

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



Analýza rozměrové kontroly na CMM v sériové výrobě

Bakalářská práce

Autor: Marek Vaclík
Vedoucí práce: Ing. Libor Beránek, Ph.D.
Studijní program: Výroba a ekonomika ve strojírenství

Praha 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vaclík** Jméno: **Marek** Osobní číslo: **482623**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Analýza rozměrové kontroly na CMM v sériové výrobě

Název bakalářské práce anglicky:

The analysis of the dimensional inspection on the CMM in serial production

Pokyny pro vypracování:

CMM využívané pro kontrolu přesných obráběných dílů v automobilovém průmyslu
Návrh a realizace systému skladování konfigurací snímacích systémů
Analýza časové náročnosti procesu měření ve vybraném podniku
Vazba kontrolního plánu operace na proces výroby

Seznam doporučené literatury:

FABIÁN, F., V. HORÁLEK, V. CHMELÍK, J. CHODOUNSKÝ, J. KRÁL, J. KŘEPELA a J. MICHÁLEK. ČESKÁ SPOLEČNOST PRO JAKOST. Statistické metody řízení jakosti. první. Praha: Česká společnost pro jakost, 2007.
PETRAŠOVÁ, Ivana. Analýza systémů měření (MSA). 4. vydání. Praha 1: Česká společnost pro jakost, 2011, ISBN 978-80-02-02326-5

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Libor Beránek, Ph.D., 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. Libor Beránek, 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

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

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně. Veškeré použité informační zdroje, ze kterých jsem čerpal, jsou v práci citovány a uvedeny v kapitole seznam použitých zdrojů. Souhlasím s využitím výsledků této práce podle uvážení a potřeb školitele.

V Praze _____

Marek Vaclík

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Liboru Beránkovi, Ph.D. za účelné připomínky, poskytnuté materiály, cenné rady a vedení při zpracování bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval mé rodině a přítelkyni za podporu během studia.

Abstrakt

Každý větší strojírenský podnik disponuje měrovým střediskem, jehož cílem je sledování kvality výroby. Ke kontrole se zpravidla využívají souřadnicové měřicí stroje využívající různé konfigurace snímacích systémů. Pro bezproblémový a efektivní průběh měření je nutné řešit systém skladování a evidenci veškerých využívaných snímacích konfigurací. Cíli této bakalářské práce jsou popsat roli metrologie v rámci systému managementu kvality, charakterizovat princip a rozdělení souřadnicových měřicích strojů s důrazem na CMM využívané ke kontrole přesných obráběných dílů v automobilovém průmyslu a v neposlední řadě navrhnout a realizovat funkční systém skladování konfigurací snímacích systémů v rámci strojírenského podniku.

Klíčová slova

Metrologie, management kvality, souřadnicový měřicí stroj, CMM, snímací systém, 3D tisk

Abstract

Every major engineering company has a measurement center, which aims to monitor the quality of production. Coordinate measuring machines using various configurations of probing systems are usually used for the inspection. For trouble-free and efficient measuring process, it is necessary to solve the system of storage and registration of all used probing configurations. The objectives of this bachelor's thesis are to describe the role of metrology within the quality management system, characterize the principle and division of coordinate measuring machines with the emphasis on CMM used to inspect precision machined parts in the automotive industry and, last but not least, to design and implement a functional storage system for probing systems in the engineering company.

Key Words

Metrology, quality management, coordinate measuring machine, CMM, probing system, 3D print

Seznam použitých symbolů a zkratek

CMM	Coordinate Measuring Machine – souřadnicový měřicí stroj
SPC	Statistical Process Control – statistická regulace procesu
MES	Manufacturing Execution Systems – výrobní informační systémy
ERP	Enterprise Resource Planning – systém pro plánování podnikových zdrojů
DMAIC	Define, Measure, Analyze, Improve and Control – cyklus zlepšování
CT	Computed Tomography – výpočetní tomografie
SSC	Stylus System Creator – typ souboru používaný firmou ZEISS
STL	Stereolithography – stereolitografická síť
3D	Three-dimensional space – trojrozměrný prostor
PETG	Polyethylene terephthalate glycol – polyethylentereftalát glykol
FDM	Fused Deposition Modeling – metoda 3D tisku
PLA	Polyactic acid – polymléčná kyselina
CAD	Computer Aided Design – počítačem podporovaný návrh

Obsah

Úvod.....	10
1 Metrologie v systému managementu kvality	11
1.1 Statistické nástroje	12
1.2 Regulace výrobních procesů	14
1.2.1 Způsobilost procesu	15
1.2.2 Regulační diagramy	16
1.3 Metodika „Six Sigma“	17
1.3.1 DMAIC	19
1.4 Lean	20
1.5 In-line a in-procesní metrologie	20
1.6 Podnikové informační systémy	21
1.6.1 MES systémy	21
1.6.2 ERP systémy	21
2 Souřadnicové měřicí stroje	23
2.1 Postup kontroly součásti na CMM	24
2.2 Rozdělení CMM podle konstrukce	26
2.2.1 Kartézské CMM dle normy ISO 10360-1	27
2.2.2 CMM uspořádané podle jiných souřadných systémů	32
2.2.3 Výpočetní tomografie	33
2.3 Snímací systémy CMM	34
2.3.1 Snímací hlavy	35
2.3.2 Dotykové snímací systémy.....	36
2.3.3 Snímací konfigurace	40
3 Návrh systému skladování konfigurací snímacích systémů.....	42
3.1 Analýza snímacích konfigurací	42
3.2 Návrh držáku	44
3.2.1 Optimalizace návrhu	45

3.2.2	Optimalizace pro speciální případy.....	46
3.2.3	Materiál držáku.....	48
3.3	Návrh rozložení snímacích konfigurací	48
4	Realizace systému skladování konfigurací snímacích systémů	50
4.1	Výroba držáků	50
4.1.1	Slicing	50
4.1.2	Tisk držáků	51
4.2	Testování držáku	54
4.3	Umístění držáků do polic.....	55
4.4	Ekonomické zhodnocení projektu.....	57
	Závěr	60
	Seznam použitých zdrojů	62
	Seznam obrázků.....	65
	Seznam tabulek.....	67

Úvod

Management kvality je nepostradatelnou součástí ve výrobním procesu každého strojírenského podniku. V současnosti se klade velký důraz na zrychlování procesu kontroly kvality. Je tedy nutné, aby byla kontrola součástí efektivní a nezdržovala samotný proces výroby.

Souřadnicové měřicí stroje se v dnešní době využívají pro kontrolu dvěma rozdílnými způsoby. Buďto se na CMM kontroluje přímo vyráběný produkt, kdy se z časového hlediska udělá výběrová kontrola výrobků. Na základě hodnocení daného výběru se následně statisticky hodnotí celý výrobní proces. Druhý způsob kontroly se neprovádí přímo na CMM. K přímé kontrole se využívají jednoúčelové stanice zabudované do výrobní linky. Díky nim je možné kontrolovat v některých případech i každý vyrobený kus. Kontrola musí být ovšem rychlá a sladěná s taktem výrobní linky. Takovéto jednoúčelové stanice se zpravidla nastavují na referenčních kusech výrobků, které byly předtím kalibrovány na CMM. Využití souřadnicových měřicích strojů v měrových laboratořích vyžaduje evidenci a systém skladování veškerých konfigurací snímacích systémů.

V první části se věnuji roli metrologie v oblasti managementu kvality. Popisují metodiky Six Sigma a Lean využívané v procesu zdokonalování výrobního procesu, funkce podnikových informačních systémů a základní principy in-line a in-procesní metrologie. V další části charakterizují podstatu a funkci souřadnicových měřicích strojů a snímacích systémů využívaných těmito stroji.

Cíli práce jsou charakterizovat CMM využívané pro kontrolu vysoce přesných obráběných dílů, konkrétně především kartézsky uspořádané souřadnicové stroje s dotykovými snímacími systémy, a navrhnout a následně zrealizovat funkční systém skladování konfigurací snímacích systémů, který bude vyhovovat zadavateli a bude uživatelsky přívětivý. Z důvodu omezení přístupu vlivem pandemie do společnosti nebylo možné vypracovat analýzu časové náročnosti procesu měření, místo toho byla posílena část týkající se systému skladování konfigurací snímacích systémů.

1 Metrologie v systému managementu kvality

Metrologie je nedílnou součástí systému kontroly kvality produktů. Pro efektivní a funkční management kvality je vždy nezbytné získat a analyzovat korektní data týkající se rozměrů a geometrických charakteristiky, aby bylo s těmito daty možné nadále pracovat a zdokonalovat kvalitu výrobků. Data se zpravidla měří právě pomocí metrologických strojů.

Problematika kontroly kvality si již zdaleka nevystačí s běžnými deterministickými přístupy a je nutné uvažovat i variabilitu (proměnlivost). Variabilita se nachází v každém výrobním procesu a způsobuje potíže, které mohou narůst do významných rozměrů. Snahou je tedy poznat zdroje variability, a těm zdrojům, které zvyšují variabilitu, předcházet. K uskutečnění prevence je nejprve zapotřebí poznat příčiny, které variabilitu způsobují. Je nutné zaznamenávat veškeré faktory, které mohou výrobní proces ovlivnit. Zkoumání těchto faktorů tedy vyžaduje organizované zkoumání procesu, a to za pomoci měřicích přístrojů a sond, odběrů vzorků atd. Následně je potřeba odborně zjištěná data zpracovat a vyhodnotit. Přístupem k managementu kvality se zabývá norma EN ISO 9000. Pro analýzu a řízení kvality se využívají statistické metody.

Pro držení se normy EN ISO 9000 je zapotřebí soustavně uskutečňovat zlepšování kvality. To je ovšem realizovatelné pouze za neustálého sběru dat, zpracování a analýzy těchto dat. Poté následuje vyhodnocení a případná realizace opatření, která vede k opravě a zdokonalení procesu. Mnohdy mohou tyto postupy vést i ke změnám technologií či například k úpravám v technických předpisech.

Je nutné brát v potaz, že s rostoucí složitostí a komplexností experimentů roste i potřeba odbornější analýzy získaných dat. Moderní doba poskytuje současným podnikům výhodu v podobě dostupnosti nástrojů a vybavení využitelných ke kontrole kvality. Nejnovější vydání norem ISO 9000 ukládá za povinnost dodavateli, že musí identifikovat potřebu statistických metod v celém procesu a musí vytvářet a udržovat dokumentované postupy pro řízení veškerých dokumentů a údajů. Nicméně řada podniků tyto požadavky pochopila pouze jako způsob, jak dosáhnout certifikátu a po zisku certifikátu již považuje kontrolu kvality za nákladný a vlastně zbytečný proces. Takový přístup však reálně těmto firmám škodí, a to především v perspektivě a uplatnění na trhu.

Pozice na trhu lze posílit jedinečně pomocí aplikace procesu soustavného zlepšování všech svých činností. Prevence je efektivnější než detekce, realizována rozsáhlými výstupními kontrolami, neboť při těchto kontrolách již mnohdy není možné zjistit původce neshod a zdrojů vysoké variability. Předcházení nevyhovujícím situacím dává podniku více času na řešení budoucí kontroly kvality a strategie celého podniku.

Mezi nejčastější prostředky využívané v managementu kvality patří metody a nástroje, které se používají ke statistickému řízení procesů s důrazem na prevenci, stabilitu kvality na úrovni požadované zákazníkem a hospodárnost výroby. Zdroj informací o procesu je většinou realizován v podobě regulačních diagramů, ukazatelů způsobilosti a výkonnosti procesu. Pro výpočet finálních regulačních diagramů je potřeba důkladná analýza zkoumající chování jednotlivých procesů v čase, po které následuje odstranění veškerých příčin. Nadále je potřeba vymyslet a uskutečnit funkční opatření, které zabrání opakovanému objevení daných příčin v procesu. Pro procesy s náročnými požadavky kladenými od zákazníka je využívána progresivní metoda „six sigma“, která během analýzy obvykle požaduje i aplikaci plánovaných experimentů. [21]

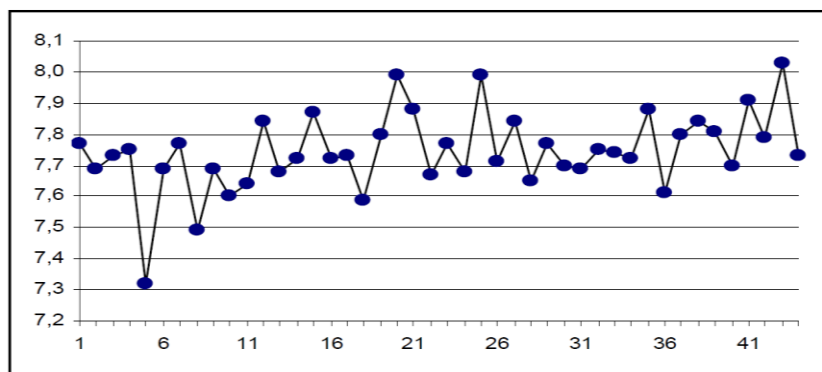
1.1 Statistické nástroje

Při aplikaci statistických metod rozeznáváme dva druhy uskutečnění daného jevu, které popisují skutečnost z pravděpodobnostního hlediska. Prvním druhem způsobu realizace skutečností je jev, který se za určitých podmínek vždy uskuteční. Tento jev je označován jako nutný. Druhým typem je jev, který se někdy uskuteční a jindy nikoliv. Takovýto jev nazýváme jevem náhodným. Pro pochopení a podchycení náhodných jevů je potřeba je opakovaně pozorovat. Pokud jejich relativní četnost roste společně s počtem experimentů, nazýváme tyto jevy statisticky stabilními.

Statistické metody se vždy popisují na určitém souboru dat. Základní soubor je souborem všech jednotek, který je předmětem sledování. Jeho rozsah může být konečný i nekonečný. Výběrový soubor poté vzniká výběrem určitých jednotek ze základního souboru. Výběr by měl být především reprezentativní a homogenní. Nicméně homogenost ani reprezentativnost nelze zcela zaručit, a proto je snaha alespoň o výběr náhodný.

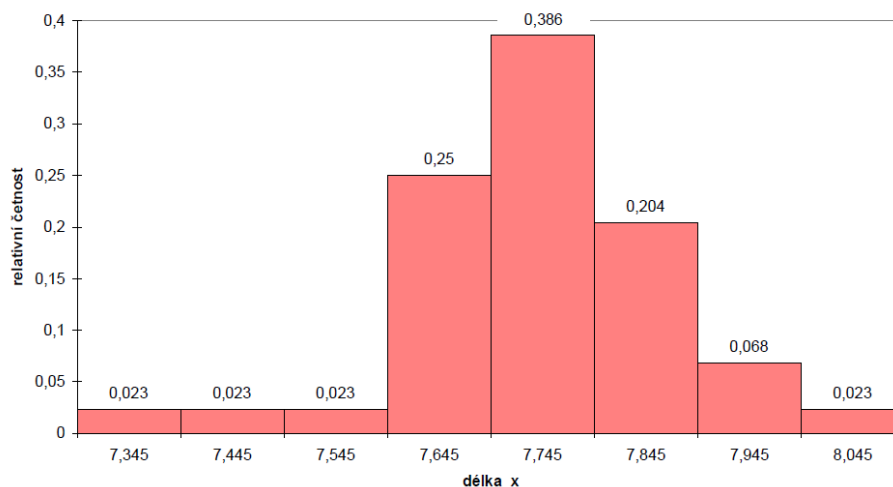
Statistické charakteristiky lze rozdělit na charakteristiky polohy a variability. Mezi základní charakteristiky polohy se řadí například výběrový průměr \bar{x} , výběrový medián Me či výběrový modus Mo . Charakteristikami variability jsou například výběrový rozptyl s^2 , výběrová směrodatná odchylka s nebo výběrové rozpětí R .

K lepšímu porozumění naměřených dat se využívá grafické zobrazení. Jedním z nejpoužívanějších je tzv. průběhový diagram, který je velmi užitečný. Na základě tohoto diagramu lze mnohdy rychle a snadno bez výpočtů odhalit nenáhodná chování procesu, jakými jsou například trendy, skoky nebo periodické výkyvy. Data je nutné pro správnost a funkčnost zachovat v pořadí, ve kterém byla naměřena. [21]



Obr. 1: Průběhový diagram [21]

Dalším typem diagramů je histogram, který graficky znázorňuje data seskupená do třídních intervalů. Podle tvaru histogramu můžeme odhadovat chování naměřených dat. Symetrický tvar histogramu například popisuje tzv. normální pravděpodobnostní rozdělení, známé jako Gaussova křivka.



Obr. 2: Histogram v relativních četnostech [21]

1.2 Regulace výrobních procesů

Statistická regulace procesu, anglicky Statistical Process Control (SPC), je systém zpětné vazby, který má za úkol dosáhnout a udržet stav, ve kterém se proces uskutečňuje na stabilní úrovni. Díky tomu proces vytváří produkty, které jsou vyhovující z hlediska požadované kvality.

Proces je celková kombinace výrobců, dodavatelů, obsluhy a zařízení, materiálu, výrobních a měřicích metod, prostředí a v neposlední řadě také zákazníků. Během výkonu SPC je velice důležité znát vlastní proces, jeho vnitřní variability a jejich příčiny.

Existují dva typy opatření. Opatření přímo v procesu jsou ekonomicky výhodnější. Jsou totiž orientována tak, aby zabránila významným rozdílům důležitých znaků již od technického zadání. Účinnost takového opatření musí být specifikována dříve, než je ono opatření zavedeno do systému. Druhým typem je opatření na výstupu z procesu. Takováto opatření jsou ekonomicky tíživější, protože jsou zaměřena pouze na odhalení a opravy výrobků nesplňujících specifikace. Prevence by měla vždy mít přednost a předcházet detekci na výstupu.

Existují tedy dvě strategie. Strategie prevence soustřeďuje těžiště odpovědnosti tam, kde kvalita vzniká. Snaží se předcházet vzniku neshodných výrobků, snižuje náklady na materiál, čas i mzdy nezbytné k výrobě neshodných výrobků a přispívá k neustálému zlepšování kvality. Představuje tedy výrazná pozitiva oproti strategii druhé, konkrétně strategii detekce. Ta cílí těžiště zodpovědnosti až na výstup z procesu, vyžaduje nákladné třídící kontroly. Navíc neumožňuje přímo zpětnovazební zásah a vkládá prostředky do práce, času a materiálu na nepoužitelné výrobky.

