



České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

# Návrh metodiky pro zhodnocení kalibračních lhůt komunálních měřidel

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

Autor: Bc. Jiří Resl

Vedoucí práce: Ing. Jan Urban

Studijní program: N 2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 3911T035 Výrobní a materiálové inženýrství

Praha 2023

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Resl** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **482689**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
Studijní program: **Výrobní inženýrství**  
Specializace: **Bez specializace**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Návrh metodiky pro zhodnocení kalibračních lhůt komunálních měřidel**

Název diplomové práce anglicky:

**Creation of methodology for evaluation the calibration interval of measurement gauge**

Pokyny pro vypracování:

1. Provedení rešerše dostupných metod hodnocení kalibračních lhůt.
2. Sestavení matematického modelu pro ověření správného nastavení kalibračního lhůty vybraných typů měřidel.
3. Ověření matematického modelu v reálných podmínkách průmyslové výroby.
4. Analýza ekonomických dopadů při nasazení v praxi.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Jan Urban ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **31.03.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2023**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Ing. Jan Urban  
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, software atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne: .....

.....

Podpis autora

## Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Janu Urbanovi za vedení diplomové práce za příležitost se problematikou zabývat, jeho cenné poznámky a profesionální přístup. Poděkování patří rovněž dalším kolegům z oddělení GQG-2 ve Škoda Auto a také rodině za neocenitelnou podporu během celého studia.

## Anotace

Diplomová práce se zabývá problematikou optimalizace kalibračních intervalů komunálních měřidel ve společnosti Škoda Auto. Byla provedena obecná rešerše současného stavu řešené problematiky a zhodnocení aktuálního stavu v podmínkách firmy. Hlavní část práce se zabývá vývojem vlastní komplexní metodiky pro optimalizaci kalibračních intervalů. Pomocí navržené metodiky byly optimalizovány kalibrační lhůty vybraných skupin komunálních měřidel používaných v rámci firmy (posuvná měřidla, mikrometry, úchylkoměry). Závěrem byly analyzovány ekonomické a technické dopady při zavedení metodiky do praxe, navrženy možnosti využití v praxi a shrnuty možnosti dalšího vývoje.

## Klíčová slova

Metrologie, kalibrace, kalibrační lhůta, kalibrační interval, optimalizace, komunální měřidlo.

## Annotation

The diploma thesis deals with the issue of optimization of calibration intervals of gauges in Škoda Auto. General research of the current state of the problem and an evaluation of the current situation in the company conditions was carried out. The main part of the thesis concerns the development of own complex methodology for optimization of calibration intervals. Using the proposed methodology, the calibration intervals of selected groups of gauges used within the company (calipers, micrometres, indicators) were optimized. Finally, the economic and technical implications of putting the methodology into practice were analysed, the possibilities of practical application were proposed and the possibilities of further development were summarised.

## Keywords

Metrology, Calibration, Calibration interval, Optimization, Gauge.

# Obsah

1	Úvod .....	11
2	Kalibrace .....	12
2.1	Metrologická návaznost .....	12
2.2	Rozdělení měřidel.....	13
2.2.1	Etalon .....	13
2.2.2	Pracovní měřidla stanovená.....	13
2.2.3	Pracovní měřidla nestanovená.....	14
2.3	Pohled normy ISO 9001:2015 na proces kalibrace.....	14
3	Aktuální stav řešené problematiky .....	15
3.1	Historický vývoj .....	15
3.2	Aktuální stav problematiky.....	15
3.3	Metody stanovení kalibračních intervalů .....	17
3.4	Spolehlivost měřidla .....	19
3.4.1	Modelování spolehlivosti měřidla .....	20
3.4.2	Seskupování měřidel .....	20
3.5	Matematické a statistické metody .....	21
3.5.1	Modely spolehlivosti měřidla .....	21
3.5.2	Cenzorování dat .....	23
3.5.3	Regresní analýza .....	24
3.5.4	Interval spolehlivosti .....	27
4	Metrologie ve Škoda Auto .....	28
4.1	Současný stav komunálních měřidel ve Škoda Auto .....	29
4.2	Kalibrace měřidel ve Škoda Auto.....	31
4.2.1	Stanovení kalibrační lhůty .....	32
4.2.2	Kalibrační postupy.....	34
5	Návrh metodiky pro optimalizaci kalibračních lhůt .....	43
5.1	Třídění měřidel .....	43
5.1.1	Minimální velikost skupiny .....	46
5.1.2	Tvorba datasetu .....	51
5.2	Matematická analýza .....	55
5.2.1	Aplikace matematických modelů na reálná data .....	55
5.2.2	Nástroje pro matematickou analýzu .....	56
5.2.3	Tvar průběhu spolehlivosti.....	62
5.2.4	Cut-off.....	65

5.2.5	Výpočet kalibrační lhůty.....	67
5.2.6	Srovnání matematických metod .....	69
6	Analýza kalibračních intervalů měřidel ve Škoda Auto .....	70
6.1	Posuvné měřítko mechanické .....	72
6.1.1	Vliv konstrukce měřidla.....	72
6.1.2	Vliv rozsahu měřidla.....	73
6.2	Posuvné měřítko digitální.....	75
6.2.1	Vliv prostředí použití .....	75
6.2.2	Vliv konstrukce měřidla.....	76
6.2.3	Vliv rozsahu měřidla.....	78
6.3	Mikrometr mechanický .....	80
6.3.1	Vliv rozsahu měřidla.....	80
6.4	Mikrometr digitální .....	82
6.4.1	Vliv rozsahu měřidla.....	82
6.5	Digitální úchylkoměr.....	83
6.5.1	Vliv rozlišení měřidla .....	83
6.5.2	Vliv konstrukce měřidla.....	84
6.6	Úchylkoměr mechanický .....	85
6.6.1	Vliv konstrukce, rozsahu a rozlišení měřidla .....	85
6.7	Páčkový úchylkoměr.....	88
6.7.1	Vliv konstrukce, rozsahu a rozlišení měřidla .....	88
7	Technicko-ekonomické dopady optimalizace kalibračních lhůt .....	90
8	Závěr.....	93
	Bibliografie.....	96
	Seznam tabulek.....	99
	Seznam obrázků.....	101
	Seznam příloh .....	104



## Seznam zkratek

AKL	akreditovaná kalibrační laboratoř
AMS	autorizované metrologické středisko
CAQ	Computer-Aided Quality (počítačová podpora řízení kvality)
CMM	Coordinate-measuring Machine (souřadnicový měřicí stroj)
ČMI	Český metrologický institut
Ex	exponenciální rozdělení
G-N	Gauss-Newtonova iterační metoda
ID	interní dokumentace
IKM	interní kalibrační místo
IMS	Integrated Management System (integrovaný systém řízení)
KP	kalibrační postup
L-M	Levenberg-Marquardtův algoritmus
MLE	Maximum Likelihood Estimation (metoda maximální věrohodnosti)
NCSLI	National Conference of Standards Laboratories International
OJ	organizační jednotka
ON	organizační norma
POD	procesní a organizační dokumentace
QMS	Quality Management System (systém řízení kvality)
ÚNMZ	Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví
VDA	Verband der Automobilindustrie (Německé sdružení automobilového průmyslu)
W2 <sub>p</sub>	dvouparametrické Weibullovo rozdělení

## Seznam použité symboliky

$\theta$	[1]	parametr rozdělení
$\lambda$	[1]	parametr rozdělení
$\Delta$	[%]	poměrná změna
CI	[rok] [měsíc]	interval spolehlivosti
CI <sup>U</sup>	[rok] [měsíc]	horní limit intervalu spolehlivosti
CI <sup>L</sup>	[rok] [měsíc]	spodní limit intervalu spolehlivosti
DFE	[1]	počet stupňů volnosti
EOP	[1]	cílová spolehlivost
I	[rok] [měsíc]	optimální kalibrační interval
n	[1]	celkový počet měřidel ve skupině v čase t
P	[1]	koeficient spolehlivosti
PCC	[1]	Pearsonův korelační koeficient
R	[1]	spolehlivost
s	[1]	počet vyhovujících měřidel v čase t
S	[1]	směrodatná odchylka
SSE	[1]	součet čtverců odchylek
t	[měsíc]	čas od provedení první kalibrace
$t_{1-\frac{\alpha}{2}, n-p}$	[1]	percentil oboustranného Studentova t-rozdělení

# 1 Úvod

Komunální měřidla jsou ve většině průmyslových podniků nejzastoupenější skupinou měřidel. Většina z nich je dle Zákona o metrologii zařazena do kategorie pracovních měřidel nestanovených. Pro zajištění návaznosti měření jsou tato měřidla kalibrována v pravidelných intervalech. Četnost provádění kalibrace však přímo nevyplývá z ani legislativních, ani z normativních požadavků. Rozhodnutí o délce kalibračního intervalu je tak plným právem provozovatele měřidla. Zásadní otázkou však je, jak dlouhý by měl tento interval být. V ideálním případě by kalibrace měla být provedena dříve, než měřidlo ztratí své metrologické vlastnosti.

V dnešní době je stále běžnou praxí určovat kalibrační interval „na základě předchozích zkušeností“. Takto stanovený interval ale není založen na žádných objektivních informacích o tom, jak klesá spolehlivost měřidel v čase. Příliš krátký kalibrační interval sice zaručuje vysokou spolehlivost měřidel, ale přináší nadměrně vysoké náklady mimo jiné na provádění kalibrací. Příliš dlouhý interval naopak snižuje náklady na provádění kalibrací, zároveň ale snižuje spolehlivost. To může znamenat zvýšení nákladů na nekvalitu, jelikož riziko, že měřidlo, které již ztratilo své metrologické vlastnosti, je stále používáno, je značné. Cílem je tedy najít optimum mezi ekonomickým a technickým hlediskem.

V současné chvíli je problematika v odborné literatuře řešena pouze na teoretické bázi bez přesahu do praxe. Cílem této diplomové práce je v první části shrnout teoretické poznatky a přístupy k řešení problematiky publikované v odborné literatuře, následně pak navrhnout vhodnou metodiku pro optimalizaci kalibračních lhůt, ověřit ji v reálných podmínkách společnosti Škoda Auto a vyhodnotit ekonomické a technické dopady v případě zavedení navržené metodiky do praxe.

## 2 Kalibrace

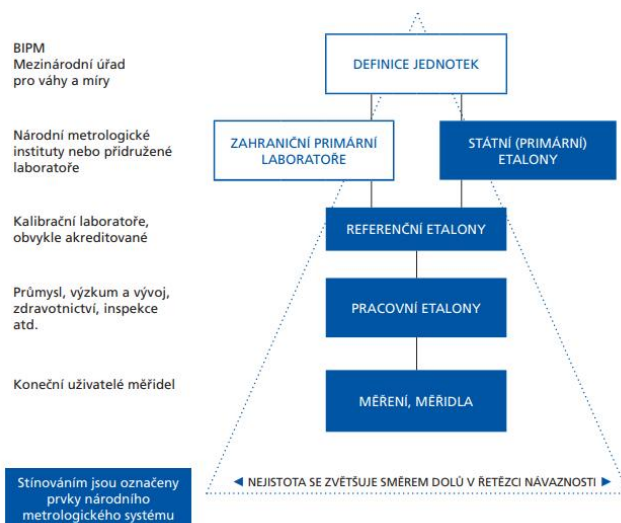
Kalibrace je základním prostředkem pro zajištění návaznosti měřidel [1]. Mezinárodní metrologický slovník ISO/IEC GUIDE 99:2007 definuje pojem kalibrace jako „činnost, která za specifikovaných podmínek v prvním kroku stanoví vztah mezi hodnotami veličiny s nejistotami měření poskytnutými etalony a odpovídajícími indikacemi s přidruženými nejistotami měření a ve druhém kroku použije tyto informace ke stanovení vztahu pro získání výsledku měření z kalibrace“ [2]. Tento dokument rovněž upozorňuje na fakt, že v běžné praxi bývá jako kalibrace chápán pouze samotný první krok ve výše uvedené definici.

Vystavuje se kalibrační list a měřidlo se obvykle označuje kalibrační značkou. Kromě zajištění návaznosti měřidel existují další důvody pro kalibraci. Zajišťuje konzistenci údajů z měření s jiným měřením, stanovuje správnost údajů a zajišťuje spolehlivost měřidla [1].

### 2.1 Metrologická návaznost

Pojem metrologická návaznost je v [2] definován jako „vlastnost výsledku měření, pomocí níž může být výsledek vztažen ke stanovené referenci přes dokumentovaný nepřerušovaný řetězec kalibrací, z nichž každá se podílí svým příspěvkem na stanovené nejistotě měření“.

Zákon o metrologii definuje pojem návaznost měřidel jako „zařazení daných měřidel do nepřerušené posloupnosti přenosu hodnoty veličiny počínající etalonem nejvyšší metrologické kvality pro daný účel“ [3]. Princip metrologické návaznosti zajišťuje návaznost výsledku měření až na nejvyšší mezinárodní úroveň.



Obr. 1 - schéma metrologické návaznosti [1].

## 2.2 Rozdělení měřidel

Dle Zákona o metrologii č. 505/1990 Sb. se měřidla člení na

- etalony,
- pracovní měřidla stanovená (tzv. stanovená),
- pracovní měřidla nestanovená (tzv. pracovní),
- certifikované referenční materiály a ostatní referenční materiály [3].

### 2.2.1 Etalon

Etalon měřicí jednotky nebo stupnice určité veličiny je dle [3] „*měřidlo sloužící k realizaci a uchování této jednotky nebo stupnice a k jejímu přenosu na měřidla nižší přesnosti*“. Zákon o metrologii definuje dvě kategorie etalonů:

- a) státní etalon,
- b) hlavní etalon.

**Státní etalony** tvoří nejvyšší úroveň v rámci řetězce metrologické návaznosti státu. Navazují se především na mezinárodní etalony nebo na státní etalony jiných států. V České republice za jejich tvorbu, rozvoj a udržování odpovídá stát prostřednictvím Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ) [3]. Praktickým uchováváním státních etalonů je pověřen ve většině případů Český metrologický institut (ČMI). V některých specifických případech, kdy je vhodné využít kapacity existujících subjektů, může být uchováním státního etalonu pověřen tento externí subjekt. V současné době je to například Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, v.v.i. uchovávající státní etalony času a frekvence [4].

**Hlavní etalony** tvoří základ návaznosti měřidel u subjektů. Podléhají povinné kalibraci. Kalibraci provádí ČMI nebo akreditované kalibrační laboratoře (AKL), popř. vhodné zahraniční subjekty [3].

### 2.2.2 Pracovní měřidla stanovená

Do kategorie **pracovních měřidel stanovených** spadají měřidla určená vyhláškou Ministerstva průmyslu a obchodu (Vyhláška č. 345/2002 Sb. [5]). V běžné praxi se označují jako měřidla stanovená. Jde o měřidla s významem mj. v závazkových vztazích, pro stanovení sankcí, poplatků, tarifů, pro ochranu zdraví a životního prostředí. Příkladem pracovních měřidel

stanovených jsou např. měřidla protečeného množství vody a plynu, elektroměry, váhy používané pro měření skutečného obsahu výrobku v hotovém balení, taxametry nebo tachografy. Vyhláška č. 345/2002 Sb. rovněž určuje dobu platnosti ověření jednotlivých kategorií pracovních měřidel stanovených [3].

Činnost vedoucí k potvrzení správných metrologických vlastností stanoveného měřidla se nazývá *ověření*. K ověřování jsou oprávněni ČMI a v rozsahu své autorizace určeném na základě rozhodnutí ÚNMZ také autorizovaná metrologická střediska (AMS). Subjekt provádějící ověření opatří ověřené měřidlo úřední značkou nebo vydá ověřovací list, případně využije obou způsobů [4].

### 2.2.3 Pracovní měřidla nestanovená

**Pracovní měřidla nestanovená** jsou zákonem definována jako všechna měřidla, která nejsou pracovním měřidlem stanoveným ani etalonem [3]. V běžné konverzaci se označují jako měřidla pracovní. Způsob návaznosti (postup kalibrace, subjekt provádějící kalibraci, kritéria shody a interval kalibrace) si v tomto případě volí uživatel měřidla sám na základě vlastního uvážení [4]. Do této kategorie spadá většina měřidel používaných v průmyslové praxi.

## 2.3 Pohled normy ISO 9001:2015 na proces kalibrace

Norma ISO 9001:2016 v článku 7.1.5.2 Návaznost měření pojednává o obecných požadavcích na návaznost měřidel.

### *7.1.5.2 Návaznost měření*

*Je-li návaznost měření požadavkem nebo je považována organizací za nezbytnou součást poskytování důvěry v platnost výsledků měření, musí být měřící vybavení*

- a) ve stanovených intervalech nebo před použitím kalibrováno nebo ověřováno podle etalonů navázaných na mezinárodní nebo národní etalony; jestliže takové etalony neexistují, musí se podklad použitý pro kalibraci nebo ověřování uchovávat jako dokumentovaná informace;*
- b) označeno tak, aby bylo možné určit jeho stav;*
- c) chráněno proti změnám nastavení, poškození nebo znehodnocení, které by narušily platnost stavu kalibrace a následné výsledky měření [6].*

Norma tak pouze obecně určuje nutnost provádění kalibrace měřidel v blíže nespecifikovaných intervalech. To odpovídá znění Zákona o metrologii č. 505/1990 Sb., dle kterého je volba způsobu návaznosti pracovních měřidel zahrnující výběr subjektu, lhůty provádění i kritéria shody výlučným právem uživatele měřidla.

Důležité je zmínit, že pojem „ověření“ používaný v normě neodpovídá významu pojmu „ověření“ ve smyslu Zákona o metrologii č. 505/1990 Sb. [6].

## 3 Aktuální stav řešené problematiky

### 3.1 Historický vývoj

Analýza kalibračních intervalů má svůj počátek na konci 50. let minulého století. V počátcích se jednalo o jednoduché algoritmické metody. Na základě nich se kalibrační interval měřidla zkracoval či prodlužoval dle toho, zda kalibrace byla provedena s vyhovujícím nebo nevyhovujícím výsledkem.

Na konci 60. let se pro analýzu začaly využívat statistické metody s využitím teorie pravděpodobnosti. V praxi bylo ověřeno, že měřidla s delší dobou uplynulou od poslední kalibrace mají často větší pravděpodobnost, že budou při nové kalibraci shledány nevyhovujícími. Ke stanovení kalibrační lhůty se začala využívat historická data z doposud proběhlých kalibrací. Metody používané dnes jsou založeny na tomto principu [7].

### 3.2 Aktuální stav problematiky

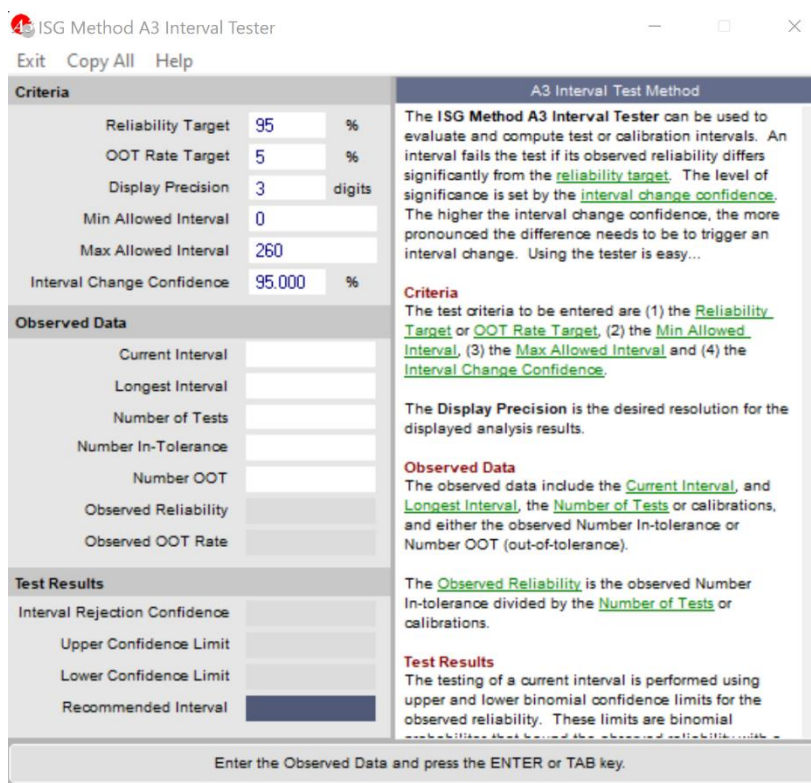
Na základě dostupných zdrojů lze konstatovat, že analýza kalibračních intervalů není v průmyslové praxi příliš využívaná i přes možné benefity pro podnik.

Určení kalibrační lhůty pro dané měřidlo se ve většině organizací provádí „na základě předchozí zkušenosti“. Při zavádění nového měřidla do systému zodpovědný pracovník přiřadí obvykle kalibrační lhůtu již používaného obdobného měřidla. Tato lhůta však obvykle není stanovena na základě žádných objektivních znalostí problematiky.

Důvodem nevyužívání může být i poměrně nízký zájem o problematiku z oblasti akademické sféry. Tématu bylo v České republice věnováno jen velmi omezené množství odborných článků či závěrečných prací. Na světovém poli existuje rovněž omezené množství vědeckých prací, ve většině případů bez přesahu do praktické oblasti.

Nejrelevantnějším materiálem se zdá být publikace *Establishment and Adjustment of Calibration Intervals* (2010) od americké neziskové organizace NCSL International (NCSLI) zabývající se výzkumem, vývojem a vzděláváním v oblasti metrologie [8]. Publikace poskytuje komplexní pohled na řešenou problematiku od teoretických základů po podrobné příklady jednotlivých metod analýzy. Základním podkladem pro vytvoření této publikace byla příručka *Metrology and Calibration Provisions Guidelines* od organizace NASA z roku 1990 [9]. I přes značnou obsáhlost v teoretické oblasti i podrobný matematický popis jednotlivých metod i zde však chybí ukázka konkrétních praktických příkladů.

Zřejmě jedinou komerční aplikací některé metody publikované v [8] je software **IntervalMAX 2.0** vyvinutý americkou společností Integrated Sciences Group, která se zabývá vývojem software a vzděláváním v oblasti analýzy nejistot a rizik, statistického řízení procesů a analýzy kalibračních intervalů. Software využívá metody S2 a A3 dle [8]. Cena za licenci se pohybuje v závislosti na velikosti inventáře a rozsahu licence od 3 300 USD do 46 000 USD. Společnost rovněž nabízí software Method A3 Interval Tester založeném na metodě A3 dle [8] jako freeware. Metoda je však vhodná pro menší inventáře měřidel [10].



Obr. 2 - IntervalMAX 2.0 [10].



### 3.3 Metody stanovení kalibračních intervalů

Publikace NCSLI [8] dělí metody hodnocení kalibračních intervalů do několika kategorií.

#### **Metoda obecného intervalu (General Interval Method)**

Metoda je vhodná pro organizace s malým a homogenním inventářem měřidel nebo nízkými požadavky na kvalitu. Všem měřidlům je přiřazen společný kalibrační interval [8].

Princip je možné využít i v organizacích s větším počtem měřidel. Při zavádění nové skupiny měřidel do provozu je stanoven společný obecný interval, zpravidla v řádech jednotek měsíců. Takto krátký interval zajistí rychlé nasbírání dat o spolehlivosti měřidel z kalibrační historie, na základě čehož je interval následně upraven na vhodnou hodnotu. Nastavení krátkého kalibračního intervalu s sebou však nese i nevýhody spočívající zejména ve zvýšených nákladech na kalibrace a nutnost častého odebírání měřidla uživateli pro provedení kalibrace [10].

#### **Metoda vypůjčeného intervalu (Borrowed Intervals Method)**

Principem této metody je volba kalibračního intervalu na základě know-how získaného od externí organizace. Systém správy měřidel této organizace by měl být srovnatelný z hlediska cílové spolehlivosti, kalibračních postupů a podmínek použití měřidel. V případě odlišností však existují metody pro korekturu. Příkladem může být například sesterská organizace v rámci koncernu [8].

Zajímavým zdrojem kalibračních historií, v ČR však nedostupným, jsou systémy GIDEP a DoDMIDAS. Tyto systémy spravované americkou armádou vytvořené za účelem sdílení armádního technologického know-how s americkým průmyslem obsahují obrovské množství dokumentů a dat včetně těch týkajících se metrologie, resp. kalibračních intervalů [8].

#### **Převzetí od podobného měřidla**

Další možností je převzetí intervalu od podobného měřidla. To je vhodné například u nových generací stejného měřidla. Pokud se nová generace od původní z hlediska konstrukce zásadně neliší, je možné kalibrační interval převzít [8].

#### **Doporučení výrobce**

Výrobce měřidla může v technické specifikaci uvádět doporučený kalibrační interval. Doporučený kalibrační interval však výrobci obvykle udávají pouze u složitějších specifických

měřicích zařízení. V případě komunálních měřidel bude spolehlivost výrazně závislá na podmínkách použití měřidla, které jsou velmi specifické pro každou organizaci [8].

## **Analýza konstrukce**

Metoda spočívá v analýze konstrukce měřidla a definování pravděpodobnosti selhání kritických částí konstrukce. Metoda je ze své podstaty vhodná pouze pro stanovení kalibračních intervalů speciálních měřidel vlastní konstrukce [8].

### **Metoda A1 – Metoda jednoduché odezvy (Simple Response Method)**

Kalibrační interval je upravován po každé kalibraci nebo častěji po dvou až třech kalibracích. Pokud je měřidlo při kalibraci shledáno vyhovujícím, interval je prodloužen a naopak. Interval je v tomto případě upravován o konstantní hodnotu nebo o násobek původního intervalu. Vzhledem k tomu, že interval je upravován vždy, nikdy nedojde k dosažení optimálního intervalu [8].

### **Metoda A2 – Metoda inkrementální odezvy (Incremental Response Method)**

Jde o modifikaci metody A1. Interval však není upravován o konstantní hodnotu, ale o hodnotu snižující se v čase. Díky tomu se aktuálně nastavený interval v čase asymptoticky přibližuje optimální hodnotě, až dojde k jejímu dosažení [8].

### **Metoda A3 – Metoda testu intervalu (Interval Test Method)**

K úpravě kalibračního intervalu dochází pouze ve chvíli, kdy výsledky kalibrace neodpovídají předpokládanému matematickému modelu. Vyhodnocení se provádí pomocí statistických metod [8].

### **Metoda S1 (klasická metoda)**

Je založena na principu metody maximální věrohodnosti MLE (Maximum Likelihood Estimation). Obecně jde o metodu matematické statistiky, která zjednodušeně řečeno odhaduje neznámé veličiny v závislosti na experimentálních datech. V prvním kroku je formulován pravděpodobnostní model popisující reálnou situaci, v kroku druhém je ověřena shoda daného modelu se skutečností na základě experimentálních dat [8].

Při stanovování pravděpodobnostní funkce je vyžadována znalost přesného času výskytu každého překročení tolerance. Tento čas ale ve většině případů nelze přesně určit, lze pracovat pouze s daty získanými na začátku a konci kalibrační lhůty. Metoda S1 tedy čas selhání měřidla odhaduje. K nejpřesnějšímu odhadu dochází ve chvíli, kdy se získaná pravděpodobnostní funkce blíží exponenciální funkci. Stanovení vhodné kalibrační lhůty se

provádí na základě požadované cílové spolehlivosti. Výhodou je jednoduchost a nízké náklady, nevýhodou je nutná podobnost s exponenciální funkcí. Metoda je vhodná pouze pro organizace se středním nebo velkým inventářem měřidel [8].

### Metoda S2 (binomická metoda)

Pro provádění analýzy je třeba měřidla zařadit do homogenních skupin, například dle typu či konkrétního modelu. Nezbytná je též dostupná kalibrační historie. Metoda vychází ze základní premisy, že podíl měřidel mimo toleranci v dané skupině měřidel roste s rostoucím časem od poslední kalibrace [8].

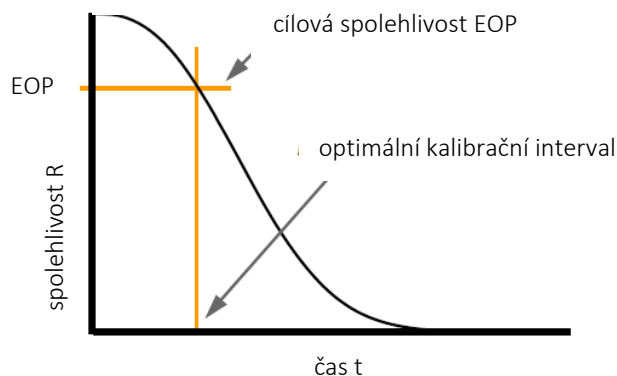
Pro ilustraci si představme skupinu podobných měřidel, ve které se každé měřidlo nachází v tolerančních mezích a skupina je do provozu uvedena ve shodný čas  $t = 0$ . Lze očekávat, že v čase  $t_1 > 0$  bude ve skupině s určitou pravděpodobností nalezeno měřidlo s nevyhovujícími vlastnostmi. Pokud budeme měřidla hodnotit v čase  $t_2 > t_1$ , očekáváme nalezení většího počtu nevyhovujících měřidel [8].

Na základě tohoto předpokladu lze najít vztah mezi počtem nevyhovujících měřidel a časem od poslední kalibrace v rámci této homogenní skupiny měřidel používaných ve srovnatelných podmínkách. Díky tomu lze stanovit vhodný kalibrační interval pro všechna měřidla nacházející se v této skupině, a to např. na základě parametru cílové spolehlivosti [8].

## 3.4 Spolehlivost měřidla

Spolehlivost měřidla  $R(t)$  je definovaná jako pravděpodobnost, že měřidlo pracuje ve svých tolerančních mezích. S rostoucím časem od poslední kalibrace spolehlivost klesá [8].

Požadavky na spolehlivost měřidla jsou určeny na základě aplikace či účelu měřidla. Obvykle se používá pojem „*Reliability Target*“ (cílová spolehlivost) vyjadřující pravděpodobnost, že měřidlo bude na konci kalibrační lhůty pracovat v tolerančních mezích. V praxi je tento parametr označován jako „*EOP target*“ (End Of Period) [8].



Obr. 3 - průběh spolehlivosti v čase (přeloženo) [8].

### 3.4.1 Modelování spolehlivosti měřidla

Cílem modelování spolehlivosti měřidla je stanovení funkčního vztahu mezi spolehlivostí a časem uplynulého od první kalibrace. Znalost této funkce následně umožňuje stanovit kalibrační interval odpovídající požadovanému EOP. K modelování se používají statistické metody vyžadující velké množství dat z proběhlých kalibrací k získání přesných výsledků. Z toho důvodu je tento přístup ke stanovení kalibračních intervalů vhodný spíše pro organizace s dostatečně velkým inventářem měřidel [8].

### 3.4.2 Seskupování měřidel

Pro provedení analýzy se data z proběhlých kalibrací obvykle vhodně seskupují do skupin dle určitých kritérií:

- a) seskupování dle výrobce a typu,
- b) seskupování dle druhu měřidla (posuvka, mikrometr...) [8].

Seskupení by se mělo provádět tak, aby v rámci skupiny byla obsažena pouze měřidla používaná ve srovnatelných podmínkách. Spolehlivost měřidla, potažmo i stanovený kalibrační interval totiž ovlivňuje velké množství faktorů uvedených níže [8].

#### Parametry ovlivňující kalibrační interval

- Nejistota měření požadovaná uživatelem měřidla,
- riziko dodatečných nákladů při nesprávném měření,
- typ měřidla, sklon k opotřebení a driftu,
- četnost používání,
- doporučení výrobce měřidla,

- prostředí (teplota, relativní vlhkost, vibrace...),
- data z předchozích kalibrací,
- způsob transportu měřidla,
- kvalifikace osob pracujících s měřidlem,
- počet osob pracujících s měřidlem [8].

## 3.5 Matematické a statistické metody

### 3.5.1 Modely spolehlivosti měřidla

Dva nejpoužívanější modely pro popis spolehlivosti je exponenciální model a Weibullův model [8]. V literatuře je popsáno větší množství modelů, které však mají význam pouze za specifických podmínek provozu měřidel.

#### Exponenciální model

Exponenciální rozdělení je určeno jedním parametrem  $\lambda$ . Hustota pravděpodobnosti je dána vztahem

$$f(t) = \lambda \cdot \exp(-\lambda \cdot t).$$

Parametr  $\lambda$  se označuje jako intenzita poruch (rozměr např. 1/měsíc). Vliv velikosti parametru je patrný z Obr. 4.

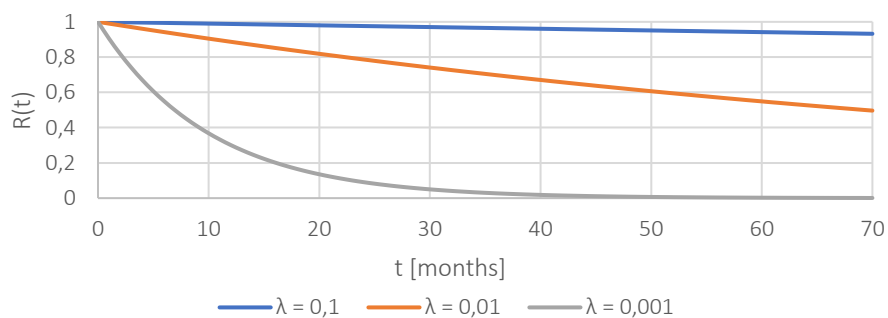
Distribuční funkce je dána vztahem

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt = \int_0^t \lambda \cdot \exp(-\lambda \cdot t) dt = 1 - \exp(-\lambda \cdot t).$$

Pravděpodobnost bezporuchového stavu (**funkce spolehlivosti**) je dána vztahem

$$R(t) = 1 - F(t) = \exp(-\lambda \cdot t).$$

Rov. 1

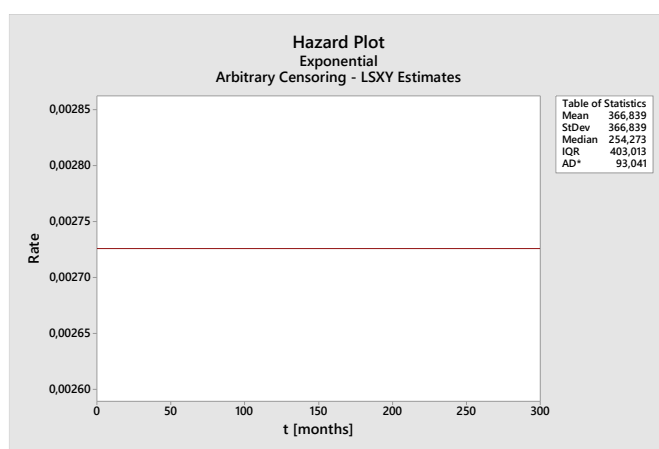


Obr. 4 - vliv parametru  $\lambda$  na průběh spolehlivosti.

