



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

**NÁVRH UPÍNACÍHO PŘÍPRAVKU PRO
KONTROLU GEOMETRICKÝCH SPECIFIKACÍ
KAPOTÁŽE MINI RYPADLA NA CMM**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Autor: Bc. Martin Šilinger

Studijní obor: Výrobní a materiálové inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Petr Mikeš, Ph.D.

Praha 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Šilinger** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **393297**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh upínacího přípravku pro kontrolu geometrických specifikací kapotáže mini rypadla na CMM

Název diplomové práce anglicky:

Design of a fixture for the geometrical specifications inspection of the mini excavator fairing on CMM

Pokyny pro vypracování:

- 1) Možnosti kontroly plechových lisovaných dílů s využitím CMM .
- 2) Návrh upínacího přípravku.
- 3) Rozměrová kontrola navrženého přípravku.
- 4) Kontrola kapotáže rypadla s využitím navrženého přípravku.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Petr Mikeš, Ph.D., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

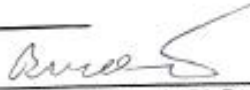
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:


Datum zadání diplomové práce: **30.10.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **17.01.2021**

Platnost zadání diplomové práce:


Ing. Petr Mikeš, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

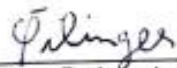

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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.

1. 12. 2020
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a veškeré podklady jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Praze dne

.....

Bc. Martin Šilinger

Poděkování:

Děkuji Ing. Petrovi Mikešovi, Ph. D. za odborné vedení mé diplomové práce.

Anotace:

Cílem této práce je návrh upínacího přípravku pro kontrolu kapotáže mini rypadla. V práci je popsán princip souřadnicových měřicích strojů, jsou zde uvedeny základní druhy CMM a popsány funkce softwaru měřicích strojů. Dále je popsán vývoj návrhu upínacího přípravku a jeho výsledná podoba. Výsledně je zde popsána rozměrová kontrola tohoto přípravku pomocí souřadnicového měřicího stroje a měření kapotáže pomocí tohoto přípravku.

Klíčová slova:

Souřadnicový měřicí stroj, CMM, upínací přípravek, kontrola kvality, mini rypadlo.

Annotation:

The aim of this diploma thesis is to design a measuring jig for checking the hood of the mini excavator. The work describes the principle of coordinate measuring machines, the basic types of CMM are listed and the functions of the measuring machine software are described. The development of the design of the measuring jig and its resulting form are described below. As a result, the dimensional control of this product using the coordinate measuring machine and the measurement of the hood using this product are described here.

Key words:

Coordinate measuring machine, CMM, measuring jig, quality control, mini excavator.

1.	ÚVOD.....	8
2.	BOBCAT DOOSAN EMEA, S.R.O.....	9
3.	SOUŘADNICOVÉ MĚŘÍCÍ STROJE PRO KONTROLU PLECHOVÝCH LISOVANÝCH DÍLŮ.....	12
3.1	PRINCIP SOUŘADNICOVÝCH MĚŘICÍCH STROJŮ	13
3.2	KONSTRUKCE KARTÉZSKÝCH SOUŘADNICOVÝCH MĚŘICÍCH STROJŮ	17
3.2.1	MOSTOVÝ CMM	18
3.2.2	PORTÁLOVÝ CMM	19
3.2.3	VÝLOŽNÍKOVÝ CMM	20
3.2.4	STOJANOVÝ CMM	21
3.3	CMM SE SFÉRICKÝM SOUŘADNÝM SYSTÉMEM	22
3.3.1	MĚŘÍCÍ RAMENA	22
3.3.2	LASER TRACKER.....	23
3.3.3	LASER SCANNER	24
3.4	MĚŘÍCÍ SOFTWARE	25
3.4.1	ZÁKLADNÍ FUNKCE CMM SW	26
3.4.2	NEJBĚŽNĚJŠÍ CMM SW	28
3.5	METROLOGICKÉ PODMÍNKY PRACOVNÍHO PROSTŘEDÍ	30
3.5.1	VLIV TEPLoty	31

4.	NÁVRH UPÍNACÍHO PŘÍPRAVKU.....	33
5.	ROZMĚROVÁ KONTROLA NAVRŽENÉHO PŘÍPRAVKU.....	46
6.	ROZMĚROVÁ KONTROLA KAPOTÁŽE POMOCÍ NAVRŽENÉHO PŘÍPRAVKU	56
7.	ZÁVĚR	64
8.	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	65
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	68
	SEZNAM TABULEK.....	70
	SEZNAM PŘÍLOH	70
	SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	71

1. Úvod

Rychlost technického a technologického vývoje zažívá strmý vzestup již od konce minulého století. Pokud se soustředíme na vývoj ve strojním průmyslu je vidět ohromný progres v hledání stále nových technických řešení, ale i ve využití nových technologií. Konkurence v jednotlivých strojírenských oborech je velmi silná a pro získání dominantního postavení na trhu je zapotřebí nejen uvést na trh něco inovativního, ale také zaručit perfektní provedení a funkčnost. Jedním ze způsobů, jak toho dosáhnout, je využití systému managementu kvality. Stejně jako na nová technická řešení se vývoj soustředí i na zdokonalení a zefektivnění způsobů kontroly kvality. Vhodným řešením pro tento účel v oblasti sériové výroby se zdá být vývoj speciálních měřicích či upínacích přípravků.

Zdokonalující se technologie přinášejí do odvětví metrologie nové a přesnější souřadnicové měřicí stroje, pomocí kterých jsou měřeny výrobky a díly ve většině průmyslových odvětví. Pro zajištění co nejpřesnější rozměrové kontroly dílů je zapotřebí dodržet několik základních pravidel – kvalifikaci souřadnicového měřicího stroje, správný výběr způsobu vyrovnání součásti a fixace dílu při měření. A právě téma vhodné fixace dílů je jedním z hlavních témat této práce. Využitím speciálních upínacích přípravků je zaručena vysoká přesnost měření, opakovatelnost a jednoduché použití. Dalšími výhodami spojenými s použitím upínacích přípravků je fixace dílu ve stabilní poloze, snadné seřizování a při správném navržení a přesné výrobě eliminuje okolní vlivy.

Společnost Bobcat se zaměřuje především na sériovou výrobu finálních produktů a jejich dílů. Pro rozměrovou kontrolu takových dílů je vhodné použití speciálních upínacích přípravků, pomocí kterých dojde k zajištění efektivní, snadno opakovatelné kontroly bez potřeby vysoce kvalifikované pracovní síly. Návrh jednoho takového upínacího přípravku je cílem této práce.

2. Bobcat Doosan EMEA, s.r.o.

Historie společnosti Bobcat se datuje do 1. poloviny 20. století, konkrétně do roku 1947, kdy v USA, v Severní Dakotě založil E. Gideon Melroe společnost Melroe Manufacturing Company. O rok později firma zahájila výrobu stroje Bobcat model M-200. Od července 2007 je firma Bobcat součástí korejské divize Doosan Infracore. Doosan je světový lídr v oblasti stavebních zařízení, energetických a vodních řešení, motorů a strojírenství. V Severní Dakotě se dnes nacházejí tři výrobní závody Bobcat, další jsou ve Francii, Číně a České republice. Na globálním trhu má společnost Bobcat vedoucí pozici v oblasti kompaktních zařízení používané pro stavebnictví, terénní úpravy, zemědělství atd. Díky neustálému vývoji a prostřednictvím diverzifikace produktů rozšiřuje podíl na světovém trhu napříč vícero odvětvími. [21] [20]



Obrázek 1 - Pobočky společnosti Bobcat ve světě [21]

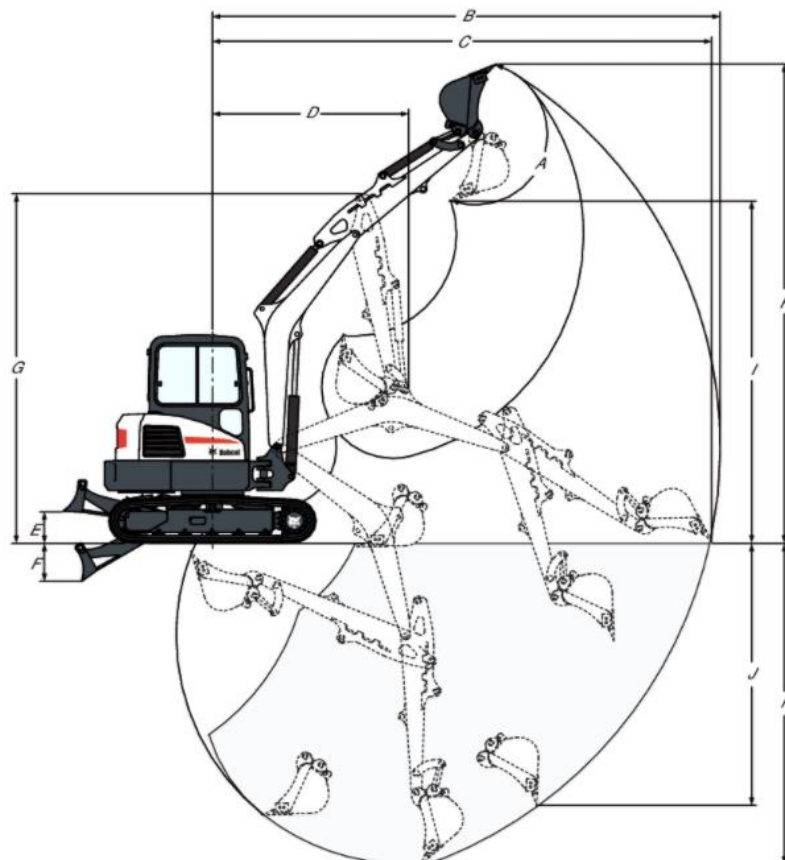
2.1 Bobcat E55 Compact Excavator

Upínací přípravek, o kterém pojednává tato práce, je navrhován na rozsah modelů mini rypadel výkonnostních řad E45, E50, E55 a E60 (hmotnostní kategorie 4 až 6 tun). Typickým představitelem této kategorie je model Bobcat E55 Compact Excavator.



Obrázek 2 - Bobcat E55 Compact Excavator [20]

Mini rypadlo Bobcat E55 je konvenční model, který nabízí velký výkon, hloubku kopání a výšku výsypu. Díky výkyvné zadní části je usnadněný pohyb stroje ve stísněných prostorech jako jsou dveře, brány nebo pohyb na přívěs. Mini rypadlo E55 je k dispozici s možností dlouhého ramene, které maximalizuje hloubku kopání, dosah a výšku výsypky. K dispozici jsou také možnosti použití úhlové čepele a svorky. [21]



(A)	Úhel otočení lžíce	185 °
(B)	Maximální dosah pracovního zařízení	6,191 mm
(C)	Maximální rypný dosah při zemi	6,083 mm
(D)	Maximální poloměr pracovního zařízení s výložníkem v maximální výšce a s plně zasunutou násadou	2,389 mm
(E)	Maximální výška opěry	385 mm
(F)	Maximální hloubka opěry	465 mm
(G)	Maximální výška pracovního zařízení se zasunutým ramenem	4,269 mm
(H)	Maximální výška zubů lžíce	5,850 mm
(I)	Maximální výsypaná výška	4,179 mm
(J)	Maximální svislá rypná hloubka za zdí	3,199 mm
(K)	Maximální rypná hloubka	3,923 mm

Obrázek 3 - Pracovní rozsah mini rypadla E55 [21]

3. Souřadnicové měřicí stroje pro kontrolu plechových lisovaných dílů

Tradiční systémy měření jsou dnes nahrazeny všude přítomnými souřadnicovými měřicími stroji (CMM). Během posledních čtyř desetiletí tyto CMM ve větší míře nahradily staré inspekční techniky, které obvykle používaly měřidla a zároveň zkrátily dobu a pracovní sílu potřebnou pro tyto životně důležité operace kontroly kvality. Souřadnicové měřicí stroje jsou nejčastěji používaným zařízením pro měření rozměrových a geometrických tolerancí dílů v průmyslové výrobě. Tyto stroje musí být schopny měřit s vysokou přesností a rychlostí tak, aby vyhověli požadavkům na produktivitu v průmyslových procesech. Přesnost souřadnicových měřicích strojů závisí na mnoha vnitřních i vnějších faktorech. Jedněmi z nejdůležitějších vnitřních faktorů ovlivňujících přesnost měření jsou vysoká přesnost mechanických součástí, jako jsou vedení a ložiska, přesná montáž stroje, efektivní elektronické ovládání a systém sondy. Dotyková sonda je velmi důležitou součástí souřadnicového měřicího stroje a měla by vykazovat vysokou přesnost při měření, aby bylo možné vypočítat související prvky a vyhodnotit rozměrové a geometrické tolerance. V minulosti bylo vyvinuto a otestováno mnoho technologií, od dotykových spínacích sond až po současné sofistikované skenovací sondy. [3][7]

Pro potřeby trhu byly vyvinuty a zavedeny různé typy souřadnicových měřicích strojů. Zvláštní třídou CMM jsou přenosná souřadnicová měřicí ramena, označovaná také jako souřadnicová měřicí zařízení s kloubovým ramenem (AACMM). Na rozdíl od tradičních kartézských souřadnicových měřicích strojů, kde se souřadnice měří fyzickými posuny ve třech lineárních osách, obsahují souřadnicová měřicí ramena řadu otočných a kloubových prvků spojených neměnnými spoji. Tato charakteristika umožňuje flexibilní 3D měření souřadnic ve sférickém pracovním prostoru až do několika metrů a poskytuje přesnost až setiny milimetru. [4]

3.1 Princip souřadnicových měřicích strojů

Měření pomocí CMM vždy zahrnuje tyto kroky:

- Kalibrace hrotu sondy s ohledem na vztažný bod hlavy sondy za normálního použití kalibrované koule (za předpokladu, že se použije elektromechanická trojrozměrná sonda)
- Určení polohy a orientace dílu (systém souřadnic dílu X_w , Y_w , a Z_w) ve vztahu ke strojovému souřadnicovému systému X_m , Y_m a Z_m
- Měření povrchových bodů na dílu
- Vyhodnocení geometrických parametrů dílu
- Znázornění nebo vykazování výsledků měření

Měřicí systém souřadnicových měřicích strojů měří souřadnice v prostoru povrchu měřeného objektu, které lze softwarově převést na rozměrové a geometrické charakteristiky, jako jsou délky, úhly, geometrické tvary, odchylky polohy atd. Princip činnosti CMM je založen na doteku měřicí sondy měřeného objektu. Sonda se pohybuje podél kartézských (XYZ), polárních a válcových souřadných systémů. Každá osa má svůj senzor, který monitoruje přesné umístění sondy na této ose s mikrometrovou přesností. Když se sonda dotkne povrchu objektu, CMM shromáždí data ze všech tří senzorů a vytvoří „mrak bodů“, který popisuje potřebný povrch objektu. Parametry dílu (např. průměr, vzdálenost, úhel, tvar a další) však nelze vyhodnotit přímo ze souřadnic měřených bodů. K vyhodnocení parametrů je zapotřebí analytický model dílu. Tento model se obvykle skládá z ideálních geometrických prvků, tzv. náhradních (matematických) geometrických prvků (ISO 2004a, 2005b; ASME 2009). Tyto prvky lze určit použitím vhodného geometrického prvku, který je pro měřený soubor dat nejvhodnější. Princip koordinované metrologie lze definovat jako:

- Generování souborů dat měřením skutečného dílu pomocí CMM
- Výpočet příslušných náhradních (matematických) geometrických prvků ve smyslu parametrů specifikujících velikost, formu, umístění a orientaci
- Vyhodnocení požadovaných vlastností měřeného dílu, například kombinací náhradních prvků a porovnáním s rozměry a tolerancemi ve výkresu

Měřicí systém, který je implicitně popsán touto definicí, tvoří základ technologie souřadnicového měření. Skládá se z následujících základních součástí:

- Mechanický rám se třemi osami a posuvnými snímači.
- Hlava sondy nesoucí senzor ke snímání souřadnic
- Řídicí jednotka
- Počítač s periferním zařízením (tiskárna, plotr atd.). Počítač je obvykle připojen k síti, odkud může získat programy a soubory CAD (Computer-aided Design) a může odesílat výsledky měření.
- Software pro výpočet a zobrazení výsledků měření. [5] [6]

Řídicí systém v CMM vykonává funkci živé interakce mezi různými komponenty stroje, jako jsou pohony stroje, snímače posunu, snímací systémy a periferní zařízení. Řídicí systémy lze klasifikovat podle následujících skupin CMM

- Manuálně řízené CMM
- Automaticky řízené CMM (DCC)
- Automaticky řízené CMM propojené s CAD, CAM atd.

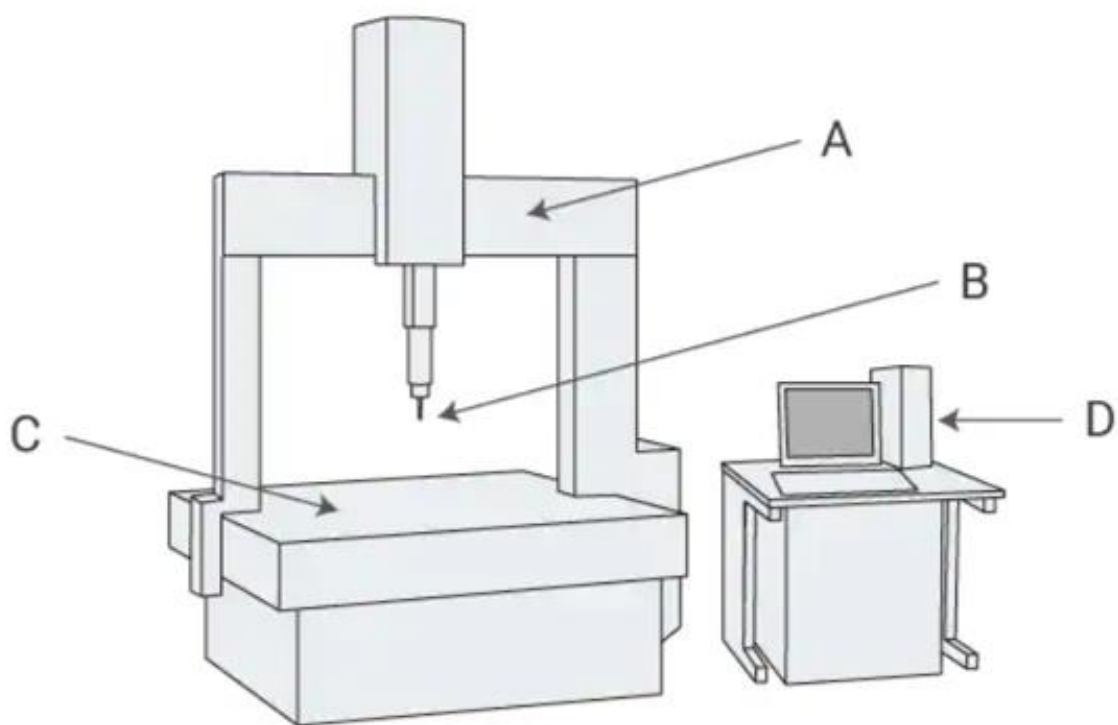
V případě DCC strojů je řízení počítače zodpovědné za pohyb snímacího systému, odečet ze snímačů a datovou komunikaci. Pro pohyb snímacího systému se používají různé strategie ovládání:

- Point-to-point řízení
- Ovládání kontinuální cesty
- Ovládání vektoru

V případě řízení z bodu do bodu je cílová poloha uvedena jako bodová informace se třemi souřadnicemi. Snímací systém se pohybuje směrem k této poloze se strojově specifickým řízením akcelerace/rychlosti, dokud nejsou dosaženy cílové hodnoty. V tomto ovládacím režimu je dosaženo dráhy, která má nejkratší vzdálenost k dosažení cílové polohové souřadnice. U kontinuálního ovládání existují dva odlišné režimy: předem vypočítané řízení skenování a adaptivní řízení skenování.

V případě předem vypočítaného řízení skenování se systém sondy přesune do cílové polohy po definované dráze. V tomto případě se počítač vždy zabývá sledováním pohybu. Tento druh kontroly se používá, pokud se měření provádí na známých tvarových rysech. Při adaptivním řízení skenování se hlava sondy pohybuje do cílové polohy v jedné nebo dvou osách s volně zvolenou rychlostí. Pokud dojde ke změně tvaru prvku, adaptivní ovládání zajistí, aby hrot sondy udržoval kontakt s povrchem měřeného dílu. Tento režim ovládání se používá při skenování nedefinovaných funkcí (pro které není k dispozici jmenovitý obrazec).

Další úkoly, které má řídicí systém provádět, zahrnují specifické ovládací příkazy (jako je volba manuálního/DCC režimu nebo kontrolního režimu a příkazy pro snímací systém) a různé kontrolní úkoly, jako je dosažení cílové polohy a detekce srážky. Výše uvedené úkoly jsou schopné plnit CMM novější generace s modulárními systémy řízení mikroprocesorů. Tyto modulární multiprocesorové systémy, jejichž jednotlivé mikroprocesory jsou spojeny s vnitřní datovou sběrnicí, provádějí různé úkoly, jako je získávání informací ze snímacího systému, ovládání hlavy sondy a ovládání řídicích systémů CMM, stejně jako přenos dat do počítače včetně periferních zařízení. Počítači CMM jsou obvykle ponechány pouze vysoké úlohy zasílání příkazů měření, vyhodnocování naměřených údajů a vykazování výsledků. Automaticky řízené CMM většinou používají externí výkonné počítače, které mohou být potřebné pro řídicí činnosti ve víceramenných konfiguracích CMM nebo aplikacích s velkými přenosy dat, jako v případě integrace s CAD. [6]



A : Pohyblivý most C : Pracovní stůl
B : Měřicí sonda D : PC stanice s ovládacími prvky

Obrázek 4 - Části CMM [23]

3.2 Konstrukce kartézských souřadnicových měřicích strojů

Konstrukce CMM hraje důležitou roli ve výkonnostních aspektech, jako je přesnost, flexibilita, doba nebo propustnost cyklu a náklady na životnost (počáteční a provozní). Základními konstrukčními prvky CMM jsou průměrná deska, vedení a odměřovací systém. Vzhledem k tomu, že tyto konstrukční prvky podpírají nebo nesou měřený díl, měřicí sondy a hlavice čtecích zařízení, jejich vlastnosti přímo ovlivňují celkový výkon měřicího stroje. Nejdůležitější ideální vlastnosti konstrukčních prvků jsou tyto:

- Rozměrová stabilita (krátkodobá a dlouhodobá)
- Nekonečná tuhost
- Beztíže
- Vysoká kapacita tlumení
- Nízký koeficient tepelné roztažnosti
- Vysoká tepelná vodivost

Žádný materiál není schopen dokonale uspokojit všechny výše uvedené vlastnosti. Znalost žádoucích vlastností a jejich vlivů pomáhá při výběru materiálů pro konstrukční prvky ve fázi návrhu. Jednou z nejdůležitějších vlastností konstrukčních prvků je rozměrová stabilita. I u softwarově korigovaných strojů je tato vlastnost nanejvýš důležitá, protože nedostatek rozměrové stability nepříznivě ovlivňuje výkon CMM. Pro dosažení rozměrové stability se používají techniky stárnutí materiálu. Mnohými považována za nejvhodnější materiál pro strukturální prvky CMM je žula. Je skutečně velmi často používána jako základní prvek, zejména ve strojích vyšší třídy přesnosti. Její nežádoucí vlastností je nasákavost, po kterém je schopna začít měnit svůj tvar. [6] [8]

Existuje několik typů CMM. Mezi ně patří typ portálový, mostový, výložníkový, stojanový atd.

