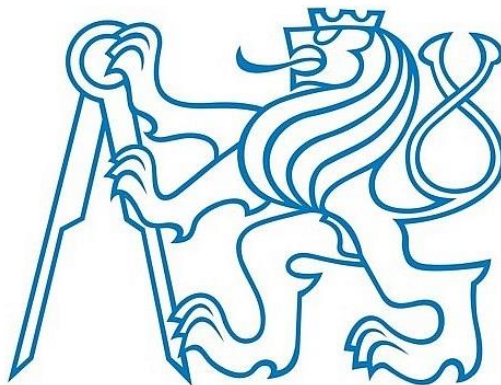


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



Bakalářská práce

**Tvorba kalibračního postupu optického robotického
pracoviště pro rozměrovou kontrolu karoserií**

**Creating of calibration procedure of optical robotic
workplace for dimensions control of bodywork**

Josef Steklý

2021

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Urban

Poděkování

Velice děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Urbanovi za cenné rady, ochotu a pomoc při zpracování této práce.

Dále děkuji svým vedoucím ve ŠKODA AUTO a.s. Ing. Petru Sobotkovi a Ing. Davidu Macounovi za možnost spolupráce a uskutečnění měření a podnětné rady. Zároveň bych chtěl poděkovat Radimu Janíčkoví a celému týmu Řízení kvality za cennou pomoc a důležité konzultace.

Prohlášení

Prohlašuji, že tuto bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, které jsou uvedeny v příloze této práce.

V Praze dne:

Podpis:

Anotace

Tématem bakalářské práce je stručné shrnutí normativních požadavků vztahujících se na laser trackery, analýza stávajícího kalibračního postupu a návrh nového kalibračního postupu. Nový kalibrační postup by měl zajistit větší možnost automatizace kalibrace, více korespondovat s normativními požadavky a usnadnit i urychlit celý proces kalibrace měřicího zařízení. Práce je vztažena na společnost ŠKODA AUTO a.s. a její robotická měrová stanoviště a kalibrační artefakty. Cílem je navrhnout kalibrační postup, který bude možné použít na více typů robotizovaných pracovišť díky využití stejného principu funkce jednotlivých součástí.

Klíčová slova: CMM, kalibrace, ISO, kvalita, automotive

Annotation

The topic of the bachelor thesis is a brief summary of normative requirements related to laser trackers, analysis of the existing calibration procedure and design of a new calibration procedure. The new calibration procedure should provide a greater possibility of automating the calibration, correspond more to the normative requirements and facilitate and speed up the whole process of calibration of the measuring device. The work is related to the company ŠKODA AUTO a.s. and its robotic measurement stations and calibration artifacts. The aim is to design a calibration procedure that can be used on more types of robotic workplaces thanks to the use of the same principle of operation of individual components.

Key words: CMM, calibration, ISO, quality, automotive

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Steklý** Jméno: **Josef** Osobní číslo: **475064**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Tvorba kalibračního postupu optického robotického pracoviště pro rozměrovou kontrolu karoserií

Název bakalářské práce anglicky:

Creating of calibration procedure of optical robotic workplace for dimensions control of bodywork

Pokyny pro vypracování:

- 1) Popis zařízení a podstaty jeho kalibrace
- 2) Analýza současných kalibračních postupů obdobných zařízení
- 3) Návrh a ověření nového postupu
- 4) Vyhodnocení přínosů

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **29.07.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Jan Urban
podpis vedoucí(ho) práce

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

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Obsah

1	Úvod	9
2	Normativní požadavky	10
2.1	Definice měřidel dle zákona o metrologii.....	10
2.1.1	Etalony.....	10
2.1.2	Pracovní měřidla stanovená (stanovená měřidla).....	12
2.1.3	Pracovní měřidla nestanovená (pracovní měřidla)	12
2.2	Metrologická návaznost.....	12
2.3	Pojem ISO.....	13
2.4	ČSN EN ISO 10360.....	14
2.4.1	Rozbor ČSN EN ISO 10360-10.....	15
2.4.2	<i>Metody použití retroreflektoru:</i>	15
2.4.3	Jmenovité provozní podmínky.....	16
2.4.4	Přejímací a periodické zkoušky	17
2.4.5	Chyba snímání tvaru a rozměru	18
2.4.6	Testy měření délky.....	20
2.4.7	Odvození výsledků zkoušek.....	28
2.4.8	Shoda se specifikací	29
3	Popis zařízení	30
3.1	Volkswagen Group	30
3.1.1	Společnost ŠKODA AUTO a.s.	31
3.2	Hlavní funkční prvky zařízení	33
3.2.1	Leica Absolute tracker AT960	36
3.2.2	Leica T-Scan 5.....	39
3.2.3	Leica T-Probe	41
4	Přesnost zařízení	42
4.1	Přesnost Leica AT960	42
4.1.1	Nejistota měření.....	42

4.2	Přesnost Leica T-Scan 5	43
4.2.1	Prostorová délka „UL“ (Length)	43
4.2.2	Poloměr koule „UR“ (Radius)	44
4.2.3	Povrch koule „US“ (Sphere)	44
4.2.4	Rovinný povrch „UP“ (Plane).....	44
4.3	Přesnost Leica T-Probe	45
5	Analýza stávajícího kalibračního postupu	45
5.1	Popis kalibračního postupu.....	45
5.1.1	Kontrola mechanických částí / vyčištění optických částí systému.....	45
5.1.2	Podmínky prostředí.....	46
5.1.3	Příprava a vyrovnaní.....	46
5.1.4	Kalibrace.....	47
5.1.5	Verifikace.....	48
5.1.6	Vyhodnocení kalibrace.....	52
5.2	Shrnutí předností a nedostatků stávajícího postupu	52
6	Návrh nového kalibračního postupu	53
6.1	Popis nového postupu	54
7	Závěr	62
8	Použitá literatura:	64
	<i>Seznam obrázků:</i>	66
	<i>Seznam tabulek:</i>	67
	<i>Seznam použitých zkratk</i>	68
	<i>Seznam příloh</i>	69

1 Úvod

Ve společnosti ŠKODA AUTO a.s. jsou kladeny vysoké požadavky na přesnost výroby. Tuto přesnost kontrolují stále sofistikovanější zařízení, jejichž kalibrace je často velice nákladná, časově náročná a zprostředkovávaná externími firmami.

Tato bakalářská práce se věnuje vytvoření nového kalibračního postupu, který bude splňovat požadavky na vysokou kvalitu kontroly zařízení, ale umožní zrychlení procesu kalibrace. Dále se plánuje zvýšení automatizace a tím snížení zátěže obsluhy a nově bude možné provádět kalibrace interně, čímž by mělo dojít k ušetření významných finančních prostředků.

Celý kalibrační postup se týká optických měřicích pracovišť pro rozměrovou kontrolu karoserií, využívající technologii bezkontaktního 3D laser trackeru. Tato technologie je nyní na vzestupu. Důkazem tohoto tvrzení je i fakt, že ŠKODA AUTO a.s. má pouze v České republice několik desítek laser trackerů a i další podniky plánují jejich pořízení popř. navýšení jejich počtu ve svém inventáři.

2 Normativní požadavky

2.1 Definice měřidel dle zákona o metrologii

Zákon č. 505/1990 Sb., o metrologii je základním metrologickým předpisem právního řádu České republiky. Jeho účelem je definovat práva a povinnosti subjektů. Dále definuje pojmy jako měřidlo¹, návaznost měřidel, etalon atp. [13]

2.1.1 Etalony

Etalony slouží k realizaci a uchování jednotky nebo stupnice veličiny a k přenosu jednotky nebo stupnice na měřidla nižších přesností a tvoří základ návaznosti měřidel u subjektů. Podléhají povinné kalibraci, kterou provádí na žádost uživatele ČMI² nebo AKL³ nebo zahraniční subjekty se srovnatelnou metrologickou úrovní. Návaznost měřidel je vlastnost výsledku měření nebo hodnoty etalonu, kterou je vztah k národním nebo mezinárodním etalonům prostřednictvím nepřerušené posloupnosti přenosu jednotky (počátek posloupnosti je etalon nejvyšší metrologické kvality realizující definici jednotky veličiny).

Druhy etalonů

Mezinárodní etalon – uznaný signatáři mezinárodní dohody a určený k celosvětovému využití

Národní/státní etalon

Primární etalon – etalon stanovený použitím primárního postupu měření nebo vytvořený konvencí zvoleným artefaktem

Sekundární etalon – etalon stanovený kalibrací vzhledem k primárnímu etalonu pro veličinu stejného druhu

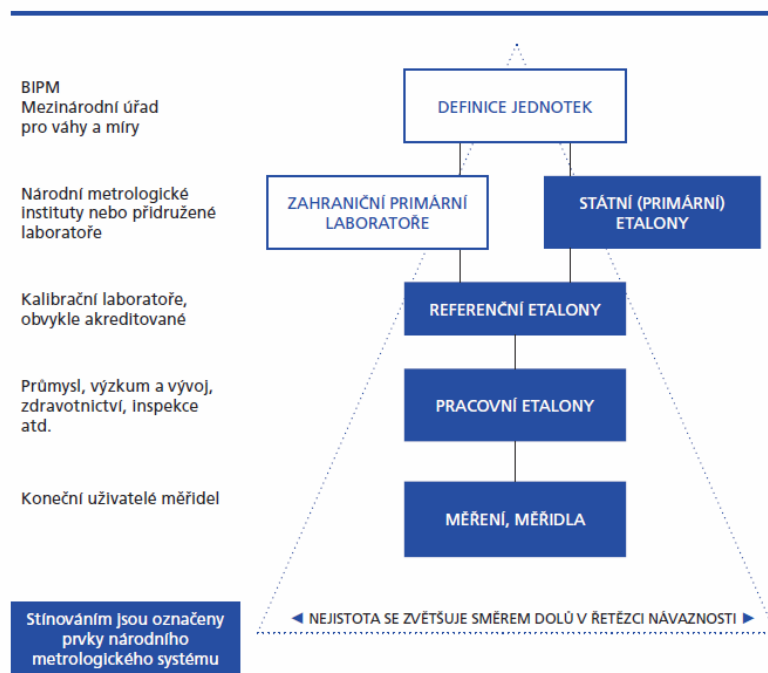
Referenční/**hlavní etalon** – etalon navržený ke kalibraci dalších etalonů pro veličiny daného druhu v dané organizaci

Pracovní etalon – etalon, který je běžně používán ke kalibraci nebo ověřování měřidel nebo měřicích systémů. [12,13]

¹ Prostředek sloužící k určení hodnoty měřené veličiny

² Český metrologický institut

³ Akreditovaná kalibrační laboratoř



Obrázek 1 Návaznost etalonů [26]



Obrázek 2 Femtosekundový generátor hřebene optických frekvencí [14]

2.1.2 Pracovní měřidla stanovená (stanovená měřidla)

Tato měřidla stanovuje MPO (Ministerstvo průmyslu a obchodu) vyhláškou č. 345/2002 Sb. k povinnému ověřování s ohledem na jejich význam:

- a) v závazkových vztazích (prodej, nájem, náhrada škod, služby, darování),
- b) pro stanovení sankcí, poplatků, daní, tarifů, nebo pro ochranu zdraví či životního prostředí,
- c) pro bezpečnost při práci a při ochraně jiných veřejných zájmů. [12,13]

2.1.3 Pracovní měřidla nestanovená (pracovní měřidla)

Jedná se o měřidla, která nejsou etalonem ani stanoveným měřidlem. [12]

2.2 Metrologická návaznost

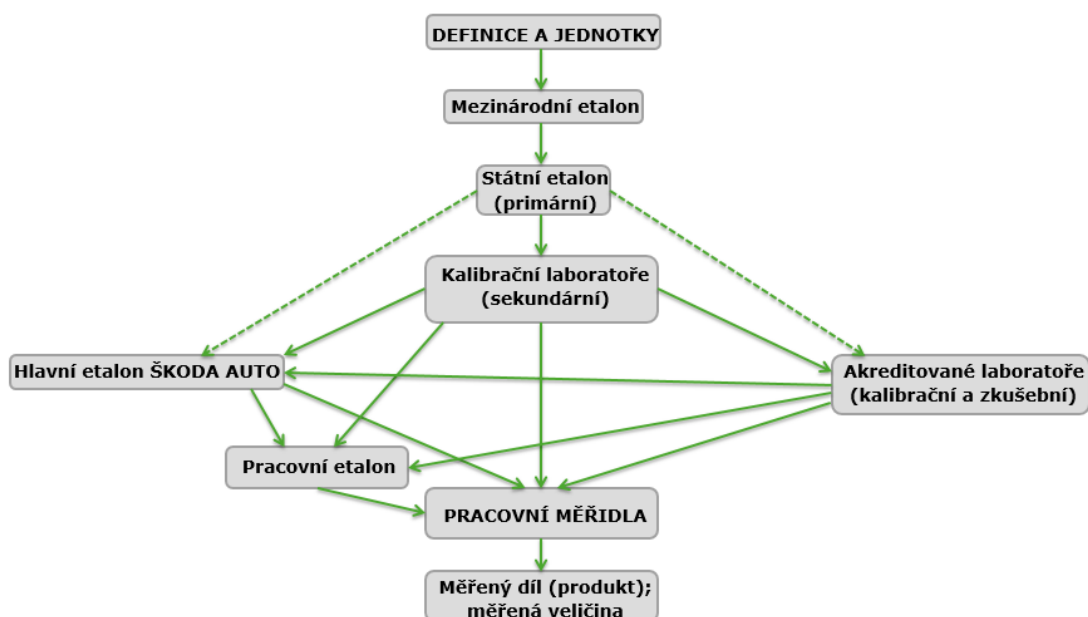
Metrologickou návazností se rozumí zařazení daných měřidel do nepřerušené posloupnosti přenosu hodnoty veličiny počínající etalonem nejvyšší metrologické kvality pro daný účel. [13]

Schéma návaznosti měřidel – obor délky



Obrázek 3 Schéma návaznosti měřidel - obor délky [25]

Schéma návaznosti měřidel



Obrázek 4 Schéma návaznosti měřidel [25]

2.3 Pojem ISO

ISO (mezinárodní organizace pro normalizaci/International Organization for Standardization) je celosvětová federace národních normalizačních orgánů sídlící v Ženevě. K založení došlo v roce 1946 a aktuálně má 161 členských národních normalizačních orgánů z celého světa. Mezinárodní normy a další dokumenty tvoří prostřednictvím technických komisí dělených do oblastí, ve kterých normy vznikají. Česká republika se prostřednictvím ÚNMZ (Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví) mohla rozhodnout mezi dvěma typy členství:

- a) P-členství – plné členství s právem i povinností hlasovat k předloženým dokumentům,
- b) O-členství – statut pozorovatele s přístupem k dokumentům a možností podávat připomínky (bez možnosti hlasovat). [1,2]

2.4 ČSN EN ISO 10360

Norma ČSN EN ISO 10360 je složena z částí se společným názvem „Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM)“ popř. anglickým názvem „Geometrical product specifications (GPS) – Acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMS)“. [3]

Celou normu tvoří následující části (doplněné o potřebné přílohy):

Část 1: Slovník pojmů,

Část 2: Souřadnicové měřicí stroje používané pro měření lineárních rozměrů,

Část 3: Souřadnicové měřicí stroje s osou otočného stolu jako čtvrtou osou,

Část 4: Souřadnicové měřicí stroje používané v režimu měření skenováním,

Část 5: Souřadnicové měřicí stroje používající snímací systémy s jedním a více dotykovými hroty,

Část 6: Odhad chyb při výpočtu prvků přiřazených metodou nejmenších čtverců,

Část 7: Souřadnicové měřicí stroje vybavené zobrazovacími snímacími systémy,

Část 8: Souřadnicové měřicí stroje s optickými snímači vzdálenosti,

Část 9: Souřadnicové měřicí stroje s vícenásobnými snímacími systémy,

Část 10: Laser Trackery pro měření vzdálenosti mezi dvěma body,

Část 11: Souřadnicové měřicí stroje využívající princip počítačové tomografie,

Část 12: Kloubové rameno souřadnicových měřicích strojů,

Část 13: Optické 3D souřadnicové měřicí systémy.

