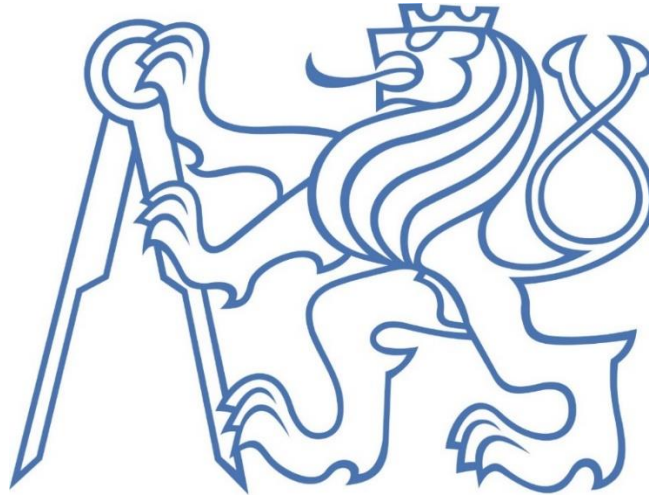


**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta strojní**

**Ústav technologie obrábění, projektování**



## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Reverzní inženýrství

Reverse engineering

**Autor:** Jiří Blažek

**Studijní program:** Teoretický základ strojního inženýrství (B 2342)

**Vedoucí práce:** Ing. Jan Šimota

Praha 2018

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Blažek** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **457639**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Reverzní inženýrství**

Název bakalářské práce anglicky:

**Reverse engineering**

Pokyny pro vypracování:

1. Problematika reverzního inženýrství
2. Získání mraku bodů
3. Rekonstrukce a optimalizace modelu

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **09.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

Ing. Jan Šimota  
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

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu použitých zdrojů.

V Praze dne .....

podpis autora.....

## Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Šimotovi za jeho cenné rady a postřehy při psaní této bakalářské práce. Taktéž děkuji své rodině za podporu.

## Anotace

Tématem této bakalářské práce je reverzní inženýrství. V teoretických částech je popisován jeho význam, metodika a použité technologie. V praktických částech je demonstrován kompletní postup při aplikování reverzního inženýrství na křížový přepínač. V práci je popsána metodika snímání bodů, rekonstrukce a úprava modelu pro 3D tisk součásti. V závěru práce byla součást vytištěna a porovnána s kovovou předlohou.

## Klíčová slova

Reverzní inženýrství, mrak bodů, model, rekonstrukce, laser scanner, 3D tisk

## Annotation

Reverse engineering is the main theme of this bachelor thesis. In theoretic parts is described his importance, methodology and used technology. In practice parts is demonstrated complete procedure of application reverse engineering for cross switch. In thesis is described methodology of scanning points, reconstruction and editing model for 3D printing. The cross switch was printed and compared with metal original in the end of thesis.

## Keywords

Reverse engineering, point cloud, model, reconstruction, laser scanner, 3D print

## Seznam použitých zkratk

ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
ASA	Acrylonitrile styrene acrylate
CAD	Computer Aided Design – Počítačem podporované projektování
CCM	Coordinate Measuring Machines – Souřadnicové měřicí stroje
CNC	Computer Numeric Control – Číslicové řízení počítačem
CT	Computer Tomography – Počítačová tomografie
FDM	Fused Deposition Modeling – Tavné poziční modelování
NDT	Non Destructive Testing – Nedestruktivní testování
NURBS	Non Uniform Rational B-Splines – Neuniformní racionální B-Spline
PLA	Polyactic acid
SLA	Stereolithography – Stereolitografie
SLS	Selective Laser Sintering – Selektivní laserové spékání
SMS	Souřadnicové měřicí stroje
STEP	Standart for Exchange of Product model data – Standart pro výměnu modelových dat
STL	Standart Triangle Language – Standartní trojúhelníkový jazyk
UV	Ultraviolet – Ultrafialové záření

## Obsah

Zadání .....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
Anotace .....	5
Seznam použitých zkratek .....	6
Úvod.....	10
1 Reverzní inženýrství .....	11
1.1 Historie reverzního inženýrství .....	11
1.2 Reverzní inženýrství v odvětvích.....	11
1.2.1 Automobilový a motocyklový průmysl .....	11
1.2.2 Válečný a zbrojní průmysl .....	13
1.2.3 Architektura a umění .....	13
1.2.4 Informační technologie .....	14
2 Křížový přepínač.....	15
2.1 Historie .....	16
2.2 Příprava modelu .....	17
3 Snímání dat .....	18
3.1 Souřadnicové měřicí stroje.....	18
3.1.1 Mostové SMS .....	19
3.1.2 Portálové SMS .....	20
3.1.3 Stojanové SMS .....	20
3.1.4 Měřicí rameno .....	21
3.1.5 Taktilní sensorika .....	22
Pasivní (snímací) sensorika .....	22
Aktivní (skenovací) sensorika .....	23
3.1.6 Laser scanner .....	24
3.2 Počítačová tomografie.....	25
3.3 Porovnání metod .....	26

3.4	Měření dat .....	27
3.4.1	Nikon MCAx – Model Maker MMDx100 .....	27
3.4.2	Zeiss Acura - Linescan .....	28
3.5	Mrak bodů .....	29
3.5.1	Získaná data .....	29
3.5.2	Úprava dat.....	29
3.5.3	Tvorba ploch .....	30
3.5.4	3D model.....	32
4	Optimalizace modelu pro tisk .....	33
4.1	Konstrukční změny modelu .....	33
4.1.1	Technologické hledisko .....	33
4.1.2	Konstrukční hledisko .....	34
5	3D tisk.....	36
5.1	Technologie tisku .....	37
5.1.1	FDM.....	37
5.1.2	SLA .....	38
5.1.3	SLS.....	38
5.2	Tiskárna.....	39
5.3	Materiály .....	39
5.3.1	ABS.....	40
5.3.2	ASA .....	40
5.3.3	PLA .....	40
5.4	Tisk modelu.....	41
6	Ověření.....	42
6.1	Porovnání .....	42
6.2	Návrh změn .....	43
6.3	Kalkulace nákladů.....	43



Závěr .....	44
Zdroje.....	45
Seznam obrázků.....	48

## Úvod

Reprodukce náhradních dílů pro veterány je v dnešní době jejich investičního potenciálu velmi slibně se rozvíjícím odvětvím. Moderní technologie navíc otevírají široké spektrum možností pro tuto specifickou a často kusovou výrobu. Tato bakalářská práce se zabývá problematikou a možnostmi využití reverzního inženýrství v oblasti výroby součástek pro historická vozidla, včetně realizace jednoho z uvedených postupů na konkrétní součástce.

První kapitola nastiňuje podstatu a význam reverzního inženýrství. Nejprve je uveden pohled na reverzní inženýrství z hlediska historie, následně je zde rozvedeno jeho využití v jednotlivých oblastech. Jsou zde uváděny konkrétní případy z oblasti automobilového a zbrojního průmyslu, architektury, umění a u informačních technologií. V druhé kapitole popisuje zkoumaný objekt a zabývá se vznikem a funkcí dané součásti, dnešní poptávkou a na závěr řeší přípravu objektu pro provedení reverzního inženýrství.

Třetí kapitola popisuje možné způsoby získávání mraku bodů, potřebného pro následnou rekonstrukci součásti a vznik CAD modelu. Nejprve rozebírá metody snímání pomocí souřadnicových měřících strojů, a to v kartézském a nekartézském souřadném systému, a následně pomocí počítačové tomografie. Poté se řeší problematika získávání modelu zkoumaného objektu na základě naměřených hodnot.

