

Specifikace přístrojů versus nejistota měření

Ing. Jaroslav Smetana, Blue Panther, s. r. o.

Hlavním úkolem specifikací přístrojů je určit nejistotu měření na kterémkoliv vstupu přístroje a rozsahu za daných podmínek. Specifikace dává odpověď na otázku „Jak blízko je hodnota na displeji přístroje té hodnotě, která je skutečně na vstupu přístroje?“ Tento příspěvek je věnován uvedené problematice především v souvislosti s digitálními přístroji, kdy vlivem zdánlivě jednoznačných čísel na displeji vznikají mnohé mylné představy o jejich významu.

Výrobci přístrojů sázejí svou reputaci na to, jak velké množství vyrobených přístrojů vyhoví specifikacím po dobu kalibračního cyklu (typický kalibrační cyklus je jeden rok).

Vývojáři a metrologové používají laboratorní testování a pečlivě využívají statistické metody pro stanovení těchto specifikací. V hromadné výrobě se specifikace aplikují na jednotlivé modely, tedy ne na každý jednotlivý kus. Kterýkoliv jednotlivý přístroj daného typu by se měl se svými parametry „vejít“ do definovaných specifikací daného modelu, zvláště na počátku kalibračního cyklu. Specifikace modelu jsou založeny na testování významného množství vyrobených kusů daného modelu a na analýze takto získaných údajů.

Z měření hodnot např. na padesáti přístrojích stejné konstrukce lze získat množství výsledků. Velký počet kusů dá stejné výsledky, ale vlivem normálního rozptylu je třeba očekávat i určité rozdíly. Jsou-li zaznamenána měření na padesáti multimetrech připojených na stejný výstup 10 V přesného kalibrátoru, je možné zjistit úzký rozptyl hodnot okolo jmenovité hodnoty 10 V. Lze vypočítat průměr všech měření, u kterých se předpokládala hodnota 10 V.

Je také možné vypočítat standardní odchylky σ naměřených hodnot:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}}$$

kde

N je počet vzorků,

x_i hodnota i -tého měření,

\bar{x} aritmetický průměr naměřených hodnot.

Standardní odchylka je míra rozptylu vzorků měření mimo průměr. Tato míra je základem specifikací nejistoty. Je-li na svislou osu vnesen počet výskytů dané hodnoty a na vodorovnou osu daná hodnota, vznikne průběh normálního rozdělení – tzv. distribuční funkce, připomínající svým tvarem zvon (obr. 2). Většina měření, včetně těch, která využívají jednoduché přístroje, jako je např. posuvné měřítko nebo měřka, sleduje normální distribuční křivku. Na obr. 2 je znázorněna

křivka normálního rozdělení vztažená k hodnotě napětí 10 V.

Použitím výsledků experiment a zkušeností a s předpokladem normálního rozdělení a nalezením standardní odchylky z významného počtu vzorků konstruktéři nastaví specifikace daného přístroje, které jsou poté použity při výrobě i kalibraci.



Obr. 1. Kalibrátor Fluke 5320

Úprava normálního rozdělení umožňuje vztáhnout standardní odchylku k počtu procent čtených hodnot získaných měřením oblasti pod křivkou:

- 68 % hodnot bude uvnitř standardní odchylky $\sigma = 1$,
- 95 % hodnot bude uvnitř standardní odchylky $\sigma = 2$,
- 99,7 % hodnot bude uvnitř standardní odchylky $\sigma = 3$.

Statistici tyto procentní hodnoty nazývají interval spolehlivosti. Uvedené hodnoty

ty slovně vyjadřují např. skutečnost: „Jsem si na 95 % jisti, že zobrazená hodnota nebude více než 2 standardní odchylky skutečné hodnoty.“

Tedy pro uvedený jednoduchý příklad:

- jedna standardní odchylka odpovídá 0,02 V,
- dvě standardní odchylky odpovídají 0,04 V,
- tři standardní odchylky odpovídají 0,06 V.