[3,4]

Soubor norem ČSN EN ISO 10360 si klade za úkol definovat pravidla pro ověřování různých typů CMM popř. jejich komponent. Přejímacími zkouškami se

rozumí ověřování specifikací na bázi výrobce stroje / zákazník. V takovém případě norma definuje postupy, jimiž se ověří výrobcem deklarované vlastnosti. Ve vztahu výrobce / uživatel se řeší periodické zkoušky, které norma definuje tak, aby ověřily stálou správnou funkčnost stroje po celou dobu jeho užívání. Zde je vhodné zmínit nejednotnost v terminologii, kdy legislativa požaduje kalibraci měřidel, ale normy řady ČSN EN ISO 10360 se drží termínu zkoušení.

2.4.1 Rozbor ČSN EN ISO 10360-10

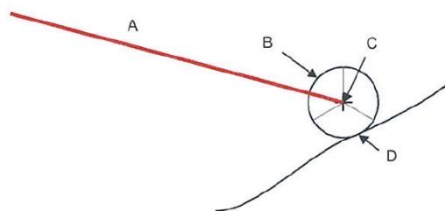
Z důvodu velké šíře problematiky souřadnicového měření a s ohledem na zaměření mé bakalářské práce se dále zaměřím především na problematiku měření pomocí laser trackerů⁴ tedy na normu ČSN EN ISO 10360-10. Tato norma obsahuje důležité informace ke kalibracím laser trackeru (doporučené environmentální podmínky, polohy zkušebních těles, rozsah zkoušek nebo rozhodnutí o shodě/neshodě se specifikací).

2.4.2 Metody použití retroreflektoru:

Norma ISO 10360-10 nejprve ve svém úvodu definuje 3 základní principy a metody použití retroreflektoru⁵, pro které předepisuje požadavky a zohledňuje jejich technické parametry.

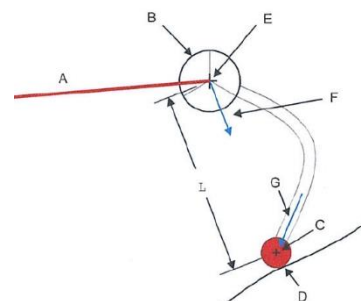
SMR (spherically mounted retroreflector)

– odražeč vložený do kulového pouzdra, vrchol koutového odražeče se nastavuje tak, aby byl ve shodě se středem kulového těla. Tato metoda se považuje za nejjednodušší pro měření za pomoci laser trackeru.⁶ [1,5]



Obrázek 5 SMR senzor [1]

SRC (stylus and retroreflector combination) – měřicí systém využívající dotykový hrot pro kontakt s obrobkem a koutový odražeč pro určení základní



Obrázek 6 SRC senzor [1]

⁴ Laserový sledovač – přístroj nepřetržitě sledující polohu sondy s koutovým odražečem

⁵ Koutový odražeč/prvek odrážející většinu dopadajícího světla zpět ke zdroji

^{6,7} A=laserový paprsek, B=retroreflektor, C=měřicí bod, D=kontaktní bod, E=základní poloha, F=vektor orientace snímacího doteku, G=vektor normálového směru snímání, L=vzdálenost hrotu

polohy nástroje. Díky této kombinaci je možné měřit body, které by byly pro samotný laser tracker neměřitelné.⁷ [1,5]

ODR⁸ (optical distance sensor and retroreflector combination) – měřicí systém, který spojuje funkci optického snímače (pro určení vzdálenosti měřeného bodu) a koutového odražeče (pro určení základní polohy optického snímače). [1,5]

2.4.3 Jmenovité provozní podmínky

1. Podmínky prostředí (environmentální podmínky)

Výrobce (v případě přijímacích zkoušek) / uživatel (v případě periodických zkoušek) stanovuje meze dovolených environmentálních podmínek (např. teplota, vlhkost vzduchu, vibrace, okolní osvětlení mající vliv na měření). V obou případech je možné, aby si uživatel zvolil podmínky prostředí, budou-li splňovat výrobcem stanovené limity. Pokud si bude uživatel přát provedení testování za jiných podmínek, musí se spolu s výrobcem dohodnout, kdo ponese náklady na úpravy pracovního prostředí. [1]

2. Provozní podmínky

Výrobce specifikuje podmínky, které musí uživatel plnit, aby došlo ke splnění MPE (maximální dovolená chyba). Dále musí být laser tracker provozován v souladu s příručkou výrobce obsahující např.:

- a) cykly spouštění/zahřívání stroje,
- b) postupy kompenzace stroje,
- c) čisticí postupy u retroreflektoru a celé soupravy,
- d) SMR nebo SRC kvalifikaci,
- e) umístění, typ a počet senzorů okolního prostředí,
- f) umístění, počet a typ dalších čidel. [1]

^{6,7} A=laserový paprsek, B=retroreflektor, C=měřicí bod, D=kontaktní bod, E=základní poloha, F=vektor orientace snímacího doteku, G=vektor normálového směru snímání, L=vzdálenost hrotu

⁸ Jedním z typů ODR je scanner na Obrázku 19

2.4.4 Přejímací a periodické zkoušky

Přejímací zkoušky jsou prováděny v souladu se specifikacemi a postupy danými výrobcem, které jsou v souladu s ISO 10360-10. U periodických zkoušek je nutné akceptovat specifikace uživatele a postupy výrobce.

Je-li to možné, měl by být laser tracker testován v jiné orientaci, než je základní vertikální orientace. V každém případě budou úhly azimutu a elevace orientovány s ohledem na laser tracker. Poloha a orientace měřených délek vzhledem k laser trackeru musí být jasně stanovena předem. Zkušební délky se běžně neotáčí spolu s laser trackerem, ale pro měření umístění a „two-face“ testy zůstává jejich poloha vůči ose stejná. Např. je-li laser tracker namontován vodorovně, jsou v normě směry „nahoru“ a „dolů“ popsány v následující tab. 1 (tab. 2 pro svislou osu). [1]

Tabulka 1 Požadavky pro jednotlivé typy senzorů [1]

Vzdálenost od laser trackeru	Požadavek pro tyto senzory	Výška vzhledem k ose rotace laser trackeru
<2 m*	SMR, SRC, ODR	přibližně stejná výška
přibližně 10 m	SRC, ODR	více než 1 m "nad" nebo "pod"
*Pokud specifikace výrobce vysloveně uvádějí, že snímač SRC nebo ODR funguje pouze ve vzdálenosti větší než 2 m od laser trackeru, provede se zkouška při minimální stanovené vzdálenosti.		

Tabulka 2 Polohy pro měření "two-face" [1]

Číslo pozice	Vzdálenost od laser trackeru*	Popis pozice laser trackeru	Úhly azimutu vzhledem k laser trackeru ve stupních
1-3	1,5 m	„Two-face“ test, retroreflektor nejméně 1 m pod výškou středu rotace laser trackeru	0, 120, 240
4-6	1,5 m	„Two-face“ test, retroreflektor ve výšce středu rotace laser trackeru	0, 120, 240
7-9	1,5 m	„Two-face“ test, retroreflektor nejméně 1 m nad výškou středu rotace laser trackeru	0, 120, 240
10-12	6 m	„Two-face“ test, retroreflektor nejméně 1 m pod výškou středu rotace laser trackeru	0, 120, 240
13-15	6 m	„Two-face“ test, retroreflektor ve výšce středu rotace laser trackeru	0, 120, 240
16-18	6 m	„Two-face“ test, retroreflektor nejméně 1 m nad výškou středu rotace laser trackeru	0, 120, 240
* Vzđálenost od laser trackeru by měla být do 10% jmenovité vzdálenosti a úhel azimutu do 5%			

2.4.5 Chyba snímání tvaru a rozměru

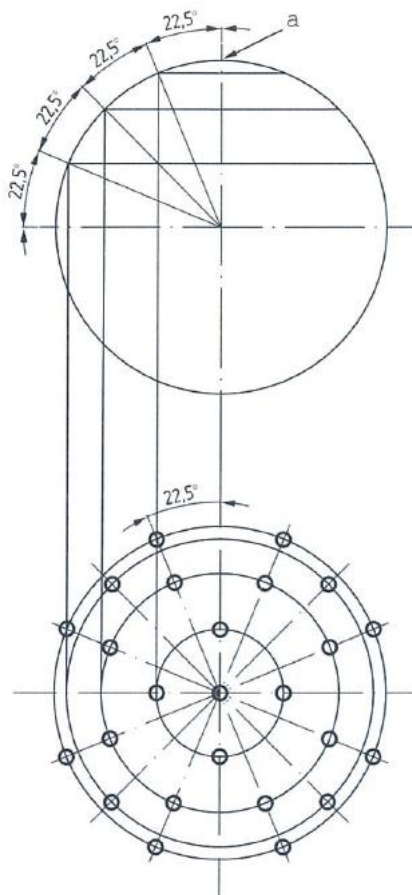
Tento zkušební postup má za úkol určit velikost a tvar testovací koule pomocí **25 bodů** měřených prostřednictvím SMR, SRC nebo ODR. Dále se norma blíže věnuje metodě SMR, zbylé dvě metody jsou zmíněny v přílohách. Metodou nejmenších čtverců je z 25 bodů zkoumána chyba tvaru a velikosti. Touto analýzou se získá chyba tvaru $P_{Form.Sph.1X25::SMR.LT}$ a chyba rozměru $P_{Size.Sph.1X25::SMR.LT}$. Nejedná se o kontrolu žádných specifikací dodaných výrobcem SMR, jelikož jde pouze o testy schopnosti systému lokalizovat jednotlivé body v prostoru (ačkoli tyto chyby budou mít vliv na výsledky zkoušek). [1]

Postup

Zkušební koule o průměru 10 - 51 mm se kalibruje na velikost a tvar. Připojí se tak, aby mohla být změřena celá hemisféra. Je-li použit sférický retroreflektor, měla by být podpora testovací koule orientována směrem od laser trackeru. V případě SRC by měla být podpora situována mimo normální směr snímání.

Změří se a zaznamená 25 bodů, které musí být přibližně rovnoměrně rozloženy alespoň na polokouli zkušební koule. Rozložení bodů záleží na uživateli (pokud není specifikováno jinak), ale norma doporučuje následovné uspořádání:

- jeden bod na pólu zkušební koule,
- čtyři body (rovnoměrně rozložené) $22,5^\circ$ pod pólem,
- osm bodů (rovnoměrně rozložených) 45° pod pólem a otočených o $22,5^\circ$ vzhledem k předchozí skupině,
- čtyři body (rovnoměrně rozložené) $67,5^\circ$ pod pólem a otočené o $22,5^\circ$ vzhledem k předchozí skupině,
- osm bodů (rovnoměrně rozložených) 90° pod pólem (tj. na rovníku) a otočených o $22,5^\circ$ vzhledem k předchozí skupině. [1]



Obrázek 7 Uspořádání měřených bodů [1]

Výsledky těchto testů mohou být vysoce závislé na vzdálenosti retroreflektoru od laser trackeru (zejména u SRC a ODR). Zkouška se proto provádí v požadovaných vzdálenostech od laser trackeru, jako je uvedeno v Tabulce 2. [1]

2.4.6 Testy měření délky

Testy chyb měření délky se skládají ze 105 měření délky. Z tohoto počtu je 41 pozic zkušební délky povinných a popsanych v Tabulce 3. Zbýlých 64 pozic si může zvolit uživatel. Pro pomoc při volbě pozic jsou v normě k dispozici 2 nepovinné alternativy. [1]

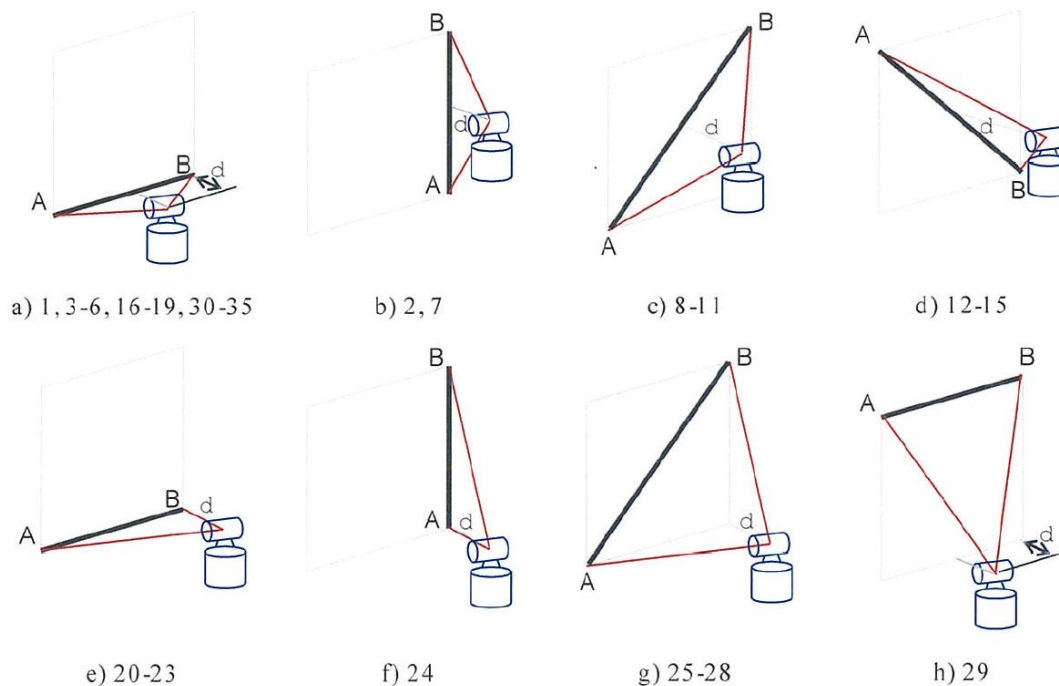
Výrobce musí specifikovat jeden nebo více vzorců tak, aby MPE bylo možné jednoznačně určit pro jakékoliv měření point-to-point v měřicím objemu. V případě, že je více vzorců, musí být vždy jasné, který se za dané situace má použít. V případě, že je uvedeno „tak blízko, jak je to možné“ používá se pro výpočet MPE vzdálenost 0,5 m. Pro účely shody se specifikací se MPE uvedou v tabulce pro polohy 1-35 a 41, ve vzdálenostech uvedených v tabulce a zkušební kalibrované délce 2,25-2,75 m s výjimkou poloh 30-35, kde je kalibrovaná délka 7-9 m. [1]

Výrobce dále musí uvést horní popř. dolní meze CTE kalibrované zkušební délky. Výchozí hodnota je materiál s normální CTE, pokud výrobce nestanoví jinak. Ke stanovení kalibrované zkušební délky se může použít laser interferometr, který je korigován na index lomu vzduchu s CTE rovným nule. Pokud se použije ke stanovení, považuje se za materiál s nízkou CTE. [1]

Tabulka 3 Přehled 41 základních pozic [1]

Číslo pozice (základní pozice)	Vzdálenost od laser trackeru	Popis polohy zkušební délky (zobrazeno na obrázku 8)	Úhel/úhly azimutu [°]
1	Tak blízko, jak je to možné.	Horizontální, vystředěný (konce testovací délky jsou stejně daleko od laser trackeru) a ve výšce laser trackeru*	v každém azimutu
2	Tak blízko, jak je to možné.	Svisle, střed délky ve výšce laser trackeru (konce testovací délky jsou stejně vzdálené od laser trackeru)**	v každém azimutu
3-6	3 m	Horizontální, vystředěný (konce testovací délky jsou stejně daleko od laser trackeru) a ve výšce laser trackeru	0, 90, 180, 270
7	3 m	Svisle, střed délky ve výšce laser trackeru (konce testovací délky jsou stejně vzdálené od laser trackeru)	v každém azimutu
8-11	3 m	Pravá úhlopříčka, vystředěná (konce testovací délky jsou stejně vzdálené od laser trackeru) a střed délky je ve výšce laser trackeru	0, 90, 180, 270
12-15	3 m	Levá úhlopříčka, vystředěná (konce testovací délky jsou stejně vzdálené od laser trackeru) a střed délky je ve výšce laser trackeru	0, 90, 180, 270
16-19	6 m	Horizontální, vystředěný (konce testovací délky jsou stejně daleko od laser trackeru) a ve výšce laser trackeru	0, 90, 180, 270
20-23	Tak blízko, jak je to možné.	Horizontální, necentrováné (laser tracker je přímo před jedním koncem délky) a ve výšce laser trackeru	0, 90, 180, 270
24	Tak blízko, jak je to možné.	Svisle, necentrováné (laser tracker je přímo před jedním koncem délky)	v každém azimutu