Ve čtvrté kapitole se pojednává o optimalizaci modelu jak z hlediska konstrukčního, tak z hlediska technologického dle následné výroby součásti. Na tuto kapitolu navazuje kapitola pátá, která shrnuje problematiku 3D tiskáren, porovnává možné způsoby tisku a druhy materiálu. Na konci kapitoly je popsán tisk zreprodukované součásti.

Poslední, šestá, kapitola porovnává vytisknuté součásti se vzorem, popisuje kvalitu výrobku a přináší návrhy na další možné konstrukční změny.

## 1 Reverzní inženýrství

Pojem reverzní inženýrství, jak již lze tušit z názvu, znamená proces opačný, než je klasické inženýrství. Objekt není tedy navrhován na základě vstupních požadavků či parametrů, ale na základě podkladů získaných z již hotového výrobku sloužícího na vzor. Ze vzorového předmětu se tedy snažíme získat co nejvíce informací o jeho vlastnostech, postupu výroby, či funkcích, neboť máme většinou jen holý předmět bez nějakých dalších výrobních podkladů. Na základě takto získaných hodnot můžeme vytvořit jeho výrobní dokumentaci a tak ho znovu zreprodukovat v podobné kvalitě, popřípadě využít jeho principy pro vytvoření vlastního vylepšeného předmětu. Jako zkoumaný předmět si můžeme představit téměř cokoli od strojních součástí, automobilů, letadel, mobilních telefonů, přes domy, nábytek, software, nebo i jídla. Reverzní inženýrství provozuje každý člověk téměř denně. Například v oblasti renovací veteránů, kde jsou často některé součásti poškozené, popřípadě úplně chybí, je potřeba provádět reverzní inženýrství téměř na každém kroku. Mezi reverzní inženýrství ale lze také zařadit i takové činnosti, jako je výměna plaňky v plotu, neboť i zde je nutno se inspirovat zbytkem plotu, aby nová plaňka vypadala stejně jako ostatní. Použití reverzního inženýrství však nemusí být vždy úplně legální, neboť díky němu lze okopírovat patentově chráněné nápady, které se pak můžou vydávat za vlastní dílo. Typický příklad plagiátorství lze najít například v IT oblastech, kde je možné přesáhnout hranice ochrany programu, který pak je možné nelegálně modifikovat a šířit. [1]

### 1.1 Historie reverzního inženýrství

Počátek reverzního inženýrství lze hledat již v dobách paleolitu (1 800 000-8 000 př. Kr.), ve kterém se začali vytvářet zárodky lidských kultur a technologií, neboť se začali vyrábět a používat první kamenné nástroje. Tyto kamenné nástroje se postupně rozšiřovaly mezi ostatní skupiny, což lze označit jako reverzní inženýrství. Reverzní inženýrství lze zaznamenat ve všech epochách lidstva, kdy jeho největší rozmach můžeme pozorovat v průmyslových dobách, popřípadě ve válečných obdobích, kdy docházelo k neustálé špionáži mezi jednotlivými stranami. [2]

### 1.2 Reverzní inženýrství v odvětvích

#### 1.2.1 Automobilový a motocyklový průmysl

Nejjednodušší příklady využití reverzního inženýrství můžeme nalézt v automobilovém průmyslu. Avšak nebýt kopírování konkurenčních technologií, docházelo by častokrát

k vývoji stejné věci na více místech najednou. Pro příklad z historie uvádím poválečnou Jawu Pérák. Motocykl představený na poválečném motoristickém veletrhu zaujal svojí moderní koncepcí, ale nelze si nevšimnout, že se Jawa leckde inspirovala u jiných značek. Například teleskopické pérování zadního kolo se nápadně podobá řešením použitých u BMW (viz. Obr. 1-1 a Obr. 1-2), nebo řadicí a startovací páka vyústěná na společné dvojité hřídeli byla převzata od DKW. Při představení následujícího modelu se však již DKW ohradila a Jawa byla nucena vymyslet vlastní řešení. Jawa však nebyla jediná československá plagiátorská značka, například během vývoje mopedu Stadion bylo dokonce zakoupeno několik konkurenčních mopedů, které byly testovány a následně i rozebrány za účelem okopírování některých technologií. [3]



Obr. 1-1 BMW R 61 [4]



Obr. 1-2 Jawa Pérák

V dnešní době jsou kopírováním cizích automobilů známé především čínské automobilky. Často lze vidět na automobilových veletrzích zarputilé asijské fotografy, fotící vozy do nejmenších detailů, včetně důležitých podvozkových komponentů. Následně okopírované výtvary jsou podobné originálu nejen tvarem či koncepcí, ale lze často na nich spatřit naprosto totožné konstrukční řešení, či estetické detaily jako na předloze. Mezi typický příklad lze například zařadit sedan vyšší střední třídy JAC A6 nápadně podobný německému Audi A6. Zde si lze povšimnout, že si čínští plagiátoři nelámali ani hlavu s vymýšlením jiného typového označení vozu. [5]



Obr. 1-3 JAC A6 [5]



Obr. 1-4 Audi A6 [5]

### 1.2.2 Válečný a zbrojní průmysl

Jak již bylo uvedeno výše, válečná mašinerie je ideální prostředí pro kopírování cizích výtvorů. Během válek vznikala celá špionážní oddělení zaměřená na získávání konkurenčních technologií. Taktéž, pokud se povedlo ukořistit nějaký zajímavý nepřátelský stroj, okamžitě došlo k jeho podrobení výzkumu.

Nejen ve válečném průmyslu, ale i čistě ve zbrojařském docházelo a dochází ke kopírování. Jednou z nejkopírovanějších zbraní všech dob je legendární pistol Colt 1911. Jako jeden příklad za všechny budiž španělská kopie Star model B 9mm. Tato kopie vznikla v roce 1928, byla používána za války Německou armádou či španělskou armádou až do konce její výroby v roce 1985. [6]



*Obr. 1-5 Porovnání Star BM (vlevo) a Colt 1911 [6]*

### 1.2.3 Architektura a umění

Metody reverzního inženýrství jsou dnes i hojně využívány v oblasti staveb. Díky 3D scannerům umístěných na dronech, je možné naskenovat výškové historické budovy v místech, kam se dřív nebylo možné dostat. Pomocí těchto dat můžeme získat nové poznatky v oblastech stavitelství dávných dob. Také existují společnosti, které na základě získaných dat jsou schopné zrekonstruovat vnitřní zařízení místností, popřípadě celý exteriér staveb tak, jak byl dříve udělán.

Reverzní inženýrství se nevyhnulo ani umění, neboť nám opět umožňuje získávat řadu cenných poznatků o historických dílech. Tato díla je možné digitálně archivovat a následně provést jejich citlivou rekonstrukci založenou na získaných datech. Bohužel i v této oblasti je to chůze po tenkém ledě. Za pozornost stojí případ jistého muže,

který vytvořil 3D model známé Michelangelovi sochy umístěné v Augustana College campu v USA. Nedlouho poté, co svůj vytvořený model nahrál na síť, ozvalo se vedení koleje s odkazem na vlastnická práva a muž byl přinucen model stáhnout z internetu.