Příčiny můžeme rozdělit na příčiny náhodné a příčiny zvláštní neboli vymežitelné. Zdrojem proměnlivosti u náhodných příčin je široká škála neidentifikovatelných příčin variability. Každá taková příčina přispívá k celkové variabilitě velice nepatrně. Během působení těchto příčin je proces stabilní a odhadnutelný, je tedy statisticky zvládnutý. Zvláštní příčiny jsou způsobeny reálnými změnami ve výrobním procesu a lze je detekovat pomocí regulačních diagramů. Takovéto příčiny se musejí nejprve identifikovat, následně odstranit a musí být navržena a zavedena prevence zabraňující opakování těch samých příčin v budoucnu.

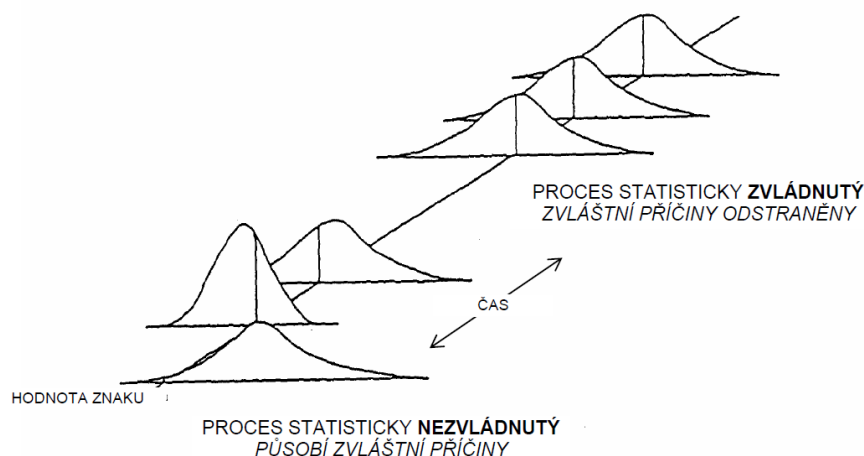
Hlavním cílem samotné regulace výrobního procesu je udělat ekonomicky podložená rozhodnutí, která ovlivňují opatření týkající se procesu. SPC má za úkol vytvořit signál v případě, pokud se objeví nežádoucí zvláštní příčiny kolísání. Regulace procesu musí zároveň předcházet falešným signálům, kdy se zvláštní příčiny kolísání v systému nevyskytují. [21]

1.2.1 Způsobnost procesu

Způsobnost procesu popisuje, jaká je schopnost procesu stále poskytovat zákazníkům produkty splňující požadovanou kvalitu. Mít dostatečné informace týkající se způsobnosti procesu je důležité pro výrobce i zákazníka. Způsobnost totiž poukazuje na realitu, jestli je produkt vyráběn za podmínek dodržujících předepsaná kritéria kvality.

Způsobnost nám popisuje vztah mezi technickým zadáním a přirozeným kolísáním vznikajícím kvůli nahodilým příčinám. Jedná se tedy o nejlepší výkon procesu, který funguje ve statisticky zvládnutém stavu. Proces nelze uvést do statisticky zvládnutého stavu před detekcí a následným opatřením zvláštních příčin. Až po odstranění těchto příčin je proces předvídatelný a může být určena jeho způsobnost.

Ukazatele způsobnosti rozdělujeme na krátkodobé a dlouhodobé. Krátkodobé jsou podloženy měřeními získanými ze samostatného provozního cyklu a jsou používány za účelem ověření, jestli může proces fungovat ve statisticky zvládnutém stavu. Dlouhodobé jsou založené na základě měření realizovaných v delším časovém období a díky tomu zohledňují v čase variabilitu procesu. [21]



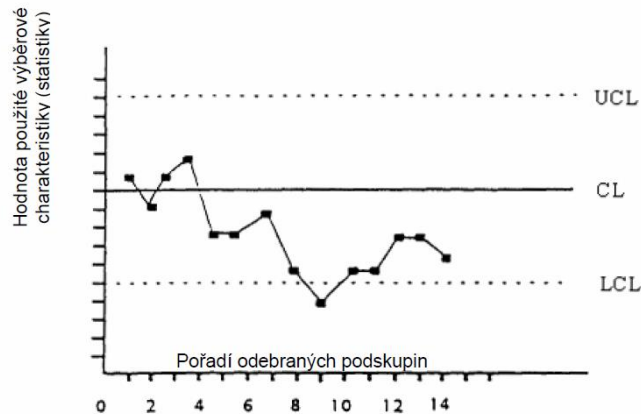
Obr. 3: Schéma statisticky zvládnutého a nezvládnutého procesu [21]

1.2.2 Regulační diagramy

Pokud je daný systém způsobilý a statisticky zvládnutý, může se zavést statistická regulace. Údaje o sledovaném znaku kvality, které se získají v určitých intervalech z procesu, se vyhodnocují pomocí regulačních diagramů. Pomocí nich je možné docílovat neustálého zlepšování procesu, které spočívá v opakované aplikaci postupu spočívajícího v následných krocích.

Prvním krokem je sběr údajů a jejich následné zakreslení do diagramu. Následuje krok propojený se samotnou regulací, kdy se určují pokusné regulační meze, identifikují zvláštní příčiny, navrhuje se opatření vedoucí k odstranění těchto příčin a určitá forma zabezpečení, aby se neopakovaly. Poté se prověřuje účinnost provedených opatření, znovu se sbírají data a určují se nové regulační meze. Posledním krokem je analýza a zlepšování. Regulační diagramy sledují proces a lze díky nim provádět průběžnou analýzu a odhalovat možnosti pro snížení variability, kterou vyvolaly zvláštní příčiny. Samotný přepočítání regulačních mezí by se měl realizovat pouze tehdy, pokud to vyžaduje proces a jeho chování, tedy například v případě změny materiálu, měření či určitých zásahů v technologickém postupu.

Regulační diagramy jsou velice účinné nástroje určené k poznání kolísání procesu. Jsou schopny detekovat přítomnost zvláštních příčin a pomáhají, aby bylo možné předpovídat chování v procesu. Jejich aplikace umožňuje procesu dosahovat vyšší kvality při nižších nákladech. Poskytují objektivní informace o efektech navržených opatření a ztělesňují objektivní nástroj vhodný pro porovnání výkonů procesů například mezi jednotlivými směny. Statistická regulace se rozděluje na dva typy podle charakteru sledovaného znaku kvality, buď měřením nebo srovnáváním. Stejně lze popsat i regulační diagramy a existují tedy diagramy při kontrole měřením a při kontrole srovnáváním. [21]



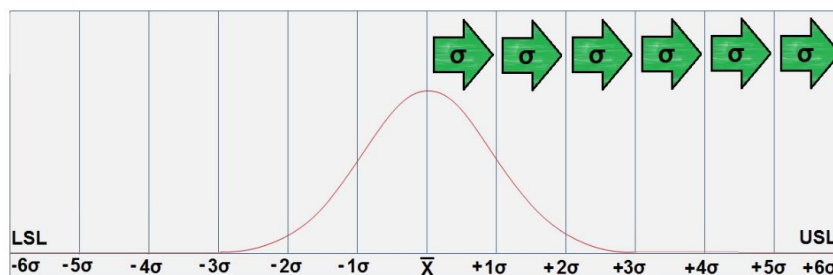
Obr. 4: Náčrtek regulačního diagramu měřením [21]

1.3 Metodika „Six Sigma“

Six Sigma je metodika, která se snaží dosáhnout spokojenosti zákazníka, zároveň dosahovat zisku, šetřit životní prostředí a v neposlední řadě rozvíjet mezilidské vztahy. Tuto metodu vyvinula americká společnost Motorola, nicméně ideu se dále snažily rozvíjet i další společnosti. Dnes se jedná o jeden ze základních principů týkajících se managementu kvality. Six Sigma umožňuje podnikům snižovat variabilitu a chybovost procesů.

Samotný název Six Sigma se týká statistiky. Každý výstup z procesu má svou variabilitu, jejíž velikost lze vyjádřit pomocí směrodatné odchylky, a střední hodnotu, která je zpravidla odhadována aritmetickým průměrem.

Cílem metody je zvládnout proces do takové míry, že variability procesu popsaná směrodatnou odchylkou není větší, než 1/12 tolerancí. Jinými slovy se do tolerančních mezí vejde plus mínus 6 směrodatných odchylek. Odtud název metody Six Sigma. Tato skutečnost vychází ze statistické idey, která popisuje snahu udržení neshodných položek za hranicí šesti směrodatných odchylek od střední hodnoty. Těmito hranicemi jsou horní (USL) a dolní (LSL) mezní hodnoty.



Obr. 5: Vymezení pojmu Six Sigma [25]

Six Sigma se opírá o tři základní složky. Konkrétně se jedná o zkušenosti, statistické metody a zdravý rozum. Praktické zkušenosti lidí jsou výchozím bodem pro použití vhodných vědeckých metod. Pomocí statistických metod je možné dosáhnout chtěných výsledků a zdravý rozum je základnou pro jasné definice cílů, fungování mezilidských vztahů a vyváženost ve využití vědeckých metod a zkušeností.

Metodika Six Sigma poskytuje návrhy na řízení procesu, především týkající se přístupu k řízení a zvládnání procesů, aby dokázaly splňovat podnikatelské cíle. Pomáhá doporučovat metody, jak navrhovat nové výrobky a procesy pro lepší uspokojení zákaznických potřeb (přístup DFSS) a v neposlední řadě návrhy na zlepšení již existujících procesů, aby taktéž uspokojily požadavky zákazníků (přístup DMAIC). Cíle a poslání Six Sigma jsou zobrazeny na obrázku č.6. [4, 22, 25]



Obr. 6: Cíle a poslání Six Sigma [22]

1.3.1 DMAIC

DMAIC je metodologie používána pro zlepšování procesu. Samotný název je zkratkou složenou z pěti slov popisujících názvy jednotlivých fází zlepšování procesů. Jmenovitě se jedná o Define (definovat), Measure (měřit), Analyze (analyzovat), Improve (zlepšit) a Control (řídit). Tyto fáze jsou vzájemně propojeny a tvoří proces. Výstup jedné fáze funguje jako vstup do fáze následující.



Obr. 7: DMAIC

První je fáze Define. Jejím cílem je definovat cíl projektu a jeho rozsah, získat podklady o procesu a zákazníkovi. Výstupem by mělo být dostatečné porozumění plánovanému zlepšení a způsobu, jakým bude zlepšení měřeno.

Druhá fáze Measure se zaměřuje na sběr informací o současné situaci. Výstupem jsou poté základní data o současném výkonu procesu a data, která přesně vymezují umístění problému či jeho výskyt. Zároveň je určeno, zda je měřicí systém správně nastaven. Specifikuje se aktuální „sigma“ a „způsobilost“ procesu.

Fáze Analyze se snaží identifikovat příčiny defektů a ověřit je pomocí testování hypotéz. Výstupem je především statisticky ověřená významnost kritických vstupních a procesních proměnných a jejich vliv na výstup.

Cílem fáze Improve je vytvořit, vyzkoušet a implementovat řešení, která odstraňují hlavní příčiny problémů v procesu. Výstupem jsou tedy plánované, ohodnocené a testované faktory, které by měly odstranit nebo snížit vliv prvotních příčin problémů.

Poslední, pátou, fází je Control, která pomocí dat vyhodnocuje řešení i plány. Pomocí standardizace procesů se snaží zajistit životaschopné zlepšení. Ověřuje, zda všechny provedené změny odpovídají fungujícímu systému řízení změn a požadavkům na shodu a v neposlední řadě navrhuje další kroky podporující kontinuální zlepšování. Výstupy fáze řízení bývají zpracované procedury, standardy nebo instrukce, analýza stavu před a po aplikaci DMAIC či například dokončená dokumentace výsledků, získaných poznatků a doporučení.

Přestože je DMAIC proces po sobě následujících fází, může se stát, že bude nutností se vrátit zpět a například upřesnit definici projektu či provést nová měření. [22]

1.4 Lean

Metodika Lean, poprvé použitá japonskou Toyotou, umožňuje maximalizování aktivit přidávajících hodnotu výrobku nebo služby a zároveň se snaží o eliminaci aktivit, které hodnotu nepřidávají. Lean tedy urychluje procesy a redukuje investovaný kapitál. Mezi základní principy této metodiky patří vymezení hodnoty, kterou určuje zákazník, dále určení toku hodnoty a eliminace plýtvání, určení toku, tj. vzdálenosti a doby, kterou produkt v procesu musí urazit a v neposlední řadě se Lean taktéž snaží dosáhnout dokonalosti procesu. Úkolem je eliminovat 7 druhů plýtvání:

- Defekty (vadné výrobky, špatně zadané informace)
- Nadprodukce (výroba na sklad, nadbytečné reporty)
- Nadměrné zásoby (nadbytek materiálu na lince či ve skladu)
- Zbytečné pohyby (nesdružené či rozdělené operace, data zadávána navíc)
- Nadbytečné zpracování (zbytečnosti v návrhu výrobku, nadbytečné schvalování)
- Doprava (kroky v procesu vyžadující přesun na velkou vzdálenost)
- Čekání (čekání na výstup z delší operace, práce v dávkách)

Reálně se velice často využívá spojení metodik Six Sigma a Lean a vzniká tím nástroj souhrnně nazývaný Lean Six Sigma. Six Sigma zvyšuje kvalitu procesu snižováním variability, zatímco Lean napomáhá k urychlování procesu a snižuje investovaný kapitál odstraněním plýtvání. [22]

1.5 In-line a in-procesní metrologie

Pokud se díly kontrolují v dedikovaných metrologických laboratořích, jsou kontrolovány tzv. off-line. V těchto laboratořích se většinou provádí měření za pomoci kontaktních snímačů. Kontrola v těchto laboratořích poskytuje většinou komplexní pohled na zkoumané charakteristiky, nicméně je proces kontroly zdlouhavý, již díky nutné logistice. Existují tudíž druhy kontroly, které nevyžadují přepravu dílů do samostatných metrologických laboratoří.

In-line metrologie je zabudována v rámci výrobní linky, nicméně nekontroluje nutně každý vyrobený kus, ale například každý desátý. Tím, že nejsou kontrolovány veškeré vyrobené kusy, může in-line metrologie provádět důkladnější kontrolu více

charakteristik. Aby mohl výrobní proces nadále bez omezení fungovat, je na lince vyvedena výhybka, která kontrolovaný díl dovede k měřicí stanici.

In-procesní metrologie je taktéž zabudována do výrobní linky, nicméně nedisponuje výhybkou. Zpravidla se při aplikaci in-procesního měření kontroluje každý vyrobený díl. Nutností je, aby měření neovlivňovalo plynulost výrobní linky. Proto je nezbytné, aby samotná kontrola trvala maximálně stejný čas, jako okolní výrobní operace, protože jsou dopravníky celé linky ve stejném taktu. Během in-procesního měření se tudíž měří jen vybrané důležité charakteristiky, které je možné změřit v požadovaném čase jednoho kroku výrobní linky. K měření se využívají převážně jednoúčelové měřicí stanice, určené k měření specifické charakteristiky.

1.6 Podnikové informační systémy

1.6.1 MES systémy

MES systémy, vycházející z anglického Manufacturing Execution Systems čili Výrobní informační systémy, jsou počítačové systémy, které jsou v podnicích využívány pro sledování výrobních procesů. Pomáhají rozhodujícím pracovníkům přijímat důležitá rozhodnutí ovlivňující výrobu. Lze díky nim také odhalit případné problémy včas a díky tomu zefektivnit výrobu. Mezi hlavní znaky MES systému patří především skutečnost, že pracují v reálném čase. MES systémy tvoří most mezi podnikovými informačními systémy, především ERP, a systémy pro řízení výrobních procesů a sběru dat.

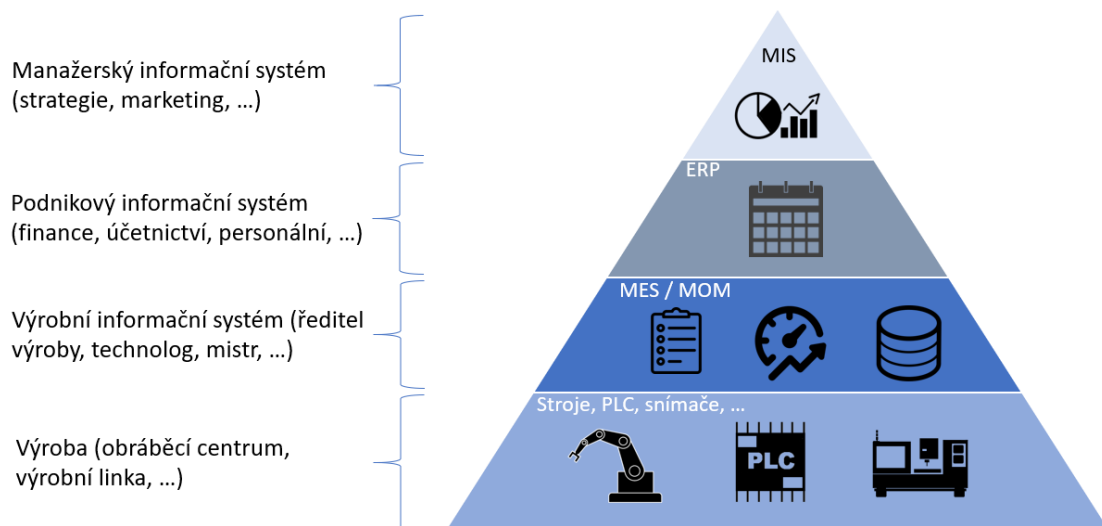
MES systémy zasahují do mnoha oblastí, od plánování výroby, přes správy prostojů, řízení procesu kvality, vyhodnocení výroby až například po vyhodnocení efektivity výroby. Pomáhají k vytváření bezchybných výrobních procesů a podporují vytváření jednotného pohledu na výrobní data. [23]

1.6.2 ERP systémy

ERP systém, anglicky Enterprise Resource Planning, je ucelený systém v rámci podniku, který zajišťuje širokou funkční podnikovou oblast. Jedná se například o finance, obchod, účetnictví, dále marketing a logistiku či správu majetku i zákazníků. Nicméně může zasahovat i do oblasti výroby. Nelze jím ovšem nahradit MES systémy, přestože zasahuje do výroby, protože ERP systémy pracují s rozdílnou koncepcí času.

