

Nejistoty v měření I: vyjadřování nejistot

Príspevek je prvým článkom z cyklu včnovaného novému spôsobu zjišťování a vyjadřování (nové koncepci) nejistot měření a jeho uplatnění v praxi technických měření. Jsou v něm uvedeny základní pojmy a definice a připomenuty důvody, které v mezinárodním kontextu vedly k přijetí koncepce nejistot měření. Pro porovnání je stručně připomenuta dosavadní koncepce chyb měření. Těžším příspěvkem jsou výklad způsobů vyjadřování nejistot v měření a úvod do metodiky vyhodnocování nejistot z naměřených údajů. Naznačené postupy budou podrobněji rozvedeny a doloženy příklady v dalších částech cyklu.

1. Úvod

V současné době se lze stále častěji setkat v souvislosti s měřením a jeho vyhodnocováním s pojmem *nejistoty v měření*. Pojem a celá problematika již téměř zdomácněly v oblasti kalibrace a vrcholové metrologie, zatímco do běžné každodenní praxe průmyslových měření se teprve začínají postupně prosazovat.

Nástup nové metodiky zpracování výsledků měření lze datovat přibližně do začátku devadesátých let. Již v osmdesátých letech přijal Mezinárodní výbor pro váhy a míry (Comité International des Poids et Mesures – CIPM), který řídí činnost Mezinárodního úřadu pro váhy a míry (Bureau International des Poids et Mesures – BIPM), na svých zasedáních doporučení k náhradě koncepce chyb měření novou koncepcí nejistot měření. Následně bylo přijato množství navazujících doporučení, která vyústila v roce 1990 v dokument Západoevropského kalibračního sdružení WECC č. 19, na jehož základě byly postupně přijímány další národní předpisy s cílem zajistit jednotné vyjadřování nejistot měření. Za vrcholový dokument je možné

považovat především *Směrnici*, která byla pod názvem *Guide to Expression of the Uncertainty of Measurement* vydána mezinárodními metrologickými orgány v roce 1993. U nás nový přístup dosud reprezentují především Technické předpisy metrologické TPM řady 005x, odkud postupně proniká do dalších norem přijímaných v rámci harmonizace s normami ISO a EN.

2. Základní pojmy a definice

Veškerý další výklad se opírá o základní definice a terminologii uvedené pro přehlednost v odděleném textu v rámečku na následující straně. Pro případnou návaznost a zájemce o detailnější proniknutí do celé problematiky je v závorkách vždy upřesněn pramen.

3. Používání nejistot a souvislosti s mezinárodními předpisy

Zavádění konceptu nejistot souvisí jak se zmíněnými předpisy, tak i s mnoha dalšími mezinárodními normami, především ISO 9000, ISO 10012 a ISO/IEC 17025. Již původní ISO 9000 požaduje ve svém článku 4.11 (nyní ISO 9000:2000 v článku 7.6) Kontrolní, měřicí a zkušební zařízení: „... *zařízení se musí používat způsobem, který zabezpečuje, že nejistota měření je známá a je ve shodě s požadovanou schopností* ...“ Podobně uvádějí v širším kontextu nebo jako samostatný termín nejistotu měření i dokumenty [1], [2], [3], [5], [6] aj.

Většina předpisů pracuje s pojmem nejistoty měření, popř. ho přesněji definuje a uvádí ho do dalších širších souvislostí. Podívejme se na některé podstatnější z nich, které současně přibližují i důvody použití koncepce nejistot v praxi:

- ISO/IEC Směrnice 25 článek 13.2 vyžaduje: „... *vyhlášení o odhadnuté nejistotě kalibrace nebo výsledku zkoušky (kde je to třeba)* ...“ a v článku 10.2 uvádí: „*Laboratoř musí při všech kalibracích a zkouškách používat vhodné metody a postupy ... (včetně ... odhadu hodnoty nejistoty měření ...)*.“
- Evropská norma EN 45 001 v článku 5.4.3 vyžaduje, aby zprávy o zkouškách obsahovaly: „... *prohlášení o nejistotě měření, (kde je to zapotřebí)* ...“, a současně praví, že: „... *výsledky kvantitativních zkoušek musí být uvedeny spolu s vypočtenou nebo odhadnutou nejistotou* ...“. Použití slov „*kde je zapotřebí*“ může vést k různým interpretacím a nesrovnalostem v přístupech různých laboratoří a akreditačních orgánů.
- Norma EN ISO 17025 v článku 5.10.4.1 požaduje, aby kalibrační certifikát obsahoval hodnoty nejistoty měření, popř. prohlášení o souladu s uvedenou metrologickou specifikací nebo jejími články. Stejná norma v článku 5.10.3.1 uvádí, že protokol o zkoušce musí obsahovat stanovené nejistoty měření tam, kde je to vhodné. Informace o nejistotě měření v protokolu o zkoušce jsou podle této normy vyžadovány v těchto případech: (1) pokud je nejistota důležitá pro platnost nebo použití výsledků zkoušky, (2) pokud ji vyžadují pokyny zákazníka, (3) pokud nejistota ovlivňuje soulad se specifikovanou hraniční hodnotou.
- Nejistota výsledku měření je kvantitativním ukazatelem jeho kvality.
- Umožnění nejistoty výsledku měření umožňuje porovnat výsledky dosažené různými laboratořemi nebo v rámci jedné laboratoře, popř. porovnat výsledky s referenčními hodnotami uvedenými v specifikacích nebo normách.

Téma „Nejistoty v měření“ v časopise Automa

V současné době se v metrologii a při technických měřeních postupně přechází k novým metodám vyjadřování odchylek. Dosavadní *chyby měření* jsou v souladu s mezinárodními předpisy ISO, BIPM, OIM a IEC i našimi normami řady TPM 005x nahrazovány *nejistotami měření*. Pro značný význam této problematiky pro technickou praxi připravil kolektiv autorů z Katedry automatizace a merania Strojníckej fakulty STU v Bratislavě a Ústavu automatizace a informatiky Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně na výzvu redakce časopisu Automa volný cyklus článků, které postupně přibližují pojem nejis-

toty v širších souvislostech měření a metrologie. Ozřejměny budou důvody zavedení pojmu nejistota měření, terminologie a základy teorie s nejistotami měření spojené a uvedeny budou i příklady z praxe.

Cílem cyklu je přiblížit celou oblast nejistot v měření širokému okruhu pracovníků, kteří plánují a provádějí technická měření, zpracovávají naměřené údaje anebo interpretují získané výsledky, popř. přicházejí s uvedenými činnostmi do styku jako provozovatelé automatizovaných systémů řízení či řídicí pracovníci nejrůznějších stupňů apod.

Téma nejistot v měření je v rámci cyklu v současné době předběžně rozděleno do asi šesti článků, které vyjdou v časopise Automa v období od tohoto čísla do konce prvního čtvrtletí roku 2002. Se svými připomínkami se čtenáři mohou obracet přímo na autory jednotlivých článků cyklu. Redakce nicméně také uvítá zpětnou vazbu, zejména připomínky k cyklu jako celku a případné náměty na doplnění vhodných dalších pohledů na danou problematiku. Své dotazy a náměty posílejte na adresu karel.suchy@fccgroup.cz

Redakce

- Údaj o nejistotě výsledku kalibrace je neoddělitelnou součástí protokolu o kalibraci, kterou zákazník používá při vyhodnocení nejistot měření kalibrovaným měřidlem.
- Vyhodnocení nebo alespoň celkové posouzení složek (včetně náhodných účinků pracovníků) přispívajících k celkové nejistotě měření nebo výsledku kalibrace poskytuje prostředky pro potvrzení správnosti měřicího (kalibračního, zkušebního) postupu.
- Posouzení složek nejistoty současně určí, kterým aspektům měření, kalibrace nebo zkoušky je třeba věnovat pozornost, je-li třeba zlepšit stávající postupy.
- Laboratoře, jestliže se ucházejí o akreditaci, musí při hodnocení a vypracování zpráv o nejistotách při kalibraci a zkouškách používat všeobecný postup uvedený v EAL R2 a EAL G23 (ve Slovenské republice jako MSA 104 a MSA 105).
- V praxi se musí vzít v úvahu stávající problémy hodnocení a udávání nejistot v různých oblastech měření, zkoušení a kalibrace.
- Od laboratoří se požaduje řádně zdokumentovaná metodika v oblasti hodnocení nejistoty při akreditovaných činnostech.
- Laboratoř musí být schopna dokázat hodnotícímu orgánu, že nejistota byla správně vyhodnocena. Toho může dosáhnout vedením úplných záznamů o hodnocení složek nejistot, dokumentováním podrobných výpočtů a přijatých předpokladů. Kde je to možné, má být tento důkazový materiál doplněn výsledky mezilaboratorních porovnání. Je potřebné zavést systém řízení měřicích procesů [6].