Intenzita poruch je dána vztahem

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{1 - \exp(-\lambda \cdot t)}{\exp(-\lambda \cdot t)} = \lambda = konst.$$

Z odvození intenzity poruch (tzv. Hazard Function) je zřejmé, že průběh intenzity poruch je u exponenciálního rozdělení konstantní (viz Obr. 5). Z toho důvodu není vhodné pro modelování spolehlivosti zařízení, u kterých se projevují vlivy opotřebení. Pro modelování spolehlivosti komunálních měřidel, kde jsou právě tyto jevy relativně významné, se tak nejvíce jako optimální. Využití nachází zejména u elektrických zařízení [11] [12].



Obr. 5 - průběh intenzity poruch exponenciálního rozdělení (Minitab).

## Weibullovo rozdělení

Weibullovo rozdělení se v modelování spolehlivosti využívá z důvodu své vysoké variability a univerzálnosti použití.

Základní Weibullovo rozdělení ( $W_{3p}$ ) je tříparametrické s parametry  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $c$ .

Hustota pravděpodobnosti je dána vztahem

$$f(t) = \frac{\alpha}{\beta} \cdot \left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha-1} \cdot \exp\left(-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right)$$

kde  $\alpha$  je parametr tvaru (*scale*),  $\beta$  je parametr měřítka (*shape*) a  $c$  je parametr polohy (*location*).

V praxi se častěji využívá zjednodušené dvouparametrické Weibullovo rozdělení bez parametru  $c$  ( $W_{2p}$ ).

Distribuční funkce je dána vztahem

$$F(t) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right).$$

Funkce spolehlivosti je dána vztahem

$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right).$$

Intenzita poruch je dána vztahem

$$\lambda(t) = \frac{\alpha}{\beta} \cdot \left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha-1} \neq konst.$$

Univerzálnost Weibullova rozdělení spočívá ve faktu, že zahrnuje exp. rozdělení ( $\alpha = 1$ ), Rayleighovo rozdělení ( $\alpha = 2$ ) a aproximuje normální rozdělení ( $\alpha = 3,5$ ) [11] [12] [13].

V rámci této práce bude využíván předpis funkce spolehlivosti pro dvouparametrické Weibulovo rozdělení v podobě

$$R(t) = \exp\left(-(\theta_1 \cdot t)^{\theta_2}\right),$$

Rov. 2

$$\text{kde } \theta_1 = \frac{1}{\beta} \text{ a } \theta_2 = \alpha.$$

### 3.5.2 Cenzorování dat

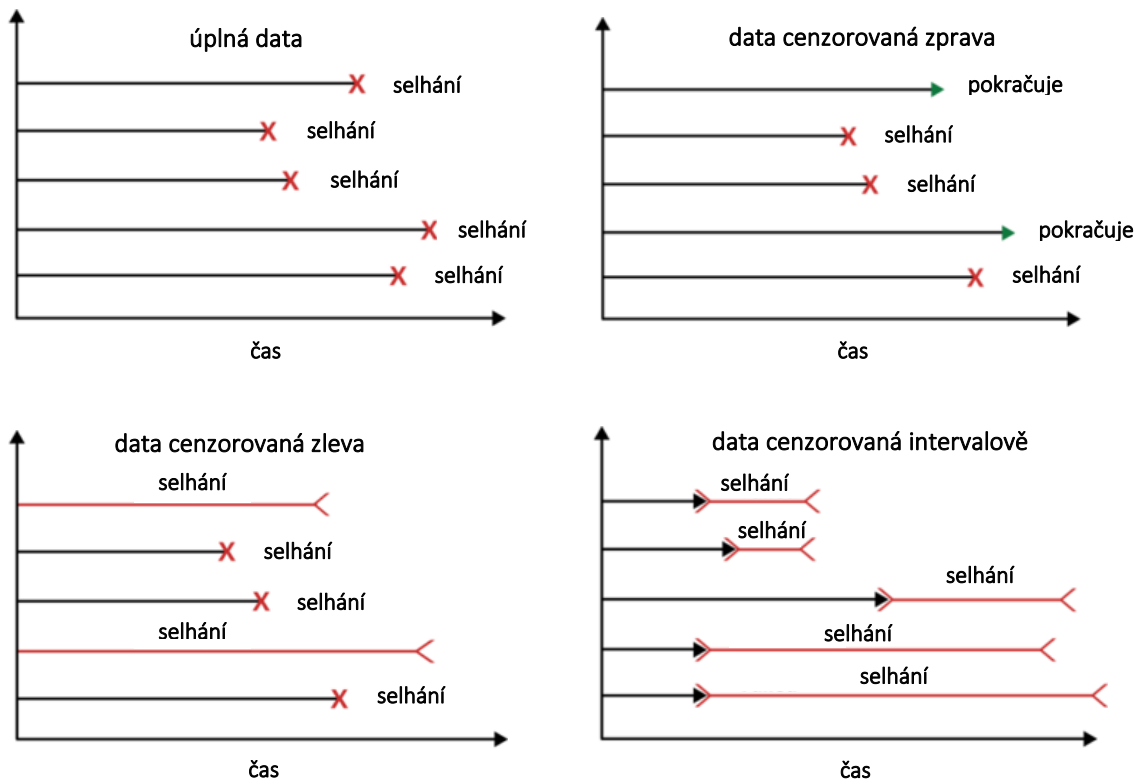
Základním principem modelování spolehlivosti měřidel je analýza času do výskytu první kalibrace s nevyhovujícím výsledkem. Analýza času do výskytu určité události je však využívána v mnoha jiných oborech jako medicína, biologie, ekonomie nebo sociologie. Typickým příkladem je například analýza přežití v medicíně a biologii. Poznatky z těchto oborů lze aplikovat i v inženýrských aplikacích [14].

Datové soubory jsou typické tím, že kromě úplných dat obsahují i data neúplná. Neúplná data se označují také jako data cenzorovaná (viz Obr. 6).

Rozlišujeme 3 druhy cenzorování.

- a) **Cenzorování zprava** – časový údaj je nekompletní na pravé straně. Sledovaná událost ve sledovaném časovém intervalu nenastala. Pokud by však experiment probíhal dále, událost by mohla nastat.
- b) **Cenzorování zleva** – časový údaj je nekompletní na levé straně. Je známý čas pozorování události, událost však mohla nastat kdykoliv dříve, než byla událost pozorována.
- c) **Intervalové cenzorování** – jde o kombinaci cenzorování zprava a zleva. Událost nastala v určitém časovém intervalu, který je známý [14].

V případě modelování spolehlivosti měřidel se vyskytují data cenzorovaná zprava (měřidla s kratší kalibrační historií, u kterých za dobu provozu zatím nedošlo k selhání) a data cenzorovaná intervalově (časy selhání měřidel – je znám přesný čas provedení kalibrace s nevyhovujícím výsledkem a čas předchozí vyhovující kalibrace, ale k selhání mohlo dojít kdykoliv v tomto intervalu).



Obr. 6 - porovnání úplných dat, zprava, zleva a intervalově cenzorovaných (upraveno, přeloženo) [15].

### 3.5.3 Regresní analýza

Regresní analýza je soubor matematicko-statistických metod, jejichž účelem je stanovení matematického vztahu mezi závislou proměnnou a jednou či více nezávislými proměnnými. Závislá proměnná se běžně nazývá *odezva* (*response*) a označuje se symbolem  $y$ . Nezávislá proměnná se nazývá *prediktor* nebo *regresor*, označuje se jako  $x_i$  a využívá se pro predikci nebo popis chování proměnné  $y$ . Pokud grafické zobrazení dat naznačuje existenci vztahu mezi  $y$  a  $x_i$ , je snahou tento vztah popsat pomocí funkce  $f: y \approx f(x_1, x_2, \dots, x_p)$  [13].

V některých případech je základní funkční vztah popisující daná data znám, jelikož vychází z teoretických předpokladů. Nejsou ale známy hodnoty konstant nebo koeficientů (označovány jako parametry). Tento stav lze matematicky popsat jako  $y \approx f(x_1, x_2, \dots, x_p; \theta)$ ,



kde  $\theta$  je vektor parametrů  $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p)$ , který je třeba stanovit. Ve většině inženýrských aplikací je funkční vztah znám, proto je stanovení parametrů klíčovým úkolem [13].

Obecný regresní model pro jednu závislou proměnnou  $y$  je udáván ve tvaru  $y = \mu + \varepsilon$ , kde  $\mu$  je deterministická složka zapisovaná ve tvaru  $\mu = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p$ , kde  $x_1, x_2, \dots, x_p$  je  $p$  nezávislých proměnných. Parametr  $\beta_i (i = 1, 2, \dots, p)$  je interpretován jako změna  $\mu$  při změně nezávislé proměnné  $x_i$  o jednotku při zachování všech ostatních nezávislých proměnných [16].

Stochastická složka  $\varepsilon$  je náhodná proměnná s nulovou střední hodnotou ( $E(\varepsilon) = 0$ ) a rozptylem rovným druhé mocnině směrodatné odchylky ( $V(\varepsilon) = \sigma^2$ ). Složka  $\varepsilon$  je ve všech případech konstantní a nezávisí na hodnotě  $x_i$ .

Za předpokladu že hodnota závislé proměnné  $y$  je součtem deterministické složky  $\mu$  a stochastické složky  $\varepsilon$ , střední hodnota  $E(y) = \mu$  a rozptyl  $V(y) = \sigma^2$ .

Vektor parametrů  $\theta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p)$  a nezávislé proměnné  $x_i$  mohou být i v mocninném, exponenciálním nebo logaritmickém tvaru. Základním předpokladem pro provádění lineární regrese je tzv. model lineární v parametrech.

Model  $y \approx \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2^2 + \beta_3 x_3^2$  je lineární model, zatímco  $y \approx \beta_0 + \beta_1 e^{\beta_2 x}$  je nelineární model s nelineárním parametrem  $\beta_2$ . Takový model nelze řešit analytickými metodami lineární regrese a je nutné použít složitější numerické metody nelineární regrese [16].

## Metody stanovení parametrů

I v případě nelineární regrese je pro stanovení vektoru parametrů  $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$  využíván princip metody nejmenších čtverců. Suma čtverců odchylek  $r_i$  je definována jako

$$S(\theta) = \sum_{i=1}^n r_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i, \theta))^2.$$

Cílem je  $S(\theta)$  minimalizovat. Minimální hodnoty  $S(\theta)$  je dosaženo za předpokladu  $\text{grad } S(\theta) = \nabla S(\theta) = 0$ .

Pokud obsahuje model  $n$  parametrů, získáváme  $n$  rovnic pro řešení gradientu:

$$\frac{\partial S(\theta)}{\partial \theta_j} = 2 \sum_i r_i \frac{\partial r_i}{\partial \theta_j} = 0 \quad (j = 1, \dots, n).$$

Derivace  $\frac{\partial r_i}{\partial \theta_j}$  je však funkcí nezávislé proměnné i parametru, není tak možné rovnice řešit analyticky. Řešení je nutné provést iteračně dle základního předpisu  $\theta_j \approx \theta_j^{k+1} = \theta_j^k + \Delta\theta_j$ , kde  $k$  značí krok iterace a  $\Delta\theta = (\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \dots, \Delta\theta_n)$  reprezentuje vektor přírůstků označovaný také jako *shift vector*.

V každém kroku iterace je model linearizován pomocí aproximace na Taylorův polynom prvního stupně dle vztahu

$$f(x_i, \theta) \approx f(x_i, \theta^k) + \sum_j \frac{\partial f(x_i, \theta^k)}{\partial \theta_j} (\theta_j - \theta_j^k) = f(x_i, \theta^k) + \sum_j J_{ij} \Delta\theta_j.$$

$J$  reprezentuje Jacobiho matici, tedy matici parciálních derivací, která je funkcí parametrů, nezávislé proměnné a konstant, proto se mění při každé iteraci. Z hlediska linearizovaného modelu tedy platí

$$\frac{\partial r_i}{\partial \theta_j} = -J_{ij}$$

a rezidua jsou dány vztahy

$$\Delta y_i = y_i - f(x_i, \theta^k),$$

$$r_i = f(x_i, \theta) = (y_i - f(x_i, \theta^k)) + (f(x_i, \theta^k) - f(x_i, \theta)) \approx \Delta y_i - \sum_{s=1}^n J_{is} \Delta\theta_s.$$

Dosazením těchto rovnic do rovnic gradientu získáváme výraz

$$-2 \sum_{i=1}^m J_{ij} \left( \Delta y_i - \sum_{s=1}^n J_{is} \Delta\theta_s \right) = 0.$$

Výraz lze převést do podoby

$$\sum_{i=1}^m \sum_{s=1}^n J_{ij} J_{is} \Delta\theta_s = \sum_{i=1}^m J_{ij} \Delta y_i \quad (j = 1, \dots, n)$$

reprezentující soustavu  $n$  lineárních rovnic nazývaných jako *normal equations*.

V maticové podobě

$$(J^T J) \Delta\theta = J^T \Delta y.$$

*Normal equations* jsou základem pro jednu ze základních metod pro řešení nelineárních regresních modelů, Gauss-Newtonovu metodu [13] [16] [17].

Pro provedení iterační procedury je třeba zvolit počáteční hodnoty parametrů. Vhodně zvolené hodnoty zajistí přesnější a rychlejší nalezení řešení. Literatura [16] popisuje několik způsobů volby počáteční hodnoty.

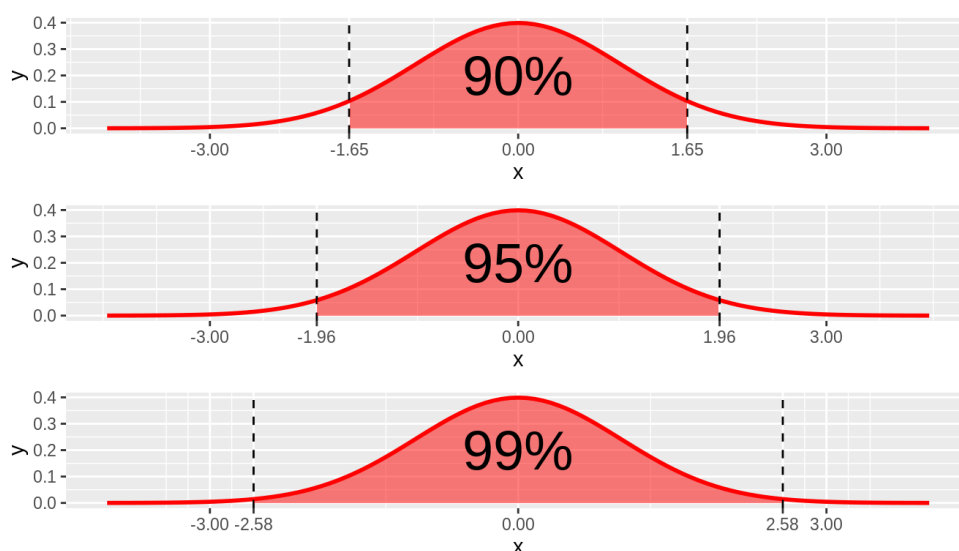
Mezi další používané metody patří Levenberg-Marquardtův algoritmus nebo metoda největšího spádu (*Steepest Descent*) [13].

### 3.5.4 Interval spolehlivosti

Interval spolehlivosti (konfidenční interval) je typ intervalového odhadu neznámého parametru  $\theta$ . Intervalový odhad zjednodušeně řečeno představuje interval, ve kterém se bude se zadanou pravděpodobností či statistickou jistotou  $P = (1 - \alpha)$  nacházet skutečná hodnota daného parametru  $\theta$ . Parametr  $P = (1 - \alpha)$  nazýváme koeficient spolehlivosti (konfidenční koeficient). Běžně se pohybuje v rozmezí (0,9-0,99), nejčastěji 0,95 nebo 0,99. Parametr  $\alpha$  se označuje jako hladina významnosti [5].

Vlastnosti intervalu spolehlivosti:

- čím je rozsah výběru  $n$  větší, tím je interval spolehlivosti užší,
- čím je odhad přesnější, tím je interval spolehlivosti užší,
- čím je vyšší koeficient spolehlivosti  $= (1 - \alpha)$ , tím je interval spolehlivosti širší.



Obrázek 1 - interval spolehlivosti [18].

## 4 Metrologie ve Škoda Auto

Požadavek na řízení metrologie ve Škoda Auto vychází z Integrovaného systému řízení (IMS).

*Integrovaný systém řízení (IMS) je způsob vedení společnosti, který splňuje požadavky na jednání společnosti v souladu s právními a jinými závaznými předpisy, na zajištění vysoké kvality výrobků a řídicích procesů, na ochranu životního prostředí a hospodaření s energiemi, na bezpečnost informací a péči o hmotný i nehmotný majetek. IMS identifikuje, zavádí a pomáhá standardizovat a neustále zlepšovat procesy, které vedou k trvalému dosahování a zlepšování výsledků společnosti v zájmu naplnění strategie a politiky společnosti [19].*

Za IMS je zodpovědné představenstvo společnosti, za jeho koordinaci vedoucí útvaru GQ.

Jedním z certifikovaných systémů řízení obsažených v IMS je Systém řízení kvality (QMS), za který zodpovídá rovněž vedoucí útvaru GQ. Systém řízení kvality je založen na aplikaci standardů EN ISO 9001, v některých útvarech také VDA 6.1 a VDA 6.4 [19].

Vlastníkem procesu metrologie ve společnosti je útvar GQG-2. Za centrální metodické řízení metrologie odpovídá Hlavní metrolog společnosti (zaměstnanec GQG-2) jmenovaný vedoucím GQ.

Úsek metrologie se zabývá mimo jiné následujícími činnostmi:

- metodické řízení metrologie v rámci celé společnosti,
- implementace legislativních požadavků do Procesní a organizační dokumentace (POD),
- provádění auditů a prověrek metrologie,
- zajištění vzdělávání v oblasti metrologie,
- správa systému Palstat CAQ,
- konzultace a poradenství v oblasti metrologie.

Nejvyšším standardem definujícím procesy metrologie ve společnosti je organizační norma ON.1.018 **Metrologický řád**. Dokument stanovuje základní požadavky, odpovědnosti a postupy pro zajištění řízení měřicího a zkušebního zařízení ve společnosti v souladu se zákonnými, normativními a dalšími závaznými požadavky [20].

Norma obsahuje informace k výběru, nákupu, evidenci, provozování, kalibraci a vyřazování měřidel a zkušebního zařízení, k nejistotám měřidel a zkouškám způsobilosti

měřidel a měření, kvalifikační požadavky na zaměstnance provádějící metrologické činnosti, kompetence a postup zřízení interního kalibračního místa v organizační jednotce (OJ) [20].

Za metrologické činnosti konkrétní organizační jednotky zodpovídá vedoucí dané OJ používající měřidla a realizující procesy měření. Metrologické procesy v rámci dané OJ koordinuje a metodicky řídí metrolog OJ, kterého pověřuje vedoucí dané OJ a schvaluje Hlavní metrolog společnosti [20].

Metrologická činnost OJ mimo jiné zahrnuje:

- plánování a provádění výběru měřidel,
- nákup měřidel,
- značení a identifikaci měřidel,
- vedení evidence měřidel a jejich kalibrací,
- stanovování, přezkoumávání a sledování platnosti ověřovacích a kalibračních lhůt,
- zajišťování ověřování a kalibrace měřidel,
- školení uživatelů měřidel.

Některé organizační jednotky doplňují Metrologický řád na základě svých požadavků pomocí interní dokumentace (ID).

## 4.1 Současný stav komunálních měřidel ve Škoda Auto

Pojem „komunální měřidlo“ není definován žádným standardem. V oblasti legální metrologie se jako komunální měřidlo v některých případech označuje „měřidlo pro měření spotřeby v distribuční síti“, tedy elektroměry, plynoměry, vodoměry a měřidla tepla [21].

V oblasti průmyslové metrologie se v běžné komunikaci jako komunální měřidla označují jednoduchá, přenosná měřidla sloužící k měření rozměrů. Zpravidla se tím rozumí:

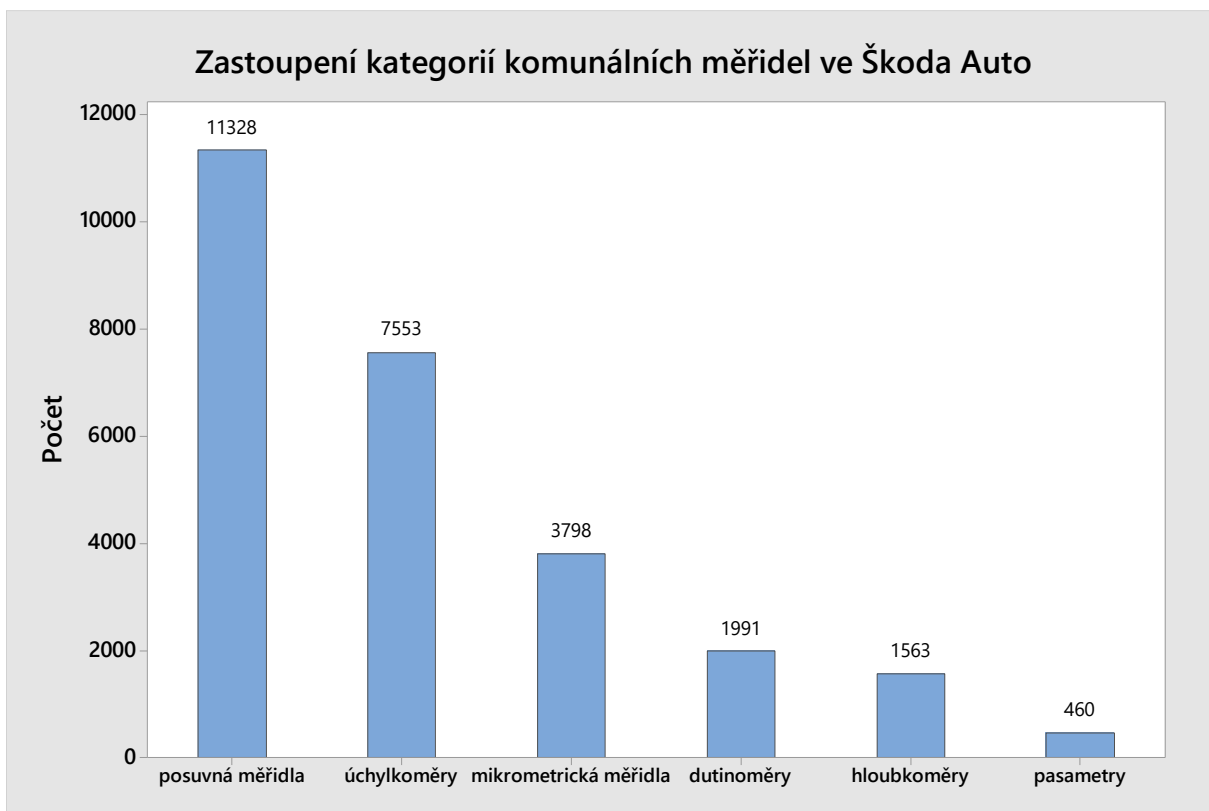
- posuvná měřidla,
- mikrometry,
- dutinoměry,
- pasometry,
- hloubkoměry,
- úchylkoměry.

Pro potřeby této práce budou jako komunální měřidla označována právě tato měřidla.

Ve Škoda Auto se pro identifikaci druhu pro zařazení měřidla používá tzv. Třídník měřidel. Komunální měřidla se v tomto dokumentu řadí do druhů viz Tab. 1. Pomocí kódů a názvů druhů dle Třídníku měřidel jsou měřidla rovněž kategorizována v systému pro správu měřidel Palstat CAQ.

Tab. 1 - dělení komunálních měřidel ve Škoda Auto (interní zdroj Škoda Auto).

<b>112.1</b>		<b>posuvná měřidla</b>
	112.11	posuvné měřidlo mechanické (nonius, číselník)
	112.12	posuvné měřidlo digitální
	112.14	ostatní posuvná měřidla
<b>112.2</b>		<b>hloubkoměry</b>
	112.21	hloubkoměr s noniem
	112.22	hloubkoměr mikrometrický (stupnice, čítač, dig. ukazatel)
	112.23	hloubkoměr digitální posuvný 0,01
	112.24	ostatní hloubkoměry
<b>112.3</b>		<b>mikrometrická měřidla</b>
	112.31	mikrometrické měřidlo vnější 0,01
	112.32	mikrometrické měřidlo digitální 0,002, 0,001
	112.33	mikrometrické měřidlo talířkové 0,01
	112.34	mikrometrická hlavice
	112.35	mikrometrický odpich pevný
	112.36	mikrometrický odpich skládací
	112.37	mikrometr dutinový 0,01, 0,005
	112.39	ostatní mikrometrická měřidla: (závit, drážky, atd)
<b>112.4</b>		<b>pasometry</b>
	112.41	pasometr
	112.42	mikropasometr
<b>112.5</b>		<b>úchylkoměry</b>
	112.52	úchylkoměr mechanický 0,01
	112.53	úchylkoměr mechanický 0,001
	112.54	úchylkoměr digitální
	112.55	úchylkoměr páčkový (pupitast)
	112.56	úchylkoměr s rameny
	112.57	komparátor mechanický
	112.58	komparátor elektronický
	112.59	ostatní úchylkoměry
<b>112.6</b>		<b>dutinoměry</b>
	112.61	dutinoměr s úchylkoměrem (subito)
	112.63	dutinoměr 3 dotekový
	112.64	dutinoměr s úchylkoměrem jednoúčelový
	112.65	ostatní dutinoměry



Obr. 7 - zastoupení komunálních měřidel v evidenci Škoda Auto vč. neaktivních.

Obr. 7 zobrazuje počty jednotlivých druhů komunálních měřidel ve všech stavech, tedy včetně vyřazených a ztracených měřidel. Komunálními měřidly s nejvyšším zastoupením jsou ve Škoda Auto v souladu s předpokladem **posuvná měřidla** následovaná **úchylkoměry** a **mikrometrickými měřidly**. Právě tyto druhy měřidel budou z důvodu nejširší dostupné kalibrační historie předmětem dalších analýz.

## 4.2 Kalibrace měřidel ve Škoda Auto

Organizační norma ON.1.018 (Metrologický řád) definuje požadavek na zajištění jednotnosti a správnosti měření. Dokument dále určuje, že jednotnost a správnost měření za použití pracovních měřidel nestanovených se zajišťuje pomocí kalibrace.

Metrologický řád definuje dva způsoby provedení kalibrace:

- a) interní kalibrace,
- b) externí kalibrace.

**Interní kalibrací** se rozumí kalibrace provedená Interním kalibračním místem (IKM) ve společnosti Škoda Auto. Procesy IKM definuje Metrologický řád a metodický pokyn Interní kalibrace. IKM jsou zřizovány jednotlivými organizačními jednotkami (OJ) pro provádění

kalibrace a kontroly měřidel, a to jak pro zřizovatele, tak pro ostatní OJ. Ve Škoda Auto je v současné době provozováno 10 Interních kalibračních míst. Jednotlivá IKM se liší z hlediska rozsahu oprávnění pro provádění kalibrace konkrétních druhů měřidel definovaných v Třídníku měřidel.

**Externí kalibrace** se provádí u měřidel, u kterých nelze zajistit kalibraci nebo kontrolu v rámci IKM. Proces externí kalibrace definuje metodický pokyn Externí kalibrace. Subjekt provádějící externí kalibraci musí splňovat přísně definované požadavky na způsobilost, obzvláště pokud se nejedná o subjekt akreditovaný dle ISO/IEC 17025.

#### 4.2.1 Stanovení kalibrační lhůty

Metrologický řád definuje pojem kalibrační lhůta jako *„stanovení maximálního dovoleného období, ve kterém je zaručeno, že měřidlo plní funkci, ke které bylo určeno“* [20]. Kalibrační lhůtu určuje majitel měřidla na základě doporučení výrobce, četnosti a intenzity používání, vlivu prostředí, přesnosti měření a zkušeností s provozem stejného druhu měřidla. Úpravu kalibrační lhůty provádí majitel měřidla po odsouhlasení metrologem příslušné OJ [20].

Pro pomoc s určením vhodné kalibrační lhůty je k dispozici jednoduchá tabulka v MS Excel. Majitel měřidla zhodnotí faktory ovlivňující spolehlivost měřidla (prostředí, počet a kvalifikace uživatelů, vliv výsledku měření...) a tabulka algoritmicky stanoví doporučený kalibrační interval. Jde však o čistě algoritmickou metodu, která nebere v úvahu reálná data z proběhlých kalibrací.





### Stanovení kalibrační lhůty měřících zařízení

Odborná informace metrologie OIM č. .../20 10.11.2020 V.Šimon, GQM-2

Název zařízení\*:  ID číslo\*:   
 Stávající kalibrační lhůta:  Cena kalibrace:   
 Vytvořeno dne:  Vytvořil-jméno, OJ:

#### Způsob používání měřícího zařízení: ? Nápověda

Zvlote možnost\*:

#### Umístění (mobilita) - náchylnost na poškození: ? Nápověda

Zvlote možnost\*:

#### Pracovní prostředí měřícího zařízení: ? Nápověda

Zvlote možnost\*:

#### Frekvence užívání:

Zvlote možnost\*:

#### Počet uživatelů obsluhujících měřícího zařízení:

Zvlote možnost\*:

#### Kvalifikace uživatelů:

Zvlote možnost\*:

#### Vliv nastavení délky kalibrační lhůty na výrobek:

Zvlote možnost\*:

#### Výsledky minulých kalibrací/opotřebení měřidla vlivem užívání:

Zvlote možnost\*:

#### Provedení mezilhůtového interního ověření:

Zvlote možnost\*:

#### Kalibrační lhůta: ? Nápověda

Doporučená:  Stanovená:

\* Označuje položky, které je nutné vyplnit pro výpočet doporučené kalibrační lhůty

Obr. 8 - pomůcka pro určení kalibrační lhůty (interní zdroj Škoda Auto).

Některé útvary v rámci společnosti definují délky kalibračních lhůt ve svých Interních dokumentacích. Příkladem je volba kalibrační lhůty podle přesnosti měřidla v IT stupních (viz Obr. 9), nebo volba fixního intervalu 3 nebo 4 roky.

Stupeň přesnosti	Kalibrační lhůta
IT 5 - 6	Týdenní
IT 7	Měsíční
IT 8 - 10	Čtvrtletní
IT 11 - 16	Roční

Obr. 9 - doporučené kalibrační lhůty dle stupně přesnosti měřidla (interní zdroj Škoda Auto).

## 4.2.2 Kalibrační postupy

Kalibrační postup je dokument popisující soubor činností při kalibraci měřidel. Česká metrologická společnost, z.s. v letech 2013 až 2022 zpracovala a vydala vzorové kalibrační postupy (KP) pro širokou škálu měřidel, které nabízí k zakoupení či volnému stažení. Tyto vzorové KP jsou často využívány organizacemi jako základ pro vytvoření vlastní dokumentace, která je přizpůsobena konkrétním podmínkám a metrologickému vybavení dané organizace. Vzorové kalibrační postupy jsou vytvořeny s ohledem na příslušné normativní požadavky, zejména požadavky ČSN EN ISO 9001, ČSN EN ISO 10012, ČSN EN ISO/IEC 17025 a příslušnými standardy z řady ISO GPS. Zahrnuty jsou rovněž příklady postupů stanovení nejistoty dle EA 4/02.

Společnost Škoda Auto provádí interní kalibrace měřidel dle vlastních kalibračních postupů. KP jsou uvolněny pro použití v rámci celé společnosti.

Pro snazší pochopení možných důvodů nevyhovujícího výsledku kalibrace bude uvedeno shrnutí důležitých informací z kalibračních postupů nejčastěji používaných komunálních měřidel ve Škoda Auto, tedy posuvných měřidel, mikrometrů a úchylkoměrů.

Rozsah provedení dále popisovaných kroků se liší dle toho, zda se jedná o prvotní kalibraci či recalibraci.

### Posuvné měřidlo

Posuvná měřidla se ve Škoda Auto kalibrují dle kalibračního postupu KP 1.1.4 [22], ze kterého jsou čerpány dále uváděné informace.

Prvním krokem kalibrace je **předběžná kontrola a úprava měřidla**. Měřidlo se vyčistí benzínem a vytře do sucha, případně odmagnetuje. Zkontroluje se, zda není mechanicky poškozeno či zkorodováno a zda je kompletní (např. zda nechybí aretační šroub). Kontroluje se správnost označení měřidla ID číslem.

Po předběžné kontrole následuje **vizuální kontrola** dle Tab. 2.

Tab. 2 - rozsah provádění vizuální kontroly posuvných měřidel [22].

Typ stupnice	Rozsah prováděné vizuální kontroly
čárková	<ul style="list-style-type: none"> <li>• stupnice a číslice musí být dobře čitelné</li> <li>• čárky stupnice musí být přímé a mít konstantní šířku (kontrola lupou)</li> </ul>
kruhový číselník	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ručička nesmí být ohnuta a musí se pohybovat v konstantní výšce nad číselníkem</li> <li>• ručička ukazatele musí mít stejnou tloušťku jako čárky stupnice</li> <li>• čárky stupnice musí směřovat do středu otáčení</li> </ul>
digitální	<ul style="list-style-type: none"> <li>• všechny dekády se nastaví, pokud možno na „8“</li> <li>• číslice musí mít funkční všechny segmenty a být dobře čitelné</li> <li>• ve všech polohách posuvné části musí být naměřená hodnota indikována jednoznačně</li> </ul>

Následuje **funkční zkouška**. Je ověřen plynulý pohyb posuvné části v celém měřicí rozsahu. Po aretaci se nesmí indikovaná hodnota změnit.

Závěrečnou částí je **měření metrologických parametrů**. Je kontrolována rovnoběžnost měřicích ploch pro vnější měření, a to průsvitem při sevření měřicích ramen k sobě, popř. pomocí válcového etalonu či koncové měřky. Dále je kontrolována přímost měřicích ploch pomocí nožového pravítka, kdy rovněž nesmí být zjištěn průsvit.

Kontrola chyby měření se provádí pomocí koncových měrek. Kontrolované rozměry závisí na rozsahu měřidla dle Tab. 3. Výsledkem je průměrná hodnota z pěti měření pro každý kontrolovaný rozměr. Dovolené chyby vychází z normy DIN 862, závisí na kontrolovaném rozměru a rozlišení stupnice.

Tab. 3 - kontrolované rozměry při kalibraci posuvných měřidel [22].