ERP systém totiž pracuje často s časem v řádu až měsíců, sleduje totiž podnik především z hlediska obchodního. Díky tomu je možné plánovat do vzdálenější budoucnosti a optimálněji a s větším nadhledem sledovat výrobní ukazatele. MES naopak pohlíží na fungování společnosti z výrobního hlediska. Konkrétně se tak jedná maximálně o dny, spíše o hodiny až sekundy. MES systém je tedy pružnější a dokáže se rychleji a adekvátněji přizpůsobit situacím ve výrobě.

ERP systémy fungují na principu dosažitelnosti dat odkudkoliv a kdykoliv. Je proto zapotřebí neustálé připojení k internetu, které nelze především ve výrobním prostředí vždy dostatečně zajistit. MES systémy jsou primárně koncipovány tak, aby byly aplikovány co nejbližše provozu, který řídí a sledují. Díky tomu se snižuje možný výskyt problémů s připojením. ERP systémy jsou tedy celkově komplexnější a univerzálnější nástroje. MES systémy jsou více specializované, a to především na část výroby. [24]



Obr. 8: Struktura informačních systémů v podniku [23]

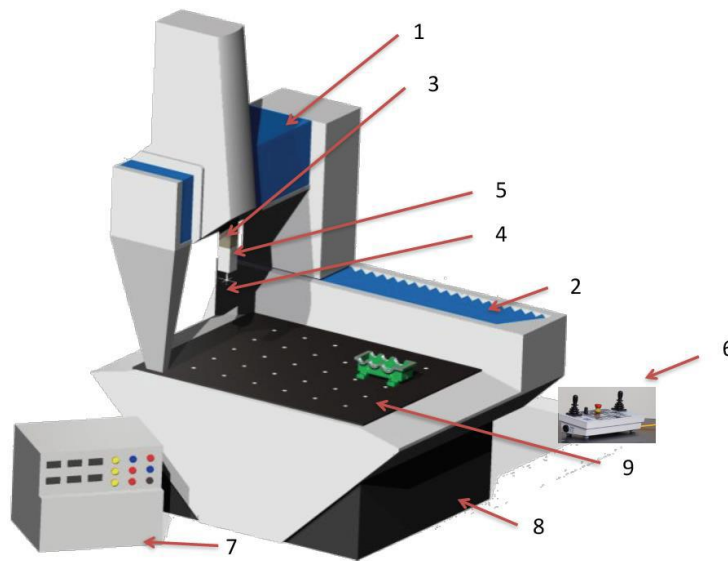
2 Souřadnicové měřicí stroje

Souřadnicové měřicí stroje (anglicky Coordinate measuring machines, CMM) jsou jedním z nejužitečnějších a nejschopnějších metrologických zařízení. Jsou široce využívány napříč průmyslovým odvětvím, například v letectví či automobilovém průmyslu. Díky flexibilitě, přesnosti a rychlosti získání a vyhodnocení dat patří CMM mezi nenahraditelné stroje používané ve výrobním procesu. Mezi přední vlastnosti souřadnicových měřicích strojů patří především jejich univerzálnost umožňující kontrolu nepřeberného množství různě tvarově složitých dílů. CMM lze také snadno automatizovat a můžeme díky nim výrazně potlačit vliv lidského faktoru na výsledky měření. Pomocí CMM se kontrolují rozměry dílu, geometrické tolerance a v neposlední řadě také textura povrchu.

Primární funkce souřadnicových měřicích strojů spočívá ve změření reálného tvaru měřeného dílu, následném porovnání získaných dat s požadovaným tvarem tohoto dílu a ve vyhodnocení rozměrových charakteristik a geometrických tolerancí.

Informace o tvaru a rozměrech jednotlivých geometrických prvků na dílu získáváme výpočtem z extrahovaných bodů z povrchu dílu. Samotnou součást popisujeme zpravidla v lokálním souřadném systému, který je zapotřebí na dílu definovat.

Reálný tvar měřeného dílu je získáván za pomoci sběru dat na povrchu daného dílu v podobě bodů. Nejprve se určí základní bod v prostoru a následně jsou měřeny body, potřebné k vyhodnocení charakteristik, formou souřadnicových rozměrů v jednotlivých osách systému, tj. X, Y a Z. Získávání dat je prováděno kontaktně, kdy se senzor fyzicky dotýká měřeného tělesa, či bezkontaktně za pomoci například optických a triangulačních senzorů. Dále lze rozdělit snímací systémy na spínací (bodové) nebo skenování. [1, 2, 3]



Obr. 9: Popis částí kartézsky uspořádaného CMM, 1: Osa X, 2: Osa Y, 3: Konfigurace snímačů, 5: Snímací hlava, 6: Ovládací panel, 7: Řízení stroje, 8: Základna stroje, 9: Stůl pro umístění součásti [4]

2.1 Postup kontroly součásti na CMM

Prvním krokem při přípravě kontroly na CMM je vždy analýza výkresové dokumentace. Následně se podle znalostí získaných z výkresu, kterými jsou především kontrolované charakteristiky, základny potřebné pro vyhodnocení těchto charakteristik, specifikování míst a orientace dílu pro co nejvhodnější upnutí, definuje upnutí součásti.

Upnutí je zapotřebí tedy zvolit tak, aby byly jednotlivé prvky dílu určené ke kontrole dostupné snímacím systémem. Upnutí součásti musí být dostatečně tuhé, aby se zabránilo zkreslení výsledků a může být realizováno pomocí upínacího přípravku v podobě modulárního systému, tj. stavebnice či pomocí zakázkového speciálního přípravku.

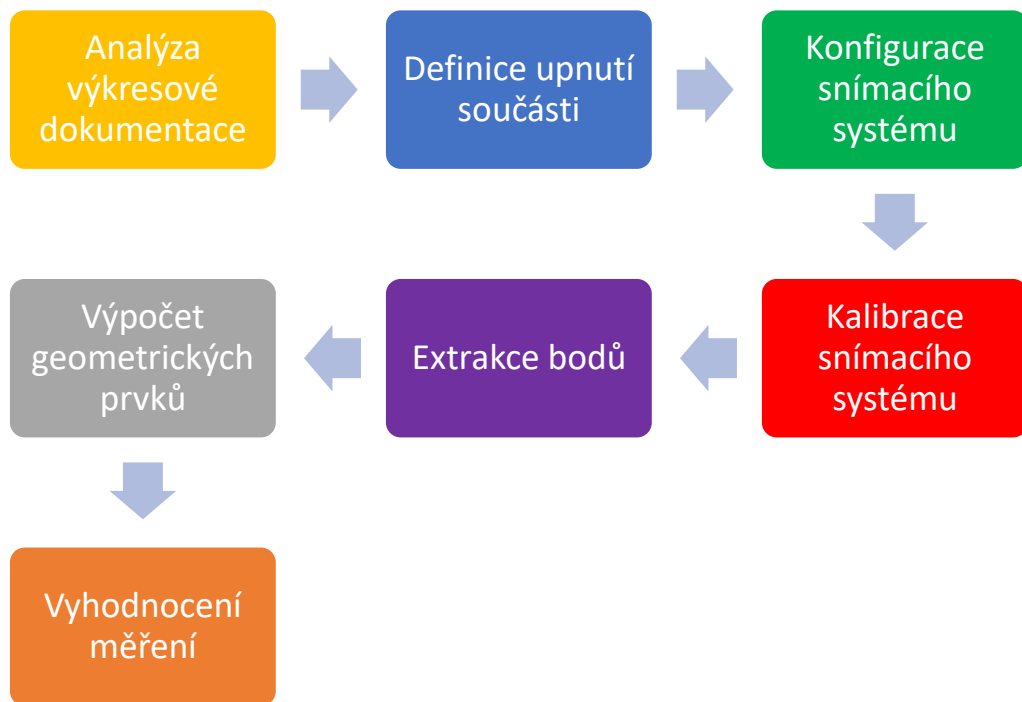
Poté se snímací systém vhodně nakonfiguruje a zkalibruje. Je zapotřebí zvolit vhodné snímače, které dovedou funkčně zaznamenat veškeré potřebné informace. Kalibrace zvoleného snímacího systému se provádí například pomocí zaměření polohy kalibrační koule referenčním snímačem a případná následná kalibrace dalších zvolených snímačů.

Po úspěšném vykonání těchto kroků se součást vyrovná na stůl daného CMM. V tomto kroku se určuje lokální souřadný systém měřeného dílu. Pro stanovení tohoto

souřadného systému existuje nespočet postupů. Jedním z nich je například postup využívající pravidla 3-2-1, který postupně odstraní šest stupňů volnosti měřeného tělesa.

Následuje samotné měření bodů, ze kterého se extrahují body a pomocí nich se definují jednotlivé geometrické a tvarové charakteristiky na součásti. Pro určení jednotlivých geometrických elementů je potřeba nasnímat minimální počet bodů. Dalším krokem je tedy výpočet zjišťovaných tvarových a geometrických charakteristik.

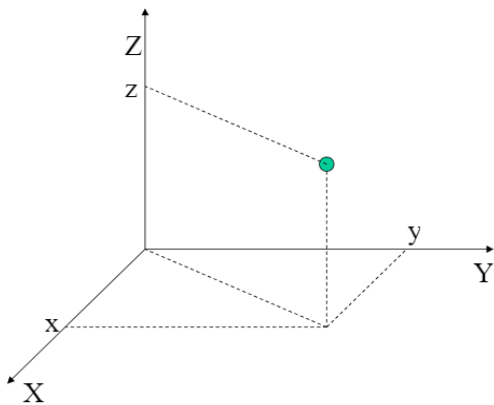
Finální operací je vyhodnocení měření, které funguje na základě porovnávání naměřených dat s požadovanými tvarovým a geometrickými vlastnostmi součásti. Za pomoci softwaru se vytvoří z extrahovaných bodů model určen k analýze a z tohoto modelu se poté získávají potřebná data pro porovnání. Zjištěné výsledky se následně zanesou do protokolu. Typicky jsou výsledky nacházející se v rámci tolerancí zobrazovány zelenou barvou, nevyhovující výsledky poté barvou červenou. [1, 3, 4]



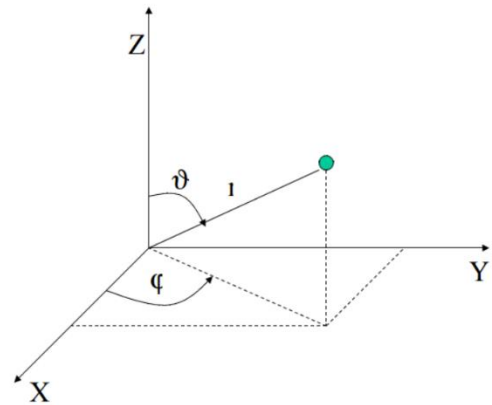
Obr. 10: Postup kontroly součásti na CMM

2.2 Rozdělení CMM podle konstrukce

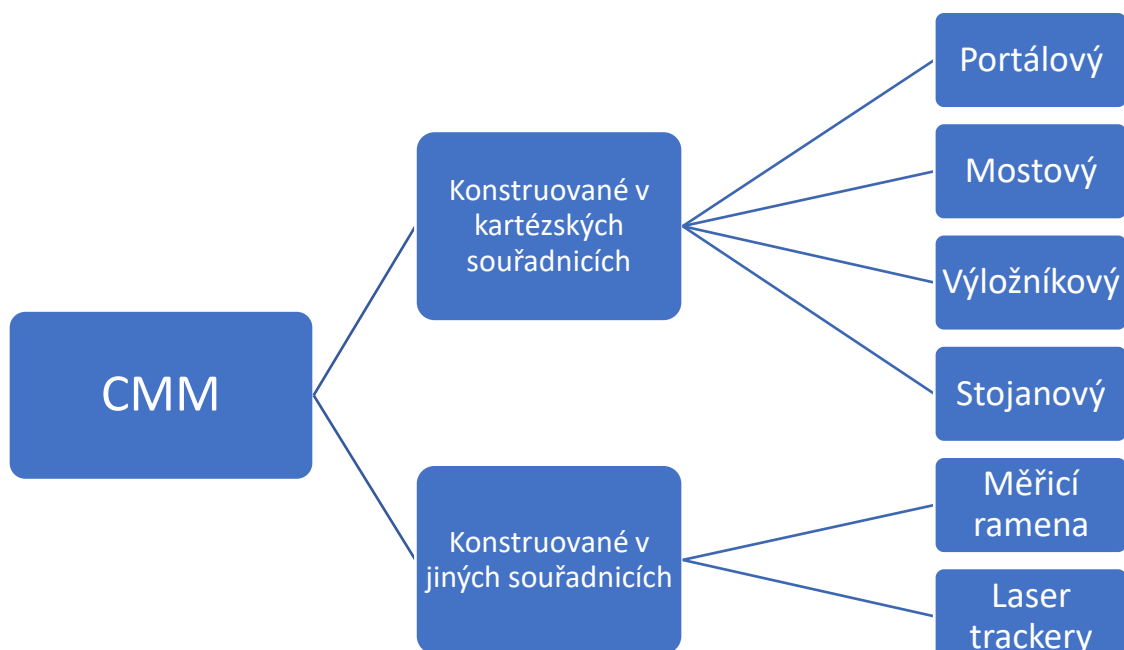
Konstrukce souřadnicových strojů je možné rozdělit podle typu souřadného systému. V tomto systému se stroje pohybují a snímají body. Podle uspořádání souřadnic lze rozdělit CMM na dvě základní kategorie. Prvním druhem jsou stroje fungující podle kartézského uspořádání souřadnic. Do druhé kategorie se zařazují stroje, které pracují naopak v jiných typech souřadnic, například ve sférickém či cylindrickém souřadném systému. Veškeré souřadnicové měřicí stroje nicméně umožňují transformace do jakéhokoliv jiného souřadného systému, a to bez ohledu na skutečnost, v jakém souřadném systému jsou konstruovány. Pro názornost se tedy většinou pro výsledky volí kartézský souřadný systém.



Obr. 11: Kartézský systém souřadnic [5]



Obr. 12: Sférický systém souřadnic [6]



Obr. 13: Základní rozdělení CMM

2.2.1 Kartézské CMM dle normy ISO 10360-1

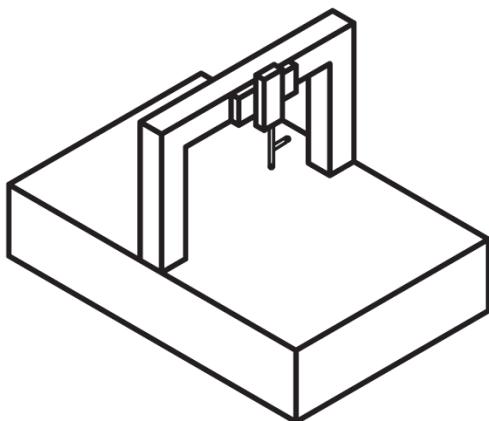
Portálový typ (Bridge)

Tento typ CMM je nejrozšířenější konfigurací kartézských souřadnicových měřicích strojů. Existuje ve dvou základních konfiguracích. Každá konfigurace má své specifické vlastnosti.

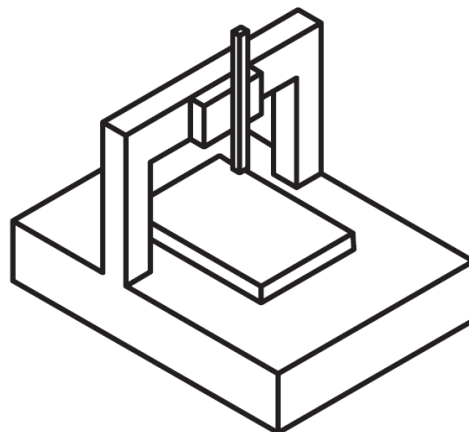
První varianta disponuje pohyblivým portálem a pevným stolem pro upnutí měřené součásti. Nevýhodou této konfigurace může být především kroucení portálu stroje vlivem rozdílných rychlostí posuvu jednotlivých stran. Tento efekt může být snížen pomocí dvojitého pohonu jednotlivých stran.

U druhé varianty je naopak portál nepohyblivý a pohyb v ose Y vykonává pohyblivý stůl. Díky tomu je eliminován problém týkající se kroucení portálu. Nejpřesnější souřadnicové stroje tedy využívají především tuto konfiguraci. Nevýhodami jsou delší časy měření způsobené nutností pohybovat s těžkým stolem včetně měřené součásti a skutečnost, že se vždy pohybuje s dílem o jiné hmotnosti. Hmotnost měřeného dílu tak může ovlivnit přesnost samotného procesu měření.

Portálový typ CMM je často využíván v měrových střediscích a laboratořích a využívá se pro kontrolu dílů menších až středních velikostí. [1, 4]



Obr. 14: Portálový typ CMM s pohyblivým portálem [1]



Obr. 15: Portálový typ CMM s pohyblivým stolem [1]



Obr. 16: ZEISS PRISMO [7]



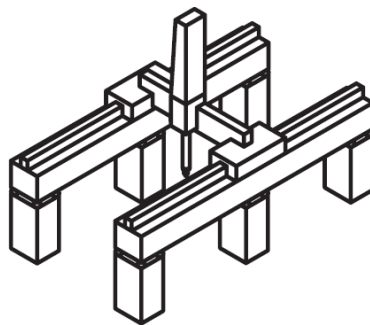
Obr. 17: Hexagon Leitz PMM-C [8]

V anglické verzi normy ISO 10360-1 je tento typ CMM zmiňován jako Bridge type čili v doslovném překladu typ mostový. Nicméně mostovým typem je v české verzi téže normy označován Gantry CMM. Pro Bridge se v češtině užívá označení portálový typ.