3.2.1 Mostový CMM

Mostový CMM je dnes nejvíce používaný souřadnicový měřicí stroj. Má stacionární stůl pro podepření měřeného dílu a pohyblivý můstek. Na stole je upnut měřený díl. Výhodou pohyblivé konfigurace můstku je, že účinek ohybu druhé vodorovné osy může být výrazně snížen tím, že má dva nosné sloupky. Tento typ CMM konstrukce, dosahuje vysoké přesnosti, rychlosti a akcelerace. Konstrukce pohyblivého mostu má malý až střední měřicí rozsah (3–10 m) s relativně malou nejistotou měření kolem 0,01mm. [6] [28]



Obrázek 5 - Mostový CMM Hexagon DEA Alpha [19]

3.2.2 Portálový CMM

Portálový CMM je nejvhodnější u velmi velkých dílů, které vyžadují měřicí objemy 10 m³ nebo více a relativně přísné tolerance. Základy jsou navrženy jako masivní konstrukce k omezení průhybů, které by způsobily deformace její struktury. Tyto aspekty jsou rovněž nutné, aby se zabránilo deformaci stroje a chybám měření. Softwarová kompenzace se efektivně využívá ke korekci geometrických zkreslení způsobených zatížením (příčný posuv) a teplotními efekty. Kromě velkého objemu (např. 25 000 × 6 000 × 4 000 mm) je výhodou u portálového typu CMM snadný přístup obsluhy ke všem dílům v objemu stroje. Pohyblivá část stroje má menší hmotnost, protože se pohybuje pouze po vodorovném supportu, a proto je běžně dosahovaná přesnost ve středním rozsahu i pro velké měřené objemy. Běžná třída strojů v této konfiguraci je poměrně nákladově efektivní. Je-li však nutná lepší nejistota měření, mohou se náklady zvýšit kvůli zvláštním požadavkům, jako je použití speciálních izolovaných základů a speciálních struktur (jako jsou velké žulové bloky). Přesnost měření se u portálových CMM udává od 0,001 mm do 0,03 mm v závislosti na měřicím rozsahu, který může být až 3 m. [6] [28]



Obrázek 6 - Portálový CMM DELTA OPERA od společnosti Hexagon [19]

3.2.3 Výložníkový CMM

Výložníkový CMM má pohyblivé výložníkové rameno, které podporuje pinolu v jejím pohybu. Pinola má na sobě upevněnou měřicí hlavu, která vykonává vertikální pohyb. Měřený díl se položí na pevný stůl. Protože stůl výložníkového CMM neobsahuje vodící lišty ložisek, lze na něj umístit i relativně těžké díly, aniž by to mělo vliv na přesnost měření. Díky třem otevřeným stranám umožňuje pevná stolní konzola dobrou přístupnost k měřenému dílu. Jeho nevýhodou je ohýbání způsobené výložníkovou konstrukcí. Jak se support posouvá do krajní vnější polohy, zvětšuje se teoreticky nejistota měření díky ohybu. Unikátní mechanické prostředky k vyrovnání tohoto účinku většina výrobců doplnila softwarovými technikami korekce chyb. Konstrukce výložníku nabízí dlouhý stůl s relativně malými měřicími rozsahy v ostatních dvou osách, takže je vhodný zejména pro měření dlouhých tenkých dílů.[6]



Obrázek 7 - Výložníkový CMM TIGO SF od společnosti Hexagon [19]

3.2.4 Stojanový CMM

Stojanový typ souřadnicového měřicího stroje je ideální pro měření automobilových karoserií nebo jiných podobně velkých a tolerovaných dílů. Mezi mnoho horizontálních konfigurací ramen patří pohyblivý stůl, pohyblivé rameno a dvouramenné konstrukce. Tato konfigurace využívá na pohyb v ose X celý stroj (stojan) a v osách Y, Z celé horizontální rameno, do kterého je implementován měřicí systém. Stejně jako u všech ostatních CMM s pohyblivými stoly závisí jeho rychlost a přesnost na velikosti a hmotnosti měřeného dílu. V případě pohyblivých horizontálních ramen má konstrukce za následek nízkou dynamickou tuhost a poměrně velké ofsetové chyby. Konstrukce dvouramenného měřicího systému se skládá ze dvou shodných zrcadlových sad vodorovných měřicích ramen a pohyblivých os, které umožňují současné měření obou stran dílu, což zvyšuje efektivitu. Výhodou u všech typů horizontálních ramen je vynikající dostupnost na všechny strany měřeného dílu. Pro tuto konfiguraci jsou typické vysoké rychlosti měření. Nevýhodou je především omezená přesnost. U těchto strojů je běžné, že mají velký provozní rozsah, kdy jedna osa může být výrazně delší než ostatní dvě. Konstrukce pohyblivého ramene nabízí měřicí rozsahy v dlouhé ose, například až 25 000 mm a přesnost měření kolem 0,1 mm. [6] [28]



Obrázek 8 - Kontrola sřícování plechů na stojanovém CMM [29]

3.3 CMM se sférickým souřadným systémem

3.3.1 Měřicí ramena

Měřicí ramena (AACMM) jsou moderní, mobilní měřicí systémy, které používají rotační klouby ve své kinematice. Jejich charakteristickým rysem je možnost dosáhnout stejné polohy kontaktní sondy z nekonečného počtu pozic. Většina typů AACMM určuje a zaznamenává polohu své sondy v prostoru a výsledky kontrol pak oznámí prostřednictvím vhodného softwaru. Z toho vyplývá, že pro výpočet polohy hrotu sondy musí být znám úhel otáčení každého kloubu a délka každého segmentu v rameni, který má při vysunutí radiální dosah, jenž se obvykle pohybuje v rozmezí: 0,8 až 2 m. Měřicí úhel každého rotačního kloubu v rameni se určuje pomocí optických rotačních enkodérů. Tyto vysoce kvalitní kodéry počítají rotace postupně, přes detekci přesně rozložených čar na skleněném mřížkovém kotouči. Po spočítání pak software převede tyto počty na úhlové změny. Taková ramena mají typicky buď 6, nebo 7 os otáčení. Ve srovnání s tradičními CMM má AACMM vlastnosti malých rozměrů, lehkého, velkého měřicího rozsahu a zároveň je flexibilní a může být využit prakticky v jakémkoli průmyslovém areálu. Kontroly přesnosti přístroje je dosaženo měřeními prováděnými v souladu s ISO 10360-2. Měření prováděná pomocí AACMM jsou často používána jako doplňková měření k měřením prováděným na CMM, což odůvodňuje použití stejných kalibračních postupů. Podobně jako u CMM je stejně důležité, aby AACMM využívalo pevné postupy pro hodnocení přesnosti prováděných měření. Prostorová přesnost měřicích ramen se pohybuje okolo $\pm 50 \mu\text{m}$. [9][7][28]



Obrázek 9 - Hexagon měřicí rameno [18]

3.3.2 Laser tracker

Laser trackery jsou přenosné koordinační měřicí systémy (CMS), které využívají principu laseru pro kontrolu kvality, které měří trojrozměrnou souřadnicovou polohu cíle. Přístroj zaznamenává vzdálenost k cíli spolu se dvěma úhly, které poskytují údaje o poloze v asférickém souřadnicovém systému. Systém, založený na koherentním laserovém radaru a sledovač laseru tvoří dva úzce související sférické souřadnicové systémy. První pracuje bez potřeby kooperativního cíle a nesleduje jej. Laserový sledovač vyžaduje kooperativní cíl. Laserový indikátor však hlásí pouze dosah k cíli, nikoli úhly, a je určen k použití v multi lateračním schématu. Velká část výzkumné a vývojové činnosti v posledních 30-ti letech se týkala oblasti návrhu měřičů absolutní vzdálenosti, modelování zdrojů chyb přístrojů a jejich nejistoty, zlepšení přesnosti, návrhu a testování příslušenství a vývoje metod, které zlepšují výkon. Toto úsilí nesmírně zvýšilo rozsah a použitelnost laserových sledovacích zařízení. Dnes jsou laser trackery měřicím nástrojem s velkým aspektem využití. Patří mezi ně robotická metrologie, výroba a montáž velkých komponentů (křídel letadel a trupů lodí), mapování chyb u souřadnicových měřicích strojů (CMM) a obráběcích strojů. [10]



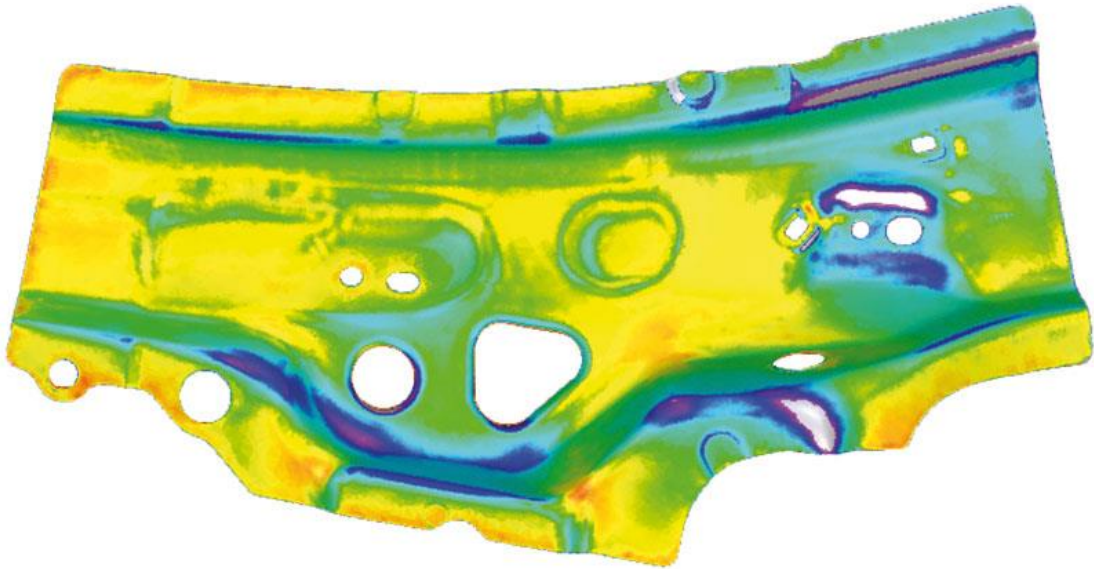
Obrázek 10 - Hexagon Laser Tracker [18]

3.3.3 Laser scanner

Laser scannery jsou čím dál více implementovány mezi systémy kontroly kvality výroby, protože poskytují inspektorům a analytikům výkonné metrologické nástroje. Využívají se především při první kontrole předmětu, pro reverzní inženýrství a k průběžnému měření ve výrobě. Laser scanner je založen na údajích z trojrozměrného skenu, který měří jemné detaily a zachycuje velmi složité tvary, ze kterých rychle vytváří vysoce přesné mraky bodů. V kombinaci s profesionálním inspekčním softwarem nabízí jednoduchý a efektivní postup pro porovnání skutečných dat měřených dílů s nominálními daty jejich CAD modelů. Tvar měřeného dílu se na monitoru počítače objevuje jako miliony bodů nazývaných „mrak bodů“, zatímco laser se pohybuje kolem a zachycuje celý povrchový tvar objektu. Proces je velmi rychlý, laser scanner sbírá až 750 000 bodů za sekundu a je velmi přesný. Kromě tvarových odchylek povrchu, lze identifikovat a kvantifikovat také polohové a velikostní odchylky. Výhoda laser scanneru oproti souřadnicovým měřicím strojům s kartézským souřadným systémem spočívá především v rychlosti měření a následném vyhodnocování. Během pouhých několika minut tyto analýzy poskytnou uživateli příslušné informace k provedení nezbytných úprav pro zajištění výroby odpovídající specifikaci. Použití laser scanneru je výhodné pro měření plechových lisovaných dílů [19] [26] [27]



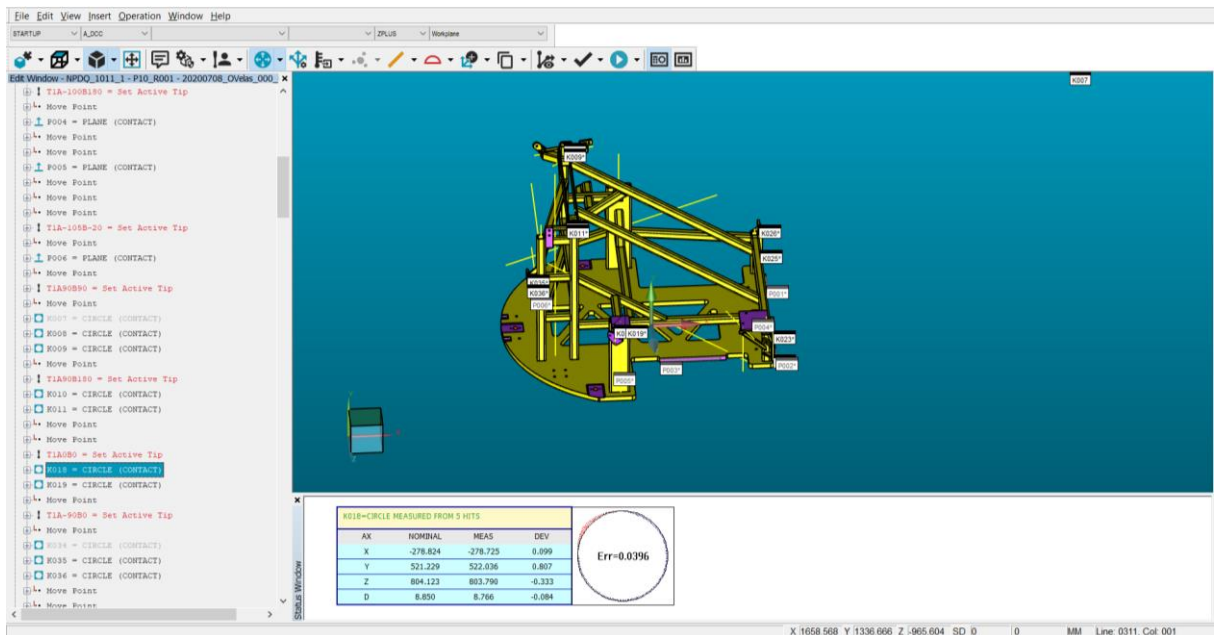
Obrázek 11 - Laser scanner připevněný na 7osém ramenu při kontrole plechových dílů [19]



Obrázek 12 - Barevná mapa z kontroly lisovaného plechového dílu pomocí laser scanneru [19]

3.4 Měřicí software

Softwary pro programování a ovládání CMM byly vyvinuty a zdokonaleny tak, aby pro jejich využití nebyla vyžadována znalost počítačového programování. SW jsou často velmi intuitivní a obsahují grafické rozhraní, které zjednodušuje interakci s CAD. Zařízení pro reverzní inženýrství, reporting a editační úlohy poskytují uživateli širokou škálu schopností pro mnoho náročných aplikací. Softwarové rutiny se většinou snadno používají a lze je přizpůsobit tak, aby vyhovovaly jednotlivým aplikacím, aniž by bylo nutné používat specifický programovací jazyk. Vysoká úroveň kompatibility softwaru usnadňuje propojení CMM a CAD systémů pro vytváření programů přímo z dat CAD. CMM software může také zahrnovat automatické měření z dat CAD. Rozhraní mezi uživatelem a strojem často poskytuje měření pomocí označených bodů, interaktivní grafický displej, rutiny zarovnání, možnosti programování on-line i off-line, zobrazení polohy sondy a snadno čitelné grafické analýzy formulářů. Celkové měřicí schopnosti a snadnost použití CMM závisí téměř výhradně na inspekčním softwaru dodávaném se strojem. Uživatel by si měl být vědom funkčnosti nabízené softwarem a usilovat o její plné využití. [11]



Obrázek 13 - Hexagon PC DMIS SW

3.4.1 Základní funkce CMM SW

- nekonvenční zarovnání částí

Schopnost zarovnat roviny, čáry a body, ale i komplexnější plochy.

- rozhraní CAD

CMM software může mít možnost pojmout více typů souborů CAD a může také přehledně a srozumitelně prezentovat informace CAD. Uživatel by měl mít možnost ovládat grafické ztvárnění a seskupit a skrýt funkce pro vizuální přehlednost.

- grafická analýza prvků

Tato softwarová funkce umožňuje uživateli vyhodnotit celý rozměrový stav dílu umožňující porovnání dotykových bodů se známou definicí CAD v paměti.

- funkce automatického měření

Toto softwarové zařízení může zajistit programování pro CMM s přímým počítačovým řízením (Direct Computer Controlled – DCC). CMM se automaticky přesune na definovanou polohu a zachytí na ní měřicí body. Uživatel definuje geometrickou charakteristiku zadáním nominální informace nebo uvedením funkce na modelu CAD. Bez tohoto zařízení by uživatel musel ručně programovat pohyb sondy a měřicí body pouze pomocí joysticku.

- reverzní inženýrství

Reverzní inženýrství je proces sběru dat z části a použití těchto dat k vytvoření CAD modelu části. Pomocí „*Počáteční specifikace výměny grafiky*“ (Initial Graphics Exchange Specification - IGES) může být software CMM schopen exportovat naměřená data neznámého nebo upraveného dílu do formátu souboru, který lze přečíst systémem CAD, aby bylo možné vytvořit CAD definici dílu. IGES je sada protokolů pro přenos a zobrazení grafických informací na vzdálených zařízeních prostřednictvím počítačové komunikační sítě. IGES nedefinuje žádné nové formáty grafických souborů, ale místo toho používá existující formáty (například Computer Graphics Metafile) pro zapouzdření grafických dat.

- offline programování

Aby se zabránilo prostojům při vývoji měřicího programu, je nezbytné využívat off-line programování. Offline programovací software umožňuje uživateli zapisovat měřicí programy CMM pomocí dat CAD, aniž by zasahoval do aktuálních měřicích aktivit CMM. Základní funkcí je možnost stáhnout program z off-line pracovní stanice do CMM a spustit jej s minimem úprav. Offline programovací software může být také schopen simulovat CMM cesty ke kontrole kolizí atd.

- programovací jazyk

Odvětví CMM má vlastní standardní inspekční softwarový jazyk nazývaný Dimensional Measuring Interface Standard (DMIS) vyvinutý Konsorciem pro dimenzionální metrologické standardy (Dimensional Metrology Standards Consortium). Použití tohoto standardního softwaru umožní zaměnitelnost dílčích programů mezi různými značkami DMIS-softwaru výrobce. Některé společnosti také používají vlastní proprietární jazyky, které umožňují vývoj výkonných, avšak snadno čitelných programů. Konsorcium Dimensional Metrology Standards Consortium se rovněž podílelo na vývoji QIF a American National Standards Institute (ANSI) schválil QIF v1.0 (Quality Information Framework, verze 1.0) jako standard ANSI. QIF V1.0 poskytuje standardizovaný způsob definování a výměny rozsahu měření, plánů měření a výsledků měření.

- skenování neznámé geometrie

Tato část CMM softwaru nabízí možnost skenovat komplexní vlastnosti pro data bez znalosti jejich nominální definice. Obecně uživatel uvede počáteční a koncový bod povrchu a určí hustotu skenování. CMM bude skenovat mezi body shromažďovat znalosti o tvaru povrchu.

- geometrická tolerance

Do softwaru CMM jsou zahrnuty všechny typy geometrických tolerancí, včetně profilu povrchu. Při zjišťování shody (nebo nesouladu) s výkresem nebo specifikací je obvykle nutné vzít v úvahu nejistotu měření.

- komplexní měření povrchu

Vyžadované složitě tvarované výrobky (letecké fólie, turbínové lopatky) představují pro uživatele obtížný úkol. CMM software může poskytnout prostředky pro sběr dat o těchto komplexních produktech pomocí CAD povrchového modelu dílu a měl by také umožnit uživateli vytvořit na povrchu průřezové linie, které by napomohly vyhodnocování měření.

- integrované statistiky a software pro hodnocení nejistoty

Schopnost integrovat statistické výpočty do inspekčního softwaru eliminuje potřebu přenášet údaje do softwaru třetích stran a umožňuje zahrnout statistické informace do záznamu informací o posouzení. [11]

3.4.2 Nejběžnější CMM SW

- Zeiss CALYPSO

Metrologický software určený pro CMM od společnosti Zeiss. Je to vícemodulární systém, založený na základním modulu Calypso, což je univerzální měřicí software zaměřený na pravidelné geometrické prvky. Calypso mimo jiné zahrnuje již v základním modulu funkci PMI. Pomocí funkce CALYPSO PMI mohou být tolerance rozměrů, tvaru a polohy, které jsou jako informace PMI obsaženy v CAD modelu, automaticky implementovány do plánu měření. Tím se výrazně sníží náročnost tvorby programů.

Základní modul může být doplněn dalšími, jako například:

- qs-STAT – konvertuje výsledky měření ze softwaru ZEISS CALYPSO pro další analýzu a vyhodnocení způsobilostí
- PLANNER – pro offline tvorbu měřicích programů
- CALIGO – účinné nástroje pro kontrolu obecných tvarových ploch i standardní geometrie plechových lisovaných dílů nebo při výrobě karoserií [12]
- Hexagon PC-DMIS

PC-DMIS je přední světový software pro souřadnicové měřicí stroje (CMM) s více než 70 000 místy po celém světě. Je využíván k měření všeho od jednoduchých dílů až po nejsložitější díly leteckého a automobilového průmyslu. Stejně jako u SW Zeiss Calypso je možné i PC-DMIS rozšířit o další funkcionality pomocí doplňků nebo dalších samostatných programů.