4. Chyby měření

V praxi nejsou žádné měření, žádná měřicí metoda ani žádný přístroj absolutně přesné. Nejvýznamnější negativní vlivy, které se v reálném měřicím procesu vyskytují, se projevují odchylkou mezi naměřenou a skutečnou hodnotou sledované veličiny. Výsledek měření se tak vždy pohybuje v jistém „tolerančním poli“ kolem skutečné hodnoty, ale téměř nikdy nenastává ideální ztotožnění obou hodnot. S přiblížením se k nulové velikosti odchylky jsou nesmírně potíže i u realizace etalonů. Výsledný rozdíl mezi oběma hodnotami je někdy tvořen i velmi složitou kombinací dílčích faktorů.

Za dlouhá léta používání bylo zvykem při vyhodnocování souborů naměřených hodnot pracovat s chybami. Lze předpokládat, že problematika chyb je většinou čtenářů alespoň do jisté míry známa. Přesto si stručně připomeneme jejich základy, aby bylo možné lépe porovnat s novou koncepcí nejistot, která koncepci chyb nahrazuje.

Chyby se vyjadřují v absolutních nebo relativních hodnotách. Podle jejich působení lze chyby rozdělit na systematické, náhodné a hrubé. Podle svého zdroje se rozdělují na chyby přístroje, metody, pozorování a vyhodnocení.

Jako chyba absolutní Δ_x se označuje rozdíl mezi hodnotou naměřenou x_m a skutečnou x_s . Podělí-li se absolutní chyba skutečnou hodnotou, dostane se poměrné vyjádření chyby, tj. chyba relativní δ_x . Platí tedy

$$\Delta_x = x_m - x_s \quad (1)$$

$$\delta_x = \frac{\Delta_x}{x_s} = \frac{x_m - x_s}{x_s} \quad (2)$$

Systematické chyby jsou při stálých podmínkách také stálé co do velikosti i znaménka a svým působením „systematicky“ ovlivňují výsledek měření. Ke stanovení jejich velikosti postačí zpravidla vztah (1). Z hlediska uživatele měřicí techniky jsou systematické chyby sympatické tím, že je lze z velké části určit a jejich vliv je možné zmenšit např. pomocí korekcí, kompenzací apod. Takto se zpravidla podaří odstranit podstatnou část jejich negativního vlivu na měření, ale zůstane ještě zbytek, který lze označit jako nevyložené (nevyučitelné) systematické chyby. Právě toto je jedna z oblastí, kterou mnohem lépe postupuje nový koncept nejistot měření.

Náhodné chyby působí zcela nahodile, jsou těžko předvídatelné a nelze je vyloučit. Při opakování měření se mění jejich velikost i znaménko, jak odpovídá předpokládanému zákonu rozdělení. Pro určení jejich velikosti se vychází z opakovaných měření s použitím statistických metod odpovídajících patřičnému pravděpodobnostnímu modelu, reprezentovanému zákonem rozdělení příslušné náhodné chyby. V praxi velmi často jde o rozdělení normální – Gaussovo, které se používá ve většině aplikací.

Výsledek měření, stanovený ze souboru opakovaných měření realizovaných za stejných podmínek, je reprezentován aritmetickým průměrem získaným při n opakováních z hodnot $x_1, x_2, \dots, x_p, \dots, x_n$, tj.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

Náhodnou chybu v klasické teorii chyb nejčastěji zastupuje směrodatná odchylka výběrového souboru s , méně často směrodatná odchylka aritmetického průměru $s_{\bar{x}}$ získané ze vztahů

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_{xi}^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (4)$$

$$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (5)$$

Obě směrodatné odchylky patřičným způsobem blíže charakterizují chování náhodných chyb.

