní (maximální) hodnoty Q_{MS_max} a Q_{MP_max} , obvykle $Q_{MS_max} = 15 \%$ a $Q_{MP_max} = 30 \%$

Pokud jsou ukazatelé menší než jejich limitní hodnoty, je systém měření i proces měření hodnocen jako vhodný.

Stanovení složek nejistoty měření může odpadnout, pokud je MPE doložena a dokumentována. V takovém případě platí pro výpočet nejistoty:

$$u_{MS} = \frac{MPE}{\sqrt{3}} \quad (4.10.3)$$

Pokud nejistotu MS ovlivňuje větší počet MPE , provádí se jejich součet (jako u nejistot typu B).

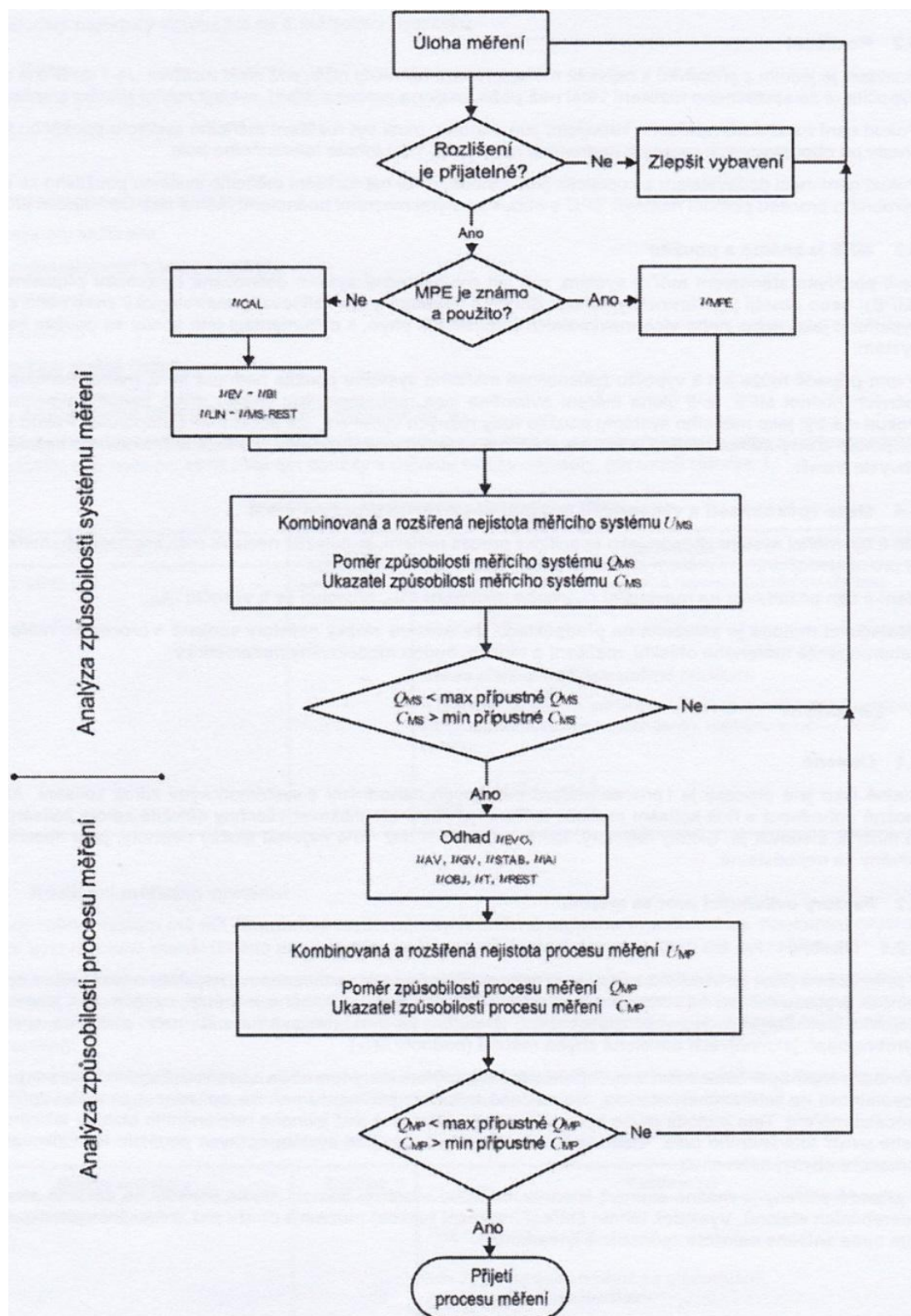
Minimální možné tolerance se vypočtou úpravou předchozích rovnic (4.10.1 a 4.10.2)