- PC-DMIS Blade – software pro měření turbínových lopatek
- PC-DMIS STI+ - software pro automatizovanou metrologii do dílenského prostředí.
- PC-DMIS Gear – pro měření ozubených kol (dle standardů AGMA 2000-A88, DIN 3962, JIS B1702, ISO 1328 atd.) [13] [19]

- Renishaw MODUS

Renishaw software MODUS poskytuje výkonnou platformu měření dílů na CMM. Konfigurovatelné uživatelské rozhraní umožňuje vývoj programů DMIS offline, kreslení geometrie, vložení rozměrů a tolerančních dat z CADu s plnou simulací. Software obsahuje certifikované algoritmy pro měření funkcí, konstrukci funkcí a zarovnání částí. Programy lze vytvářet offline přímo z CADu s ověřením pohybu sondy na obrazovce. Lze definovat prostředí CMM, upevnění a umístění dílu na stroji, což umožňuje plnou simulaci měřicích programů. [14]

- Mitutoyo MiCAT PLANNER

MiCAT planner používá informace o toleranci PMI (Product Manufacturing Information) uvnitř CAD souboru a vytváří kompletní část programu tím, že zváží individuální strategii měření a specifické CMM. To zaručuje bezkolizní program v co nejkratším čase. [15]

3.5 Metrologické podmínky pracovního prostředí

Metrologické podmínky prostředí, kde je umístěný CMM mohou mít vážný vliv na jeho budoucí nejistoty měření. Kvůli této problematice výrobci CMM obvykle stanovují: teplotní rozsah, kolísání teploty za hodinu, kolísání teploty za den, kolísání teploty na metr, v rámci, kterého konkrétní CMM nakonec dosáhne svých výkonnostních specifikací. Tyto proměnné je třeba vzít v úvahu při výběru místa, kde se bude CMM nacházet. V případě CMM je důležitým hlediskem velikost předpokládaných vibrací podlahy, většina výrobců CMM dodává podrobnosti o maximálních vibracích, které tyto CMM odolají, a přitom stále splňují stanovené technické specifikace. V určitých situacích mohou být dodány aktivní nebo pasivní vibrační tlumicí systémy, které umožňují instalaci CMM ve značně náročných prostředích, což jim umožňuje stále plnit jejich specifikace. Čím dál častěji se pro ochranu CMM používají modulární místnosti. Tyto přenosné přístřešky bývají vybavené systémem pro zajištění teplotní stability, filtračním zařízením a také je zde vyhrazený přístup do místnosti pro ochranu před neoprávněným vniknutím, kontaminací nebo poškozením při manipulaci s materiálem. [7] [22]



Obrázek 14 - CMM modulární místnost [22]

3.5.1 Vliv teploty

Dobrá opakovatelnost byla a je vždy důležitá při práci strojů pro souřadnicové měření. Tepelné účinky jsou největším zdrojem zjevné neopakovatelnosti a nepřesnosti u většiny CMM. Schéma tepelných efektů znázorněné na obrázku 15 poskytuje prostředky k pochopení celkového problému s tepelnou chybou pro měřicí a obráběcí stroje. Diagram rozděluje problém do dvou hlavních kategorií:

- účinky rovnoměrných teplot jiných než 20 °C
- účinky nestejných teplot

Schéma také ilustruje koncept, že každá měřicí a obráběcí operace se skládá ze tříprvkového systému tvořeného:

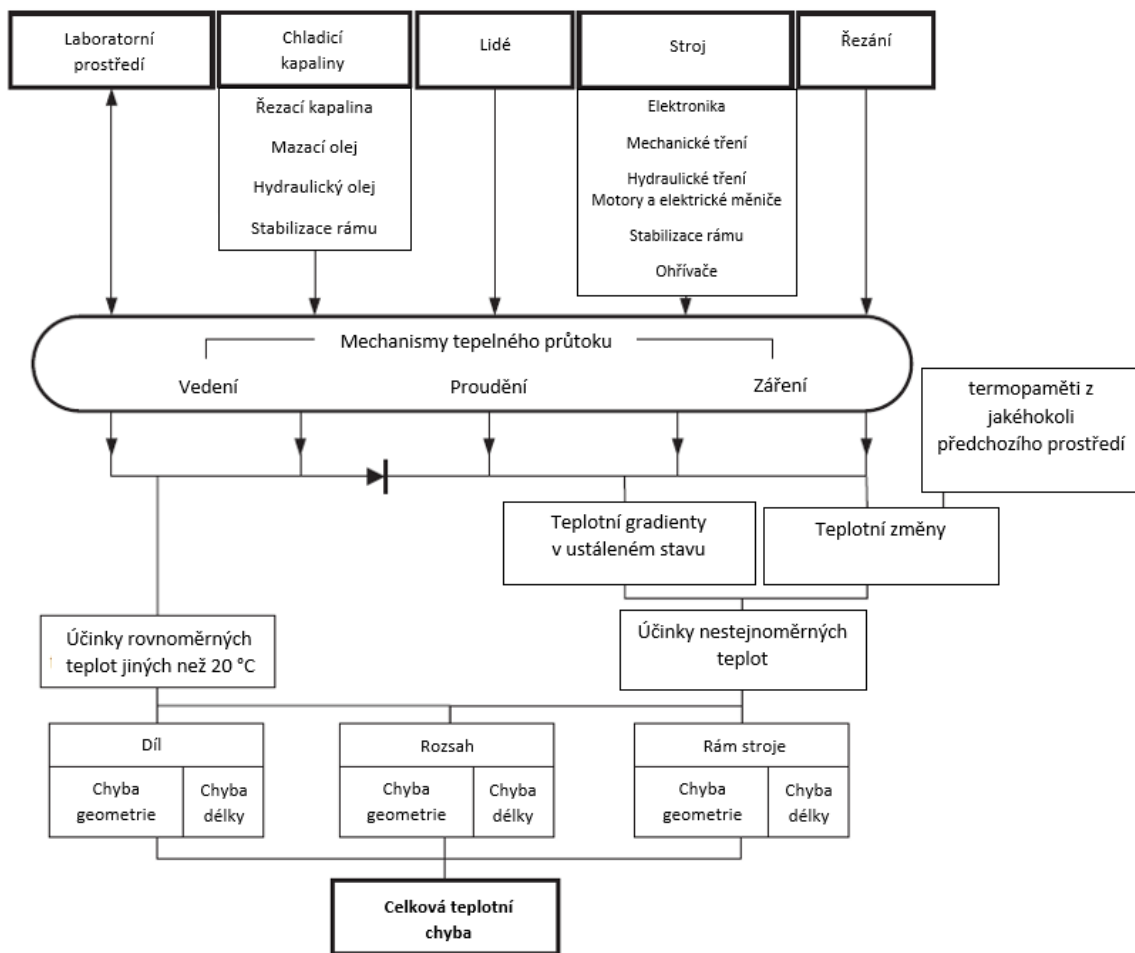
- částí
- rámem stroje
- rozsahem stroje

V diagramu je znázorněno šest typů tepelných vlivů:

- vytápění nebo chlazení – vliv zajišťovaný prostředím místnosti
- vliv vytápění nebo chlazení zajišťovaný různými chladicími systémy
- účinek tepla lidského těla
- teplo generované strojem
- teplo vzniklé při řezání
- termopaměti z jakéhokoli předchozího prostředí.

Všechny zdroje tepla ovlivňují tříprvkový systém třemi možnými způsoby přenosu tepla:

- vedením
- konvekcí
- radiací [6]

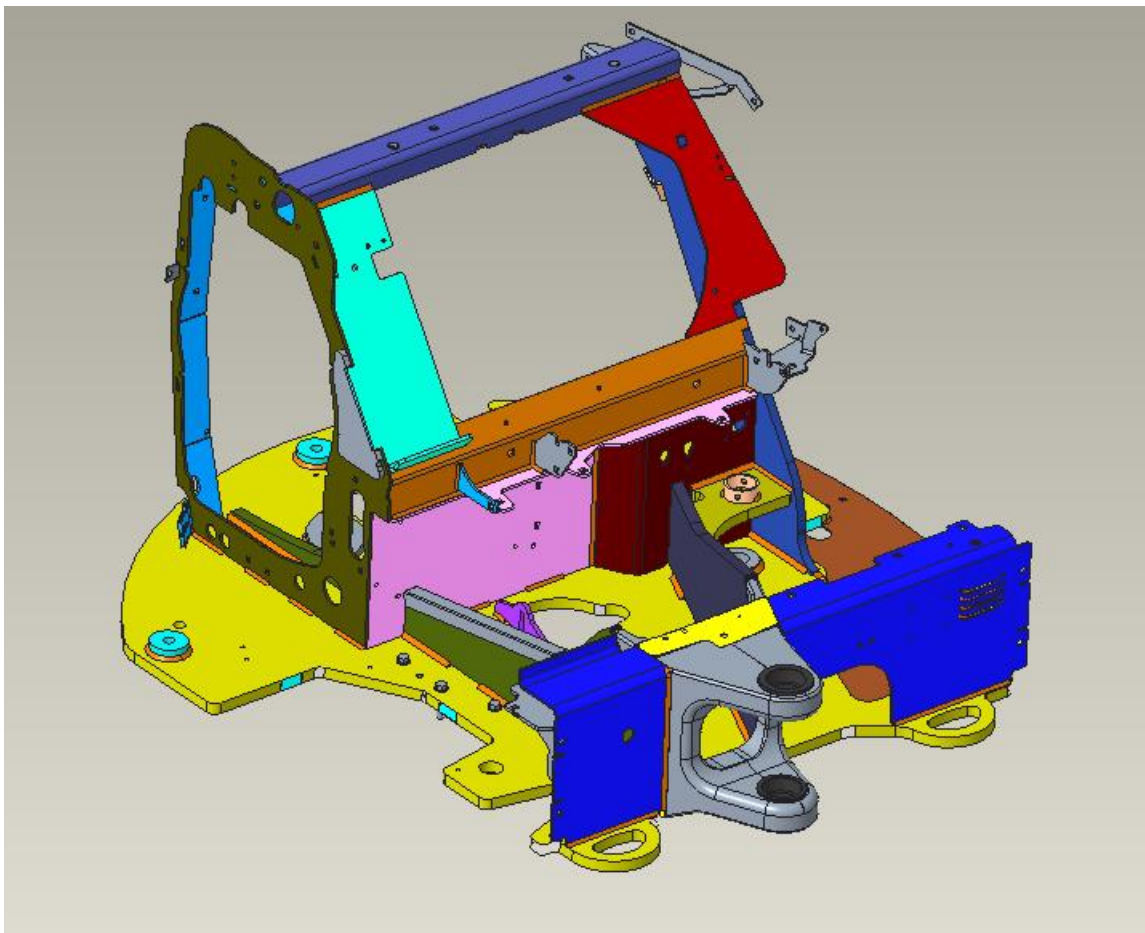


Obrázek 15 - Schéma tepelných efektů pro měřicí a obráběcí stroje [6]

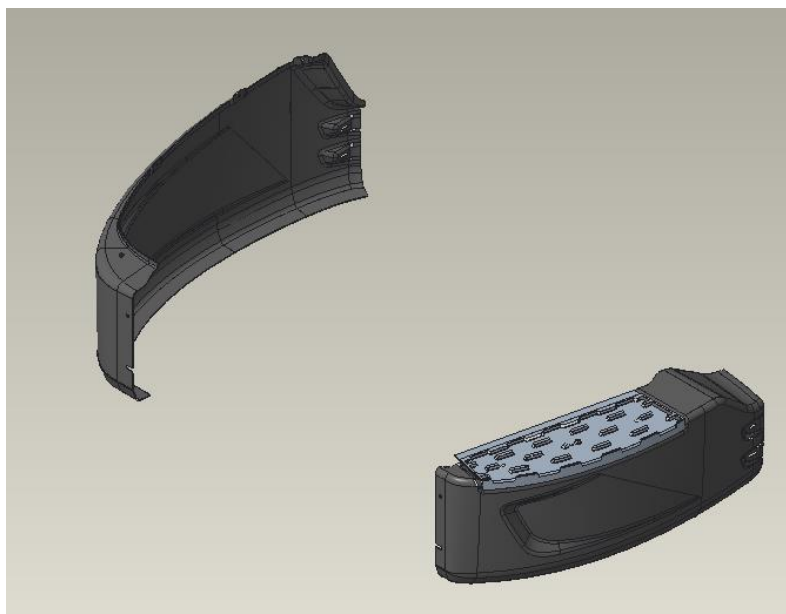
4. Návrh upínacího přípravku

Cílem této práce je navrhnout kontrolní upínací přípravek pro suplování rámu mini rypadla ke kontrole lícování plechových krytů. Zadání ze strany společnosti Bobcat bylo navrhnout takový přípravek, který bude vyroben z co největší části z dostupných dílů, s minimálními náklady a pomocí výrobních technologií dostupných v inovačním centru Bobcat Dobříš. Zároveň je potřeba dosáhnout vysoké přesnosti provedení.

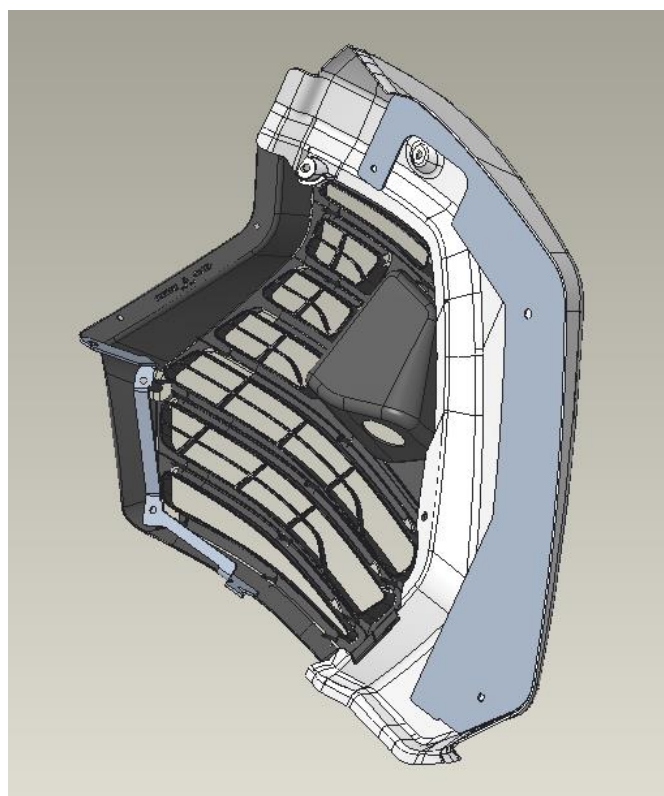
Na obrázku 16 je rám mini rypadla Bobcat E55 Compact Excavator. Upínací přípravek by měl být navržen tak, aby tento rám suploval pro potřeby měření. Na obrázku 31 je vidět tento rám osázený kryty, pro jejichž měření je přípravek navrhován. Jednotlivé kryty jsou pak zobrazeny na obrázcích 17-21.



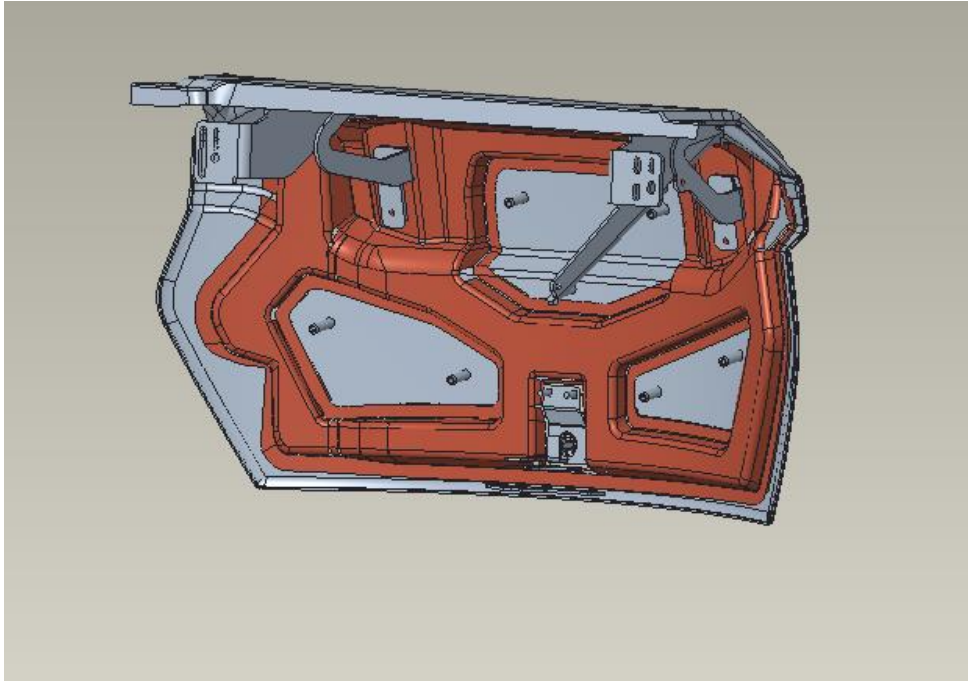
Obrázek 16 - Rám mini rypadla Bobcat E55



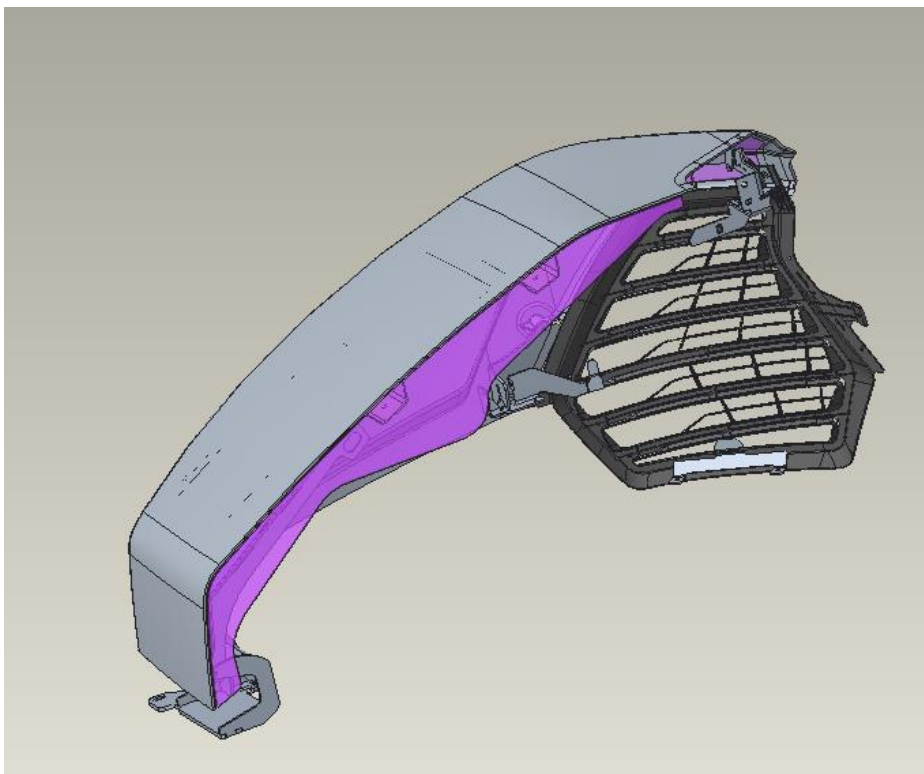
Obrázek 17 - Kryt 1



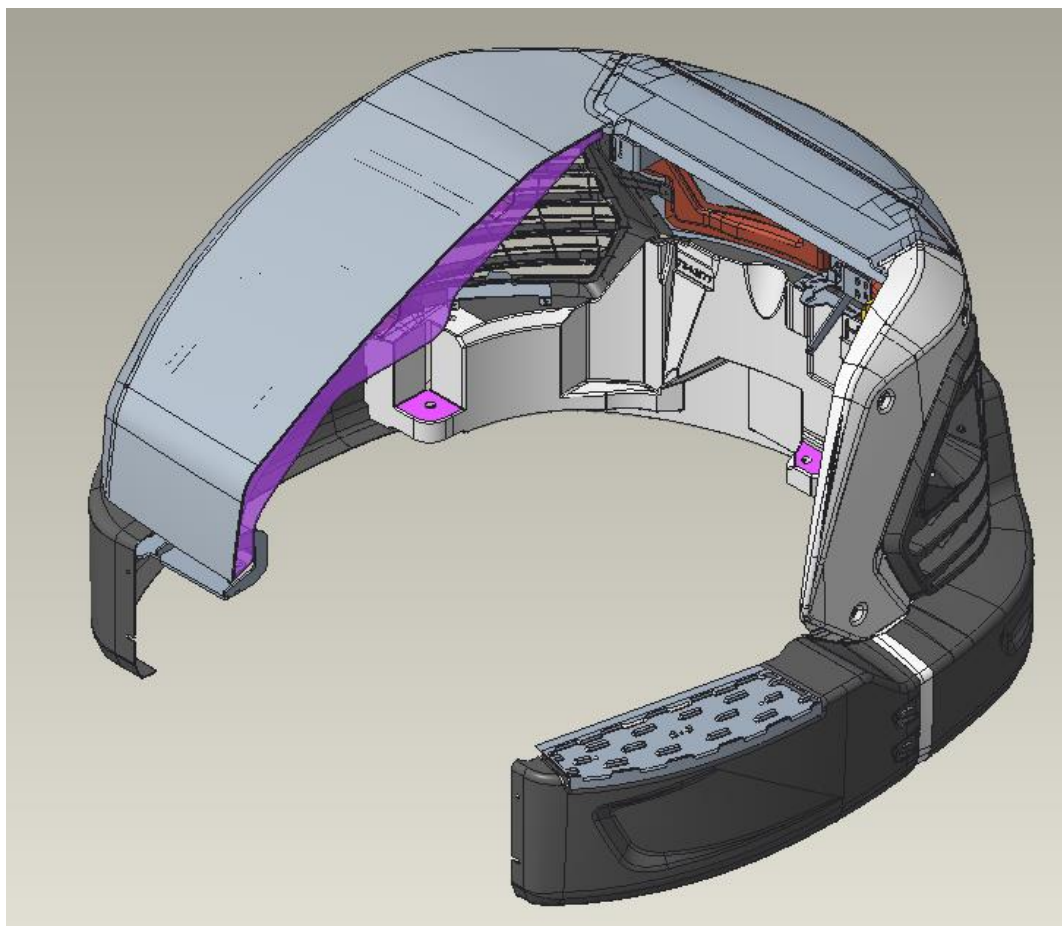
Obrázek 18 - Kryt 2



Obrázek 19 - Kryt 3



Obrázek 20 - Kryt 4



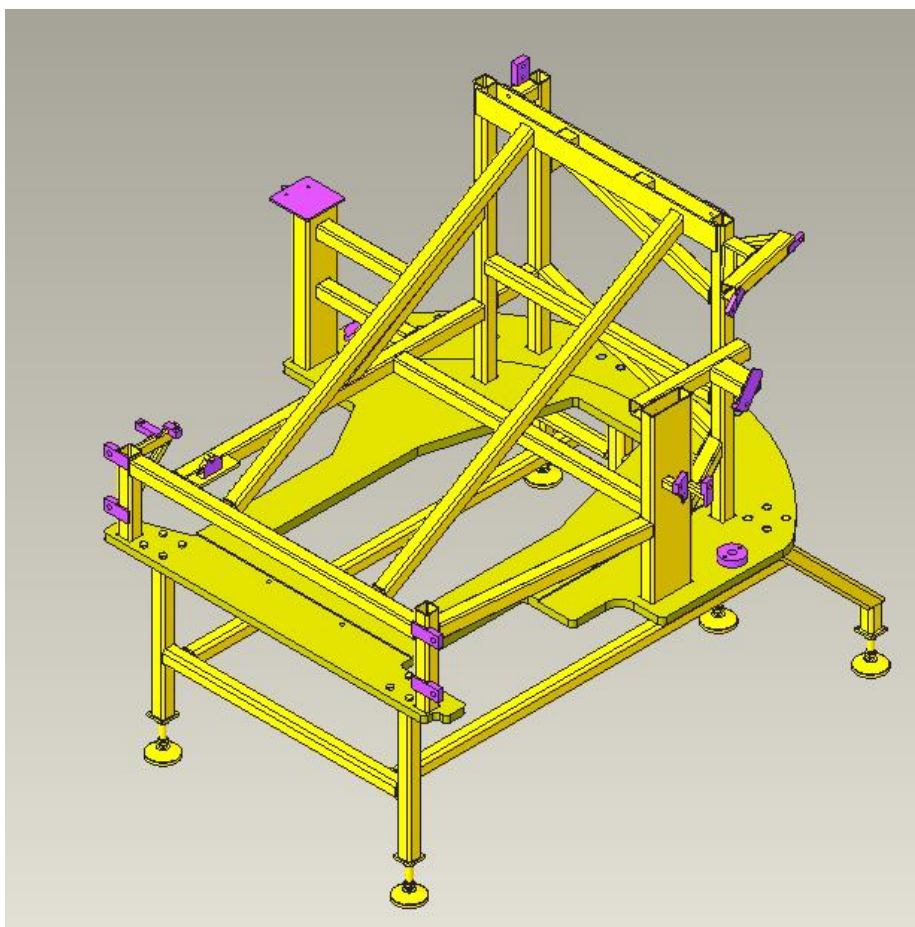
Obrázek 21 - Sestava všech testovaných krytů