Hrubé chyby jsou z předchozího pohledu zcela nevyzpytatelné. Měření zatížené hrubou chybou znehodnotí celý experiment, a proto naměřené hodnoty, které výrazně „vybočují z řady“, což bývá velmi často projevem tohoto druhu chyby, se vyloučí z dalšího zpracování. Omezit riziko jejich výskytu lze důsledným dodržováním příslušných měřicích postupů, podmínek měření a pozorností obsluhy.

Výsledná chyba měření je vyjadřována jako součet systematické a náhodné složky, což lze zapsat

$$\Delta_x = e + \varepsilon \quad (6)$$

a její maximální hodnotu je možné odhadnout jako

$$\Delta_{x\max} = (\bar{x} - x_s) + 2s \quad (7)$$

kde systematická složka $e = \bar{x} - x_s$ a náhodná složka $\varepsilon = s$, popř. $\varepsilon = 2s$. Součinitel rozšíření směrodatné odchylky souvisí s pravděpodobností pokrytí intervalu a typem rozdělení. Dvojka u Gaussova rozdělení přísluší často užívané 95% pravděpodobnosti.

Co se týče původu chyby, chyby přístrojů jsou způsobeny nedokonalostí použitých měřicích prostředků, které mohou vznikat ve výrobě, montáži a popř. i opotřebením. Svou roli sehrává i změna charakteristik a parametrů přístroje v čase (stárnutí). Dalším zdrojem chyb je nevhodná instalace nebo uložení (ustavení) přístroje na pracovním místě, stole apod. Chyby metody mají svůj původ v nedokonalosti či zjednodušení použité měřicí metody. Chyby pozorování, nebo spíše pozorovatele, jsou do měření vnášeny jako chyby osobní, zapříčiněné buď nedokonalostí smyslu pozorovatele nebo jeho nesoustředěností. Chyby mající svůj původ ve vyhodnocení jsou časté jako výpočtové, vznikající v důsledku aplikování přibližných vztahů, zjednodušení, ale také použitím linearizace, interpolace, extrapolace, zaokrouhlování, nedostatečným vyčíslením konstant apod.

5. Nejistoty měření

5.1 Typy nejistot

Jak již bylo uvedeno v kap. 2, je pojem nejistota (nejistota měření) označením pro parametr související s výsledkem měření a charakterizující rozsah hodnot, které je možné racionálně přiřadit k měřené veličině. Zmíněná kapitola také naznačila, že nejistota se skládá z několika dílčích nejistot (složek). Ke stanovení jejich velikosti jsou principiálně k dispozici tyto dvě metody:

- statistické zpracování naměřených údajů (metoda typu A),
- jiné než statistické zpracování naměřených údajů (metoda typu B).

Někdy se nejistoty získané metodou A také stručně označují jako nejistoty typu A, obdob-

ně nejistoty získané metodou B jako nejistoty typu B. Z těchto základních typů nejistot se snadno, prostřednictvím součtu jejich čtverců, určí výsledná nejistota kombinovaná.

Jak naznačil úvod, je celá metodika určených nejistot dosti komplikovaná. Zde přiblížíme jen základní metodiku, ke které se podrobněji, včetně příkladů, vrátíme v další části cyklu.

Předpokládejme nyní, že máme jednoduchou výstupní funkci několika vstupních parametrů

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_m) \quad (8)$$

kde

y je odhad výstupní veličiny,
 x_i odhady veličin vstupních,
 f známý funkční vztah.