Mostový typ (Gantry)

Mostový typ CMM se využívá pro měření velmi rozměrných součástí o velikostech dosahujících desítek m³ a zároveň se pohybuje v relativně dobrých přesnostech měření. Základ stroje je tvořen masivní konstrukcí, aby se omezilo nechtěné kroucení a narušení konstrukce. Aby se předešlo vybočení jezdícího nosníku, disponuje mostový typ často pohonem obou stran, na kterých je nosník uchycen. Stroj je, na rozdíl od jiných konstrukčních typů, sestavován až u zákazníka. Přesnost se tudíž koriguje taktéž až namístě. U jiných typů je poskytnuta korekční mapa již přímo z továrny od výrobce. Stroj je vyroben převážně z ocele či hliníkových slitin.

Mimo velikých rozměrů spočívá další výhoda mostové konstrukce v jednoduché přístupnosti ke všem dílům konstrukce. Pohyblivá část stroje má menší hmotnost, protože je pohyblivá pouze horizontální část. Díky tomu je dosahovaná přesnost měření na dobré úrovni, přestože jsou měřeny větší díly. Mostový typ se díky svým rozměrům využívá především v těch závodech, které potřebují kontrolovat velké díly, například letecký, automobilový průmysl či pro telekomunikační zařízení a satelity. [1]



Obr. 18: Mostový typ CMM [1]



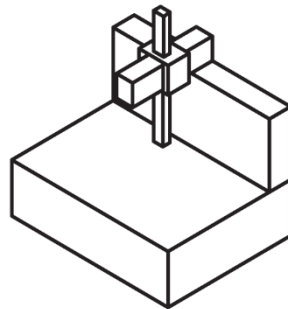
Obr. 19: Hexagon DEA DELTA SLANT [9]

Výložníkový typ (Cantilever)

Základem této konstrukce CMM je pohyblivé konzolové rameno, na němž je umístěný pojezd s pinolou. Měřená část je umístěna na nepohyblivém stole. Díky tomu, že není stůl připevněn na ložiskovém vedení, mohou být na něj položeny relativně těžké součásti, aniž by docházelo k poklesu měřicí přesnosti.

Velká výhoda tohoto stroje spočívá v dobré přístupnosti k měřenému dílu. Manipulační prostor je totiž blokován konstrukcí stroje pouze z jedné strany a tři zbývající strany tedy zůstávají otevřené. Výložníkový typ je vysoce produktivní, využívá se proto ve výrobě pro rychlá měření. Používá se taktéž v laboratořích.

Nevýhodou tohoto stroje spočívá v konstrukci samotné. Otevřená konstrukce nedosahuje zcela dostatečné tuhosti a dochází k jejímu prohýbání. Tento efekt je výraznější tehdy, nachází-li se stroj v extrémnějších pozicích. Díky tomuto faktu se stroj využívá především k měření menších součástí. [1]



Obr. 20: Výložníkový typ CMM [1]

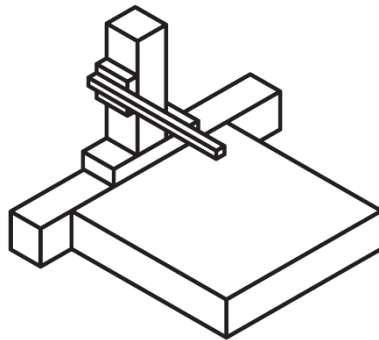


Obr. 21: ZEISS DuraMax [10]

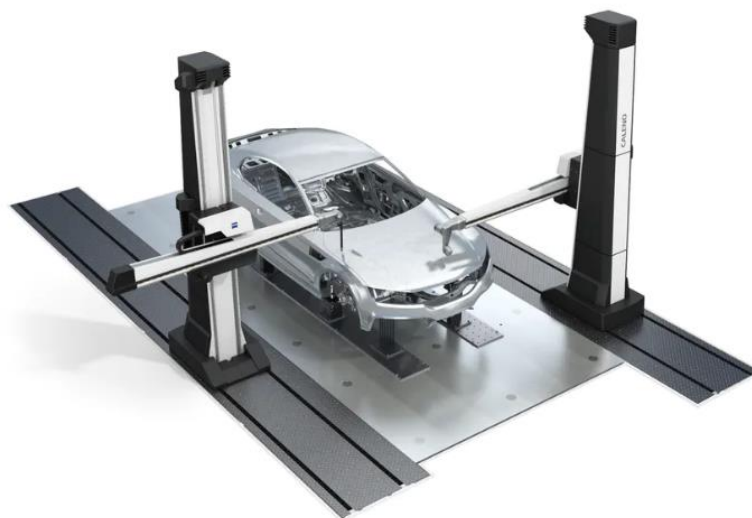
Stojanový typ (Horizontal Arm)

Stojanový typ CMM s horizontálním ramenem je vhodný například k měření konstrukcí automobilů. Konstrukce je složena z nosného sloupu a na něm upevněného horizontálního ramena. Na konci tohoto ramena je připevněna snímací hlava. Stroj existuje také v provedení, které disponuje dvěma horizontálními rameny. V tomto provedení může měřit obě strany dílu zároveň a urychlit tím samotný proces měření.

Konstrukce má výhodu v dobré přístupnosti k veškerým stranám měřeného dílu. Nevýhodou je poté omezená přesnost měření. Stojanové CMM zpravidla disponují velice vysokými měřicími rozsahy. Jedna z os stroje bývá znatelně delší než zbylé dvě osy. Měřicí rozsah zmíněné delší osy poté může dosahovat hodnot až například 25 000 mm. [1]



Obr. 22: Stojanový typ CMM [1]



Obr. 23: ZEISS CALENO [11]

2.2.2 CMM uspořádané podle jiných souřadných systémů

Tyto stroje fungují na základě jiných než kartézských souřadnic, například sférických či cylindrických. Existuje více metod, které využívají k měření zmíněné souřadné systémy. Jedná se o měření využívající kloubová ramena, měření využívající sférické souřadnice, měření využívající triangulaci či měření využívající vzdálenosti jednotlivých charakteristických bodů z několika bodů referenčních.

Ačkoliv tyto stroje nejsou konstruovány podle kartézského souřadného systému, tak pro přehlednost mohou výsledky v kartézském systému podle potřeby poskytovat. Tyto stroje se neustále nacházejí v oblasti vývoje. Algoritmy pro vyhodnocování naměřených dat jsou pro tyto CMM složitější. [1]

Měřicí ramena

Měřicí ramena využívají sférického souřadnicového systému. Ten je popsán vzdáleností měřeného bodu od počátku soustavy souřadnic a dvěma úhly. Jedná se o přenosné CMM, které lze využít přímo v prostředí výroby. Na stativ je přišroubována samotná konstrukce ramene, která je složena z rotačních kloubů. Na konci tělesa stroje se nachází držák pro snímací systém. Na měřicích hlavách lze využít dotykových i optických snímačů.



Obr. 24: Hexagon Absolute Arm [12]

Laser trackery

Laser tracker je přenosný CMM, který se skládá z laser interferometru, systému měřicího úhly a systému sledujícího cíl. Tento sledující mechanismus udržuje pomocí laseru polohu cíle a laser interferometr měří vzdálenost mezi základním bodem systému a bodem na cíli. Mezitím systém měřicí úhly zjišťuje nasměrování světelného paprsku. Za pomoci tohoto sférického systému je poté definována poloha cíle.

Laser trackery patří mezi nejpřesnější a nejspolehlivější CMM. Umožňují snímání jednotlivých bodů a skenování. Využívají se především pro měření velice rozměrných součástí, tudíž například v leteckém a automobilovém průmyslu či ve stavebnictví. Na obrázku č. 25 je zobrazen laser tracker od firmy Hexagon.

2.2.3 Výpočetní tomografie

Počítačová tomografie využívá principu rentgenového záření. Stále častěji se začíná využívat v oblasti kontroly rozměrů dílů. Jedná se o alternativu ke klasickým souřadnicovým měřicím strojům. Velkou výhodou výpočetní tomografie je skutečnost, že dokáže odhalit i vnitřní vady měřeného dílu. Technologie CT se často využívá v oblasti reverzního inženýrství.



Obr. 25: Hexagon Leica Absolute Tracker ATS600 [13]



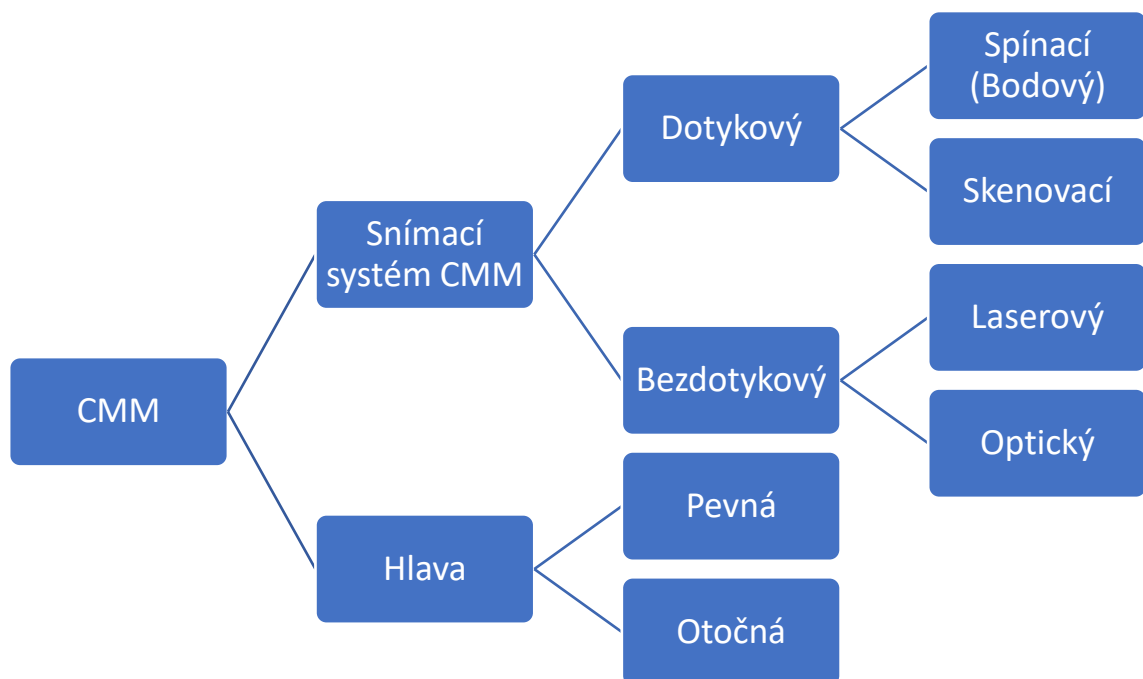
Obr. 26: ZEISS METROTOM 1500 [14]

2.3 Snímací systémy CMM

Souřadnicové měřicí stroje mohou získávat informace o snímaném díle pomocí různých snímacích systémů. Snímače jsou obvykle k tělesu stroje připojené pomocí hlav, které se běžně rozdělují na hlavy pevné a otočné.

Nezákladnější rozdělení snímacích systémů rozlišuje snímání bodů na dotykové, kde je pro získávání informací zapotřebí přímý kontakt s měřeným dílem a na metody bezdotykové, které kontakt nepotřebují a fungují například na optických principech. Dále lze specifikovat rozdělení na základě počtu naměřených bodů během krátkého časového úseku. A to na snímání spínací (bodové), kdy je povrch součásti snímán bod za bodem či skenování bodů, kdy je během okamžiku nasnímán velký počet bodů. [1, 2]

Tato kapitola se bude věnovat především dotykovým snímacím systémům využitelným na CMM, které se používají ke kontrole vysoce přesných obráběných dílů v automobilovém průmyslu.



Obr. 27: Základní rozdělení snímacích systémů CMM

2.3.1 Snímací hlavy

Snímací systému bývá upnut do snímací/měřicí hlavy, která je připojena k pinole stroje. Rozlišují se dva typy hlav. Prvním typem je hlava pevná, která se nedokáže natáčet v prostoru, typem druhým je poté hlava otočná (indexovatelná). Ta se dokáže přesně natáčet a polohovat snímací sondy ve dvou rotačních osách. Volba hlavy může výrazně ovlivnit celkovou výkonnost měřicího systému.

Pevná snímací hlava

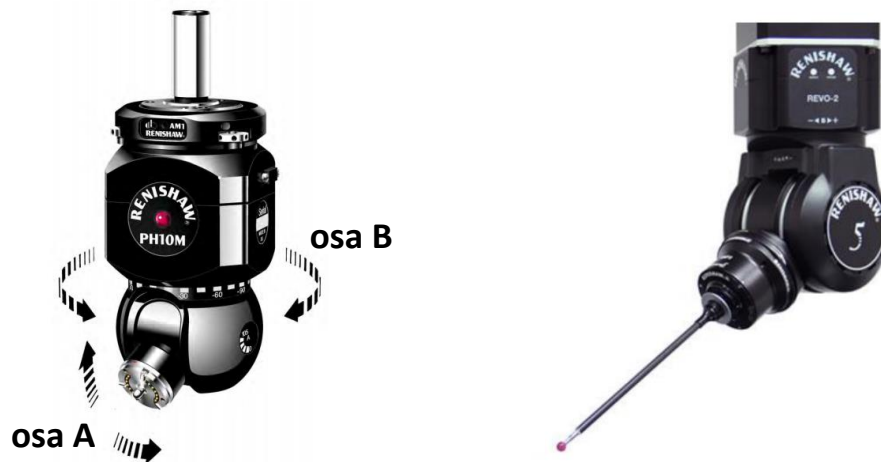
Pevné hlavy nedisponují možností natáčet snímací systém. Měření tedy vykonává pohyb snímače ve třech osách CMM. Díky absenci natáčecího mechanismu je tedy často nutné pro komplexní měření dílu využít složitějších konfigurací snímacího systému, kde může být k hlavě připojeno více snímačů. Příkladem může být hvězdicové uspořádání. Výhoda této konstrukce spočívá v absenci mechanického otočného kloubu uvnitř hlavy. Tím se eliminují nepřesnosti, které otočný kloub do systému vnáší. Další výhodou pevné snímací hlavy je její robustnost. Její větší rozměry je možné využít k sofistikovanější konstrukci, která čítá paralelogramy a promyšlené snímací prvky. Otočná hlava je nejčastěji jednopalcová a není tak snadné do ní vložit vlivem menších rozměrů propracované konstrukční prvky [2, 4]

Otočná snímací hlava

Jak bylo již zmíněno, otočné hlavy, taktéž nazývané indexovatelné, disponují otočným kloubem, na kterém je uchycen měřicí snímač. Díky tomu umožňují nastavování snímače do různých poloh a směrů. Otočná hlava operuje ve dvou přídavných osách. Osa A zaručuje pohyb ve vertikální rovině pohybu a osa B řídí natočení, kterým snímač směřuje v horizontální rovině (viz obrázek č. 28). Kroky pro jednotlivé osy bývají obvykle po 15° či po 7,5°. Výhoda této konstrukce tkví ve využití jediného snímače pro více orientací. Nevýhodou je naopak horší tuhost soustavy díky otočnému kloubu, která generuje nepřesnosti během měření. [2]

Mezi otočné snímací hlavy patří i separátní kategorie tzv. pětiosých dotykových snímacích hlav. Oproti konvenčním metodám, kde provádí CMM veškeré pohyby potřebné při získání dat, tato technologie disponuje synchronizovaným pohybem os CMM a hlavy. Hlava samotná tedy vykonává snímací pohyb a body jsou změřeny pouze

tímto pohybem hlavy. Díky tomu dochází k minimalizaci dynamických chyb způsobených zrychleními při rozjezdech a brzdění tělesa CMM a zlepšení přesnosti a rychlosti měření. [1, 2, 15]



Obr. 28: Otočná snímací hlava (RENISHAW PH10M) (vlevo) a RENISHAW REVO-2 (pětiosá) [2, 16]

2.3.2 Dotykové snímací systémy

Dotykové snímací systémy potřebují k měření bodů fyzický dotyk s měřeným dílem. Způsob získávání naměřených dat se liší pro jednotlivé typy konstrukce. Základní rozdělení konstrukcí rozlišuje spínací (bodové, kontaktní) snímací systémy a systémy skenovací (měřicí).

Dotykové spínací snímací systémy

Spínací snímací systémy jsou díky své konstrukci využívány pro postupné měření jednotlivých bodů na součásti. Odečtení souřadnic jednotlivých bodů funguje na základě najetí stroje do polohy v bezpečné vzdálenosti od dílu, poté se za plynulé rychlosti vhodné pro měření najíždí k součásti až se provede mechanický dotyk. Ve chvíli, kdy tento dotyk proběhne, jsou odečteny aktuální hodnoty jednotlivých souřadnic měřicího stroje.

Nevýhodou takto konstruovaných snímacích systémů je především nižší produktivita oproti systémům skenovacím a mnohdy také ne zcela celistvé a dostačující popis měřeného elementu na dílu.

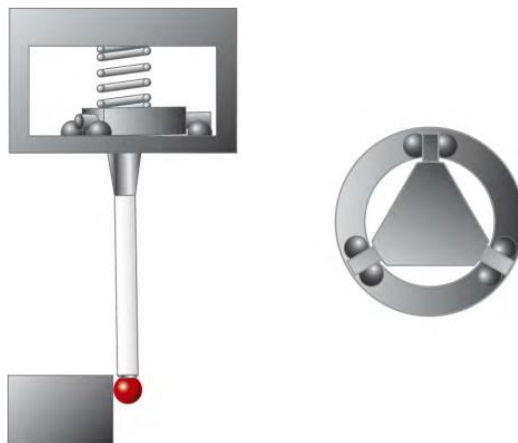
Výhodou je poté především nízká složitost konstrukce a díky tomu relativně nízká pořizovací cena oproti složitějším typům snímacích systémů. Mezi základní druhy dotykových spínacích systémů patří kinematický a elektronický (tenzometrický) typ. [2]

Kinematický typ

Typický mechanismus tohoto typu se skládá ze tří válečků. Každý z těchto válečků leží na dvou kuličkách. Takovéto uspořádání odstraňuje všech šest stupňů volnosti a samotný dřík se snímačem se po odměření bodu vždy vrátí do své původní polohy.

Ve chvíli, kdy se dotkne snímač měřeného elementu na dílu, se vždy alespoň jeden ze tří kontaktních bodů rozpojí a tím vzniká signál k odečtení souřadnic odměřovacím systémem CMM. Odměřené souřadnice daného bodu odpovídají středu snímacího prvku (nejčastěji kulička). Tento prvek je zpravidla připevněn ke dříku, který je z druhé strany upevněn na třibodovém uložení.