Měřená hodnota [ mm ]	Měřicí rozsah [ mm ]					
	0 -160	0 - 250	0 - 400	0 - 630	0 -1000	0 -2000
0	X	X	X	X	X	X
30	X	X	X			
41,3	X	X	X	X	X	X
50						
100	X					
131,4	X	X	X	X	X	X
150						
200		X				
300				X		
400			X			
500				X	X	
600						
700						
800						
900						
1000					X	X
1200						X
1500						X
2000						X

Tab. 4 - dovolené chyby posuvných měřidel [22].

Měřená hodnota [ mm ]	Dovolené chyby <b>G</b>		
	Dělení stupnice resp. nonia (rozlišení)		
	0,1 a 0,05 (mm)	0,02 (mm)	0,01 (mm) Digitální
Dovolená chyba G v [ μm ]			
50	50	20	20
100		30	30
200			
300			
400			
500			
600			
700	40		
800			
900			
1000			
1200			
1400	50	-	
1600			
1800			
2000			

Dalším krokem je kontrola osazených konců hlavních ramen nebo špiček pro vnitřní měření. Provádí se alespoň jedním kontrolním kroužkem, dovolená chyba je definována jako hodnota v Tab. 4 zvětšená o 20 μm.

Závěrem se provede kontrola hloubkoměru (pokud je jím posuvka vybavena) na průměrné desce za pomoci dvojice koncových měrek stejné hodnoty. Dovolená chyba je rovněž hodnota z Tab. 4 zvětšená o 20 μm.

## Mikrometr

Mikrometrická měřidla se ve Škoda Auto kalibrují dle kalibračního postupu KP 1.1.6 [23], ze kterého jsou čerpány dále uváděné informace.

Po předběžné kontrole provedené obdobným způsobem jako v případě posuvek je provedena **vizuální kontrola**. Nejprve jsou kontrolovány měřicí plochy, které nesmí být mechanicky poškozeny (vyštípnuty, poškrábány) a zkorodovány. V případě lehkého poškození mohou být vhodně upraveny.

Kontrola čárkové nebo digitální stupnice se provádí v rozsahu viz Tab. 2.

Při **funkční zkoušce** se ověřují mimo jiné následující vlastnosti:

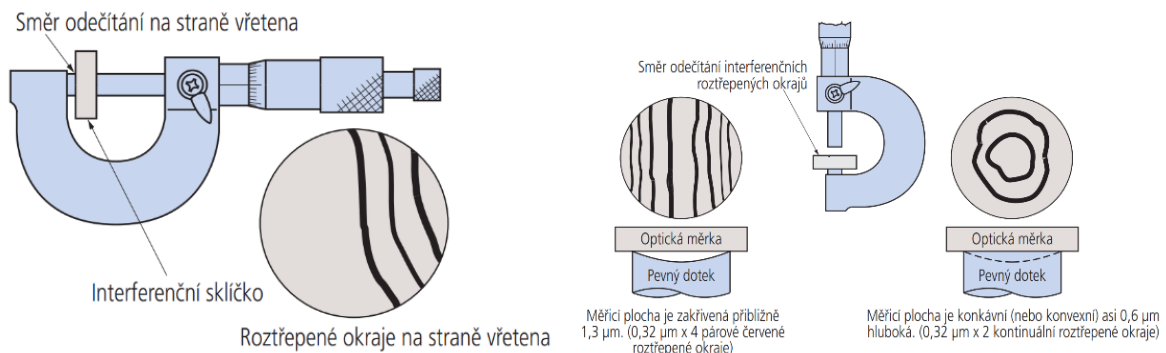
- plynulost chodu mikrometrického šroubu v celém měřicím rozsahu včetně zpětného pohybu,
- vůle mezi bubínkem a trúbkou - bubínek nesmí při otáčení házet ani zachytávat se o trúbku,
- po aretaci se nesmí změnit indikovaná hodnota o více než 2 μm.

Následuje samotné **měření metrologických parametrů**.

- Měřicí síla se kontroluje pomocí speciálního přípravku. Síla působící mezi měřicími plochami musí být u běžných mikrometrů v rozsahu (5-10) N a přibližně stejná v celém měřicím rozsahu.
- Rovinnost měřicích ploch mikrometrů zařazených jako pracovní měřidla se provádí podobně jako u posuvky pomocí nožového pravítka. Etalonové mikrometry se kontrolují interferenčním sklíčkem.
- Rovnoběžnost měřicích ploch se kontroluje v závislosti na rozsahu a zařazení pomocí ocelové kuličky, koncových měrek, interferenčního sklíčka nebo CMM. Dovolená chyba vychází z normy ČSN 25 1401.

Pro kontrolu rovnoběžnosti a přímosti měřicích ploch se používají interferenční sklíčka. Obvykle se dodávají v sadách obsahujících sklíčka vhodných rozměrů, aby mohla být provedena kontrola v každé čtvrt otáče vřetena mikrometru. Tloušťka běžně dostupných sklíčků je omezena, z toho důvodu se takto obvykle kontrolují mikrometry do rozsahu 50 mm [24].

Při zkoušení rovnoběžnosti měřicích ploch je sklíčko umístěno na pevný měřicí dotek a dotaženo vřetenem. Následně je vyhodnocen počet červených interferenčních proužků viditelných na měřicí ploše vřetena (viz Obr. 10). Každý roztřepený okraj představuje jednu polovinu vlnové délky výškového rozdílu. V případě červených interferenčních proužků je přibližná úchylka rovnoběžnosti v  $[\mu\text{m}]$  stanovena jako 0,32 násobek počtu viditelných roztřepených okrajů. Obdobně se provádí i kontrola rovinnosti měřicích ploch. Sklíčko však není dotahováno, ale pouze položeno na měřicí plochu (viz Obr. 11) [25].



Obr. 10 - princip kontroly rovnoběžnosti měřicích ploch mikrometru [25].

Obr. 11 . princip kontroly rovinnosti měřicích ploch mikrometru [25].

Kontroluje se i nulové nastavení mikrometru, u mikrometrů s rozsahem nad 25 mm se používají vhodné koncové měrky. V případě nevyhovujícího nastavení se mikrometr seřídí.

Kontrola chyby měření se provádí pomocí koncových měrek. Měřené rozměry kalibrační postup přímo neudává. Provádí se 5 měření pro každý kontrolovaný rozměr, výsledkem je aritmetický průměr z těchto hodnot. Dovolené chyby pro třmenové mikrometry zařazené jako pracovní měřidla vychází z normy DIN 863-1 a závisí na měřicím rozsahu, viz Tab. 5. Platí, že hodnota dovoleného rozpětí úchylek se rovná hodnotě G v Tab. 5.

Tab. 5 - dovolené chyby třmenových mikrometrů [23].

Měřicí rozsah [mm]*	0-50	50-100	100-150	150-200	200-250	250-300	300-350	350-400
Dovolená chyba G [ $\mu\text{m}$ ]	4	5	6	7	8	9	10	11

\*Uvedeno do rozsahu 400 mm

## Úchylkoměr

Úchylkoměry se ve Škoda Auto kalibrují dle kalibračního postupu KP 1.1.7 [26], ze kterého jsou čerpány dále uváděné informace.

Prvním krokem kalibrace je **vizuální a funkční zkouška**. U všech typů úchylkoměrů se kontroluje lehkost chodu měřicí tyčky v celém rozsahu a závit měřicího doteku. Následující kroky jsou popsány v Tab. 6 a liší se dle typu úchylkoměru.

Tab. 6 - rozsah vizuální a funkční kontroly úchylkoměrů [26].

Typ úchylkoměru	Rozsah prováděné vizuální a funkční kontroly
číselníkový	<ul style="list-style-type: none"> <li>• stupnice a číslice musí být dobře čitelné</li> <li>• čárky stupnice musí být přímé a mít konstantní šířku</li> <li>• ručička nesmí být ohnutá, musí se pohybovat v konstantní výšce, nesmí se dotýkat skla ani číselníku a musí být nejméně 1/10 otáčky před nulovým údajem a 1/10 otáčky za horní mezí měřicího rozsahu</li> </ul>
digitální	<ul style="list-style-type: none"> <li>• všechny dekády se nastaví, pokud možno na „8“</li> <li>• číslice musí mít funkční všechny segmenty a být dobře čitelné</li> <li>• ve všech polohách posuvné části musí být naměřená hodnota indikována jednoznačně</li> </ul>
páčkový	<ul style="list-style-type: none"> <li>• chod ukazatele při pohybu páčky musí být plynulý</li> <li>• krajní poloha páčky v obou směrech musí být 90° od základní polohy</li> </ul>

Následuje **měření metrologických parametrů**, jehož způsob provedení závisí na typu úchylkoměru. Kontrola se provádí pomocí přístroje pro kontrolu úchylkoměrů. V případě číselníkových úchylkoměrů se nastaví hodnota na stupnici měřidla a odečítá se hodnota na zkušebním přístroji. Páčkové úchylkoměry se kontrolují stejným způsobem, ale v obou směrech. U digitálních úchylkoměrů se postupuje opačným způsobem – hodnota se nastaví na zkušebním zařízení a odečítá se indikace měřidla.



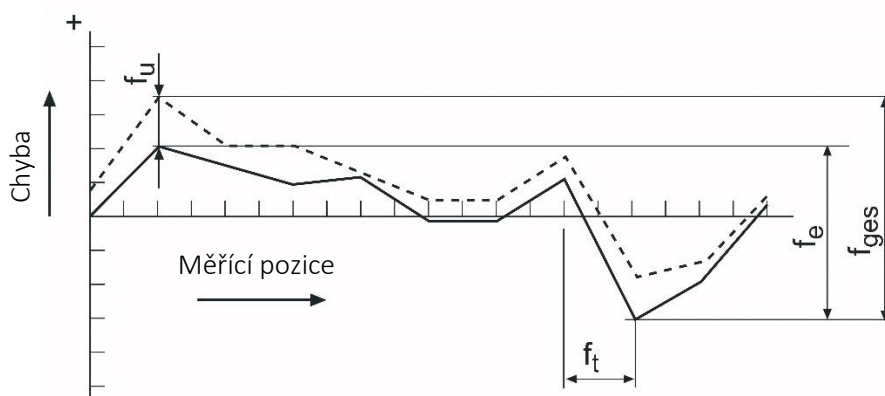
Obr. 12 - kontrola číselníkového, digitálního a páčkového úchylkoměru (Mitutoyo I-Checker IC2000) [27].

Velikost odchylky se stanoví jako rozdíl mezi hodnotou na ukazateli a hodnotou na zkušebním přístroji.

Pro vyhodnocení příslušných metrologických charakteristik je třeba sestavit záznam velikostí odchylek (příklad viz Obr. 13). Vyhodnocované charakteristiky jsou shrnuty v Tab. 7. Rozsah vyhodnocení se liší pro jednotlivé druhy úchylkoměrů (M – mechanický, P – páčkový, D – digitální).

Tab. 7 - vyhodnocované parametry při kalibraci úchylkoměru [26].

$f_e$	rozpětí odchylky	souřadnicový odstup mezi nejvyšším a nejnižším bodem v diagramu odchylky při vychýlení čepu měřicího doteku proti směru měřicího tlaku	M, P, D
$f_t$	rozpětí odchylky v dílčím rozsahu měření	souřadnicový odstup mezi nejvyšším a nejnižším bodem v diagramu odchylky měřeno pro dílčí rozsah úchylky o 10 dílčích stupnice při vychýlení čepu měřicího doteku proti směru měřicího tlaku	M, P
$f_{ges}$	rozpětí celkové odchylky	souřadnicový odstup mezi nejvyšším a nejnižším bodem v diagramu odchylky při vychýlení čepu měřicího doteku jak proti, tak i ve směru měřicího tlaku	M, P
$f_u$	reverzibilita (hystereze)	souřadnicový odstup mezi nejvyšším a nejnižším bodem v diagramu odchylky při vychýlení čepu měřicího doteku jak proti, tak i ve směru měřicího tlaku, posuzováno v jednom měřeném místě	M, P, D
$f_w$	variační rozpětí (opakovatelnost)	rozdíl největší a nejmenší naměřené hodnoty při více měřeních stejné měřené veličiny v rámci rozsahu měření při stejných směrech pohybu měřicí tyčky	M, P, D



Obr. 13 - chyby úchylkoměru na záznamu odchylek (přeloženo) [28].

Velikost kroku a vyhodnocovaného rozsahu při sestavování záznamu odchylek závisí na typu úchylkoměru, jeho rozlišení a vyhodnocované charakteristice.

Tab. 8 - podmínky vyhodnocování charakteristik úchylkoměrů [26].

typ	rozlišení [mm]	charakteristika	krok	rozsah
číselníkový	0,01	$f_e, f_{ges}, f_u$	0,5 mm	celý měřicí rozsah
		$f_t$	0,01 mm	0,1 mm v libovolném místě
	0,001	$f_e, f_{ges}, f_u$	0,1 mm	celý měřicí rozsah
		$f_t$	0,001 mm	0,01 mm v libovolném místě
páčkový	0,01	$f_e, f_{ges}, f_u$	5 dílků	celý měřicí rozsah
	0,001	$f_t$	1 dílek	10 dílků v libovolném místě
	0,002			
digitální	0,01	$f_e, f_u$	1 mm	celý měřicí rozsah
	0,001			



**Chyba reverzibility  $f_u$**  se měří minimálně ve 3 místech stupnice – na počátku, ve středu a na konci měřicího rozsahu. Za chybu reverzibility se považuje největší ze zjištěných rozdílů.

**Opakovatelnost  $f_w$**  se měří v libovolném místě měřicího rozsahu, kde se provede 5 měření při stejném směru pohybu tyčky měřicího doteku. V případě páčkových úchylkoměrů se zkouška provádí ve směru a proti směru měřicího tlaku. Za chybu opakovatelnosti se bere největší ze zjištěných rozdílů.

V případě **číselníkových úchylkoměrů** limity vychází maximální dovolené hodnoty vyhodnocovaných charakteristik z koncernové normy, resp. DIN 878:1983 (některé hodnoty jsou doplněny nad rámec této normy).

Tab. 9 - mezní hodnoty charakteristik číselníkových úchylkoměrů s rozlišením 0,01 mm [26].

rozsah [mm]	mezní hodnoty [ $\mu\text{m}$ ]				
	$f_e$	$f_t$	$f_{ges}$	$f_w$	$f_u$
0,45	7	5	9	3	3
0,9	7	5	9	3	3
1,8	10	5	12	3	3
3	10	5	12	3	3
5	12	5	14	3	3
10	15	5	17	3	3

Tab. 10 - mezní hodnoty charakteristik číselníkových úchylkoměrů s rozlišením 0,001 mm [26].

rozsah [mm]	mezní hodnoty [ $\mu\text{m}$ ]				
	$f_e$	$f_t$	$f_{ges}$	$f_w$	$f_u$
0,18	3	2,5	4	1	1
1	4	2,5	6	1	2

Mezní hodnoty vyhodnocovaných parametrů pro **páčkové úchylkoměry** vychází z DIN 2270:1985 (některé hodnoty jsou doplněny nad rámec této normy).

Tab. 11 - mezní hodnoty charakteristik páčkových úchylkoměrů s rozlišením 0,01 [26].

rozsah [mm]	mezní hodnoty [ $\mu\text{m}$ ]				
	$f_e$	$f_t$	$f_{ges}$	$f_w$	$f_u$
0,5					
0,8	10	5	13	3	3
1,6					

Tab. 12 - mezní hodnoty charakteristik páčkových úchylkoměrů s rozlišením 0,002 mm [26].

rozsah [mm]	mezní hodnoty [ $\mu\text{m}$ ]				
	$f_e$	$f_t$	$f_{ges}$	$f_w$	$f_u$
0,2	3	2	4	2	1,5
0,24					
0,4	3	2	5	3	1,5

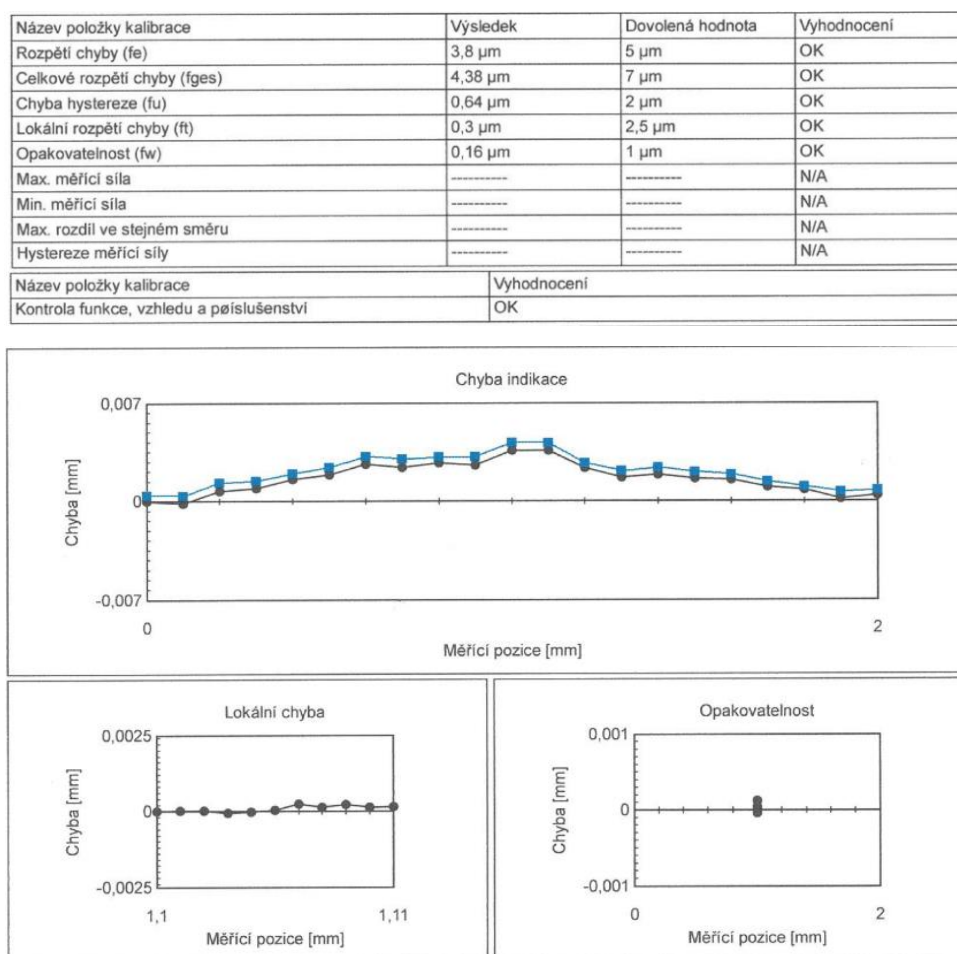
Největší dovolené hodnoty charakteristik **digitálních úchylkoměrů** nejsou definovány žádným standardem. Je zvykem využívat výrobní normy konkrétních výrobců, jak určuje i kalibrační postup [26].

Jako příklad bude uveden výrobce Mitutoyo. Maximální dovolené hodnoty charakteristik všech objednacích čísel lze vyhledat v katalogu [24]. Tab. 13 jako příklad udává mezní hodnoty často využívaných digitálních úchylkoměrů řady ID-SX.

Tab. 13 - mezní hodnoty charakteristik digitálních úchylkoměrů Mitutoyo řady ID-SX [26].

obj. číslo	rozsah [mm]	rozlíšení [mm]	mezní hodnoty [ $\mu\text{m}$ ]		
			$f_e$	$f_w$	$f_u$
543-781	12,7	0,01	20	10	20
543-790	12,7	0,001	30	20	2

Na Obr. 14 je příklad části reálného kalibračního protokolu se záznamem odchylek a vyhodnoceními charakteristikami číselníkového úchylkoměru. Kontrola byla provedena na přístroji Mitutoyo I-Checker IC2000.



Obr. 14 - výřez z kalibračního protokolu číselníkového úchylkoměru (interní zdroj Škoda Auto).

## 5 Návrh metodiky pro optimalizaci kalibračních lhůt

### 5.1 Třídění měřidel

Jak bylo zmíněno v teoretické části, spolehlivost měřidla je ovlivněna mnoha faktory. Správně provedená analýza spolehlivosti vyžaduje vytvoření skupiny měřidel, která je v maximální možné míře homogenní.

Měřidla jsou ve Škoda Auto evidována v systému Palstat CAQ. Každému měřidlu je přiřazen unikátní identifikátor v číselném formátu (tzv. ID číslo). Při zavádění nového měřidla do systému vyplní zodpovědný zaměstnanec tzv. doklad měřidla. Doklad měřidla obsahuje veškeré informace o daném měřidlu v rozsahu definovaném dokumentem *Zásady vyplňování MIS Palstat*. Ukázka konkrétního dokladu měřidla je na Obr. 15.

The screenshot displays a detailed record for a measurement instrument with ID 3111797. The record is organized into several sections:

- Základní informace:** ID číslo (3111797), Datum zápisu (15.12.2020), Obrábek (Bez obrábku), Název (mikrometrické měřidlo digitální 0,001), Druh (112.32 - mikrometrické měřidlo digitální 0,002, 0,001), Výrobce (Mitutoyo).
- Identifikace:** Evidenční / výrobní číslo (66049035), Inventurní číslo (4307,68), Pořizovací cena měřidla (Měna, Rok výroby), Informace (Poznamka).
- Charakteristika:** Číslo měření, Délka (Typ/forma: 293-145-30), Zařazení (Specifikovaná přesnost: určená výrobcem ± 0,001), Rozměr / rozsah (0-25), Aktuální stav (Lobčen), Poznamka k lobčen, Datum vyřazení.
- Umístění:** Vývěra / Městej (značka), Pracovník.
- Uživatel:** Jméno uživatele, Sifedisko uživatele (2142), Datum pohybu.
- Kalibrace:** HealthCheck ovláštění, Další informace, Kalibrační lhůta (1 rok), Jednotka kal. lhůty, Typ přesnosti kalibrace, Plánovaná cena kalibrace/servisu, Měna, Platí do (4/2023), Platí do (4/2024), Ověřování, Ověřování, Učtení způsob kalibrace (Interní, Kalibrační postup C), Učtení kalibrační společnosti (S04 6), Kalibrované (07.12.2020), Výsledek kalibrace (Výhruče).

Obr. 15 - doklad měřidla v Palstat CAQ.

Systém Palstat CAQ, který postupně nahradil evidenci měřidel pomocí klasických papírových karet, je ve Škoda Auto v provozu již od 90. let minulého století. Požadavky na rozsah vyplňovaných údajů, stejně jako míra dohledu nad jejich dodržováním, se v průběhu času měnila. Zejména u starších měřidel tak často v dokladu měřidla chybí některé informace důležité pro správné rozřídění měřidel pro analýzu.

S vysokou úspěšností lze vyfiltrovat měřidla požadovaného druhu (kategorizováno dle Třídníku měřidel) a rozsahu. Problematické je ale filtrování dle výrobce a typu, kdy u významné části měřidel tato informace chybí. Příkladem může být druh 112.31 - Mikrometrické měřidlo vnější 0,01, u kterého není výrobce uveden u třetiny záznamů. Chybějící typ měřidla je problematický zejména u některých výrobců nabízejících velké množství typových čísel, v mnoha případech zásadně odlišných z hlediska konstrukce (např. Mitutoyo). Při provádění správné analýzy je třeba dbát na zahrnutí pouze odpovídajících měřidel, proto tyto chybějící

zásadní informace v některých případech výrazně omezují možnou velikost analyzované skupiny, a tím i nejistotu získaného výsledku (viz kap. 5.1.1).

Parametry ovlivňující spolehlivost měřidla, a tím i kalibrační interval jsou popsány v Tab. 14. V ideálním případě by pro analýzu byly vybrány pouze měřidla striktně splňující určené podmínky. Třídění měřidel na takové úrovni však vzhledem k omezenému rozsahu dostupných informací není v praxi možné. Tabulka shrnuje parametry ovlivňující optimální kalibrační interval a míru dostupnosti těchto informací ze systému evidence měřidel v současné podobě.

Tab. 14 - vlivy na spolehlivost měřidel a dostupnost dat.

nejistota měření požadovaná uživatelem měřidla	nelze zjistit ani odhadnout
riziko překročení maximální dovolené chyby při používání	nelze zjistit, v některých případech lze hrubě odhadnout
riziko dodatečných nákladů, pokud měřidlo nespĺňuje podmínku maximální nejistoty měření	nelze zjistit, v některých případech lze hrubě odhadnout
typ měřidla, sklon k opotřebení a driftu	lze zjistit – třídění dle výrobce a typu
četnost používání	nelze zjistit, v některých případech lze hrubě odhadnout
doporučení výrobce měřidla	nelze zjistit - v případě komunálních měřidel výrobce obvykle neudává
prostředí (teplota, relativní vlhkost, vibrace...)	lze odhadnout, vliv teploty a relativní vlhkosti lze zjistit na pracovištích vybavených monitoringem těchto parametrů
data z předchozích kalibrací	lze zjistit – k dispozici je kompletní kalibrační historie
způsob transportu měřidla	do určité míry souvisí s kvalifikací osob
kvalifikace osob pracujících s měřidlem	lze odhadnout u měřidel s přiřazeným uživatelem
počet uživatelů měřidla	lze odhadnout, ale do určité míry souvisí s kvalifikací osob

Z provedené analýzy vyplývá, že na základě dostupných informací lze měřidla do určité míry třídít dle prostředí používání, kvalifikace uživatele a počtu uživatelů měřidla. Škoda Auto sice disponuje rozsáhlým inventářem měřidel, avšak při třídění dle každého atributu zvlášt by nebylo dosaženo vytvoření pro analýzu dostatečně velké skupiny vzorků. Navíc, vzhledem k faktu, že spolu parametry do určité míry souvisí (v laboratorním prostředí lze očekávat vyšší kvalifikaci uživatelů, v dílenském prostředí nižší) by taková analýza byla neodůvodněně časově náročná vzhledem k vypovídající hodnotě získaných výsledků.

Z toho důvodu bylo přistoupeno k definování tzv. Usage Score (Tab. 15). Jde o parametr zahrnující vliv prostředí, kvalifikaci uživatele a počet uživatelů měřidla. Každý z těchto parametrů je ohodnocen hodnotou, výsledná hodnota Usage Score je součinem jednotlivých hodnot.

V případě, že některý z parametrů nelze objektivně zhodnotit, hodnota se přiřazuje arbitrálně dle majitele měřidla, který je v dokladu měřidla uveden ve většině případů. Pokud je majitelem měřidla výdejna začínající písmenem „V“, lze s určitou pravděpodobností očekávat použití měřidla v dílenském prostředí s relativně nižší kvalifikací uživatele, a proto je atributu přiřazena vyšší hodnota. Ostatní majitelé měřidel, nejčastěji útvary GQ (útvary řízení kvality), mají vzhledem k očekávanému způsobu použití měřidla přiřazenou nižší hodnotu parametru.

Tab. 15 - Usage Score.

Usage Score			pokud neznámo
Prostředí	laboratoř metrologická	1	dle výdejny: výdejny GQx - 2 výdejny Vxx - 4
	kancelář	2	
	laboratoř provozní	3	
	provoz	4	
	provoz těžký (hutě, obrábění)	5	
Uživatel	expert	1	dle výdejny: výdejny GQx - 2 výdejny Vxx - 4
	laborant	2	
	THP	3	
	údržbář, seřizovač	4	
	dělník	5	
Počet uživatelů	přiřazen v Palstat	1	
	nepřiřazen v Palstat (výdejna)	1,5	

Počet uživatelů je hodnocen dle kolonky Jméno uživatele v dokladu měřidla. Pokud je měřidlu přiřazen konkrétní uživatel, je předpokládán pozitivní vliv na spolehlivost měřidla. V případě nepřiřazeného uživatele je předpokládáno užívání měřidla větším počtem uživatelů, proto je taková situace hodnocena vyšší hodnotou atributu.

Měřidlo lze následně na základě vypočteného Usage Score zařadit do Třídy použití měřidla dle Tab. 16.

Tab. 16 - třídy použití měřidla.

Třídy použití měřidla				
označení			charakteristika	typický provoz
<b>A</b>	<b>1 - 2,5</b>	<b>Laboratoř</b>	Měřidlo je používáno v laboratorních podmínkách (prostředí se stálou teplotou a vlhkostí bez přítomnosti prachu a dalších nečistot). Uživatel měřidla je kvalifikovaný. S měřidlem je zacházeno opatrně a je skladováno ve vhodných podmínkách.	měrové středisko IKM
<b>B</b>	<b>3 - 13,5</b>	<b>THP</b>	Měřidlo může být používáno mimo dílenský provoz, avšak ne v laboratorních podmínkách i krátkodobě v dílenském prostředí. Měřidlo není používáno s vysokou frekvencí. Uživatel nemusí být kvalifikovaný v metrologické nebo laboratorní oblasti, zpravidla však jde o technicko-hospodářské pracovníky.	provozní laboratoř laboratoře kvality
<b>C</b>	<b>14 - 24</b>	<b>Údržba</b>	Měřidlo je používáno v dílenském prostředí, avšak ne přímo při výrobních operacích.	údržba
<b>D</b>	<b>24,5 - 37,5</b>	<b>Dílna</b>	Měřidlo je používáno čistě v dílenském prostředí v rámci výrobních operací. Vysoce pravděpodobná přítomnost prachu, třísek, provozních kapalin. Uživatel měřidla nemá metrologickou ani laboratorní kvalifikaci. Významná pravděpodobnost nevhodného způsobu skladování měřidla a zacházení s ním. Měřidlo je používáno s vysokou frekvencí.	obrobna, hutě, nářaďovna

Je třeba deklarovat, že řazení měřidel do Třídy použití měřidla je vzhledem k omezené vypovídající hodnotě informací v dokladu měřidla bez dobré znalosti konkrétních útvarů do určité míry subjektivní. V tuto chvíli se však jedná o nejlepší možný způsob definice podmínek použití měřidla.

Je však třeba zmínit výraznou časovou náročnost, zejména v počátku, kdy se uživatel seznamuje s principy evidence a zvyklostmi konkrétních OJ. V případech, kdy je již ze zkušeností zřejmé, za jakých podmínek je měřidlo používáno, lze měřidlo zařadit rovnou do třídy bez hodnocení Usage Score.

Skutečné názvy jednotlivých výrobců nejsou v této práci uváděny. Jsou nahrazeny fiktivními názvy.

### 5.1.1 Minimální velikost skupiny

Literatura minimální počet vzorků v rámci analyzované skupiny explicitně neuvádí. Z toho důvodu bylo přistoupeno k provedení následující analýzy.

Jako základní soubor dat pro analýzu byl využit dataset s kalibrační historií digitálních posuvných měřitek značky Gaston, rozsah 0-150 mm. Použití tohoto datasetu je vhodné zejména z důvodu velkého počtu vzorků (107) a vysoké homogenity skupiny (všechny vzorky mají velmi srovnatelné podmínky použití).

Analýza byla provedena pro 100; 80; 60; 40; 20 a 10 vzorků ve skupině. Ze základního souboru dat byl daný počet vzorků vybrán vždy pomocí generátoru pseudonáhodných čísel.

Vypočtené hodnoty spolehlivosti  $R(t)$  pro danou skupinu byly v software Minitab pomocí nelineární regrese (Gauss-Newtonova metoda) proloženy exponenciální funkcí. Díky tomuto kroku byla získána odhadnutá hodnota parametru exponenciální funkce  $\theta$ , standardní chyba odhadu a intervaly spolehlivosti na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ . Hodnoty byly zaznamenávány do tabulky pro pozdější statistické zpracování. Pro každý hodnocený počet vzorků ve skupině bylo provedeno 5 náhodných výběrů. Závěrem byly vypočteny základní statistické charakteristiky – aritmetický průměr, směrodatná odchylka, rozptyl a variační rozpětí.

Tab. 17 - výsledky simulace velikosti skupiny.

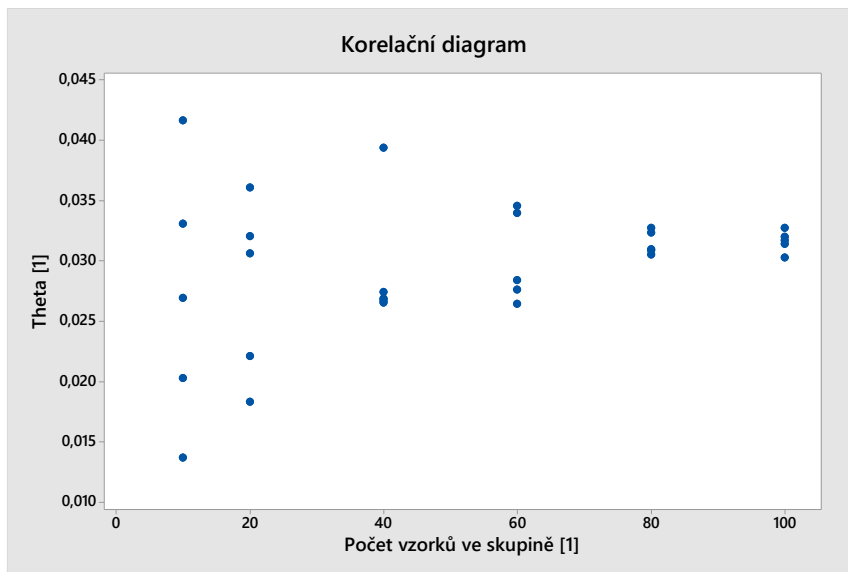
Size	Test no.	Theta	SE	0,95 CI	Size	Test no.	Lambda	SE	0,95 CI	Size	Test no.	Lambda	SE	0,95 CI			
100	1	0,0314	0,0005	0,0323	0,0305	60	1	0,0264	0,0003	0,0270	0,0258	20	1	0,0306	0,0007	0,0321	0,0292
	2	0,0320	0,0005	0,0330	0,0311		2	0,0284	0,0005	0,0294	0,0274		2	0,0320	0,0006	0,0333	0,0309
	3	0,0317	0,0005	0,0327	0,0307		3	0,0345	0,0006	0,0358	0,0333		3	0,0183	0,0003	0,0189	0,0178
	4	0,0327	0,0005	0,0337	0,0318		4	0,0276	0,0004	0,0284	0,0268		4	0,0221	0,0005	0,0231	0,0211
	5	0,0303	0,0004	0,0311	0,0295		5	0,0340	0,0006	0,0352	0,0328		5	0,0361	0,0007	0,0372	0,0350
	AVG	0,0316	0,0005	0,0326	0,0307		AVG	0,0302	0,0005	0,0312	0,0292		AVG	0,0278	0,0006	0,0289	0,0268
	S	0,0009	0,0000	0,0009	0,0009		S	0,0038	0,0001	0,0040	0,0036		S	0,0074	0,0002	0,0076	0,0071
	VAR	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000		VAR	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000		VAR	0,0001	0,0000	0,0001	0,0001
	R	0,0025	0,0001	0,0026	0,0024		R	0,0081	0,0003	0,0088	0,0075		R	0,0177	0,0004	0,0183	0,0172
	80	1	0,0305	0,0006	0,0317		0,0293	40	1	0,0269	0,0005		0,0280	0,0258	10	1	0,0269
2		0,0308	0,0004	0,0315	0,0301	2	0,0265		0,0005	0,0275	0,0255	2	0,0137	0,0003		0,0143	0,0130
3		0,0323	0,0005	0,0333	0,0314	3	0,0274		0,0005	0,0285	0,0264	3	0,0416	0,0014		0,0445	0,0390
4		0,0327	0,0005	0,0337	0,0318	4	0,0394		0,0013	0,0422	0,0368	4	0,0330	0,0014		0,0364	0,0301
5		0,0310	0,0004	0,0318	0,0301	5	0,0267		0,0005	0,0277	0,0258	5	0,0203	0,0004		0,0211	0,0195
AVG		0,0315	0,0005	0,0324	0,0305	AVG	0,0294		0,0007	0,0308	0,0281	AVG	0,0271	0,0008		0,0289	0,0254
S		0,0010	0,0001	0,0010	0,0010	S	0,0056		0,0003	0,0064	0,0049	S	0,0109	0,0005		0,0120	0,0099
VAR		0,0001	0,0000	0,0001	0,0001	VAR	0,0000		0,0000	0,0000	0,0000	VAR	0,0001	0,0000		0,0001	0,0001
R		0,0022	0,0002	0,0022	0,0024	R	0,0129		0,0008	0,0147	0,0113	R	0,0280	0,0010		0,0302	0,0260

Korelační analýza provedená v Minitab neprokázala významnou lineární závislost mezi počtem vzorků ve skupině a velikostí odhadnutého parametru  $\theta$  (PCC = 0,357, P = 0,038).