Tabulka 1 - Seznam měřených krytů mini rypadla

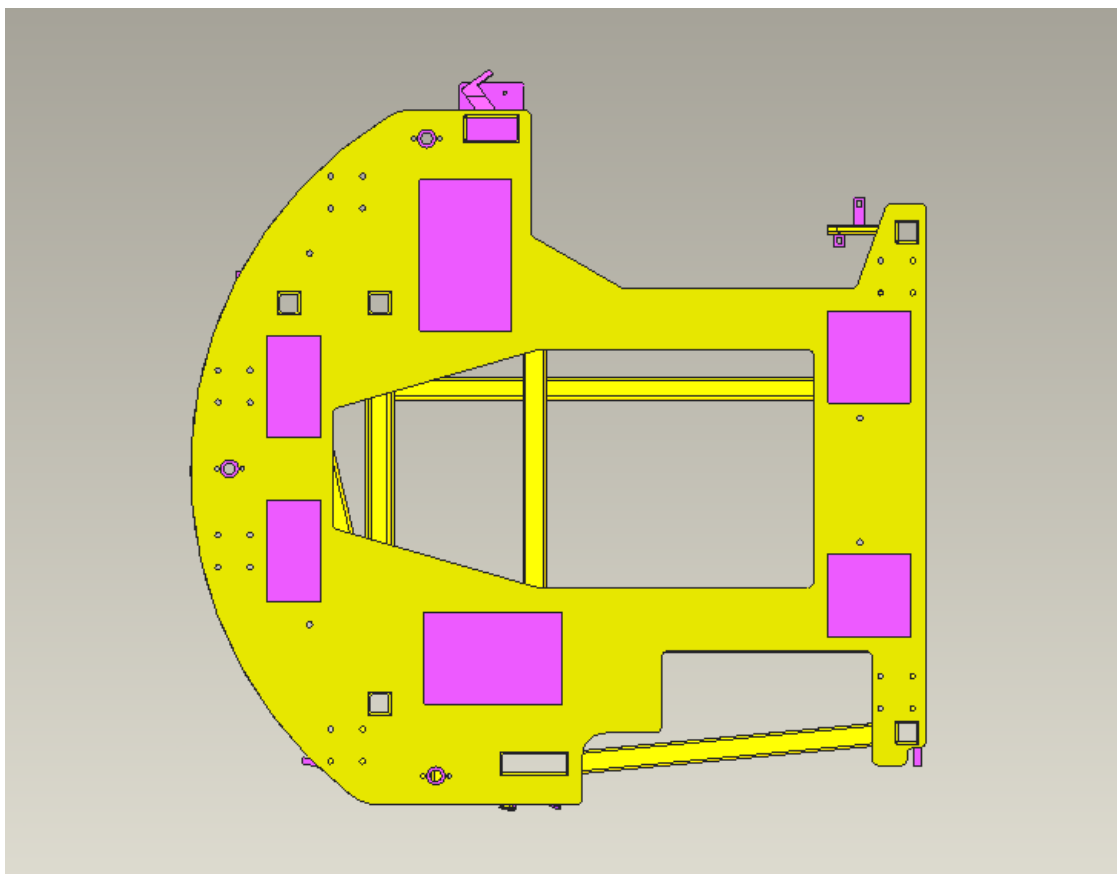
Číslo obrázku	Název krytů mini rypadla
17	Channel LH, RH
18	Cover LH
19	Tailgate
20	Cover RH
21	Counterweight

4.1 1. návrh upínacího přípravku

Na obrázku 22 je 1. návrh upínacího přípravku. Konstrukce upínacího přípravku je navržena z konstrukční oceli, ve stejné výšce jako samotný rám mini rypadla. Funkční plochy jsou na obrázku zvýrazněny fialovou barvou. Na tyto plochy by při měření měly být upnuty měřené kryty tak, aby v místě upnutí bylo ideálně dosaženo nominální hodnoty pozice. Konstrukce upínacího přípravku je navržena jako svařenec z ocelových profilů, základní deska je plechový výpalek, funkční díly jsou ocelové polotovary s přídavkem materiálu pro finální obrábění. Po svaření celé konstrukce jsou funkční díly obrobena na CNC pro dosažení maximální přesnosti poloh jednotlivých děr pro upínání krytů. Obrábění přípravku probíhá ve více operacích. Na obrázku jsou fialovou barvou znázorněny plochy, které jsou navrženy pro přesné vyrovnávání přípravku v CNC při jednotlivých obráběcích operacích. Na finální obrábění bylo dbáno již při návrhu, kdy celá konstrukce přípravku byla navržena tak, aby v co nejmenší míře docházelo k vibracím při obrábění. Proto je celá konstrukce vyztužena jednotlivými profily ve všech směrech. Přípravek má rozměry 1612 x 1550 x 1620 mm a váží 485 kg

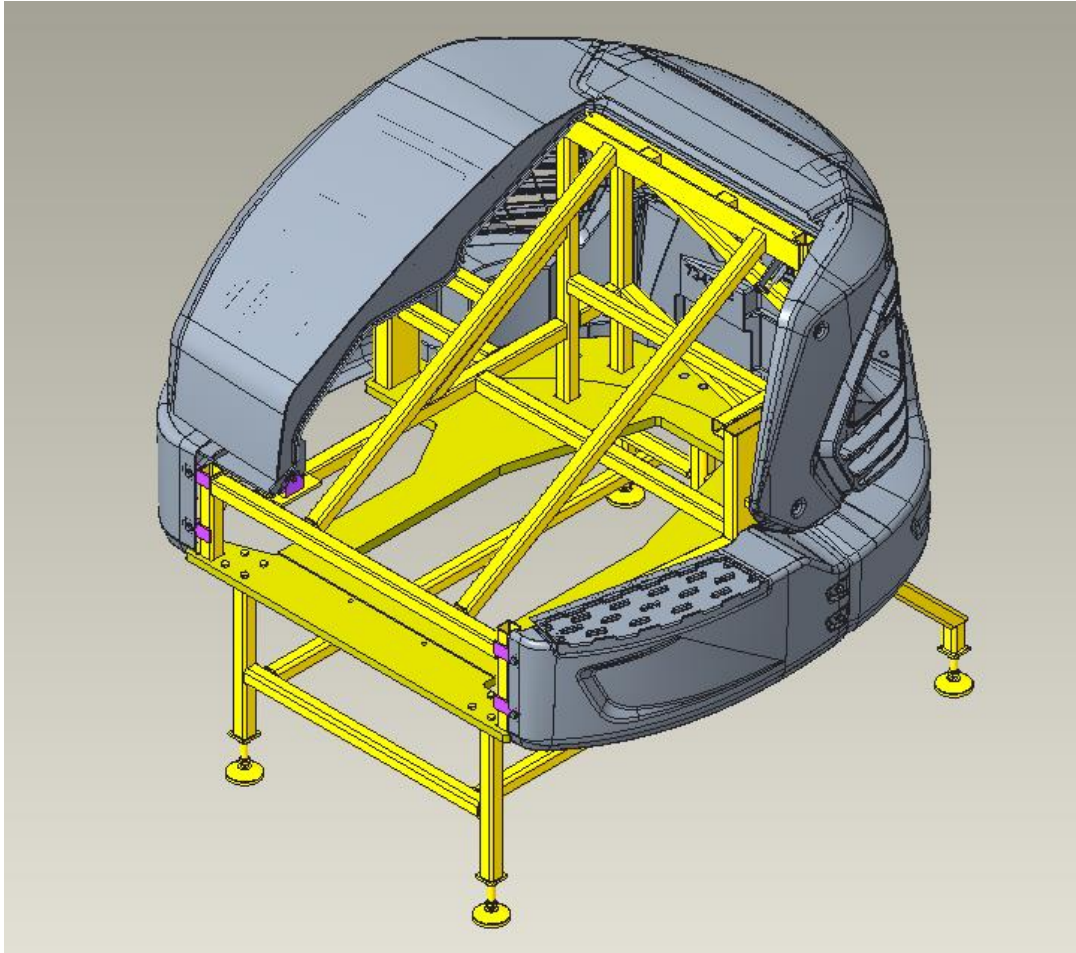


Obrázek 22 - 1. návrh upínacího přípravku



Obrázek 23 - 1. návrh upínacího přípravku – pohled zdola

Na obrázku 24 je znázorněn upínací přípravek s nasazenými kryty a s protizávažím. Některé z měřených krytů jsou k mini rypadlu upevněny přes protizávaží, proto jsou závaží nezbytnou součástí přípravku.

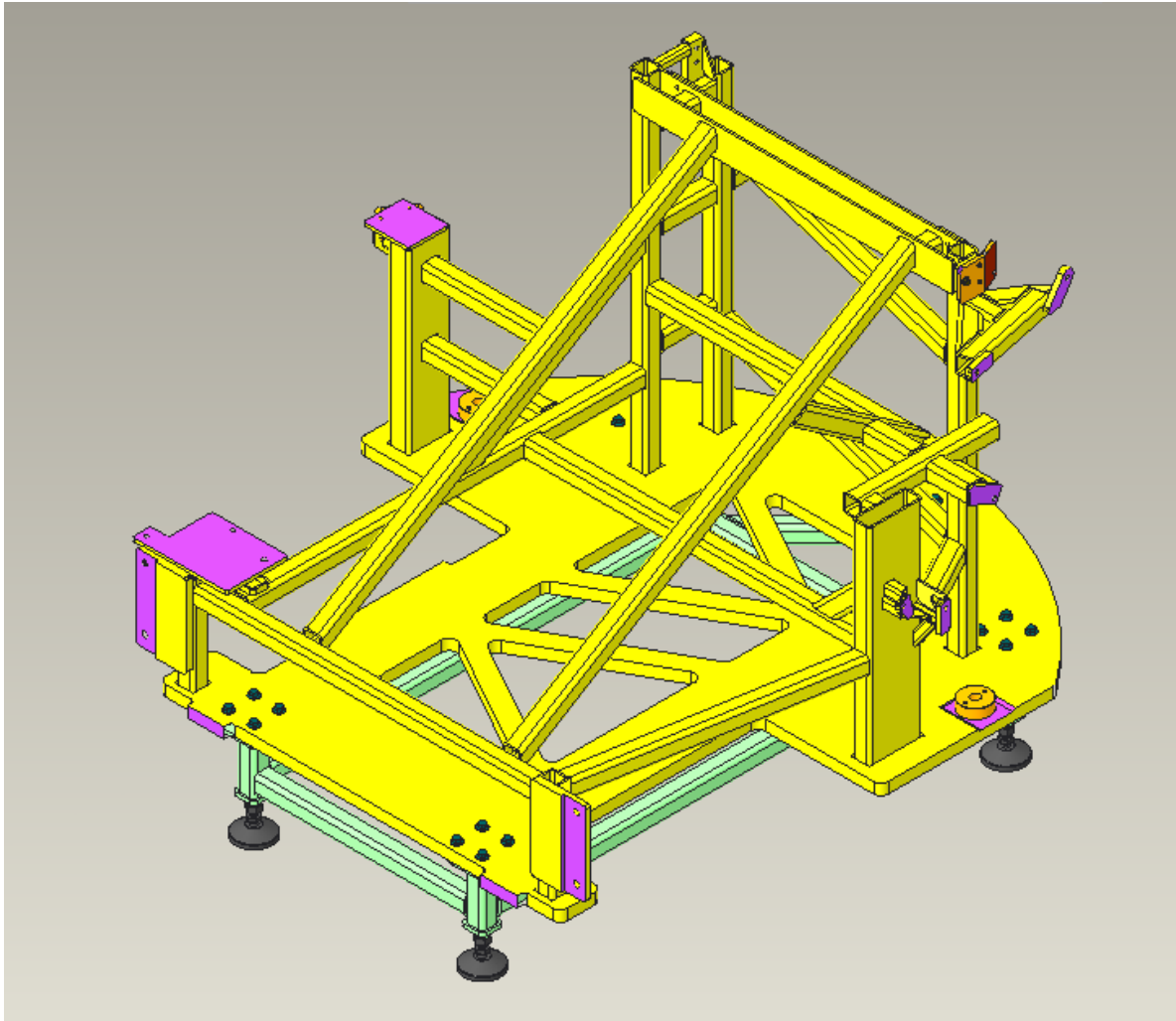


Obrázek 24 - 1. návrh upínacího přípravku s plechovými kryty

Nevýhodou tohoto návrhu je hlavně jeho výška. Původně uvažovaný návrh stejné výšky přípravku jako mini rypadla se zdá být nevhodný kvůli protizávaží, které je umístěno v zadní části přípravku. Kvůli jeho vysoké hmotnosti (1000 kg) by mohl nastat problém se stabilitou celého přípravku. Po konzultaci s technologií bylo třeba pozměnit i některé funkční díly tak, aby lépe odolávaly vibracím při obrábění. Některé z těchto dílů navíc bude možné použít jako hotové díly – nejprve přesně obrobené a následně připevněné pomocí kolíků k přesně obrobené ploše konstrukce. Jako nedostatečné se u tohoto návrhu jeví usazení protizávaží. Vodicí prvky, na kterých je závaží ustaveno nejsou usazeny na ideálně rovné ploše.

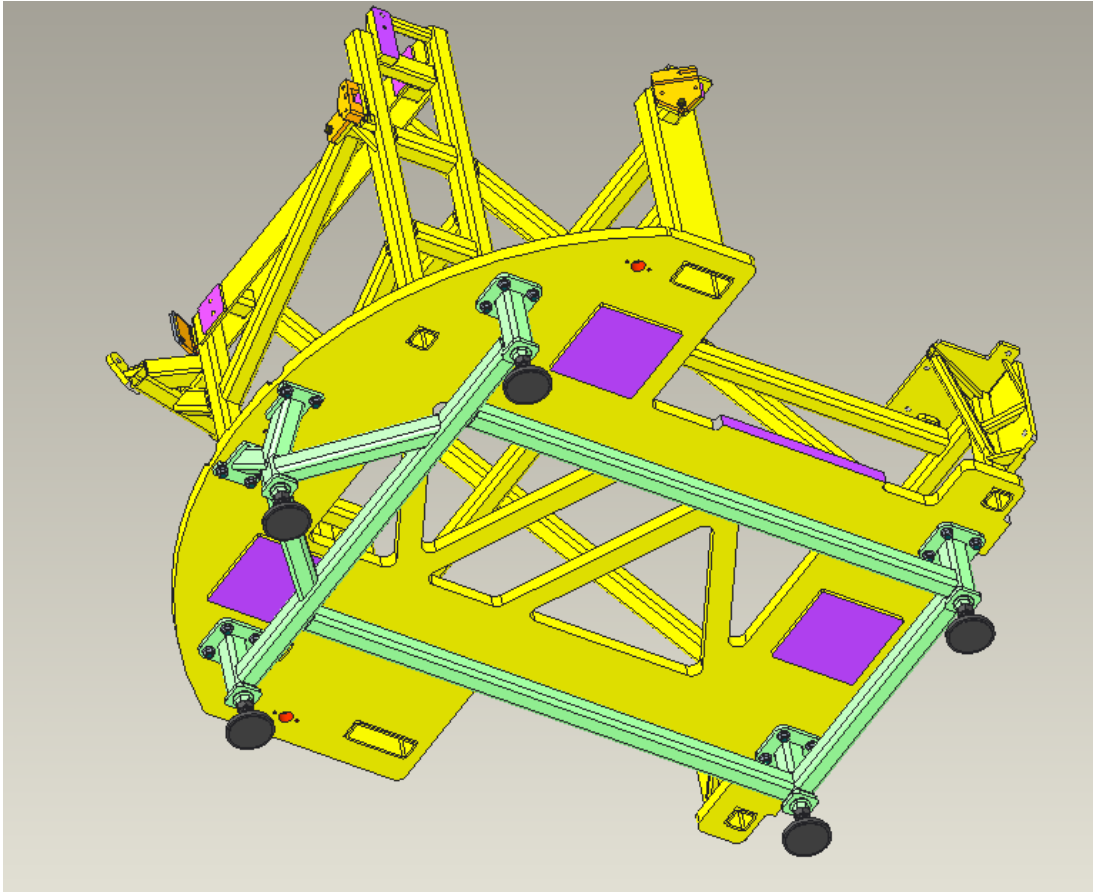
4.2.2. návrh upínacího přípravku

Na obrázku 25 je vidět upravený návrh navrhovaného přípravku. Stejně jako u původního návrhu se jedná o ocelovou konstrukci – svařenec z ocelových profilů, základní deska je tvořena plechovým výpalkem a funkční díly jsou přesné obrobky. Přípravek má rozměry 1250 x 1550 x 1620 mm a váží 526 kg.



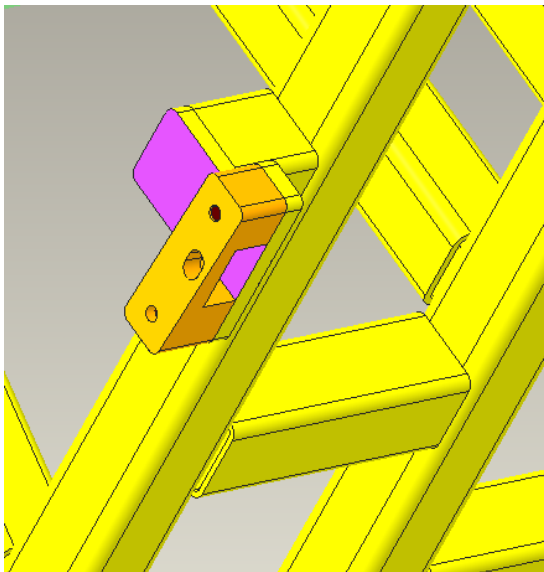
Obrázek 25 - 2. návrh upínacího přípravku

Z důvodu nevhodné výšky prvního návrhu je u tohoto přípravku předělaná celková podstava. Ta je nyní vysoká 270 mm, stojí na pěti nožičkách (každá o nosnosti 1000 kg). Jak je vidět na obrázku 26, byla k podstavě oproti původnímu návrhu přidána pátá nožička, která zajišťuje lepší stabilitu. Celá podstava je ke konstrukci upínacího přípravku připevněna pomocí šroubových spojů.

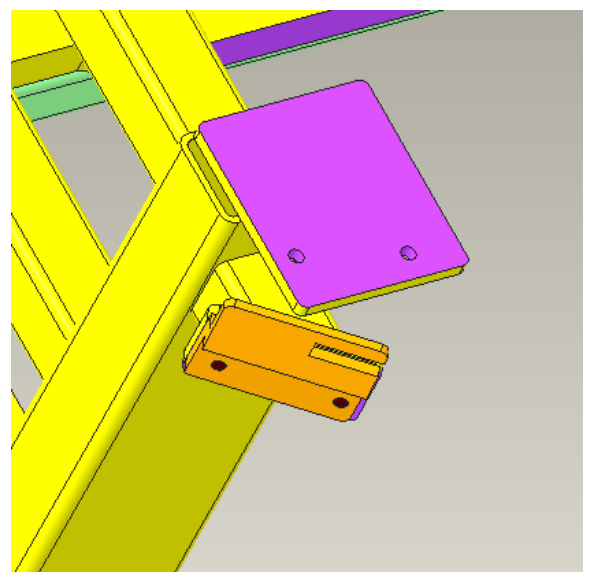


Obrázek 26 - Podstava upínacího přípravku

Po domluvě s technologií byla pozměněna místa pro upnutí přípravku v CNC (viz obrázek 26) a byly přidány obrobené plochy pro vyrovnání dílu při měření.