25-28	Tak blízko, jak je to možné.	Diagonálně, jeden konec pod nebo nad bodem přímo před laser trackerem, druhý konec vpravo nebo vlevo od bodu přímo před laser trackerem. Rozsah obou konců délky je stejný.	0, 90, 180, 270
29	Tak blízko, jak je to možné.	Horizontální, vystředěný, přímo nad (je-li to možné) samotným laser trackerem	v každém azimutu
30-35	dlouhé*	Horizontální, vystředěný (konce testovací délky jsou stejně daleko od laser trackeru) a ve výšce laser trackeru	0, 30, 60, 90, 120, 150
36-40	5 nastavení vzdálenosti	Tyto zkušební vzdálenosti pokrývají 66% lineární osy (IFM nebo ADM) laser trackeru****, *****	v každém azimutu
41	syntetická délka	Dle požadavků přílohy k normě (vyžadováno pouze u případů s nízkou CTE)	v každém azimutu
<p>* Tato zkouška pokrývá 66% horizontálního rozsahu měření laser trackeru, pokud se maximální úhel pro point-to-point měření považuje 180°</p> <p>** Tato zkouška pokrývá 66% svislé osy měření laser trackeru</p> <p>*** Ve zvláštním "dlouhém" případě se měří větší zkušební délka ve větší vzdálenosti od laser trackeru. Doporučuje se měřená délka v rozsahu 7-9 m ve vzdálenosti 7-9m.</p> <p>**** Vzdálenost mezi dvěma měřenými body použitými k vyhodnocení největší zkušební délky musí být alespoň 66% maximálního měřicího rozsahu laser trackeru specifikovaného výrobcem, pokud není mezi výrobcem a uživatelem dohodnuto jinak.</p> <p>***** Uživatelé, kteří nezmýšlejí používat celý měřicí rozsah laser trackeru, si mohou zvolit délky 36-40, které pokrývají kratší rozsah než 66% maximálního specifikovaného rozsahu. Nový rozsah se zaznamená do protokolu o zkoušce.</p>			



Obrázek 8 Normou stanovené polohy etalonu [1]

Za účelem získání 105 zkušebních délek (shodných s ostatními částmi ISO 10360) se ke 41 povinným pozicím přidá dalších 64 pozic. Tabulka 4 a 5 znázorňuje první alternativu volby doplňkových pozic. [1]

Tabulka 4 První varianta volitelných pozic – část 1 [1]

Číslo pozice (Doplňková alternativa 1)	Vzdálenost od počátku laser trackeru	Popis polohy zkušební délky	Úhel/úhly azimutu [°]
42-44	3 m	Poloha 7 v různých úhlech - svislá, vystředěná (konce testovací délky jsou stejně vzdálené od laser trackeru) a střed délky je ve výšce laser trackeru.	90, 180, 270 (vzhledem k úhlu v poloze 7)
45-48	6 m	Svisle, střed délky ve výšce laser trackeru (konce testovací délky jsou stejně vzdálené od laser trackeru).	0, 90, 180, 270
49-52	6 m	Pravá úhlopříčka, vystředěná (konce testovací délky jsou stejně vzdálené od laser trackeru) a střed délky je ve výšce laser trackeru.	0, 90, 180, 270
53-56	6 m	Levá úhlopříčka, vystředěná (konce testovací délky jsou stejně vzdálené od laser trackeru) a střed délky je ve výšce laser trackeru.	0, 90, 180, 270
57-59	Tak blízko, jak je to možné.	Pozice 24 v různých úhlech - svislá, necentrována (laser tracker je přímo před jedním koncem testovací délky).	90, 180, 270 (vzhledem k úhlu v poloze 24)
60-63	Tak blízko, jak je to možné.	Horizontální, necentrované (laser tracker je přímo před jedním koncem délky) a ve výšce laser trackeru. Tyto pozice jsou zrcadlové vůči 20-23 (Pokud byl laser tracker původně přímo před jedním koncem, pak nyní musí být přímo před druhým koncem).	0, 90, 180, 270
64-67	Tak blízko, jak je to možné.	Diagonálně, jeden konec pod nebo nad bodem přímo před laser trackerem, druhý konec vpravo nebo vlevo od bodu přímo před laser trackerem. Rozsah obou konců délky je stejný. Jedná se o doplňkovou polohu odpovídající pozicím 25-28 (Pokud byl laser tracker původně před a pod jedním koncem a druhý konec byl ve stejné výšce jako laser tracker, pak nyní to bude obráceně).	0, 90, 180, 270

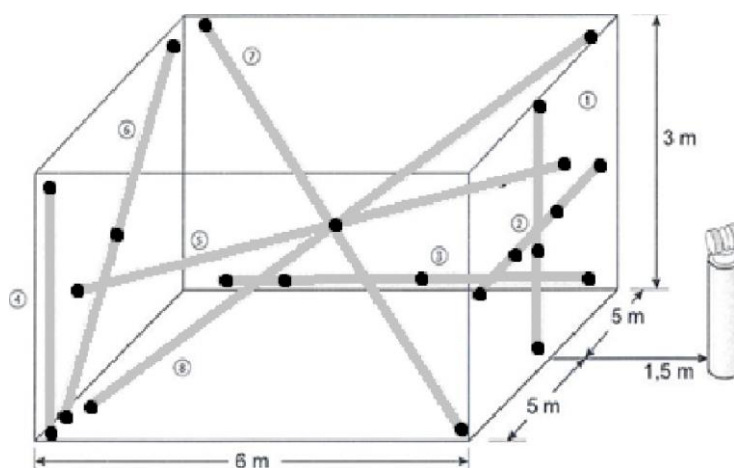
68-71	Tak blízko, jak je to možné.	Diagonálně, jeden konec pod nebo nad bodem přímo před laser trackerem, druhý konec vpravo nebo vlevo od bodu přímo před laser trackerem. Rozsah obou konců délky je stejný. Tyto pozice jsou zrcadlově vůči 64-67 (pokud byla testovací délka v pozicích 64-67 v pravé diagonální poloze, měla by být nyní orientována v poloze "diagonála vlevo").	0, 90, 180, 270
72-74	Tak blízko, jak je to možné.	Horizontální, vystředěný, přímo nad (je-li to možné) samotným laser trackerem.	90, 180, 270 (vzhledem k úhlu v poloze 29)
75-78	6 m	tělesná úhlopříčka krychle	0, 90, 180, 270
79-82	Tak blízko, jak je to možné.	Diagonální, vystředěná (konce testovací délky jsou stejně vzdálené od laser trackeru) a střed zkušební délky je ve výšce laser trackeru.	0, 90, 180, 270

Tabulka 5 První varianta volitelných pozic – část 2 [1]

Číslo pozice (Doplňková alternativa 1)	Vzdálenost od počátku laser trackeru	Popis polohy zkušební délky	Úhel/úhly azimutu [°]
83-86	vzdálenost přibližně rovná polovině zkušební délky	Horizontální, vystředěný (konce testovací délky jsou stejně daleko od laser trackeru) a ve výšce laser trackeru. Měření se opakuje čtyřikrát. Tento test ověřuje opakovatelnost schopnosti měření horizontálního úhlu.	v každém azimutu
87-90	vzdálenost přibližně rovná dvojnásobku zkušební délky	Horizontální, vystředěný (konce testovací délky jsou stejně daleko od laser trackeru) a ve výšce laser trackeru. Měření opakujte čtyřikrát. Tento test ověřuje opakovatelnost schopnosti měření horizontálního úhlu.	v každém azimutu
91-94	vzdálenost přibližně rovná polovině zkušební délky	Svisle, střed délky ve výšce laser trackeru (konce testovací délky jsou stejně vzdálené od laser trackeru). Měření se opakuje čtyřikrát. Tento test ověřuje opakovatelnost schopnosti měření svislého úhlu.	v každém azimutu
95-98	vzdálenost přibližně rovná dvojnásobku zkušební délky	Svisle, střed délky ve výšce laser trackeru (konce testovací délky jsou stejně vzdálené od laser trackeru). Měření se opakuje čtyřikrát. Tento test ověřuje opakovatelnost schopnosti měření svislého úhlu.	v každém azimutu
99-102	3 m	V jakémkoliv radiálním směru, kde nejbližší konec délky je 3 m od laser trackeru. Měření se opakuje čtyřikrát. Tento test ověřuje opakovatelnost schopnosti měření rozsahu.	v každém azimutu

103-105	6 m	V jakémkoliv radiálním směru, kde nejbližší konec délky je 6 m od laser trackeru. Měření se opakuje třikrát. Tento test ověřuje opakovatelnost schopnosti měření rozsahu.	v každém azimutu
---------	-----	---	------------------

Druhá alternativa doporučující rozmístění 64 volitelných pozic je znázorněna na obrázku 9. V této alternativě je laser tracker vystředěn před nejdelší stranou měřeného objemu ve vzdálenosti 1,5 m tak, že měřicí hlava je přibližně stejně vzdálena od horního i dolního měřeného objemu. Pozice zkušební délky jsou určeny osmi různými měřicími čarami (viz. Obrázek 9), ale jsou povolena i jiná uspořádání. Pozice zkušební délky jsou na obrázku popsány vzhledem k měřicímu objemu 10 m x 6 m x 3 m (délka x šířka x výška). Pro laser tracker používaný pro měření malých součástí, doporučuje se měřicí objem 5 m x 3 m x 2 m. Jiné měřicí objemy jsou ovšem povoleny. [1]



Obrázek 9 Druhá varianta volitelných pozic [1]

2.4.7 Odvození výsledků zkoušek

U všech 105 měření se určí každá chyba měření délky $E_{Uni:0:LT}$ nebo $E_{Bi:0:LT}$ získáním rozdílu mezi udanou hodnotou a kalibrovanou hodnotou každé zkušební délky, kde je kalibrovaná hodnota považována za správnou skutečnou hodnotu délky. Uvedená hodnota konkrétního měření kalibrované zkušební délky může být laser trackerem korigována tak, aby zohledňovala systematické chyby, nebo

tepelně indukované chyby (včetně teplotní roztažnosti), má-li laser tracker pro tento účel přídavná zařízení. Ruční korekce získaných výsledků není povolena. Pro každou ze 105 chyb měření $E_{Uni:0:LT}$ nebo $E_{Bi:0:LT}$ se vypočítá odpovídající hodnota MPE $E_{Uni:0:LT,MPE}$ nebo $E_{Bi:0:LT,MPE}$ na základě specifikací výrobce (specifikací výrobce bývá obvykle vzorec). [1]

2.4.8 Shoda se specifikací

a) Přijímací zkoušky

Snímací výkon laser trackeru je ověřen pokud

- Chyba snímání tvaru ($P_{Form.Sph.1x25::SMR.LT}$) není větší než příslušná maximální dovolená chyba snímání ($P_{Form.Sph.1x25::SMR.LT,MPE}$), která je specifikována výrobcem a zohlední se v nejistotě zkušební hodnoty. [1]

- Absolutní hodnota chyby velikosti snímání ($P_{Size.Sph.1x25::SMR.LT}$) není větší než příslušná maximální hodnota povolené chyby velikosti snímání ($P_{Size.Sph.1x25::SMR.LT,MPE}$), která je specifikována výrobcem a zohlední se v nejistotě zkušební hodnoty. [1]

Dojde-li k selhání některého měření, měření se opakuje v této poloze třikrát a replikuje se 25 měřících bodů použitých v neúspěšném testu. Všechny tři z těchto opakovaných testů musí být úspěšné. Hlásí se největší chyba (v absolutní hodnotě). [1]

„Two-face“ výkon laser trackeru je ověřen pokud

- Chyba lokalizace $L_{Dia.2x1:P\&R:LT}$ není větší než příslušná maximální dovolená chyba lokalizace $L_{Dia.2x1:P\&R:LT,MPE}$, která je specifikována výrobcem a zohlední se v nejistotě zkušební hodnoty. [1]

Pokud některý z „two-face“ testů selže, opakuje se měření v této poloze třikrát. Hlásí se největší chyba (v absolutní hodnotě).

Výkon laser trackeru při měření délky je ověřen pokud

- Chyby měření délky (hodnoty $E_{Uni:0:LT}$ nebo $E_{Bi:0:LT}$) nejsou větší než příslušná maximální hodnota povolené chyby $E_{Uni:0:LT,MPE}$ nebo $E_{Bi:0:LT,MPE}$, která je specifikována výrobcem a zohlední se v nejistotě zkušební hodnoty.

Mimo specifikaci nesmí být více než pět ze 105 testovacích délek. Jakékoli měření délky mimo specifikaci musí být provedeno třikrát a každé z těchto měření musí být v rámci specifikace. [1]

b) Periodické zkoušky

U periodických zkoušek jsou nastavena stejná pravidla jako u přijímacích zkoušek, ale specifikace jsou prováděny uživatelem (za dodržení postupů výrobce). [1]

3 Popis zařízení

Vzhledem k tomu, že má práce je úzce zaměřena na kalibraci velmi nákladných zařízení, která vzešla z požadavků výrobních úseků společnosti ŠKODA AUTO a.s., která je součástí koncernu Volkswagen Group, si na úvod této kapitoly představíme koncern a především společnost ŠKODA AUTO a.s..

3.1 Volkswagen Group

Koncern Volkswagen patří mezi největší světové výrobce automobilů. Na evropském trhu má, co se týče prodeje automobilů, největší podíl. Hlavní sídlo je v Německu ve městě Wolfsburg, nicméně po celém světě má skupina 125 výrobních závodů (71 v Evropě, 35 v Asii, 6 v Severní a 9 v Jižní Americe a 4 v Africe). Celou skupinu tvoří 12 značek ze sedmi evropských zemí (obr.10): Volkswagen, ŠKODA, Audi, SEAT, Bentley, Bugatti, Lamborghini, Porsche, Ducati, Volkswagen Užitkové vozy, Scania a MAN. [8,9]



Obrázek 10 Skupina Volkswagen [8]

3.1.1 Společnost ŠKODA AUTO a.s.

a) Historie

Rok 1895 představuje počátek historie ŠKODA, protože Václav Laurin a Václav Klement zahajují výrobu kol v Mladé Boleslavi se značkou SLAVIA. Již na přelomu století se po výrobě motocyklů začíná i s výrobou prvních automobilů s názvem Voiturette, které se sériově vyrábějí od roku 1906. Roku 1912 Laurin & Klement přebírá automobilový závod RAF (Reichenberger Automobil-Fabrik) v Liberci a z důvodu posílení pozice na trhu dochází roku 1925 k fúzi Laurin & Klement se Škodovými závody v Plzni, založenými Emilem Škodou. Od zmíněné fúze nesou automobily značky Laurin & Klement logo s okřídleným šípem a rok poté dochází k představení nové firemní značky ŠKODA. Roku 1928 dochází ke spuštění pásové výroby. Během 2. sv. války je automobilka opakovaně bombardována a většina je zničena. Roku 1945 dochází k zestátnění a k oddělení plzeňského závodu Škoda. O rok později se k závodu v Mladé Boleslavi připojují závody ve Vrchlabí a v Kvasinách. [6]