V nejobecnějším pojetí potom lze pro nejistotu u_y odhadu y napsat vztah

$$u_y = \sqrt{\sum_{i=1}^m A_i^2 \cdot u_{x_i}^2} \quad (9)$$

kde

u_{x_i} jsou jednotlivé složky nejistot,
 A_i je koeficient citlivosti (převodu) příslušného zdroje nejistoty, který je znám, popř. se určí jako parciální derivace funkce y podle příslušné vstupní veličiny x_i

$$A_i = \frac{\partial y}{\partial x_i} = \frac{\partial f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_m)}{\partial x_i} \quad (10)$$

5.2 Vyhodnocení standardních nejistot vstupní veličiny metodou typu A

Metoda vyhodnocení tohoto typu nejistot vychází ze statistické analýzy opakované série měření. Je-li n nezávislých stejně přesných pozorování ($n > 1$), bude odhad výsledné hodnoty y reprezentován hodnotou výběrového průměru (aritmetického průměru), spočteného stejně jako u případu chyb, tj. podle vztahu (3). Nejistota příslušná k odhadu y se určí jako směrodatná odchylka této výsledné hodnoty, tedy výběrového průměru (4). Celá situace tak při velmi zběžném pohledu připomíná náhodné chyby. Nejistota se zde zpravidla značí u_{Ay} a s použitím vztahu (5) je možné napsat

| Základní pojmy a definice z oblasti nejistot měření | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| (v abecedním pořadí; upřesňujícími údaji v závorkách jsou číslo pramenu podle seznamu literatury za článkem a číslo, pod kterým lze daný termín, popř. část textu, která se termínu dotýká, nalézt v příslušném dokumentu): | |
| Aritmetický průměr ([8], 2.26) – Součet hodnot podělený počtem hodnot. | |
| Koeficient citlivosti související se vstupním odhadem ([2], část 5.1.3) – Změna hodnot výstupního odhadu jako důsledek změny hodnot vstupního odhadu podělená změnou hodnot tohoto vstupního odhadu. | |
| Koeficient pokrytí ([2], 2.3.6) – Číselný faktor, kterým se násobí standardní nejistota měření s cílem zjistit rozšířenou nejistotu měření. | |
| Konfidenční pravděpodobnost ([7], 2.3.5) – Podíl, obvykle velký, hodnot z rozdělení, které je možné přiřadit měřené veličině jako výsledek měření. | |
| Korelace ([8], 1.13) – Vztah mezi dvěma nebo větším počtem náhodných veličin v rámci rozdělení dvou nebo většího počtu náhodných veličin. | |
| Koeficient korelace ([2], část C.3.6) – Míra relativní vzájemné závislosti dvou náhodných veličin rovnající se podílu jejich kovariance a kladné odmocniny součinu jejich rozptylů. | |
| Kovariance ([2], část C.3.4) – Míra vzájemné závislosti dvou náhodných veličin rovnající se střední hodnotě součinu odchylek dvou náhodných veličin od jejich středních hodnot. | |
| Metoda vyhodnocení typu A ([2], 2.3.2) – Metoda vyhodnocení nejistoty měření pomocí statistické analýzy série měření. | |
| Metoda vyhodnocení typu B ([2], 2.3.3) – Metoda vyhodnocení nejistoty měření jiným způsobem, než je statistická analýza série měření. | |
| Měřená veličina ([7], 2.6) – Konkrétní veličina, která je předmětem měření. | |
| Náhodná veličina ([8], 1.2) – Veličina, která může nabývat libovolné hodnoty z určité množiny hodnot a je charakterizována rozdělením pravděpodobnosti. | |
| Nejistota měření ([1], 2.1) – Parametr, který souvisí s výsledkem měření a charakterizuje rozsah hodnot, jež je možné racionálně přiřadit k měřené veličině. Často se používá také zkrácený název nejistota . | |
| Nejlepší měřicí schopnost ([3], 1.3) – Nejmenší nejistota měření, které může laboratoř dosáhnout v rámci předmětu své akreditace, když vykonává více méně rutinní kalibrace téměř ideálních etalonů s cílem definovat, realizovat, zachovat nebo reprodukovat jednotku dané veličiny nebo jednu nebo několik jejích hodnot, popř. když vykonává rutinní kalibrace téměř ideálních měřicích přístrojů sloužících k měření dané veličiny. | |
| Pravá (skutečná) hodnota veličiny ([7], 1.19) – Hodnota, která je ve shodě s definicí dané blíže určené veličiny (pozn.: jde o hodnotu, která byla získána naprosto přesným měřením). | |
| Průřezový odhad rozptylu ([2], část 4.2.4) – Odhad výběrového rozptylu získaný z dlouhé série měření stejné měřené veličiny za stejných podmínek. | |
| Vstupní odhad ([2], část 4.1.4) – Hodnota odhadu vstupní veličiny používaná při vyhodnocení výsledku měření. | |
| Vstupní veličiny ([3], 2.4) | |
| a) Veličiny, jejichž odhadovaná hodnota a příslušná nejistota se určují přímo měřením. Tyto hodnoty je možné získat z jediného měření nebo z opakovaných měření. | |
| b) Veličiny, jejichž odhad a příslušná nejistota vstupují do měření z vnějších zdrojů. Jsou jimi např.: | |
| – veličiny související s kalibrovanými etalony, | |
| – certifikované referenční materiály, | |
| – referenční údaje získané z příruček, | |
| – korekce údajů přístrojů i korekce na vliv ovlivňujících veličin. | |
| Výstupní odhad ([2], část 4.1.4) – Výsledek měření vypočítaný ze vstupních odhadů pomocí funkce modelu měření. | |
| Výstupní veličina ([2], část 4.1.2) – Veličina, která při vyhodnocení měření představuje měřenou veličinu. | |
| Relativní standardní nejistota měření ([1], 4.5; [2], část 5.1.6) – Standardní nejistota veličiny podělená odhadem této veličiny. | |
| Rozdělení pravděpodobnosti ([8], 1.3) – Funkce vyjadřující pravděpodobnost, že náhodná veličina nabyde určité hodnoty nebo hodnoty z jistého intervalu. | |
| Rozptyl ([8], 1.22) – Střední hodnota druhé mocniny odchylky náhodné veličiny od její střední hodnoty. | |
| Rozšířená nejistota ([2], 2.3.5) – Veličina definující interval okolo výsledku měření, který zahrnuje velkou část rozdělení hodnot, jež je možné přiřadit k měřené veličině. | |
| Směrodatná odchylka ([8], 1.23) – Druhá odmocnina rozptylu. | |
| Standardní nejistota měření ([1], 2.3; [2], 2.3.1) – Nejistota měření vyjádřená jako směrodatná odchylka. | |
| Výběrová směrodatná odchylka ([8], 3.8) – Druhá odmocnina výběrového rozptylu – viz v textu článku uvedený vztah (4). | |
| Výběrový rozptyl ([2], část 4.2.2) – Veličina charakterizující rozptýlení výsledků série n pozorování (měření, odečítání) stejné měřené veličiny získaná jako druhá mocnina vztahu (4) uvedeného v textu. | |