Hlavní problém spojený s touto konstrukcí je, že geometrie kontaktu způsobuje rozdílně velké potřebné síly vznikající při doteku v závislosti na směru, ve kterém dojde ke kontaktu snímače s povrchem stroje. Tím vznikají různá ohnutí dříku ve chvílích, kdy se snímač dotkne stroje a kdy je generován signál označující dotyk. Čím více je dřík delší, tím je ohnutí ztelnější. [2]



Obr. 29: Kinematický typ snímače [2]

Elektronický (tenzometrický) typ

Jedná se o vylepšený typ dotykového snímacího systému, který se snaží odstranit nechtěné problémy týkající se konstrukce kontaktního typu. Vylepšení spočívá v použití třech vysoce citlivých elektronických senzorů nacházejících se uvnitř hlavy. Tyto senzory umí detekovat kontaktní síly vznikající mezi snímačem připojeným na dřík a měřeným dílem. V této konstrukci je spínací signál generován při mnohem nižších silách, které jsou navíc nezávislé na směru dotyku snímače s dílem. Díky tomu jsou eliminovány nepřesnosti měření způsobené silami závislými na směru působení.

Mezi další výhody, které přináší tato konstrukce oproti běžné kinematické patří například možnost využití delších dříků, protože jsou síly dotyku nízké a dřík se tedy minimálně prohýbá. Lze tedy využít delší dříky bez citelného snížení přesnosti měření. Díky nižším silám je také značně vylepšena opakovatelnost měření a taktéž životnost snímačů. [2]



Obr. 30: Tenzometrický typ snímače [2]



Obr. 31: RENISHAW S25M [17]



Obr. 32: ZEISS VAST XXT [18]

Dotykové skenovací snímací systémy

Na rozdíl od spínacích systémů, které snímají jednotlivé nespojitě body na povrchu dílu, sbírají skenovací snímací systémy větší množství dat z povrchu dílu. Díky tomu poskytují ucelenější a jasnější obraz o tvarových a geometrických charakteristikách měřeného dílu. Skenovací systémy jsou vhodnější především pro měření tvarově složitých ploch.

Samotné měření skenováním začíná příjezdem snímače k měřenému dílu. Jakmile dojde ke kontaktu snímače a dílu, začne se snímač plynule posouvat po povrchu součásti a je tedy neustále v kontaktu s plochou. Během tohoto pohybu jsou plynule snímány body dle předešlého nastavení. Toto nastavení se týká například rychlosti snímání či vzdáleností kroku mezi jednotlivými body.

Skenovacími snímacími systémy je taktéž možné snímat jednotlivé body jako v případě dotykových spínacích systémů.

Měřicí skenovací systém

Spousta vysoce přesných souřadnicových měřicích strojů využívá analogové či digitální skenovací systémy. Tento systém využívá k pohybu tři pružinové paralelogramy, které se typicky vychylují v rozmezí ± 3 milimetry ve směru měřicí osy. Zjišťování polohy je v případě analogového systému realizováno pomocí induktivního odměřování. Každý paralelogram je přirozeně ve své neutrální pozici, nulové body induktivního odměřování jsou soustředěny do těchto neutrálních poloh. Pohybující se systém cívek generuje měřicí sílu v momentě, kdy se snímač dotkne měřeného dílu. Jakmile se měřicí systém nastaví do polohy blízké se poloze nulové, jsou souřadnice stroje a digitalizované pozůstatkové výchylky skenovací hlavy přeposlány do počítače.

Hlavní rozdíl oproti dotykovým spínacím systémům tkví v tom, že je měření pomocí analogových měřicích hlav statické. Díky tomu jsou naměřená data přesnější. Analogové hlavy mohou operovat buď v tzv. free-floating režimu, kdy pracují souvisle všechny tři osy zároveň nebo v režimu uzamknutí, kde jsou osy nevyužívané k měření zamknuté. Tyto měřicí systémy mohou využívat buď pasivní senzory, kdy zařízení jednoduše rozeznává vychýlení senzoru, nebo může používat motory, které přímo kontrolují vychýlení a přítlačnou sílu. Tento druhý typ se nazývá aktivní řízení. [2]



Obr. 33: Analogový měřicí systém výrobce ZEISS [2]



Obr. 34: ZEISS VAST Gold [19]

2.3.3 Snímací konfigurace

Důležitým prvkem, který ovlivňuje skutečnost, jak vypadá snímací konfigurace, je použitá snímací hlava. Při využití otočné hlavy stačí často využít pouze jeden snímač, protože s ním může hlava pohybovat do různých poloh. Při využití pevné hlavy je situace komplikovanější, protože nelze se snímači pohybovat do více rozdílných poloh. Pro díly s komplexnější geometrií a složitějšími tvary je tedy zapotřebí využít složitější snímací konfiguraci. Tyto konfigurace disponují více snímači směřujícími do různých poloh v prostoru.

Konfigurace pro pevné hlavy mohou tedy nabývat značně rozličných rozměrů i hmotností. Nelze ovšem nabývat neomezených rozměrů a hmotností snímacích konfigurací. Jednotlivé snímací hlavy mají totiž omezení, a to rozměrové i hmotnostní. Například pevná hlava ZEISS VAST Gold (viz obrázek č. 34) může nést snímací konfiguraci o maximální délce 800 milimetrů a hmotnosti 800 gramů. Pro hlavu ZEISS VAST XXT lze použít konfigurace o maximální délce 65 milimetrů. [26]

Samotná snímací konfigurace je spojená s hlavou obvykle pomocí tzv. upínacích talířků. K spodní straně tohoto talířku je připojena daná konfigurace a talířek je následně upevněn do měřicí hlavy. Neexistuje jeden univerzální talířek. Pro každý typ měřicí hlavy

jsou navrženy speciální upínací talířky kompatibilní právě s daným typem hlavy. Talířky pro různé hlavy se mohou lišit svými rozměry, tvarem či například způsobem upevnění k měřicí hlavě. Talířky mohou již v základu disponovat například integrovaným prodloužením či kostkou, díky které lze připevnit snímače orientované do různých směrů. Na obrázcích č. 36 a 37 jsou zobrazené upínací talířky od firmy ZEISS.



Obr. 35: Reálná snímací konfigurace [26]



Obr. 36: Talířek VAST Standard s kostkou a ID čipem [27]



Obr. 37: Talířek VAST XXT TL3 (vlevo) a talířek VAST XTR [28, 29]

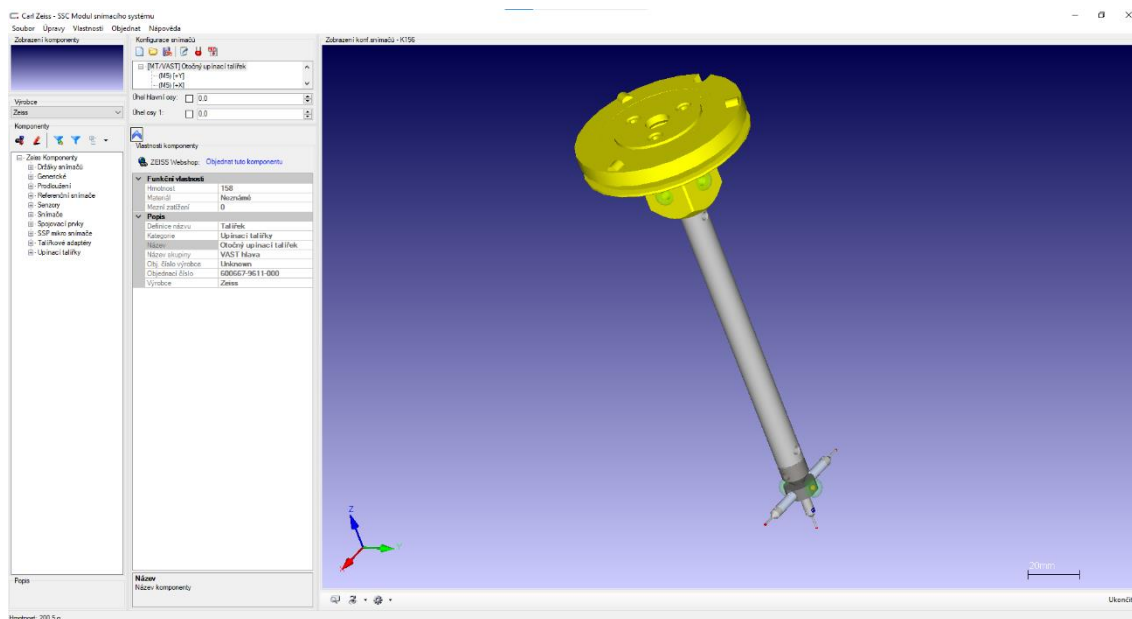
3 Návrh systému skladování konfigurací snímacích systémů

Především ve větších strojírenských podnicích, kde se v metrologických laboratořích kontroluje velké množství různých dílů, se používá celá řada snímacích konfigurací lišících se rozměry, hmotností a určením. Může se jednat i o desítky až stovky konfigurací a je nutné pro veškeré konfigurace v takovýchto střediscích řešit skladování a evidenci.

Zadavatel mě pověřil takovýto systém skladování navrhnout a následně zrealizovat. Od zadavatele jsem obdržel jednotlivé modely snímacích konfigurací a také určité požadavky, které je nutné při návrhu skladování respektovat.

3.1 Analýza snímacích konfigurací

Pro co nejintuitivnější a dobře fungující skladování bylo nezbytné dostatečně zanalyzovat veškeré snímací konfigurace. Modely konfigurací mi byly poskytnuty ve formátu SSC, který využívá software ZEISS CALYPSO. Použitím zmíněného programu jsem převedl všechny modely do formátu STL, který mi umožnil s modely pracovat i v jiných programech. Již během převádění těchto formátů jsem si všiml, že jsou jednotlivé konfigurace velice pestré.

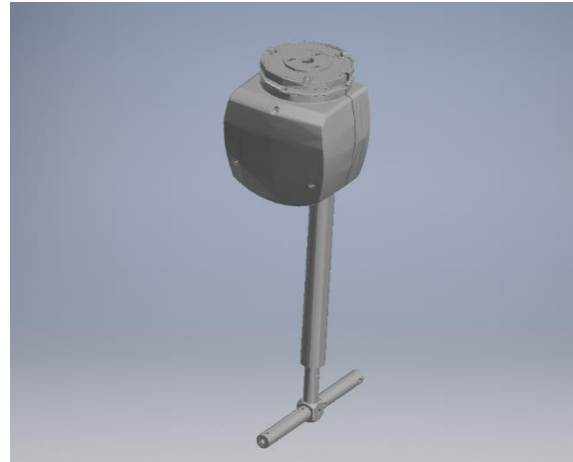


Obr. 38: Prostředí programu ZEISS CALYPSO

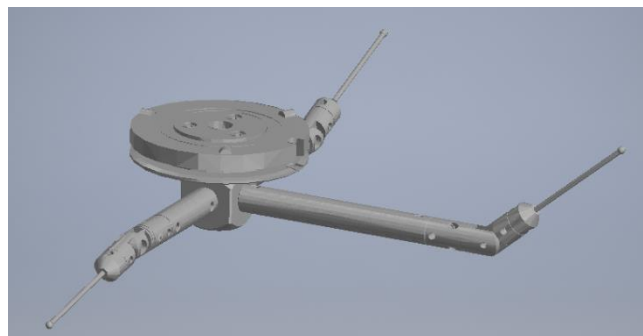
Už během analýzy konfigurací bylo jasné, že nebude stačit navrhnout jeden univerzální zásobník pro odložení snímače, ale i pár modifikací, díky kterým bude možné uložit i některé atypické snímací konfigurace. Jmenovitě se jednalo například o speciální snímač Rotos určený pro měření profilu povrchu či konfigurace, které dosahují vyšší kladné hodnoty v ose Z, než samotný talířek těchto konfigurací.



Obr. 39: Snímací konfigurace K11



Obr. 40: Snímací konfigurace Rotos



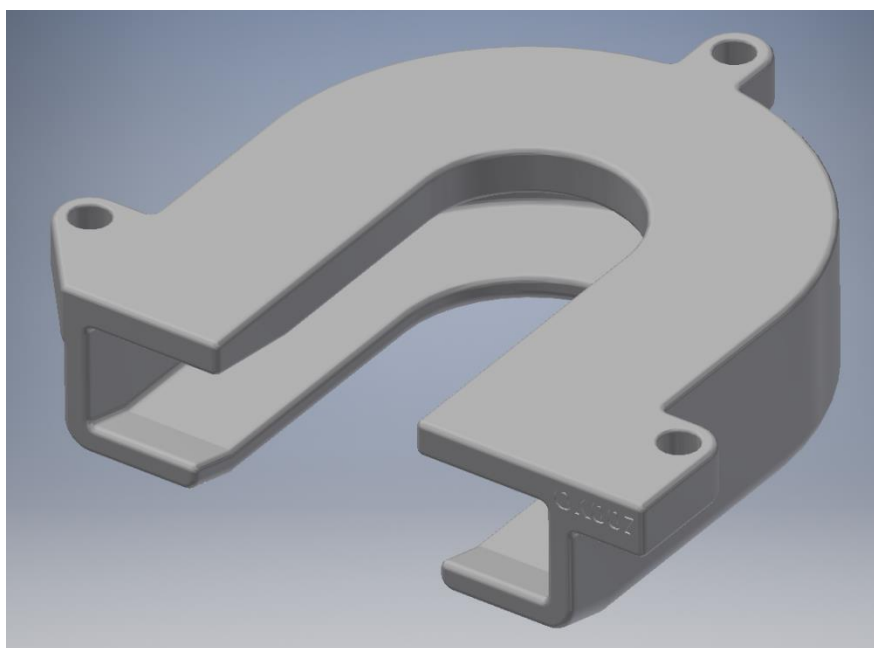
Obr. 41: Snímací konfigurace K500

Od zadavatele jsem obdržel soubor s informacemi o jednotlivých konfiguracích, kde bylo například zmíněno, jaký díl se pomocí konkrétní konfigurace měří. Také byly v souboru zmíněné určité požadavky, které se týkaly specifického umístění některých konfigurací. Po prostudování tohoto souboru jsem si již dokázal ucelit předběžný obraz návrhu skladování. Celkově se jednalo o 94 snímacích konfigurací využívaných v daném měrovém středisku, přičemž se ve společnosti nacházejí další dvě podobná střediska. Skladování je zcela běžnou součástí laboratoří a je potřeba toto skladování navrhnout rozumně i s výhledem do budoucnosti.

3.2 Návrh držáku

Po provedené analýze veškerých konfigurací jsem začal navrhovat samotný zásobník na odložení snímačů v podobě držáku. Držák byl navrhován od začátku s úvahou, že bude přivrtán zespoda ke policím v úložných skříních a že se do něj zasune talířek dané snímací konfigurace. Konfigurace tak budou v držáku držet díky talířku a budou volně viset směrem dolů.

Rozměry držáku jsem tedy od začátku odvíjel od modelu talířku, který jsem měl k dispozici v STL formátu. Vytvořil jsem v držáku tři díry pro umístění šroubů sloužících k přišroubování do polic. Vzhledem k nízké sériovosti byla již od začátku návrhu uvažována výroba v podobě 3D tisku. Při návrhu držáku jsem s touto myšlenkou již od začátku pracoval a snažil jsem se tedy návrh této výrobní metodě co nejvíce přizpůsobit, aby při výrobě docházelo k co nejmenším potížím. Na držáku jsem taktéž navrhl místo, kde bude umístěn název dané snímací konfigurace, která do daného držáku patří. Na hraně, kde se zasouvá talířek snímací konfigurace, jsem vytvořil zešíkmení, díky kterému by se neměl talířek z držáku samovolně vysunout.



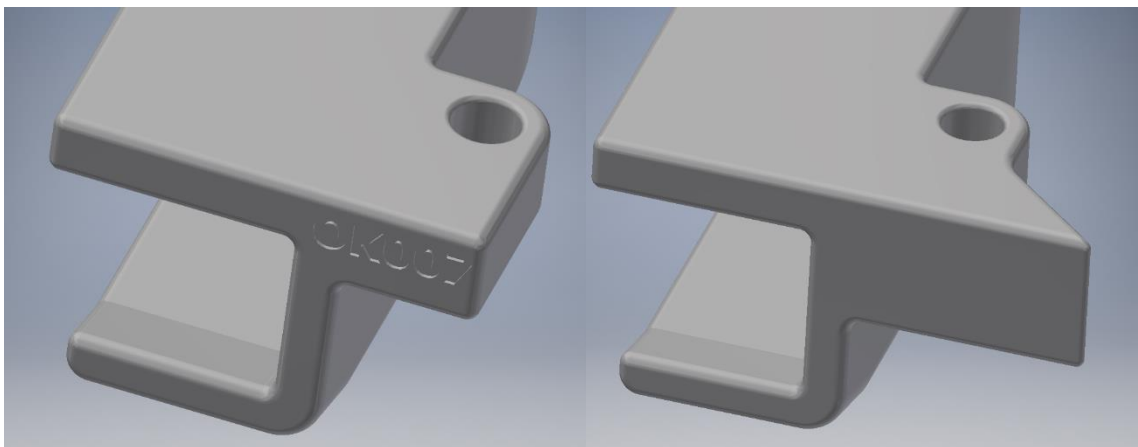
Obr. 42: Původní návrh držáku

Tento původní model jsem vytvořil ve třech variantách lišících se vůlemi vzhledem k rozměrům talířku. Tyto modely jsem poté zaslal panu doktoru Beránkovi, který tyto prototypy vytiskl na 3D tiskárně a porovnal je s reálným talířkem, kterým disponují veškeré řešené snímací konfigurace. Z těchto tří prototypů se poté určil ten,

který rozměrům talířku vyhovoval nejlépe. To znamená, že v něm talířek nebyl příliš volný, ale zároveň bylo možné talířek do držáku bezproblémově založit. Tímto jsem získal finální geometrii talířku a mohl jsem se věnovat dalším optimalizacím.

