

## Metody analýzy vhodnosti měřicích systémů

M. Motyčka, O. Tůmová

Katedra technologií a měření, Fakulta elektrotechnická, ZČU v Plzni,  
Univerzitní 26, Plzeň

E-mail : mmotycka@ket.zcu.cz, tumova@ket.zcu.cz

### Anotace:

Analýzy vhodnosti měřicích systémů patří mezi klíčové nástroje používané pro zajištění kvality výroby. Jedná se o metody, které zkoumají kvalitu naměřených hodnot, tedy posuzují vhodnost nasazení daného měřicího systému pro konkrétní aplikaci. Měřicí systém je posuzován z hlediska rozlišení, přesnosti měření, vlivu obsluhy na měřicí proces, případně celkové nejistoty měření. Základní příručky, které se těmito metodami zabývají, jsou MSA – Analýza měřicích systémů a VDA5 – Vhodnost kontrolních procesů. Účelem tohoto článku je předložit čtenáři základní přehled hlavních principů těchto metod.

Analysis of the suitability of the measurement systems is one of the key tools used to ensure product quality. These are all methods that examine the quality of the measured data, thus assessing the suitability of use of the measuring system for a particular application. The measuring system is evaluated in terms of resolution, accuracy, and operator influence on the measuring process or the overall measurement uncertainty. Basic handbooks concerned with these methods are MSA - Measurement Systems and Analysis VDA5 - Suitability of control processes. The purpose of this paper is to present the reader an overview of the basic principles of these methods.

### ÚVOD

„Můžeme tak vyrábět tak přesně, jak přesně umíme měřit.“

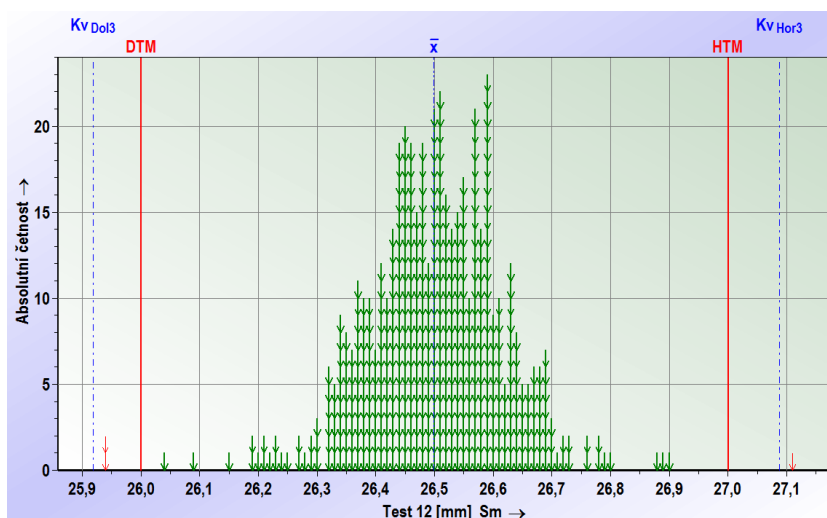
Tato jednoduchá poučka naprosto přesně vystihuje, jakou roli mají měřicí systémy v průmyslové praxi. Jedná se o naprosto klíčovou součást systému řízení kvality. Nevhodně zvolený měřicí systém může naprosto degradovat sbíraná data, na jejichž základě usuzujeme o kvalitě výroby a o plnění specifikačních požadavků pro daný výrobek. Vystavujeme se poté nebezpečí, že nebude včas rozpoznán pokles způsobilosti výrobních procesů a tedy i samotné kvality výroby. Z tohoto důvodu se provádějí studie vhodnosti měřicích systémů, které mají prokázat, že se daný měřicí systém hodí pro daný výrobní proces. Vhodností měřicích systémů se zabývá několik příruček. Mezi nejčastěji citované patří dvě: VDA5 – Vhodnost kontrolních procesů, kterou vydává svaz německého automobilového průmyslu (VDA). Druhou příručkou je MSA – Analýza systémů měření, která je vydávána pod patronací americké akční skupiny pro automobilový průmysl AIAG (Automotive Industry Action Group).