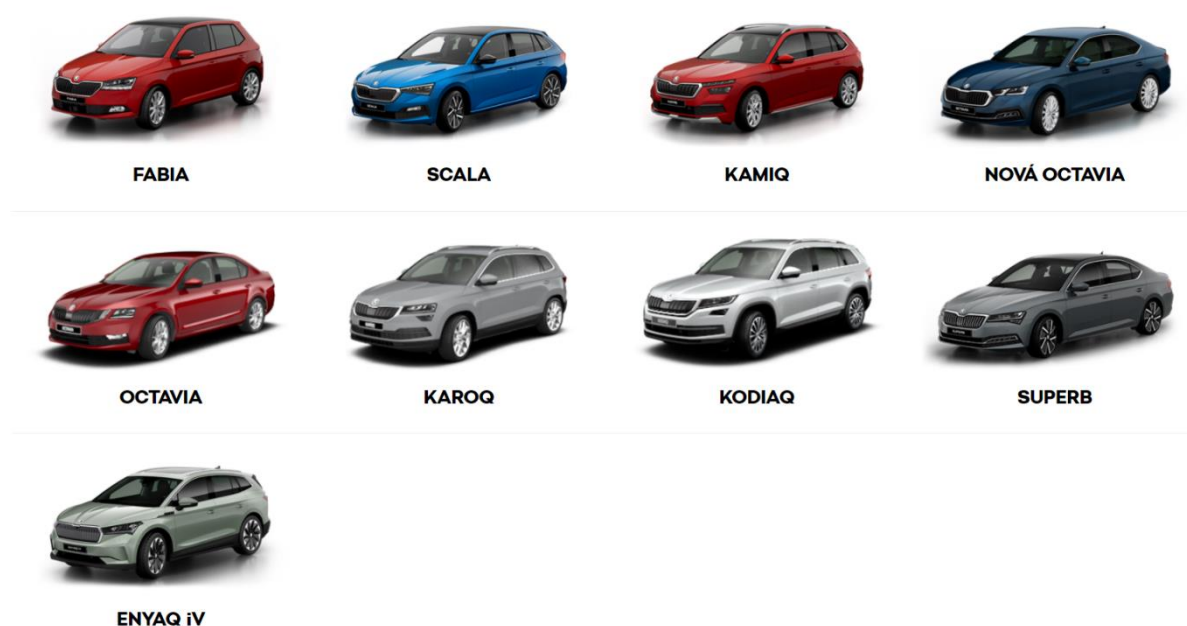
Roku 1964 ŠKODA staví výrobní linku pro tlakové lití hliníku, aby mohla spustit první velkosériovou produkci agregátů pomocí technologie tlakového lití hliníku na světě. Tyto agregáty se využívají ve vozidlech ŠKODA 1000 MB, která se objevují tentýž rok na trhu a jsou vybavena motorem vzadu. Ke změně konceptu na moderní verzi vozu s motorem vpředu, pohonem předních kol a kompaktní

karoserií s velkým zadním víkem dochází v roce 1987 s modelovou řadou FAVORIT. [6]

Po politickém převratu v roce 1989 se hledá silný partner a roku 1990 je českou vládou vybrán Volkswagen. Od roku 1991 se česká značka stává součástí koncernu jako čtvrtá značka (po VW, Audi a SEAT). FAVORIT je po více než 1 milionu vyrobených kusů nahrazen typem FELICIA, který je prvním společně vyvinutým typem od spojení s Volkswagen a který zůstává nejběžnějším vozidlem na českých silnicích i 10 let po ukončení výroby (tj. v roce 2011). [6,7,10]

b) Současnost

Od spojení s Volkswagen Group Škoda Auto a.s. zvýšila počet dodávek po celém světě více než sedminásobně (1,3 mil. vozů 2018, 1,2 mil vozů 2019). Škoda Auto a.s. pracuje na řadě ekologických modelů na zemní plyn a v roce 2019 vstoupila do éry e-mobility plně elektrickým vozidlem Citigo^e iV a hybridními modely, jako je např. SUPERB iV nebo později OCTAVIA iV. Nyní ŠKODA nabízí i špičkové SUV ENYAQ iV, se kterým se vrátila možnost hnané zadní nápravy a který je stavěn na modulární platformě MEB speciálně vyvinuté pro elektrické vozy. [6,7,11]



Obrázek 11 Aktuální nabídka vozů [11]

3.2 Hlavní funkční prvky zařízení

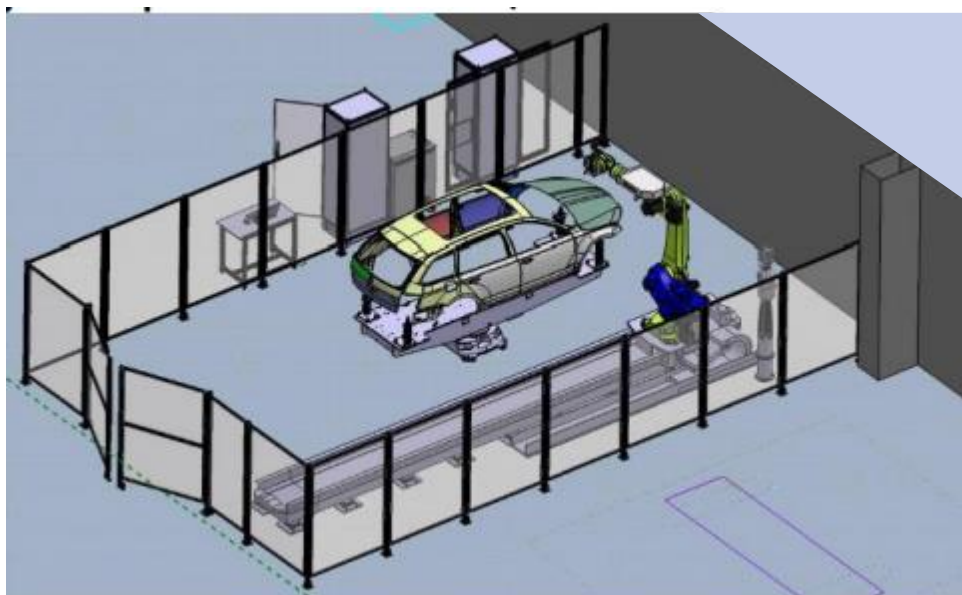
Nově vytvářený kalibrační postup se nevztahuje výhradně na jedno zařízení, ale na vícero typů, které si jsou principem podobné. Ve Škoda Auto a.s. se vyskytují různé kombinace těchto přístrojů umístěných v laboratořích, ale i ve výrobě nebo na montážní lince. Může se jednat o sestavy typu:

- a) laboratorní buňka 1: 2 x laser tracker, 2 x robotické rameno na pojezdové dráze, 1 x pevný stůl (účel: prokazování shody výrobku - karoserie se specifikací (pro tento účel jsou dále využívány také mobilní zařízení využívající laser trackery), dlouhé programy s tisíci měřeními prvky),



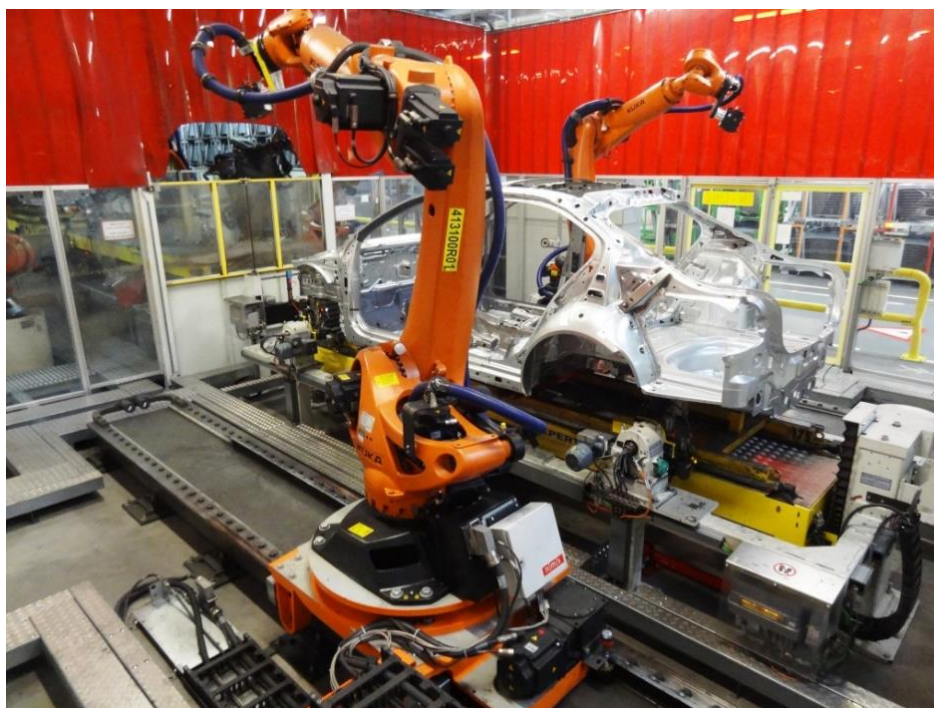
Obrázek 12 Laboratorní buňka 1

- b) laboratorní buňka 2: 1 x laser tracker, 1 x robotické rameno na pojezdové dráze, 1 x otočný stůl (účel prokazování shody výrobku – karoserie se specifikací, dlouhé programy s tisíci měřeními prvky),



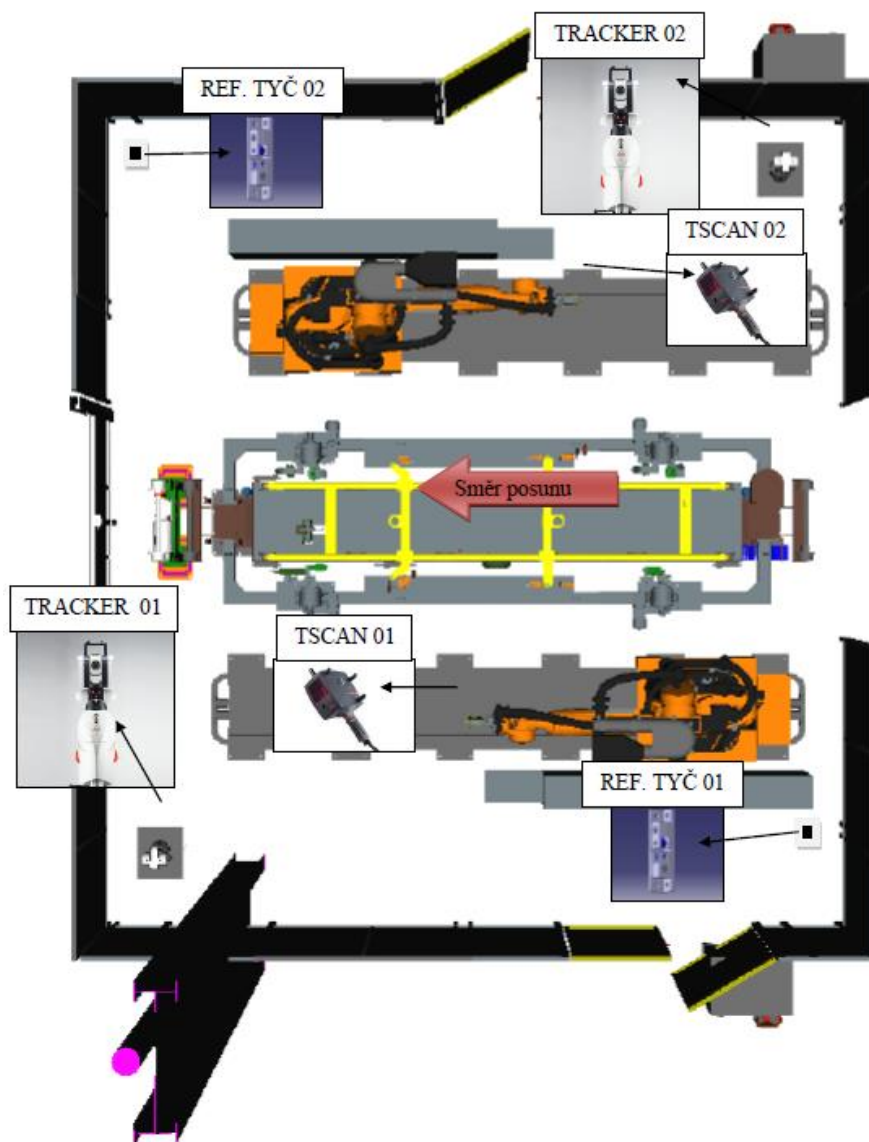
Obrázek 13 Laboratorní buňka 2

- c) měřová buňka pracující v taktu linky: 2 x laser tracker, 2 x robotické rameno na pojezdové dráze, 1 x posuvný samoustavovací stůl (účel: kontrola stability výrobního procesu, krátké programy v taktu linky (cca 1 minuta včetně ustavení do souřadnicového systému, kontrola vždy jen několika bodů, na následující karoserii kontrola další skupiny bodů).



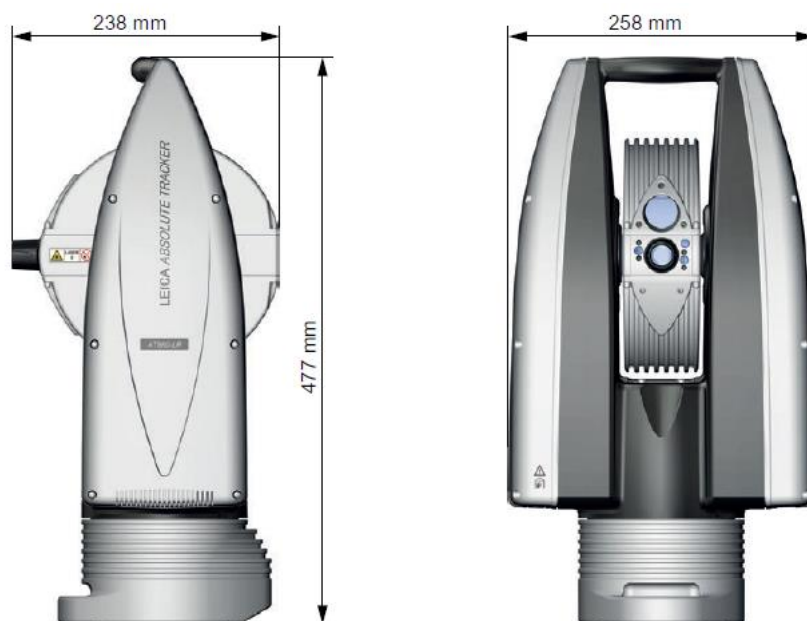
Obrázek 14 Měřová buňka pracující v taktu linky

Dále se tyto sestavy mohou lišit typem robotického ramena a uživatelským softwarem (PC-DMIS / PolyWorks). Níže se zaměříme na důležité komponenty, které jsou obsažené v sestavách.



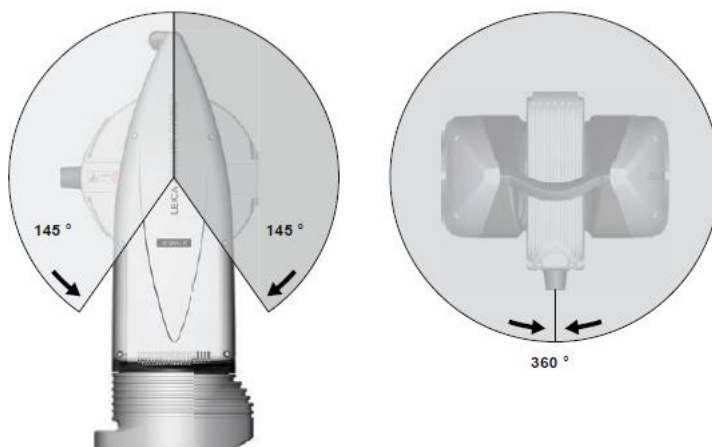
Obrázek 15 Layout inline buňky [23]

3.2.1 Leica Absolute tracker AT960



Obrázek 16 Leica AT 960 rozměry [15]

Leica Absolute Tracker AT960 je robustní přenosné laserové zařízení typu „vše v jednom“⁹ určené pro měření velkých objemů. Toto řešení má 6 stupňů volnosti (klíčové jsou azimut 360° a elevace ±145°) a možnost měřit pomocí sondy, skeneru, automatizovanou kontrolu nebo měření pomocí reflektoru. [16]



Obrázek 17 Leica AT 960 azimut a elevace [15]

Díky absolutnímu interferometru (AIFM) je možné provádět přesná měření i pohyblivého cíle. AT960 je schopné měřit objekty až do rozměru 120 m (průměr snímané oblasti) rychlostí až 1 000 bodů za sekundu a díky kompatibilitě

⁹ Umožňuje měření pomocí sondy, skeneru, reflektoru i automatizovanou kontrolu.

s reflektory, sondou Leica T-Probe, scannerem Leica T-Scan a přístrojem Leica T-Mac (popsány dále v práci) je vhodné pro velký počet různých aplikací. [15,17]

3.2.1.1 Komponenty nástroje



Obrázek 18 Sestava laser trackeru [15]

- a) přepravní rukojeť
- b) snímač integrující AIFM (Absolutní interferometr), PowerLock, 6DoF (6 Degrees of Freedom) měřicí kameru a přehledovou kameru
- c) PowerLock
- d) stavové LED diody
- e) LED PowerLock
- f) přehledová kamera
- g) koaxiální optika pro měření úhlu a vzdálenosti a výstupní port pro viditelný laserový paprsek IFM a neviditelný ADM
- h) rotující hlava
- i) konektor kabelu senzoru [15]