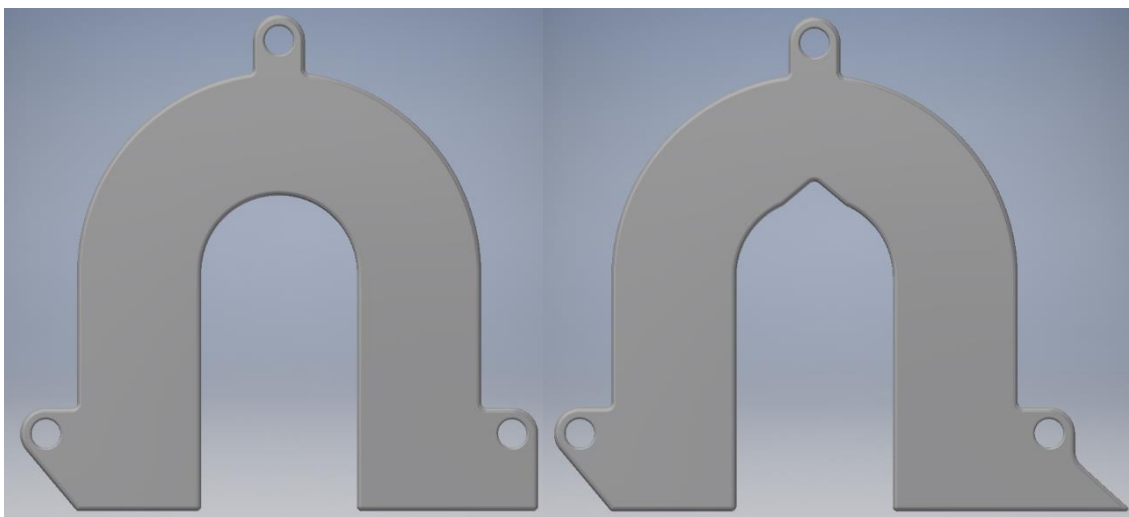
3.2.1 Optimalizace návrhu

Optimalizace se v první řadě týkala místa označení snímací konfigurace patřící do držáku. Původně jsem uvažoval s myšlenkou, že by již bylo dané označení konfigurace přímo vytisknuté na každém držáku. Takto vytisknuté označení bylo nicméně hůře čitelné. Z hlediska výhledu do budoucna by se také mohlo stát, že by se daný držák začal využívat pro jinou snímací konfiguraci a vytisknuté označení by tedy pak neodpovídalo realitě. Rozhodl jsem se tedy od této myšlenky upustit a zvolil jsem označení za pomoci cedulky, která se k danému držáku přilepí a v případě potřeby se může znovu odlepit a nahradit jinou. Původní prostor pro označení konfigurace jsem zvětšil, aby bylo označení lépe čitelné již z větší vzdálenosti.



Obr. 43: Porovnání původního a finálního návrhu držáku

Druhý optimalizační krok se týkal výrobní technologie. Kvůli charakteristice dílu bylo pro lepší vzhled nutné využít podpory. Díky podporám by se ovšem prodloužil výrobní čas držáku a také by přibyla práce s odstraňováním podpor od hotového výrobku. Zvýšila by se i spotřeba materiálu. Vytvořil jsem tudíž v kritických místech modelu dodatečné vyříznutí ve tvaru trojúhelníku, díky kterému již nebylo využití podpor nutné. Porovnání držáku před optimalizací s využitím podpor při tisku a držáku po optimalizaci bez využití podpor je zobrazené na obrázku č. 45.



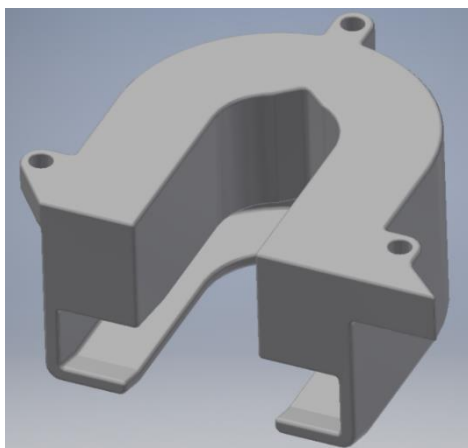
Obr. 44: Porovnání původního a finálního návrhu držáku



Obr. 45: Detail držáku před a po optimalizaci

3.2.2 Optimalizace pro speciální případy

Již při analýze snímacích konfigurací bylo jasné, že bude pro několik konkrétních konfigurací nutné specificky upravit navržený držák. Bylo tak nutné učinit kvůli konstrukci daných konfigurací. Dvě konfigurace (K23 a K500) jsou totiž konstruovány tak, že dosahují svým snímačem v ose Z výše, než je nejvyšší bod talířku. Díky tomu by je nebylo možné skladovat při použití stejného držáku obdobným způsobem jako ostatní snímací konfigurace. Tento problém jsem vyřešil zvýšením těla držáku specificky pro tyto dva dané případy. Zvýšení je dimenzované pro konfiguraci K500, jejíž snímač byl od talířku vzdálen o vyšší hodnotu v kladném směru osy Z. Díky tomu tento držák zcela vyhovoval i druhé snímací konfiguraci K23.



Obr. 46: Upravený držák zvýšený v ose Z

Druhý případ nevyhovující konstrukce původního držáku se týkal speciální snímací konfigurace s názvem Rotos. Tato konfigurace je speciálně určená pro měření profilu povrchu součásti. Rotos disponuje stejným talířkem jako ostatní konfigurace. Nicméně v případě Rotosu, na rozdíl od ostatních konfigurací, navazuje pod talířkem okamžitě rozšířená část těla konfigurace. Díky tomu by nebylo možné danou snímací konfiguraci do těla držáku zasunout. Navrhl jsem tedy úpravu, díky které se do tělesa držáku nezasouvá celý talířek, nýbrž pouze jeho horní část, jak je možné vidět na obrázku č. 47.



Obr. 47: Upravený držák pro snímací konfiguraci Rotos



Obr. 48: Snímací konfigurace Rotos

3.2.3 Materiál držáku

Vzhledem ke zvolené metodě výroby v podobě 3D tisku jsem vybíral materiál, který se běžně k plastovému 3D tisku používá. Při volbě materiálu jsem se zabýval jeho mechanickými vlastnostmi, ale také například náročností při samotném tisknutí. Jako ideální kompromis vyhovující zmíněným požadavkům jsem zvolil materiál PETG.

PETG, tj. polyethylentereftalát glykol, je jeden z nejpoužívanějších materiálů v oblasti plastového FDM 3D tisku. Je houževnatý, poměrně teplotně odolný a disponuje nízkou tepelnou roztažností. Díky tomu dobře drží na podložce tiskárny. Díky výborné adhezi mezi jednotlivými vrstvami se využívá pro tisk různých mechanicky namáhaných dílů, kterými mohou být právě i držáky. Oproti materiálu PLA je vyžadováno pro tisk PETG využít vyhřívanou podložku. [20, 30]

3.3 Návrh rozložení snímacích konfigurací

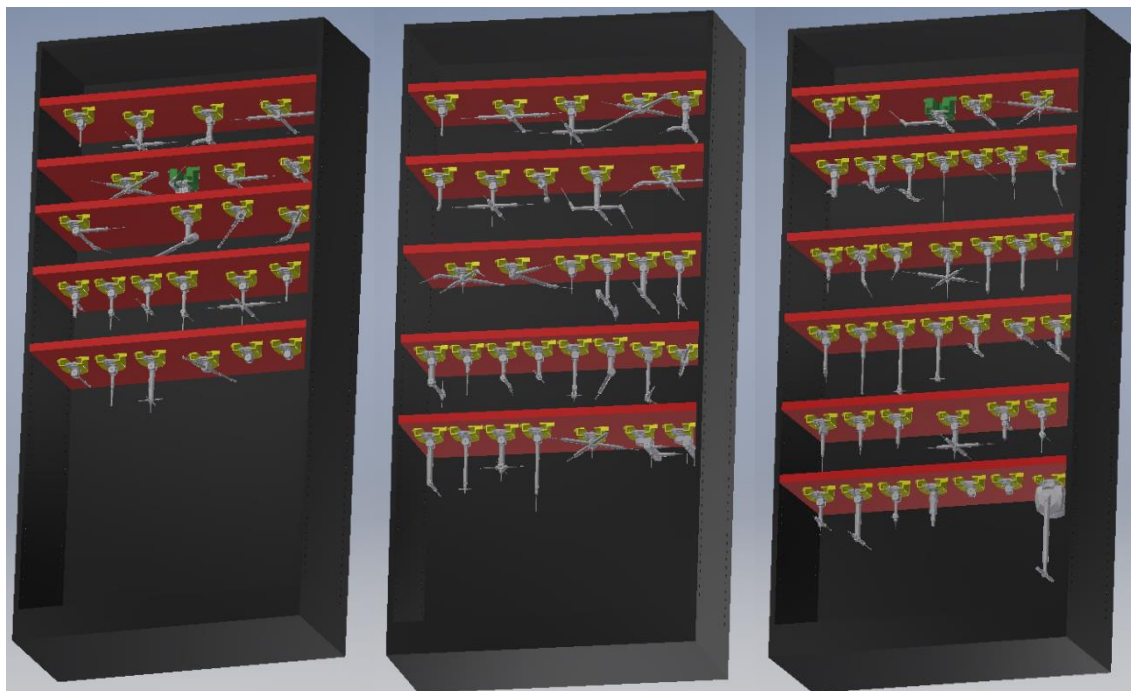
Po analýze veškerých snímacích konfigurací, vytvoření předběžného rozložení a následného návržení držáku jsem mohl začít navrhovat samotné umístění a polohování držáků do skladovacích prostorů. Konkrétně se jednalo o tři skříně sloužící pro uskladnění snímacích konfigurací. Tyto snímací konfigurace jsou využívány čtyřmi souřadnicovými měřicími stroji.

Podle souborů poskytnutých zadavatelem jsem vytvořil tabulky předběžného rozložení, kterými jsem se při návrhu řídil. Primárně jsem řešil specifické požadavky od zadavatele, poté jsem seskupil jednotlivé snímací konfigurace podle jejich určení. Snímací konfigurace určené pro měření konkrétního dílu jsem umisťoval, pokud to bylo možné, k sobě. Snažil jsem se řídit určitými ergonomickými zásadami, aby bylo možné konfigurace snadno ze skříní vyndávat i ukládat.

Pro návrh na rozložení jsem měl šestnáct polic obdélníkového tvaru o stranách 917 a 370 milimetrů. Do skříně lze tyto police umisťovat libovolně po stupních vysokých 25 milimetrů.

V CAD programu jsem vytvořil 3D modely skříní i polic odpovídající reálným rozměrům. Do jednotlivých polic jsem umisťoval podle zmíněného postupu jednotlivé držáky, do kterých jsem ukládal snímací konfigurace. Snímací konfigurace disponovaly rozmanitými tvary a rozměry. Bylo nutné na tuto skutečnost brát ohled. Pokud to rozměry snímacích konfigurací umožňovaly, bylo možné do jedné police umístit sedm

držáků, v jednom případě osm. Při umisťování složitějších a rozměrnějších konfigurací bylo uskutečnitelné do police umístit například jen čtyři držáky. Celkově se mi podařilo veškeré snímací konfigurace požadované od zadavatele umístit do daných šestnácti polic. Obdobným způsobem byly zpracovány layouts dalších dvou skříní. Zadavatel byl s návrhy skříní spokojený a mohla být tedy započata výroba.



Obr. 49:Finální návrhy jednotlivých skříní (zleva skříň P6, C a P7)

4 Realizace systému skladování konfigurací snímacích systémů

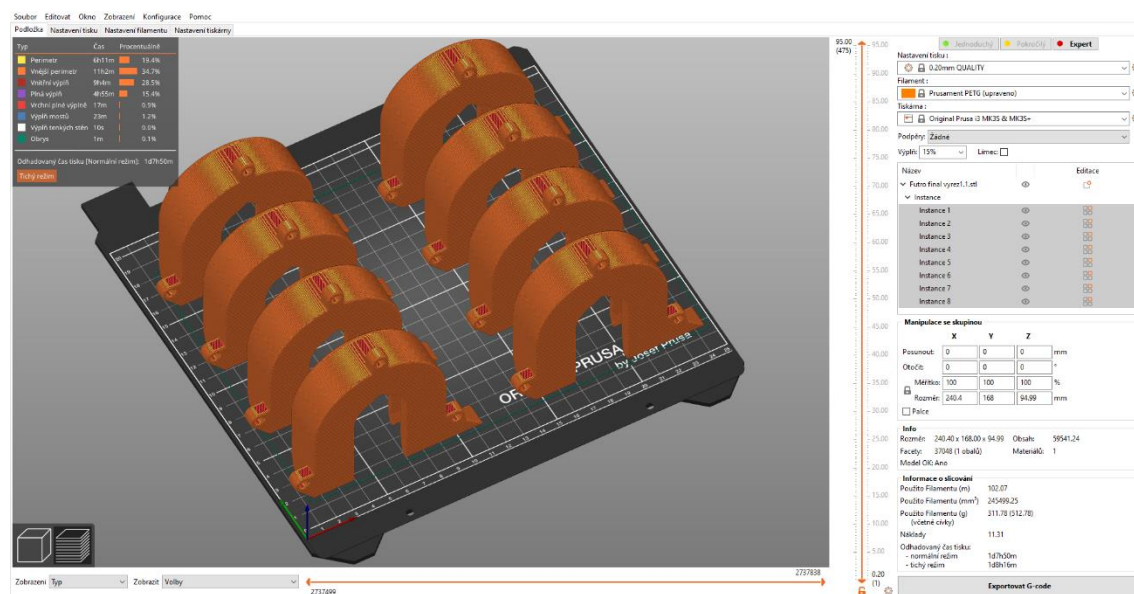
Prvním krokem realizace byla výroba samotných držáků, posléze umístění těchto držáků do polic podle vytvořených návrhů a následná expedice hotových polic do měrového střediska zadavatele.

4.1 Výroba držáků

Jak jsem již zmínil, vzhledem k velikosti a charakteru zakázky se držáky vyráběly technologií 3D tisku. Byly využity tiskárny nacházející se na Fakultě strojní ČVUT. Konkrétně se jednalo o tři tiskárny Original Prusa i3 MK3S+ doplněné o jednu tiskárnu Original Prusa Mini. Veškeré tiskárny byly tedy od českého výrobce PRUSA RESEARCH. Od stejného výrobce byl použit i materiál, konkrétně Prusament PETG Prusa Galaxy Black.

4.1.1 Slicing

Nejprve bylo potřeba vyexportovat v CAD programu modely držáku do STL formátu. STL modely jsem následně nahrál do programu PrusaSlicer 2.3.1, ve kterém jsem mohl nastavit veškeré parametry tisku.



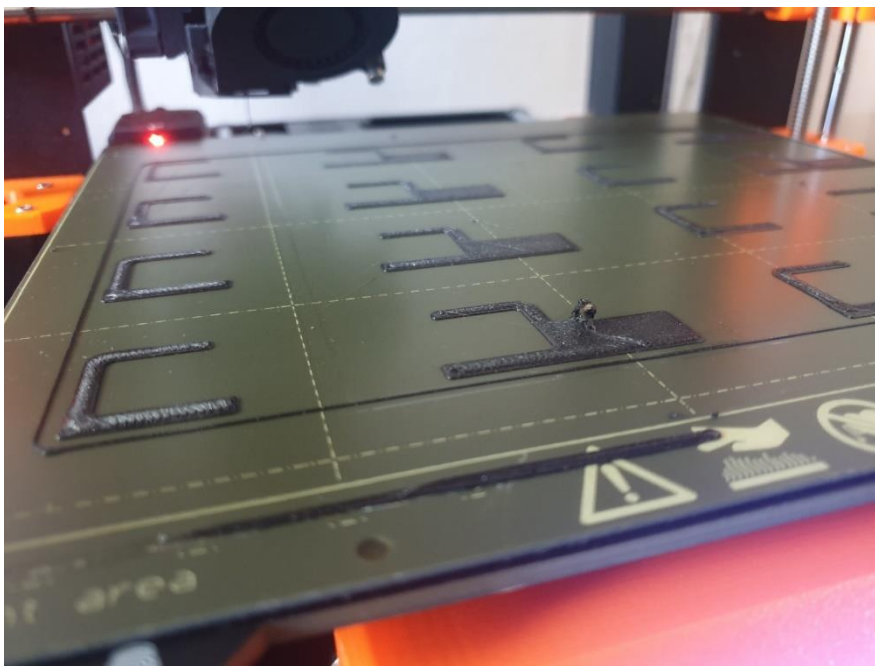
Obr. 50: Prostředí softwaru PrusaSlicer 2.3.1

Co se týče nastavení základních parametrů tisku, řídil jsem se převážně těmi doporučenými přímo softwarem. Software PrusaSlicer je totiž od stejného výrobce, jako použité tiskárny i materiál. Díky tomu byly v softwaru již vytvořeny profily pro zmíněné tiskárny s materiálem, a tím byl proces nastavování tisku značně ulehčen.

Zvolil jsem nastavení tisku 0,20mm QUALITY. Toto nastavení, jak již název napovídá, disponuje výškou vrstvy 0,2 milimetru a upřednostňuje kvalitu před rychlostí tisku. Výplň byla ponechána na 15 %, počet perimetrů byl roven 2 a mezi jednotlivými držáky byla nastavena minimální mezera 20 milimetrů.