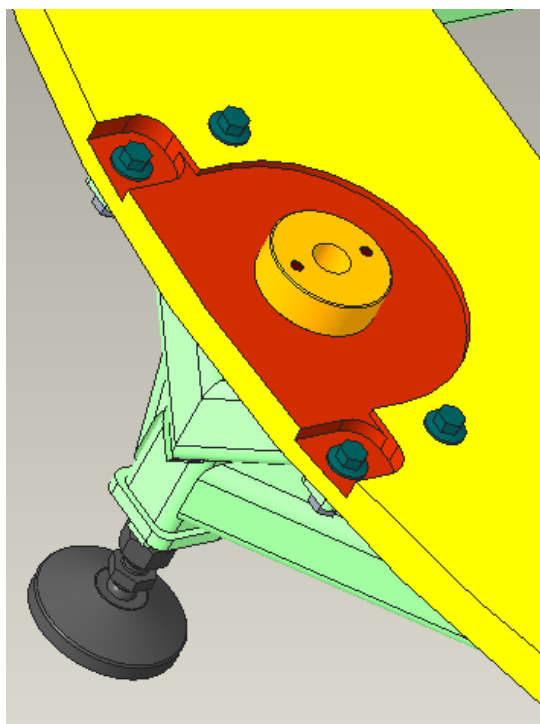


Obrázek 27 - Funkční díl – detail 1

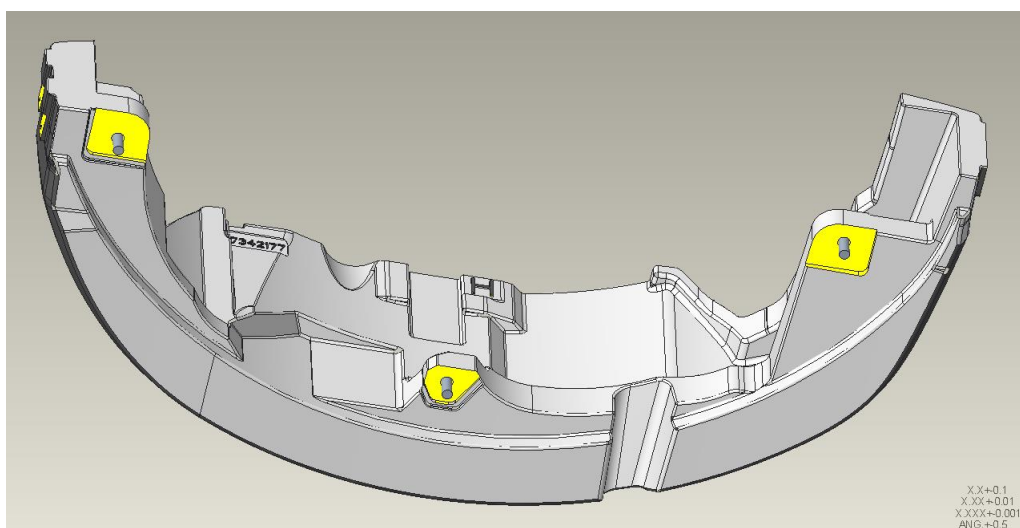


Obrázek 28 - Funkční díl – detail 2

Úpravou prošly i funkční díly. Na obrázcích 27 a 28 jsou vidět varianty, kdy původní svařenec je nahrazen předem přesně obroběným dílem, který je ke konstrukci připevněn válcovými kolíky. Takové řešení funkčních dílů by mělo vykazovat vyšší přesnosti, nežli původně navrhovaný svarový spoj. Toto řešení bylo použito v takových místech konstrukce, kde nebylo možno pomocí podpěr dosáhnout dostatečné tuhosti pro minimalizaci vibrací při následném obrábění.



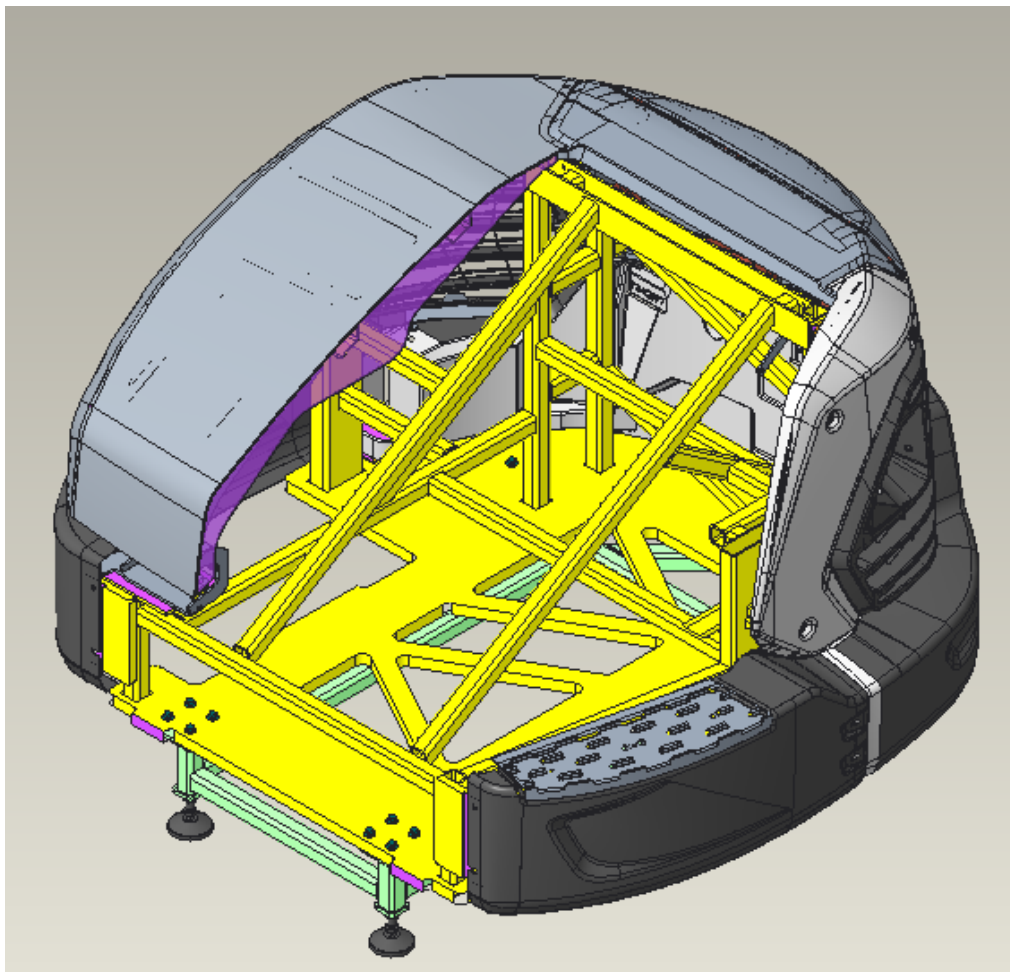
Obrázek 29 - Detail upevnění závaží



Obrázek 30 - Protizávaží

Další z nedostatků, který byl u druhé varianty upínacího přípravku odstraněn je upnutí závaží. Na obrázku 29 je vidět obrobena plocha přípravku, ke které je připevněno protizávaží (obrázek 30), jehož dosedací plocha je také přesně obrobena. Celý tento spoj je výsledně upevněn pomocí šroubového spoje.

U tohoto návrhu byl změněn tvar základové desky a ta byla navíc vyztužena žebry. I díky tomu bylo zajištěno minimalizování vibrací během obrábění. Na obrázku 31 je vidět výsledný návrh upínacího přípravku s upevněným závažím a s kryty.



Obrázek 31 - 2. návrh upínacího přípravku s kryty

Dle výsledného návrhu byl upínací přípravek vyroben, jednotlivé díly byly opatřeny povrchovou úpravou a přípravek byl následně sestaven a jeho výsledná podoba je vidět na obrázcích (32, 33, 34, 35) níže.



Obrázek 32 - Sestavený upínací přípravek 1



Obrázek 33 - Sestavený upínací přípravek 2



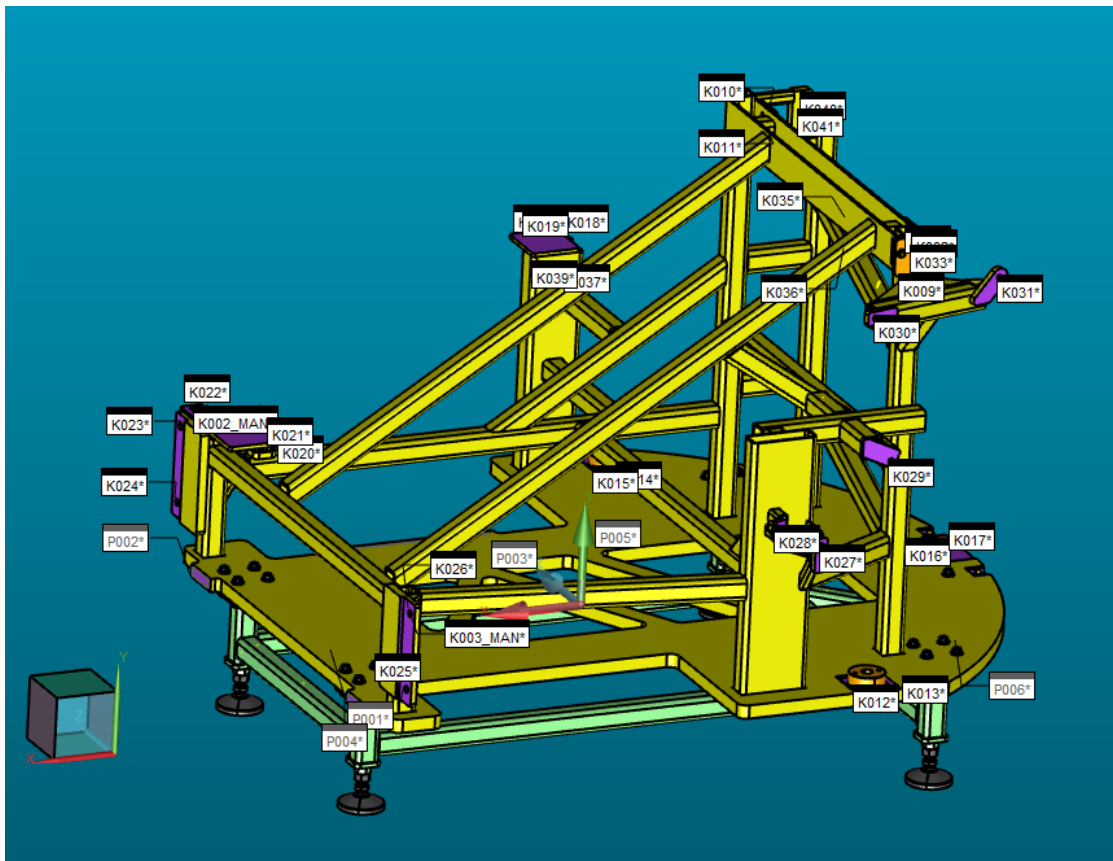
Obrázek 34 - Sestavený upínací přípravek 3



Obrázek 35 - Sestavený upínací přípravek 4

5. Rozměrová kontrola navrženého přípravku

Z výsledného modelu upínacího přípravku byly vytvořeny výkresy jednotlivých dílů pro výrobu a přípravek byl následně vyroben v IC Bobcat Dobříš. Pro rozměrovou kontrolu byl zvolen mostový CMM Alpha DEA (viz obrázek 37). Program měření byl vytvořen tak, že naměřené souřadnice měřených bodů (x, y, z) byly porovnávány s nominálními (modelovými) souřadnicemi těchto bodů. Na obrázku níže (obrázek 36) jsou znázorněny jednotlivé měřené body. Pro vyrovnání přípravku byla použita v SW PC DMIS metoda Best fit. Tato metoda slouží k co nejpřesnějšímu určení orientace a polohy dílu před měřením díky softwarovému posunutí a rotování naměřených prvků na referenční CAD data. V našem případě k tomu bylo použito 21 naměřených prvků.



Obrázek 36 - Měřené pozice

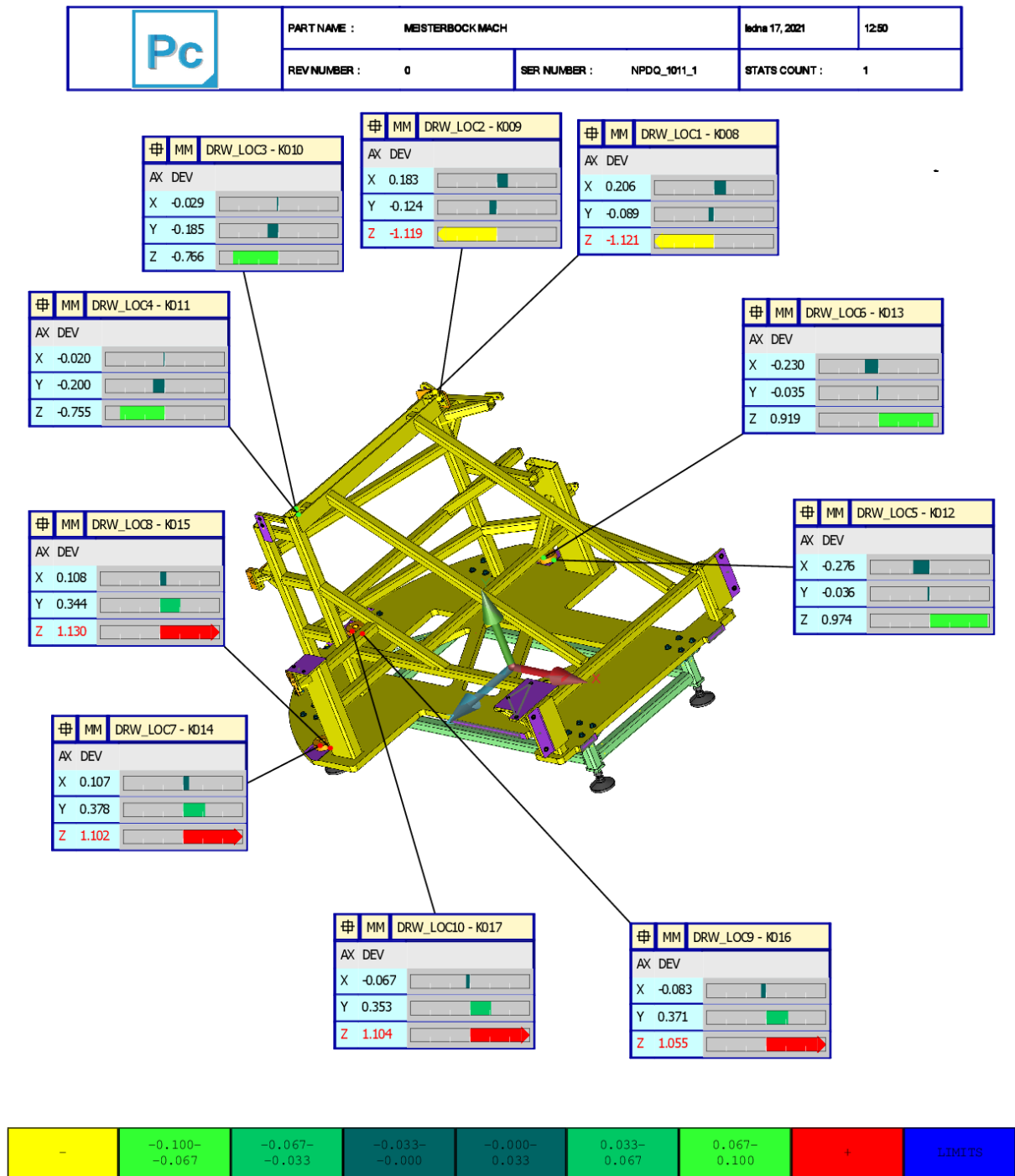


Obrázek 37 - CMM DEA Alpha

Tabulka 2 - Měřicí rozsah CMM DEA Alpha [25]

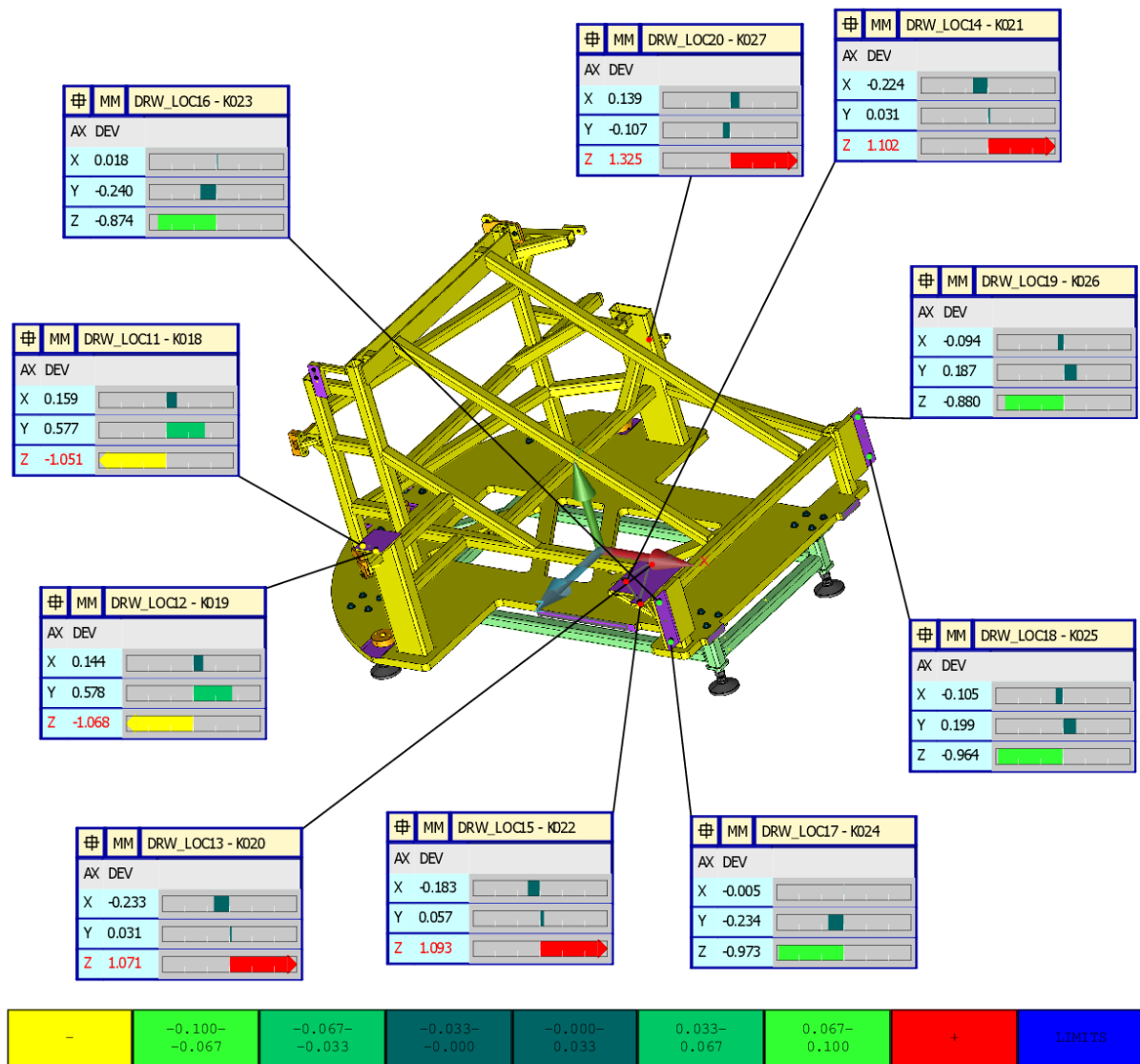
Měřicí rozsah CMM DEA ALPHA (mm)		
X	Y	Z
2000–2500	3300–5000	1000–1500–1800
Přesnost: $MPE_E = \text{od } 3.5 + 3.5 L/1000$		