*Obr. 1-6 Michelangelova socha a její 3D scan [7]*

#### 1.2.4 Informační technologie

Reverzní inženýrství v oblasti IT může být velmi přínosné, ale i nežádoucí. Jednak lze díky jeho pomoci odhalit chyby v programech, obnovit ztracené kódy, či detekovat škodlivé softwary, ale taktéž může docházet k nežádoucímu plagiátorství a šíření programu. Taktéž je velmi nebezpečný útok hackerů na citlivá data, ke kterým je možné se takto dostat. Například čínským hackerům se povedlo díky emailu s pdf souborem obsahujícím škodlivý kód vylákat z vládních počítačů tajné dokumenty o pádu letadla MH370. Proto je velmi důležité, jakým směrem jsou metody reverzního inženýrství využívány a je nutné se jim umět i bránit. [8]

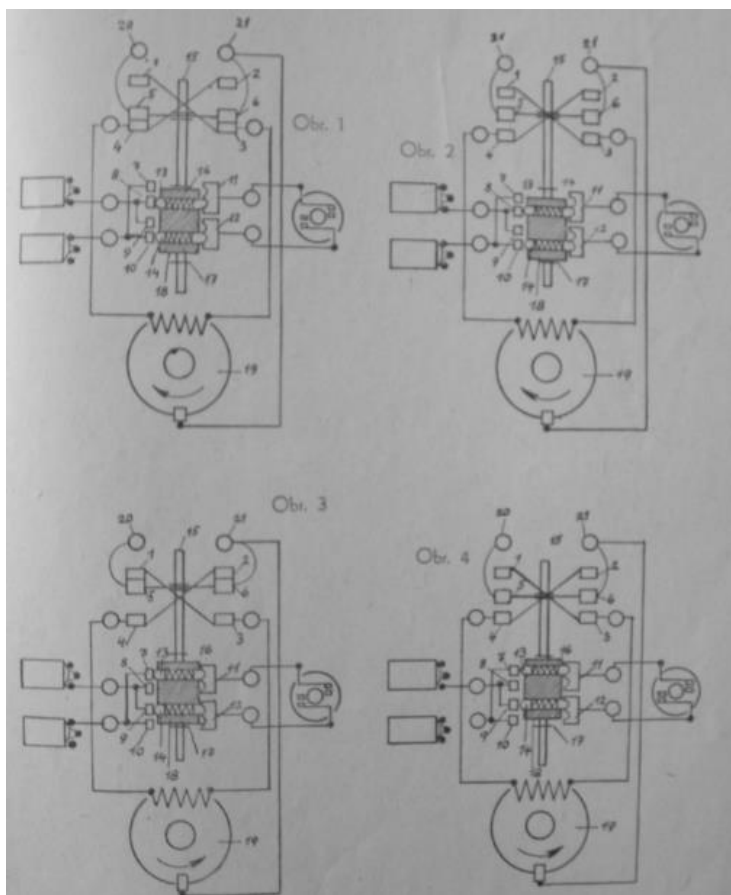
## 2 Křížový přepínač

Pro účely této bakalářské práce bylo zvoleno jako model základní těleso křížového přepínače. Křížový přepínač se používal ve vozítkách Velorex typu 16/175, 16/350, 435-O a rikšách ČZ 175-505, kde sloužil k ovládní startéru. Lze si jej zjednodušeně představit jako dvupolohový mechanický stykač a přepínač dohromady. Ve svém tělese má



Obr. 2-1 Velorex 16/350

zabudovány nejen silové stykové kontakty, ale i kontaktové přepínače. Při zatažení či zatlačení táhla dochází ke styku silových kontaktů a nastavení správného propojení impulsových kontaktů. Spínání silových kontaktů slouží pro přívod startovacího proudu na stator startéru, jehož smysl lze změnit opačným pohybem táhla. Této reversace se využívá pro start motocyklového motoru opačným směrem, a lze jej využít pro zpětný chod vozidla. Změna pozice impulsových kontaktů slouží pro výměnu kontaktů zapalování, neboť je třeba pro zpětný chod jejich prohození. Smysl funkce je dobře



Obr. 2-2 Schéma zapojení křížového přepínače [10]

zřetelný z přiloženého schématu zapojení, které se dochovalo jako příloha patentového spisu na křížový přepínač. [10]

Křížové přepínače se na trhu stávají velmi nedostatkovým zbožím, a cenou atakující hranici 4 000 Kč za použitelný kus i slušným obchodním artiklem. Bohužel na trhu není žádná jiná součástka, která by jej nahradila a tak pokud ho člověk potřebuje k dokompletování vozidla, většinou mu nezbyvá než zaplatit požadovanou sumu.

## 2.1 Historie

Impuls k vývoji křížového přepínače nastal ve chvíli, když se ve vývojovém středisku Doly u Nového hrádku začali zabývat možností osadit tříkolku Velorex dvouválcovým motorem se startérem umožňujícím start vpřed i vzad. Bylo třeba vyřešit nejen reverzaci otáčení, ale i přepínání kontaktů.



Obr. 2-3 Jaromír Kábrt a prototyp vozítka Motorex

Vývoje součástí se ujal Jaromír Kábrt (20. 6. 1914-5. 11. 1984), který již dříve pracoval na vylepšení stávajících tříkolek a vývoji nového čtyřkolového vozidla ve spolupráci s n. p. Jawa. Mezi jeho známá díla patří osazení motoru Jawa 250 startérem a dynamem z automobilu, kde vytvořil

a doma odlil nová víka motoru přizpůsobená k montáži těchto komponent. Další úprava spočívala ve vytvoření hydraulického ovládní do té doby lankových brzd. Obě tyto úpravy sice velmi zlepšily vozítko, avšak se neprosadily vzhledem k cenové a časové náročnosti. Mezi jeho prosazené návrhy patří například vylepšení stávajícího systému mechanických brzd či zlepšení přístupu k motoru vozítka.

První křížové vypínače spatřily světlo světa v roce 1959, které schválil do výroby Krajský svaz výrobních družstev. Jaromír Kábrt v roce 1961 podal patentovou přihlášku, která mu byla schválena. Sériová výroba naběhla z kraje roku 1963 v Závodě v Olešnici v Orlických horách. Primární část objemu výroby byla určena pro ČZM Strakonice, které jej montovali do svých rikšových tříkolek ČZ 175-505. Sekundární část výroby byla dodávána do závodu v Solnici, kde se montovali v letech 1963-1964 do tříkolek Velorex 16/175, v letech 1963-1971 do tříkolek Velorex 16/350 a v letech 1971-1973 do čtyřkolového Velorexu 435-O.

Velodružstvo na prodeji přepínačů do ČZM Strakonice vydělalo v té době slušný obnos v řádu statisíců, avšak Jaromír Kábrt dostal pouze jednorázovou finanční odměnu v roce 1964 ve výši 11 731,85 Kčs. [9] [10]



## 2.2 Příprava modelu

Křížový přepínač, který jsem měl k dispozici pro tuto práci, bylo potřeba připravit pro provedení procesu reverzního inženýrství. Nejprve bylo nutné přepínač odstrojit na holé hliníkové těleso, které se budu snažit reprodukovat. Pokud by na něm zůstaly ostatní součástky, bylo by nutné je později softwarově odstraňovat a modelovat části tělesa, které by se nepromítli, což by znamenalo spoustu práce navíc.

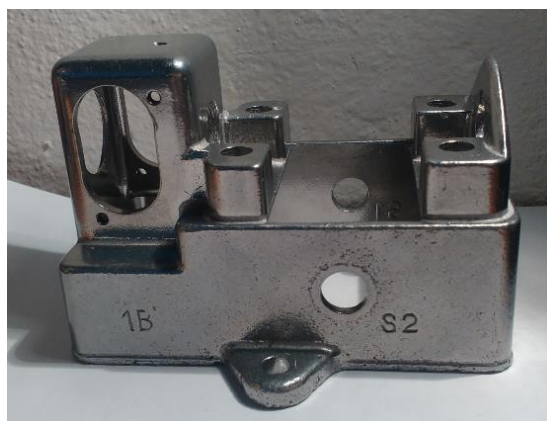
Poté co jsem těleso odstrojil na holý hliníkový skelet, bylo nutné provést jeho očistu, neboť neslo spoustu nečistot i značné známky oxidace. Pokud bych zvolil mechanické čištění, mohlo by dojít k nenávratnému poškození povrchu tělesa. Proto bylo zvoleno jít cestou chemického čištění. Výsledný povrch očištěného tělesa byl kovově lesklý a zbavený veškerých nežádoucích nečistot. Na povrchu se objevily důlky po oxidaci, mechanické šrámy a různé stopy po opracování odlitku. Za zmínění stojí, že čísla označující pozici svorek nebyly při výrobě odlity na výrobku, ale až dodatečně doráženy raznicemi, neboť byl vidět otlak materiálu na vnitřní straně stěny.