Nabízí se nyní otázka pro výrobce, kolik standardních odchylek a jaký interval spolehlivosti používají pro určení svých specifikací. Větší počet standardních odchylek znamená menší pravděpodobnost, že přístroj bude mimo specifikace v době mezi kalibracemi. V oblasti elektronických měřících přístrojů je obvyklé používat $\sigma = 2$, tedy 95 %. Tato hodnota je běžně používána i v metrologii.

Někteří výrobci však volí $\sigma = 2,6$, tedy 99 %, a dávají tak najevo větší spolehlivost své výroby. Při čtení specifikací je třeba si této skutečnosti povšimnout, protože je významná pro definici nejistoty.

Návaznost a specifikace

Až doposud byla popisována jen otázka očekávané velikosti nejistoty měřícího přístroje, ale ne skutečnost, že všichni zainteresovaní hovoří o stejných voltech, ohmech či ampérech.

Vlastnosti měřícího přístroje by měly navazovat až na standardy národní metrologické laboratoře – na národní etalony.

Například digitální multimetr, který obsahuje množství funkcí, bývá obvykle kalibrován multifunkčním kalibrátorem. Mezi multimetrem a národními etalony může být mnoho stupňů, zahrnujících kalibrátory i převodní standardy laboratoří v řetězci navázání. Při procházení řetězce standardů mezi předmětným digitálním multimetrem a národní kalibrační laboratoří, v tomto případě Českým metrologickým institutem (ČMI), lze pozorovat, že jednotlivé kalibrační standardy

Tabulka části specifikace multimetru jako příklad výše uvedených skutečností

Základní nejistota	
vstup	±(0,001 % čtení + 3 digity)
stupnice a pozadí	±(0,001 % čtení + 3 digity)
Modifikátory nejistoty	
teplotní činitel	±(0,003 % čtení) na °C od 0 do 18 °C a od 28 do 50 °C
čas	1 rok
Kvalifikátory	
zahřívací čas	specifikace jsou platné po jedné hodině zahřátí
pracovní teplota	23 ±5 °C
relativní vlhkost (RH)	80 % RH od 0 do 35 °C, 70 % do 50 °C
skladovací teplota	40 až 60 °C
vibrace	vyhovuje MIL-T-28800E pro typ III, třídu 3, druh zařízení E
elektromagnetické rušení (EMI)	vyhovuje EN 50082-1
nadmořská výška	2 000 m
napájení	100/120/220/240 V ±10 %
přepětová ochrana	600 V přepětí CAT III

v řetězci mají trvale vzrůstající přesnost. Každý standard musí být navázán bez přerušení na národní standardy směrem výše po řetězci standardů od laboratoře, která kalibruje předmětný multimetr, přes laboratoře, jež kalibrují své standardy, až po porovnání se standardy národní laboratoře. Tedy nejistota předmětného multimetru závisí i na nejistotě kalibrátoru, na kterém byl kalibrován.

Většina specifikací multimetrů je vytvořena např. s předpokladem dvou skutečností:

- přístroj byl kalibrován určitým modelem kalibrátoru, který je obvykle uveden v servisní příručce přístroje,
- kalibrátor byl uvnitř své pracovní chyby a byl navázán na národní etalony.

To umožní výrobcí multimetru zahrnout nejistoty kalibrátoru do nejistot multimetru. Jsou-li nejistoty uvedeny jako relativní, znamená to, že nejistota kalibrátoru nebyla zahrnuta, a musí být přidána k nejistotě multimetru.

Z uvedených skutečností je patrné, že specifikace nejistot definují pásmo okolo jmenovité hodnoty. Při měření uvnitř limitů času, teploty, vlhkosti atd. definovaných výrobcem je třeba mít jistotu, že obdržené hodnoty nebudou ležet mimo definovaný rozsah. Čas a teplota jsou ve většině případů rozhodující faktory pro určení nejistoty. Všechny elektronické součástky vykazují v průběhu času malé změny (posuny) svých hodnot. Proto jsou nejistoty obecně jakéhokoliv měřicího přístroje, tedy i předmětného multimetru, platné pouze v časové periodě uvedené výrobcem. Tato perioda se většinou shoduje s periodou doporučeného cyklu kalibrace (obvykle jeden rok).