### Correlation: Theta; Počet vzorků ve skupině

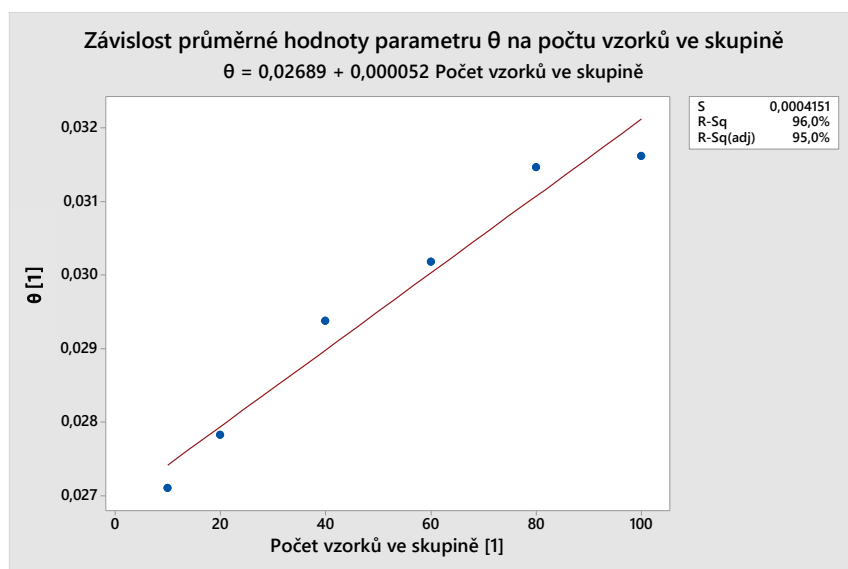
Pearson correlation of Počet vzorků ve skupině and Theta = 0,357

P-Value = 0,038



Obr. 16 - korelační diagram (počet vzorků ve skupině – parametr  $\theta$ ).

Z grafu zobrazujícího aritmetický průměr jednotlivých hodnot  $\theta$  pro jednotlivé počty vzorků ve skupině (Obr. 17) lze ovšem pozorovat rostoucí trend hodnoty  $\theta$  s rostoucí velikostí skupiny. Data je možné lineárně aproximovat s koeficientem determinace  $R^2 = 0,96$ . Pro spolehlivější prokázání korelační závislosti nebo nezávislosti by tak bylo vhodné provést korelační analýzu s využitím širšího vstupního souboru dat. Z důvodu vysoké časové náročnosti nebude tato hlubší analýza v této fázi výzkumu provedena.



Obr. 17 - vliv počtu vzorků ve skupině na hodnotu parametru  $\theta$ .

V korelačním diagramu lze však pozorovat snižující se variační rozpětí jednotlivých odhadů parametru Theta s rostoucí velikostí skupiny. Zřetelnou interpretaci poskytuje Obr. 18.

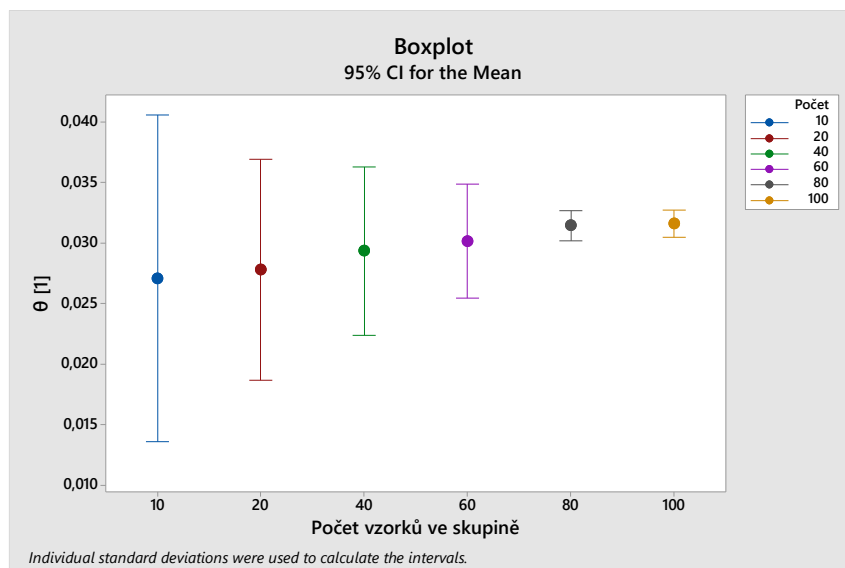




Obr. 18 - závislost variačního rozpětí parametru  $\theta$  na počtu vzorků ve skupině.

Výstupem je tedy potvrzení předpokladu, že větší skupina vzorků poskytuje lepší výsledky následné analýzy. Lineární korelační závislost mezi velikostí skupiny a parametrem  $\theta$  se v této fázi výzkumu nepotvrdil. S vysokou spolehlivostí ale bylo prokázáno, že s klesající velikostí skupiny se zvyšuje variační rozpětí parametru  $\theta$ , což lze obecně nazvat jako zvyšující se nejistota odhadu parametru  $\theta$ .

Patrně nejnázornější interpretaci tohoto výsledku je Obr. 19 zobrazující průměrné hodnoty  $\theta$  pro jednotlivé velikosti skupin včetně intervalů spolehlivosti vůči aritmetickému průměru na hladině významnosti 0,05. Zjednodušeně lze tedy tvrdit, že v intervalu spolehlivosti se s 95% pravděpodobností nachází skutečná hodnota  $\theta$  pro příslušnou velikost skupiny. Je patrné, že s rostoucí velikostí skupiny se interval spolehlivosti zužuje. Přibližně od velikosti skupiny 80 vzorků již zůstává konstantní jak průměrná hodnota  $\theta$ , tak interval spolehlivosti, který je zároveň dostatečně úzký. Na základě tohoto faktu lze stanovit jako optimální nejmenší velikost skupiny 80 vzorků.



Obr. 19 - boxplot intervalů spolehlivosti odhadů parametru  $\theta$ .

Hodnota parametru exponenciálního rozdělení  $\theta$  je však pro praktický pohled značně abstraktní veličina. Názornější pohled na vliv velikosti skupiny na hodnotu parametru  $\theta$  lze získat vypočtením konkrétního kalibračního intervalu včetně intervalu spolehlivosti.

Výpočty proběhly pomocí základní rovnice pro výpočet kalibračního intervalu z exponenciálního rozdělení

$$I = -\frac{1}{\theta} \cdot \ln(R)$$

Tab. 18 - kalibrační intervaly pro různé parametry  $\theta$ .

Velikost skupiny	$\theta$ [1]	$I^{EOP=0,9}$ [rok]	95% CI [rok]	
10	0,0271	1,9	1,3	3,8
20	0,0278	1,8	1,4	2,7
40	0,0294	1,7	1,4	2,3
60	0,0302	1,7	1,5	2,0
80	0,0315	1,6	1,6	1,7
100	0,0316	1,6	1,6	1,7

Je patrné, že při velikosti skupiny 10 vzorků se stanovený kalibrační interval bude pohybovat s 95% statistickou jistotou v rozmezí (1,3 – 3,8) měsíce. Při zvýšení velikosti skupiny na 80 vzorků se interval spolehlivosti zužuje na (1,6 – 1,7) měsíce. Na tomto příkladu je znovu patrná optimální minimální velikost skupiny, jelikož při zvýšení velikosti skupiny na 100 vzorků zůstává interval spolehlivosti konstantní. Všechny výpočty byly provedeny pro hodnotu cílové spolehlivosti  $EOP = 0,95$ .

Pro další analýzy tak budou, pokud možno, vytvářeny skupiny měřidel o velikosti alespoň 80 vzorků, pro které je ale zároveň k dispozici *relevantní kalibrační historie*.

Pojem *relevantní kalibrační historie* je chápán jako dostatečně velké množství provedených kalibrací konkrétního měřidla s příslušným výsledkem. Optimální minimální počty kalibračních záznamů pro každé měřidlo v analyzované skupině naznačuje literatura pro nejnáročnější metody analýzy za použití MLE (S1, S2). V případě třídění podle výrobce a typu je doporučeno minimálně 30 záznamů, v případě třídění podle druhu měřidla je to 40 záznamů [8]. Vzhledem k tomu, že doba provozu komunálního měřidla ve Škoda Auto obvykle nepřekračuje 20 let a nastavené kalibrační lhůty se pohybují nejčastěji v rozmezí od 1 roku do 4 let, nelze tento požadavek ve všech případech zajistit.

### 5.1.2 Tvorba datasetu

Pod pojmem dataset se v rámci této práce rozumí soubor obsahující výsledky kalibrací analyzované skupiny měřidel ve formátu vhodném pro následnou matematickou analýzu.

Provedení přípravy dat pro analýzu není v dostupné literatuře dostatečně popsáno. Z toho důvodu bylo přistoupeno k vývoji vlastní metodiky při zohlednění všech teoretických poznatků.

Vzhledem k tomu, že vytváření datasetu je časově výrazně nejnáročnější, rutinní činnost, byl kladen důraz na automatizaci této činnosti v maximální možné míře.

Pro přípravu datasetu byl vytvořen automatizovaný sešit v Microsoft Excel. Zadávání veškerých potřebných informací o měřidle probíhá přes formulář vytvořený pomocí programovacího jazyku VBA (Visual Basic for Applications), viz Obr. 20.

The screenshot shows a window titled "Data Input Accelerator" with the following fields and callouts:

- ID**: Callout: ID číslo měřidla
- interval**: Callout: aktuálně nastavená kalibrační lhůta
- class**: Callout: třída použití měřidla
- type**: Callout: typ měřidla (není povinné)
- enviroment**, **user**, **users no**: Callout: hodnota vlivu prostředí, kvalifikace uživatele a počtu uživatelů (viz Tab. 15)

Buttons: **CREATE INSTRUMENT** (pink), **RESET** (pink), **ENTER** (green), **SOLVE** (green).

Other elements: "Insert a date of calibration" label, a date input field, an "OK" checkbox, and "Analysed classes" with checkboxes for A, B, C, and D.

Obr. 20 - formulář pro zadávání dat v MS Excel.

Uživatel nejprve zadá základní informace o měřidlu – ID číslo pro jednoznačnou identifikaci, aktuálně nastavenou kalibrační lhůtu a zhodnotí podmínky používání měřidla (buď přímým zařazením do Třídy použití měřidla nebo zhodnocením atributů pro výpočet Usage Score). Stiskem tlačítka CREATE INSTRUMENT se vytvoří položka v tzv. kalendáři (viz Obr. 14) obsahující všechny zadané informace.

Následně pokračuje zadáváním jednotlivých kalibračních záznamů z Palstat CAQ. Datum kalibrace se zadává ve formátu YYYYMM, kde YYYY definuje rok a MM měsíc provedené kalibrace. K definici výsledku kalibrace (OK/nOK) slouží checkbox vedle textového pole. Stiskem tlačítka ENTER se výsledek kalibrace přiřadí k poslednímu vytvořenému měřidlu. Po zaznamenání všech výsledků se postup opakuje pro další měřidlo. Ve chvíli, kdy jsou zadána všechna měřidla z analyzované skupiny, je možné stiskem tlačítka SOLVE spustit automatický proces, na jehož konci uživatel získá data ve formátu vhodném pro následnou matematickou analýzu.

Klíčovým prvkem celého systému je tzv. kalendář, v sešitu jde o list označený jako DATA\_INPUT (Obr. 21). Prvních 8 sloupců je vyhrazeno pro základní informace o měřidle

zadávané pomocí formuláře. Výsledky kalibrací se zaznamenávají do sloupce dle příslušného roku a měsíce. Hodnotou 1 jsou označeny kalibrace s vyhovujícím výsledkem, hodnotou 0 s výsledkem nevyhovujícím. Sloupec SCO obsahuje vypočtenou hodnotu Usage Score, na jejímž základě je měřidlo zařazeno do Třídy použití. Ta je identifikována podbarvením ID čísla. Uživatel v této fázi může vymazat záznamy měřidel, které do další analýzy nechce zahrnout. Nelze zadávat kalibrace provedené před rokem 1995.

Záznamy kalibrací, kdy měřidlo bylo po provedení kalibrace s nevyhovujícím výsledkem opraveno, nejsou zahrnovány.

YY							2018											
MM							1	2	3	4	5	6	7	8	10	11	12	
ID	type	INT	CL	ENV	US	NO	SCO	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285
202816	500-151	4		4	4	2	24											
203013	500-151	4		4	4	2	24								1			
203014	500-151	4	D	5	5	1	25				1							
16535	500-154	3	D	5	5	1	25											
301927	500-154	4		4	4	2	24											
36732	500-154	1		4	4	2	24	1										0
301889	500-161	2	B	2	3	1	6											
1003021	500-161	4	B	2	3	1	6								1			
1003622	500-161	4	C	4	4	1	16											
1006628	500-161	4	B	2	2	1	4											
1006348	500-161	3	A	1	1	2	2			1					0			
1027070	500-161	3	D	5	5	1	25											
1005802	500-161	2	B	2	3	1	6							1				
17101	500-161	2	B	2	3	1	6											
17102	500-161	2	B	2	3	1	6											
17803	500-161	2	B	2	3	1	6							1				
17804	500-161	2	B	2	3	1	6			1								
203020	500-161	4		4	4	2	24											1
203027	500-161	4		4	4	2	24											

Obr. 21 – „kalendář“.

Data z listu DATA\_INPUT jsou následně automaticky kopírovány do listu CALC a náležitě upravovány.

Prvním krokem procesu je posunutí všech výsledků kalibrací tak, aby první kalibrace každého měřidla byla umístěna v čase  $t = 0$  se zachováním délky časových intervalů mezi jednotlivými kalibracemi. V tuto chvíli tak ztrácíme informace o konkrétních časech provedení kalibrací, zůstávají pouze informace o čase každé kalibrace počítané od první známé kalibrace měřidla. To je ale vzhledem k principu modelování spolehlivosti měřidla plně dostačující.

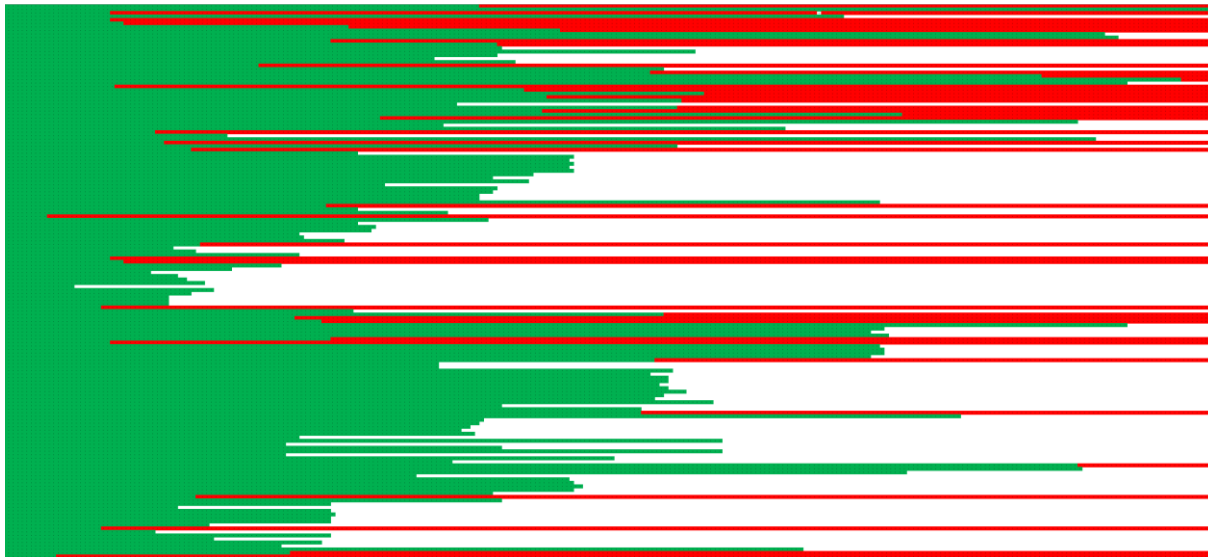
Na základě předpokladu, že každá kalibrace provedená v časovém intervalu ohraničeném dvěma provedenými kalibracemi s vyhovujícím výsledkem je rovněž kalibrace s vyhovujícím výsledkem, jsou do příslušných políček doplněny imaginární kalibrace s vyhovujícím výsledkem. Pokud je výsledek provedené kalibrace nevyhovující, všechny následující imaginární kalibrace jsou rovněž s nevyhovujícím výsledkem.

Sledované časové období je uzavřeno v čase, kdy byla provedena poslední kalibrace s nevyhovujícím výsledkem v rámci všech měřidel.

Výsledná podoba listu *CALC* je patrná z Obr. 22.

Posledním krokem je výpočet vstupních parametrů do matematické analýzy, tedy čas od první kalibrace  $t$ , celkový počet měřidel v daném intervalu  $n$  a počet měřidel s vyhovujícím výsledkem kalibrace v daném časovém intervalu  $s$ .

Závěrem dojde k automatickému vygenerování několika listů s příslušnými daty. Je vygenerován graf sloužící k získání základního přehledu o průběhu spolehlivosti. List *Histogram* obsahuje časy selhání, ze kterých je následně možné vygenerovat histogram. List *PLOT* obsahuje hodnoty spolehlivosti v čase, tedy data potřebná pro další matematickou analýzu.



Obr. 22 – „CALC“.

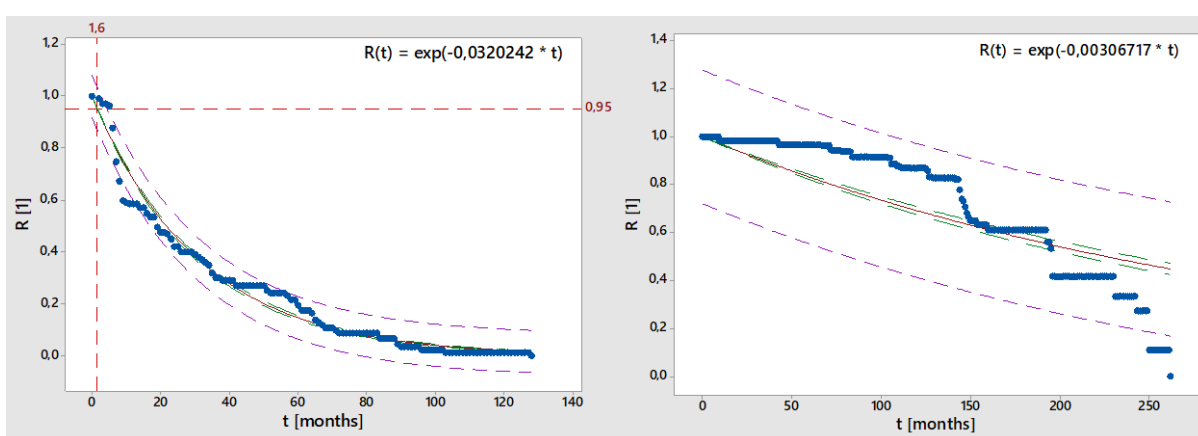
Příprava datasetu je časově nejnáročnější část celého procesu i přes, v tuto chvíli, maximální možnou míru automatizace. V budoucnosti by bylo vhodné ověřit možnost automatického exportu kalibračních záznamů ze systému Palstat.

## 5.2 Matematická analýza

### 5.2.1 Aplikace matematických modelů na reálná data

Jako první příklad je uveden průběh spolehlivosti měřidel od výrobce Gaston (Obr. 23). Na první pohled je zřejmé, že data lze relativně spolehlivě aproximovat exponenciální funkcí (směrodatná odchylka  $S = 0,0141$ ).

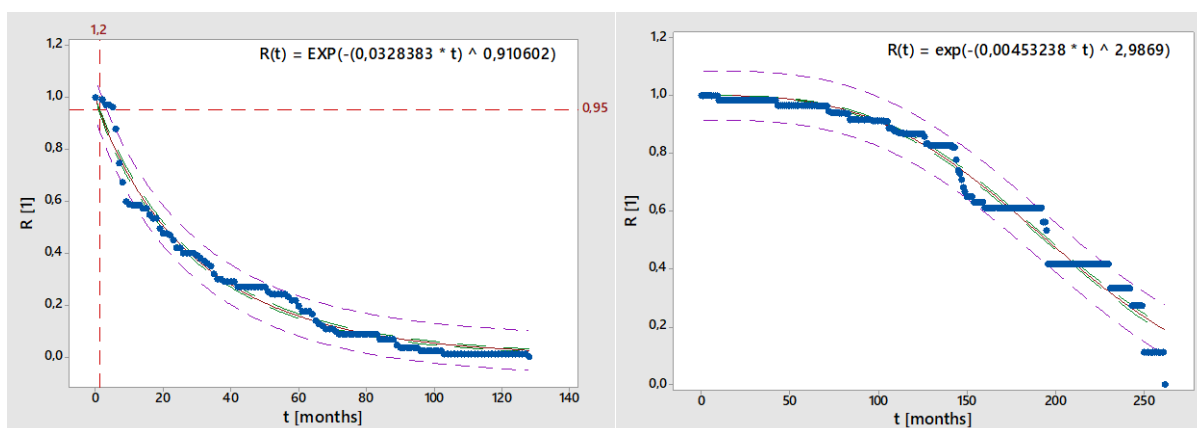
Obr. 24 zachycuje průběh spolehlivosti pro stejný druh měřidla, v tomto případě od výrobce Leo. Na první pohled je zřejmé, že exponenciální funkce není pro aproximaci tohoto průběhu vhodná ( $S = 0,141$ , tedy o řád vyšší).



Obr. 23 – Gaston - exponenciální.

Obr. 24 – Leo - exponenciální.

Obr. 25 a Obr. 26 zobrazují stejné průběhy, tentokrát aproximovány pomocí Weibullova rozdělení. Oba průběhy byly aproximovány s podobnou chybou ( $S = 0,04$ ). V předpisu funkce na Obr. 25 si lze všimnout velikosti parametru  $\theta_2 = 0,91$ . Hodnota blízká číslu 1 napovídá, že průběh se blíží exponenciále (viz kap. 3.5.1).



Obr. 25 - Gaston – Weibull.

Obr. 26 - Leo – Weibull.

Vliv použitého rozdělení na výsledný kalibrační interval popisuje Tab. 19. V případě měřidel od výrobce Leo (Obr. 24 a Obr. 26) je výrazně vyšší rozdíl ve stanoveném kalibračním intervalu za použití exponenciálního a Weibullova rozdělení, stejně jako v kvalitě regresního modelu.

Tab. 19 - porovnání výsledků aproximace exponenciálním a Weibullovým rozdělením.

Model	Výrobce	$\Theta_1$ [1]	$\Theta_2$ [1]	$l$ [měsíce]*	$\Delta l$ [%]	$l$ [roky]*	$S$ [roky]	$\Delta S$ [%]
Ex	Leo	0,00307	1	17	382	1,4	0,1415	329
W2 <sub>p</sub>		0,00453	2,98690	82		6	0,0434	
Ex	Gaston	0,032	1	1,6	33	0,10	0,041	5
W2 <sub>p</sub>		0,033	0,910	1,2		0,13	0,039	

\*EOP = 0,95

Závěrem lze konstatovat, že Weibullovo rozdělení je, ve shodě s teoretickými předpoklady, univerzálně použitelné, a proto budou následující analýzy prováděny za použití Weibullova rozdělení.

## 5.2.2 Nástroje pro matematickou analýzu

Kapitola shrnuje veškeré poznatky týkající se matematických principů modelování spolehlivosti a stanovení kalibračních intervalů.

### Vlastní aplikace

V první fázi vývoje metodiky byla autorem této práce vytvořena vlastní aplikace provádějící analýzu kalibračních intervalů v prostředí Matlab. Aplikace pracuje na principu metody zpracované autory Dennisem Jacksonem a Howardem Castrupem [29]. Jedná se zřejmě o jediný dostupný zdroj popisující analýzu spolehlivosti včetně určitého přesahu do praktické oblasti. Výsledky získané pomocí navržené aplikace mohly být následně validovány, jelikož autoři v práci publikovali i konkrétní příklady včetně výsledků.

Aplikace je v tuto chvíli navržena pouze pro aproximaci podle exponenciálního rozdělení. Dle závěru vyplývajícího z analýzy v kap. 5.2.1, není použití exponenciálního rozdělení ve všech případech optimální. Z toho důvodu je využitelnost aplikace v současné chvíli omezená. Implementace Weibullova rozdělení do aplikace je technicky možná, vzhledem k dostupnosti srovnatelných metod nebude v tuto chvíli realizována. I přes to bude princip funkce aplikace v krátkosti představen.



Výpočet optimálního kalibračního intervalu probíhá dvěma možnými způsoby:

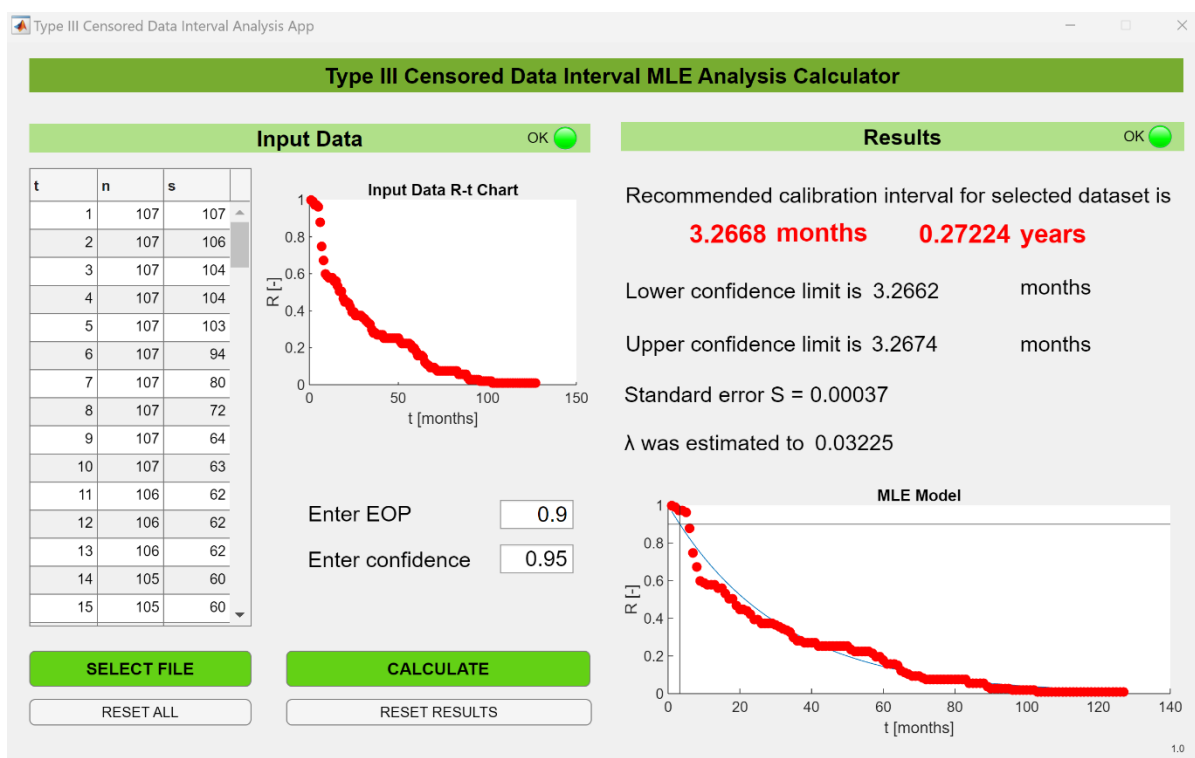
- tzv. Simple – vychází čistě z předpisu exponenciální funkce,
- MLE – přístup na základě metody maximální věrohodnosti (MLE).

Bylo zjištěno, že metody Simple a MLE poskytují téměř shodné výsledky (viz Tab. 20). Z hlediska náročnosti implementace metody a samotných výpočtů je však metoda MLE výrazně složitější (nutno řešit iteračně numerickými metodami). Byl tak potvrzen závěr autorů v [29], že výsledky obou přístupů jsou srovnatelné.

Tab. 20 - srovnání výsledků metod Simple a MLE.

	$\lambda$ [1]	l [rok]
Simple	0,0346	1,48
MLE	0,0356	1,44
$\Delta$ [%]	2,9	2,5

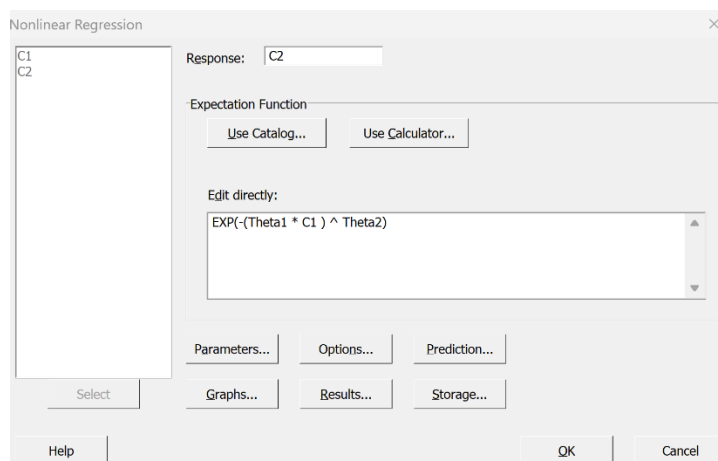
Prvním krokem je importování vstupního datového souboru ve formátu .xlsx, který musí mít definovanou strukturu. Po dokončení importu se uživateli zobrazí náhled průběhu spolehlivosti. Následně je nutné zadat hodnotu koeficientu spolehlivosti a požadované cílové spolehlivosti EOP. Stiskem tlačítka *CALCULATE* se spustí výpočet, jehož výsledky se vypíší do okna aplikace. Zobrazen je optimální kalibrační interval, jeho interval spolehlivosti, standardní chyba určující těsnost modelu a hodnota parametru exponenciálního rozdělení.



Obr. 27 - prostředí výpočetní aplikace.

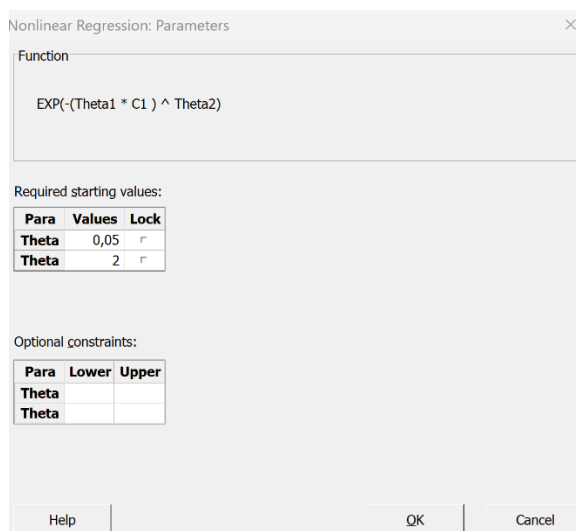
## Minitab

Statistický software Minitab se ukázal jako kvalitní nástroj pro provádění regrese. Funkce Nonlinear Regression umožňuje vybrat požadovanou funkci z katalogu obsahujícího všechna běžně používaná rozdělení, případně zadat předpis funkce ručně.



Obr. 28 - základní okno nelineární regrese v Minitab.

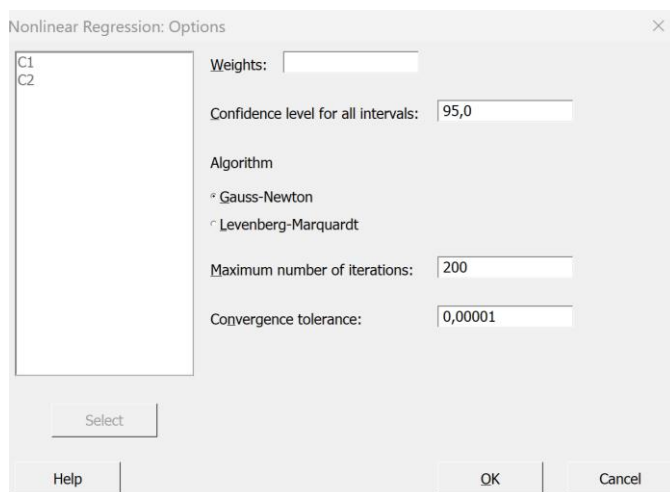
Po zadání předpisu funkce a výběru vstupních dat je třeba nastavit počáteční hodnoty parametrů. Ze zkušeností se ukázaly jako vhodné hodnoty  $\theta_1 = 0,05$  a  $\theta_2 = 2$ .



Obr. 29 - nastavení počátečních hodnot parametrů nelineární regrese v Minitab.