5.1 Výsledek měření

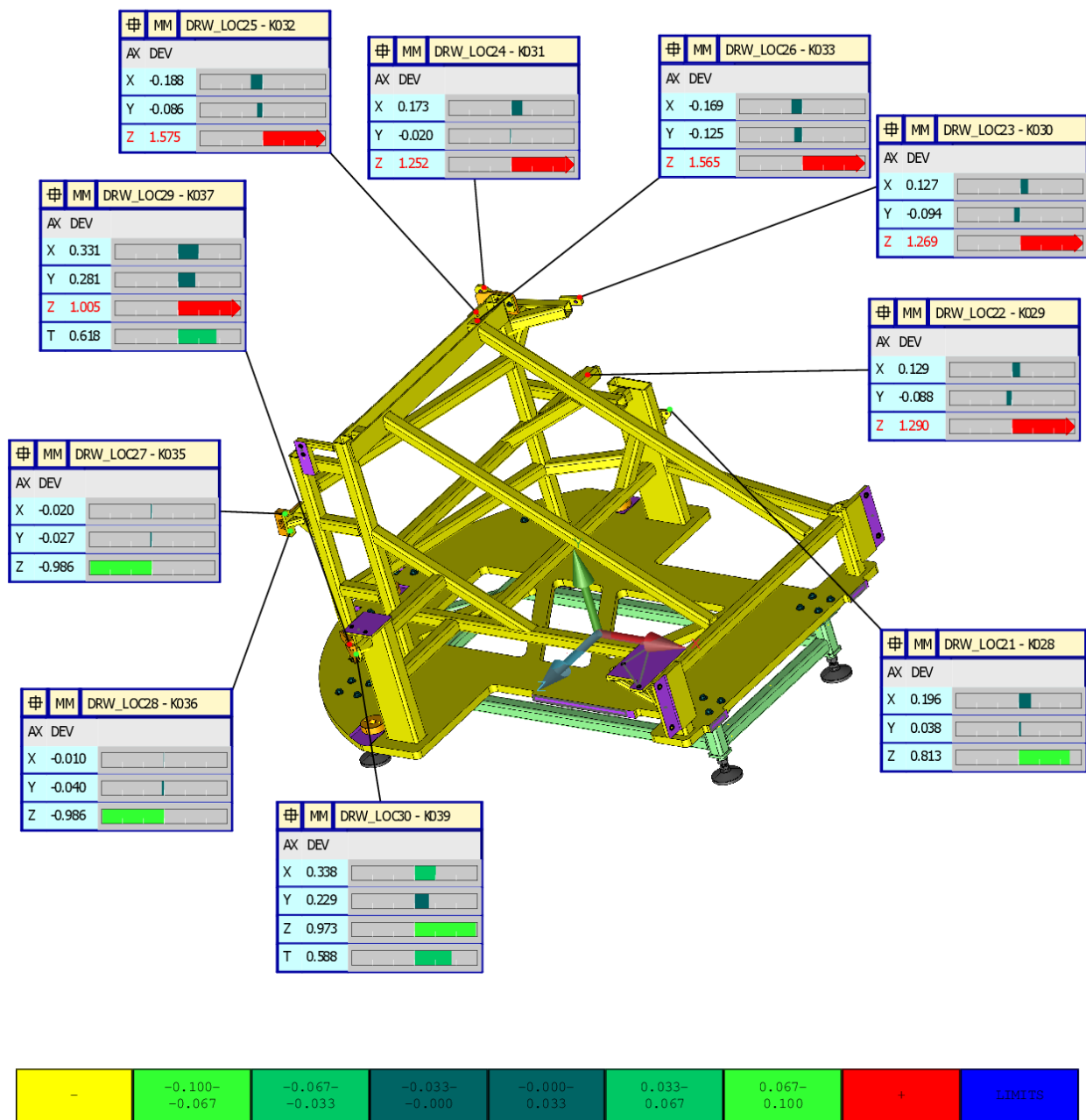


1 / 8

Obrázek 38 - Měřicí protokol 1/8

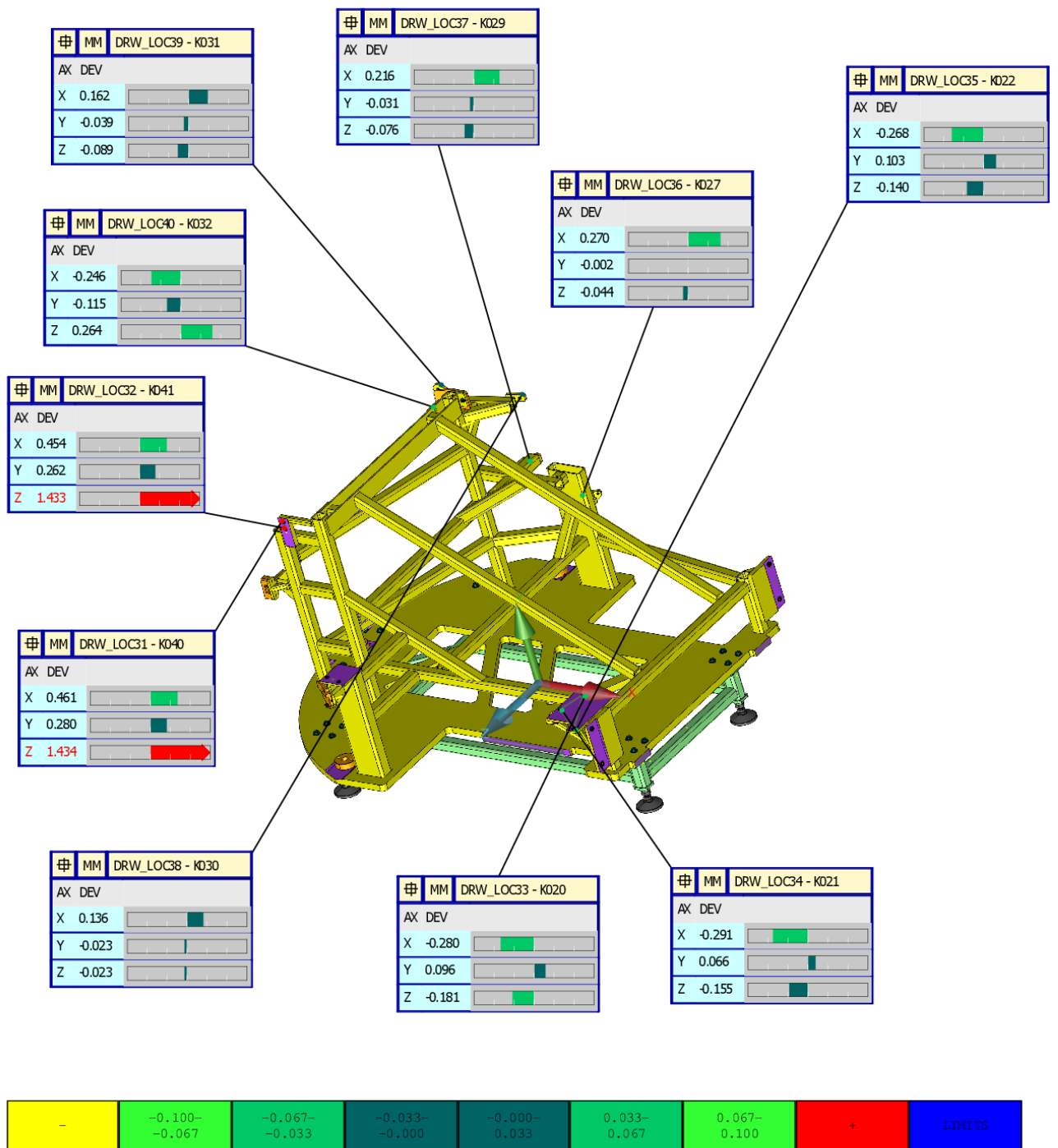


Obrázek 39 - Měřicí protokol 2/8

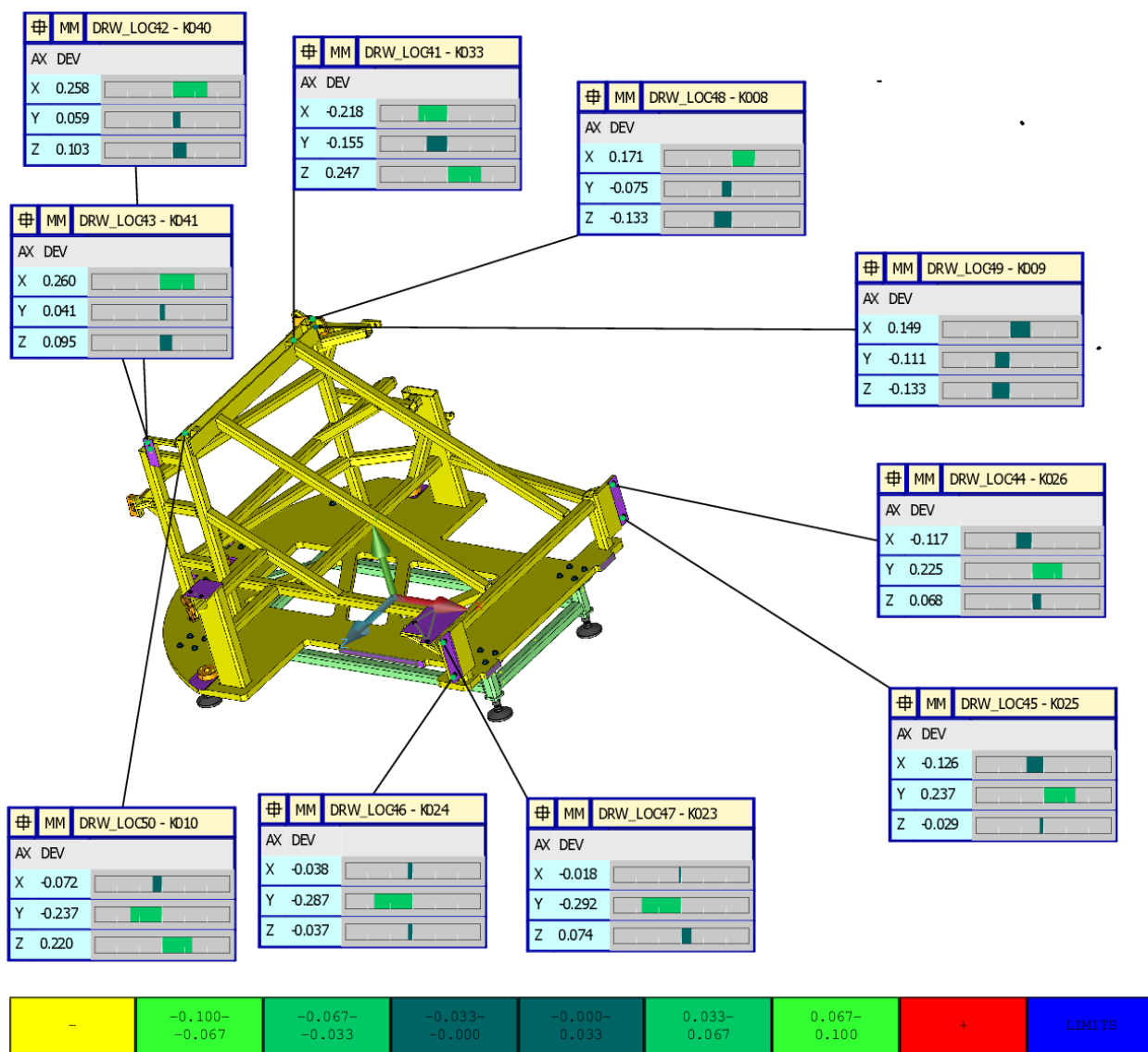


3 / 8

Obrázek 40 - Měřicí protokol 3/8

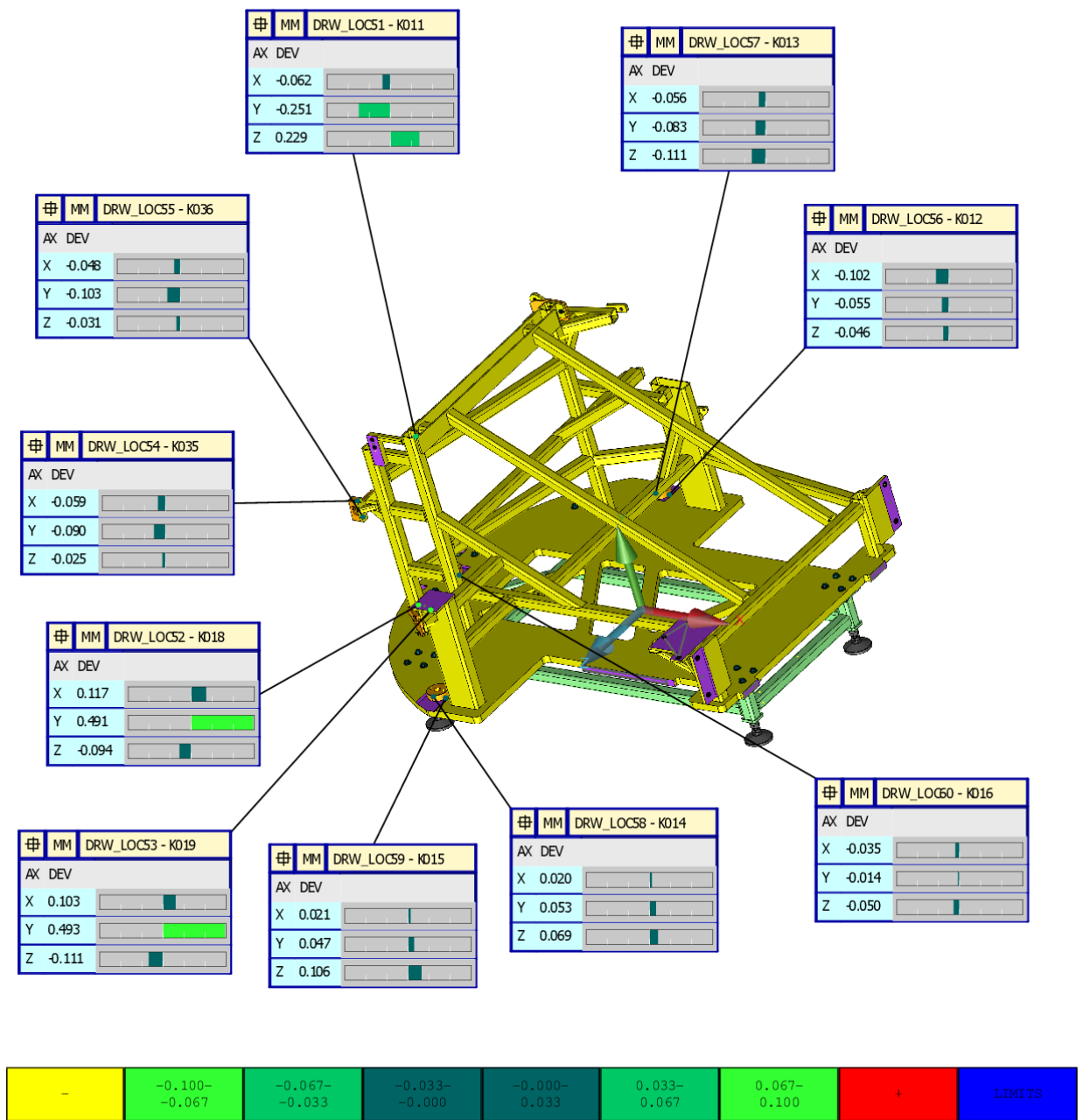


Obrázek 41 - Měřicí protokol 4/8



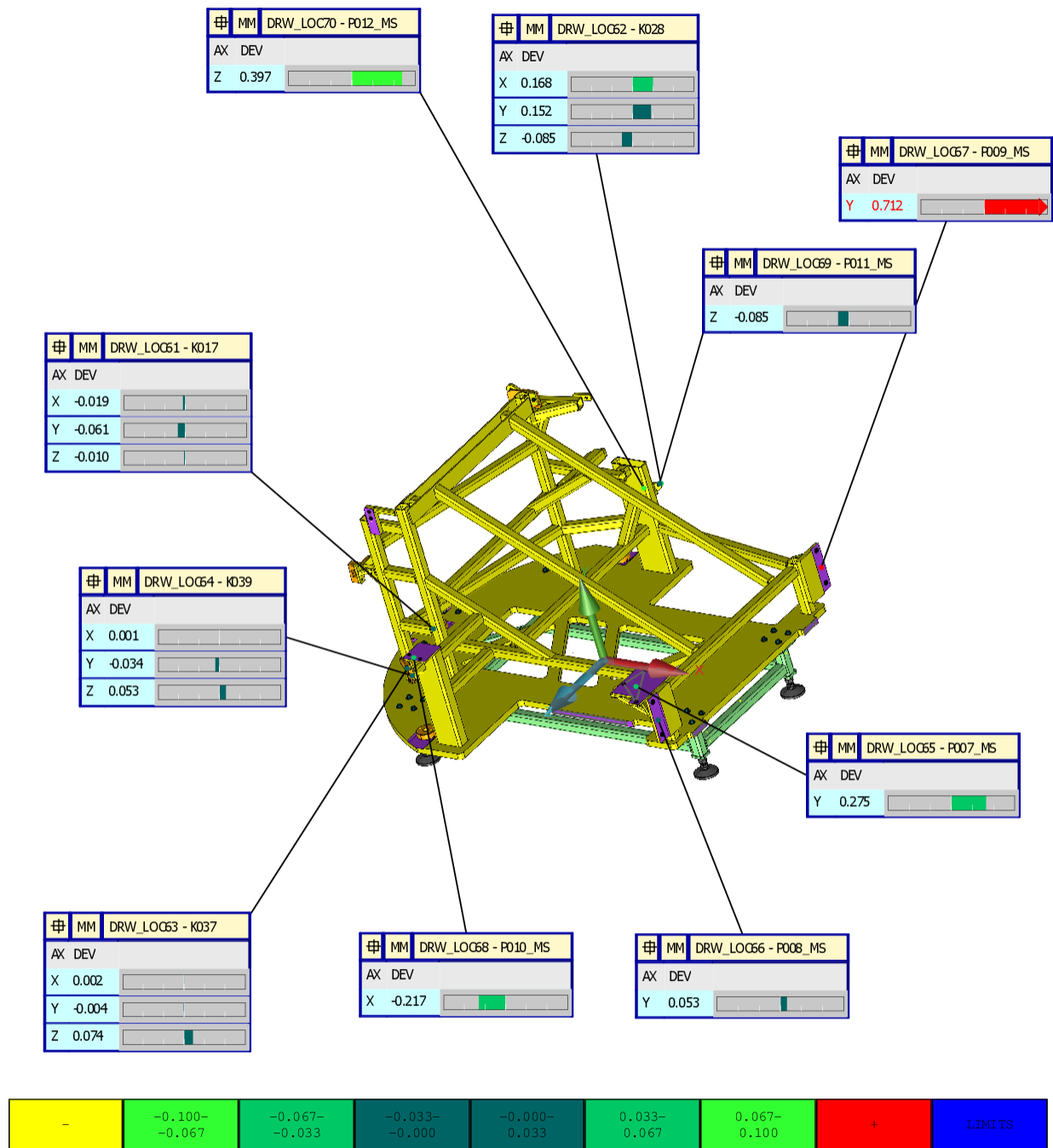
5 / 8

Obrázek 42 - Měřicí protokol 5/8

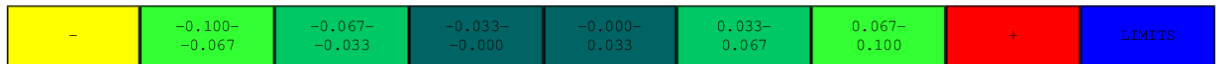
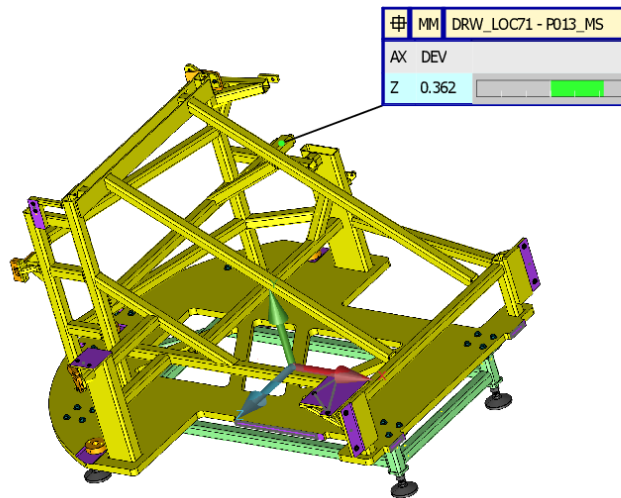


6 / 8

Obrázek 43 - Měřicí protokol 6/8



Obrázek 44 - Měřicí protokol 7/8



8 / 8

Obrázek 45 - Měřicí protokol 8/8

5.2 Rozbor výsledků měření

Celkem bylo na upínacím přípravku změřeno 71 charakteristik z nichž 21 vyšlo mimo předepsanou toleranci. V těchto 21 případech činila maximální odchylka od předepsané tolerance 1,6 mm, nejčastěji se však pohybovala kolem 1,1 mm. Při velikosti svařeného dílu 1620 mm a technických možnostech výroby v IC Bobcat Dobříš je předepsaná tolerance ± 1 mm velmi těžko dosažitelná. Pokud bychom chtěli přípravek vyrobit v předepsané přesnosti, bylo by zapotřebí použít jinou výrobní technologii, např. obrobení z jednoho kusu materiálu nebo použití přesných modulárních upínacích systémů. Náklady by ale v těchto případech vzrostly násobně. Z uvedených důvodů bylo rozhodnuto, že mimotoleranční odchylky jsou natolik malé, že neovlivní funkčnost přípravku a přípravek bude možné ve výrobě využít.

6. Rozměrová kontrola kapotáže pomocí navrženého přípravku

Posledním bodem bylo ověření funkčnosti navrženého a vyrobeného upínacího přípravku sestavením a změřením krytů mini rypadla. Na upínací přípravek bylo upevněno 5 krytů a protizávaží. Pro měření bylo zvoleno skenování kontur povrchu pomocí laser scanneru Hexagon RS6 upevněném na měřicím ramenu Hexagon Romer absolute arm (viz obrázek 46). Pro měření a vyhodnocení byl použit software PolyWorks Inspector. Kvůli velikosti měřeného upínacího přípravku osázeného kryty mini rypadla byly provedeny celkem čtyři skeny. Ty byly následně v softwaru PolyWorks propojeny do jednoho. Naměřené hodnoty byly vyhodnocovány pomocí dvou různých druhů vyrovnání:

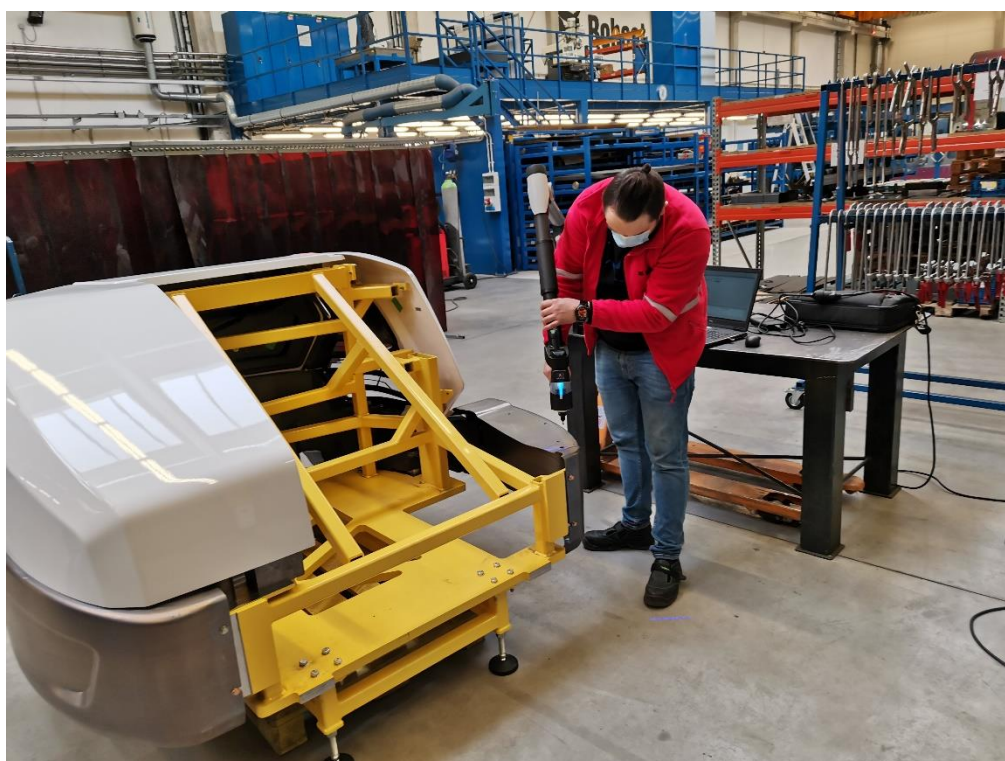
- Best fit – nejlepší napasování skenu na CAD model
- Vyrovnání na tři navzájem kolmé roviny s využitím přesně obrobených ploch na upínacím přípravku