Měřič absolutní vzdálenosti (ADM – Absolute Distance Meter)

Tento typ zařízení je vybaven měřičem absolutní vzdálenosti, který produkuje neviditelný laserový paprsek vycházející z objektivu dalekohledu. Tento laser je dle IEC 60825-1 (2014-05): „Bezpečnost laserových produktů“ klasifikován jako laser

třídy 1, tedy je bezpečný za rozumně předvídatelných provozních podmínek a nepoškozuje zrak, je-li používán a udržován v souladu s pokyny výrobce. Základní parametry paprsku jsou uvedeny v následující tabulce. [15,16]

Tabulka 6 Vlastnosti paprsku měřiče absolutní vzdálenosti [16]

Popis	Hodnota
vlnová délka	795 nm
maximální průměrný zářivý výkon	0,53 mW cw
průměr paprsku	~ 10 mm
paprsková divergence	< 1,5 mrad (kolimovaný)
princip činnosti	Modulace polarizace
rozlišení	0,1 μm
přesnost (MPE)	$\pm 10 \mu\text{m}$

Laser Interferometer

Do AT960 je zabudovaný laserový interferometr produkující viditelný laserový paprsek (spadající také do třídy 1 dle IEC 60825-1 (2014-05)), který vychází z objektivu. Základní parametry tohoto paprsku jsou uvedeny v tabulce níže. Spolu s ADM tvoří jednotku AIFM (Absolutní Interferometr) určenou pro měření jedné vzdálenosti a kombinující přesnost ADM a rychlost interferometru. Dokáže tak poskytovat naměřené údaje rychle a přesně bez použití výchozího bodu. [15,17]

Tabulka 7 Vlastnosti paprsku interferometru [15]

Popis	Hodnota
vlnová délka	633 nm
maximální průměrný zářivý výkon	0,30 mW cw
vyzařovací clona	5,5 mm
paprsková divergence	< 1,5 mrad
rozlišení	0,3 μm
přesnost (Stabilizace vlnové délky)	$\pm 0,2 \text{ ppm}$

Přehledová kamera

Díky barevné přehledové kameře s vysokým rozlišením může obsluha vzdáleně sledovat zorné pole trackeru a zaměřovat cíle pro měření pomocí pevných reflektorů. Tato možnost je ideální pro statická zařízení se skrytými body. [17]

Meteostanice

Pro detekci okolního prostředí monitoruje teplotu, tlak a vlhkost integrovaná meteostanice. Pomocí získaných hodnot je možné kompenzovat změny a zajistit přesné měření bez ohledu na vnější vlivy. [17]

PowerLock

Díky funkci PowerLock v případě přerušení zorného paprsku dojde k automatickému obnovení v zorném poli +/- 5 stupňů bez zásahu obsluhy. [17]

Integrovaný objektiv mini variozoom

Objektiv s konstantním zorným polem umožňuje přesné snímání, skenování a řízení strojů, protože poskytuje možnost měření v šesti stupních volnosti (6DoF) za jakýchkoli světelných podmínek. [17]

AT Controller

Controller je vybavený dotykovým barevným displejem, který zobrazuje základní informace na různých stránkách (Úvodní obrazovka, Obrazovka aktualizace softwaru, Obrazovka napájení, síťového připojení, meteoinformace...). Dále je možné k němu připojit Ethernet (LAN), kabel T-Probe, napájecí kabel, konektor pro teplotní čidlo atd., díky kterým může uživateli na displeji podat celkový přehled o situaci. [15]

3.2.2 Leica T-Scan 5

Spojením Leica T-Scan 5 a Leica Absolute Tracker dochází ke zlepšení vlastností systému. Mezi zlepšené vlastnosti patří schopnost snímat body na mnoha typech povrchu (matný černý, vysoce reflexní, povrch z uhlíkových vláken), vyšší rychlost skenování (až 210 000 bodů za sekundu), dvojbarevné vodící světlo nebo akustická signalizace. [21]



Obrázek 19 Leica T-scan 5 [19]

3.2.2.1 Skenovací modul

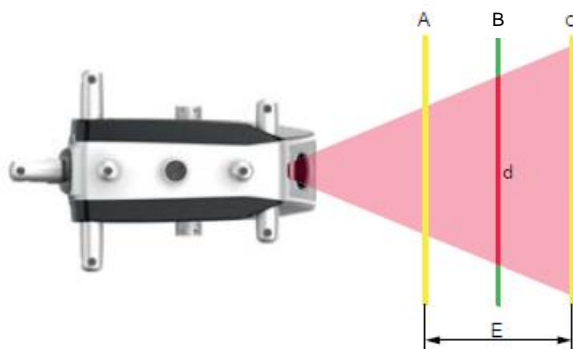
Skenovací modul zabudovaný do produktu vysílá viditelný červený laserový paprsek, který vychází ze skenovacího okna. Tento laser je dle IEC 60825-1 (2014-5): „Bezpečnost laserových produktů“ klasifikován jako laser třídy 2, tedy je bezpečný pro krátkodobé střety se zrakem, ovšem v případě dlouhodobého hledění do paprsku (zejména za špatných světelných podmínek) může paprsek způsobit oslnění nebo oslepení. Základní parametry jsou uvedeny v tabulce níže. [19,20]

Tabulka 8 Vlastnosti paprsku skenovacího modulu [19]

Popis	Hodnota
vlnová délka	660 nm
maximální zářivý výkon	< 1 mW
doba trvání pulzu	Spojité vlna
paprsková divergence	Spojité vlna
frekvence opakování pulzu	0,784 rad x 0,003 rad

3.2.2.2 Princip funkce

T-scan je triangulační skener využívající opticky zesílenou laserovou linii pozorovanou 2D zobrazovacím senzorem. Pracovní rozsah je přibližně 50 mm, střední pracovní vzdálenost (tj. vzdálenost od pouzdra ke středu pracovního rozsahu) neboli stand-off činí 150 mm a použitelná šířka v této vzdálenosti je přibližně 100 mm. [19]

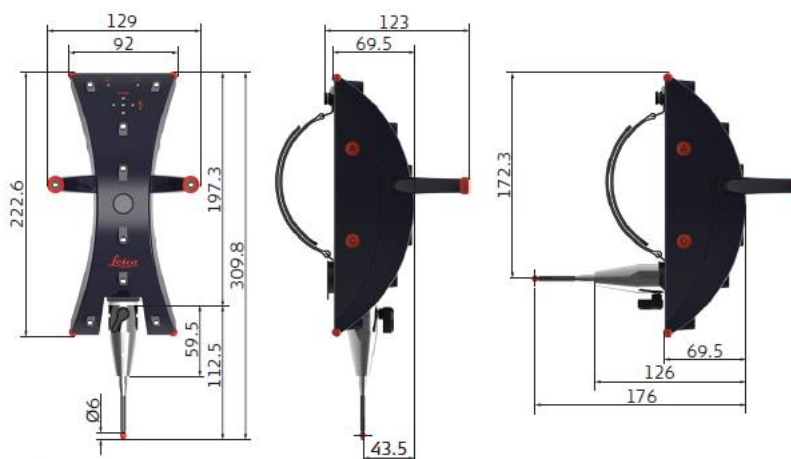


Obrázek 20 Stanovení vzdáleností T-scan 5 [19]

- A) Minimální pracovní vzdálenost
- B) Střední pracovní vzdálenost (stand-off)
- C) Maximální pracovní vzdálenost
- D) Šířka skenování při stand-off
- E) Pracovní rozsah [19]

3.2.3 Leica T-Probe

T-Probe je volně pohyblivé měřicí zařízení spolupracující s Leica Absolute Trackerem s možností připojení různých doteků pro měření jednotlivých bodů i mraku bodů. Rychlost výstupu je až 1000 bodů za sekundu. [22]



Obrázek 21 Leica T-Probe [18]

4 Přesnost zařízení

V rámci vytvoření nového kalibračního postupu bylo nutné změnit i specifikace přesnosti jednotlivých zařízení z důvodu spojování zkoušek (definice jednotlivých chyb) do jedné celkové chyby měření. Tato nová specifikace musela být projednána a odsouhlasena nejen s uživatelem konkrétního typu zařízení (s ohledem na prováděné měřicí úkoly a tolerance), ale i se zástupcem dodavatele (servisní firmou), aby nová přesnost nebyla rozporována z důvodu podkročení původní (výrobce stanovené) přesnosti zařízení.

4.1 Přesnost Leica AT960

Přesnost měření pomocí Absolute Trackeru závisí na individuální přesnosti následujících komponent:

- a) měření úhlů,
- b) měření vzdálenosti,
- c) reflektory. [15]

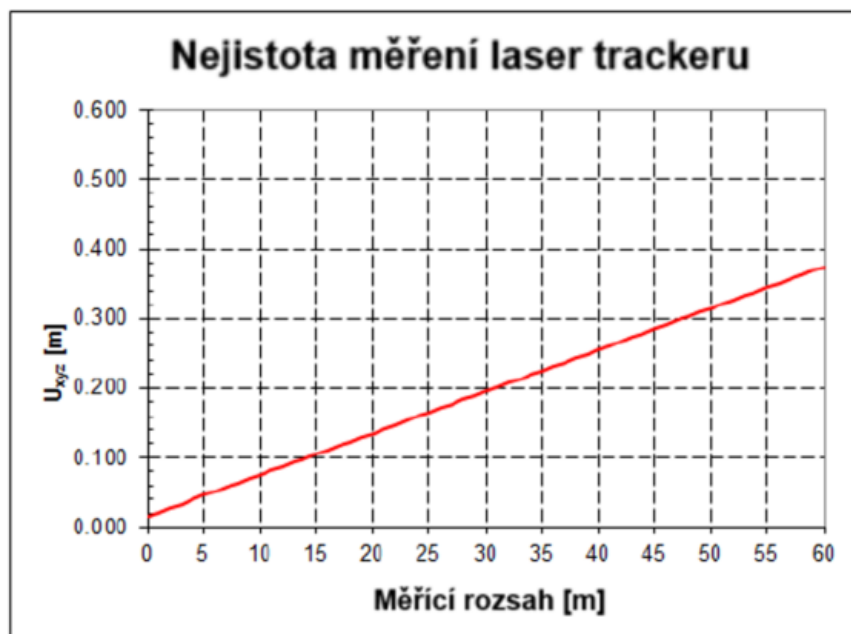
4.1.1 Nejistota měření

Nejistota měření souřadnice " U_{xyz} " je definována jako odchylka mezi měřenou souřadnicí a jmenovitou souřadnicí měřeného bodu. Tato nejistota je specifikována jako funkce vzdálenosti mezi laserovým sledovačem a měřeným bodem. Všechny přesnosti jsou specifikovány jako maximální přípustná chyba

(MPE) a počítají se s využitím přesných 1,5“ kruhových reflektorů Leica, není-li dohodnuto jinak. [15,16]

Tabulka 9 Nejistota měření " U_{xyz} " pro AT960 [15]

Rozsah	Nejistota
U xyz (MPE)	$\pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m} / \text{m}$



Obrázek 22 Nejistota měření laser trackeru [15]

4.2 Přesnost Leica T-Scan 5

4.2.1 Prostorová délka „ U_L “ (Length)

Nejistota prostorové délky „ U_L “ je definována jako odchylka měřené délky od její nominální hodnoty. Tato odchylka je specifikována jako funkce nejkratší vzdálenosti mezi laser trackerem a měřenou délkou. Délka může být až 6 m a je umístěna kolmo na laserový paprsek. Na konci referenční délky jsou dvě pevně připevněné koule s poloměrem 15-20 mm, jejichž středy představují nominální vzdálenost. Naměřená vzdálenost mezi středy koulí se vypočítá pomocí naskenovaných dat ze čtyř stran. [19]

Tabulka 10 Nejistota měření prostorové délky „ U_L “ [19]

Nejistota měření prostorové délky	
$U_L < 8,5 \text{ m}$	$\pm 60 \text{ }\mu\text{m}$
$U_L > 8,5 \text{ m}$	$\pm 26 \text{ }\mu\text{m} + 4 \text{ }\mu\text{m} / \text{m}$

4.2.2 Poloměr koule „ U_R “ (Radius)

Nejistota měření koule „ U_R “ je definována jako odchylka měřeného poloměru koule od jeho jmenovité hodnoty. [19]

Tabulka 11 Nejistota měření poloměru koule „ U_R “ [19]

Nejistota měření poloměru koule	
$U_R < 8,5 \text{ m}$	$\pm 50 \text{ }\mu\text{m}$
$U_R > 8,5 \text{ m}$	$\pm 16 \text{ }\mu\text{m} + 4 \text{ }\mu\text{m} / \text{m}$

4.2.3 Povrch koule „ U_S “ (Sphere)

Nejistota měření povrchu koule „ U_S “ je definována jako celková hodnota odchylky povrchu koule od nejlépe vhodné koule. Tato hodnota se počítá ze všech měřených bodů. Nejistoty měření jsou specifikovány jako funkce vzdálenosti mezi laserovým sledovačem a koulí. Specifikace předpokládá referenční kouli s poloměrem mezi 10 mm a 50 mm. Poloměr koule a povrch koule se vypočítají pomocí dat všech čtyř měřených stran. [19,20]

Tabulka 12 Nejistota měření povrchu koule „ U_S “ [19]

Nejistota měření povrchu koule	
U_S	$\pm 85 \text{ }\mu\text{m} + 1,5 \text{ }\mu\text{m} / \text{m}$

4.2.4 Rovinný povrch „ U_P “ (Plane)

Nejistota měření rovinného povrchu „ U_P “ je definována jako celková hodnota odchylky rovinného povrchu od nejlépe vyhovujícího povrchu. Tato hodnota se počítá ze všech měřených bodů. Rovinná plocha se vypočítá pomocí dat všech čtyř měření. [19,20]

Tabulka 13 Nejistota měření rovinného povrchu „ U_p “ [19]

Nejistota měření rovinného povrchu	
U_p	$\pm 80 \mu\text{m} + 3 \mu\text{m} / \text{m}$

4.3 Přesnost Leica T-Probe

Nejistota měření U_{xyz} je definována jako odchylka mezi měřenou souřadnicí a jmenovitou souřadnicí měřeného bodu. Tato nejistota měření je specifikována jako funkce vzdálenosti mezi laserovým sledovačem a měřeným bodem. [18]

Tabulka 14 Nejistota měření U_{xyz} pro T-Probe [18]

Rozsah	Nejistota
U_{xyz} (MPE)	$\pm 35 \mu\text{m}$

Ke stávající nejistotě U_{xyz} AT960 je potřeba přidat další nejistotu od T-Probe. [18]

5 Analýza stávajícího kalibračního postupu

První nasazení těchto zařízení ve společnosti ŠA bylo ve výrobní lince. Jeho účelem bylo sledování stability procesu a kalibrace / kontrola probíhala výhradně v době odstávky výrobní linky, byla spojena se servisem zařízení a zkoušky prováděli výhradně pracovníci servisní firmy. Nevadilo tedy, že kalibrace se prováděla „ručně“ (ne v CNC režimu) a byla nutná demontáž snímacího systému z robotu. S nasazením robotických pracovišť využívajících laser trackery v útvarech kvality, kde jsou využívány pro prokázání shody se specifikací, přestal tento postup kalibrace splňovat všechny požadavky a bylo nutné některé jeho části a metody přepracovat.

5.1 Popis kalibračního postupu

5.1.1 Kontrola mechanických částí / vyčištění optických částí systému

V rámci prvotní přípravy měřidel je potřeba nejprve zkontrolovat všechny součásti měřidla, jeho kompletnost a nepoškozenost. Zkontroluje se, zda-li nemá měřidlo vnější poškození, jestli je správné umístění a zapojení kabelů a jestli

nejsou koncovky povytažené, popř. poškozené. Součástí měřidla jsou i referenční tyče, na kterých jsou umístěny reflektory. [23,24]

Následně je nutné zkontrolovat, že optické součásti měřidla nejsou znečištěné nebo nijak poškozené a v případě znečištění je nutné optiku vyčistit dle návodu. [23,24]

5.1.2 Podmínky prostředí

Kalibrace probíhá přímo ve výrobní lince a z toho důvodu je nutné dodržet následující podmínky:

- A) V buňce se nesmí nacházet karoserie.
- B) V buňce nesmí být přímé sluneční záření / jiný zdroj světla nebo tepla.
- C) V okolí buňky nesmí být provozovaná činnost, která může způsobit vibrace.
- D) V buňce nesmí být silné proudění vzduchu.
- E) V buňce se smí pohybovat jenom obsluha vykonávající kalibraci měřidla.