Obr. 2-4 Křížový přepínač v náleзовém stavu



Obr. 2-5 Odstrojené těleso přepínače



Obr. 2-6 Těleso po chemickém čištění

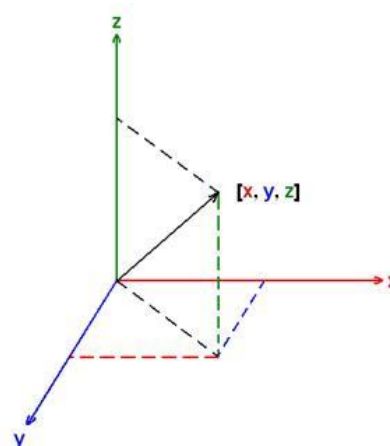
### 3 Snímání dat

Jedním z nejdůležitějších kroků v procesu tvorby modelu součásti, je snímání dat (vytvoření mraku bodů). Na základě nasnímaných dat bude vytvořen model součásti. Kvalita snímání má značný vliv na časovou náročnost konstrukce modelu.

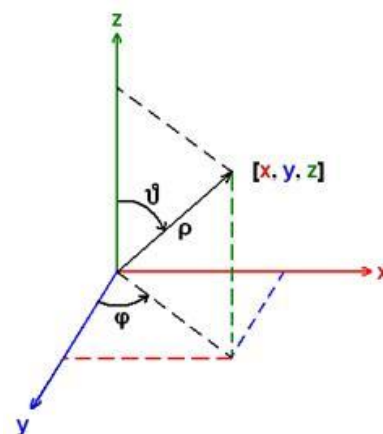
Snímání dat je možné provádět několikero možnými způsoby. Základní dělení metod je na kontaktní a bezkontaktní. Další dělení je možné dle přístrojů, pomocí kterých měření probíhá. Nejjednodušší, avšak velmi omezený tvarovou složitostí součásti, je odměřování pomocí komunálních měřidel, jako jsou posuvná měřítka. V dnešní době jsou pro snímání velmi využívané souřadnicové měřicí stroje, pomocí kterých je možno měřit kontaktně i bezkontaktně. Mezi další postupy je možno zařadit například počítačovou tomografii, která se řadí k bezkontaktním metodám.

#### 3.1 Souřadnicové měřicí stroje

Souřadnicové měřicí stroje (SMS), nebo také Coordinate Measuring Machines (CCM), slouží pro měření a kontrolu široké škály výrobků. Můžeme pomocí nich měřit nejen délky či průměry, ale i například souosost děr či zaznamenávat různě složité tvarové plochy. Díky možnosti měření ve třech osách je možné kontrolovat mnoho rozměrů na jedno upnutí, což do určité míry eliminuje možnost chyby. Ke své práci používají souřadné systémy, ve kterých definují polohy naměřených bodů v prostoru. Nejčastěji je používán kartézský souřadný systém (používající tři délkové rozměry v osách xyz), který se používá u portálových, mostových, stojanových aj. měřicích strojů. Takovéto stroje bývají nazývány jako tříosé měřicí stroje. Měřicí stroje nepoužívající kartézský systém souřadnic, například měřicí ramena, pracují se sférickým souřadným systémem (používající pro popis dva úhly a jeden délkový rozměr). [11]



Obr. 3-1 Kartézský souřadnicový systém [15]

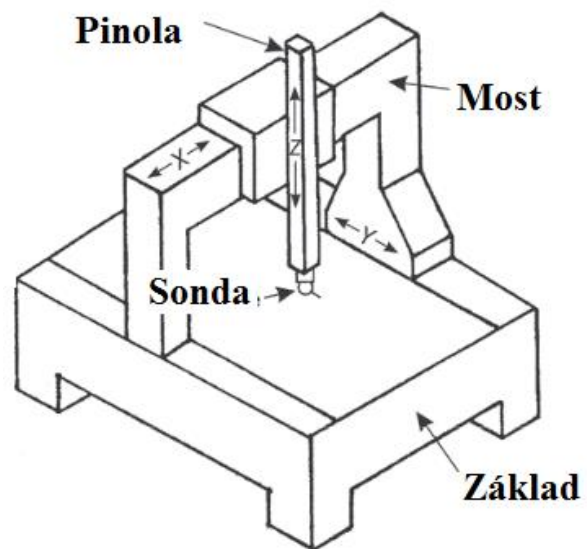


Obr. 3-2 Sférický souřadnicový systém [15]

Souřadnicové měřicí stroje vznikly v návaznosti na vznik CNC strojů kolem roku 1960. Tyto první přístroje byly neautomatizované, měření probíhalo pouze pomocí tuhých sond a jejich průmyslové využití bylo velmi omezené. První automatizovaný souřadnicový měřicí stroj se objevil na trhu v roce 1973. Tento stroj byl automaticky řízen díky speciálnímu ovladači, do kterého se program umisťoval na papírových páscích. K největšímu rozmachu dochází v době nástupu počítačově řízených strojů s plně řízeným provozem. Došlo k propojení měřicího stroje s operační technikou, díky čemuž dnešní souřadnicové měřicí stroje dokáží pracovat s CAD modely. Tato spolupráce přináší možnost okamžitého porovnání naměřených bodů reálné části s 3D modelem, čehož se využívá v oblasti metrologie. [12]

### 3.1.1 Mostové SMS

Mezi nejrozšířenější souřadnicové měřicí stroje patří bezpochyby stroje s pohyblivým mostem. Jedná se o velmi přesné stroje, vhodné pro laboratorní využití. Jako základ pro tento stroj slouží silná granitová deska, která vytváří stabilní pracovní prostor pro měření. Pro měření ve všech třech osách se posouvá most po základně, na mostu se pohybuje pinola a na pinole se hýbe měřicí sonda. [13] [14]



Obr. 3-3 Konstrukce mostového SMS [13]

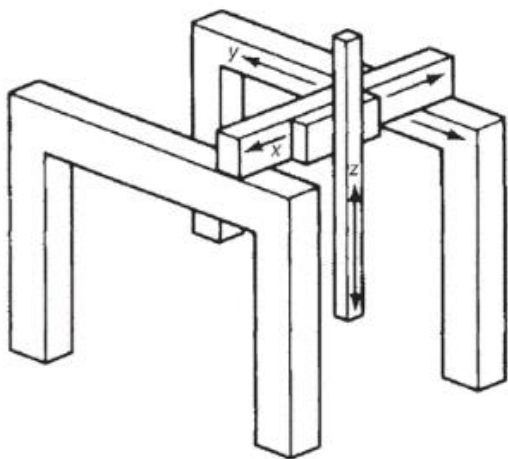
Posuvy u dnešních počítačově řízených

strojů mohou být vykonávány manuálně pomocí joysticku na řídicím panelu, nebo automaticky dle programu. Takovéto měřicí stroje dosahují velmi dobrých přesností díky značné tuhosti konstrukce a pevného základu. Aby kvalita měření odpovídala tomu, co deklaruje výrobce, je nutné dodržovat určité zákonitosti. Vzhledem k tomu, že se přesnosti pohybují v řádech mikrometrů, potřebuje takovýto stroj laboratoř s konstantní teplotou, vlhkostí a pravidelné kalibrační prohlídky, které většinou poskytuje výrobce. [13]

Pro možnost srovnání s ostatními typy strojů uvádím stroj Zeiss Accura. Výrobce deklaruje chybu měření od 1,2  $\mu\text{m}$ , teplotní rozsah 20° - 26°C, možnost montáže široké škály dotykových senzorů nebo laserové hlavy. Velikost pracovního prostoru je variabilní v rozmezí od 900x1200x800 mm do 2000x4200x1500 mm. [14]