Obrázek 46 - Laser scanner RS6

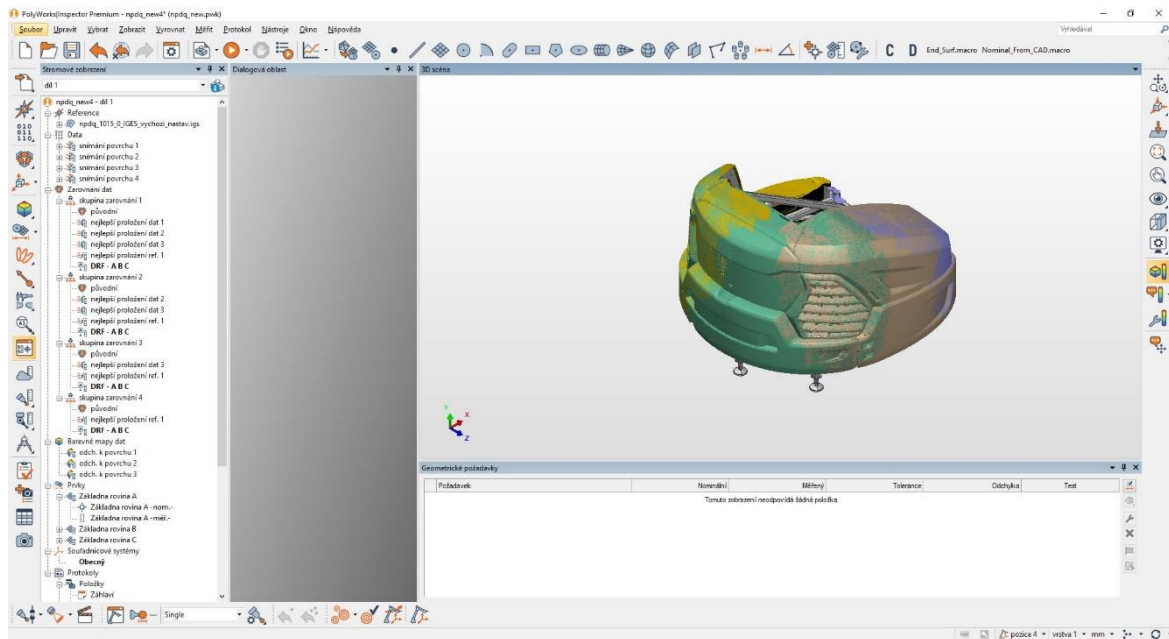


Obrázek 47 - Upínací přípravek osazený kryty mini rypadla

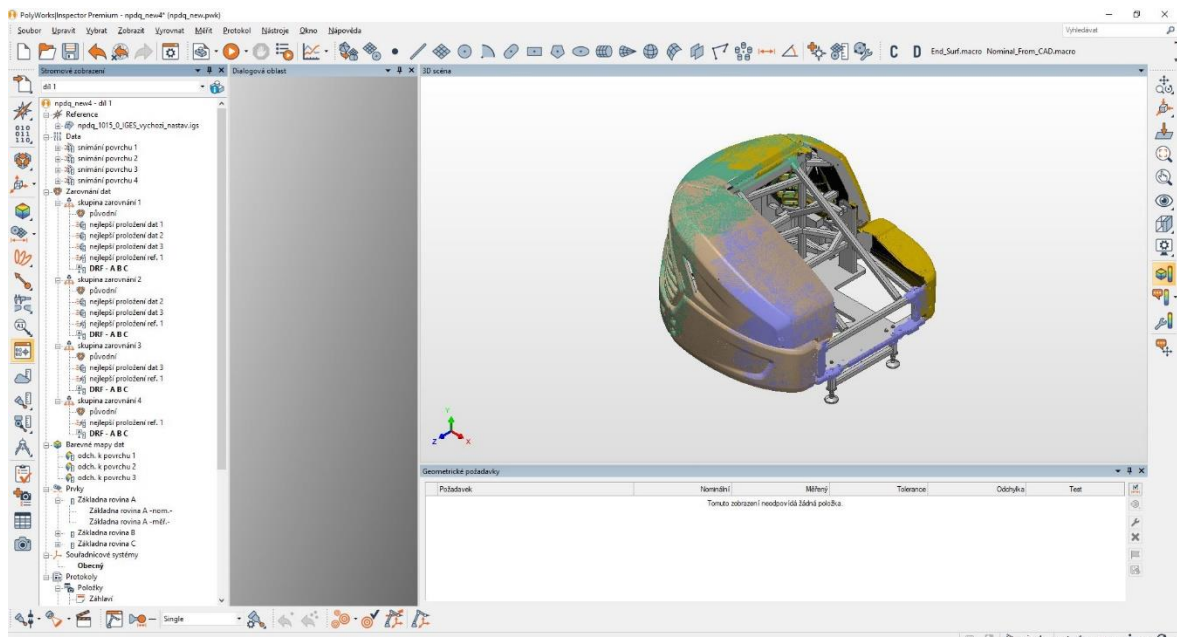


Obrázek 48 - Skenování krytů mini rypadla

Výstupem měření je barevná mapa sestavy, která znázorňuje odchylky od nominálních hodnot CAD modelu. Na jednotlivých měřicích protokolech je barevná stupnice, na které můžeme odečíst velikost odchylky. a obrázcích 49 a 50 je pohled ze softwaru PolyWorks. V této fázi jsou již naskenovaná veškerá data a vyrovnaná na CAD model. Další fází je už tvorba výstupů v podobě barevných map.

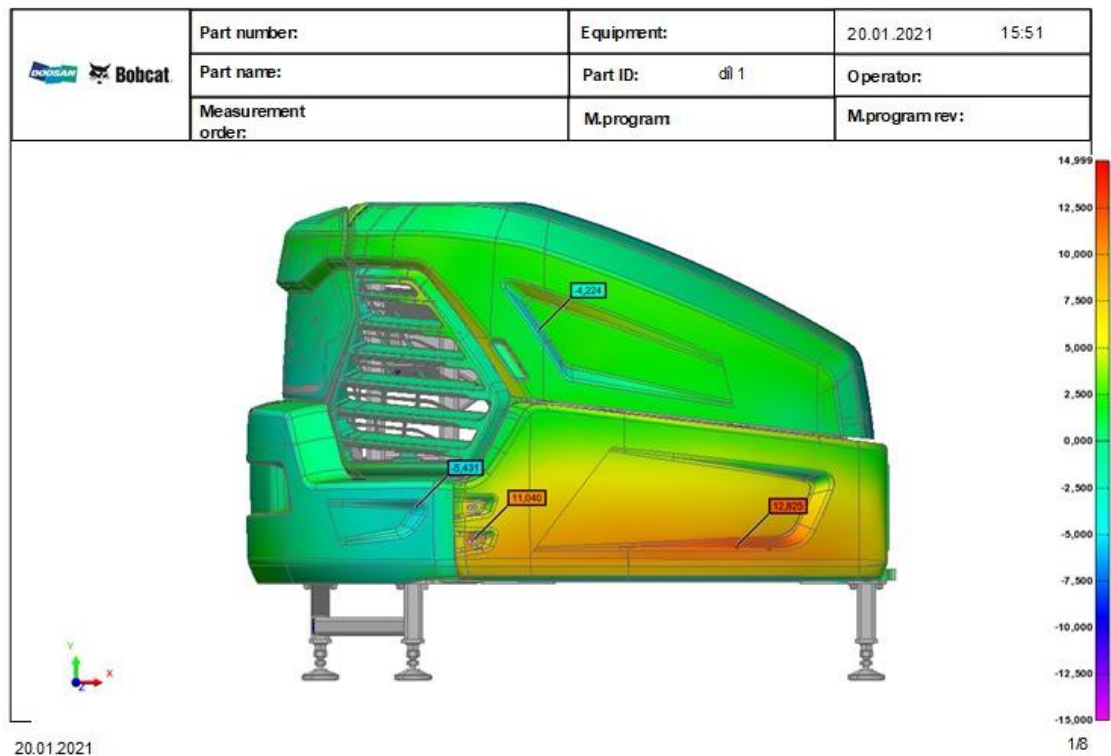


Obrázek 49 - Naskenovaná data v SW PolyWorks 1/2

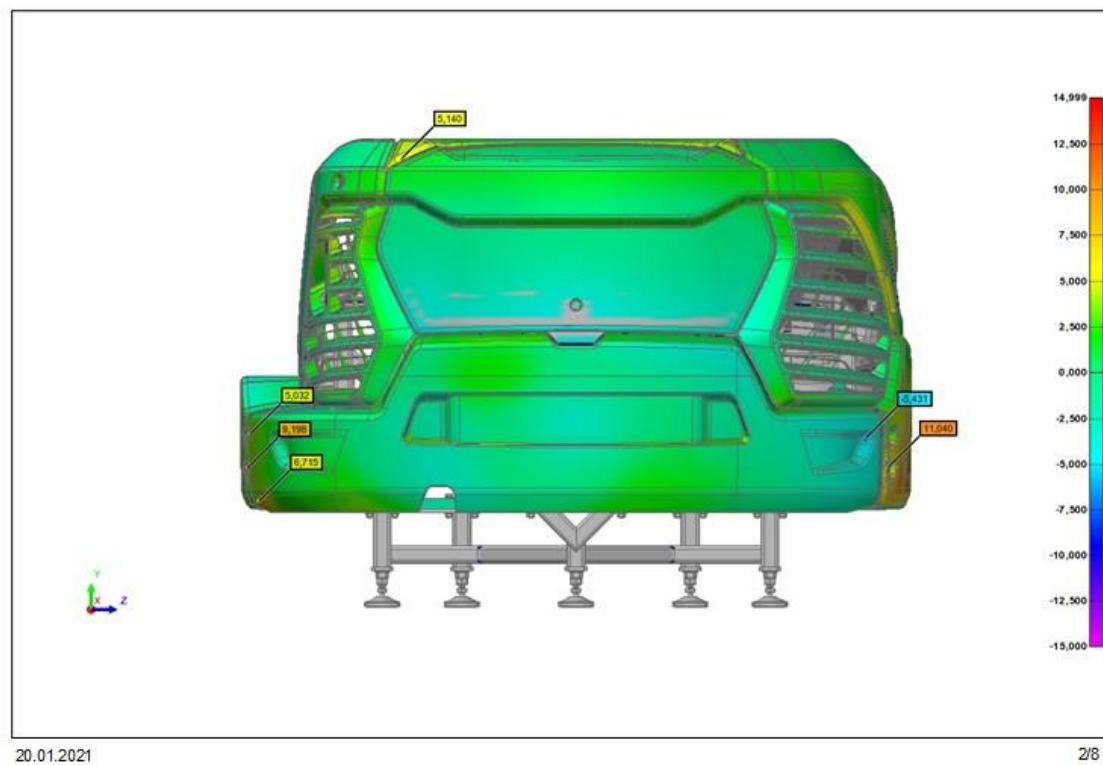


Obrázek 50- Naskenovaná data v SW PolyWorks 2/2

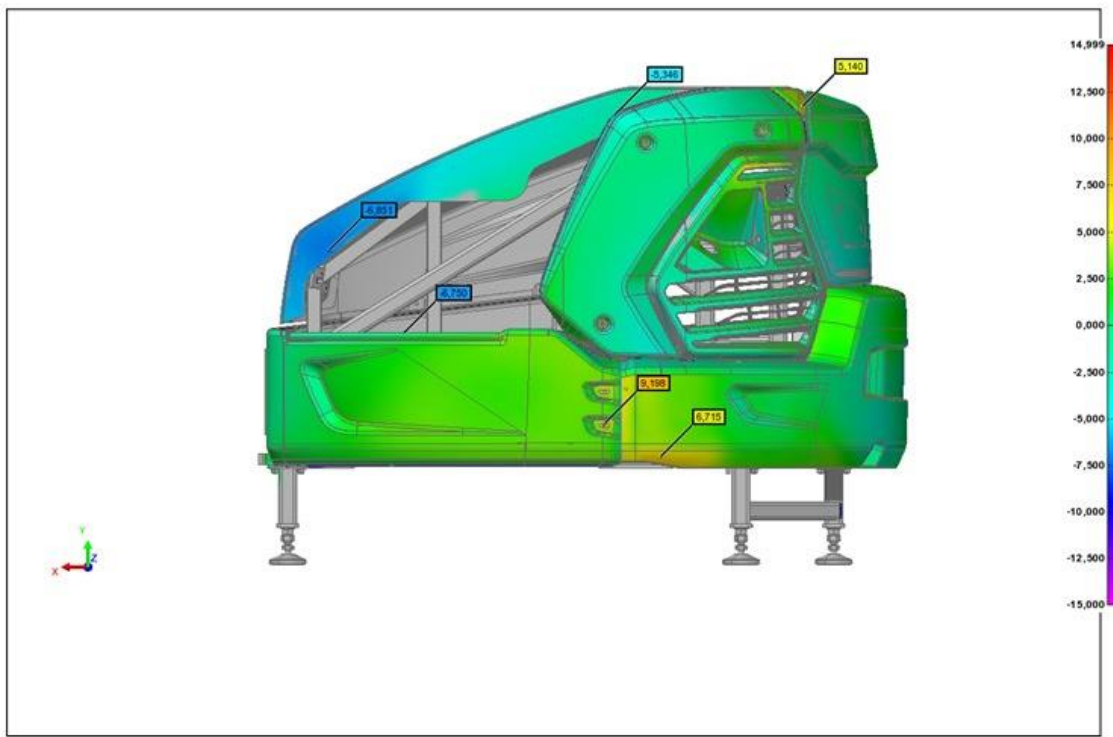
Na obrázcích 50 a 51 je pohled ze softwaru PolyWorks. V této fázi jsou již naskenovaná veškerá data a vyrovnaná na CAD model. Další fází je už tvorba výstupů v podobě barevných map.



Obrázek 51 - Výsledek měření pomocí Laser scanneru 1/8



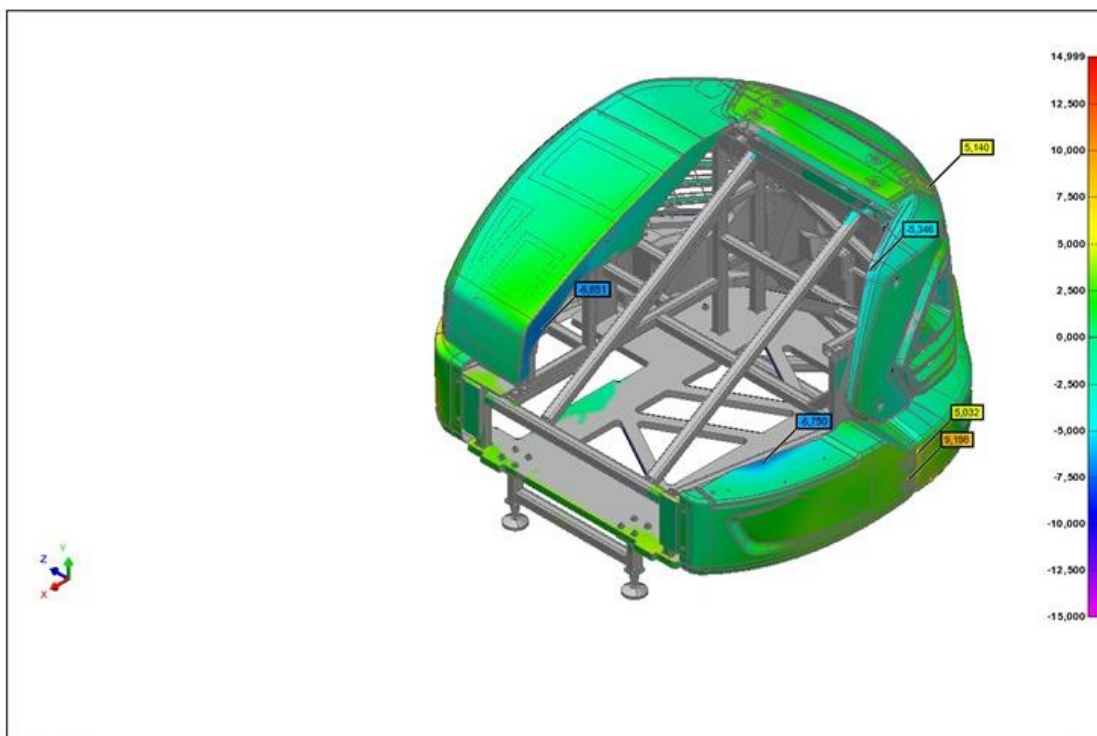
Obrázek 52 - Výsledek měření pomocí Laser scanneru 2/8



20.01.2021

3/8

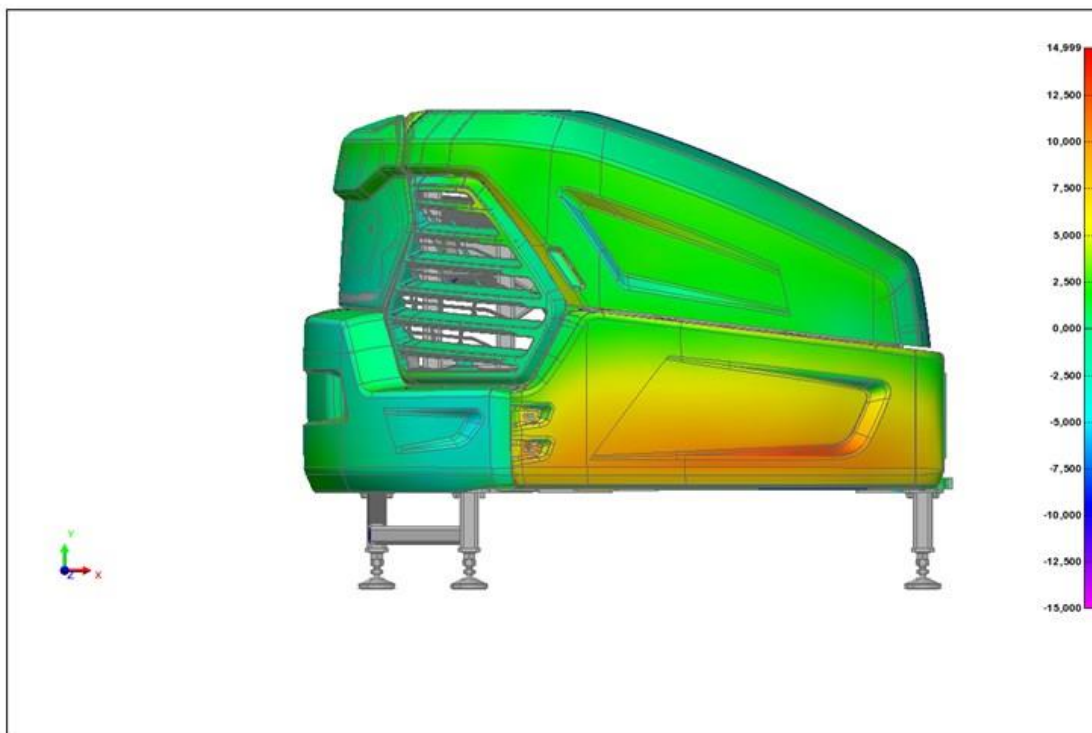
Obrázek 53 - Výsledek měření pomocí Laser scanneru 3/8



20.01.2021

4/8

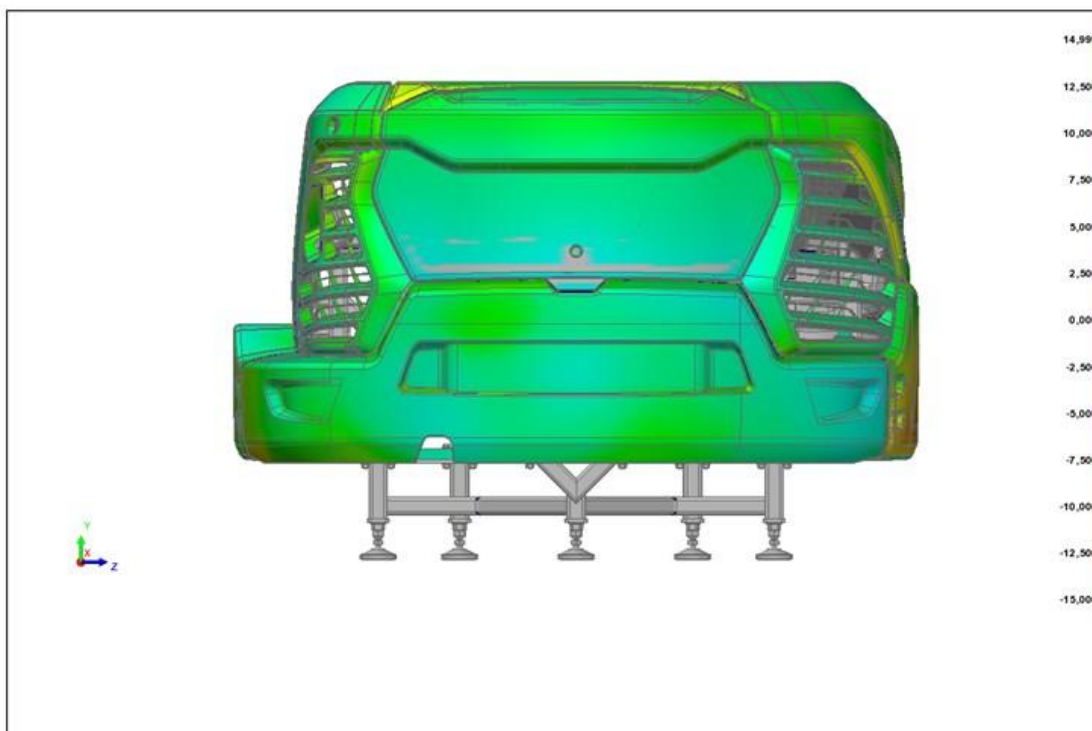
Obrázek 54 - Výsledek měření pomocí Laser scanneru 4/8