V dalším kroku je zadána

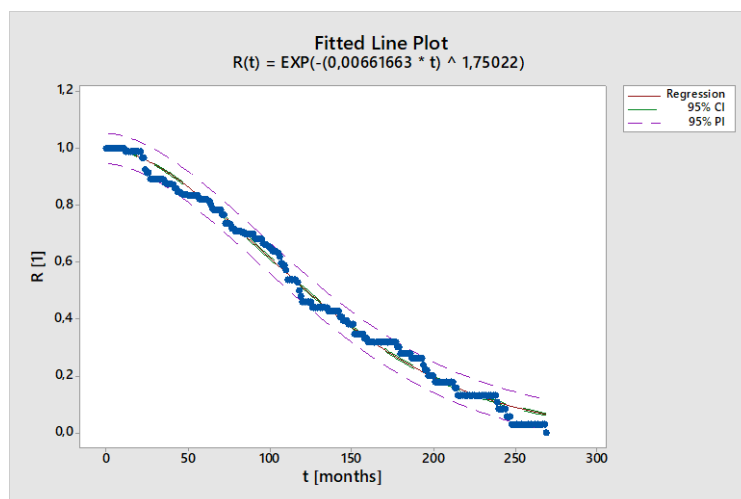
- požadovaná hladina spolehlivosti (standardně používáno 95 %),
- metoda řešení (Gauss-Newton nebo Levenberg-Marquardt),
- podmínky ukončení výpočtu – maximální počet iterací, konvergenční kritérium.



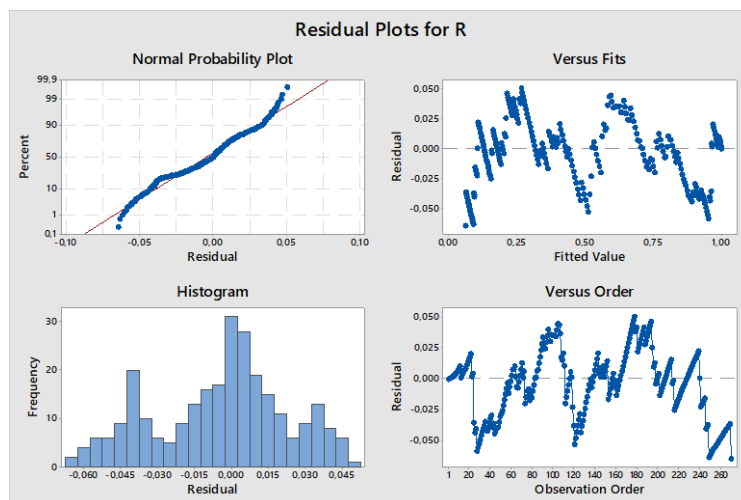
Obr. 30 - doplňující nastavení nelineární regrese v Minitab.

Dále jsou definovány grafické výstupy. Lze zvolit vykreslení intervalu spolehlivosti a intervalu predikce do grafu. Lze nastavit i vykreslení grafů reziduí.

Následuje ukázka řešení konkrétního datasetu v Minitab (Obr. 31 a Obr. 32).



Obr. 31 - graf nelineární regrese v Minitab.



Obr. 32 - graf reziduí nelineární regrese v Minitab.

Software vygeneruje protokol shrnující vstupní parametry a výsledky provedené regrese. Kromě základních informací obsahuje shrnutí jednotlivých iteračních kroků, předpis výsledné funkce, stanovené parametry včetně standardní chyby (SE Estimate) a intervalů spolehlivosti a Summary Table.

<b>Nonlinear Regression: <math>R(t) = \text{EXP}(-(\text{Theta1} * t) ^ \text{Theta2})</math></b>			
Method			
Algorithm	Gauss-Newton		
Max iterations	200		
Tolerance	0,00001		
Starting Values for Parameters			
Parameter	Value		
Theta1	0,05		
Theta2	2		
Estimates at Each Iteration			
Iteration	SSE	Theta1	Theta2
0	66,9794	0,0500000	2,00000
1	24,7345	0,0222046	0,30157
2	13,4594	0,0025699	0,44748
3	7,7495	0,0100233	1,33513
4	3,7945	0,0050851	1,39437
5	0,2152	0,0066777	1,68725
6	0,1998	0,0066174	1,74668
7	0,1997	0,0066168	1,75016
8	0,1997	0,0066166	1,75022
9	0,1997	0,0066166	1,75022
10	0,1997	0,0066166	1,75022
11	0,1997	0,0066166	1,75022
Equation			
$R(t) = \text{EXP}(-0,00661663 * t) ^ 1,75022$			
Parameter Estimates			
Parameter	Estimate	SE Estimate	95% CI
Theta1	0,00662	0,0000236	(0,00657; 0,00666)
Theta2	1,75022	0,0169293	(1,71703; 1,78404)
Summary			
Iterations	11		
Final SSE	0,199729		
DFE	267		
MSE	0,0007481		
S	0,0273505		

Summary Table shrnuje parametry popisující kvalitu regrese.

Parametr **Iterations** udává počet iterací potřebných pro nalezení řešení.

Parametr **Final SSE** reprezentuje nejmenší hodnotu sumy čtverců odchylek, které bylo dosaženo za zadaných vstupních podmínek. Parametr lze využít pro posouzení kvality regrese v porovnání s hodnotou získanou za použití jiného modelu či jiných počátečních podmínek [30].

Parametr **DFE** vyjadřuje počet stupňů volnosti odchylky. Je definován jako rozdíl velikosti vzorku a počtu odhadovaných parametrů [30].

Parametr **S** vyjadřuje směrodatnou odchylku vzdálenosti mezi měřenou a aproximovanou hodnotou. Běžně používaný parametr  $R^2$  je v případě nelineárních modelů bezvýznamný, tudíž je pro kvalitu regrese používán právě parametr **S**. Rozměr směrodatné odchylky je stejný jako rozměr odezvy, proto je jeho interpretace intuitivnější než SSE. Obecně platí, že nižší hodnota **S** znamená vyšší kvalitu regresního modelu [30].

Interpretace grafů reziduí není pro potřeby této práce významná.

Pro ověření vlivu použité metody na výsledky regrese bylo provedeno 5 regresí z různých datasetů a výsledky porovnány. Bylo prokázáno, že Gauss-Newtonova a Levenberg-Marquardtova metoda poskytují stejné hodnoty parametrů  $\theta$ , SSE i **S**, jak je patrné z Tab. 21. Rozdíl je pouze v počtu potřebných iteračních kroků – Gauss-Newtonova metoda vyžaduje nižší počet iterací.

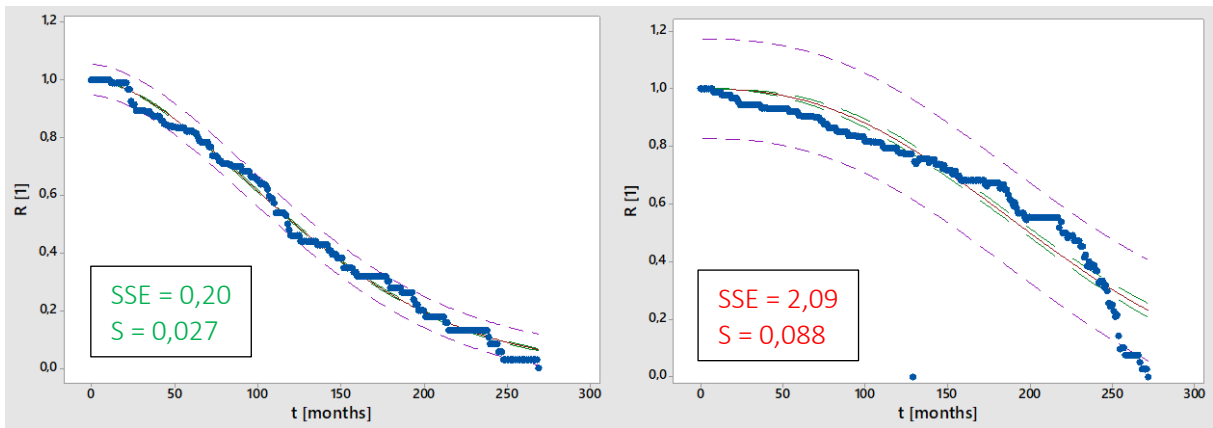
Tab. 21 - porovnání výsledků Gauss-Newtonovy (G-N) a Levenberg-Marquardtovy (L-M) metody.

G-N				
$\Theta_1$ [1]	$\Theta_2$ [1]	Iterace	SSE [1]	S [1]
0,0067	1,75	11	0,199	0,027
0,0039	2,26	19	1,140	0,065
0,0079	1,45	12	0,310	0,036
0,0043	2,44	19	2,088	0,088
0,0043	6,24	25	1,216	0,068

L-M				
$\Theta_1$ [1]	$\Theta_2$ [1]	Iterace	SSE [1]	S [1]
0,0067	1,75	18	0,199	0,027
0,0039	2,26	27	1,140	0,065
0,0079	1,45	18	0,310	0,036
0,0043	2,44	27	2,088	0,088
0,0043	6,24	33	1,216	0,068

Význam parametrů SSE a **S** je patrný z následujících obrázků. Obr. 33 zachycuje model s vyšší kvalitou regrese, Obr. 34 zachycuje model s nižší kvalitou regrese. Parametry SSE a **S** jsou v případě kvalitnějšího regresního modelu nižší.



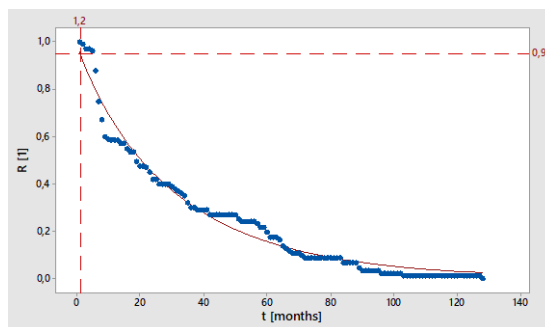
Obr. 33 - model s nižší hodnotou SSE a S.

Obr. 34 - model s vyšší hodnotou SSE a S.

### 5.2.3 Tvar průběhu spolehlivosti

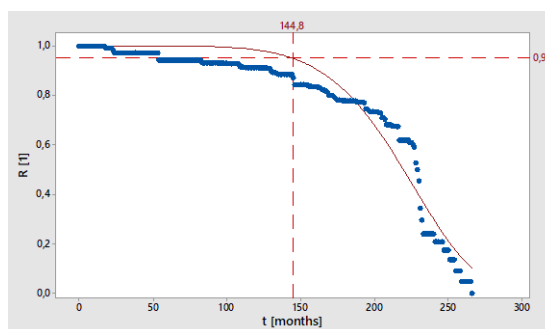
Z provedených analýz vyplynulo, že skutečné průběhy spolehlivosti v čase mohou mít různé tvary. Tři základní pozorované tvary jsou následující:

#### Konvexní



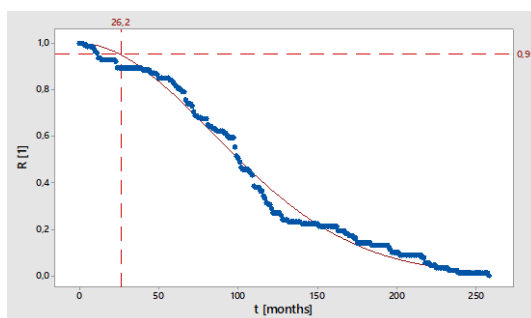
Obr. 35 - konvexní průběh spolehlivosti.

#### Konkávni



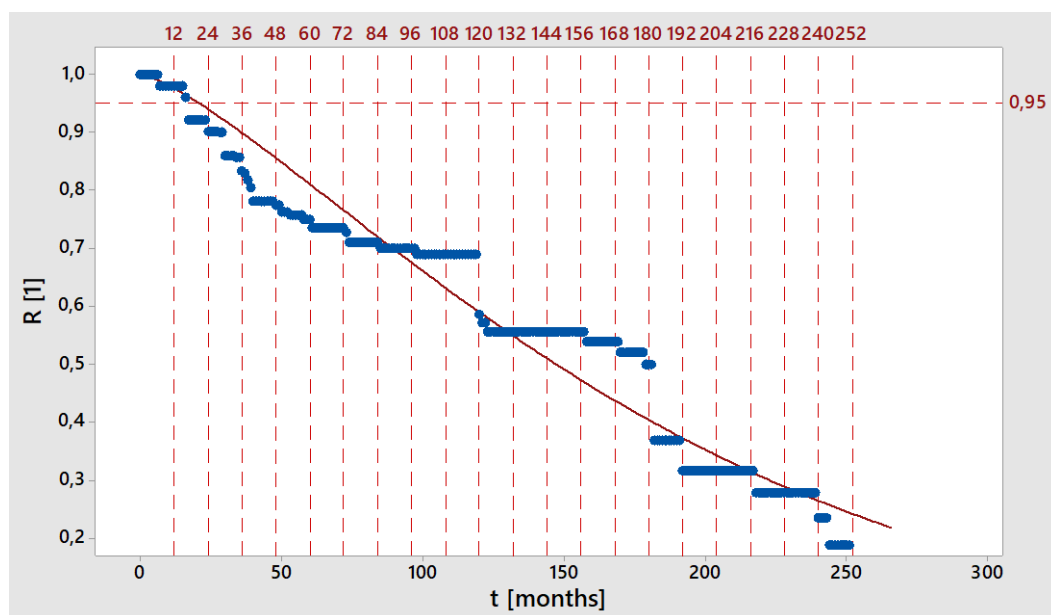
Obr. 36 - konkávni průběh spolehlivosti.

## Konvexně-konkávní



Obr. 37 - konvexně-konkávní průběh spolehlivosti.

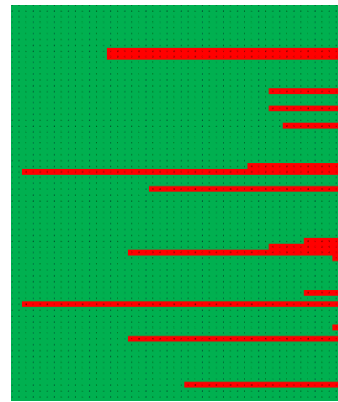
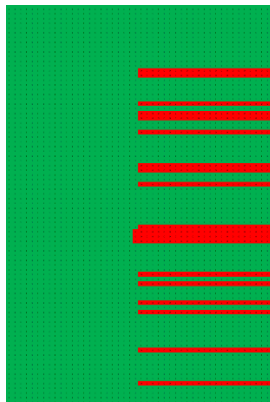
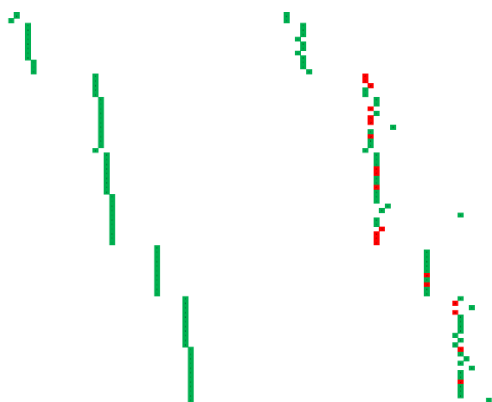
Schody, které lze na křivkách pozorovat, odpovídají ročním časovým intervalům viz Obr. 38. Tento jev je výraznější u datasetů s menším počtem vzorků a u velmi homogenních datasetů, které obsahují vzorky z omezeného počtu výdejen. V takových případech se často provádí kalibrace měřidel hromadně. V tuto chvíli používaný způsob práce s intervalově cenzorovanými daty (selhání měřidla uprostřed intervalu) tento jev zvyrazňuje. Jedním z možných řešení by mohlo být umístění času selhání měřidla do náhodného času v rámci daného časového intervalu.



Obr. 38 - souvislost místa výskytu schodu na křivce a času.

Vliv umístění času selhání do náhodného času v rámci příslušného časového intervalu lze ilustrovat na následujícím příkladu. Obr. 39 zachycuje vysoce homogenní skupinu měřidel vlastněných stejnou výdejnou. Všechna měřidla byla zaváděna do provozu po skupinách a kalibrována v pravidelných čtyřletých intervalech, a to rovněž hromadně po skupinách. Při uvažování času selhání měřidla ve středu intervalu je pak pro většinu měřidel určen shodný čas selhání 96 měsíců (viz Obr. 40). Graf průběhu spolehlivosti v takovém případě není vypovídající

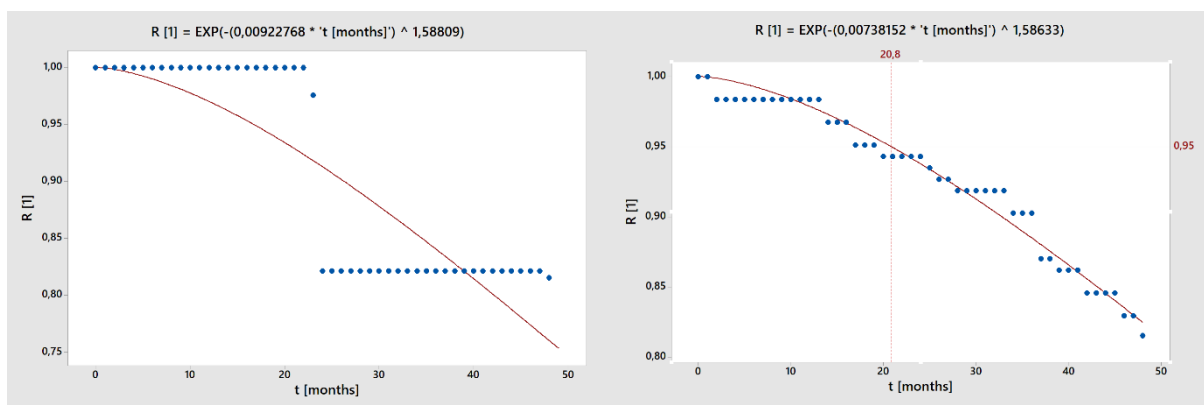
(Obr. 42). To je v tomto konkrétním případě umocněno krátkou kalibrační historií. Efekt náhodného určování časů selhání je patrný z Obr. 41. Z takto získaných dat je možné stanovit odhad optimálního kalibračního intervalu (Obr. 43).



Obr. 39 - "kalendář".

Obr. 40 - čas selhání umístěný do středu intervalu.

Obr. 41 - čas selhání umístěný do náhodného času.



Obr. 42 - graf – čas selhání ve středu intervalu.

Obr. 43 - graf – čas selhání v náhodném čase.

Pro bližší ověření vlivu náhodného určování času selhání byl tento princip aplikován na vybrané datasey. Bylo zjištěno, že oba popisované způsoby určení času selhání dávají srovnatelné výsledky jak z hlediska optimálního kalibračního intervalu, tak spolehlivosti (viz. Tab. 22). Použití náhodně určovaného času selhání je tak výhodné zejména u specifických skupin měřidel. Všechny analýzy publikované v kap. 6 využívají princip určování času selhání ve středu intervalu.



Tab. 22 - srovnání metod určení času selhání.

Dataset	Střed intervalu		Náhodně	
	$I_{(EOP = 0,95)}$ [rok]	R [1]	$I_{(EOP = 0,95)}$ [rok]	R [1]
PMA150CD	1,4	0,92	1,2	0,94
PL150CD	1,7	0,99	1,9	0,99
PY150CD	1,8	0,95	1,7	0,95
MME25CD	5,8	0,94	5,8	0,94
ML25CD	3,5	0,95	3,4	0,95
UMT5CD	0,5	0,92	0,2	0,94
UT12CDO	3,7	0,96	3,7	0,96
UPT014CD	2,5	0,93	2,6	0,93
<b>Průměr</b>	<b>2,6</b>	<b>0,95</b>	<b>2,6</b>	<b>0,95</b>

#### 5.2.4 Cut-off

Jak je patrné z Obr. 44, křivka Weibullova rozdělení v některých případech neprokládá skutečný průběh spolehlivosti dokonale. Kalibrační interval pro EOP = 95 % odečtený na regresní křivce je 68,9 měsíce. Skutečná spolehlivost v tomto čase je však o 5 % nižší.

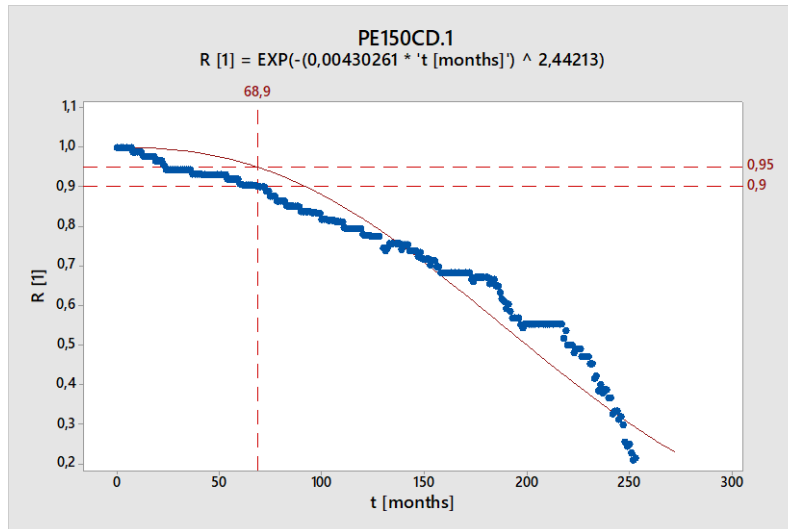
Pro potřeby analýzy kalibračních intervalů (pro EOP v rámci běžně používaných hodnot 0,9 až 0,99), které jsou jen zřídka stanoveny v řádech vyšších jednotek let, není důležitá znalost pravé části křivky. Většina skutečných křivek je navíc tvarově odlišná v počátku provozu měřidla a aproximace kompletního průběhu spolehlivosti tuto skutečnost nereflkuje. Vzhledem k tomu, že pokles spolehlivosti je obvykle v první fázi rychlejší a až následně dochází k ustálení rychlosti poklesu, skutečný průběh spolehlivosti leží pod aproximovaným průběhem. To má za důsledek stanovení nadměrně dlouhého kalibračního intervalu, v některých případech až extrémně.

Z těchto důvodů bylo rozhodnuto o využívání pouze levé části křivky spolehlivosti. Byl definován pojem „Cut-Off“, tedy oříznutí křivky při poklesu spolehlivosti pod určitou hodnotu. Jako optimální se zdá být hodnota 0,8.

Následující tabulky porovnávají výsledky analýzy pro kompletní dataset (Tab. 23) a oříznutý dataset (Tab. 24). Kalibrační interval získaný z kompletní křivky je v tomto případě téměř o 3 roky vyšší, interval spolehlivosti hodnoty kalibračního intervalu je širší a směrodatná odchylka regresního modelu je vyšší o řád.

Tab. 23 - analýza s Cut-Off = 0.

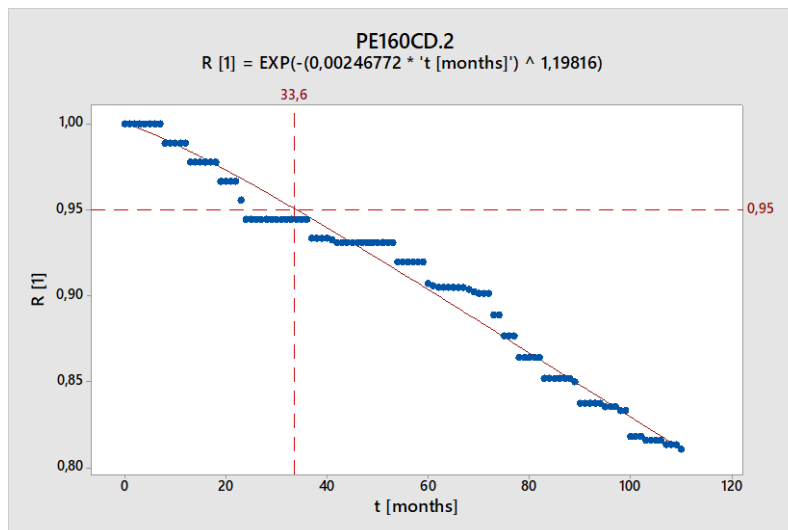
PE150CD.1	Druh	Výrobce	Typ	Rozsah	Třída	Velikost	Cut-Off
	112.12	Edmond	POS DI 0,01	0-150 mm	CD	98	<b>0</b>
W <sub>2p</sub>	θ <sub>1</sub>	θ <sub>2</sub>	S	DFE	I <sup>(EOP=0,95)</sup>	95% CI	
	0,0043	2,44	0,0879	270	<b>5,7 roku</b>	5,32	6,12



Obr. 44 - graf s Cut-Off = 0.

Tab. 24 - analýza s Cut-Off = 0,8.

PE150CD.2	Druh	Výrobce	Typ	Rozsah	Třída	Velikost	Cut-Off
	112.12	Edmond	POS DI 0,01	0-150 mm	CD	98	<b>0,8</b>
W <sub>2p</sub>	θ <sub>1</sub>	θ <sub>2</sub>	S	DFE	I <sup>(EOP=0,95)</sup>	95% CI	
	0,0025	1,20	0,0086	108	<b>2,8 roku</b>	2,72	2,93



Obr. 45 - graf s Cut-Off = 0,8.

### 5.2.5 Výpočet kalibrační lhůty

Pro výpočet kalibrační lhůty z exponenciálního, resp. Weibullova modelu jsou použity vztahy získané prostým vyjádřením z Rov. 1, resp. Rov. 2.

#### Weibull

$$I = \frac{\ln (EOP^{-1})\theta_2^{-1}}{\theta_1} \quad \text{Rov. 3}$$

#### Exponenciální

$$I = -\frac{\ln (EOP)}{\theta} \quad \text{Rov. 4}$$

### Výpočet intervalů spolehlivosti

Interval spolehlivosti stanoveného parametru lze získat pomocí vztahu

$$CI = \theta \pm t_{1-\frac{\alpha}{2}, n-p} \cdot S,$$

kde  $\theta$  je hodnota odhadnutého parametru a  $S$  směrodatná odchylka jeho odhadu (ve výstupním protokolu v Minitab lze najít jako parametr  $S$ ) [31].

Výraz  $t_{1-\frac{\alpha}{2}, n-p}$  reprezentuje  $100\left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)$  percentil oboustranného Studentova  $t$ -rozdělení s  $n - p$  stupni volnosti, kde  $\alpha$  je hladina významnosti,  $n$  je počet pozorování a  $p$  počet parametrů regrese (pro exponenciální model  $p = 1$ , pro Weibullův  $n = 2$ ). Výraz  $n - p$  reprezentuje hodnota DFE v Minitab (viz kap. 5.2.2) [31].

Výpočet hodnoty  $t_{1-\frac{\alpha}{2}, n-p}$  je relativně složitý. Pro stanovení lze využít statistické tabulky (Obr. 46), online aplikace, funkci T.INV.2T v MS Excel nebo specializované SW a programovací jazyky (R, Matlab...). Pro potřeby této práce, vzhledem k vysokému počtu pozorování v jednotlivých datasetech, tabulky nejsou obvykle dostačující.

cum. prob	t <sub>.50</sub>	t <sub>.75</sub>	t <sub>.80</sub>	t <sub>.85</sub>	t <sub>.90</sub>	t <sub>.95</sub>	t <sub>.975</sub>	t <sub>.99</sub>	t <sub>.995</sub>	t <sub>.999</sub>	t <sub>.9995</sub>
one-tail	0.50	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05	0.025	0.01	0.005	0.001	0.0005
two-tails	1.00	0.50	0.40	0.30	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01	0.002	0.001
df											
1	0.000	1.000	1.376	1.963	3.078	6.314	12.71	31.82	63.66	318.31	636.62
2	0.000	0.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	22.327	31.599
3	0.000	0.765	0.978	1.250	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	10.215	12.924
4	0.000	0.741	0.941	1.190	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	7.173	8.610
5	0.000	0.727	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	5.893	6.869
6	0.000	0.718	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.208	5.959
7	0.000	0.711	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.785	5.408
8	0.000	0.706	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	4.501	5.041
9	0.000	0.703	0.883	1.100	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.297	4.781
10	0.000	0.700	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.144	4.587
11	0.000	0.697	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.025	4.437
12	0.000	0.695	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.930	4.318
13	0.000	0.694	0.870	1.079	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.852	4.221
14	0.000	0.692	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.787	4.140
15	0.000	0.691	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.733	4.073
16	0.000	0.690	0.865	1.071	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.686	4.015
17	0.000	0.689	0.863	1.069	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.646	3.965
18	0.000	0.688	0.862	1.067	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.610	3.922
19	0.000	0.688	0.861	1.066	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.579	3.883
20	0.000	0.687	0.860	1.064	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.552	3.850
21	0.000	0.686	0.859	1.063	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.527	3.819
22	0.000	0.686	0.858	1.061	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.505	3.792
23	0.000	0.685	0.858	1.060	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.485	3.768
24	0.000	0.685	0.857	1.059	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.467	3.745
25	0.000	0.684	0.856	1.058	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.450	3.725
26	0.000	0.684	0.856	1.058	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.435	3.707
27	0.000	0.684	0.855	1.057	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.421	3.690
28	0.000	0.683	0.855	1.056	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.408	3.674
29	0.000	0.683	0.854	1.055	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.396	3.659
30	0.000	0.683	0.854	1.055	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.385	3.646
40	0.000	0.681	0.851	1.050	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.307	3.551
60	0.000	0.679	0.848	1.045	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	3.232	3.460
80	0.000	0.678	0.846	1.043	1.292	1.664	1.990	2.374	2.639	3.195	3.416
100	0.000	0.677	0.845	1.042	1.290	1.660	1.984	2.364	2.626	3.174	3.390
1000	0.000	0.675	0.842	1.037	1.282	1.646	1.962	2.330	2.581	3.098	3.300
<b>Z</b>	0.000	0.674	0.842	1.036	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	3.090	3.291
	0%	50%	60%	70%	80%	90%	95%	98%	99%	99.8%	99.9%

Obr. 46 - t-test tabulka [32].

Princip stanovení intervalů spolehlivosti v Minitab se nepodařilo dohledat. Výše popsaný postup (postup A) však poskytuje srovnatelné výsledky s Minitab – rozdíly jsou zanedbatelné (viz Tab. 25).

Tab. 25 - porovnání vypočtených intervalů spolehlivosti parametru  $\theta$ .

$\theta$ [1]	S [1]	DFE [1]	$t_{1-\frac{\alpha}{2}, n-p}$	95% CI							
				postup A			Minitab			$\Delta$	
				$CI_{\theta}^L$	$CI_{\theta}^U$	šířka	$CI_{\theta}^L$	$CI_{\theta}^U$	šířka	$CI_{\theta}^L$	$CI_{\theta}^U$
0,0383	0,0031	6	2,45	0,0306	0,0460	0,0153	0,0308	0,0461	0,0153	0,63 %	0,27 %
0,0079	0,0001	240	1,97	0,0077	0,0081	0,0005	0,0077	0,0081	0,0004	0,21 %	0,04 %
0,0023	0,0001	266	1,97	0,0021	0,0025	0,0004	0,0021	0,0025	0,0004	1,13 %	1,03 %

Pro stanovení intervalu spolehlivosti stanoveného kalibračního intervalu jsou použity upravené rovnice Rov. 3 a Rov. 4 za využití horních, resp. dolních mezí intervalů spolehlivosti odhadu parametrů.

## Exponenciální

$$CI_{\theta}^U = -\frac{\ln(EOP)}{\theta^L}$$

$$CI_{\theta}^L = -\frac{\ln(EOP)}{\theta^U}$$

## Weibull

$$CI_I^U = \frac{\ln (EOP^{-1})(\theta_2^L)^{-1}}{\theta^L}$$

$$CI_I^L = \frac{\ln (EOP^{-1})(\theta_2^U)^{-1}}{\theta^U}$$

### 5.2.6 Srovnání matematických metod

Pro validaci výsledků a srovnání výsledků poskytovaných jednotlivými matematickými metodami byla provedena regrese všemi popisovanými metodami za použití shodného datasetu. Provedena byla aproximace exponenciální funkcí, jelikož ji lze použít ve všech metodách.

Validace byla provedena za použití příkladu uvedeného v článku [29], viz Tab. 26. Článek obsahuje kompletní postup výpočtu včetně výsledků za použití metod Simple a MLE (popisováno v kap. 3.5.1). Bylo ověřeno, že vlastní vyvinutá aplikace poskytuje správné výsledky. Výsledky získané za použití metody používané v rámci této práce, nelineární regrese v Minitab, jsou srovnatelné (výsledný kalibrační interval se vůči metodě MLE liší maximálně o 4 %).

Tab. 26 - dataset pro validaci metod.

t [months]	n	s	R [1]
1	1000	967	0,967
2	1000	933	0,933
3	1000	933	0,933
4	1000	900	0,900
5	1000	833	0,833
6	1000	767	0,767
7	1000	733	0,733

Tab. 27 - srovnání výsledků matematických metod.

Metoda	$I^{(EOP=0,85)}$ [rok]	95% CI [rok]	
MLE – literatura [29]	<b>4,4334</b>	<b>4,4306</b>	<b>4,4363</b>
Simple – literatura [29]	<b>4,5393</b>	<b>4,5364</b>	<b>4,5422</b>
Minitab – Gauss-Newton (Minitab)	4,2433	3,5361	5,3041
Minitab – Levenberg-Marquardt (Minitab)	4,2433	3,5361	5,3041
MLE – aplikace	4,4334	4,4306	4,4363
Simple – aplikace	4,5393	4,5364	4,5422

## 6 Analýza kalibračních intervalů měřidel ve Škoda Auto

Cílem této části diplomové práce je ověření navržené metodiky za použití reálných informací o měřidlech používaných ve Škoda Auto.

Jak bylo již nastíněno, analýza bude prováděna pro 8 druhů měřidel dle Třídníku měřidel:

- 112.11 – posuvné měřidlo mechanické,
- 112.12 – posuvné měřidlo digitální,
- 112.31 – mikrometrické měřidlo vnější 0,01,
- 112.32 – mikrometrické měřidlo digitální 0,002, 0,001,
- 112.52 – úchylkoměr mechanický 0,01,
- 112.53 – úchylkoměr mechanický 0,001,
- 112.54 – úchylkoměr digitální,
- 112.55 – úchylkoměr páčkový.

Cílem je ověřit vliv co největšího množství parametrů. Vzhledem k limitovanému rozsahu dostupných dat (viz kap. 5.1) bylo toto omezeno na vliv výrobce, rozsahu a v některých případech i prostředí použití a rozlišení měřidla.

Základní informace o analyzovaném vzorku a výsledky analýzy jsou shrnuty do přehledných tabulek. Význam jednotlivých položek je shrnut na Obr. 47.

Označení analýzy	Druh dle Třídníku měřidel		Bližší specifikace měřidla	Třída použití (viz kap. 5.1)	Počet vzorků ve skupině	Omezení (viz kap. 5.2.4)	
A(B)CDDD(E).F	Druh	Výrobce	Typ	Rozsah	Třída	Velikost	Cut-off
$W_{2p}$	$\theta_1$	$\theta_2$	S	DFE	I <sup>(EOP=0,95)</sup>	95% CI	

Weibullovo rozdělení  
 Parametry rozdělení  
 Směrodatná odchylka modelu (viz kap. 5.2.2)  
 Počet stupňů volnosti (viz kap. 5.2.2)  
 Optimální kalibrační interval  
 Interval spolehlivosti kalibračního intervalu

Obr. 47 - význam parametrů ve shrnující tabulce.