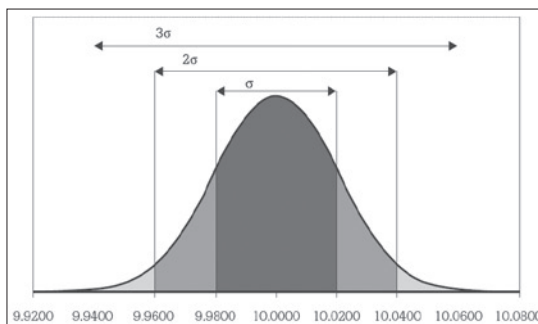
Teplota ovlivňuje vlastnosti každé součástky v přístroji počínaje prostým rezistorem až po nejpropracovanější integrovaný obvod – vše je závislé na změnách teploty. Návrháři přístrojů se snaží projektovat přístroje tak, aby vlivy teploty byly minimální. Takováto schopnost přístrojů je však zaručena jen v určitém vymezeném teplotním pásmu a často bývá vyjádřena teplotním činitelem. Nejistota přístroje nemůže být tedy dána jako pouhé procento, ačkoliv je to velmi lákavé zjednodušení. V prodejních letáčcích sice lze číst např. „Základní přesnost přístroje je 0,002 %.“ Tato informace však představuje jen malou část nejistoty a většinou je velmi optimistickým obrazem skutečné hodnoty. Je ale mnoho dalších důvodů pro komplexnost údajů ve specifikacích přístrojů. Mezi ně patří již uvedené důvody, ale i důvody konstrukce přístrojů, které ve většině případů pro různá měření používají různé signálové cesty, různé rozsahy atd. Například měření odporu multimetrem vyžaduje kromě základních obvodů pro měření stejnosměrného napětí, které především určují citovanou základní přesnost, ještě přidavný zdroj prou-

du v jeho analogové části; to zhorší nejistotu pro funkci měření odporu oproti základní nejistotě přístroje.

Tedy každá funkce i rozsah přístroje musí být specifikovány způsobem, který respektuje vlivy nelinearity, posuvů, šumů a vlivů teploty.

Základní specifikace nejistoty jsou udávány většinou jako:

- $\pm(\text{procento ze čtené hodnoty} + \text{počet digitů})$ nebo
- $\pm(\text{procento ze čtené hodnoty} + \text{počet čítání})$.



Obr. 2. Graf průběhu normálního rozdělení

„Digity“ a „čítání“ jsou používány vzájemně zaměnitelně a ukazují hodnotu poslední významné číslice nebo číslic pro daný rozsah. Představují rozlišení přístroje na daném rozsahu. Má se např. měřit 10 V na rozsahu 20 V, na kterém je nejméně významná číslice 0,0001 V. Je-li nejistota pro rozsah 20 V dána jako $\pm(0,003 \% + 2 \text{ dig})$, lze vypočítat nejistotu v měřených jednotkách jako $\pm(0,003 \% \times 10 \text{ V} + 2 \times 0,0001 \text{ V}) = \pm(0,0003 \text{ V} + 0,0002 \text{ V}) = \pm(0,0005 \text{ V})$ nebo 0,5 mV.

Některé specifikace používají tvar $\pm(\text{procento ze čtené hodnoty} + \text{procento z rozsahu})$. Pro získání tohoto tvaru se vynásobí maximální čtená hodnota pro daný rozsah procentem.