### CITLIVOST MĚŘICÍHO SYSTÉMU

První otázkou, kterou si musíme při vyšetřování vhodnosti měřicího procesu zabývat, by měla mířit na rozlišení měřicích systémů. Je toto rozlišení dostatečné? Je dostatečné pouze vzhledem k tolerancím výrobního procesu nebo i k samotné šířce procesu. Důležitost rozlišení měřicích systémů spočívá v tom, abychom na základě sebraných dat mohli včas detekovat různé posuny v kvalitě výroby. Pro vyšetřování citlivosti používají výše zmíněné příručky různé přístupy. Ve VDA je jednoznačně definováno, že rozlišení měřicího systému by mělo být:

$$\%RE < 5\% TOL \quad (1)$$

tedy rozlišení měřicího systému může činit maximálně 5% tolerance výrobního procesu. U analogových přístrojů se jako rozlišení uvažuje tzv. nejmenší bezpečně vyhodnotitelná hodnota kroku, tj. vzdálenost mezi dvěma dílky. U digitálních přístrojů je rozlišení nejmenší stálá zobrazovaná hodnota. Vždy je třeba dávat rozlišení měřidla do kontextu výrobních tolerancí, případně šířky výrobního procesu. Pro velmi jednoduché zjištění, zda je rozlišení měřicího systému dostatečné, je možné použít např. *diagram absolutních četností (obr. 1)*. Abychom mohli prohlásit rozlišení za dostatečné, je třeba, aby v diagramu bylo minimálně 20 různých hodnot v toleranci procesu.



Obr. 2 Diagram absolutních četností pro měřicí systém s dostatečným rozlišením

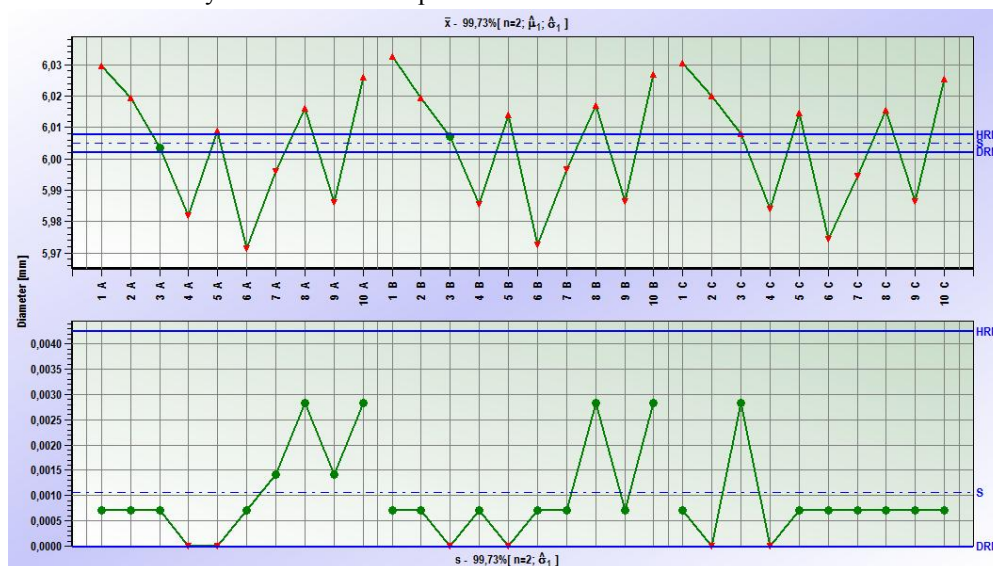
MSA v této otázce pracuje s tzv. *prahem citlivosti měřidla*. Jako práh citlivosti se označuje velikost změny vzhledem k referenční hodnotě, kterou je přístroj schopen detekovat. Prahem citlivosti tedy je hodnota nejmenšího dílku na stupnici měřidla. Na rozdíl od VDA5, u které žádné další dodatečné dělení stupnice není přípustné, zde je možné v případě hrubé stupnice použití i dělení i jednotlivých dílků na polovinu. V MSA obecně platí, že práh citlivosti by měl činit přinejmenším jednu desetinu měřeného rozsahu. V současnosti se chápání tohoto pravidla upravuje tak, že práh citlivosti by měl být minimálně jedna desetina pozorované variability procesu. Toto je motivováno požadavkem na neustálé zlepšování procesu. Důsledky použití systému s nevhodným prahem citlivosti je možné pozorovat v regulačních diagramech, konkrétně v diagramu pro výběrové rozpětí (obr. 2) poté můžeme pozorovat pouze jednu, dvě nebo tři hodnoty možného rozpětí uvnitř regulačních mezí. Rozpětí v tomto případě definujeme jako rozdíl maximální a minimální hodnoty. Pokud jsou v diagramu hodnoty čtyři a více jak čtvrtina jednotlivých rozpětí je nulová, poté také není práh citlivosti dostatečný. Tato nulová rozpětí