Obr. 3-4 Zeiss Accura [14]



Obr. 3-5 Konstrukce portálového stroje [16]

### 3.1.2 Portálové SMS

Portálové měřicí stroje mají konstrukci velmi podobnou mostovým strojům, avšak mají mnohem větší pracovní prostor daný velikostí měřených součástí. Portálové stroje byly vynalezeny na začátku šedesátých let pro měření větších součástí, jako jsou automobilové karoserie, části letadel, lodí či obří diesellové motory. [16]

### 3.1.3 Stojanové SMS

Stojanové souřadnicové měřicí stroje mají konstrukci podobnou mostovým, avšak mají jen most poloviční. Výhodou je možný přístup obsluhy k upnuté součásti ze tří stran. Hlavní rozměrové omezení měřené součásti je dáno velikostí stojanu. Jelikož stroj



Obr. 3-6 Zeiss Pro [17]

postrádá druhou polovinu ramene, je tuhost konstrukce mnohem nižší než u mostové srovnatelné velikosti a tudíž stroj měří s větší nepřesností.

Jako příklad stojanových souřadnicových měřicích strojů, zde uvádím Zeiss Pro. Tento model je možné objednat ve třech různých variantách, lišících se polohou pracovního prostoru, který má rozměry 1600x2100 mm. Výrobce udává, při dodržení teplotního rozsahu na pracovišti 16-24 °C, chybu měřené délky od 27 mikrometrů. [17]

### 3.1.4 Měřící rameno

Měřící ramena se řadí mezi souřadnicové měřící stroje pracující se sférickým souřadným systémem. Oproti klasickým strojům vynikají díky své velikosti, přenosnosti a nízkým nárokům na obsluhu. Používají se tam, kde není možné výrobek umístit do klasického souřadnicového stroje. Rameno je zkonstruováno pomocí trubkových dílců spojených klouby, jejichž počet definuje počet stupňů volnosti. Trubkové dílce bývají často vyrobeny z uhlíkových vláken, aby nebyla manipulace s měřícím ramenem fyzicky náročná. Pro klasické dotykové měření se sondou umístěnou na konci ramene je postačujících šest stupňů volnosti, kdežto při použití laser scanneru je nutné použít sedmi osé provedení ramena. Jelikož jsou oba senzory namontovány zároveň, je možné je použít v rámci jednoho měření. V každém kloubovém spoji je umístěn úhlový enkodér, díky kterému má připojený software informaci o aktuální poloze sondy v prostoru. Každé kloubové spojení přidává určitou chybu měření, takže chyba měření je přímo úměrná počtu kloubů. Tato chyba měření je větší než u klasického souřadnicového stroje.[11][13][18]



*Obr. 3-7 Nikon MCAx [19]*

Pro srovnání s ostatními typy strojů zde uvádím měřící rameno od firmy Nikon, MCAx. Konstrukci ramene tvoří uhlíkové částice a disponuje sedmi stupni volnosti. Rameno je možné umístit k pracovní ploše pomocí tří šroubů, magnetické základny, vakuové

přísavky, nebo je možné jej umístit na stativ. K dispozici je v několika různých délkových provedení od 2 do 4,5 m. Chyba měření se u tohoto typu pohybuje v řádech desítek mikrometrů v závislosti na délce ramene.[18]

### 3.1.5 Taktilní sensorika

Základní způsob měření na souřadnicových měřicích strojích je realizován pomocí taktilních sensorů umístěvaných na konci pinoly, které při doteku vyšlou signál a dojde k zaznamenání souřadnic bodu. Existuje několik typů taktilních sensorů lišících se způsobem získání informace o doteku s měřeným objektem. Mezi hlavní nevýhodu taktilních sensorů patří časová náročnost při měření tvarově složitých dílů. V praxi jsou nenahraditelné pro svoji vysokou přesnost. [13]



*Obr. 3-8 Taktilní sensorika [20]*

#### Pasivní (snímací) sensorika

Pasivní senzory mají na vrchním konci dřívku umístěné do trojúhelníku tři páry kontaktů, které jsou viditelné na obr. 3-9. Tyto kontakty jsou realizovány pomocí kuliček a válečků, a slouží k detekci kontaktu snímače s měřeným objektem. V případě kdy se senzor dotkne objektu, dojde k vychýlení dřívku, změní se styčná plocha kontaktu a dojde ke změně elektrického odporu, čímž je proveden záznam polohy pomocí elektroniky umístěné v senzoru. Nevýhodou trojúhelníkového uspořádání je různá velikost spínací síly, a tím i vychýlení dřívku, nutné k zaznamenání doteku, jelikož se ve stejné rovině mění

v závislosti na směru dotyku. Tento jev se, negativně na výsledky měření, projevuje při měření tvarově složitějších prvků a dochází k vnášení určité chyby. Oproti tomu pasivní senzory vynikají značnou tuhostí a jednoduchostí konstrukce. [20]

#### Aktivní (skenovací) sensorika

Aktivní senzory pracují s podobným mechanickým principem jako pasivní senzory, ale mají odlišnou elektronickou snímací technologii. Nevyužívají odpor kontaktů mezi kuličkami a válečky, ale mají na konci dřívku umístěné mikro tenzometry snímající kontaktní sílu ve třech směrech. Tyto tři signály jsou následně v elektronice senzoru vektorově



Obr. 3-10 Aktivní sensorika [20]

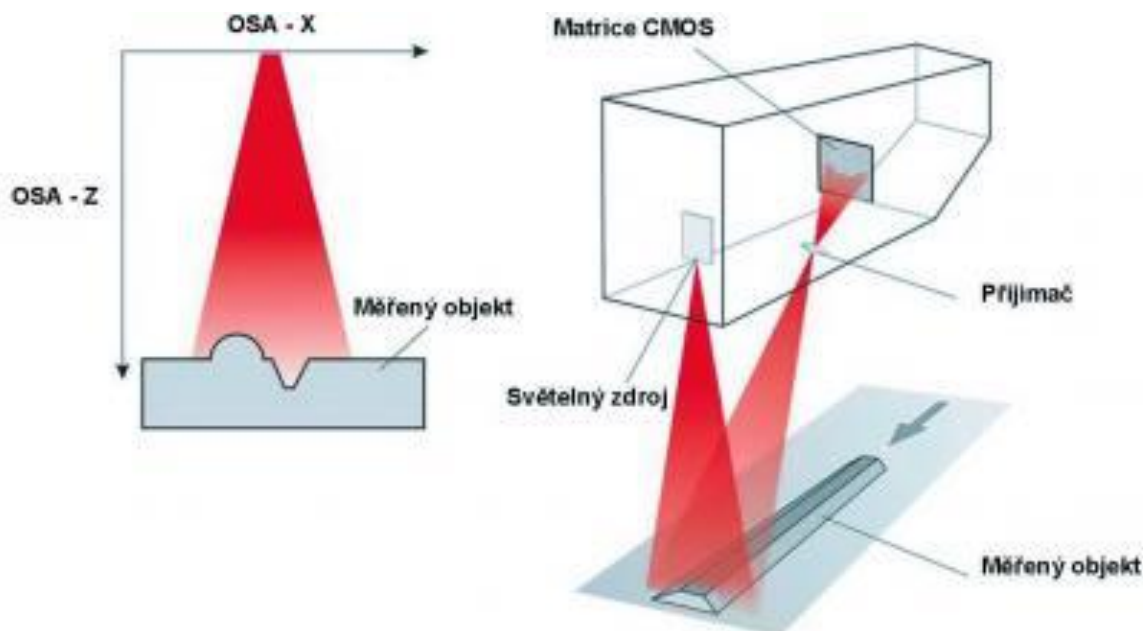


Obr. 3-9 Pasivní sensorika [20]

skládány, a pokud dojde k překročení hraniční velikosti síly, senzor vyšle signál k zaznamenání polohy. Aktivní senzory reagují při mnohem menším kontaktním tlaku než pasivní senzory, díky čemuž dochází k menšímu namáhání dřívku senzoru. Taktéž, díky měření sil ve všech třech směrech najednou, mají ve všech směrech stejné spouštěcí síly a dokáží lépe a přesněji pracovat s měřením úhlů či tvarových ploch. [20]