$$u_{Ay} = s_{\bar{y}} = \frac{s_y}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (11)$$

Tato nejistota je způsobena kolísáním naměřených údajů. V případě malého počtu měření ($n < 10$) je hodnota určená pomocí vztahu (11) málo spolehlivá. Potom by bylo třeba tuto nejistotu (způsobenou kolísáním naměřených hodnot) odhadnout metodou typu B na základě jiných informací, než jsou současně naměřené hodnoty.

5.3 Vyhodnocení standardních nejistot vstupní veličiny metodou typu B

Vyhodnocení standardních nejistot vstupní veličiny metodou typu B je, jak již bylo uvedeno, založeno na jiných než statistických přístupech k analýze série pozorování. Opět se nabízí analogie se systematickými složkami chyb. Rozhodně ale nejde o jednoznačnou souvislost, protože metodou B je možné odhadnout i vliv náhodných chyb, např. při kalibraci využitím minulých měření. Standardní nejistota se odhaduje pomocí racionálního úsudku na základě všech možných a dostupných informací. Nejčastěji se použijí:

- údaje výrobce měřicí techniky,
- zkušenosti z předchozích sérií měření,
- zkušenosti s vlastnostmi chování materiálů a techniky a poznatky o nich,
- údaje získané při kalibraci a z certifikátů,
- nejistoty referenčních údajů v příručkách.