Pro snazší orientaci byly jednotlivým datasetům přiřazeny označení ve formátu **AABCCCD.E**.

Význam označení shrnuje Tab. 28.

Tab. 28 - význam označení analýzy.

<b>A</b>	druh měřidla	P – posuvné měřidlo M – mikrometrické měřidlo U - úchylkoměr
<b>(B)</b>	specifikace druhu měřidla	bez symbolu – digitální M – mechanické (číselníkové) P - páčkové
<b>C</b>	výrobce	L – Leo G – Gaston T – Theo E – Edmond Y – Yves A - Achille
<b>DDD</b>	rozsah	
<b>(E)</b>	pořadí analýzy	
<b>F</b>	Cut-off	1 – bez omezení 2 – omezení 0,8

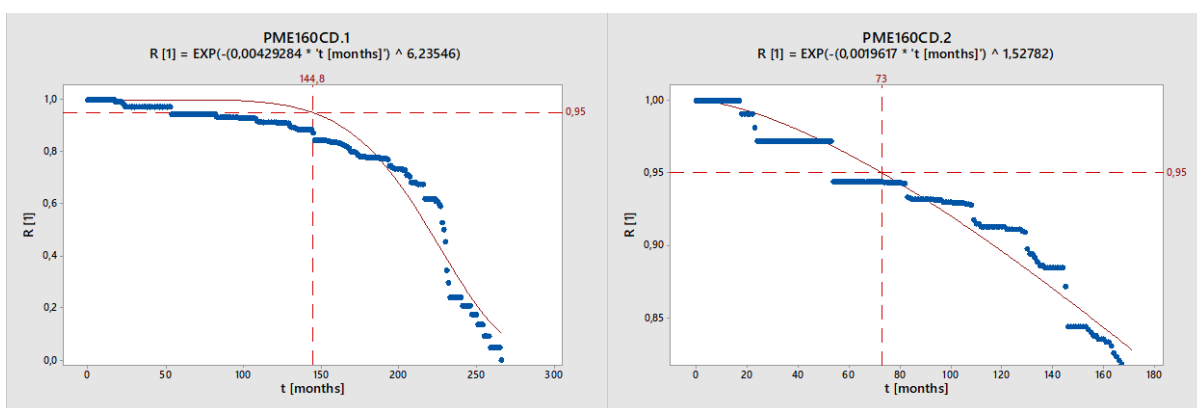
## 6.1 Posuvné měřítko mechanické

### 6.1.1 Vliv konstrukce měřidla

Analyzovány byly vzorky mechanických posuvných měřidel rozsahu 0-150 mm používaných v dílenském prostředí od 2 různých výrobců.

Tab. 29 - analýza PME160CD.

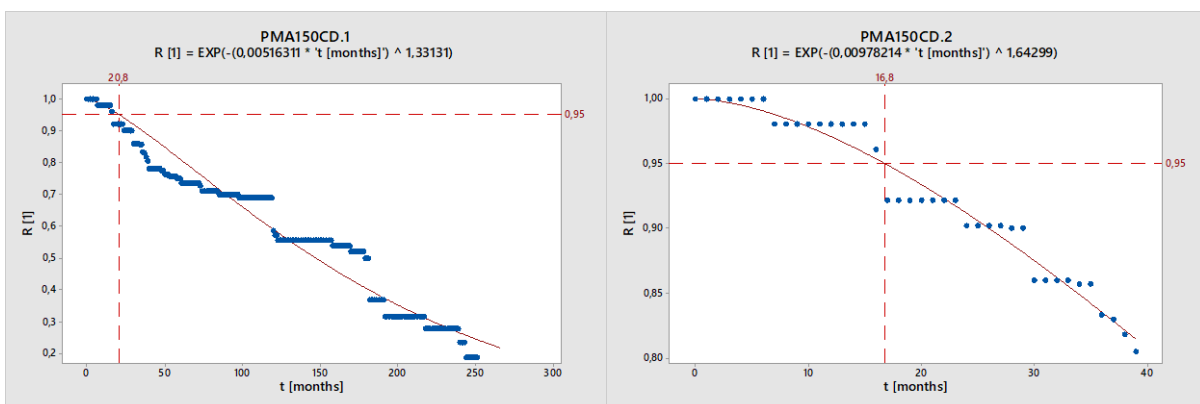
PME150CD.2	Druh	Výrobce	Typ	Rozsah	Třída	Velikost	Cut-off
	112.11	Edmond	POS ME 0,02	0-150 mm	CD	107	0,8
$W_{2p}$	$\theta_1$	$\theta_2$	S	DFE	$I_{(EOP=0,95)}$	95% CI	
	0,0020	1,53	0,0124	169	<b>6,1 roku</b>	5,87	6,27



Obr. 48 - grafy PME160CD.

Tab. 30 - analýza PMA150CD.

PMA150CD.2	Druh	Výrobce	Typ	Rozsah	Třída	Velikost	Cut-off
	112.12	Achille	POS ME 0,02	0-150 mm	CD	51	0,8
$W_{2p}$	$\theta_1$	$\theta_2$	S	DFE	$I_{(EOP=0,95)}$	95% CI	
	0,010	1,64	0,0111	37	<b>1,4 roku</b>	1,30	1,47



Obr. 49 - grafy PMA150CD.



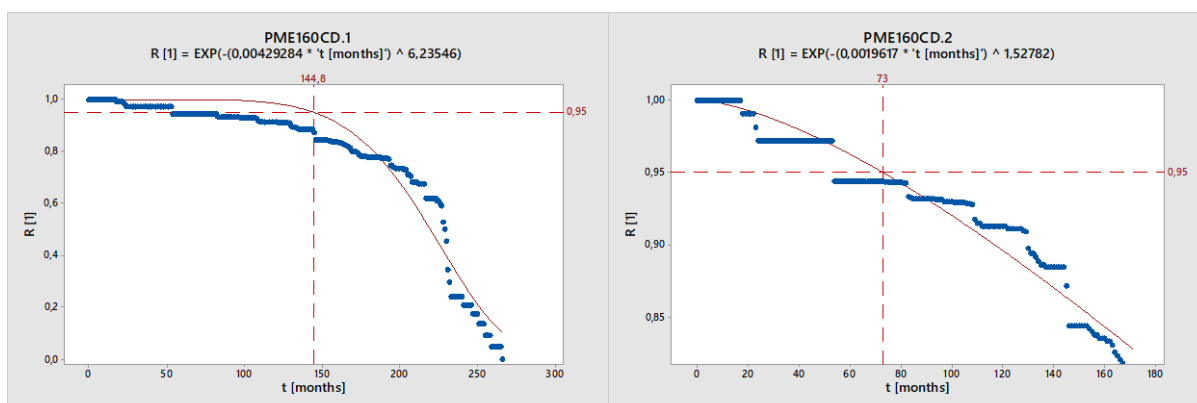
Byl shledán významný rozdíl ve spolehlivosti mechanického posuvného měřidla od dvou různých výrobců. Optimální kalibrační interval měřidel od výrobce Edmond je 6 let, pro výrobce Achille je to 1-2 roky.

### 6.1.2 Vliv rozsahu měřidla

Porovnána byla mechanická posuvná měřidla ze stejné modelové řady (tedy shodné konstrukce) od výrobce Edmond s rozsahy 150 mm, 250 mm a 400 mm používané v dílenském prostředí.

Tab. 31 - analýza PME160CD.

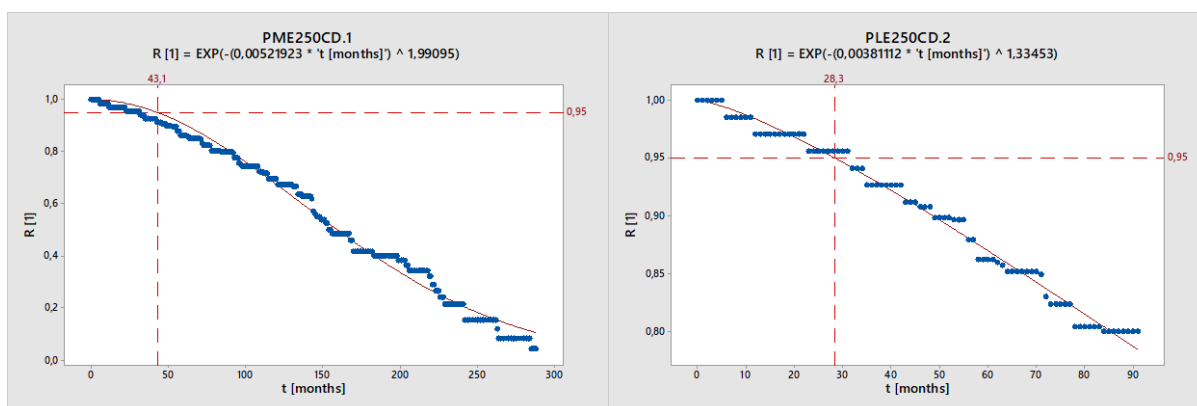
PME150CD.2	Druh	Výrobce	Typ	Rozsah	Třída	Velikost	Cut-off
	112.11	Edmond	POS ME 0,02	0-150 mm	CD	107	0,8
$W_{2p}$	$\theta_1$	$\theta_2$	S	DFE	$I_{(EOP=0,95)}$	95% CI	
	0,0020	1,53	0,0124	169	<b>6,1 roku</b>	5,87	6,27



Obr. 50 - grafy PME160CD.

Tab. 32 – analýza PME250CD.

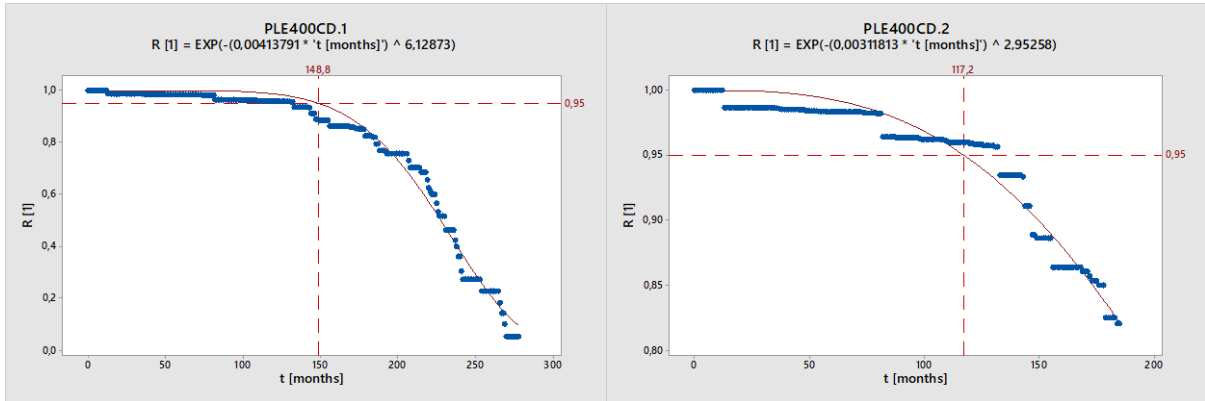
PME250CD.2	Druh	Výrobce	Typ	Rozsah	Třída	Velikost	Cut-Off
	112.121	Edmond	POS ME 0,02	0-250 mm	CD	68	0,8
$W_{2p}$	$\theta_1$	$\theta_2$	S	DFE	$I_{(EOP=0,95)}$	95% CI	
	0,0038	1,33	0,0069	89	<b>2,4 roku</b>	2,29	2,43



Obr. 51 - grafy PME250CD.

Tab. 33 - analýza PME400CD.

PME400CD.2	Druh	Výrobce	Typ	Rozsah	Třída	Velikost	Cut-Off
	112.11	Edmond	POS ME 0,02	0-400 mm	CD	76	0,8
$W_{2p}$	$\theta_1$	$\theta_2$	S	DFE	$I_{(EOP=0,95)}$	95% CI	
	0,0031	2,95	0,0113	183	<b>9,8 roku</b>	9,59	9,90



Obr. 52 - grafy PLE400CD.

Byl shledán významný rozdíl ve spolehlivosti měřidel s různými rozsahy. Dataset PME250CD.2 se od zbývajících výrazně odlišuje jak tvarem křivky spolehlivosti, tak stanoveným kalibračním intervalem.

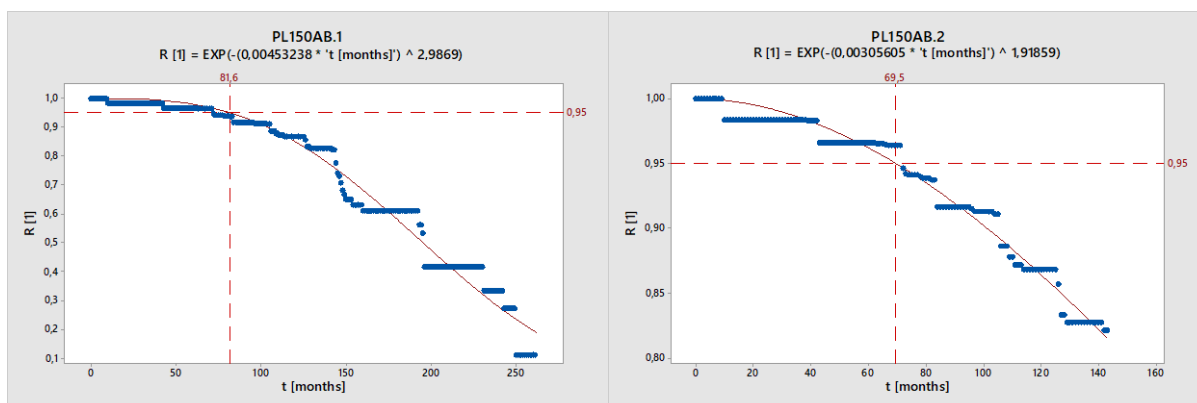
## 6.2 Posuvné měřítko digitální

### 6.2.1 Vliv prostředí použití

Pro ověření vlivu prostředí použití byly vytvořeny dva datasety. První dataset (PL150AB.2) zahrnuje digitální posuvná měřítka výrobce Leo, rozsahu 0-150 mm používané v laboratorním prostředí. Druhý dataset (PL150CD.2) zahrnuje stejná měřítka používaná v dílenském prostředí (třídy C+D).

Tab. 34 - analýza PL150AB.

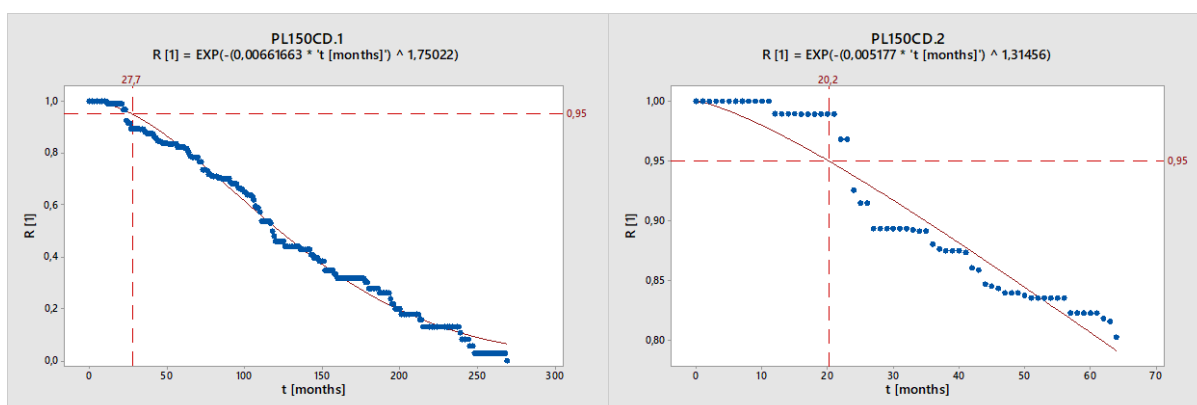
PL150AB.2	Druh	Výrobce	Typ	Rozsah	Třída	Velikost	Cut-Off
	112.12	Leo	POS DI 0,01	0-150 mm	AB	61	0,8
$W_{2p}$	$\theta_1$	$\theta_2$	S	DFE	$I^{(EOP=0,95)}$	95% CI	
	0,0031	1,92	0,0085	141	<b>5,8 roku</b>	5,67	5,90



Obr. 53 - grafy PL150AB.

Tab. 35 - analýza PL150CD.

PL150CD.2	Druh	Výrobce	Typ	Rozsah	Třída	Velikost	Cut-Off
	112.12	Leo	POS DI 0,01	0-150 mm	CD	95	0,8
$W_{2p}$	$\theta_1$	$\theta_2$	S	DFE	$I^{(EOP=0,95)}$	95% CI	
	0,0052	1,31	0,0188	62	<b>1,7 roku</b>	1,50	1,82



Obr. 54 - grafy PL150CD.

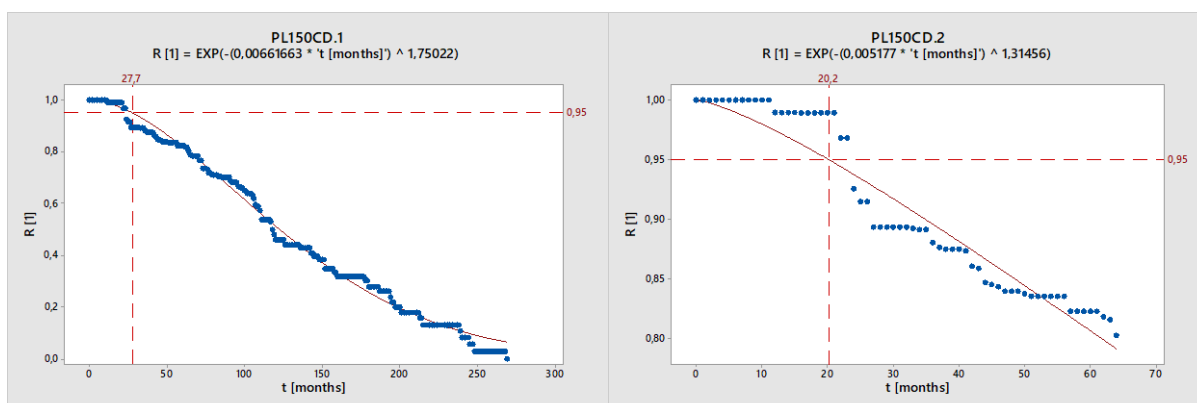
Pro měřidla používaná v laboratorním prostředí byl stanoven optimální kalibrační interval 5,8 roku, pro měřidla používaná v dílenském prostředí 1,7 roku. Výsledek tak potvrzuje teoretický předpoklad. Rozdíl je patrný již pouhým pohledem na Obr. 53 a Obr. 54, kdy spolehlivost měřidel používaných v laboratorním prostředí v počáteční fázi klesá pomaleji.

## 6.2.2 Vliv konstrukce měřidla

Do analýzy byly zahrnuty vzorky digitálních posuvných měřitek rozsahu 0-150 mm používaných v dílenském prostředí (CD) od 4 různých výrobců.

Tab. 36 - analýza PL150CD.

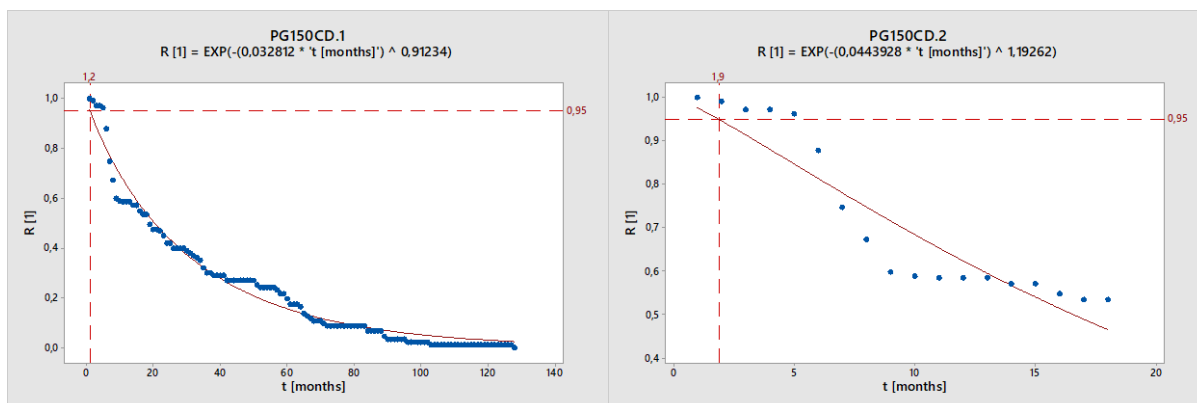
PL150CD.2	Druh	Výrobce	Typ	Rozsah	Třída	Velikost	Cut-Off
	112.12	Leo	POS DI 0,01	0-150 mm	CD	95	0,8
$W_{2p}$	$\theta_1$	$\theta_2$	S	DFE	$I_{(EOP=0,95)}$	95% CI	
	0,0052	1,31	0,0188	62	<b>1,7 roku</b>	1,50	1,82



Obr. 55 - grafy PL150CD.

Tab. 37 - analýza PG150CD.

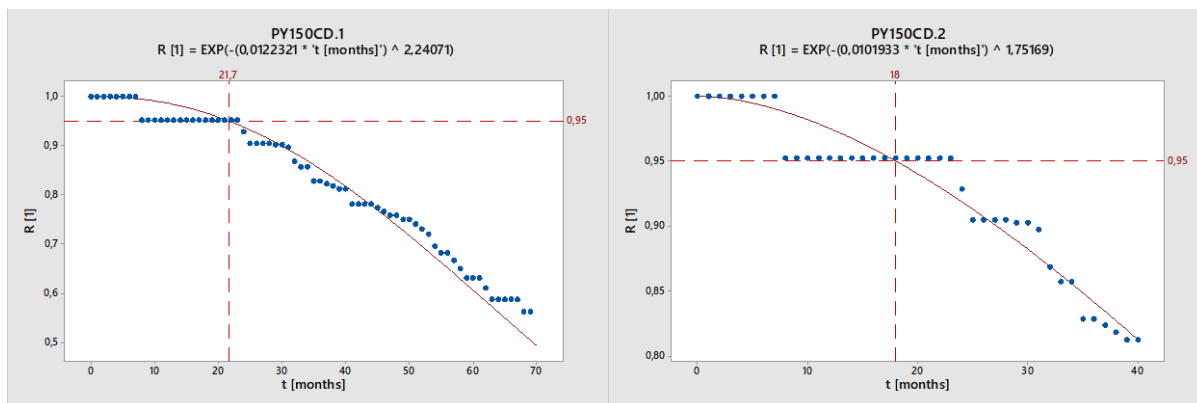
PG150CD.2	Druh	Výrobce	Typ	Rozsah	Třída	Velikost	Cut-Off
	112.12	Gaston	POS DI 0,01	0-150 mm	CD	107	0,5
$W_{2p}$	$\theta_1$	$\theta_2$	S	DFE	$I_{(EOP=0,95)}$	95% CI	
	0,0444	1,19	0,0692	16	<b>1,9 měsíce</b>	0,75	2,79



Obr. 56 - grafy PG150CD.

Tab. 38 - analýza PY150CD.

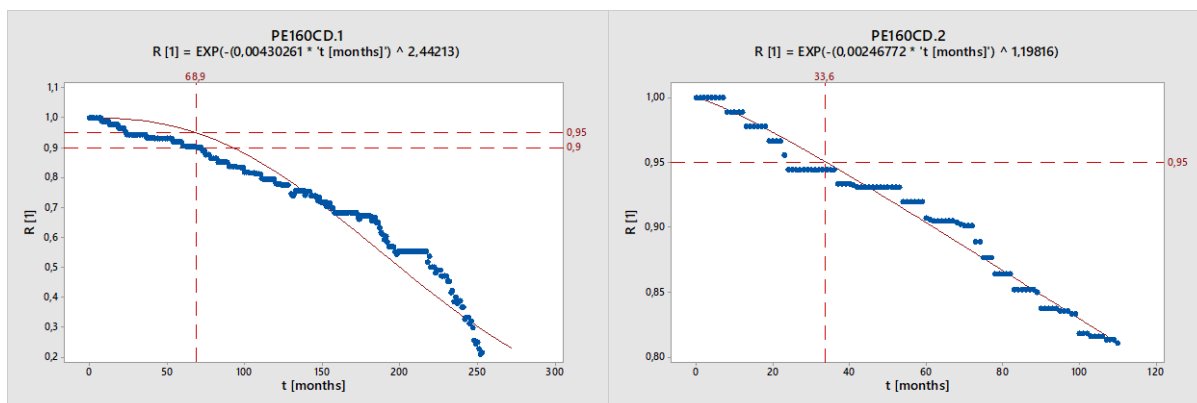
PY150CD.2	Druh	Výrobce	Typ	Rozsah	Třída	Velikost	Cut-Off
	112.12	Yves	POS DI 0,01	0-150 mm	CD	42	0,8
$W_{2p}$	$\theta_1$	$\theta_2$	S	DFE	$I^{(EOP=0,95)}$	95% CI	
	0,0122	2,24	0,0649	68	<b>1,8 roku</b>	1,51	2,03



Obr. 57 - grafy PY150CD.

Tab. 39 - analýza PE160CD.

PE160CD.2	Druh	Výrobce	Typ	Rozsah	Třída	Velikost	Cut-Off
	112.12	Edmond	POS DI 0,01	0-160 mm	CD	98	0,8
$W_{2p}$	$\theta_1$	$\theta_2$	S	DFE	$I^{(EOP=0,95)}$	95% CI	
	0,0025	1,20	0,0086	108	<b>2,8 roku</b>	2,72	2,93

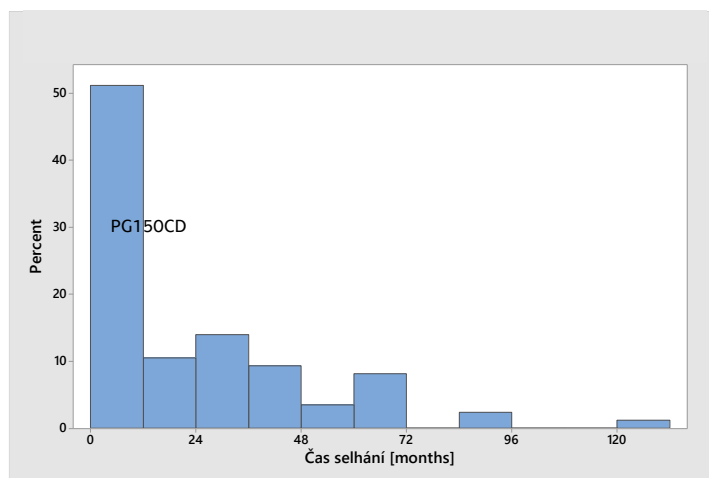


Obr. 58 - grafy PE160CD.

Digitální posuvná měřidla od výrobců Leo, Yves a Edmond se vyznačují relativně srovnatelnou spolehlivostí a lze jim přiřadit optimální kalibrační interval v rozsahu 2-3 roky.

Měřidla od výrobce Gaston zaváděná některými útvary v poslední době se ukázala jako výrazně nespolehlivá. Pro dosažení 95% cílové spolehlivosti by bylo nutné snížit kalibrační interval ze současného 1 roku na 2 měsíce. Bližší analýzu ekonomických a technických dopadů lze najít v kap. 7.

Nízkou spolehlivost lze ilustrovat i na histogramu časů selhání (Obr. 59). U zhruba 50 % měřidel, u kterých došlo během jejich používání k provedení kalibrace s nevyhovujícím výsledkem, se tak stalo již během prvního roku používání.



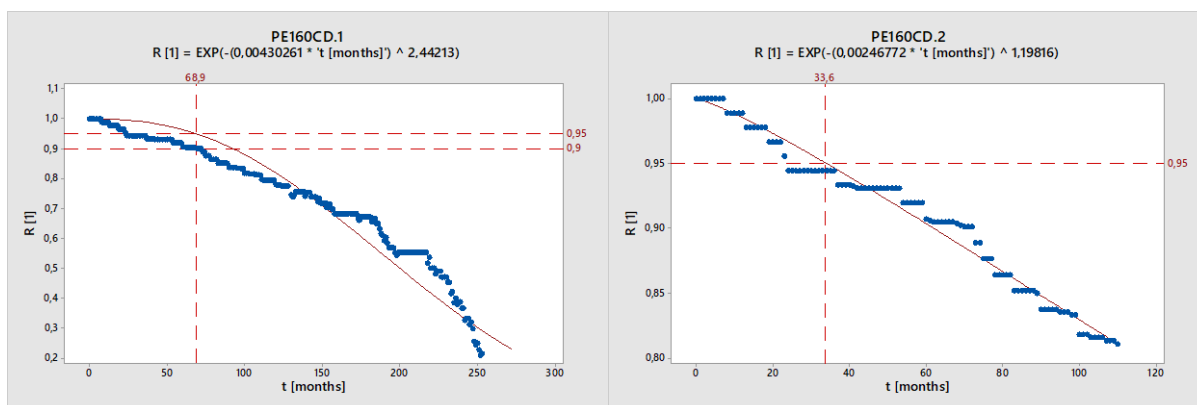
Obr. 59 - histogram časů selhání PG150CD.

### 6.2.3 Vliv rozsahu měřidla

Byla vyhodnocena spolehlivost digitálních posuvných měřidel stejné modelové řady rozsahů 0-160 mm, 0-200 mm a 0-300 mm od výrobce Edmond.

Tab. 40 - analýza PE160CD.

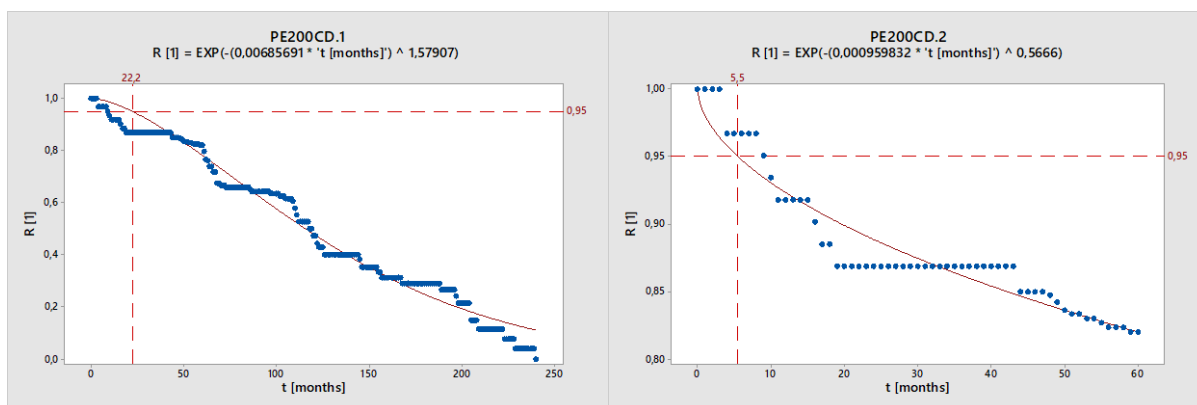
PE160CD.2	Druh	Výrobce	Typ	Rozsah	Třída	Velikost	Cut-Off
	112.12	Edmond	POS DI 0,01	0-160 mm	CD	98	0,8
$W_{2p}$	$\theta_1$	$\theta_2$	S	DFE	$I^{(EOP=0,95)}$	95% CI	
	0,0025	1,20	0,0086	108	<b>2,8 roku</b>	2,72	2,93



Obr. 60 - grafy PE160CD.

Tab. 41 - analýza PE200CD.

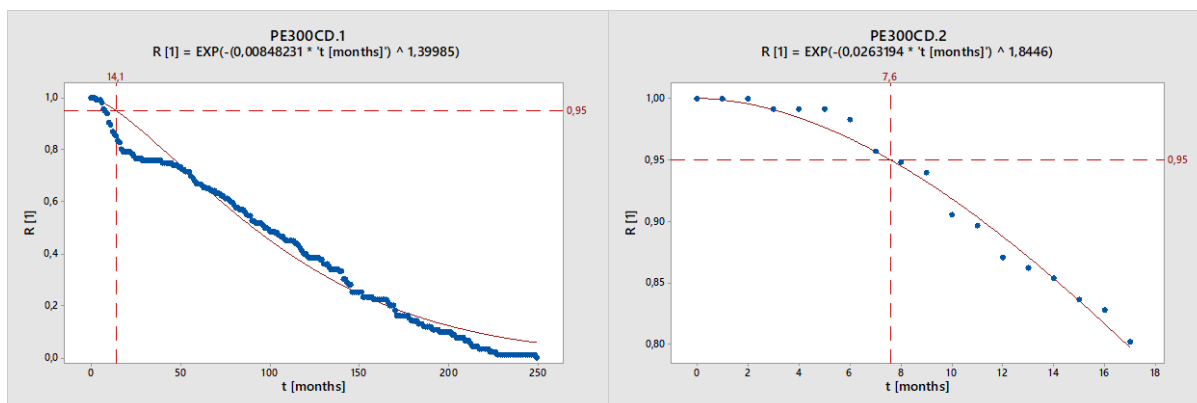
PE200CD.2	Druh	Výrobce	Typ	Rozsah	Třída	Velikost	Cut-Off
		112.12	Edmond	POS DI 0,01	0-200 mm	CD	62
W <sub>2p</sub>	θ <sub>1</sub>	θ <sub>2</sub>	S	DFE	I <sub>1</sub> (EOP=0,95)	95% CI	
	0,0010	0,57	0,0150	58	<b>5,5 měsíce</b>	4,55	6,85



Obr. 61 - grafy PE200CD.

Tab. 42 - analýza PE300CD.

PE300CD.2	Druh	Výrobce	Typ	Rozsah	Třída	Velikost	Cut-Off
		112.12	Edmond	POS DI 0,01	0-300 mm	CD	147
W <sub>2p</sub>	θ <sub>1</sub>	θ <sub>2</sub>	S	DFE	I <sub>1</sub> (EOP=0,95)	95% CI	
	0,0263	1,84	0,0094	14	<b>7,6 měsíce</b>	6,95	8,03



Obr. 62 - grafy PE300CD.

Vliv rozsahu na spolehlivost měřidla nebyl ani v tomto případě definován. Měřidlo nejmenšího rozsahu se jeví jako nejspolehlivější (optimální kalibrační interval 3 roky), optimální kalibrační intervaly větších měřidel se pohybují v řádech měsíců.