jsou poté spíše důsledkem zaokrouhlování, než indikací reálné variability v podskupině.

## VHODNOST MĚŘICÍHO SYSTÉMU DLE MSA

V rámci MSA se vyšetřuje několik základních charakteristik měřicího systému. Mimo výše zmíněné citlivosti to jsou charakteristiky, které popisují **variabilitu polohy** naměřených dat. Mezi tyto charakteristiky patří např. *strannost*, tedy rozdíl mezi referenční hodnotou a průměrnou hodnotou měření stejné charakteristiky na stejném dílu. Strannost je mírou systematické chyby měření. Mezi nejčastější příčiny této chyby patří např. použití nekalibrovaného měřidla, nesprávné použití etalonu, použití nevhodného měřidla či různá opotřebení.

Další takovouto charakteristikou je *stabilita* (drift), tedy celková variabilita výsledku měření v dostatečně dlouhém časovém úseku. Jedná se tedy o změnu strannosti v čase. Závislost změny strannosti na velikosti či rozsahu měřených dat se označuje jako *linearita* systému.



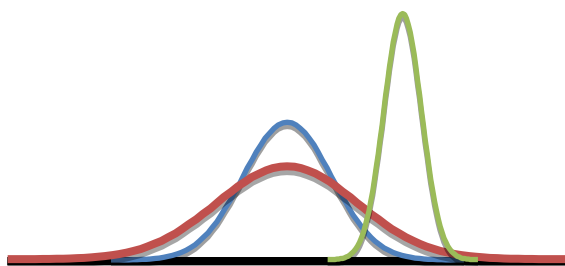
Obr. 1 Regulační diagram pro výběrové rozpětí

Dalšími sledovanými charakteristikami jsou charakteristiky popisující **variabilitu šířky** procesu v závislosti na měřicím systému. Nejčastěji uváděnou charakteristikou měřicího systému v souvislosti s MSA jsou indexy *GRR* (z angl. *gauge repeatability and reproducibility*, bývá označováno i jako *R&R*). *GRR* je odhad variability reprodukovatelnosti a opakovatelnosti měřicího systému. *Opakovatelnost* je v tomto případě označení pro variabilitu samotného měřicího systému. Udává variabilitu výsledků měření získaných jedním měřidlem, které bylo použito několikrát jedním operátorem pro měření jedné charakteristiky na stejném dílu. Tato charakteristika bývá ve studiích MSA označována *EV*. Jako *reprodukovatelnost* se běžně označuje variabilitu mezi operátory. Jedná se tedy o variabilitu průměru naměřených hodnot jednotlivých operátorů, které byly získány pomocí stejného měřicího přístroje při měření konkrétní charakteristiky na stejném díle. Reprodukovatelnost se v MSA studiích označuje *AV*. Celková chyba reprodukovatelnosti a opakovatelnosti systému odpovídá:

$$\sigma_{GRR}^2 = \sigma_{repr.}^2 + \sigma_{opak.}^2 \quad (2)$$

Celkově se poté pozorovaná variabilita skládá z variability samotného výrobního zařízení (skutečná variabilita) a z variability měřicího systému (viz. obr. 3):

$$\sigma_{poz.}^2 = \sigma_{skut.}^2 + \sigma_{GRR}^2 \quad (3)$$



Obr. 3 Složky variability procesu

### Numerická analýza výsledků

Základní vztahy pro numerickou analýzu výsledků MSA jsou následující:

$$EV = \bar{R} \times K_1 \quad (4)$$

$$AV = \sqrt{(\bar{X}_{DIFF} \times K_2)^2 - \frac{EV^2}{nr}} \quad (5)$$

$$GRR = \sqrt{EV^2 + AV^2} \quad (6)$$

kde  $\bar{R}$  je průměrné rozpětí měřených dílů,  
 $\bar{X}_{DIFF}$  je max. rozdíl průměru operátora,  
 $K_1, K_2$  jsou konstanty dle MSA, přílohy C,  
 $n$  je počet dílů,  
 $r$  počet měření.