Vlivy modifikující nejistoty

Modifikátory nejistoty lze uplatnit na specifikace nejistoty pro získání nejistot pro běžné faktory prostředí nebo času. V některých specifikacích jsou uváděny hodnoty nejen pro jeden rok kalibračního cyklu, ale i pro devadesát dní po kalibraci. Devadesátidenní specifikace budou přesnější než roční specifikace. Pro delší časový úsek než obvyklý jeden rok je třeba očekávat mnohem horší specifikace, než jsou roční. Pro prodloužení doby recalibrace je nezbytné znát historii přístroje, jinak vzniká riziko, že při příští kalibraci přístroj „neprojde“ a všechna jím vykonaná měření budou neplatná se všemi z toho vyplývajícími důsledky. To se týká např. přístrojů pro vykonávání revizí elektrických instalací, kde je tendence uživatelů k neodůvodněnému prodlužování doby recalibrace. Týká se to však i velkého množství přístrojů používaných v průmyslu, kdy ve snaze ušetřit je doba recalibrace prodloužena na desítky let, po jejímž uplynutí nikdo netuší, jak vlastně přístroj měří.

Nejistoty jsou ale platné jen ve specifikovaném teplotním rozsahu. Většinou se předpokládá pokojová teplota, tedy 18 až 28 °C, a pro kalibraci teplota 23 °C.

Při měření přístrojem ve větším teplotním rozsahu je nezbytné modifikovat nejistoty a vyčíslit nejistoty pro dané teploty použití. K tomu se používají teplotní činitele (viz např. tabulka).

Nyní je třeba měřit stejných 10 V jako v uvedeném příkladu, ale v místě, kde je teplota okolo 41 °C. Teplotní činitel je dán jako $\pm(0,001 \% \text{ ze čtené hodnoty})$ na stupeň Celsia pro teploty od 0 do 18 °C a od 28 do 50 °C.

Teplota pro tento příklad o 13 °C překračuje hranici 28 °C pro použití základní nejistoty. Je třeba tedy vypočítat modifikovanou nejistotu. Pro každý stupeň Celsia překračující hranici je třeba přidat $0,001 \% \times 10 \text{ V} = 0,1 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ k základní nejistotě. Přidaná nejistota při 41 °C je $13 \text{ }^\circ\text{C} \times 0,1 \text{ mV}/^\circ\text{C} = 1,3 \text{ mV}$. Celková napěťová nejistota, zahrnující základní nejistotu a nejistotu vlivem teploty, bude: $\pm(0,5 \text{ mV} + 1,3 \text{ mV}) = 1,8 \text{ mV}$.

Zde je dobré si povšimnout, že výsledná nejistota modifikovaná teplotou je více než třikrát větší než nejistota základní!!!

Kvalifikátory specifikací

Nejistoty přístrojů závisí nejen na teplotě a času, ale i na dalších podmínkách. Faktory prostředí, jako je skladovací teplota, vlhkost, tlak vzduchu a elektromagnetické pole, mohou nejistotu ovlivňovat. Měřicí přístroje napájené ze sítě vyžadují dostatečně čisté napájecí napětí, aby jejich vnitřní napájecí zdroje pracovaly dobře. Některé kvalifikátory lze snadno určit číselnými hodnotami, jako je např. rozptýlené napájecího napětí, nadmořská výška a relativní vlhkost.

Většina přístrojů není hermeticky uzavřena, a tak jejich obvody jsou v kontaktu s okolím, což ovlivňuje jejich činnost. Nevhodné skladovací podmínky mohou nevratně změnit charakteristiky přístrojů. Další komplexnější kvalifikátory jako přepětová ochrana, vibrace nebo elektromagnetická kompatibilita jsou dány definicemi ve standardech pro měřicí přístroje. Všechny tyto vlivy zhoršují nejistotu při změně podmínek oproti standardním podmínkám a je třeba je brát v úvahu jak při používání přístrojů, tak i při jejich volbě a kalibraci.

Další informace mohou zájemci získat na adrese:

Blue Panther, s. r. o.
Na Schůdkách 10
143 00 Praha 4 – Modřany
tel.: 241 762 724–5
fax: 241 773 251
e-mail: info@blue-panther.cz
http://www.blue-panther.cz