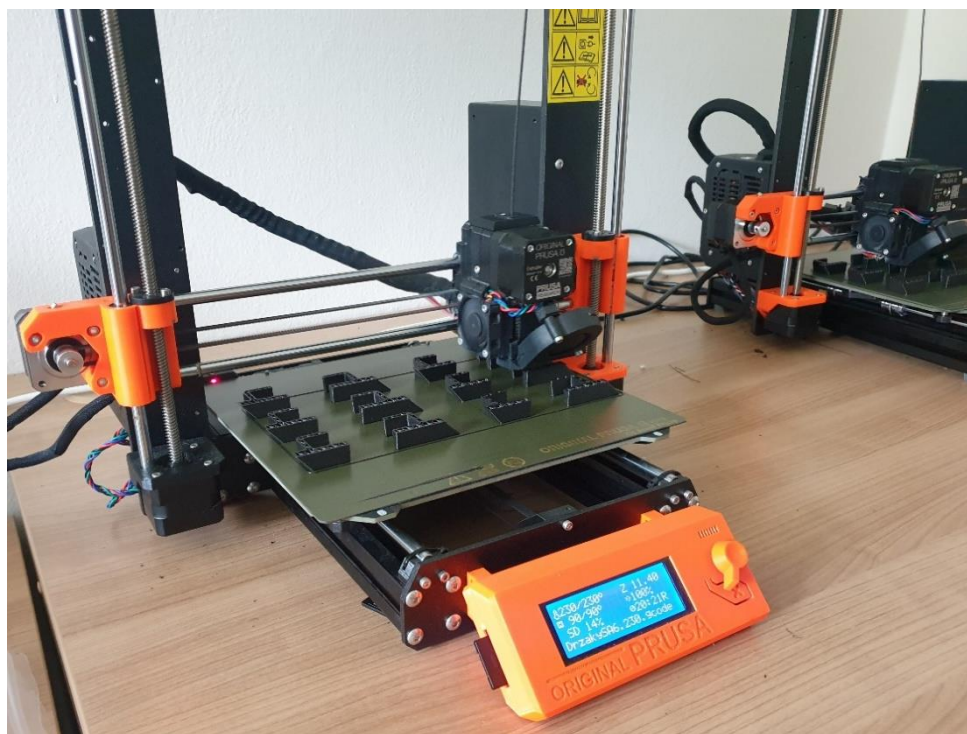
4.1.2 Tisk držáků

Samotný tisk držáků nicméně především z počátku provázely komplikace. Během tisku prvních vrstev docházelo k oddělování výtisků od podložky, do kterých následně narážela tryska a byl tím pokažen celý tisk. Tento problém se týkal všech tiskáren. Bylo tedy zřejmé, že bude problém tkvět v nastavení tisku. Při analýze nastavení tisku v softwaru PrusaSlicer jsem si všiml, že je nastavena teplota trysky na 250 °C. Na webových stránkách výrobce bylo nicméně uvedeno, že se při tisku materiálu PETG doporučuje teplota trysky nižší, konkrétně 230 až 240 °C. Zvolil jsem tedy teplotu trysky na 230 °C a problémů s prvními vrstvami tisku výrazně ubylo. Problém souvisel i s vyšší teplotou v místnosti pohybující mezi 28 až 31 °C, díky které již byla původní teplota trysky 250 °C již příliš vysoká pro bezproblémový tisk.

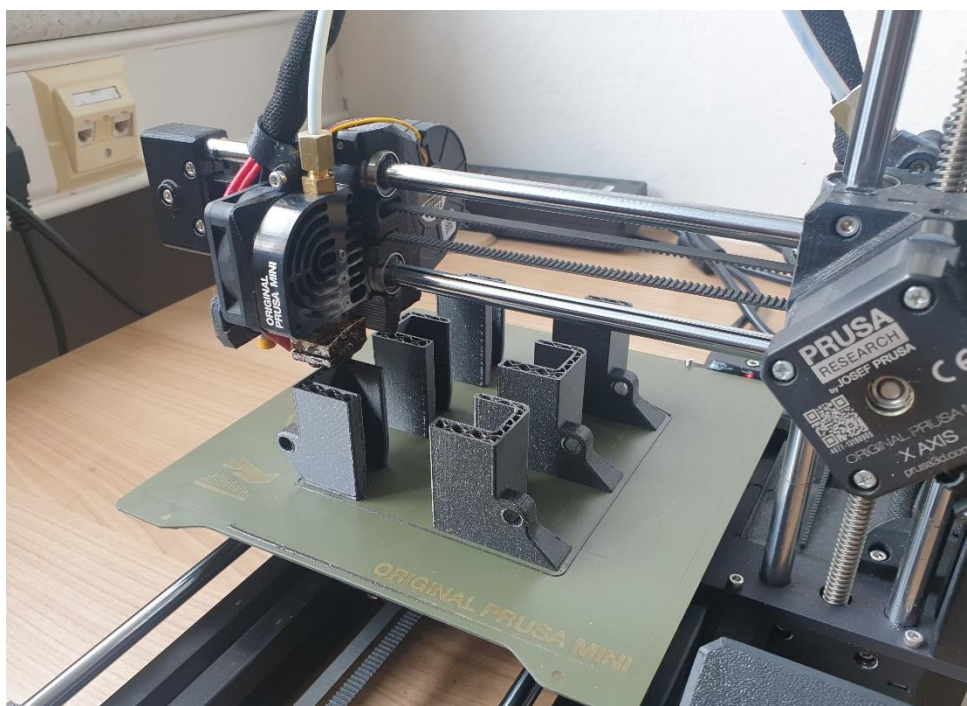


Obr. 51: Tisk pokažený vlivem příliš vysoké teploty trysky

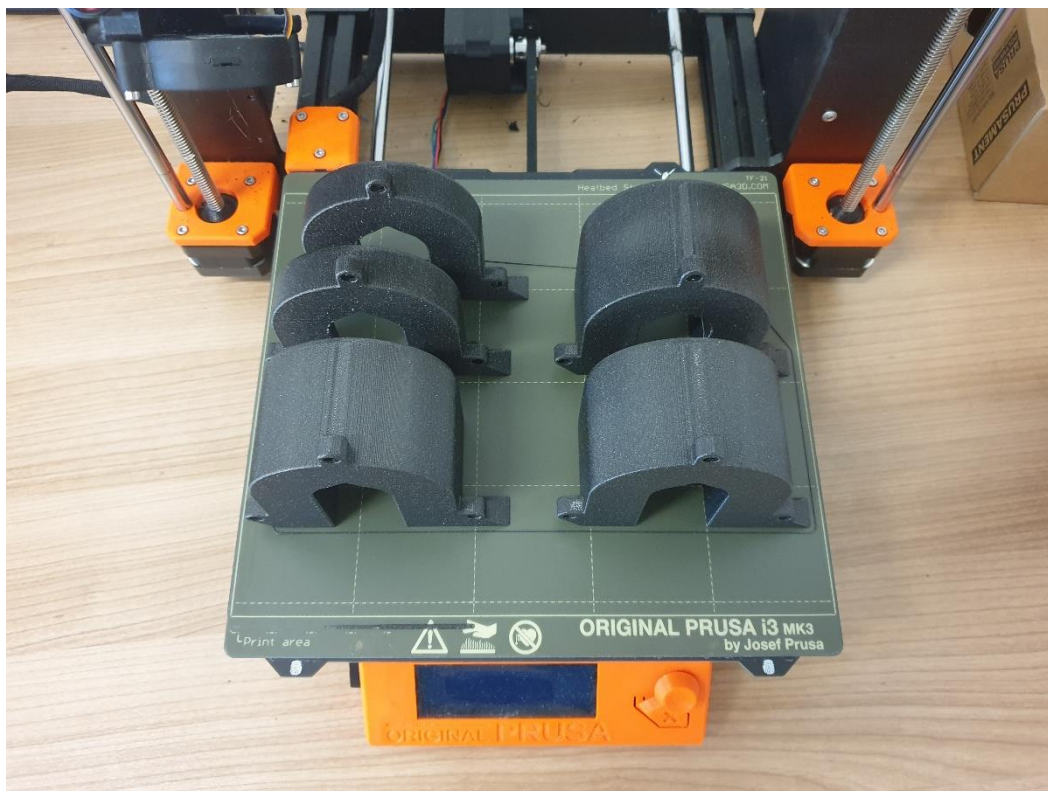
Tisk byl realizován na tiskárnách Original Prusa I3 MK3S+ disponujícími větší plochou tiskové podložky v počtu 6, respektive 8 kusů. V případě tiskárny Original Prusa Mini se tiskly vždy 3 kusy držáků. Podle softwaru měl trvat tisk jednoho kusu běžného držáku 3 hodiny a 58 minut. Tisk 6 držáků najednou tedy trval necelých 24 hodin.



Obr. 52: Tisk držáků na tiskárně Original Prusa I3 MK3S+



Obr. 53: Tisk držáků na tiskárně Original Prusa MINI



Obr. 54: Vytisknuté speciální držáky

Celkově bylo vyrobeno 96 běžných držáků, konkrétně 91 kusů potřebných pro uskladnění snímacích konfigurací a 5 náhradních kusů. Dále byly vytisknuty 3 držáky zvýšené v ose Z a 2 držáky určené pro snímací konfiguraci Rotos.



Obr. 55: Vytisknuté držáky připravené k umístění do polic

4.2 Testování držáku

Abych měl jistotu, že bude držák splňovat daný účel dobře a bezpečně, provedl jsem zátěžové testování. V době testování byla v platnosti přísná pandemická opatření. Zmíněný držák jsem tedy testoval v domácím prostředí za pomoci dostupných prostředků.

Testovaný držák jsem přišrouboval k prknu reprezentujícímu polici. Vytvořil jsem přípravek nahrazující talířek, který sloužil k simulaci talířku a zavěšení závaží. Jako závaží jsem použil balíky mezníků. Jeden balík vážil 11 kilogramů.



Obr. 56: Přípravek pro zavěšení závaží a držák zatížený závažím 55 kilogramů

Jednotlivé hodnoty závaží jsem nechal na držák působit vždy nejméně 5 dnů. Pokud danou zátěž držák bez poškození vydržel, přilepil jsem pomocí lepicí pásky k působícímu závaží další balík. Tento proces jsem postupně nadále aplikoval, dokud již držák danou hmotnost závaží nevydržel a praskl. Konkrétně držák praskl při zavěšeném závaží o hmotnosti 66 kg. Z obrázku č. 57 je patrné, že držák praskl v místech děr pro šrouby. Vzhledem k faktu, že pevná hlava ZEISS VAST gold může nést snímací konfiguraci o maximální hmotnosti 800 gramů [26], se jedná o úspěšný test, který předčil původní očekávání. Držák tedy snese mnohonásobně větší zatížení, než jakému bude při reálném používání vystaven.



Obr. 57: Prasklý držák a zbytky držáku přišroubované k prknu

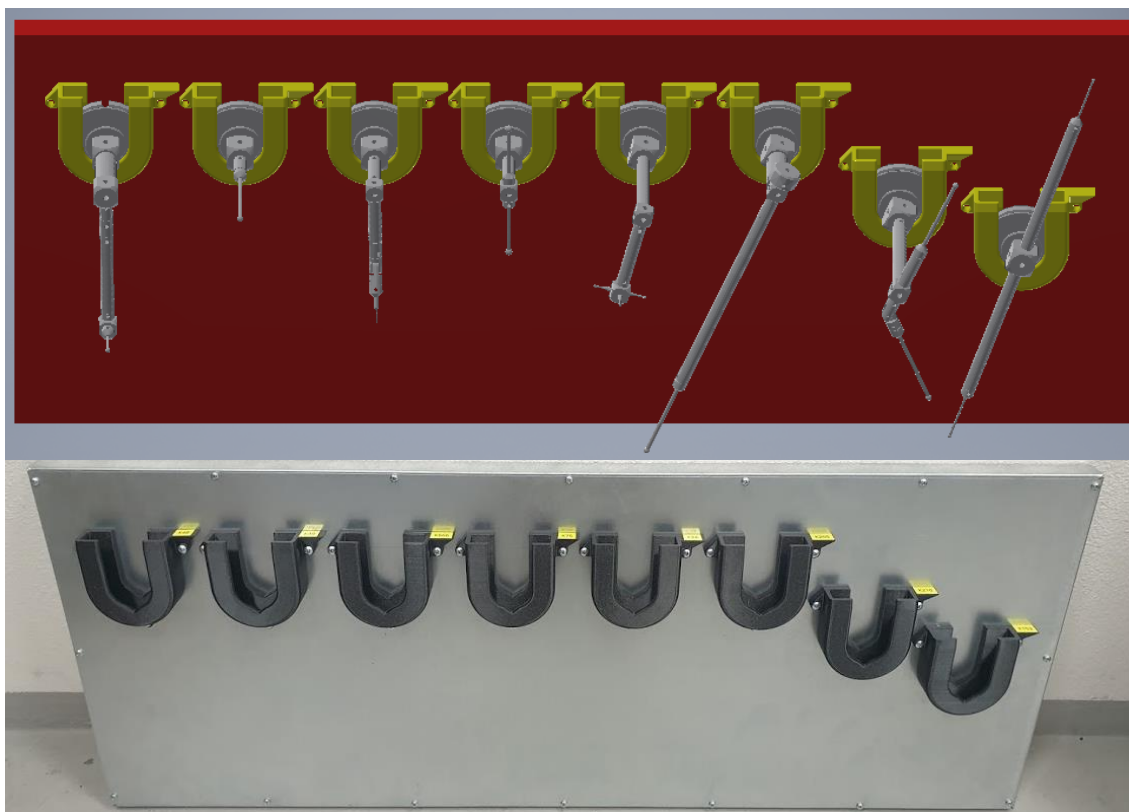
4.3 Umístění držáků do polic

Před umístěním držáků do polic podle vyhotovených návrhů bylo nejprve nutné upravit police samotné, aby bylo možné držáky do polic navrtat. Spodní strany polic totiž disponovaly vyztužením, které znemožňovalo přišroubování držáků přímo do polic. Rozhodl jsem se tedy ke spodní členité straně polic přišroubovat pozinkovaný plech, do kterého již bylo možné snadno držáky připevnit. Jednalo se o pozinkovaný plech o tloušťce 0,55 milimetru, který jsem nastříhal na potřebné rozměry odpovídající policím. Plechy k policím a následně držáky do plechů jsem přišrouboval pomocí samořezných šroubů.

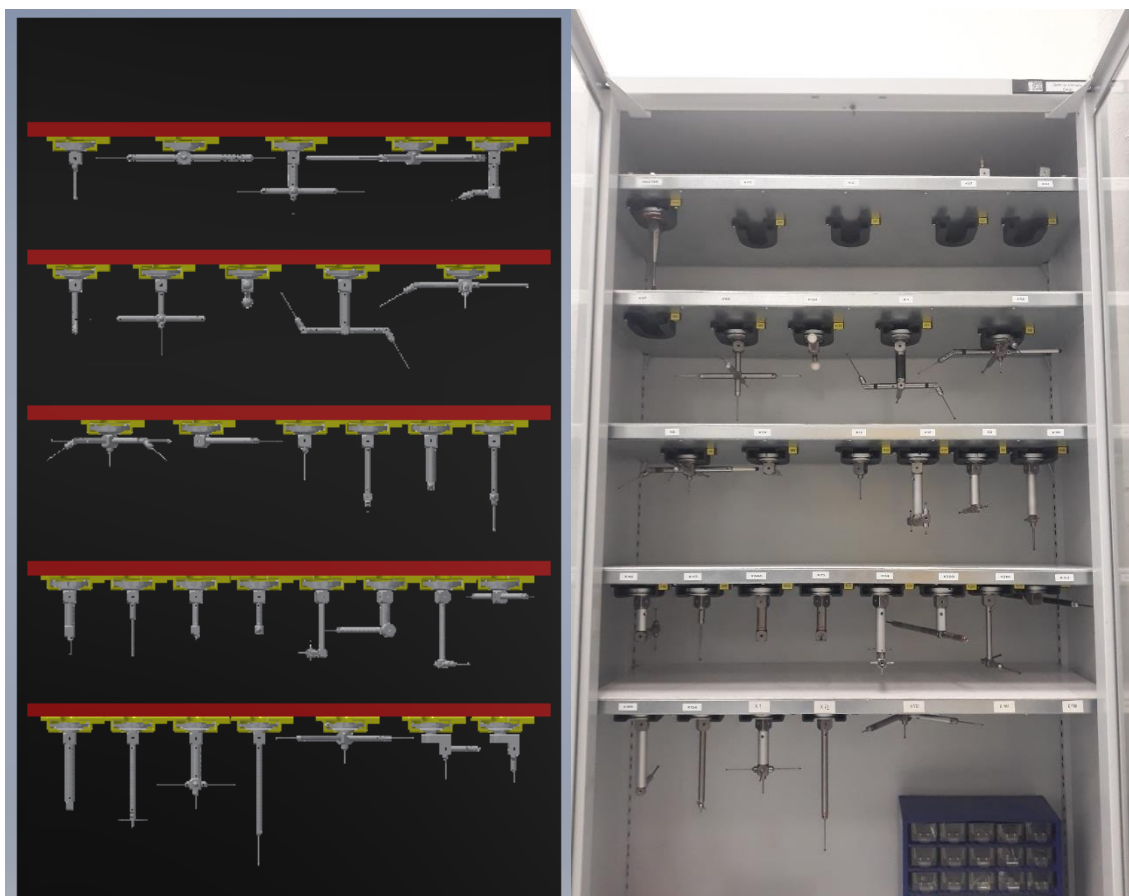
Při umístování jednotlivých držáků jsem se řídil především vytvořenými CAD modely. Po vyhotovení jednotlivých polic jsem vždy kontroloval, zda jsou k nim držáky přišroubovány pevně a zda reálné rozložení držáků v policích odpovídá návrhům. Po kontrole jsem každý držák označil pomocí štítkovače příslušným názvem, který odpovídal dané snímací konfiguraci. Hotové police byly následně expedovány přímo do měrového střediska společnosti, kde byly umístěny do jednotlivých skříní a mohly tak začít sloužit ke skladování snímacích konfigurací, kvůli kterému byly vytvořeny.



Obr. 58: Držáky pro snímací konfigurace K500 a K400



Obr. 59: Porovnání návrhu a vyhotovené police č. 4 ze skříně C



Obr. 60: Porovnání návrhu a vyhotovené skříně C

4.4 Ekonomické zhodnocení projektu

Ke kompletnímu posouzení je potřebné zmínit ekonomické zhodnocení systému skladování. Nejprve jsem se rozhodl zjistit výrobní náklady na jeden kus běžného držáku.

Pomocí softwaru PrusaSlicer jsem zjistil, že se na tisk jednoho držáku spotřebovalo 39,02 gramů filamentu. Vzhledem k použité technologii výroby, kdy se mohly během tisku vyskytnout komplikace, jsem pro jistotu počítal s 10 % přírážkou, se kterou bylo na jeden kus potřeba 42,92 gramů filamentu. Materiál PETG od společnosti Prusa Research o hmotnosti 1000 g stál 699 Kč, cena dopravy materiálu se rovnala 200 Kč. Celková cena filamentu na jeden držák se tedy rovnala 31,72 Kč/ks.