### 3.1.6 Laser scanner

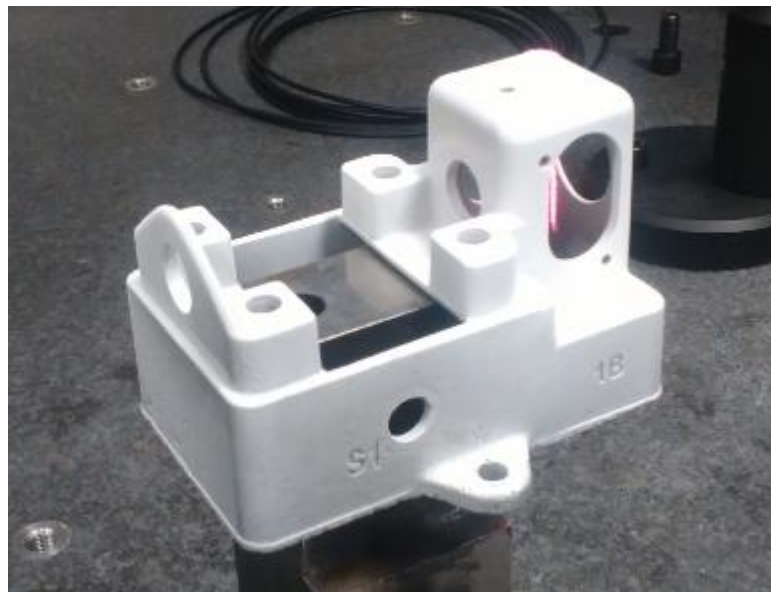
Mezi bezkontaktní snímače lze zařadit laser scanner, který je možné namontovat jak na klasický souřadnicový stroj, tak na i měřicí rameno. Pomocí tohoto snímače můžeme zachytit tvar, povrch a další informace o trojrozměrném tělese. Původně byla tato technologie vyvinuta pro použití v automobilové výrobě, ale dnes dochází k jejímu širšímu rozmachu do širokého spektra oblastí. Tento rozmach byl způsoben vznikem moderních měřících laser scannerů, které pracují s relativně přiměřenou přesností, velkou rychlostí skenování a s malými náklady. Skenovat lze v rozsahu od několika mikrometrů až po desítky metrů u průmyslových skenerů. Laser scannery pracují pomocí triangulační metody získání bodu. Ze zdroje záření je vyslán laserový paprsek, který je rozprostřen do linie promítnuté na měřené těleso. Tato linie, zdeformovaná podle měřeného tělesa, se odráží do objektivu, a následně je v detektoru zpracována. Jelikož tato metoda pracuje s celou linií bodů, je měření mnohem rychlejší a ve stejném okamžiku měří několik bodů najednou. Například výrobce senzoru Werth LLP udává rychlost 250 linií za sekundu, délka linie 15 mm a až 1024 bodů v linii. Udávaná maximální chyba činí 0,025 mm. Tento senzor pracuje s laserovou linií o vlnové délce 655 nm a o výkonu 15 mW. [22] [23]



Obr. 3-11 Princip měření laser scannerem [23]



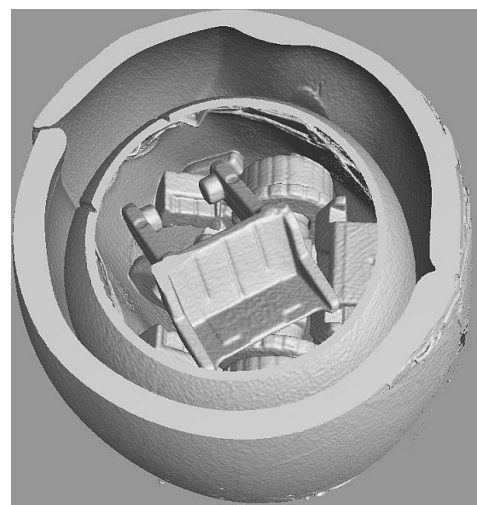
Jelikož metoda pracuje s odrazem světla, některé povrchy mohou být špatně skenovatelné. Pokud je měřený objekt příliš lesklý, dochází k různým odrazům světla a vznikají chybové body měření (šum). Totéž platí pro přechod dvou různých materiálů, neboť každý z nich má jiné odrazové vlastnosti. Skleněné součásti nelze měřit bez úpravy, neboť sklo paprsek pouze zalomí, ale neodrazí. Pro zlepšení vlastností měřených povrchů se používá křídový prášek, kterým se povrch tělesa popráší. Prášek je bílé barvy, která je vhodná k odražení paprsků. Nevýhodou tohoto postupu je drobné vnesení chyby do měření, neboť i vrstva prášku přidá řádově několik mikrometrů navíc.[11] [22]



*Obr. 3-12 Křížový přepínač po nanesení křídového prášku*

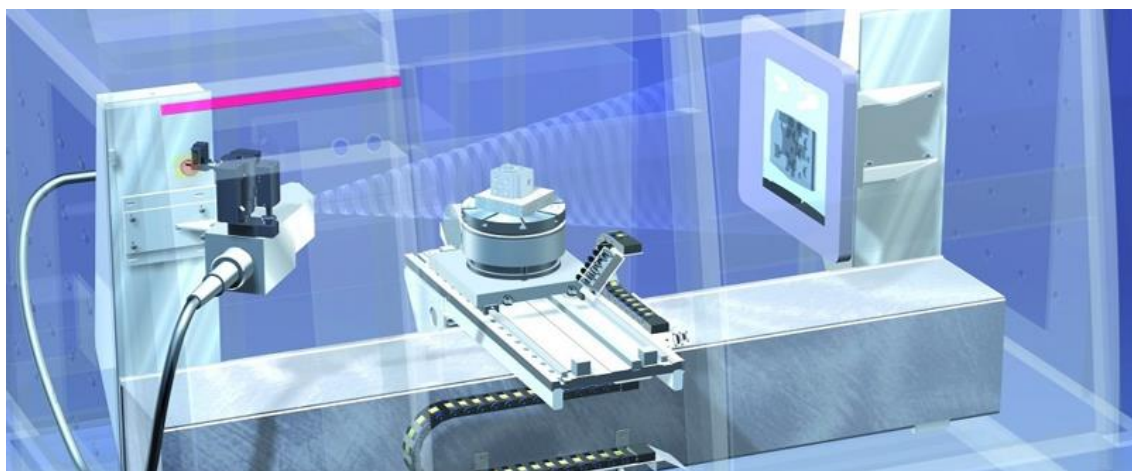
### 3.2 Počítačová tomografie

Počítačová tomografie (označení CT z anglického názvu Computed tomography) se řadí mezi nedestruktivní zkoušky materiálu (NDT). Tato technologie byla původně určena pro lékařské účely, avšak její využití ve strojní praxi je dnes oblíbené a praktické. V praxi se zkoumaný objekt umístí na otočný talíř ležící mezi zdroj záření a snímací zařízení. Otočný talíř se postupně otáčí a snímací zařízení si vytváří snímky objektu, ze kterých následně pomocí počítače vytvoří model zkoumané součásti. Výhodou této metody je, že téměř nezáleží na složitosti dané součásti, pouze je



*Obr. 3-13 Model Kinder Surprise získaný z tomografu [24]*

limitující šířka materiálu v určitém směru, neboť paprsky dokáží prozářit jen do určité hloubky. Na získaném modelu pak lze pozorovat nejen vnější tvary objektu, ale díky této metodě lze odhalit i vnitřní vady výrobku. Například u odlitků lze odhalit vzduchové bubliny, trhliny či různě vměstky. Počítačové tomografy dokáží pracovat s přesností 0,025-0,25 mm. Použití tomografů je silně omezeno velikostí součásti, neboť její skenování zabere mnoho času a je také velmi energeticky náročné. Mezi další nevýhody této technologie patří vysoká pořizovací cena zařízení, omezenost jen na laboratorní použití a složitá obsluha zařízení. [21]



Obr. 3-14 Princip měření tomografu[28]

### 3.3 Porovnání metod

V následující tabulce jsem vypsál hlavní faktory ovlivňující rozhodování mezi jednotlivými technologiemi.