Při určování nejistoty metodou typu B se vychází z dílčích nejistot jednotlivých zdrojů u_{Bzj} . Je-li známa maximální odchylka j -tého zdroje nejistoty z_{jmax} , určí se nejistota u_{Bzj} podle vztahu

$$u_{Bzj} = \frac{z_{jmax}}{k} \quad (12)$$

kde k je součinitel vycházející ze zákona rozdělení, kterým se příslušný zdroj nejistoty řídí, takže např. pro normální rozdělení je $k = 2$, popř. 3, pro rovnoměrné $k = 1,73$ atd. V některých případech však může být známa již přímo hodnota standardní nejistoty u_{Bzj} (např. z kalibračního certifikátu měřidla).

Výsledná nejistota se určí metodou B podobně jako v případě vztahu (9) pro p zdrojů $z_1, z_2, \dots, z_p, \dots, z_p$

$$u_{By} = \sqrt{\sum_{j=1}^p A_j^2 u_{Bzj}^2} \quad (13)$$

kde

u_{Bzj} jsou nejistoty jednotlivých zdrojů,
 A_j jejich součinitele citlivosti.

Takto se nejistota vyhodnocovaná metodou B převede do zcela nové podoby a oproti předchozím představám získávají i tyto nejistoty charakter směrodatné odchylky. Jako s takovými, popř. ve druhých mocninách jako

s rozptylem, se s nimi i nadále pracuje, což opět blíže objasní příští části cyklu, popř. některá specializovaná literatura, např. [1], [2], [3], [9], [10], [11].

5.4 Nejistoty kombinované a rozšířené

V praxi se jen zřídka vystačí s jedním nebo druhým typem nejistoty samostatně. Pak je zapotřebí stanovit výsledný efekt kombinovaných nejistot měření obou typů, A i B. Výsledná kombinovaná nejistota veličiny y se označuje u_{Cy} a určuje se jako odmocnina ze součtu čtverců obou typů nejistot A a B podle vztahu

$$u_{Cy}^2 = u_{Ay}^2 + u_{By}^2 \quad (14)$$

resp. $u_{Cy} = \sqrt{u_{Ay}^2 + u_{By}^2}$

Tam, kde nestačí standardní nejistoty, je nutné použít jejich rozšíření pomocí koeficientu rozšíření k_r . Původně stanovená směrodatná odchylka (tedy i standardní nejistota) představuje např. u nejčastěji používaného normálního rozdělení interval určený s pravděpodobností asi 68 %. Podobně je tomu i u jiných zákonů rozdělení. Aby bylo dosaženo lepšího intervalu pokrytí, blížícího se 100 %, je třeba rozšířit standardní nejistotu koeficientem rozšíření k_r , jehož význam je v podstatě shodný s významem kvantilů u normálního Gaussova rozdělení, kde $k_r = 2$ pro rozšíření na 95 % a $k_r = 3$ pro rozšíření na 99,7 % pravděpodobnost apod. Rozšířená nejistota je pak vyjádřena vztahem

$$U = k_r \cdot u \quad (15)$$

kde

U je rozšířená nejistota,
 k_r koeficient rozšíření,
 u standardní nejistota.

5.5 Zdroje nejistot

Jako zdroje nejistot lze označit veškeré jevy, které nějakým způsobem mohou ovlivnit neurčitost jednoznačného stanovení výsledku měření a tím vzdalují naměřenou hodnotu od hodnoty skutečné. Značnou roli zde sehrává také skutečnost, zda jde o měřicí metody přímé nebo nepřímé. Na nejistoty působí výběr měřicích přístrojů analogových nebo číslicových, použití různých filtrů, vzorkovačů a dalších prostředků v celé trase přenosu a úpravy měřicího signálu. K nejistotám velmi výrazně přispívají rušivé vlivy prostředí v tom nejširším slova smyslu.

Vyjmenovat zde veškeré možné zdroje nejistot nelze, takže se pokusme uvést alespoň ty, které se vyskytují častěji:

- nedokonalá či neúplná definice měřené veličiny nebo její realizace,
- nevhodný výběr přístroje (rozlišovací schopnost aj.),

- nevhodný (nereprezentativní) výběr vzorků měření,
- nevhodný postup při měření,
- zjednodušení (zaokrouhlení) konstant a převzatých hodnot,
- linearizace, aproximace, interpolace anebo extrapolace při vyhodnocení,
- neznámé nebo nekompensované vlivy prostředí,
- nedodržení shodných podmínek při opakovaných měřeních,
- subjektivní vlivy obsluhy,
- nepřesnost etalonů a referenčních materiálů.