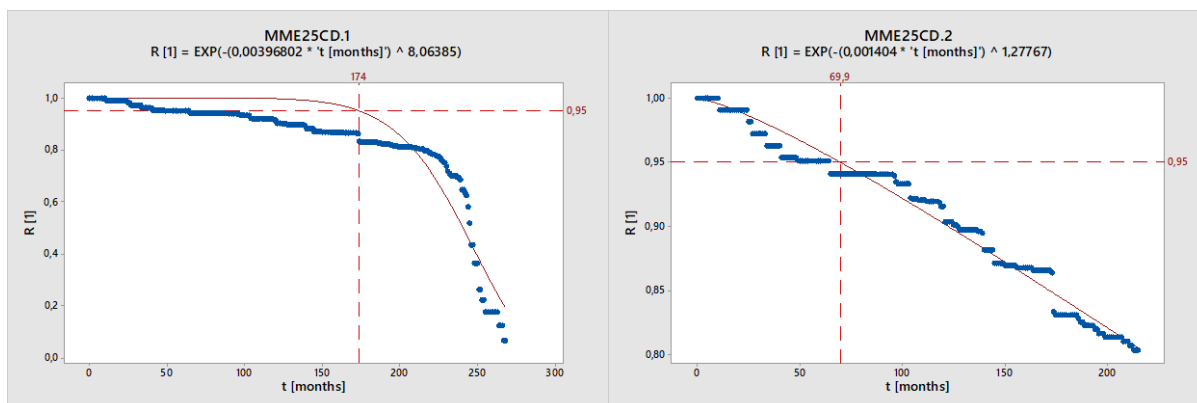
## 6.3 Mikrometr mechanický

### 6.3.1 Vliv rozsahu měřidla

V případě mechanických mikrometrů byla z důvodu omezené dostupnosti dat provedeno pouze srovnání spolehlivosti měřidel od výrobce Edmond v rozsazích 0-25 mm, 50-75 mm a 100-125 mm používaných v dílenském prostředí.

Tab. 43 - analýza MME25CD.

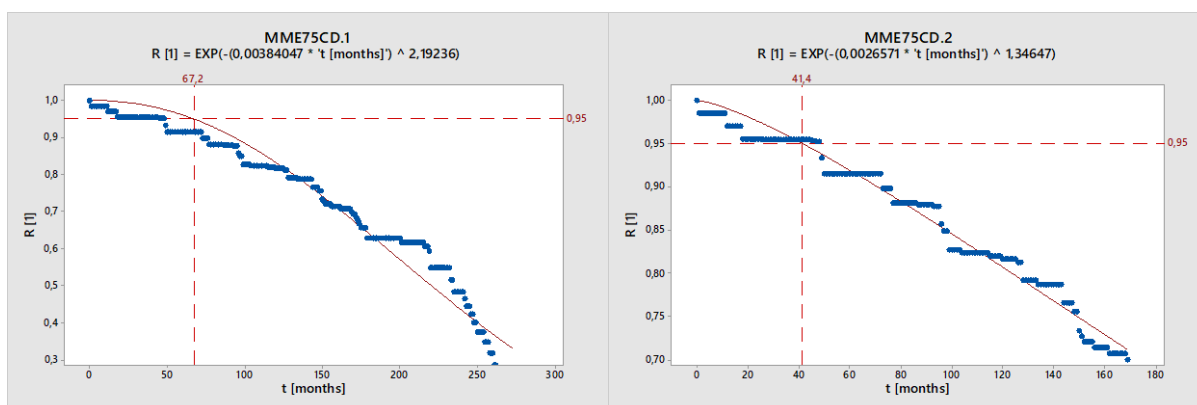
MME25CD.2	Druh	Výrobce	Typ	Rozsah	Třída	Velikost	Cut-Off
	112.11	Edmond	MIK ME 0,01	0-25 mm	CD	109	0,8
$W_{2p}$	$\theta_1$	$\theta_2$	S	DFE	$I_{(EOP=0,95)}$	95% CI	
	0,0014	1,28	0,0090	213	<b>5,8 roku</b>	5,67	5,97



Obr. 63 - grafy MME25CD.

Tab. 44 - analýza MME75CD.

MME75CD.2	Druh	Výrobce	Typ	Rozsah	Třída	Velikost	Cut-Off
	112.11	Edmond	MIK ME 0,01	50-75 mm	CD	69	0,8
$W_{2p}$	$\theta_1$	$\theta_2$	S	DFE	$I_{(EOP=0,95)}$	95% CI	
	0,0027	1,35	0,0133	167	<b>3,5 roku</b>	3,31	3,58

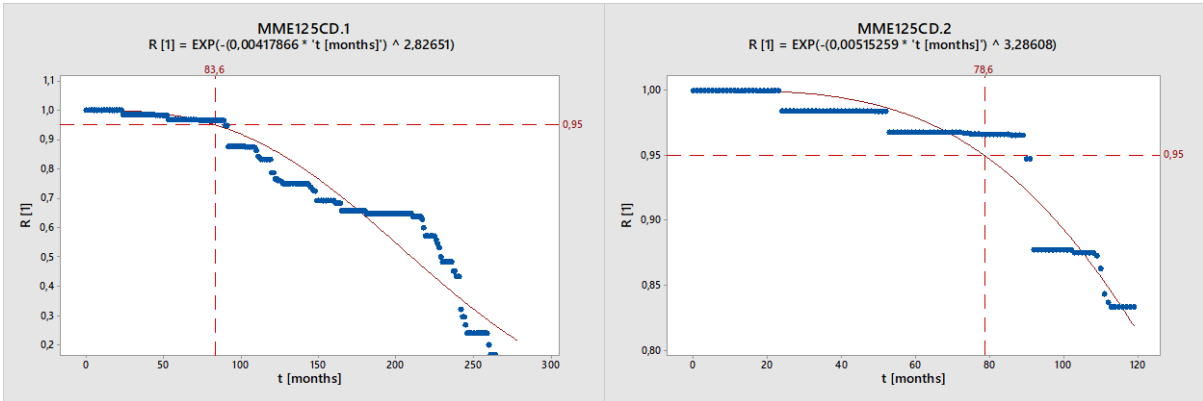


Obr. 64 - grafy MME75CD.



Tab. 45 - analýza MME125CD.

MME125CD.2	Druh	Výrobce	Typ	Rozsah	Třída	Velikost	Cut-Off
	112.11	Edmond	MIK ME 0,01	100-125 mm	CD	65	0,8
$W_{2p}$	$\theta_1$	$\theta_2$	S	DFE	$I_{(EOP=0,95)}$	95% CI	
	0,0052	3,29	0,0149	117	<b>6,6 roku</b>	6,36	6,67



Obr. 65 – grafy MME125CD.

V případě mechanických mikrometrů lze najít podobu s mechanickými posuvnými měřítky. Jako nejspolehlivější se jeví znovu největší měřidlo.

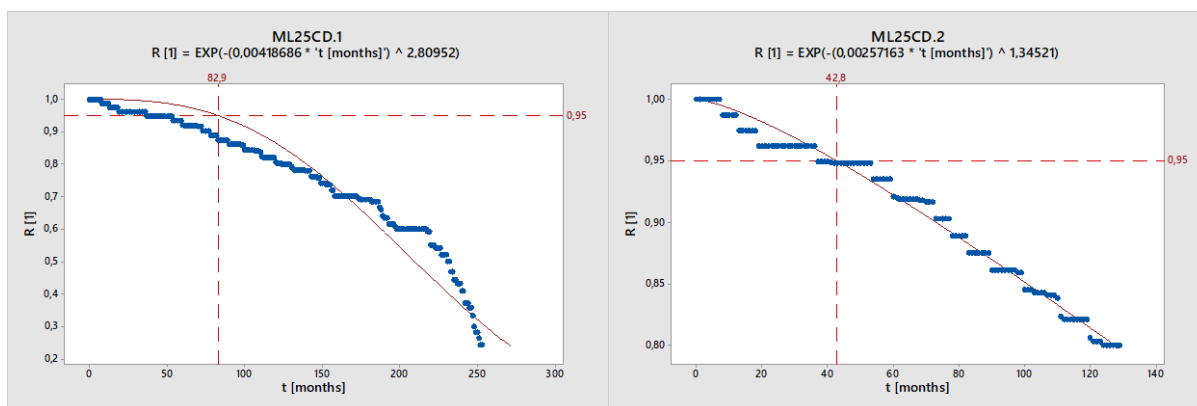
## 6.4 Mikrometr digitální

### 6.4.1 Vliv rozsahu měřidla

Byla porovnána spolehlivost digitálních mikrometrů od výrobce Leo s rozsahy 0-25 mm a 50-75 mm používaných v dílenském prostředí.

Tab. 46 - analýza ML25CD.

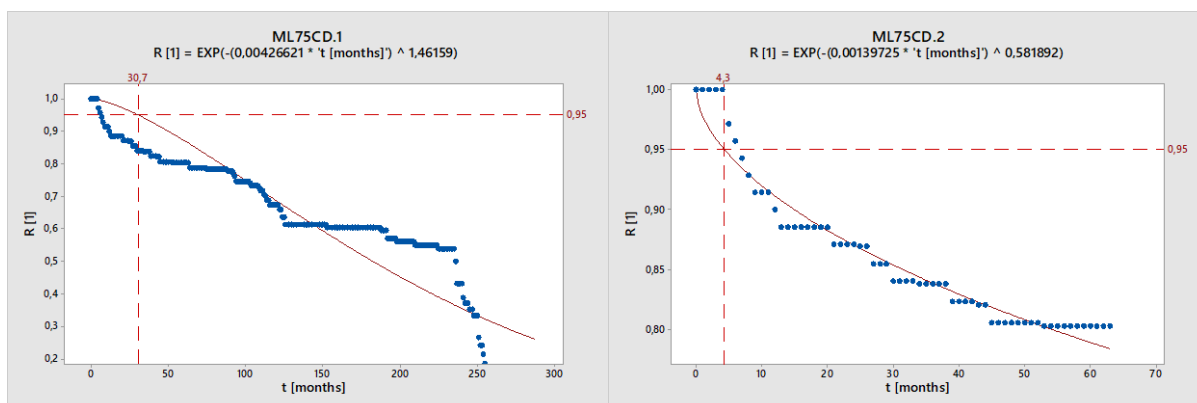
ML25CD.2	Druh	Výrobce	Typ	Rozsah	Třída	Velikost	Cut-Off
	112.32	Leo	MIK DI 0,001	0-25 mm	CD	79	0,8
$W_{2p}$	$\theta_1$	$\theta_2$	S	DFE	$I (EOP=0,95)$	95% CI	
	0,0026	1,35	0,0075	127	<b>3,5 roku</b>	3,47	3,65



Obr. 66 - grafy ML25CD.

Tab. 47 - analýza ML75CD.

ML75CD.2	Druh	Výrobce	Typ	Rozsah	Třída	Velikost	Cut-Off
	112.32	Leo	MIK DI 0,001	50-75 mm	CD	57	0,8
$W_{2p}$	$\theta_1$	$\theta_2$	S	DFE	$I (EOP=0,95)$	95% CI	
	0,0014	0,58	0,0131	61	<b>4,4 měsíce</b>	3,62	5,17



Obr. 67 - grafy ML75CD.

V případě digitálních mikrometrů lze najít podobu s digitálními posuvnými měřítky. Jako nejspolehlivější se jeví měřidlo s nejmenším rozsahem, optimální kalibrační lhůta většího měřidla se znovu pohybuje v řádu měsíců.

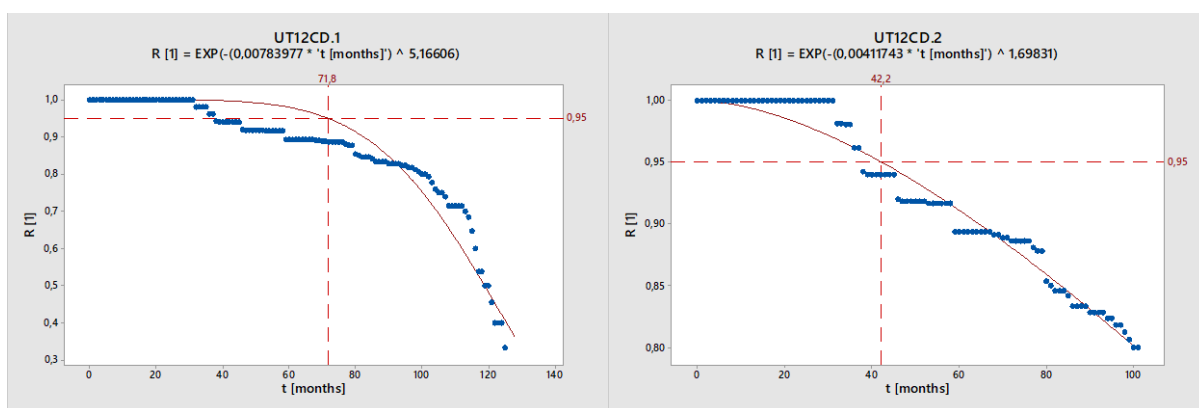
## 6.5 Digitální úchylkoměr

### 6.5.1 Vliv rozlišení měřidla

Porovnány byly digitální úchylkoměry od výrobce Theo s běžným rozsahem 0-12 mm. Měřidla jsou ze stejné modelové řady, liší se jen v rozlišení (0,001 mm, resp. 0,0005 mm).

Tab. 48 - analýza UT12CD.

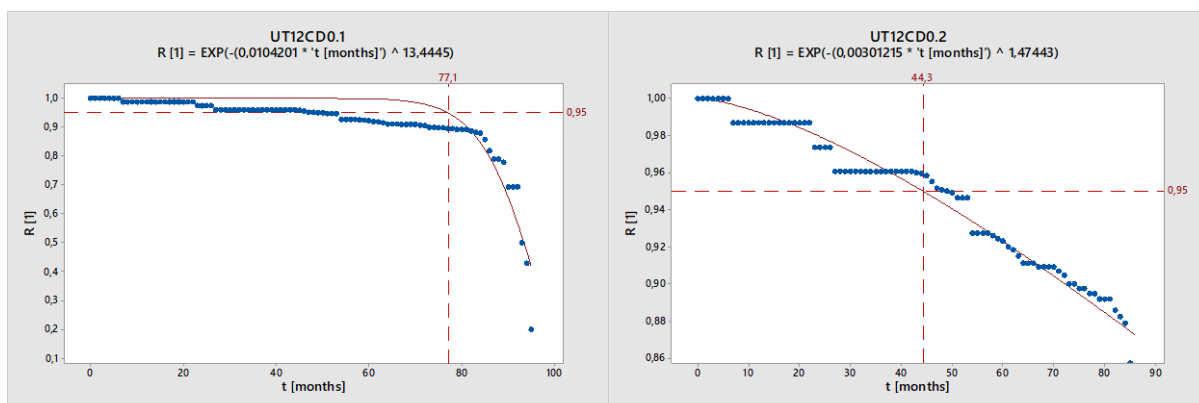
UT12CD.2	Druh	Výrobce	Typ	Rozsah	Třída	Velikost	Cut-Off
	112.54	Theo	Ú DIG 0,001	0-12 mm	CD	63	0,8
$W_{2p}$	$\theta_1$	$\theta_2$	S	DFE	$I_{(EOP=0,95)}$	95% CI	
	0,0041	1,70	0,0121	99	<b>3,5 roku</b>	3,37	3,64



Obr. 68 - grafy UT12CD.

Tab. 49 - analýza UT12CD0.

UT12CD0.2	Druh	Výrobce	Typ	Rozsah	Třída	Velikost	Cut-Off
	112.54	Theo	Ú DIG 0,0005	0-12 mm	CD	76	0,8
$W_{2p}$	$\theta_1$	$\theta_2$	S	DFE	$I_{(EOP=0,95)}$	95% CI	
	0,0030	1,47	0,0086	126	<b>3,7 roku</b>	3,57	3,79



Obr. 69 - grafy UT12CD0.

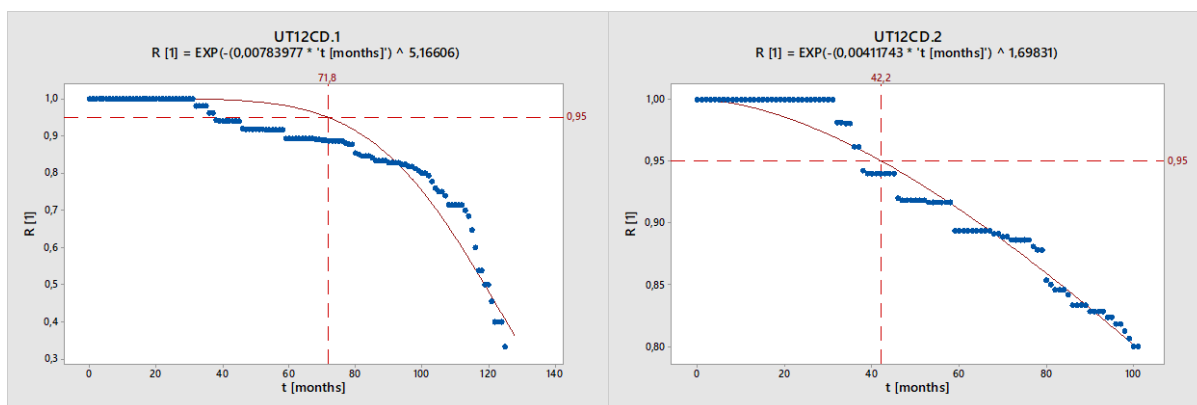
Byl potvrzen předpoklad, že spolehlivost stejných měřidel, lišících se pouze v rozlišení, je shodná. Měřidla jsou stejné konstrukce, liší se pouze v elektronické a softwarové části. Podobu lze pozorovat i ve tvaru průběhu spolehlivosti.

### 6.5.2 Vliv konstrukce měřidla

Srovnány byly digitální úchylkoměry od výrobců Theo a Leo, shodného rozsahu 0-12 mm, používané v dílenském prostředí.

Tab. 50 - analýza UT12CD.

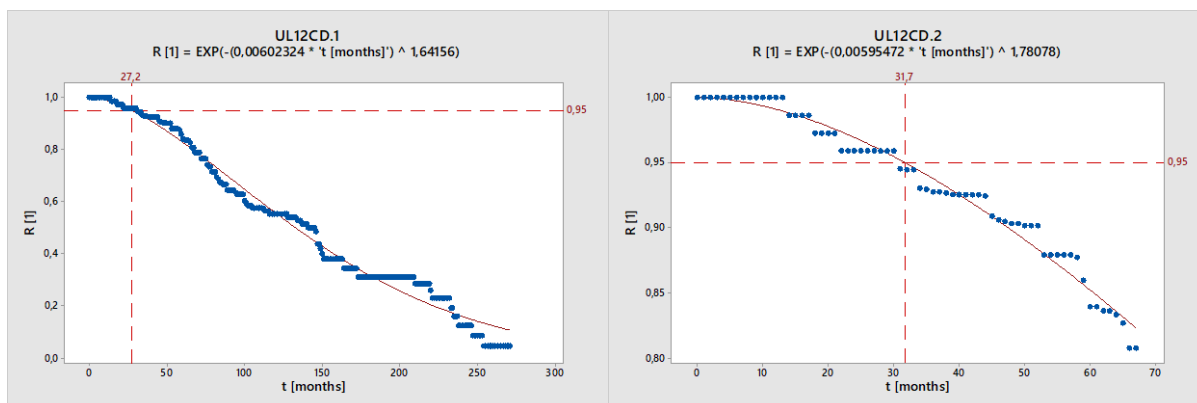
UT12CD.2	Druh	Výrobce	Typ	Rozsah	Třída	Velikost	Cut-Off
	112.54	Theo	Ú DIG 0,001	0-12 mm	CD	63	0,8
$W_{2p}$	$\theta_1$	$\theta_2$	S	DFE	$I^{(EOP=0,95)}$	95% CI	
	0,0041	1,70	0,0121	99	<b>3,5 roku</b>	3,37	3,64



Obr. 70 - grafy UT12CD.

Tab. 51 - analýza UL12CD.

UL12CD.2	Druh	Výrobce	Typ	Rozsah	Třída	Velikost	Cut-Off
	112.54	Leo	Ú DIG 0,001	0-12 mm	CD	75	0,8
$W_{2p}$	$\theta_1$	$\theta_2$	S	DFE	$I^{(EOP=0,95)}$	95% CI	
	0,0056	1,78	0,0082	65	<b>2,6 roku</b>	2,55	2,71



Obr. 71 - grafy UL12CD.

I v tomto případě je patrný rozdíl ve spolehlivosti měřidel od různých výrobců, avšak méně výrazný. Měřidlům od výrobce Theo lze přiřadit optimální kalibrační lhůtu 4 roky, měřidlům od výrobce Leo 3 roky.

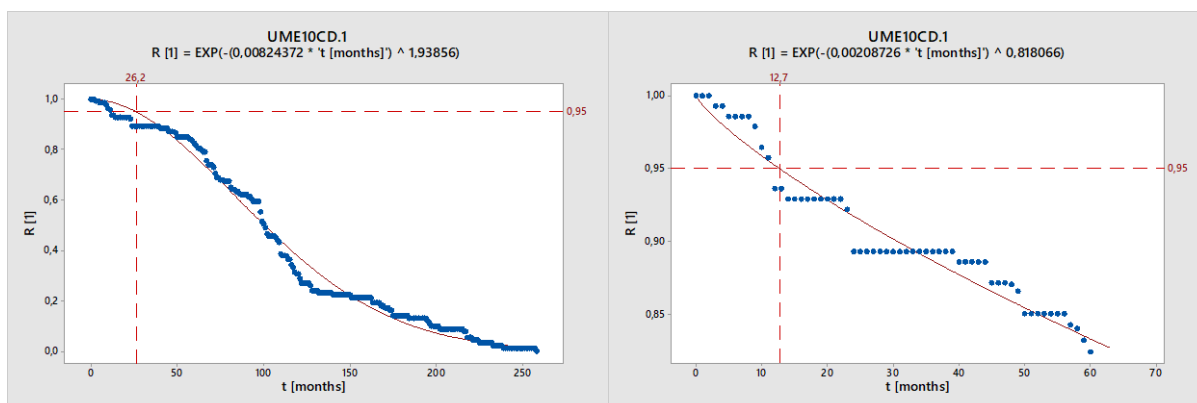
## 6.6 Úchylkoměr mechanický

### 6.6.1 Vliv konstrukce, rozsahu a rozlišení měřidla

Srovnány byly mechanické úchylkoměry od výrobců Edmond (rozsahy 0-10 mm a 0-3 mm), Leo (rozsah 0-2 mm) a Theo (rozsah 0-5 mm).

Tab. 52 - analýza UME12CD.

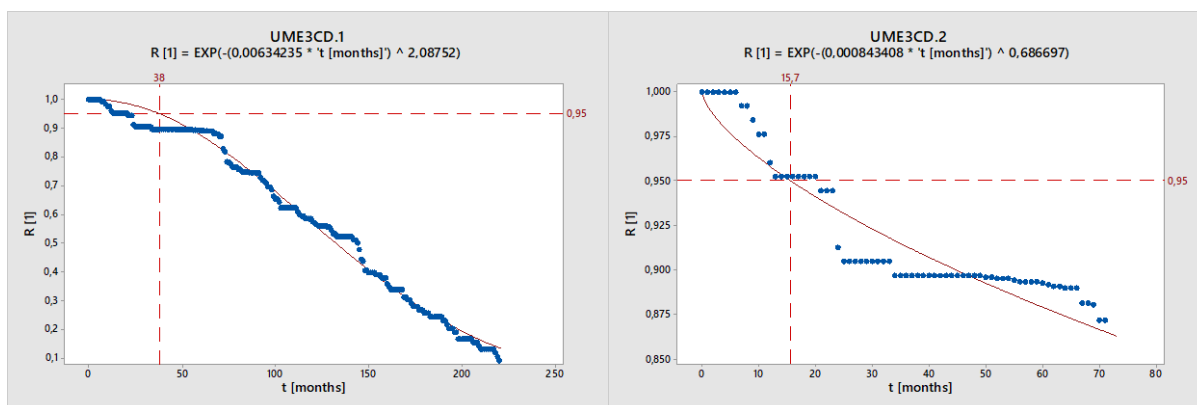
UME10CD.2	Druh	Výrobce	Typ	Rozsah	Třída	Velikost	Cut-Off
	112.52	Edmond	Ú ME 0,01	0-10 mm	CD	141	0,8
$W_{2p}$	$\theta_1$	$\theta_2$	S	DFE	$I$ (EOP=0,95)	95% CI	
	0,0021	0,82	0,0116	61	<b>1,1 roku</b>	0,95	1,17



Obr. 72 - grafy UME10CD.

Tab. 53 - analýza UME3CD.

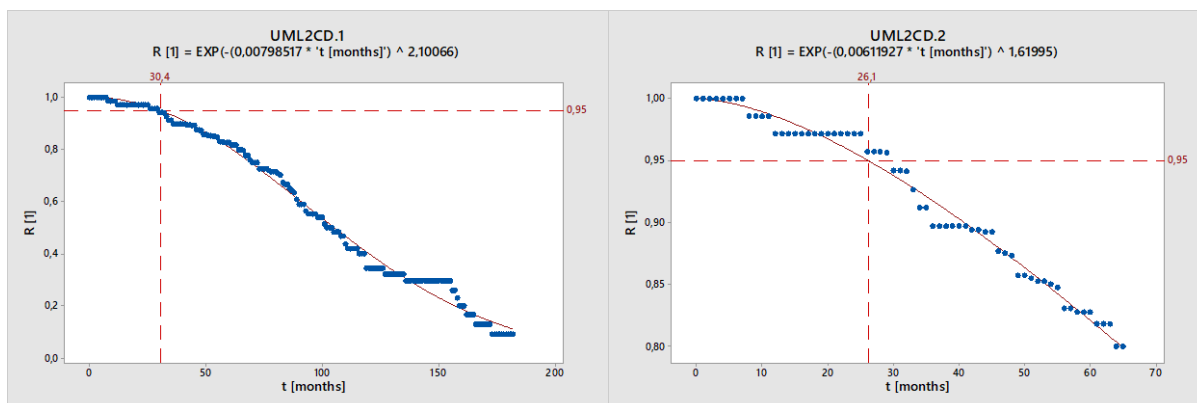
UME3CD.2	Druh	Výrobce	Typ	Rozsah	Třída	Velikost	Cut-Off
		112.52	Edmond	Ú ME 0,01	0-3 mm	CD	126
W <sub>2p</sub>	θ <sub>1</sub>	θ <sub>2</sub>	S	DFE	I (EOP=0,95)	95% CI	
	0,0008	0,69	0,0154	71	<b>1,3 roku</b>	1,19	1,53



Obr. 73 - grafy UME3CD.

Tab. 54 - analýza UML2CD.

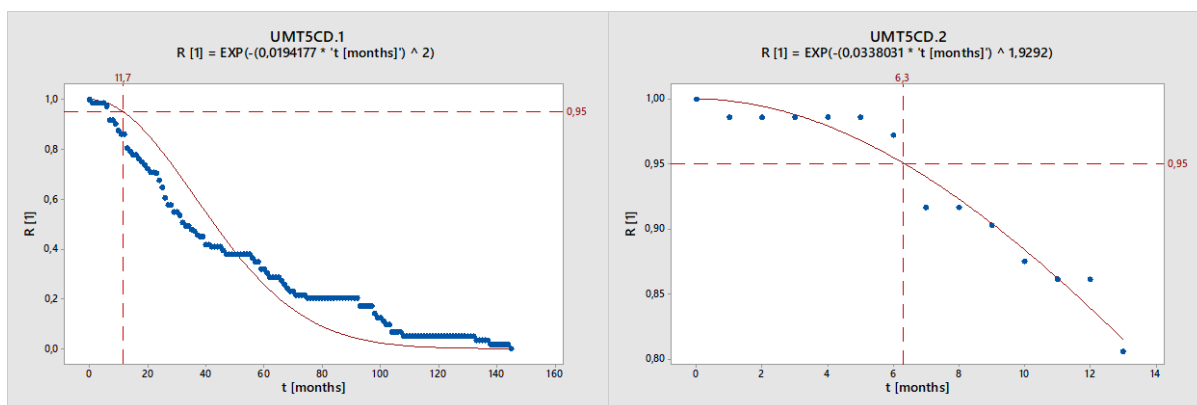
UML2CD.2	Druh	Výrobce	Typ	Rozsah	Třída	Velikost	Cut-Off
		112.53	Leo	Ú ME 0,001	0-2 mm	CD	70
W <sub>2p</sub>	θ <sub>1</sub>	θ <sub>2</sub>	S	DFE	I (EOP=0,95)	95% CI	
	0,0061	1,62	0,0081	63	<b>2,2 roku</b>	2,10	2,24



Obr. 74 - grafy UML2CD.

Tab. 55 - analýza UMT5CD.

UMT5CD.2	Druh	Výrobce	Typ	Rozsah	Třída	Velikost	Cut-Off
	112.53	Theo	Ú ME 0,001	0-5 mm	CD	72	0,8
$W_{2p}$	$\theta_1$	$\theta_2$	S	DFE	$I_{(EOP=0,95)}$	95% CI	
	0,0338	1,93	0,0139	11	<b>6 měsíců</b>	5,38	6,81



Obr. 75 - grafy UMT5CD.

Vzhledem k omezenému množství rozsahů, které jednotliví výrobci nabízejí a omezené dostupnosti dat nelze v tomto případě stanovit vypovídající závěry. Je patrné, že mechanické úchylkoměry od výrobce Edmond mají shodnou spolehlivost pro oba rozsahy (optimální kalibrační interval 1 rok). Spolehlivost měřidel od dalších výrobců se liší.

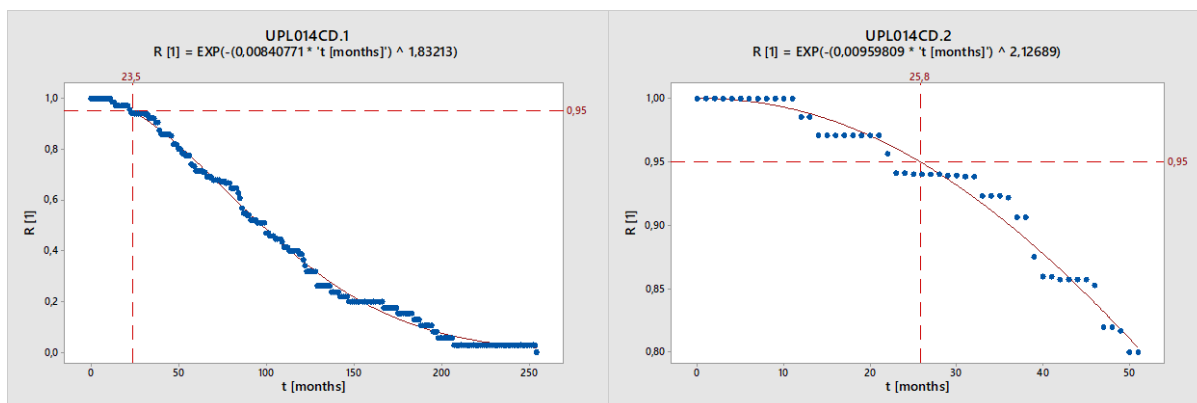
## 6.7 Páčkový úchylkoměr

### 6.7.1 Vliv konstrukce, rozsahu a rozlišení měřidla

Srovnány byly páčkové úchylkoměry rozsahu 0-0,14 mm (výrobce Leo a Theo), rozsahu 0-0,4 mm (výrobce Theo) a rozsahu 0-0,8 mm (výrobce Edmond), všechny používané v dílenském prostředí.

Tab. 56 - analýza UPL014CD.

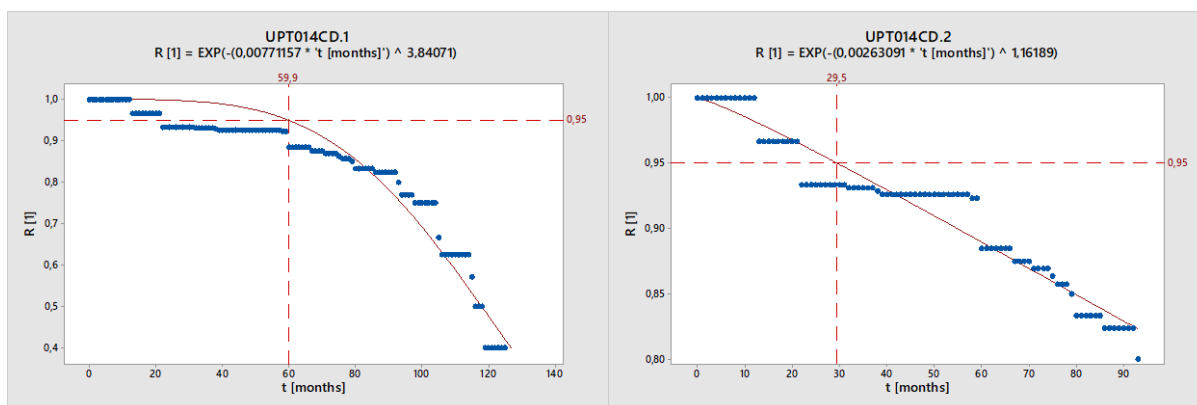
UPL014CD.2	Druh	Výrobce	Typ	Rozsah	Třída	Velikost	Cut-Off
	112.55	Leo	Ú P 0,001	0-0,14 mm	CD		0,8
$W_{2p}$	$\theta_1$	$\theta_2$	S	DFE	$I$ (EOP=0,95)	95% CI	
	0,0096	2,13	0,0099	49	<b>2,1 roku</b>	2,06	2,21



Obr. 76 - grafy UPL014CD.

Tab. 57 - analýza UPT014CD.

UPT014CD.2	Druh	Výrobce	Typ	Rozsah	Třída	Velikost	Cut-Off
	112.55	Theo	Ú P 0,001	0-0,14 mm	CD	30	0,8
$W_{2p}$	$\theta_1$	$\theta_2$	S	DFE	$I$ (EOP=0,95)	95% CI	
	0,0026	1,16	0,0137	91	<b>2,5 roku</b>	2,28	2,61

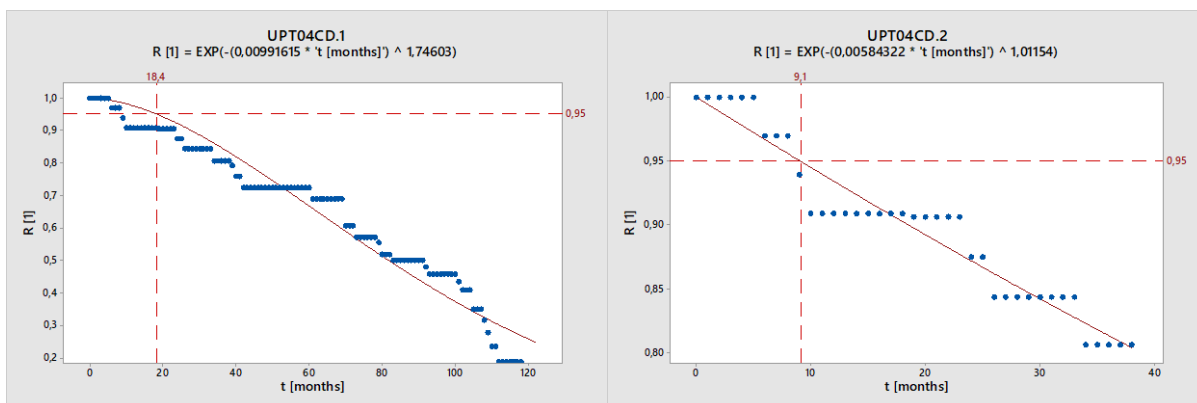


Obr. 77 - grafy UPT014CD.