Dále je nutné dodržet výrobcem stanovené atmosférické podmínky, jelikož přesnost laserového interferometru je přímou funkcí atmosférických parametrů (teplota, tlak, vlhkost). [23,24]

5.1.3 Příprava a vyrovnání

Ve stávajícím kalibračním postupu je popsáno několik důležitých pokynů. Pro Laser Tracker i T-Scan postup definuje potřebu stabilizace etalonu na teplotu prostředí před kalibračním měřením a nastavení požadovaných parametrů v softwaru. Zvláště pro Laser Tracker je požadováno zahřívání po dobu 4 hodin před kalibračním měřením na místě kalibrace. T-Scan systém je nutné demontovat z robota a připravit pro ruční použití. [23,24]

Dále je definován „Způsobilý subjekt pro vykonání kalibrace měřidel“ jako osoba nebo právnická osoba, která má na kalibraci vypracované písemné postupy v souladu s návodem na nastavení a obsluhu vydaných výrobcem a má osvědčení výrobce nebo dovozce měřidla o vyškolení na obsluhu a kalibraci konkrétního typu měřidla, na kterém bude způsobilý subjekt vykonávat metrologickou kontrolu. K tomu je nutné použít kalibrační přípravky a přístroje s prokazatelně zabezpečenou metrologickou návazností. [23,24]

5.1.4 Kalibrace

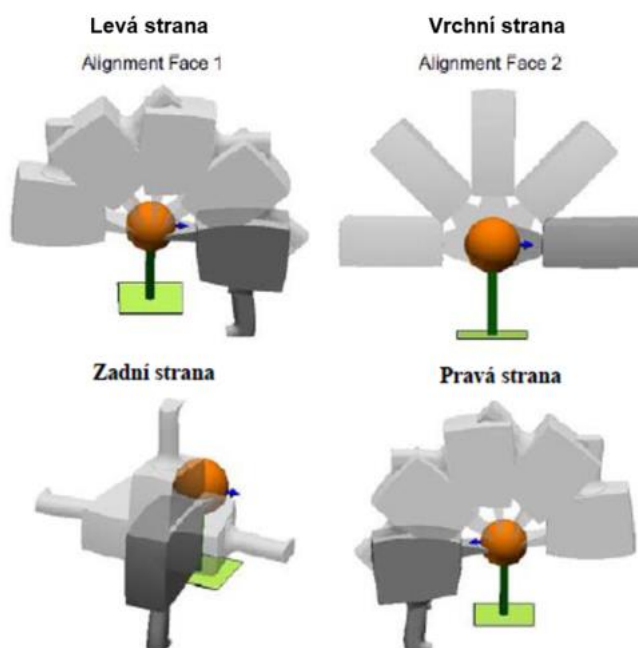
V případě kalibrace T-Scan se využije kalibrační koule s průměrem 90 - 110 mm. Tvarová chyba na průměru musí být menší nebo rovna požadovanému rozměru. Kalibrační měření probíhá separátně pro jednotlivé strany T-Scanu. Na obrázku 23 jsou znázorněny pozice T-Scan při měření. Při měření koule o průměru 100 mm je nutné provést každé měření s určitým posunutím z důvodu obsažení celého průměru koule. [23,24]

5.1.4.1 Použitý etalon a jeho umístění

Jako etalon je použita matná kalibrovaná koule o průměru 90 – 110 mm. Pro správnou funkci je nutné v softwaru nastavit (v kalibračním postupu uvedené) hodnoty následujících parametrů:

- 1) síť měřicích bodů, vzdálenost Čára – Čára [mm],
- 2) síť měřicích bodů, vzdálenost Bod – Bod [mm],
- 3) zkontrolovat úhel dopadu [ano/ne],
- 4) max. úhel dopadu [°].

Při kalibračním měření dle obrázku 23 s využitím posunutí se etalon se umístí na místo, kde je zaručena dobrá dostupnost a možnost nasnímání všech stran a které je časově stabilní bez přenosu vibrací z okolí. [23,24]



Obrázek 23 Polohy měření pro určení tvarové chyby [23]

5.1.4.2 Výsledky a vyhodnocení

Je třeba předem odstranit měřená data, která nejsou získaná z povrchu, který se měřil. Pro zjištění chyby měření se matematicky vypočítá střed koule, který se porovnává se středem referenční koule a toto porovnání probíhá zvlášť pro jednotlivá data naměřená z každé strany. Z absolutního rozdílu mezi měřeným středem jednotlivých koulí a středem referenční koule se získá chyba měření. [23,24]

Data, která byla generována při kalibraci, musí být dokumentována a uložena na příslušném počítači. V případě potřeby musí být možnost tato data zobrazit. Pro kalibraci Tracker systému v měřicích stanicích platí, že jsou vyhodnocena jako jeden celek. Z toho důvodu je nutné před začátkem měření zarovnat Tracker systém pomocí referenční tyče. [23,24]

5.1.5 Verifikace¹⁰

V případě měření v buňkách je postup totožný s postupem při kalibraci.

5.1.5.1 Tracker systém

Jako etalon pro měření délky slouží jedenáct kalibrovaných koulí s průměrem koule 30,00 mm, jejichž povrch má difúzní odraz. Tyto koule jsou rozmístěny a upevněny v kalibrované vzdálenosti 500 mm od sebe. Pro použití etalonu je nutné mít platný kalibrační certifikát a chyby kulového tvaru i vzdálenosti mezi středy by měly být známé s nejistotou menší, než je jedna pětina parametru kvality, která se má ověřovat. Instalace etalonu musí být na pevném podpurném zařízení tak, aby se vzájemná poloha mezi verifikační jednotkou a měřidlem během měřicího procesu neměnila. [23,24]

Jako lhůta kalibrace byl zvolen jeden rok. Použitým etalonem je v tomto případě Tyč s matnými koulemi, jejíž sestavení musí být provedeno podle návodu výrobce nebo dle pokynů zaškolené osoby a opět je nutné v softwaru nastavit výše zmiňované parametry na hodnoty uvedené v kalibračním postupu (jedná se o informace interního charakteru, tedy konkrétní hodnoty nemohly být zveřejněny). [23,24]

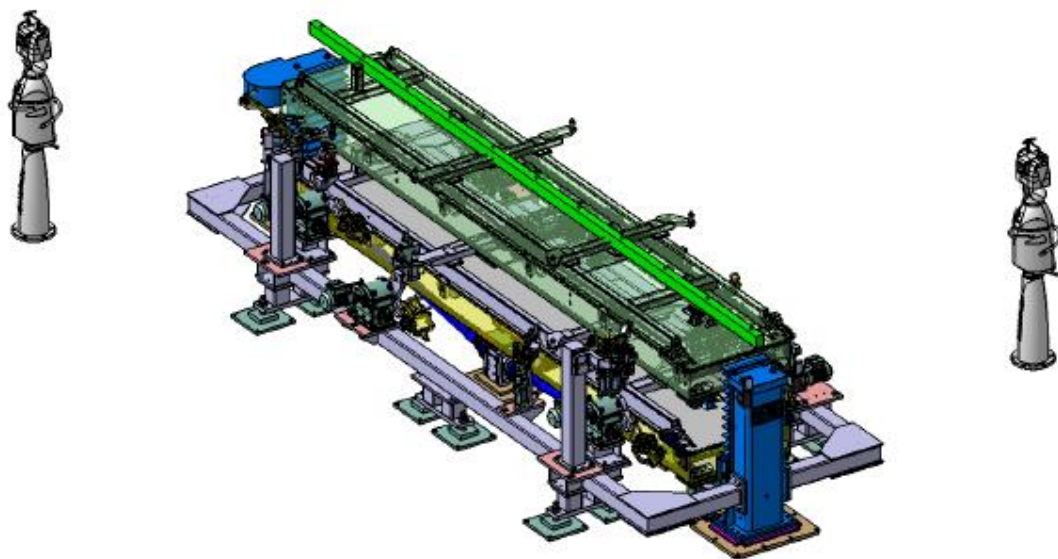
¹⁰ Verifikační zkoušky = zkoušky ověřující funkčnost přístroje

5.1.5.2 Umístění etalonu

Pro ověření je nutné umístit etalon tak, aby bylo možné ruční metodou provést měření v pěti pozicích oběma T-Scany. [23]

a) První pozice – Vodorovná poloha etalonu „H“

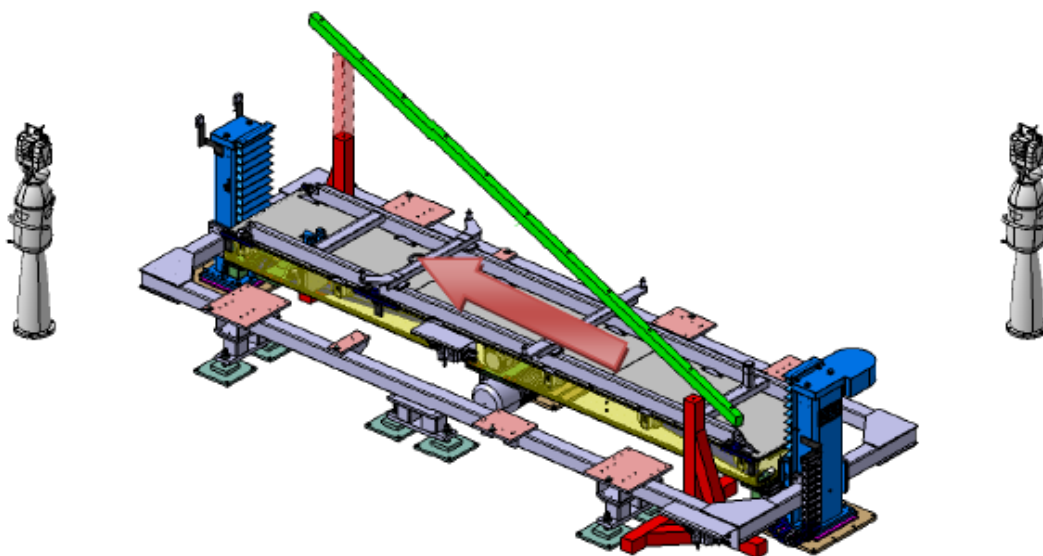
V buňce dojde k umístění etalonu do středu stolu a z důvodu stabilizace se vyčká požadovaný čas, než se začne s měřením. Poté se 3x vykoná kalibrační měření pomocí T-Scanu pro každý Tracker. [23]



Obrázek 24 První pozice - Vodorovná poloha etalonu „H“ [23]

b) Druhá pozice – Diagonální poloha etalonu „D1“

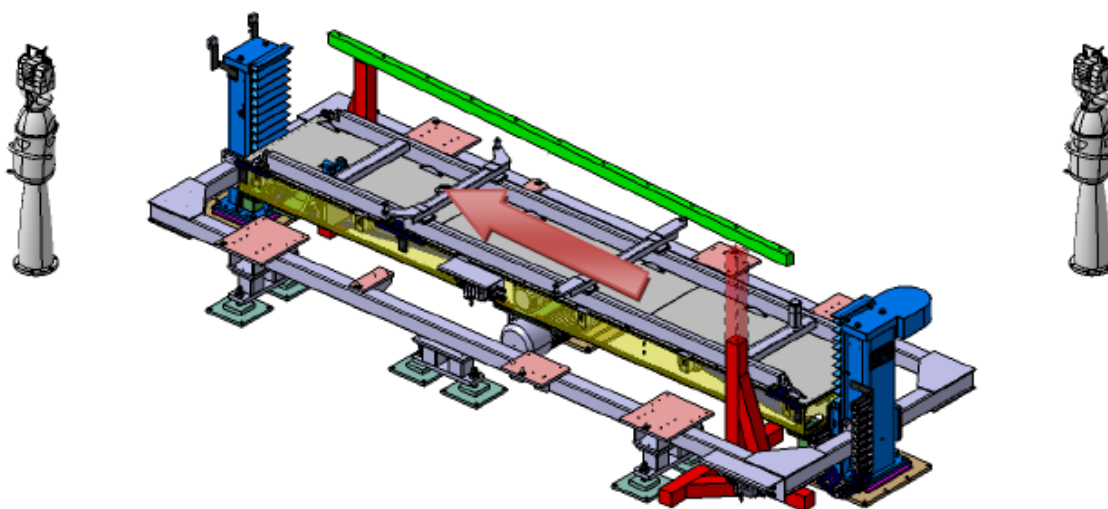
Pro diagonální uchycení etalonu, je nutné použít stojany, na které se pomocí šroubu M16 uchyť etalon z každé strany. Toto měření se pro každý Tracker provádí 1x. [23]



Obrázek 25 Druhá pozice – Diagonální poloha etalonu „D1“ [23]

c) Třetí pozice – Diagonální pozice „D2“

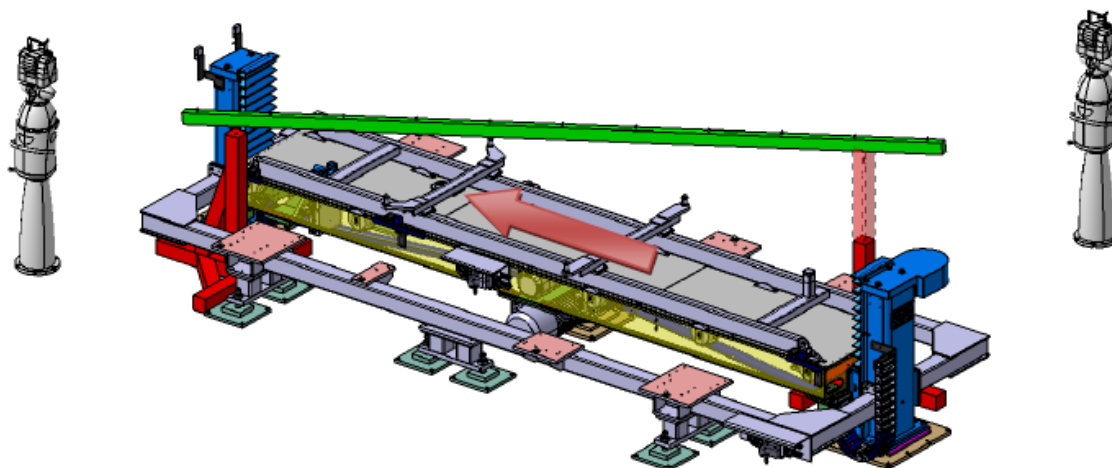
V tomto případě dochází ke změně diagonály, tedy je nutné etalon demontovat ze stojanů a poté uvolnit vertikální sloupy a vyměnit je mezi stojany. Po výměně se etalon opět upevní na stojany a provede se 1 měření pro každý tracker. [23]



Obrázek 26 Třetí pozice - Diagonální pozice „D2“ [23]

d) Čtvrtá pozice – Diagonální pozice „D3“

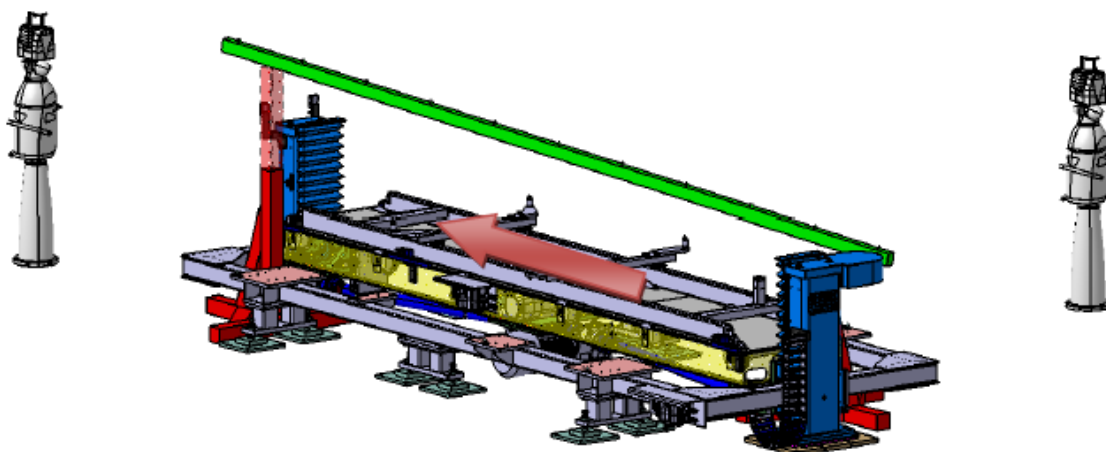
Při měření čtvrté pozice je opět nutné demontovat etalon ze stojanů a položit jej na stůl. Následně dojde k demontáži vertikálních sloupků a přesunutí stojanů na protější stranu, kde budou opět sestaveny. Po sestavení se na stojany upevní etalon a provede se 1 měření pro každý tracker. [23]