$$TOL_{MIN_UMS} = \frac{2 \cdot U_{MS}}{Q_{MS_MAX}} \cdot 100 \% \quad (4.10.4)$$

$$TOL_{MIN_UMP} = \frac{2 \cdot U_{MP}}{Q_{MP_MAX}} \cdot 100 \% \quad (4.10.5)$$

kde RE je rozlišení,
 MPE je max. dovolená odchylka, chyba.

Více o metodice VDA v [L36].



Obr. 4. 7: Postupový diagram analýzy způsobilosti systému měření a procesu měření

4.11 Systém managementu měření

Systémy managementu měření v laboratořích i výrobních procesech musejí nutně odrážet povinné i nepovinné požadavky vztahující se na systémy managementu kvality. Úroveň a rozsah systému managementu měření určují také požadavky systémových norem a charakter konkrétního programu dané laboratoře nebo daného výrobního procesu. Organizace musí specifikovat monitorování a měření, která se provádějí ve výrobním procesu, a zajišťuje k tomu monitorovací a měřicí zařízení potřebná pro poskytnutí důkazu o shodě produktu s určenými požadavky.

Návodem pro řízení systému managementu měření je v návaznosti na požadavky souboru norem ISO 9000, normy ČSN EN ISO/IEC 17025 i norma ČSN EN ISO 10012 – Požadavky na procesy měření a měřicí vybavení.

Systém managementu měření definovaný požadavky normy je založen na procesně orientovaném přístupu, kdy v rámci systému managementu měření musejí být identifikovány procesy, odpovídající prvky procesů a nástroje jejich řízení. Organizace, které používají měřicí zařízení k zajištění kvality výrobního procesu, musí tyto procesy měření a měřicí zařízení specifikovat. U každého procesu měření musejí být identifikovány odpovídající prvky procesu i nástroje řízení.

Metrologická konfirmace

Je charakterizována jako soubor činností požadovaných pro zajištění toho, aby měřicí vybavení bylo ve shodě s požadavky na jeho zamýšlené použití.

Metrologická konfirmace zahrnuje následující prvky:

- kalibraci měřicího vybavení, kde cílem je zajištění návaznosti měřicího vybavení na etalony (metrologická konfirmace ve smyslu provedení kalibrace, návaznost, výběr externích dodavatelů, validace interních kalibračních postupů);
- metrologické ověřování, kde cílem je přezkoumání výsledků kalibrace (kontrola výsledků kalibrace, posouzení výsledků kalibrace s požadavky);
- rozhodování a opatření (představuje seřízení, opravu a následnou kalibraci měřicího zařízení; přezkoumání vhodnosti zvoleného intervalu mezi konfirmacemi; atp.).

4.12 Závěr

Monitorování procesů, jejich měření a vyhodnocování představuje důležitou složku realizace kvality procesů. Často se požaduje schopnost prokázat, jakým způsobem je zabezpečena kvalita měřicího zařízení a jakým způsobem je řízen proces měření. Mnohdy již nestačí, aby se prokázala kvalita procesu měření aplikací požadavků na zabezpečování kvality měřicího zařízení podle normy [L22], stále častěji je vyžadováno prokazování způsobilosti měření i v provozu v oblasti řídicích i technických činností.

Studie způsobilosti měřicího procesu se provádí nejlépe při nezávislém odhadu variability sledovaného procesu. Pokud tomu tak není, pak se musí vybrat ke zjišťování stavu procesu měření takové vzorky, které reprezentují nezávisle kvalitu uvedené laboratoře nebo jiného měřicího subjektu.

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. Metody používané v systému managementu měření jsou kontrolovány od základního ověřování až po aplikaci statistických metod při řízení procesu měření. [L22]

Systém managementu měření definovaný požadavky normy [L32] je založen na procesně orientovaném přístupu, kdy v rámci systému managementu měření musejí být identifikovány procesy, odpovídající prvky procesů a nástroje jejich řízení. Organizace, které používají měřicí zařízení k zajištění kvality výrobního procesu, musí tyto procesy měření a měřicí zařízení specifikovat, jak je uvedeno v normě [L32]. U každého procesu měření musejí být identifikovány odpovídající prvky procesu i nástroje řízení.