Variabilita dílů PV odpovídá:

$$PV = R_p \times K_3 \quad (7)$$

kde  $R_p$  je rozpětí průměru dílů,

$K_3$  je konstanta dle MSA, přílohy C.

A celková variabilita TV se poté vypočte dle vztahu:

$$TV = \sqrt{GRR^2 + PV^2} \quad (8)$$

Charakteristika *GRR* bývá velmi často uváděna v procentech, které označují podíl variability měřicího systému na celkové variabilitě:

$$\%GRR = \left(\frac{GRR}{TV}\right) \times 100\% \quad (9)$$

Další podrobnější výpočty, vč. grafické analýzy naměřených výsledků je možné nalézt v příručce MSA [1].

### Kritéria přijatelnosti měřicího systému

Základním kritériem pro označení měřicího systému jako způsobilého je charakteristika *GRR*, konkrétně vyjádřena v procentech *%GRR*, podle které můžeme systém zařadit do několika kategorií:

#### 1. *%GRR* < 10%

V tomto případě se jedná o obecně přijatelný systém měření.

#### 2. *%GRR* = 10% ~ 30%

Takovýto systém může být přijatelný pro některé aplikace. O jeho akceptování se následně rozhodujeme dle nákladů na měřicí zařízení, nákladů na přepracování nebo opravu či dle důležitosti měřicí aplikace. Použití měřicího systému, který je způsobilý tzv. s výhradou, by mělo být schváleno zákazníkem.

#### 3. *%GRR* > 30%

Jedná se o nepřijatelný systém měření. Mělo by být věnováno maximální úsilí pro jeho zlepšení.

*Nicméně použití pouze indexu GRR jako jediného kritéria pro přijatelnost měřicího systému NENÍ dostatečné.*

Další charakteristikou, kterou je možno pro hodnocení použít, je počet odlišných kategorií *ndc* (z angl. *number of discreet categories*):

$$ndc = 1,41 \times \left(\frac{PV}{GRR}\right) \quad (10)$$

Počet odlišných kategorií by měl být větší než 5. V takovémto případě je možné daný měřicí systém použít pro řízení procesu pomocí regulačních diagramů. V případě, že  $ndc = 2 \sim 4$  se již nedoporučuje používat tento systém pro odhady parametrů a ukazatelů procesu, protože takovéto odhady nebudou příliš přesné. Pokud  $ndc = 1$  tak systém pouze indikuje, zda vyrobené díly jsou či nejsou ve specifikacích. Pro jakékoli odhady je naprosto nepřijatelný.

**Tab. 1** Studie GRR dle MSA

díl	operátor A		operátor B		operátor C	
	měření č. 1	měření č. 2	měření č. 1	měření č. 2	měření č. 1	měření č. 2
1	6,029	6,03	6,033	6,032	6,031	6,03
2	6,019	6,02	6,02	6,019	6,02	6,02
3	6,004	6,003	6,007	6,007	6,01	6,006
4	5,982	5,982	5,985	5,986	5,984	5,984
5	6,009	6,009	6,014	6,014	6,015	6,014
6	5,971	5,972	5,973	5,972	5,975	5,974
7	5,995	5,997	5,997	5,996	5,995	5,994
8	6,014	6,018	6,019	6,015	6,016	6,015
9	5,985	5,987	5,987	5,986	5,987	5,986
10	6,024	6,028	6,029	6,025	6,026	6,025