Tab. 58 - analýza UPT04CD.

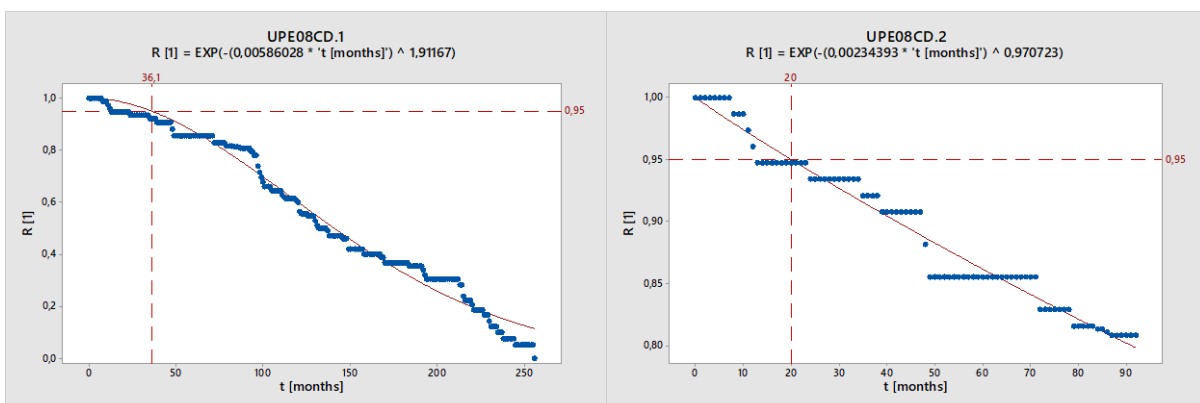
UPT04CD.2	Druh	Výrobce	Typ	Rozsah	Třída	Velikost	Cut-Off
	112.55	Theo	Ú P 0,002	0-0,4 mm	CD	33	0,8
$W_{2p}$	$\theta_1$	$\theta_2$	S	DFE	$I_{(EOP=0,95)}$	95% CI	
	0,0058	1,01	0,0161	36	<b>9,1 měsíce</b>	7,70	10,27



Obr. 78 - grafy UPT04CD.

Tab. 59 - analýza UPE08CD.

UPE08CD.2	Druh	Výrobce	Typ	Rozsah	Třída	Velikost	Cut-Off
	112.55	Edmond	Ú P 0,01	0-0,8 mm	CD	76	0,8
$W_{2p}$	$\theta_1$	$\theta_2$	S	DFE	$I_{(EOP=0,95)}$	95% CI	
	0,0023	0,97	0,0110	90	<b>1,7 roku</b>	1,56	1,77



Obr. 79 - grafy UPE08CD.

Vzhledem k omezenému množství rozsahů, které jednotliví výrobci nabízejí a omezené dostupnosti dat nelze ani v tomto případě stanovit vypovídající závěry. Pro všechny měřidla kromě Theo 0-0,4 mm by bylo možné aplikovat shodnou kalibrační lhůtu v rozmezí 2-3 roky.

## 7 Technicko-ekonomické dopady optimalizace

### kalibračních lhůt

Zhodnocení ekonomicko-technických dopadů praktické aplikace navržených kalibračních intervalů je pro potřeby jakéhokoliv průmyslového podniku klíčové.

Pro přehledné zhodnocení byly vytvořeny tabulky (viz Příloha 1) shrnující všechny provedené analýzy. První část tabulky obsahuje informace základní parametry měřidel v dané analýze.

*Počet aktivních měřidel* určuje počet měřidel, která lze s jistotou zahrnout do dané skupiny a jsou v současné době aktivně používána. Nejsou tak zahrnuta měřidla ztracená a vyřazená, která byla v samotné matematické analýze obsažena.

*Aktuálně nastavený průměrný kalibrační interval* popisuje aktuální stav nastavení kalibračních lhůt v rámci dané skupiny. Vzhledem k tomu, že nastavené kalibrační lhůty se v rámci skupiny liší, byl pro popis využit vážený průměr.

*Optimální kalibrační interval* je kalibrační interval získaný z matematické analýzy, viz kap. 5.2.5.

*Doporučený kalibrační interval* je optimální kalibrační interval zaokrouhlený nahoru a dolů.

*Změna nákladů na kalibrace* určuje procentuální změnu nákladů, pokud by byl přiřazen optimální kalibrační interval všem měřidlům ve skupině. Výpočet je založen na skutečně nastavených kalibračních intervalech.

*Cena kalibrace* je přibližná cena za provedení jedné kalibrace daného měřidla. Z důvodu zachování obchodního tajemství nejsou uvedeny skutečné interní ceny, ale vychází se z obvyklých cen externích akreditovaných kalibračních laboratoří. Souhrn ročních nákladů na kalibrace pro všechna měřidla v dané skupině určuje *Současná cena kalibrace za rok*. Roční náklady na kalibrace v případě aplikace doporučených kalibračních intervalů jsou patrné v sloupci *Optimalizovaná cena kalibrace za rok*.

*Současná spolehlivost  $R$*  je odečtená z grafu průběhu spolehlivosti v čase na základě aktuálně nastaveného kalibračního intervalu. *Spolehlivost  $R$  pro optimalizovaný kalibrační interval* a *Spolehlivost  $R$  pro doporučený kalibrační interval* jsou skutečné spolehlivosti po aplikaci příslušných kalibračních intervalů. Změnu spolehlivosti při aplikaci doporučeného kalibračního intervalu v porovnání se současnou spolehlivostí určuje *Změna spolehlivosti  $R$* .

Vzhledem k tomu, že optimální kalibrační intervaly jsou stanoveny na jedno desetinné místo, což není z praktických důvodů vhodné, je třeba hodnotu vhodně zaokrouhlit. Obecně platí, že

volba delšího kalibračního intervalu znamená nižší náklady na kalibrace, ale zároveň nižší spolehlivost (v rámci této práce označováno jako *ekonomická varianta*). Volba kratšího kalibračního intervalu naopak znamená vyšší náklady na kalibrace, vyšší je ale i spolehlivost (označováno jako *technická varianta*). Další možností je „*střední varianta*“, tedy zaokrouhlení optimálních kalibračních intervalů dle běžných pravidel zaokrouhlování. Rozhodnutí o způsobu zaokrouhlení je tedy vhodné ponechat na majiteli měřidla, který určí, zda je pro něj důležitější ekonomické nebo technické hledisko.

Aktuálně nastavené kalibrační intervaly posuvných měřidel se z globálního pohledu ukázaly jako příliš dlouhé, což má za důsledek zvýšení nákladů na kalibrace ve všech variantách. V případě aplikace technické varianty by došlo k nárůstu nákladů o 105 %, spolehlivost by se ale zvýšila o 12 % ze současných 84 %. Volba ekonomické varianty by znamenala mírnější nárůst nákladů o 25 % a nárůst spolehlivosti pouze o 5 %.

Kalibrační lhůty mikrometrů jsou obecně nastaveny nadměrně krátké a u většiny analyzovaných skupin měřidel je lze prodloužit. Při aplikaci delších kalibračních intervalů dle ekonomické varianty by bylo možné dosáhnout úspory nákladů cca 17 % při zachování průměrné spolehlivosti 94 %, která může být dostatečná. Technická a střední varianta jsou spojeny s nárůstem nákladů o 35 %, resp. 23 % a nárůstem spolehlivosti na 97 %, resp. 96 %. Takto mírný nárůst spolehlivosti, navíc na hodnoty přesahující požadovanou cílovou spolehlivost 95 % a spojený s relativně významným nárůstem nákladů, nemusí být v běžných podmínkách provozu měřidel odůvodnitelný.

Podobně jako u mikrometrů, tak i kalibrační lhůty úchylkoměrů jsou celkově nastaveny příliš krátké. Lze provést optimalizaci spojenou s poklesem nákladů, a to zejména u digitálních úchylkoměrů. V případě volby ekonomické varianty lze v rámci kompletní skupiny měřidel dosáhnout úspory nákladů ve výši 41 % spojené s poklesem průměrné spolehlivosti o 1 % na konečných 92 %. Střední varianta přináší rovněž úsporu, i když nižší, ve výši 9 %. Průměrná spolehlivost však naroste o 2 % na konečných 95 %. Technická varianta v tomto případě nemá příliš velký smysl – znamená růst nákladů a spolehlivost se v porovnání se střední variantou zvýší pouze o 1 %.

Pokud by byly nastaveny kalibrační lhůty všech příslušných měřidel dle závěrů výzkumu, lze v případě ekonomické varianty dosáhnout celkové úspory nákladů na kalibrace ve výši 18 %, což může být dle odhadů v absolutních číslech více než 100 000 Kč za rok. Průměrná spolehlivost by vzrostla ze současných 84 % na 93 %, což lze obecně považovat za přijatelnou

úroveň spolehlivosti. Technická a střední varianta se z globálního pohledu nejeví jako smysluplná. V obou případech by došlo k nárůstu nákladů o 23 %, resp. 47 % s konečnou úrovní spolehlivosti 95 %, resp. 96 %.

V popisované studii je však zahrnuto pouze cca 3 700 vhodných měřidel. Pokud by tato měřidla byla považována jako reprezentativní vzorek, celková roční úspora nákladů na kalibrace by se v případě provedení optimalizace všech cca 11 000 komunálních měřidel aktuálně používaných ve Škoda Auto mohla na základě hrubého odhadu pohybovat okolo 300 000 Kč.

Jedním z výsledků navržené optimalizace kalibračních intervalů je rovněž identifikace měřidel s výrazně nízkou spolehlivostí v daných podmínkách použití. Jako měřidla s nízkou spolehlivostí lze označit měřidla se stanoveným optimálním kalibračním intervalem kratším než 1 rok. Tato měřidla výrazně ovlivňují celkové závěry studie. Pokud by nebyla uvažována, úspora nákladů při ekonomické variantě by se pohybovala okolo 150 000 Kč za rok.

Ekonomická rozvaha však nezahrnuje jen náklady na samotné provedení kalibrací. Zvýšení spolehlivosti měřidel má za důsledek zvýšení spolehlivosti samotných měřicích procesů. Ve chvíli, kdy je kalibrační lhůta nastavena příliš vysoko, existuje vyšší pravděpodobnost, že měřidlo již ztratilo své metrologické vlastnosti, ale je stále používáno. Výsledky takového měření nemusí být jednotné a správné, což se může promítnout do zvýšených nákladů na nekvalitu. Tím může být odůvodněno zkrácení kalibračních intervalů spojené s nárůstem nákladů na kalibrace a zároveň významným zvýšením spolehlivosti. Kvantifikace ekonomických dopadů je však velmi obtížná.

Dalším parametrem vstupujícím do ekonomické rozvahy jsou nepřímé náklady na kalibrace. Ty zahrnují náklady na personál organizující zajištění kalibrace, dopravu z místa užívání do místa kalibrace a zpět, náklady na pořízení a udržování rezervních měřidel a další. Velikost těchto nákladů bude růst s rostoucí frekvencí kalibrace.

## 8 Závěr

Analýza a optimalizace kalibračních intervalů je v podmínkách průmyslové praxe stále opomíjenou problematikou. V rámci diplomové práce byla navržena komplexní metodika pro optimalizaci kalibračních intervalů komunálních měřidel.

V první fázi procesu je třeba vybrat vhodná měřidla pro provedení analýzy. Analyzovaný vzorek měřidel by měl být co nejvíce homogenní – měřidla by se neměla výrazně lišit jak z hlediska konstrukce, tak podmínek použití. Charakterizování podmínek použití je vlivem velkého množství ovlivňujících parametrů složité. Z toho důvodu byla vytvořena metodika pro zařazování měřidel do tříd použití dle prostředí použití, kvalifikace uživatelů a počtu uživatelů. Na základě statistické analýzy bylo stanoveno, že optimální minimální počet měřidel v analyzované skupině je 80. Toho však nelze ve všech případech dosáhnout. V takových případech je třeba počítat s méně přesnými výsledky.

Kalibrační historii jednotlivých měřidel ve skupině, tedy časy provedení kalibrací a jejich příslušné výsledky, je nutno připravit pro matematickou analýzu. V současné chvíli je tento krok výrazně časově nejnáročnější částí. Pro zajištění maximální možné míry automatizace bylo vytvořeno makro v Excelu. Uživatel zadá veškerá potřebná data do formuláře a makro zpracuje data do podoby vhodné pro vykreslení průběhu spolehlivosti v čase. Data jsou následně importována do software provádějící matematickou analýzu. Jako vhodný se ukázal statistický software Minitab. Pomocí nelineární regrese je průběh proložen křivkou Weibullova rozdělení a iteračně stanoveny jeho parametry. Ty jsou poté využity pro stanovení optimálního kalibračního intervalu, který leží v průsečíku regresní křivky a požadované cílové spolehlivosti. Ukázalo se, že pro získání přesnějších výsledků je vhodné využívat jen část křivky spolehlivosti.

Navržená metodika byla testována na vybraných skupinách nejpoužívanějších komunálních měřidel ve Škoda Auto. Jde o posuvná měřidla, mikrometry (v obou případech mechanické i digitální) a úchylkoměry (mechanické, digitální a páčkové). Bylo prokázáno, že měřidla používaná v laboratorním prostředí jsou spolehlivější v porovnání s měřidly používanými v prostředí dílenském. Spolehlivost měřidel v rámci jednotlivých druhů se může výrazně lišit na základě konstrukčního řešení (charakterizováno značkou a typem měřidla) i rozsahu. Podoba závislosti spolehlivosti měřidla na jeho rozsahu však prokázána nebyla. Zvyk metrologů v průmyslové praxi nastavovat univerzální kalibrační interval pro širokou skupinu měřidel různých výrobců, rozsahů, podmínek použití nebo dokonce i druhů není tedy vhodný.

Zavedení metodiky pro optimalizaci kalibračních intervalů a její využívání tak může průmyslovému podniku přinést následující benefity:

- snížení nákladů na kalibrace,
- celkové zvýšení spolehlivosti měřidel, potažmo snížení nákladů na nekvalitu vyvolaných nesprávným měřením,
- identifikace výrazně nespolehlivých měřidel – informace užitečná při nákupu měřidel nebo návrhu procesů měření.

Zde je důležité zmínit poznatek, že neplatí přímá úměrnost mezi prodejní cenou měřidla a jeho spolehlivostí. Identifikována byla některá měřidla spadající do stejné cenové kategorie, avšak s velmi výrazně lišící se spolehlivostí, potažmo optimální kalibrační lhůtou.

Možnosti dalšího rozvoje problematiky jsou významné, avšak v současné fázi výzkumu limitované nízkou efektivitou způsobenou rutinní prací při přípravě datasetů. Dalším krokem tak musí nezbytně být ověření možnosti hromadného exportu kalibrační historie ze systému Palstat CAQ. Do dokladů nově zaváděných měřidel v systému Palstat CAQ by rovněž bylo vhodné přidat atribut, kterým by majitel měřidla charakterizoval podmínky použití měřidla. To umožní efektivnější výběr pro analýzu vhodných měřidel. Efekt tohoto opatření by se však výrazněji projevil až za delší dobu. Po zefektivnění metodiky by tak bylo možné rychle vytvořit velké množství datasetů a tím spolehlivěji prokázat zde publikované závěry, případně je i rozšířit.

V rámci této práce byla vytvořena metodika vhodná pro nejpočetnější skupiny měřidel. Provozováno je však i významné množství méně běžných měřidel, v kategorii komunálních měřidel jde např. o hloubkoměry nebo dutinoměry. V případě těchto měřidel ve většině případů nelze vytvořit pro spolehlivou analýzu dostatečně širokou skupinu vzorků. V plánu je tedy vytvořit metodiku vhodně upravenou pro optimalizaci kalibračních intervalů těchto měřidel. Početnou skupinou jsou i mezní měřidla typu kalibry nebo koncové měřky, specifické výraznějšími projevy mechanismů opotřebení.

Autor navrhuje následující možnosti využití výsledků v praxi.

1. Vytvoření databáze běžně používaných měřidel v systému Palstat CAQ. Na základě uživatelem vyplněných údajů v kartě měřidla (druh, výrobce, typ, rozsah, podmínky použití) systém doporučí optimální kalibrační lhůtu.

2. Analýza kalibračních intervalů jako služba úseku metrologie. Oddělení je osloveno s požadavkem na optimalizaci kalibračních intervalů u určité skupiny měřidel dle konkrétního zadání. To je vhodné zejména pro útvary vlastníci velké množství podobných měřidel (např. výdejny).
3. Vytvoření katalogu měřidel s charakteristikou jejich spolehlivosti. Ten může sloužit jako podklad pro osoby zodpovědné za nákup měřidel nebo návrh procesů měření. Zde je vhodné dávat do kontrastu spolehlivost s prodejní cenou.

Nejvyšší dosažitelnou úrovní systému optimalizace je autonomně fungující systém s prvky strojového učení, provádějící optimalizaci kalibračních intervalů automaticky.

Závěrem lze konstatovat, že cíle diplomové práce byly splněny v celém rozsahu. Práce přináší nové poznatky do doposud nepříliš řešené oblasti, a to zejména z praktické stránky věci. Bylo prokázáno, že implementace metodiky pro optimalizaci kalibračních intervalů může být pro průmyslový podnik výhodná. Nutno však podotknout, že metodika je navržena pro potřeby společnosti typu Škoda Auto, která je v podmínkách českého průmyslového prostředí svou velikostí, a tedy i velikostí inventáře měřidel, unikátní. Nelze tedy tvrdit, že je metodika univerzálně aplikovatelná. Problematika nabízí široké možnosti dalšího výzkumu, kterým se autor hodlá zabývat i v další fázi akademické i profesní kariéry.

# Bibliografie

- [1] *Metrologie v kostce*. ÚNMZ. Praha, 2009. Dostupné také z:  
[https://www.unmz.cz/sborniky\\_th/sb2009/MvK\\_7\\_vidit\\_hypervazby\\_small.pdf](https://www.unmz.cz/sborniky_th/sb2009/MvK_7_vidit_hypervazby_small.pdf)
- [2] *ISO/IEC GUIDE 99: International vocabulary of metrology*. 2007.
- [3] Zákon č. 505/1990 Sb. Zákon o metrologii. In: *Zákony pro lidi* [online]. 1990 [cit. 2023-07-08]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1990-505>
- [4] Komentovaný zákon o metrologii. In: *ČMI* [online]. [cit. 2023-07-08]. Dostupné z:  
<https://www.cmi.cz/komentovany%20zakon%20o%20metrologii>
- [5] Vyhláška č. 345/2002 Sb. Vyhláška Ministerstva průmyslu a obchodu, kterou se stanoví měřidla k povinnému ověřování a měřidla podléhající schválení typu. In: *Zákony pro lidi* [online]. [cit. 2023-07-08]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2002-345>
- [6] *ČSN EN ISO 9001:2015: Systémy managementu kvality - Požadavky*. 2015.
- [7] CASTRUP, Howard. Calibration Intervals from Variables Data. In: *Integrated Sciences Group* [online]. Bakersfield, CA, USA, 2017 [cit. 2023-07-08]. Dostupné z:  
[http://www.isgmax.com/Articles\\_Papers/Calibration%20Intervals%20from%20Variable%20Data.pdf](http://www.isgmax.com/Articles_Papers/Calibration%20Intervals%20from%20Variable%20Data.pdf)
- [8] *Establishment and Adjustment of Calibration Intervals: Recommended Practice RP-1*. NCSL International. Boulder, CO, USA, 2010.
- [9] *NASA Handbook NHB 5300.4(1A): Metrology and Calibration Provisions Guidelines*. 1990.
- [10] IntervalMax 2.0. In: *Integrated Sciences Group* [online]. [cit. 2023-07-08]. Dostupné z:  
[http://www.isgmax.com/imax\\_product.htm](http://www.isgmax.com/imax_product.htm)
- [11] NACHLAS, Joel. *Reliability Engineering: Probabilistic Models and Maintenance Methods*. 2. Boca Raton, FL, USA: Taylor & Francis Group, LLC, 2017. ISBN 978-1-4987-5247-3.
- [12] BIROLINI, Alessandro. *Reliability Engineering: Theory and Practice*. 5. Berlín: Springer, 2007. ISBN 978-3-540-49388-4.
- [13] BETHEA, Robert, Benjamin DURAN a Thomas BOULLION. *Statistical Methods for Engineers and Scientists*. 3. New York, USA: Marcel Dekker, INC., 1995. ISBN 0-8247-9335-8.



- [14] LANGOVÁ, Kateřina. *Analýza přežívání - vytěžování informací z cenzorovaných dat* [online]. Olomouc, 2008 [cit. 2023-07-08]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/wv2jln/94165-138711557.pdf>. Dizertační práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Lékařská fakulta.
- [15] REID, Matthew. What is censored data. In: *Reliability* [online]. [cit. 2023-07-08]. Dostupné z: <https://reliability.readthedocs.io/en/latest/What%20is%20censored%20data.html>
- [16] RUCKSTUHL, Andreas. *Introduction to Nonlinear Regression* [online]. In: . ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften [cit. 2023-07-08]. Dostupné z: <https://stat.ethz.ch/~stahel/courses/cheming/nlreg10E.pdf>
- [17] ABRAHAM, Bovas a Johanes LEDORTEL. *Introduction to Regression Modeling*. Belmont, CA, USA: Brooks/Cole, 2006. ISBN 978-0-534-42075-8.
- [18] Confidence Interval. In: *GitHub* [online]. [cit. 2023-07-08]. Dostupné z: [https://nulib.github.io/moderndive\\_book/ismaykimkuyper\\_files/figure-html/N-CIs-1.png](https://nulib.github.io/moderndive_book/ismaykimkuyper_files/figure-html/N-CIs-1.png)
- [19] *Příručka Integrovaného systému řízení Škoda Auto a.s.* Interní dokument. Mladá Boleslav, 2021.
- [20] *Metrologický řád Škoda Auto.* Interní dokument.
- [21] Směrnice pro měřidla 2014/32/EU: Společné aplikace pro komunální měřidla. In: *ÚNMZ* [online]. [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: [https://www.unmz.cz/wp-content/uploads/WELMEC-11.1\\_2020.pdf](https://www.unmz.cz/wp-content/uploads/WELMEC-11.1_2020.pdf)
- [22] *KP 1.1.4 - Posuvná měřidla.* Interní dokument Škoda Auto, 2023.
- [23] *KP 1.1.6 - Mikrometrická měřidla.* Interní dokument Škoda Auto, 2021.
- [24] *Mitutoyo - Katalog měřicích přístrojů.* 2021-2023. Dostupné také z: [http://www.mitutoyo.cz/download\\_file/view/14650](http://www.mitutoyo.cz/download_file/view/14650)
- [25] Mitutoyo - Metrologická příručka. In: *Mitoyo* [online]. [cit. 2023-07-08]. Dostupné z: <http://mitoyo.cz/ke-stazeni/metrologicka-prirucka.pdf>
- [26] *KP 1.1.7 - Úchylkoměry.* Interní dokument Škoda Auto, 2019.
- [27] Kalibrační přístroj I-Checker IC2000. In: *Mitutoyo* [online]. [cit. 2023-07-08]. Dostupné z:

<https://shop.mitutoyo.cz/web/mitutoyo/cs/mitutoyo/1480603020766/index.xhtml;jsessionid=7724C4CD8AA58988C8E7BECBE0614827>

- [28] SCHUETZ, George. Automating the Indicator Calibration Process. In: *Modern Machine Shop* [online]. [cit. 2023-07-08]. Dostupné z: <https://www.mmsonline.com/articles/automating-the-indicator-calibration-process>
- [29] JACKSON, Dennis a Howard CASTRUP. Reliability Analysis Methods for Calibration Intervals: Analysis of Type III Censored Data. In: *ISO Budgets* [online]. [cit. 2023-07-09]. Dostupné z: <https://www.isobudgets.com/pdf/calibration-interval-analysis/reliability-analysis-methods-for-calibration-intervals.pdf>
- [30] Summary table for Nonlinear Regression. In: *Minitab Support* [online]. [cit. 2023-07-09]. Dostupné z: <https://support.minitab.com/en-us/minitab/20/help-and-how-to/statistical-modeling/regression/how-to/nonlinear-regression/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/summary-table/>
- [31] Confidence Intervals. In: *New York University, Stern School of Business* [online]. [cit. 2023-07-09]. Dostupné z: <https://pages.stern.nyu.edu/~gsimon/Pamphlets/ConfidenceIntervalCollection16APR08.pdf>
- [32] *T-test table* [online]. In: . [cit. 2023-07-09]. Dostupné z: <https://cdn1.byjus.com/wp-content/uploads/2020/04/T-table.png>

# Seznam tabulek

Tab. 1 - dělení komunálních měřidel ve Škoda Auto.....	30
Tab. 2 - rozsah provádění vizuální kontroly posuvných měřidel [22].....	35
Tab. 3 - kontrolované rozměry při kalibraci posuvných měřidel [22].....	35
Tab. 4 - dovolené chyby posuvných měřidel [22]. ....	36
Tab. 5 - dovolené chyby třmenových mikrometrů [23]. ....	38
Tab. 6 - rozsah vizuální a funkční kontroly úchylkoměrů [26]. ....	38
Tab. 7 - vyhodnocované parametry při kalibraci úchylkoměru [26].....	40
Tab. 8 - podmínky vyhodnocování charakteristik úchylkoměrů [26]. ....	40
Tab. 9 - mezní hodnoty charakteristik číselník. úchylkoměrů s rozlišením 0,01 mm [26]. ....	41
Tab. 10 - mezní hodnoty charakteristik číselník. úchylkoměrů s rozlišením 0,001 mm [26]. ....	41
Tab. 11 - mezní hodnoty charakteristik páčkových úchylkoměrů s rozlišením 0,01 [26]. ....	41
Tab. 12 - mezní hodnoty charakteristik páčk. úchylkoměrů s rozlišením 0,002 mm [26]. ....	41
Tab. 13 - mezní hodnoty charakteristik digitálních úchylkoměrů Mitutoyo řady ID-SX [26]. ....	42
Tab. 14 - vlivy na spolehlivost měřidel a dostupnost dat. ....	44
Tab. 15 - Usage Score.....	45
Tab. 16 - třídy použití měřidla. ....	46
Tab. 17 - výsledky simulace velikosti skupiny.....	47
Tab. 18 - kalibrační intervaly pro různé parametry $\theta$ . ....	50
Tab. 19 - porovnání výsledků aproximace exponenciálním a Weibullovým rozdělením.....	56
Tab. 20 - srovnání výsledků metod Simple a MLE. ....	57
Tab. 21 - porovnání výsledků G-N a L-M metody.....	61
Tab. 22 - srovnání metod určení času selhání.....	65
Tab. 23 - analýza s Cut-Off = 0. ....	66
Tab. 24 - analýza s Cut-Off = 0,8. ....	66
Tab. 25 - porovnání vypočtených intervalů spolehlivosti parametru $\theta$ .....	68
Tab. 26 - dataset pro validaci metod. ....	69
Tab. 27 - srovnání výsledků matematických metod.....	69
Tab. 28 - význam označení analýzy. ....	71
Tab. 29 - analýza PME160CD .....	72
Tab. 30 - analýza PMA150CD. ....	72
Tab. 31 - analýza PME160CD. ....	73

Tab. 32 – analýza PME250CD.....	73
Tab. 33 - analýza PME400CD. ....	74
Tab. 34 - analýza PL150AB. ....	75
Tab. 35 - analýza PL150CD. ....	75
Tab. 36 - analýza PL150CD. ....	76
Tab. 37 - analýza PG150CD. ....	76
Tab. 38 - analýza PY150CD.....	77
Tab. 39 - analýza PE160CD.....	77
Tab. 40 - analýza PE160CD.....	78
Tab. 41 - analýza PE200CD.....	79
Tab. 42 - analýza PE300CD.....	79
Tab. 43 - analýza MME25CD. ....	80
Tab. 44 - analýza MME75CD. ....	80
Tab. 45 - analýza MME125CD. ....	81
Tab. 46 - analýza ML25CD.....	82
Tab. 47 - analýza ML75CD.....	82
Tab. 48 - analýza UT12CD. ....	83
Tab. 49 - analýza UT12CD0. ....	83
Tab. 50 - analýza UT12CD. ....	84
Tab. 51 - analýza UL12CD.....	84
Tab. 52 - analýza UME12CD.....	85
Tab. 53 - analýza UME3CD.....	86
Tab. 54 - analýza UML2CD. ....	86
Tab. 55 - analýza UMT5CD.....	87
Tab. 56 - analýza UPL014CD.....	88
Tab. 57 - analýza UPT014CD. ....	88
Tab. 58 - analýza UPT04CD. ....	89
Tab. 59 - analýza UPE08CD. ....	89

## Seznam obrázků

Obr. 1 - schéma metrologické návaznosti [1].....	12
Obr. 2 - IntervalMAX 2.0 [10].....	16
Obr. 3 - průběh spolehlivosti v čase [8].....	20
Obr. 4 - vliv parametru $\lambda$ na průběh spolehlivosti.....	21
Obr. 5 - průběh intenzity poruch exponenciálního rozdělení. ....	22
Obr. 6 - porovnání úplných dat, zprava, zleva a intervalově cenzorovaných [15].....	24
Obr. 7 - zastoupení komunálních měřidel v evidenci Škoda Auto vč. neaktivních. ....	31
Obr. 8 - pomůcka pro určení kalibrační lhůty.....	33
Obr. 9 - doporučené kalibrační lhůty dle stupně přesnosti měřidla.....	33
Obr. 10 - princip kontroly rovnoběžnosti měřicích ploch mikrometru [25]. ....	37
Obr. 11 . princip kontroly rovinnosti měřicích ploch mikrometru [25]. ....	37
Obr. 12 - kontrola číselníkového, digitálního a páčkového úchylkoměru [27].....	39
Obr. 13 - chyby úchylkoměru na záznamu odchylek [28]. ....	40
Obr. 14 - výřez z kalibračního protokolu číselníkového úchylkoměru.....	42
Obr. 15 - doklad měřidla v Palstat CAQ.....	43
Obr. 16 - korelační diagram (počet vzorků ve skupině – parametr $\theta$ .....	48
Obr. 17 - vliv počtu vzorků ve skupině na hodnotu parametru $\theta$ .....	48
Obr. 18 - závislost variačního rozpětí parametru $\theta$ na počtu vzorků ve skupině. ....	49
Obr. 19 - boxplot intervalů spolehlivosti odhadů parametru $\theta$ .....	50
Obr. 20 - formulář pro zadávání dat v MS Excel.....	52
Obr. 21 – „kalendář“.....	53
Obr. 22 – „CALC“.....	54
Obr. 23 – Gaston - exponenciální.....	55
Obr. 24 – Leo - exponenciální. ....	55
Obr. 25 - Gaston – Weibull.....	55
Obr. 26 - Leo – Weibull. ....	55
Obr. 27 - prostředí výpočetní aplikace.....	57
Obr. 28 - základní okno nelineární regrese v Minitab. ....	58
Obr. 29 - nastavení počátečních hodnot parametrů nelineární regrese v Minitab.....	58
Obr. 30 - doplňující nastavení nelineární regrese v Minitab. ....	59
Obr. 31 - graf nelineární regrese v Minitab.....	59

Obr. 32 - graf reziduí nelineární regrese v Minitab. ....	59
Obr. 33 - model s nižší hodnotou SSE a S. ....	62
Obr. 34 - model s vyšší hodnotou SSE a S. ....	62
Obr. 35 - konvexní průběh spolehlivosti. ....	62
Obr. 36 - konkávní průběh spolehlivosti. ....	62
Obr. 37 - konvexně-konkávní průběh spolehlivosti. ....	63
Obr. 38 - souvislost místa výskytu schodu na křivce a času. ....	63
Obr. 39 - "kalendář". ....	64
Obr. 40 - čas selhání umístěný do středu intervalu. ....	64
Obr. 41 - čas selhání umístěný do náhodného času. ....	64
Obr. 42 - graf – čas selhání ve středu intervalu. ....	64
Obr. 43 - graf – čas selhání v náhodném čase. ....	64
Obr. 44 - graf s Cut-Off = 0. ....	66
Obr. 45 - graf s Cut-Off = 0,8. ....	66
Obr. 46 - t-test tabulka [32]. ....	68
Obr. 47 - význam parametrů ve shrnující tabulce. ....	70
Obr. 48 - grafy PME160CD. ....	72
Obr. 49 - grafy PMA150CD. ....	72
Obr. 50 - grafy PME160CD. ....	73
Obr. 51 - grafy PME250CD. ....	73
Obr. 52 - grafy PLE400CD. ....	74
Obr. 53 - grafy PL150AB. ....	75
Obr. 54 - grafy PL150CD. ....	75
Obr. 55 - grafy PL150CD. ....	76
Obr. 56 - grafy PG150CD. ....	76
Obr. 57 - grafy PY150CD. ....	77
Obr. 58 - grafy PE160CD. ....	77
Obr. 59 - histogram časů selhání PG150CD. ....	78
Obr. 60 - grafy PE160CD. ....	78
Obr. 61 - grafy PE200CD. ....	79
Obr. 62 - grafy PE300CD. ....	79
Obr. 63 - grafy MME25CD. ....	80

Obr. 64 - grafy MME75CD.....	80
Obr. 65 – grafy MME125CD.....	81
Obr. 66 - grafy ML25CD. ....	82
Obr. 67 - grafy ML75CD. ....	82
Obr. 68 - grafy UT12CD.....	83
Obr. 69 - grafy UT12CD0.....	83
Obr. 70 - grafy UT12CD.....	84
Obr. 71 - grafy UL12CD. ....	84
Obr. 72 - grafy UME10CD.....	85
Obr. 73 - grafy UME3CD.....	86
Obr. 74 - grafy UML2CD.....	86
Obr. 75 - grafy UMT5CD.....	87
Obr. 76 - grafy UPL014CD. ....	88
Obr. 77 - grafy UPT014CD.....	88
Obr. 78 - grafy UPT04CD.....	89
Obr. 79 - grafy UPE08CD.....	89

# Seznam příloh

Příloha 1      Studie technicko-ekonomických dopadů optimalizace kalibračních intervalů