20.01.2021

5/8

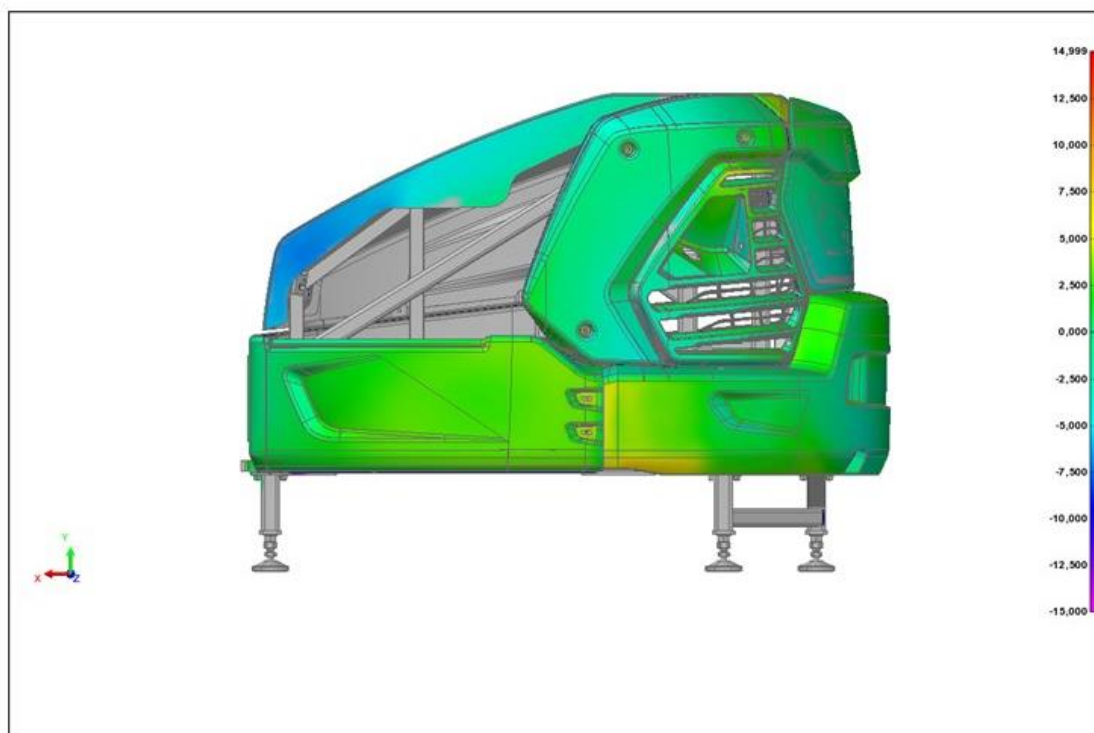
Obrázek 55 - Výsledek měření pomocí Laser scanneru 5/8



20.01.2021

6/8

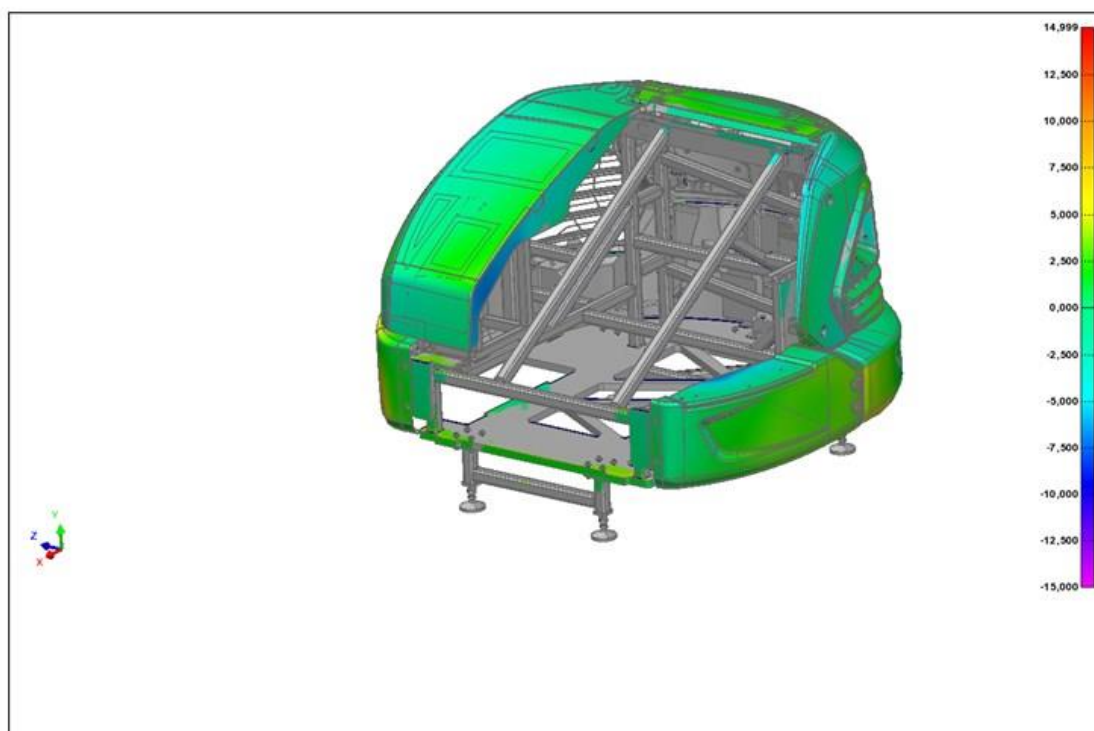
Obrázek 56 - Výsledek měření pomocí Laser scanneru 6/8



20.01.2021

7/8

Obrázek 57 - Výsledek měření pomocí Laser scanneru 7/8



20.01.2021

8/8

Obrázek 58 - Výsledek měření pomocí Laser scanneru 8/8

Výsledky měření pomocí druhého vyrovnání jsou součástí přílohy této práce.

Navržený upínací přípravek správně plnil svou funkci. Metodou laserového skenování se jednotlivé kryty mini rypadla velmi jednoduše měří. Grafický výstup měření je jednoduše vyhodnotitelný a vhodný pro lisované plechové díly. Na první pohled je možné z barevných map detekovat, že jednotlivé kryty správně nelícují. Odchyšky od nominálních hodnot se pohybují v maximech 12,8 mm a -7 mm.

Díky měření krytů pomocí upínacího přípravku dojde ke včasné detekci špatně vyrobených dílů. Takové díly se nedostanou k finální montáži, což ušetří čas i náklady spojené s nápravnými opatřeními.

7. Závěr

Tato práce se zabývá návrhem upínacího přípravku pro kontrolu lisovaných plechových dílů mini rypadla. V první části práce byly představeny možnosti rozměrové kontroly lisovaných plechových dílů pomocí CMM. Pozornost byla věnována nejen kartézských souřadnicovým měřicím strojům, ale i dnes častěji se vyskytujícím měřicím ramenům a laser scannerům. I ty jsou vhodným nástrojem pro měření plechových lisovaných dílů, jak bylo nakonec předvedeno i v závěru této práce.

Další část této práce byla věnována návrhu speciálního upínacího přípravku pro kontrolu krytů mini rypadla Bobcat E55 Compact Excavator. První návrh přípravku byl inspirován konstrukcí mini rypadla. Nevýhodou tohoto návrhu byla hlavně jeho výška, která v kombinaci s použitím protizávaží mohla působit problémem se stabilitou celého přípravku. Finální návrh přípravku byl tedy nižší a došlo u něj i k dalším úpravám, jako například změna konstrukce některých prvků pro lepší obrobitelnost. Změnou prošla i některá funkční místa pro přesné upevnění krytů. Navržený přípravek byl následně vyroben v inovačním centru Bobcat Dobříš.

Vyrobený upínací přípravek byl v další fázi změřen. To proběhlo na souřadnicovém měřicím stroji DEA ALPHA. Celkem bylo změřeno 71 charakteristik z nichž 21 vyšlo mimo předepsanou toleranci. Celý přípravek je svařenec velikosti 1620 mm. Většina předepsaných tolerancí byla ± 1 mm, což je velmi úzká tolerance pro takto veliký navíc svařovaný díl. Maximální odchylka od předepsané tolerance byla 1,6 mm, což v daném případě nesnižuje funkčnost přípravku pro kontrolu kapotáže mini rypadla. Přípravek by bylo možné jistě vyrobit s větší přesností, avšak bylo by zapotřebí využít jiné výrobní technologie, například obrobení z jednoho kusu materiálu nebo využití speciálních modulárních upínacích systémů. Tyto varianty by však byly daleko více (násobně) nákladnější.

Posledním bodem bylo použití vyrobeného upínacího přípravku pro kontrolu kapotáže. Ta proběhla s využitím metody laserového skenování laser scannerem Hexagon RS6. Výstupem tohoto měření jsou barevné mapy znázorňující odchylky od nominálních hodnot (CAD modelu). Použitím vyrobeného přípravku je možné pozorovat „kritická místa“ - místa mezi jednotlivými kryty, které vzájemně nelícují.

Všechny cíle diplomové práce tak byly splněny.

8. Seznam použité literatury

- [1] SŁADEK, Jerzy A. Coordinate Metrology [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016 [cit. 2021-01-18]. Springer Tracts in Mechanical Engineering. ISBN 978-3-662-48463-0. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-662-48465-4
- [2] FAN, Kuang-Chao. Design and Applications of Coordinate Measuring Machines [online]. 2016 [cit. 2021-01-18]. ISBN ISBN 978-3-03842-277-8. Dostupné z: http://www.mdpi.com/journal/applsci/special_issues/coordinate-measuringmachines-2016
- [3] SOUSA, André R. Metrological evaluation of a Coordinate Measuring Machine with 5-axis measurement technology. *Procedia CIRP*. 2018, 75, 367-372. ISSN 2212-8271. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.04.035>
- [4] DUPUIS, J., C. HOLST a H. KUHLMANN. Improving the kinematic calibration of a coordinate measuring arm using configuration analysis. *Precision Engineering*. 2017, 50, 171-182. ISSN 0141-6359. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.05.004>
- [5] Stojkic, Zeljko; Culjak, Eva & Saravanja, Luka (2020). 3D Measurement - Comparison of CMM and 3D Scanner, *Proceedings of the 31st DAAAM International Symposium*, pp.xxxx-xxxx, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-xx-x, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria DOI: 10.2507/31st.daaam.proceedings.xxx
- [6] HOCKEN, Robert J a Paulo H PEREIRA. Coordinate measuring machines and systems: Second Edition [online]. Boca Raton, Fla. : CRC Press, 2012 [cit. 2021-01-04]. ISBN 978-1-4200-1753-3.
- [7] SMITH, Graham T. Machine tool metrology: an industrial handbook. [Switzerland]: Springer, [2016]. ISBN 978-3-319-25107-3.
- [8] PADEVĚT, Václav. Vývoj přípravku pro rozměrovou kontrolu s využitím CMM. 2019. Fakulta strojní ČVUT v Praze. Vedoucí práce Ing. Libor Beránek Ph.D.
- [9] SŁADEK, Jerzy, Ksenia OSTROWSKA a Adam GAŚKA. Modeling and identification of errors of coordinate measuring arms with the use of a metrological model. *Measurement*.

2013, 46(1), 667-679. ISSN 0263-2241. Dostupné z:
doi:<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.08.026>

[10] MURALIKRISHNAN, Bala, Steve PHILLIPS a Daniel SAWYER. Laser trackers for large-scale dimensional metrology: A review: A review. Precision Engineering. 2016, 44, 13-28. ISSN 0141-6359. Dostupné z:
doi:<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2015.12.001>

[11] Measurement Good Practice Guide No. 41: CMM measurement strategies [online]. Hampton Road, Teddington, Middlesex, TW11 0LW: Queen's Printer and Controller of HMSO, 2014, 2014 [cit. 2021-01-04]. Dostupné z: https://www.npl.co.uk/special-pages/guides/gpg41_cmm.pdf?ext=.

[12] Zeiss [online]. [cit. 2021-01-18]. Dostupné z:
<https://www.zeiss.cz/corporate/home.html>

[13] PC-DMIS for bridge and gantry CMMs. Hexagon [online]. [cit. 2021-01-04]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/products/software/pc-dmis/pcdmis-cmm-388>

[14] MODUS™ metrology software. Renishaw [online]. [cit. 2021-01-04]. Dostupné z:
<https://www.renishaw.com/en/modus-metrology-software--10495>

[15] MiCAT Planner. Mitutoyo [online]. [cit. 2021-01-04]. Dostupné z:
[https://shop.mitutoyo.eu/web/mitutoyo/en/mitutoyo/1343028164341/MiCAT%20Planner/\\$catalogue/mitutoyoData/PG/CMM%20Software/index.xhtml?jsessionid=4327F74E33883A037024778B4897E4CE](https://shop.mitutoyo.eu/web/mitutoyo/en/mitutoyo/1343028164341/MiCAT%20Planner/$catalogue/mitutoyoData/PG/CMM%20Software/index.xhtml?jsessionid=4327F74E33883A037024778B4897E4CE)

[16] SHI, Shendong, Bala MURALIKRISHNAN a Daniel SAWYER. Terrestrial laser scanner calibration and performance evaluation using the network method. Optics and Lasers in Engineering. 2020, 134, 106298. ISSN 0143-8166. Dostupné z:
doi:<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106298>

[17] GODA, K., A. MAHJOUBFAR, C. WANG, et al. Hybrid Dispersion Laser Scanner. Scientific Reports. 2012, 2(1), 445. ISSN 2045-2322. Dostupné z: doi:10.1038/srep00445

[18] Hexagon Metrology launches a new range of all-in-one high-speed laser tracker [online]. [cit. 2021-01-04]. Dostupné z: <http://metalworkingnews.info/hexagon-metrology-launches-a-new-range-of-all-in-one-high-speed-laser-tracker/>

[19] Hexagon [online]. [cit. 2021-01-18]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ>

- [20] O společnosti Bobcat CZ, a.s. Bobcat CZ [online]. [cit. 2021-01-04]. Dostupné z: <https://www.bobcat.cz/o-spolecnosti-bobcat-cz>
- [21] Bobcat [online]. [cit. 2021-01-04]. Dostupné z: <https://www.bobcat.com/eu>
- [22] Coordinate Measuring Machine Rooms. Starrco [online]. [cit. 2021-01-04]. Dostupné z: <https://www.starrco.com/modular-office-buildings/coordinate-measuring-machine-cmm-rooms/>
- [23] Coordinate Measuring Machines. Keyence [online]. [cit. 2021-01-04]. Dostupné z: www.keyence.com/ss/products/measure-sys/measurement-selection/type/3d.jsp
- [24] ŠKUTOVÁ, Lucia. Návrh průměrného přípravku pro kontrolu rámu rypadla na CMM. Praha, 2020. Fakulta strojní ČVUT v Praze. Vedoucí práce Ing. Petr Mikeš, Ph.D.
- [25] DEA ALPHA. Hexagon [online]. [cit. 2021-01-18]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-cz/products/coordinate-measuring-machines/gantry-cmms/dea-alpha>
- [26] Choose 3D Laser Scanners for Manufacturing Quality Control. NeoMetrix [online]. [cit. 2021-01-21]. Dostupné z: <http://3dscanningservices.net/blog/choose-3d-laser-scanners-for-manufacturing-quality-control/>
- [27] 3D Scanning Technology — Hard Work That Looks Like “Magic”. Laser Design: A CyberOptics Corporation Brand [online]. [cit. 2021-01-21]. Dostupné z: <https://www.laserdesign.com/what-is-3d-scanning>
- [28] BERÁNEK, Libor. Průmyslová metrologie [přednáška]. Praha, 2018.
- [29] TURLEY, Glen. Evaluation of a multi-sensor horizontal dual arm Coordinate Measuring Machine for automotive dimensional inspection. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014/03/01.

Seznam obrázků

OBRÁZEK 1 - POBOČKY SPOLEČNOSTI BOBCAT VE SVĚTĚ [21]	9
OBRÁZEK 2 - BOBCAT E55 COMPACT EXCAVATOR [20].....	10
OBRÁZEK 3 - PRACOVNÍ ROZSAH MINI RYPADLA E55 [21]	11
OBRÁZEK 4 - ČÁSTI CMM [23].....	16
OBRÁZEK 5 - MOSTOVÝ CMM HEXAGON DEA ALPHA [19]	18
OBRÁZEK 6 - PORTÁLOVÝ CMM DELTA OPERA OD SPOLEČNOSTI HEXAGON [19].....	19
OBRÁZEK 7 - VÝLOŽNÍKOVÝ CMM TIGO SF OD SPOLEČNOSTI HEXAGON [19].....	20
OBRÁZEK 8 - KONTROLA SLÍCOVÁNÍ PLECHŮ NA STOJANOVÉM CMM [29].....	21
OBRÁZEK 9 - HEXAGON MĚŘICÍ RAMENO [18]	22
OBRÁZEK 10 - HEXAGON LASER TRACKER [18]	23
OBRÁZEK 11 - LASER SCANNER PŘIPEVNĚNÝ NA 7OSÉM RAMENU PŘI KONTROLE PLECHOVÝCH DÍLŮ [19].....	24
OBRÁZEK 12 - BAREVNÁ MAPA Z KONTROLY LISOVANÉHO PLECHOVÉHO DÍLU POMOCÍ LASER SCANNERU [19] ...	25
OBRÁZEK 13 - HEXAGON PC DMIS SW	26
OBRÁZEK 14 - CMM MODULÁRNÍ MÍSTNOST [22]	30
OBRÁZEK 15 - SCHÉMA TEPELNÝCH EFEKTŮ PRO MĚŘICÍ A OBRÁBĚCÍ STROJE [6].....	32
OBRÁZEK 16 - RÁM MINI RYPADLA BOBCAT E55	33
OBRÁZEK 17 - KRYT 1.....	34
OBRÁZEK 18 - KRYT 2.....	34
OBRÁZEK 19 - KRYT 3.....	35
OBRÁZEK 20 - KRYT 4.....	35
OBRÁZEK 21 - SESTAVA VŠECH TESTOVANÝCH KRYTŮ	36
OBRÁZEK 22 - 1. NÁVRH UPÍNACÍHO PŘÍPRAVKU.....	37
OBRÁZEK 23 - 1. NÁVRH UPÍNACÍHO PŘÍPRAVKU – POHLED ZDOLA	38
OBRÁZEK 24 - 1. NÁVRH UPÍNACÍHO PŘÍPRAVKU S PLECHOVÝMI KRYTY	39
OBRÁZEK 25 - 2. NÁVRH UPÍNACÍHO PŘÍPRAVKU.....	40
OBRÁZEK 26 - PODSTAVA UPÍNACÍHO PŘÍPRAVKU	41
OBRÁZEK 27 - FUNKČNÍ DÍL – DETAIL 1	41
OBRÁZEK 28 - FUNKČNÍ DÍL – DETAIL 2	41
OBRÁZEK 29 - DETAIL UPEVNĚNÍ ZÁVAŽÍ.....	42
OBRÁZEK 30 - PROTIZÁVAŽÍ	42

OBRÁZEK 31 - 2. NÁVRH UPÍNACÍHO PŘÍPRAVKU S KRYTY	43
OBRÁZEK 32 - SESTAVENÝ UPÍNACÍ PŘÍPRAVEK 1	44
OBRÁZEK 33 - SESTAVENÝ UPÍNACÍ PŘÍPRAVEK 2	44
OBRÁZEK 34 - SESTAVENÝ UPÍNACÍ PŘÍPRAVEK 3	45
OBRÁZEK 35 - SESTAVENÝ UPÍNACÍ PŘÍPRAVEK 4	45
OBRÁZEK 36 - MĚŘENÉ POZICE	46
OBRÁZEK 37 - CMM DEA ALPHA	47
OBRÁZEK 38 - MĚŘICÍ PROTOKOL 1/8	48
OBRÁZEK 39 - MĚŘICÍ PROTOKOL 2/8	49
OBRÁZEK 40 - MĚŘICÍ PROTOKOL 3/8	50
OBRÁZEK 41 - MĚŘICÍ PROTOKOL 4/8	51
OBRÁZEK 42 - MĚŘICÍ PROTOKOL 5/8	52
OBRÁZEK 43 - MĚŘICÍ PROTOKOL 6/8	53
OBRÁZEK 44 - MĚŘICÍ PROTOKOL 7/8	54
OBRÁZEK 45 - MĚŘICÍ PROTOKOL 8/8	55
OBRÁZEK 46 - LASER SCANNER RS6	56
OBRÁZEK 47 - UPÍNACÍ PŘÍPRAVEK OSAZENÝ KRYTY MINI RYPADLA	57
OBRÁZEK 48 - SKENOVÁNÍ KRYTŮ MINI RYPADLA	57
OBRÁZEK 49- NASKENOVANÁ DATA V SW POLYWORKS 1/2	58
OBRÁZEK 50 - NASKENOVANÁ DATA V SW POLYWORKS 2/2	58
OBRÁZEK 51 - VÝSLEDEK MĚŘENÍ POMOCÍ LASER SCANNERU 1/8	59
OBRÁZEK 52 - VÝSLEDEK MĚŘENÍ POMOCÍ LASER SCANNERU 2/8	59
OBRÁZEK 53 - VÝSLEDEK MĚŘENÍ POMOCÍ LASER SCANNERU 3/8	60
OBRÁZEK 54 - VÝSLEDEK MĚŘENÍ POMOCÍ LASER SCANNERU 4/8	60
OBRÁZEK 55 - VÝSLEDEK MĚŘENÍ POMOCÍ LASER SCANNERU 5/8	61
OBRÁZEK 56 - VÝSLEDEK MĚŘENÍ POMOCÍ LASER SCANNERU 6/8	61
OBRÁZEK 57 - VÝSLEDEK MĚŘENÍ POMOCÍ LASER SCANNERU 7/8	62
OBRÁZEK 58 - VÝSLEDEK MĚŘENÍ POMOCÍ LASER SCANNERU 8/8	62

Seznam tabulek

TABULKA 1 - SEZNAM MĚŘENÝCH KRYTŮ MINI RYPADLA	36
TABULKA 2 - MĚŘICÍ ROZSAH CMM DEA ALPHA [25].....	47

Seznam příloh

Příloha 1	Grafický protokol z měření na CMM DEA Alpha
Příloha 2	Protokol z měření na CMM DEA Alpha
Příloha 3	Protokol z měření laser scannerem vyrovnání BEST FIT
Příloha 4	Protokol z měření laser scannerem vyrovnání ABC
Příloha 5	Výkres: sestava upínacího přípravku

Seznam zkratek a symbolů

Symbol/ zkratka	Jednotka	
CMM	[-]	Coordinate measuring machine
AACMM	[-]	Articulated Arms Coordinate Measuring Machines
CAD	[-]	Computer-aided design
DCC	[-]	Direct Computer Control
CAM	[-]	Computer Aided Manufacturing
CMS	[-]	Coordinate measuring systems
IGES	[-]	Initial Graphics Exchange Specification
DMIS	[-]	Dimensional Measuring Interface Standard
ANSI	[-]	American National Standards Institute
QIF	[-]	Quality Information Framework
PMI	[-]	Product and manufacturing information
SW	[-]	Software
CNC	[-]	Computer Numerical Control
IC	[-]	Inovation center
MPE	[μm]	Maximum permissible error