Co se týče spotřeby elektrické energie, řídil jsem se průměrnými hodnotami. Tiskárna Original Prusa I3 MK3S+ spotřebuje průměrně v závislosti na činnosti 80 až 120 W, zvolil jsem tedy 100 W. Při času tisku 4 hodiny a průměrné ceně energie, kterou jsem stanovil na 5 Kč/kWh, tedy činily celkové náklady na elektřinu 2 Kč/ks.

Další položku, kterou jsem uvažoval, byly náklady na tiskárnu, potažmo na její servis a opravy. Original Prusa I3 MK3S+ stojí 20 000 Kč. Návratnost investice jsem zvolil rovnu 1 roku a uvažoval jsem dvousměnný provoz. Tomu odpovídá výrobní kapacita 3920 hodiny ročně. Nakonec jsem určil výši nákladů servisu a oprav během doby životnosti tiskárny jako 20 % pořizovacích nákladů, tedy 4000 Kč. Náklady na jednu hodinu tiskárny včetně servisu odpovídají 6,12 Kč. Veškeré popsané parametry byly shrnuty v následující tabulce:

Tab. 1: Náklady na výrobu jednoho kusu držáku

Náklady	Množství	Cena
Materiál na držák	42,92 g	
Cena materiálu na 1 ks držáku včetně poštovního		31,72 Kč/ks
Spotřeba elektrické energie	100 W	
Průměrná cena energie		5 Kč/kWh
Celkové náklady na elektřinu na 1 ks držáku	400 W	2 Kč/ks
Požizovací cena tiskárny		20 000 Kč
Náklady na servis a opravy		4000 Kč
Návratnost investice	1 rok	
Dvousměnný provoz	3920 h	
Náklady na 1 hodinu provozu tiskárny		6,12 Kč/h
Celkové náklady na tiskárnu a servis na 1 ks držáku		24,49 Kč
Celkové náklady na výrobu 1 ks držáku		58,21 Kč

Náklady na jeden kus běžného držáku byly rovny 58,21 Kč. V případě držáku zvýšeného v ose Z se jednalo o 97,44 Kč a na držák určený pro snímací konfiguraci Rotos činily náklady 48,17 Kč.

Dále bylo nutné určit další náklady spojené s výrobou systému skladování. Jednalo se například o náklady spojené s plechy, spojovacím materiálem, práci či režijní náklady.

Tab. 2: Další náklady spojené s výrobou

Náklady	Množství	Cena
Plechý	4 ks	5798,38 Kč
Spojovací materiál		880 Kč
Práce	80 h	12 000 Kč
Režijní náklady (opotřebení nářadí, ...)	10 %	
Pásy do štítkovače	2	800 Kč
Další náklady spojené s výrobou		21 426,22 Kč

V tabulce č.3 byly shrnuty celkové náklady na systém skladování. Jejich výše dosáhla 27 403,03 Kč. V ekonomickém zhodnocení této práce nejsou záměrně uvedeny náklady na analýzu používaných konfigurací v podniku, vývoj držáku a celého systému skladování a výsledné náklady plně neodrážejí režie a přiměřený zisk.

Tab. 3: Náklady na systém skladování

Náklady	Množství	Cena
Běžné držáky	96 ks	5588,16 Kč
Držáky zvýšené v ose Z	3 ks	292,31 Kč
Držáky pro Rotos	2 ks	96,34 Kč
Další náklady spojené s výrobou		21 426,22 Kč
Náklady na systém skladování		27 403,03 Kč

Závěr

V první části byla popsána úloha metrologie v rámci systému managementu kvality. Byly zmíněny statistické nástroje a regulace výrobních procesů. Dále jsem charakterizoval metodiky Six Sigma a Lean, které slouží ke zdokonalování výrobního procesu. In-line a in-procesní metrologie jsou specifické druhy měření charakteristik dílů, které jsou zabudované přímo do výrobní linky. Jejich výhoda díky tomu tkví v rychlosti procesu kontroly. Pokud je nicméně potřebný komplexní pohled na zkoumané charakteristiky, je nutné využít měrovou laboratoř. V neposlední řadě jsem v této kapitole vysvětloval funkci podnikových informačních systémů využívaných v rámci výrobního procesu.

Druhá kapitola byla věnována souřadnicovým měřicím strojům. Popsal jsem princip fungování CMM, jejich rozdělení a postup kontroly součástí na těchto strojích. Dále jsem charakterizoval snímací systémy používané na CMM a jejich rozdělení. Zaměřil jsem se především na kartézsky uspořádané CMM s dotykovými snímacími systémy, které se z velké části používají ke kontrole vysoce přesných obráběných dílů. Věnoval jsem se rovněž problematice snímacích konfigurací, proč mnohdy nelze používat jednu univerzální konfiguraci a jakým způsobem se připojují k CMM.

Ve velkých podnicích, které vyrábějí stovky různých dílů, je nutné řešit skladování snímacích konfigurací, které se ke kontrole daných dílů využívají. V hlavní části této práce, rozdělené do dvou dílčích kapitol, jsem se zabýval návrhem a následnou realizací systému skladování pro měrové středisko zadavatele. Nejprve bylo potřeba provést analýzu jednotlivých snímacích konfigurací. K analýze jsem měl k dispozici 3D modely všech 94 snímacích konfigurací a požadavky od zadavatele týkající se specifického umístění vybraných konfigurací, které jsem respektoval.

Po analýze jsem se věnoval návrhům. Nejprve jsem navrhoval samotný držák určený pro ukládání snímacích konfigurací. Návrh jsem postupně optimalizoval, aby jej bylo možné bez problému vyrobit pomocí technologie 3D tisku ideálně bez tisku podpor a aby jeho využívání v praxi bylo pohodlné a ergonomicky vyhovující. Pro bezproblémové skladování několika specifických konfigurací jsem držák speciálně upravil. Po finalizaci návrhu držáku jsem se zabýval návrhem strukturovaného dispozičního řešení v jednotlivých skříních. Rozmístění jednotlivých konfigurací jsem prováděl

s respektováním požadavků zadavatele. Snahou bylo, aby byl systém intuitivní a snadno použitelný. Po shledání návrhu držáku i dispozičních řešení skříní jako vyhovujících jsem pokračoval realizací.

Výroba držáků a polic probíhala simultánně. K výrobě samotných držáků jsem využil čtyři 3D tiskárny. Ačkoliv se výroba držáku neobešla zcela bez komplikací, způsobených vysokou teplotou prostředí v laboratoři 3D tisku, po úpravě teplot tisku již byla výroba spolehlivější. Zhotovené držáky jsem na základě dříve vytvořených návrhů následně rozmístil do předem připravených polic osazených ze spodní strany pozinkovanými plechy. Abych zjistil, zda navržený držák mechanicky vyhovuje podmínkám, ve kterých bude využíván, podrobil jsem jej v domácím prostředí zátěžovému testu. Tento test splnil držák nad očekávání dobře, kdy praskl až při zatížení 66 kilogramů. V reálných podmínkách může být zatížen maximálně 800 gramy. Vyhotovené police s umístěnými držáky byly následně vyexpedovány do měrového střediska zadavatele, kde mohly začít sloužit zamýšleným účelům skladování. V poslední části kapitoly věnované realizaci jsem provedl ekonomické zhodnocení celého projektu, které jsem přehledně shrnul v tabulkách. Výrobní náklady jednoho kusu běžného držáku se rovnaly 58,21 Kč. Celková výše nákladů na systém skladování dosáhla 27 403 Kč.

Byl navržen a realizován systém skladování konfigurací snímacích systémů, který je organizovaný, uživatelsky přívětivý a vyhovuje veškerým požadavkům zadavatele. Veškeré cíle bakalářské práce, které bylo možné uskutečnit, byly tudíž splněny.

Seznam použitých zdrojů

- [1] HOCKEN, Robert J. a Paulo H. PEREIRA, ed. *Coordinate Measuring Machines and Systems: Second Edition*. 2. Boca Raton: CRC Press, 2012. ISBN 978-1-57444-652-4.
- [2] FLACK, David. 2014. *Measurement Good Practice Guide No. 43, CMM probing*, ISSN 1368-6550 [online] Dostupné z: https://www.npl.co.uk/special-pages/guides/gpg43_cmm
- [3] ČEPOVÁ, Lenka a Lenka PETŘKOVSKÁ. *Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch: studijní opora*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2514-4.
- [4] BERÁNEK, Libor. Strojírenská metrologie [PDF prezentace, studijní opora k předmětu Strojírenská metrologie]. 2017 [cit. 2020-12-10]. Interní dokument.
- [5] Kartézský souřadný systém. Docplayer [online]. [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/20860150-Souradne-systemy-geometricke-urceni-polohy-pevne-spojene-se-vztaznym-telesem.html>
- [6] Sférický souřadný systém. Docplayer [online]. [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/20860150-Souradne-systemy-geometricke-urceni-polohy-pevne-spojene-se-vztaznym-telesem.html>
- [7] ZEISS PRISMO. In: ZEISS [online]. [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/metrology/products/systems/coordinate-measuring-machines/bridge-type-cmms/prismo.html#prismo>
- [8] Hexagon Leitz PMM-C. In: ZEISS [online]. [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-cz/products/coordinate-measuring-machines/bridge-cmms/leitz-pmmc>
- [9] Hexagon Delta Dea Slant. In: Hexagon [online]. [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/coordinate-measuring-machines/gantry-cmms/dea-delta-slant>
- [10] ZEISS DURAMAX. In: ZEISS [online]. [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/metrology/products/systems/coordinate-measuring-machines/production-cmms/duramax.html>

- [11] ZEISS CALENO. In: ZEISS [online]. [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/metrology/products/systems/coordinate-measuring-machines/horizontal-arm-cmms/caleno.html>
- [12] Hexagon Absolute Arm. In: ZEISS [online]. [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/portable-measuring-arms/absolute-arm-7-axis>
- [13] Hexagon Leica Absolute Tracker ATS600. In: ZEISS [online]. [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/laser-tracker-systems/leica-absolute-tracker-ats600>
- [14] ZEISS METROTOM. In: ZEISS [online]. [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/metrology/products/systems/computed-tomography/metrotom.html>
- [15] RENISHAW 5osá technologie. Renishaw.cz [online]. [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/petiose-systemy--13413>
- [16] RENISHAW REVO-2. Renishaw.com [online]. [cit. 2020-12-30]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/cmmsupport/knowledgebase/en/revo-2--33018>
- [17] RENISHAW SP25M. Renishaw.com [online]. [cit. 2020-12-30]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/en/sp25m--6688>
- [18] ZEISS VAST XXT. ZEISS [online]. [cit. 2020-12-30]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/metrology/products/sensors/on-cmm/tactile-scanning-probe/vast-xtt.html>
- [19] ZEISS VAST gold. ZEISS [online]. [cit. 2020-12-30]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/metrology/products/sensors/on-cmm/tactile-scanning-probe/vast-gold.html>
- [20] Průvodce materiály. Prusa3D [online]. [cit. 2021-02-22]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/materialy/>
- [21] FABIÁN, F., V. HORÁLEK, V. CHMELÍK, J. CHODOUNSKÝ, J. KRÁL, J. KŘEPELA a J. MICHÁLEK. ČESKÁ SPOLEČNOST PRO JAKOST. Statistické metody řízení jakosti. první. Praha: Česká společnost pro jakost, 2007.
- [22] KŘEPELA, Jaroslav. *Úvod do Six Sigma BB* [PPT prezentace]. [cit. 2021-02-23]

- [23] MES systém. *MEScenter* [online]. [cit. 2021-02-23]. Dostupné z: <http://www.mescenter.org/cz/clanky/5-co-je-to-mes-system>
- [24] 3 Key Differences Between ERP and MES Systems. *Intraratio* [online]. [cit. 2021-02-23]. Dostupné z: <https://intraratio.com/post/key-differences-between-erp-and-mes>
- [25] Six Sigma. *Lean6sigma* [online]. [cit. 2021-02-23]. Dostupné z: <https://lean6sigma.cz/six-sigma/>
- [26] ZEISS Contact and optical sensors: A 360 degree view [online]. 2016, , 40 [cit. 2021-7-19]. Dostupné z: [https://applications.zeiss.com/C1257A26006EFF9E/0/E906E71D828B06FEC1257A45002E8D95/\\$FILE/ZEISS_Metrology_Sensors_EN_60_020_0001II.pdf](https://applications.zeiss.com/C1257A26006EFF9E/0/E906E71D828B06FEC1257A45002E8D95/$FILE/ZEISS_Metrology_Sensors_EN_60_020_0001II.pdf)
- [27] VAST Standard. *ZEISS 3D Automation Webshop* [online]. [cit. 2021-7-19]. Dostupné z: https://world.probes.zeiss.com/cz/Konfigurace-snimacu/Upinaci-talirky/VAST%C2%A0talirek/VAST-Standard/category-175/product-ARTIKEL_2589.html
- [28] VAST XXT TL3. *ZEISS 3D Automation Webshop* [online]. [cit. 2021-7-19]. Dostupné z: https://world.probes.zeiss.com/cz/Konfigurace-snimacu/Upinaci-talirky/VAST-XXT-upinaci-talirky/Upinaci-talirky-XXT-TL3-sada%C2%A010/category-489/product-ARTIKEL_4021.html
- [29] VAST XTR. *ZEISS 3D Automation Webshop* [online]. [cit. 2021-7-19]. Dostupné z: https://world.probes.zeiss.com/cz/Konfigurace-snimacu/Upinaci-talirky/XTR%C2%A0talirek/XTR%C2%A0talirek/category-405/product-ARTIKEL_4185.html
- [30] Rozdíly mezi ABS, PLA, PETG. *Materialpro3d* [online]. [cit. 2021-7-22]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/blog/rozdily-abs-pla-petg/>

Seznam obrázků

Obr. 1: Průběhový diagram [21]	13
Obr. 2: Histogram v relativních četnostech [21].....	13
Obr. 3: Schéma statisticky zvládnutého a nezvládnutého procesu [21]	15
Obr. 4: Náčrtek regulačního diagramu měření [21]	17
Obr. 5: Vymezení pojmu Six Sigma [25].....	17
Obr. 6: Cíle a poslání Six Sigma [22].....	18
Obr. 7: DMAIC	19
Obr. 8: Struktura informačních systémů v podniku [23]	22
Obr. 9: Popis částí kartézsky uspořádaného CMM [4]	24
Obr. 10: Postup kontroly součásti na CMM.....	25
Obr. 11: Kartézský systém souřadnic [5]	26
Obr. 12: Sférický systém souřadnic [6]	26
Obr. 13: Základní rozdělení CMM	26
Obr. 14: Portálový typ CMM s pohyblivým portálem [1]	27
Obr. 15: Portálový typ CMM s pohyblivým stolem [1]	27
Obr. 16: ZEISS PRISMO [7]	28
Obr. 17: Hexagon Leitz PMM-C [8]	28
Obr. 18: Mostový typ CMM [1].....	29
Obr. 19: Hexagon DEA DELTA SLANT [9].....	29
Obr. 20: Výložníkový typ CMM [1].....	30
Obr. 21: ZEISS DuraMax [10].....	30
Obr. 22: Stojanový typ CMM [1]	31
Obr. 23: ZEISS CALENO [11]	31
Obr. 24: Hexagon Absolute Arm [12].....	32
Obr. 25: Hexagon Leica Absolute Tracker ATS600 [13]	33
Obr. 26: ZEISS METROTOM 1500 [14]	33
Obr. 27: Základní rozdělení snímacích systémů CMM	34
Obr. 28: Otočná snímací hlava (RENISHAW PH10M) (vlevo) a RENISHAW REVO-2 (pětiosá) [2, 16].....	36
Obr. 29: Kinematický typ snímače [2].....	37

Obr. 30: Tenzometrický typ snímače [2].....	38
Obr. 31: RENISHAW S25M [17].....	38
Obr. 32: ZEISS VAST XXT [18].....	38
Obr. 33: Analogový měřicí systém výrobce ZEISS [2]	40
Obr. 34: ZEISS VAST gold [19]	40
Obr. 35: Reálná snímání konfigurace [26].....	41
Obr. 36: Talířek VAST Standard s kostkou a ID čipem [27]	41
Obr. 37: Talířek VAST XXT TL3 (vlevo) a talířek VAST XTR [28, 29].....	41
Obr. 38: Prostředí programu ZEISS CALYPSO.....	42
Obr. 39: Snímání konfigurace K11.....	43
Obr. 40: Snímání konfigurace Rotos.....	43
Obr. 41: Snímání konfigurace K500.....	43
Obr. 42: Původní návrh držáku	44
Obr. 43: Porovnání původního a finálního návrhu držáku	45
Obr. 44: Porovnání původního a finálního návrhu držáku	46
Obr. 45: Detail držáku před a po optimalizaci	46
Obr. 46: Upravený držák zvýšený v ose Z	47
Obr. 47: Upravený držák pro snímání konfiguraci Rotos	47
Obr. 48: Snímání konfigurace Rotos.....	47
Obr. 49: Finální návrhy jednotlivých skříní (zleva skříně P6, C a P7)	49
Obr. 50: Prostředí softwaru PrusaSlicer 2.3.1	50
Obr. 51: Tisk pokažený vlivem příliš vysoké teploty trysky	51
Obr. 52: Tisk držáků na tiskárně Original Prusa I3 MK3S+.....	52
Obr. 53: Tisk držáků na tiskárně Original Prusa MINI	52
Obr. 54: Vytisknuté speciální držáky.....	53
Obr. 55: Vytisknuté držáky připravené k umístění do polic	53
Obr. 56: Přípravek pro zavěšení závaží a držák zatížený závažím 55 kilogramů	54
Obr. 57: Prasklý držák a zbytky držáku přišroubované k prknu	55
Obr. 58: Držáky pro snímání konfigurace K500 a K400.....	55
Obr. 59: Porovnání návrhu a vyhotovené police č. 4 ze skříně C	56
Obr. 60: Porovnání návrhu a vyhotovené skříně C.....	56

Seznam tabulek

Tab. 1: Náklady na výrobu jednoho kusu držáku.....	58
Tab. 2: Další náklady spojené s výrobou.....	58
Tab. 3: Náklady na systém skladování	59