Díl čís.	1		Díl ozn.	Shaft		
Znak č.	1460320000		Znak ozn.	Diameter		
	Rozptyl	Směrodatná odchylka				
Opakovatelnost	0,00000236	0,00153	EVO = 0,00659 ≤ 0,00791 ≤ 0,00988	%EVO = 13,18%		
Reprodukovatelnost	0,00000868	0,000932	AV = 0,00185 ≤ 0,00480 ≤ 0,0321	%AV = 8,00%		
Interakce	[pooling]	[pooling]	IA =	%IA = ---		
Celkové rozptýlení	0,00000322	0,00180	R&R = 0,00815 ≤ 0,00925 ≤ 0,0331	%R&R = 15,42%		
Tolerance	T =	0,060	Hladina spolehlivosti	1-α =	95,000%	
Rozlišení	%RE =	1,67%				
Celkové rozptýlení	%R&R =	15,42%				
Rozptýlení dílů	%PV =	167,56%				
Počet rozlišovatelných tříd	ndc =	9				
Měřicí systém je způsobilý (RE,U,R&R)						
Q-DAS Messunsicherheit (03/2005): Verfahren 2						
			T <sub>min</sub> (R&R) =	0,0462	T <sub>min</sub> (R&R) =	0,0462

**Obr. 4** Výstup analýzy systému měření ze softwaru Solara

### Příklad výpočtu GRR dle MSA

Na jednoduchém příkladu si nyní ukážeme, jakým způsobem postavit studii GRR. Nejčastěji se doporučuje, aby se při analýze systému měření měřilo minimálně 10 dílů a analýzy se účastnili 3 operátoři, přičemž každý by měl měřit minimálně dvakrát. Důležité při samotném měření je, aby jednotlivé díly byly číslovány, ale takovým způsobem, aby operátor nevěděl, jaký díl právě měří. Stejně tak by operátor neměl vědět, jaké hodnoty naměřili operátoři ostatní. Toto je důležité proto, aby byla zajištěna nezávislost měřených dat.

V tabulce 1 tak máme změřených celkem 60 hodnot. V tomto případě se jedná o měření průměru hřídele. Na základě těchto hodnot se provede analýza systému měření. Pro vyhodnocení použijeme software Solara od firmy Q-DAS s.r.o. Výstup analýzy můžeme vidět na obr. 4. Z těchto výsledků je patrné, že měřicí systém je pro daný proces způsobilý, u GRR poté způsobilý s výhradou.

### VHODNOST KONTROLNÍCH PROCESŮ DLE VDA

Na rozdíl od MSA základem vyšetření vhodnosti kontrolních procesů dle VDA je vyšetřování nejistot. Studie je rozdělena do dvou částí – vhodnost měřicího systému a vhodnost měřicího procesu. Do vhodnosti měřicího systému se uvažují jen ty dílčí nejistoty, které bezprostředně souvisí se samotným měřicím systémem. Jedná se např. nejistotu kalibrace a opakovatelnost etalonu, odchylka linearity a další. Do vhodnosti měřicího procesu se poté počítá opakovatelnost operátorů, reprodukovatelnost měřicího přípravku, různé interakce a nejistota způsobená změnami teploty. Samotné stanovení nejistot měření probíhá dle GUM [2]: „Návod pro stanovení nejistot měření.“

Z vypočítaných nejistot měření se stanoví ukazatele vhodnosti měřicího systému  $Q_{MS}$  a procesu  $Q_{MP}$ :

$$Q_{MS} = \frac{2U_{MS}}{TOL} \times 100\% \quad (11)$$

$$Q_{MP} = \frac{2U_{MP}}{TOL} \times 100\% \quad (12)$$

kde TOL je šířka tolerančního pásma

$U_{MS}$ ,  $U_{MP}$  je rozšířená nejistota měřicího systému a měřicího procesu.

Jako limitní hodnoty ukazatelů vhodnosti měřicího systému a procesu jsou navrženy  $Q_{MS} = 15\%$  a  $Q_{MP} = 30\%$ .

## ZÁVĚR

Tento článek by měl čtenáři nabídnout základní pohled na principy analýz vhodnosti měřicích systémů. Případné zájemce o podrobnější informace týkající se této problematiky odkážeme na plné znění příruček MSA [1] a VDA 5 [3].

*Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže ZČU č. SGS-2012-026 „Materiálové a technologické systémy v elektrotechnice“*

## LITERATURA

- [1] MSA. *Analýza systému měření*. 4. vydání. Praha: ČSJ, 2011
- [2] JCGM 100:2008. *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement*. Sèvres: BIPM, 2008
- [3] VDA5. *Vhodnost kontrolních procesů*. 2. vydání. Praha: ČSJ, 2011.