	Výhody	Nevýhody
SMS	Vysoká přesnost Automatizace	Vysoká cena Rychlost měření
Měřící rameno	Nižší cena Rychlost měření	Menší přesnost Složitě měření vnitřních č.
Počítačová tomografie	Komplexní kontrola Odhalí nedostatky	Vysoká cena Limitace tloušťkou stěny

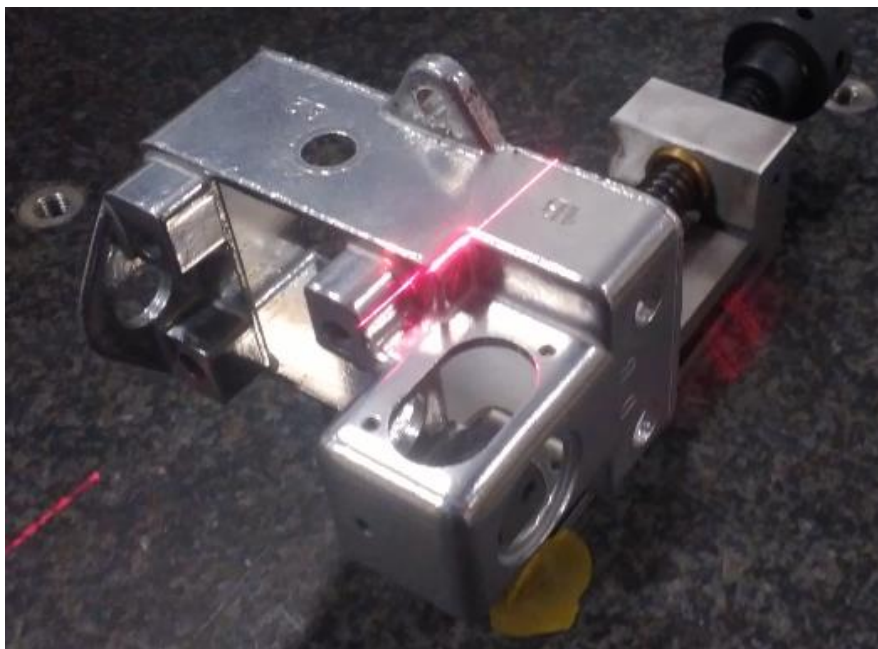
Každá metoda je vhodná na jinou oblast použití a nelze jednoznačně říci, která z nich je nejlepší. Technologie je nutné volit s ohledem na danou součást a následné možnosti zpracování.

### 3.4 Měření dat

Měření dat za účelem demonstrace technologií jsem provedl dvojího typu. Obě měření využívala laser scanneru a lišila se pouze v použitém souřadnicovém měřicím stroji. První měření proběhlo pomocí měřicího ramena, druhé měření proběhlo na SMS. S ohledem na složitost měření na SMS nebyla získána kompletní data, a tudíž byly použity k následujícímu zpracování data z měřicího ramena.

#### 3.4.1 Nikon MCAX – Model Maker MMDx100

Křížový přepínač byl nejprve měřen pomocí měřicího ramena MCAX od firmy Nikon. Toto rameno je osazeno ručním laser scannerem ModelMaker MMDx100. Tento scanner pracuje s 100 mm liniemi obsahujícími až 1000 bodů za sekundu. V kombinaci s ramenem je udávána přesnost 0,054 mm. Zaměřování pro nastavení ideálního sklonu paprsku vůči měřenému tělesu je realizováno tečkou, která se má blížit bodové linii. Před začátkem měření je nutné provést kalibraci ramene, aby nedošlo k vnášení chyb měření. Kalibrace se u ramene provádí protočením všech kloubů kolem jejich osy. Jelikož je těleso tvarově složité a nebylo by možné jej změřit na jedno uchycení, bylo nutné jej umístit nejdříve na jeden bok součásti, na kterém bylo provedeno první naskenování.



*Obr. 3-15 Měření pomocí laser scanneru na rameni*

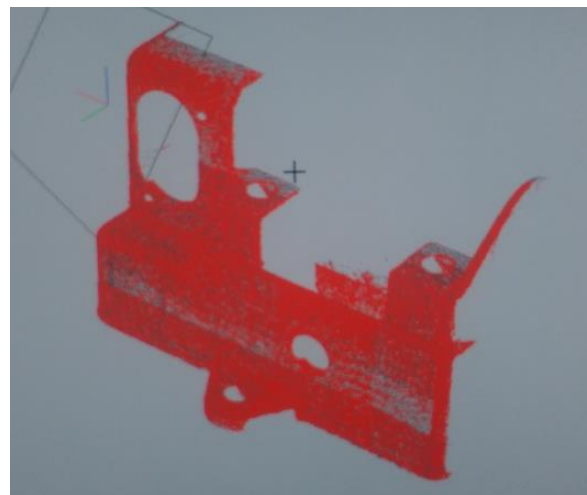
Laser scanner se natočí nad měřenou plochu tak, aby se překrývala zaměřovací tečka s linií, sepne se spoušť a těleso se přejede optimální rychlostí. Při příliš velké rychlosti by skenování bylo nedostatečné, přílišně pomalé skenování přináší spoustu nepotřebných dat zpomalujících výpočtový software. Po naměření dostatečného počtu bodů bylo těleso přesunuto, otočeno na druhý bok a vytvořen další mrak bodů. Těleso je nutné v měřicím prostoru posunout, aby nedocházelo k promíchání dat dohromady z obou měření. Takovéto výsledky by bylo obtížné či nemožné vypracovat. Výsledný mrak bodů je na Obr. 3-19. [35]

### 3.4.2 Zeiss Accura - Linescan

Jak již bylo uvedeno, druhé měření proběhlo na mostovém souřadnicovém měřicím stroji Zeiss Accura s laserovým scannerem Zeiss LineScan. Tento scanner pracuje s 1280 body v liniích o délkách 25, 50 nebo 100 mm. Měření na SMS s laser scannerem je značně zdlouhavé oproti ramenu, neboť je nutné provést kalibraci pro všechny směry měření, které chceme vykonat. Pro kalibraci je nutné nasadit kalibrační senzor, provést detekci kalibrační koule, osadit stroj scannerem a zaměřit kalibrační kouli v daném směru měření. Po kalibrování přístroje je již možné měřit. Stroji je nutné nastavit měřicí dráhu a rozsah měření, které následně již vykonává sám. Přesnost měření pomocí SMS je mnohem lepší než s ramenem, avšak u aplikací jako je tato, není žádaná tak vysoká přesnost a jeví se výhodnější použít měřicí rameno. [36]