Obrázek 27 Čtvrtá pozice - Diagonální pozice „D3“ [23]

e) Pátá pozice – Diagonální poloha etalonu „D4“

V této fázi se mění diagonála, demontuje se etalon ze stojanů a položí na stůl. Uvolní se vertikální sloupy a vymění se mezi stojany. Po výměně dojde k upevnění etalonu na stojany a provede se 1 měření pro každý Tracker. [23]



Obrázek 28 Pátá pozice - Diagonální poloha „D4“ [23]

5.1.6 Vyhodnocení kalibrace

Matematickým výpočtem se určí rozměry kalibrační koule. Ještě před výpočtem je třeba odstranit měřená data, která nepochází z povrchu měřených artefaktů. Pomocí obou trackerů se složí koule a určí poloha jejího středu, jehož vzdálenost od předešlého středu je měřenou délkou. [23]

5.2 Shrnutí předností a nedostatků stávajícího postupu

Stávající kalibrační postup je odzkoušený a je ověřena jeho funkce a dostatečný rozsah zkoušek, ovšem odpovídá tehdejším potřebám a požadavkům. Celý postup byl vytvořen díky spolupráci firmy ŠKODA AUTO a.s. a NMS s.r.o., která má rozsáhlé zkušenosti s podobnými systémy. Dále tato firma provádí i servis zařízení, takže při odhalení problému je možné okamžitě zjednat nápravu. Hlavní nevýhodou postupu je potřeba ručního provedení měření. Jednotlivé scanery je nutné demontovat, ručně kalibrovat a následně upnout na původní pozici. Velký rozsah zkoušek spolu s nutností ruční kalibrace má také za následek velkou časovou náročnost celého procesu kalibrace. Pro ŠKODA AUTO a.s. je také nevýhodné, že kalibraci provádí externí firma, která má sice rozsáhlé zkušenosti s podobnými přístroji, ale provedení kalibrace je velice nákladné a interními kalibracemi by bylo možné ušetřit nemalé finanční náklady. Umožněním interních kalibrací firma také získá operativní výhodu a možnost provádět interní kalibrace i v případě pochybností o správnosti měření.

6 Návrh nového kalibračního postupu

Ve spolupráci se ŠKODA AUTO a.s. byl navržen nový kalibrační postup. Při návrhu kalibračního postupu byly brány v úvahu normativní požadavky, ovšem byly uzpůsobeny pro používaný měřicí objem. Z důvodu nevyužití celého rozsahu 360° byla například oproti normě tato oblast vymezena „pouze“ na kruhovou výseč technicky využitelnou v podmínkách měrové buňky. Dále bylo upuštěno od požadavku na měření ve velkých vzdálenostech, jelikož vzdálenosti byly omezeny rozměry měrové buňky.

Oproti stávajícímu kalibračnímu postupu došlo k redukci počtu poloh a celkovému urychlení kalibrace. Naopak v podmínkách prostředí byly přidány další požadavky dle interních předpisů¹¹ ŠA. Výhodou nového kalibračního postupu je také možnost interní kalibrace oproti nutnosti využití externích kalibračních firem, čímž dojde k velké finanční úspoře, a vysoké využití automatizace (původní kalibrace externími firmami byla prováděna ručně, tedy muselo dojít k demontáži některých prvků). Při automatické kontrole také odpadá nutnost demontáže snímacího systému a dochází k maximálnímu přiblížení běžnému způsobu měření a vyhodnocení v obvyklých podmínkách.

Kalibrační postup je nyní ve fázi testování. Jednotlivá pracoviště s jeho využitím provádějí kalibrace a podávají zpětnou vazbu. V závislosti na zaslaných naměřených hodnotách jsou vytvářeny a vyhodnocovány zkušební protokoly, na jejichž základě může dojít ke změnám samotného kalibračního postupu. Vzhledem k vytíženosti pracovníků i strojů (celá dosavadní práce probíhala za běžného provozu, kdy bylo nutné měřit, kalibrovat, pečovat o měřicí zařízení a zajišťovat úkoly pro kvalitní a plynulou výrobu) a dlouhé odstávce související s pandemií koronaviru, jsou hlavní testovací fáze postupu plánovány na dobu celozávodní dovolené. Bližší informace a případné úpravy nového kalibračního postupu z časového hlediska nemohou být obsahem této práce.

V Příloze 1 je ukázka jednoho z protokolů testování. V tomto případě nebyla použita správná matná kalibrovaná koule, která se bude při kalibracích využívat, ale lesklá zkušební koule, na které se pouze testuje trasování robotických ramen,

¹¹ Např. se v buňce během kalibrace nesmí nacházet karoserie a v okolí buňky nesmí být prováděna činnost způsobující vibrace.

jelikož její cena je podstatně nižší (rozdíl jednotek tisíc euro) než cena kalibrované matné koule. Dále došlo k umístění koule pod rovinu trackeru (i přestože norma doporučuje umístění ve stejné výšce). Ze stejných důvodů je také možné zveřejnit i naměřené hodnoty, jelikož ty neodpovídají reálnému stavu.

6.1 Popis nového postupu

Nový kalibrační postup obsahuje tyto kapitoly a podkapitoly, ke kterým je v této práci uveden pouze stručný popis se zveřejnitelnými informacemi.

1. Předmět kalibrace

- Kalibrace robotizovaných pracovišť optických měřicích zařízení pomocí hmotných etalonů rozměru
- Postup je určen nejen pro rekalibrace zařízení, ale po dohodě s dodavatelem i při převíjkách nových zařízení, po opravách, nebo pro mezilhůtovou kontrolu technického stavu zařízení.

2. Související normy a navazující předpisy

- ČSN EN ISO 10360-1:2001
- ČSN EN ISO 10360-10:2016
- ČSN EN ISO 14253-1:2018

3. Kvalifikace pracovníků provádějících kalibraci

- Měření v rámci kalibrace provádí operátor CMM.
- Potřebná znalost kalibračního postupu, návodů na sestavení a používání etalonu atp.

4. Názvosloví, definice

- Stanovení některých pojmů z ČSN EN ISO 10360-1:2001

5. Měřidla a pomůcky potřebné ke kalibraci

- Kalibrační koule matná o průměru 30 – 110 mm, těleso KOBA (Kolb and Baumann) o délce 5 m s 11 matnými koulemi, teploměr
- Nutnost prokazatelného zabezpečení metrologické návaznosti používaných kalibračních etalonů



Obrázek 29 Těleso KOBA

6. Obecné podmínky kalibrace

- Definovaná teplota, doba temperace, podmínky užití početní korekce, speciální podmínky pro průběh kalibrace přímo ve výrobní lince

7. Rozsah kalibrace

- Předběžná a vizuální kontrola, kontrola dodávky při přejímce po opravě, příprava ke kalibraci, zvolení vhodné metody kalibrace, funkční zkouška, měření jednotlivých parametrů

8. Předběžná a vizuální kontrola

- Kontrola kompletnosti, nepoškozenosti, koroze, plynulého chodu, vibrací, zajištění koncovek kabelů, kontrola a očištění optických částí systému

9. Zkouška měřidla

9.1. Kontrola dodávky při vstupní přejímce

- Dle smluvní dohody v souladu s metrologickým řádem a ostatními interními předpisy

9.2. Příprava ke kalibraci

- Příprava dokladu měřidla a technické dokumentace, zajištění kvalifikované obsluhy, spuštění zařízení a uvedení do optimálního stavu, konfigurace snímacího systému, příprava a temperování etalonů, zadání příslušných koeficientů pro měření, vytvoření / výběr měřících programů, dohodnutí

způsobu zpracování výsledků měření, použití filtrů, způsobu vyhodnocení, formy a formátu výstupu měření

9.3. Metody měření / rozsah zkoušek:

- Výběr metody závisí především na typu zařízení.
- Rozsah zkoušek při recalibraci určuje pracovník provádějící kalibraci na základě požadavku provozovatele a dle způsobu užívání stroje.

9.4. Měření metrologických parametrů

- Tento kalibrační postup vychází z principů ČSN EN ISO 10360, které jsou použitelné pro většinu 3D měřicích systémů. Cílem je zjistit chyby měření délek zobrazených na výstupním zařízení kalibrovaného stroje a chyby snímacího systému.
- Postup: zkoušky snímacího systému, zkoušky měření délky, doplňkové zkoušky (viz. kapitola postupu 16)
- Rychlost snímání a posuvů by měla být shodná jako při běžném měření.

10. Vyhodnocení a výrok o kalibraci

10.1. Vyhodnocení výsledků měření

- Porovnání hodnot zobrazených na výstupním zařízení kalibrovaného systému s konvenčně pravými hodnotami realizovanými etalonem (zkušebním tělesem)
- Vyhodnocení probíhá pomocí softwaru a vychází z ČSN EN ISO 10360
- Prokázání shody se specifikací se provádí ve smyslu ČSN EN ISO 14253-1, připouští se opravná měření (dle ČSN EN ISO 10360 / VDI / VDE 2617)
- Maximální zjištěná chyba snímání nesmí přesáhnout maximální dovolenou chybu stanovenou dodavatelem nebo provozovatelem.
- Hodnoty chyby polohy musí ležet v pásmu specifikace: $-MPE \leq E \leq +MPE$

chyba polohy = odchylka polohy středu naměřené koule k referenční kouli etalonu

- MPE = dolní mez tolerované chyby CMM

+ MPE = horní mez tolerované chyby CMM

E = naměřená chyba

V ostatních případech je výsledek měření: nevyhovuje, nebo vyhovuje s omezením.

10.2. Stanovení nejistoty měření při kalibraci

- Nejvýznamnější příspěvky nejistot jsou při vyhodnocování zohledněny a jsou v protokolu o kalibraci uvedeny.

10.3. Rozhodnutí o výsledku kalibrace

- Na základě vyhodnocení zkoušek rozhodne pracovník provádějící kalibraci, zda kalibrovaný stroj vyhovuje či nevyhovuje stanoveným požadavkům.
- Výsledek kalibrace se zanesou do dokladu měřidla a do protokolu o kalibraci.
- V případě, že některý z parametrů nebyl dodržen / hodnocen, ale tato skutečnost nebrání měření plánovaných úloh, výsledkem kalibrace bude „vyhovuje s omezením“, důvod omezení musí být uveden v protokolu i v dokladu měřidla.

11 Protokol o kalibraci, označení měřidla

11.1. Náležitosti protokolu

- Obsah, forma a úprava protokolu o kalibraci je dána interním předpisem ŠKODA Metrologie.

11.2. Kalibrační protokol

- Originál kalibračního protokolu se předá provozovateli, popř. zadavateli kalibrace.
- V elektronické formě je uložen do systému.

11.3. Jiné kalibrační záznamy

- Výsledky kalibrace se zanesou do dokladu měřidla.

12. Převzetí měřidla ke kalibraci, předání zkalibrovaného měřidla, reklamace

12.1. Převzetí měřidla ke kalibraci:

- Dle interních zásad

12.2. Předání měřidla po kalibraci:

- Dle interních zásad

12.3. Reklamace

- V případě, že objednatel kalibrace podá stížnost na provedenou kalibraci, přebírá tuto stížnost koordinátor IKM (Interní Kalibrační Místo).

13. Péče o kalibrační postup, revize

- Vlastníkem kalibračního postupu je IKM 1 a postup podléhá revizi.
- Originál je uložen v elektronické podobě.

14. Rozdělovník**15. Stanovení nejistoty kalibrace**

Nejistota kalibrace zařízení se v kalibračních protokolech uvádí formou:

- rozšířené nejistoty kalibrace etalonu U_E a podmínek prostředí při kalibraci,
- maximální dovolené chyby MPE_E etalonu a podmínek prostředí při kalibraci,
- výpočtu rozšířené nejistoty při kalibraci dle EA 4/02.

16. Průběh kalibrace**16.1 Two-face test**

Před započítáním pracných a časově náročných měření se provede výrobcem doporučená rychlá zkouška „two-face“.

- U trackerů AT 960 je od výrobce přímo nahráný program obdoby provedení two-face testu za využití odražečů na sloupkách v rozích měrové buňky. Tato alternativa je povolena.
- Pokud stroj neumožňuje provedení varianty a), provede se two-face test následujícím způsobem:

Do 3 metry vzdáleného místa se přibližně ve výšce trackeru do „hnízda“ (originální díl výrobce) umístí koule s reflektorem. Změří se poloha reflektoru. Tracker se v obou hlavních směrech rotace (azimut i elevace) otočí o 180° a znovu se přeměří poloha koule s reflektorem.

Pokud test (provedený podle varianty a) nebo b)) ukáže chybu větší, než je stanoveno, neprovádí se žádné další zkoušky.

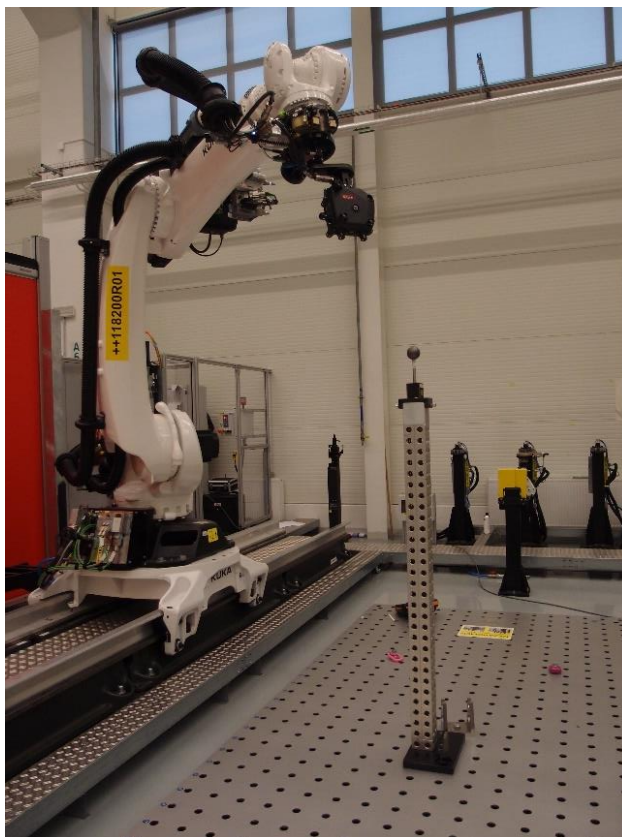
16.2 RMS test diod

Snímací systém (T-Probe nebo T-Scan) se umístí kolmo ve směru paprsku a nasnímá se poloha diod. Následně se snímací systém pootočí o úhel 10° - 15° a znovu se nasnímá poloha diod.

16.3. Zkoušky chyb snímání

Ve středu používaného měřicího objemu (nejčastěji 4 m od trackeru) se umístí matná kalibrační koule o průměru 30 – 110 mm. Pomocí každého jednotlivého reflektoru (na T-Scan 4 reflektory: levý, pravý, zadní, horní) se naskenuje maximální možná část koule.

Ze všech scanů (ze všech reflektorů) se vytvoří referenční koule. Vypočítá se pozice středu (v souřadnicích x,y,z), průměr koule a chyba tvaru (rozdíl mezi opsanou a vepsanou koulí). Ze scanů pořízených vždy jen jedním reflektorem se vytvoří 4 koule (1 koule pomocí pouze levého reflektoru, 1 pouze pomocí pravého reflektoru ...). Odchytky středů takto vytvořených koulí se porovnají s polohou středu referenční koule.