Procesy měření a metrologická confirmace jako součást systému managementu měření jsou řízeny prostřednictvím řízení prvků stanovených procesů. Aby systém managementu měření mohl zabezpečovat své cíle v oblasti měření produktů a aby byl schopen minimalizovat riziko nesprávného výsledku, je nezbytně nutné, aby:

- proces měření byl nastaven tak, že bude schopen poskytovat natolik přesné (tzn. správné a shodné) výsledky, které budou vyhovovat požadavkům zákazníka;
- proces metrologické confirmace měřicího zařízení, jehož metrologické charakteristiky budou zárukou pro dosažení očekávaných výstupů.

Tato skutečnost je příčinou, že zejména vývojové, zkušební a kalibrační laboratoře jsou nuceny zavádět systém kvality ve shodě se všeobecnými požadavky na způsobilost zkušebních a kalibračních laboratoří. Pro potřeby vybudování takového systému kvality se využívají jak požadavky definované v normě [L32], tak i metodiky MSA nebo VDA.

5 Měřidla a pomocná měřicí zařízení

5.1 Hlavní měřidla

Hlavní měřidla jsou ta, která měří veličinu vlastnosti příslušného dílu/produktu (např. posuvka délku, 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),
- vhodnost kontrolních měřidel.

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] [L34] [L35] [L36].

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 10krát citlivěji danou 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 ± 1 V). S tím souvisejí i chyby a nejistoty, jak je uvedeno v odst. 4.4-4.7 a způsobilost měřidel, diskutovaná v odst. 4.8.2 .

Metrologická konfirmace 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 Sb. v platném znění) musí být kontrolovány ověřením nebo kalibrací. U stanovených měřidel je doba ověření uvedena ve vyhlášce č. 345/2002 Sb.

8.1 Shromáždění informací o měřeném výrobku

Při řešení procesu měření 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 VDA 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 nebo VDA 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

V každém procesu měření je nutné postupovat podle určitých zásad. Zvolíme vhodné přístroje a měřicí metody (s ohledem na chyby a nejistoty); pokud je to možné, zajistíme měření za vztažných podmínek okolního prostředí (s ohledem na měřicí přístroje/systémy). Měření provedeme s minimální časovou prodlevou, aby nedocházelo k procesu stárnutí.

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 zvolené metodiky [L35] nebo [L36] pro stanovení vhodnosti měřidla je navržena metoda založená na hodnocení průměru a rozpětí, tj. způsob, kterým se získá jak odhad opakovatelnosti, tak reprodukovatelnosti systému měření. Může být též hodnocena způsobilost měřidel (viz 4.8.2) nebo stroje (viz 4.8.3).

9.3 Vyhodnocení měření

Měření se vyhodnocuje obvykle některým z validovaných software.

10 Stanovení nejistoty měření

10.1 Metodika stanovení nejistot měření

Použijeme-li např. metodiku VDA, nejistoty měření se vyhodnocují na základě maximálních odchylek, viz rovnice (4.10.3):

$$u_{MS} = \frac{MPE}{\sqrt{3}}$$

Pokud nejistotu ovlivňuje větší počet MPE, provádí se jejich součet (jako u nejistot typu B).

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

$$\text{Standardní nejistota } u_{MP} = \sqrt{u_{kal}^2 + u_w^2 + u_{sys}^2} \quad (10.1)$$

kde u_{kal} nejistota kalibrace,
 u_w nejistota seřízení referenčního měřidla a opakované směrodatné odchylky (chyby),
 u_{sys} nejistota získaná ze systematických odchylek.

10.2 Příklad

Výpočet standardní nejistoty podle metodiky VDA.

Nejistota kalibrace

$$u_{kal} = U_{kal} / k_{kal} = 0,026 / 2 = 0,013 \text{ mm}$$

Nejistota seřízení referenčního měřidla a opakované směrodatné odchylky (chyby)

$$u_w = 0,040 \cdot 0,577 = 0,031 \text{ mm}$$

Nejistota získaná ze systematických odchylek

$$u_{sys} = 0,577 \cdot B_i = 0,577 (x_g - x_m) = 0,577 \cdot 0,0148 = 0,00854 \text{ mm}$$

Standardní nejistota $u_{MP} = \sqrt{(169 + 961 + 72,93) \cdot 10^{-6}} = 34,68 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$

11 Záznamy o měření

Protokol o provozním měření vhodnosti měřidel 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/nevyhovuje 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
Upravit			
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.