Některé ze zdrojů se projevují výhradně či výrazněji v nejistotách vyhodnocovaných metodou typu A, jiné při použití metody typu B. Mnohé zdroje ale mohou být příčinou obou skupin nejistot, a zde právě číhá největší nebezpečí v podobě opomenutí jedné ze složek, což může mít i velmi výrazný zkreslující účinek.

6. Závěr

Tato úvodní část rozsáhlejšího cyklu si kladla za cíl velmi stručně a průřezově seznámit čtenáře s novým konceptem nejistot v měření, jejich příčinami, způsobem vyhodnocení a souvislostmi s klasickými chybami. Přinesla základní terminologii i širší metrologické souvislosti této oblasti vyhodnocení naměřených souborů dat. Postupy vyhodnocení, stručně nastíněné v kap. 5, budou v dalších částech cyklu podrobněji rozvedeny a přiblíženy na příkladech.

Celá situace se značně komplikuje, použije-li se k měření několika vstupních veličin stejný přístroj nebo existují-li mezi vstupními parametry jiné kovarianční vazby. Pak je výsledná nejistota podstatně větší a celá metodika zpracování naměřených údajů je také složitější, což bude přiblíženo v dalších částech.

Literatura:

- [1] Technický předpis metrologický TPM 0051-93. FÚMN 1993.
- [2] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (Směrnice pro vyjadřování nejistoty při měření). BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, 1993.
- [3] Expression of the Uncertainty in Measurement in Calibration (Metodika vyjadřování nejistot při kalibracích). EA 4/02 (původní značení EAL-R2), 1997 (v SR MSA-104, 1998, v ČR EAL-R2, 1997).
- [4] Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement (Kvantifikace nejistoty při analytických měřeních). Eurachem 1995.
- [5] Expression of the Uncertainty in Quantitative Testing (Vyjadřování nejistot v kvantitativním zkoušení). EA 3/02 (původní značení EAL-G23), 1997 (v SR MSA-105, 1997, v ČR EAL-G23, 1997).

- [6] Quality Assurance for Measuring Equipment, Part 2: Guidelines for Control of Measurement Processes (Požadavky na zabezpečení kvality měřicího vybavení, 2. část: Směrnice pro řízení procesů měření). ISO 10012-2, 1997 (STN ISO 10012-2, 2000, ČSN EN ISO 10012-2, 1998).
- [7] International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology (Mezinárodní slovník základních a všeobecných termínů v metrologii). 1993. ČSN 01 0115, 1996 (STN 01 0115, 2001).
- [8] Vocabulary and Symbols, Part 1: Probability and General Statistical Terms (Statistika – Slovník a symboly, 1. část: Pravděpodobnost a všeobecné statistické termíny). ISO 3534-1, 1993. (STN ISO 3534 -1, 1999, ČSN ISO 3534 –1, 1994).
- [9] PALENČÁR, R. – HALAJ, M.: Metrologické zabezpečenie systémov riadenia kvality. Bratislava, Vydavateľstvo STU 1998.
- [10] PALENČÁR, R.: Modely merania pri zabezpečovaní kvality. Bratislava, Vydavateľstvo STU 1998.
- [11] CHUDÝ, V. – PALENČÁR, R. – KUREKOVÁ, E. – HALAJ, M.: Meranie technických veličín. Bratislava, Vydavateľstvo STU 1999.
- [12] SLÁDEK, Z – VDOLEČEK, F.: Technická měření. Brno, Nakladatelství VUT 1992.

*doc. Ing. Rudolf Palenčár, CSc.,
SjF STU, Bratislava
palencar@kam.vm.stuba.sk
Ing. František Vdoleček, CSc.,
FSI VUT, Brno
vdolecek@uai.fme.vutbr.cz
Ing. Martin Halaj,
SjF STU, Bratislava
halaj@kam.vm.stuba.sk*