Obrázek 30 Kalibrovaná koule ve středu pracovního prostoru

V případě budoucího rozšíření kalibračního postupu o kalibrace T-Probe (dotkový snímač) bych doporučil postup maximálně dle normy (Z možných směrů a úhlů nasnímat vždy pomocí 25 bodů přilehlou polokouli. Ze všech bodů vytvořit referenční kouli a vypočítat pozici středu. Následně se vytvoří z každého jednotlivého směru snímání (z 25 bodů přilehlé polokoule) koule a vyhodnotí se odchylka polohy středu této koule od pozice referenční koule.).

16.4 Zkoušky měření délek

Normalizovaný postup je v případě trackerů zabudovaných do měřicích pracovišť těžko proveditelný, nebo i zbytečný (např. využívaná kruhová výseč je opravdu malá). Tomu je možné přizpůsobit i rozsah zkoušek.

Etalon KOBA se v pracovním prostoru umístí podélně (příčné umístění není možné z důvodu nedostatečné šíře buňky a v případě umístění do prostorové diagonály nedosáhne robotické rameno na vzdálenější konec etalonu). U každé

podélné stěny pracovního prostoru (v případě in line měřicí buňky vpravo/vlevo ve směru toku linky) se umístí úhlopříčně kalibrační těleso KOBA. Na levé straně je začátek tělesa dole a směřuje nahoru a na pravé straně je směr stoupání obrácený. Koule umístěné na tělese (celkem 11 kalibrovaných matných koulí) se nasnímají z jedné poloviny jedním T-Scanem a z druhé pooviny druhým T-Scanem umístěným na druhém robotickém rameni.¹²

¹² Dalším krokem bude popsání výsledků zkoušek, kdy operátoři CMM vytvoří dva programy měření. Jeden koule nasnímá ze všech stran snímacího zařízení (využití všech reflektorů). Druhý program by měl snímat jednotlivé části koulí za použití pokud možno pouze jednoho nebo dvou reflektorů. Z výsledků testu bude možné vyhodnotit a určit s jejich pomocí optimální způsob snímání a tedy i tvorbu měřicích programů. Z důvodu zpoždění souvisejícím s koronavirem (a dlouhou odstávkou výroby) zatím není dostatek podkladů pro stanovení optimálního způsobu měření.

7 Závěr

V bakalářské práci jsem se věnoval tvorbě kalibračního postupu optického robotického pracoviště pro kontrolu montáže karoserií ve společnosti ŠKODA AUTO a.s. a zpracování dostupných informací potřebných k tomuto úkolu.

Do první části jsem zapracoval informace o souboru norem ČSN EN ISO 10360, především pak normy ČSN EN ISO 10360-10, která pojednává právě o problematice laser trackerů. Tato část byla velice časově náročná i z toho důvodu, že část norem jsem měl k dispozici pouze v anglickém nebo německém jazyce.

Ve druhé části jsem se zaměřil na popis zařízení, pro které jsem tvořil nový kalibrační postup. Je důležité zmínit, že se nejedná pouze o jedno zařízení, ale ani o pouze jeden typ zařízení. S využitím nového postupu budou kalibrovány pracoviště po celé ŠKODA AUTO a.s., které budou mít stejné základní komponenty a/nebo princip funkce. Vyskytují se případy s využitím jiných robotických ramen, jiného softwaru, ale i jiné celkové koncepce měrové buňky.

Přesnost jednotlivých prvků zařízení, především pak trackeru AT960 a scanneru T-Scan 5, jsem rozebral ve třetí části své práce. Na závěr této pasáže je zmínka o Leica T-Probe, která se zatím ve ŠKODA AUTO a.s. na robotických pracovištích nepoužívá, ale je již pořízená a v budoucnosti bude možné rozšířit kalibrační postup o kalibraci tohoto komponentu.

Rozboru stávajícího kalibračního postupu jsem se věnoval ve čtvrté části. Tato část je velice důležitá, ovšem v některých případech se informace obsažené v práci mohou zdát poněkud obecné. K tomuto zobecnění informací došlo po konzultaci s NMS s.r.o., která je vlastníkem stávajícího postupu a nepřála si zveřejnění celého obsahu.

Obsahem páté části byl návrh nového kalibračního postupu, který by umožnil urychlení kalibrací, zvýšení jejich automatizace, umožnění provádění kalibrací v režii ŠKODA AUTO a.s. a tím i snížení nákladů. Jelikož jsou tyto postupy interního charakteru, není přidán celý postup, ale v práci je obsažena jeho osnova, ke které jsou doplněny pouze některé důležité zveřejnitelné informace.

Nový postup je nyní ve fázi testování, utváří se programy na trasování robotických ramen, hodnotí vhodnost použitých artefaktů a především je nutné otestovat dostatečný rozsah zkoušek, aby i přes zvýšení rychlosti kalibrace byla zachována kvalita ověření.

Do budoucna má tato práce velký potenciál. Již nyní je aplikovatelná na několik druhů zařízení v různých závodech společnosti ŠKODA AUTO a.s. v České republice. Výhledově bude možné na práci navázat a rozšířit ji o kalibraci Leica T-Probe, jejíž užívání je plánováno. Další možností rozšíření je přidání požadavku na kalibraci nejen v oblasti mezi robotickými rameny, ale i v jejich bočních prostorech. Některá pracoviště jsou konstrukčně řešena tak, že po stranách jejich hlavního společného měřicího prostoru jsou vytvořeny další měřicí prostory. Tyto prostory jsou vybaveny přípravky na ustavení jednotlivých dílů nebo otočnými stoly a jsou odděleny bezpečnostními přepážkami umožňujícími zvýšení produktivity robotických pracovišť. V době, kdy se v hlavním měřicím prostoru zakládá nový díl (připravuje se měření) laser trackery s roboty zatím provádí měření za bezpečnostními přepážkami. Třetí možností rozšíření je využití kalibračního postupu pro mezilhůtovou kontrolu systémů SmartCell.

V teoretické rovině je možné říci, že nový kalibrační postup splnil požadavky uvedené v zadání. Ovšem až důkladné dlouhodobé testování ukáže, jestli se postup osvědčí, nebo bude nutné vykonat úpravy, aby skutečně přinesl časové i finanční úspory a zachoval maximální kvalitu ověření.

8 Použitá literatura:

- [1] ČSN EN ISO 10360-10. *Geometrical product specifications (GPS) - Acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMS): Part 10: Laser trackers for measuring systems point -to-point distances*. Geneva: Česká agentura pro standartizaci, 2016.
- [2] Centrum technické normalizace: Jak funguje technická normalizace. *Česká společnost pro jakost* [online]. Praha: Česká společnost pro jakost [cit. 2021-01-27]. Dostupné z: <https://www.csq.cz/jak-funguje-technicka-normalizace/>
- [3] ČSN EN ISO 10360-1. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM): Část 1: Slovník*. Geneva: Český normalizační institut, 2001.
- [4] ČSN EN ISO 10360-13. *Geometrical product specifications (GPS) - Acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMS): Part 13: Optical 3D CMS*. Geneva: Český normalizační institut, 2017.
- [5] KLUS, Jakub. *MĚŘENÍ TĚŽKÝCH OBROBKŮ*. Brno, 2019. Bakalářská práce. VUT Brno.
- [6] Historie společnosti. *ŠKODA AUTO Česká republika | Oficiální web ŠKODA AUTO a.s.* [online]. Mladá Boleslav: ŠKODA AUTO, c2020 [cit. 2021-02-01]. Dostupné z: <https://heritage.skoda-auto.com/cs/vyvoj-loga/historie-spolecnosti/>
- [7] BRANDS & MODELS. *Volkswagen Group Homepage* [online]. Wolfsburg: Volkswagen Group, c2021 [cit. 2021-02-04]. Dostupné z: <https://www.volkswagenag.com/en/brands-and-models/skoda.html>
- [8] Group. *Volkswagen Group Homepage* [online]. Wolfsburg: Volkswagen Group, c2021 [cit. 2021-02-04]. Dostupné z: <https://www.volkswagenag.com/en/group.html>
- [9] Group. *Volkswagen Group Homepage* [online]. Wolfsburg: Volkswagen Group, c2021 [cit. 2021-02-04]. Dostupné z: <https://www.volkswagenag.com/en/brands-and-models/volkswagen.html>
- [10] Před deseti lety škodovka vyrobila poslední felicii. *AUTO.cz* [online]. Praha: CZECH NEWS CENTER, c2011 [cit. 2021-02-04]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/pred-deseti-lety-skodovka-vyrobila-posledni-felicii-59534>
- [11] ŠKODA AUTO modely. *ŠKODA AUTO Česká republika | Oficiální web ŠKODA AUTO a.s.* [online]. Mladá Boleslav: ŠKODA AUTO, c2020 [cit. 2021-7-1]. Dostupné z: <https://www.skoda-auto.cz/>
- [12] interní zdroje, školení Ing. František Dvořáček, Český metrologický institut, OI Liberec/Ing. Eva Pelcová, ŠKODA Akademie (Obecná metrologie a kalibrace měřidel)

- [13] *Zákon č. 505/1990 Sb., o metrologii*. In: Praha: ., 1990, ročník 1990, 505/1990. Dostupné také z: <https://www.mpo.cz/cz/podnikani/standardizace/metrologie/zakon-c--505-1990-sb---o-metrologii--118977/>
- [14] Femtosekundový generátor hřebene optických frekvencí. In: *Vítá Vás Český metrologický institut | Český metrologický institut* [online]. Brno: Český metrologický institut, 2008 [cit. 2021-02-04]. Dostupné z: <https://www.cmi.cz/sites/all/files/public/D1%20%284%29.JPG>
- [15] *Leica Absolute Tracker AT930-AT960 User Manual v1.2.0en*. Unterentfelden, c2015.
- [16] *Leica Absolute Tracker AT930-AT960 Quick Guide v1.2.0en*. Unterentfelden, c2015.
- [17] Leica Absolute Tracker AT960 | Hexagon Manufacturing Intelligence. *Hexagon Manufacturing Intelligence | Hexagon Manufacturing Intelligence* [online]. Praha: Hexagon Manufacturing Intelligence, 2021 [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/laser-tracker-systems/leica-absolute-tracker-at960>
- [18] *Leica T-Probe User Manual v3.1.0en*. Unterentfelden, c2016.
- [19] *Leica T-Scan User Manual v1.2.0en*. Unterentfelden, c2017.
- [20] *Leica T-Scan Quck Guide v1.2.0en*. Unterentfelden, c2017.
- [21] Leica T-Scan 5 | Hexagon Manufacturing Intelligence. *Hexagon Manufacturing Intelligence | Hexagon Manufacturing Intelligence* [online]. Praha: Hexagon Manufacturing Intelligence, 2021 [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/3d-laser-scanners/leica-tscan-5>
- [22] Leica T-Probe | Hexagon Manufacturing Intelligence. *Hexagon Manufacturing Intelligence | Hexagon Manufacturing Intelligence* [online]. Praha: Hexagon Manufacturing Intelligence, 2021 [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/laser-tracker-systems/leica-probing-solutions/leica-tprobe>
- [23] NMS Online AbsoluteScanCell AWPL DUO NMS_IP_201108 _002: POSTUP KALIBRACE VERIFIKACE IN LINE MĚŘICÍ BUŇKY. Praha, 2016.
- [24] Postup ověření měřicího systému Steinbichler T-TrackCS dle interního předpisu NMS_IP_201410_001. Bratislava, 2017.
- [25] KOŠŤÁK, Ondřej. *Schéma návaznosti měřidel*. Mladá Boleslav, 2014.
- [26] ÚNMZ, ČMI, ČIA, ČMS. *METROLOGIE V KOSTCE: Překlad dokumentu „Metrology in short, 3rd edition“*, © EURAMET e. V. Třetí upravené a doplněné vydání. Praha: Bořivoj Kleník, PhDr. – Q-art., 2009.

Seznam obrázků:

Obrázek 1 Návaznost etalonů [26].....	11
Obrázek 2 Femtosekundový generátor hřebene optických frekvencí [14] ..	11
Obrázek 3 Schéma návaznosti měřidel - obor délky [25].....	12
Obrázek 4 Schéma návaznosti měřidel [25]	13
Obrázek 5 SMR senzor [1].....	15
Obrázek 6 SRC senzor [1].....	15
Obrázek 7 Uspořádání měřených bodů [1]	20
Obrázek 8 Normou stanovené polohy etalonu [1].....	24
Obrázek 9 Druhá varianta volitelných pozic [1].....	28
Obrázek 10 Skupina Volkswagen [8]	31
Obrázek 11 Aktuální nabídka vozů [11]	32
Obrázek 12 Laboratorní buňka 1	33
Obrázek 13 Laboratorní buňka 2	34
Obrázek 14 Měrová buňka pracující v taktu linky	34
Obrázek 15 Layout inline buňky [23].....	35
Obrázek 16 Leica AT 960 rozměry [15]	36
Obrázek 17 Leica AT 960 azimut a elevace [15]	36
Obrázek 18 Sestava laser trackeru [15].....	37
Obrázek 19 Leica T-scan 5 [19].....	40
Obrázek 20 Stanovení vzdáleností T-scan 5 [19]	41
Obrázek 21 Leica T-Probe [18].....	42
Obrázek 22 Nejistota měření laser trackeru [15].....	43
Obrázek 23 Polohy měření pro určení tvarové chyby [23]	47
Obrázek 24 První pozice - Vodorovná poloha etalonu „H“ [23].....	49
Obrázek 25 Druhá pozice – Diagonální poloha etalonu „D1“ [23].....	50
Obrázek 26 Třetí pozice - Diagonální pozice „D2“ [23]	50
Obrázek 27 Čtvrtá pozice - Diagonální pozice „D3“ [23].....	51
Obrázek 28 Pátá pozice - Diagonální poloha „D4“ [23].....	52
Obrázek 29 Těleso KOBA.....	55
Obrázek 30 Kalibrovaná koule ve středu pracovního prostoru	60

Seznam tabulek:

Tabulka 1 Požadavky pro jednotlivé typy senzorů [1].....	17
Tabulka 2 Polohy pro měření "two-face" [1]	18
Tabulka 3 Přehled 41 základních pozic [1]	22
Tabulka 4 První varianta volitelných pozic – část 1 [1]	25
Tabulka 5 První varianta volitelných pozic – část 2 [1]	27
Tabulka 6 Vlastnosti paprsku měřiče absolutní vzdálenosti [16]	38
Tabulka 7 Vlastnosti paprsku interferometru [15]	38
Tabulka 8 Vlastnosti paprsku skenovacího modulu [19].....	40
Tabulka 9 Nejistota měření "Uxyz" pro AT960 [15]	43
Tabulka 10 Nejistota měření prostorové délky „UL“ [19].....	44
Tabulka 11 Nejistota měření poloměru koule „UR“ [19].....	44
Tabulka 12 Nejistota měření povrchu koule „US“ [19].....	44
Tabulka 13 Nejistota měření rovinného povrchu „UP“ [19].....	45
Tabulka 14 Nejistota měření Uxyz pro T-Probe [18]	45

Seznam použitých zkratk

ČMI – český metrologický institut

AKL – akreditovaná kalibrační laboratoř

RM – referenční materiál

CRM – certifikovaný referenční materiál

MPO – Ministerstvo průmyslu a obchodu

ISO – International Organization for Standardization

ÚNMZ – Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví

GPS – Geometrical product specifications

CMS – Coordinate measuring system

CMM – Coordinate measuring machine

SMR – Spherically mounted retroreflector

SRC – Stylus and retroreflector combination

ODR – Optical distance sensor and retroreflector combination

MPE – maximum permissible error

CTE – Coefficient of thermal expansion

m - metr

IFM – Interferometr

ADM – Absolute distance meter

SEAT – Sociedad Española de Automóviles de Turismo

MAN – Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg

RAF – Reichenberger Automobil-Fabrik

VW – Volkswagen

MEB – Modularer E-Antriebs-Baukasten

AT – absolute trackeru

mm - milimetr

AIFM – Absolutní interferometr

nm – nanometr

mW cW – miliwatt continuous wave

mrad – miliradián

μm – mikrometr

ppm – parts per million

rad – radián

LED – Light-Emitting Diode

LAN – Local area network

IEC – International Electrotechnical Commission

ASME – American Society of Mechanical Engineers

ŠA – Škoda Auto a.s.

DoF – Degrees of Freedom

Seznam příloh

Příloha 1 – Protokol two-face testu se zkušební lesklou koulí