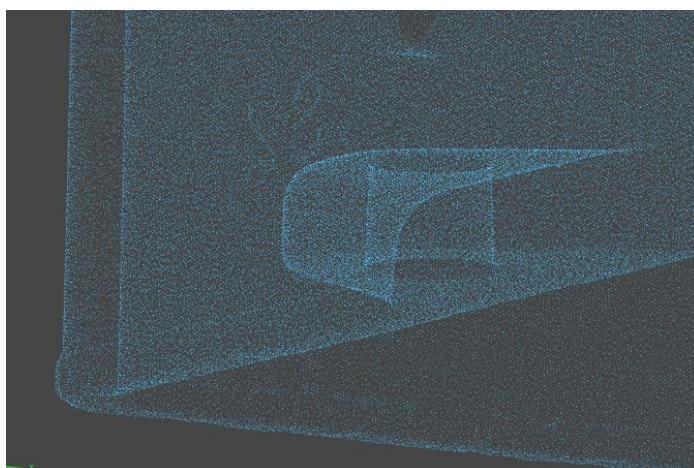
Obr. 3-16 Měření na mostovém SMS



Obr. 3-17 Průběh měření

### 3.5 Mrak bodů

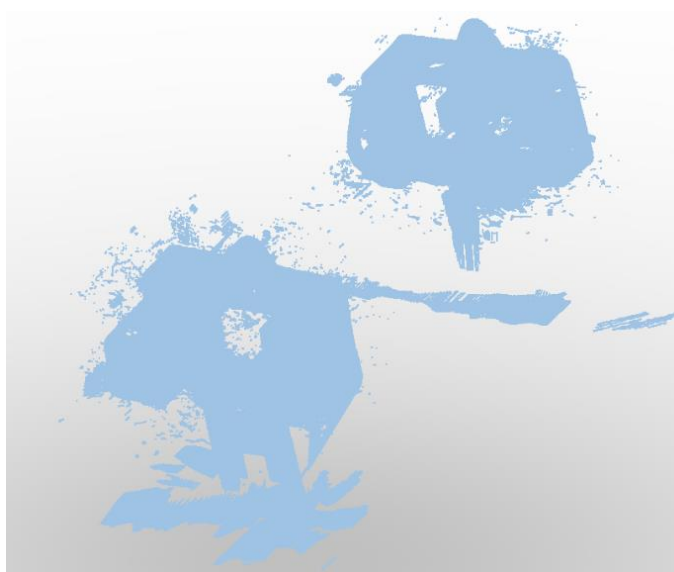
Mrak bodů vzniká skenováním povrchu těles. Jednotlivé body představují změřené body tělesa. V případě kontaktního měření se jedná o místa doteku sondy a objektu. U měření pomocí laser scanneru to jsou body odražené pomocí laserové linie. Tyto body dohromady tvoří obálku daného předmětu.



*Obr. 3-18 Detail mraku bodů*

#### 3.5.1 Získaná data

Na obrázku 3-18 jsou zobrazeny dva mraky bodů, které vznikly měřením křížového přepínače ze dvou směrů. Jak je na obrázku patrné, při měření vzniklo mnoho chybových bodů, které způsobil přílišný lesk tělesa a nezkušenost s měřením.

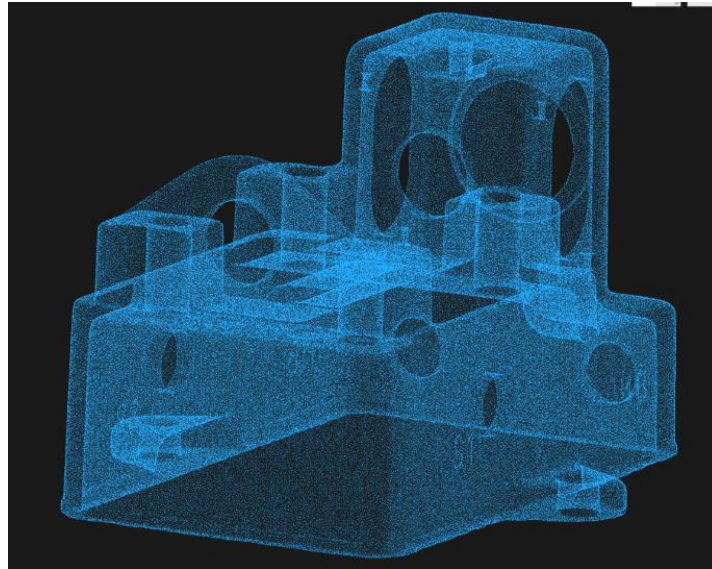


*Obr. 3-19 Naměřené mraky bodů*

#### 3.5.2 Úprava dat

Naměřená data je nutné nejdříve oprostít o chybové body, aby se s daty lépe pracovalo a následně je spojit do jednoho mraku bodů tvořícího model součásti. Odstraňování chybových bodů probíhá pomocí ručního výběru a odstranění. Jedná se o zdlouhavou práci, kterou je třeba vykonávat zodpovědně, aby nedošlo k odstranění důležitých dat.

Pro správné spojení mraků, je nutné, aby oba obsahovaly společné tvarové části a plochy. Díky těmto společným plochám se postupně oba mraky bodů spojí a vyrovnají se ve všech šesti stupních volnosti (tři směrové a tři rotační pohyby). Poslední důležitá úprava mraku bodů je odfiltrování přebytečných bodů, které by zbytečně zatěžovaly výpočtový software. Výsledný mrak bodů je vidět na obr. 3-19.



Obr. 3-20 Získaný mrak bodů

### 3.5.3 Tvorba ploch

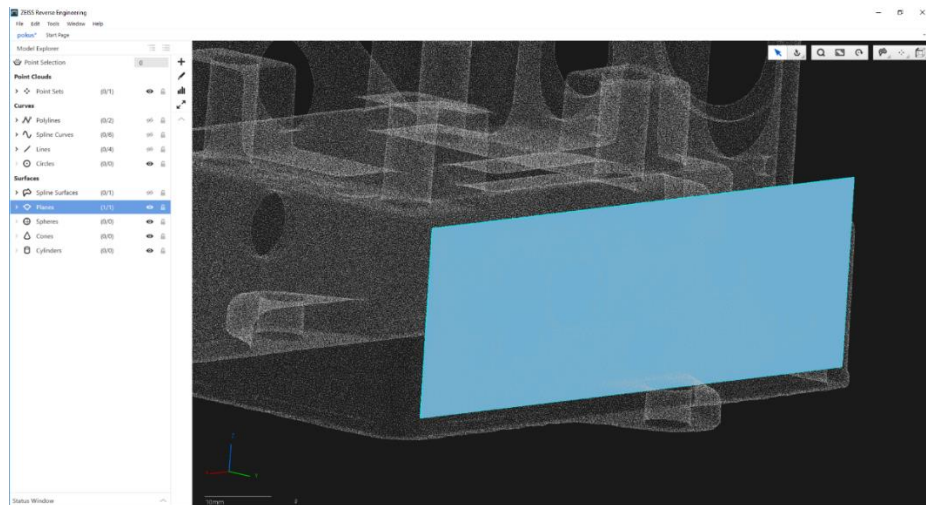
Ze získaného mraku bodů jsem vytvářel 3D model pomocí programu ZEISS Reverse engineering. Tento program, stejně jako většina CAD systémů, pracuje s tzv. NURBS (Non Uniform Rational B-Splines) křivkami a plochami, které jsou vhodné pro jejich dobré modulační schopnosti. NURBS křivka je určena řídicími body, jejich vahou, stupněm a vektorem jejich parametrizace. Pomocí těchto parametrů lze určit vztah pro NURBS křivku, který je zapisován ve tvaru:

$$Q(t) = \frac{\sum_{i=0}^n w_i P_i N_{i,p}(t)}{\sum_{i=0}^n w_i N_{i,p}(t)}$$

Kde  $w_i$  je váha  $i$ -tého bodu řídicího polygonu a  $N_{i,p}(t)$  jsou normalizované B-spline báze funkce. [25]

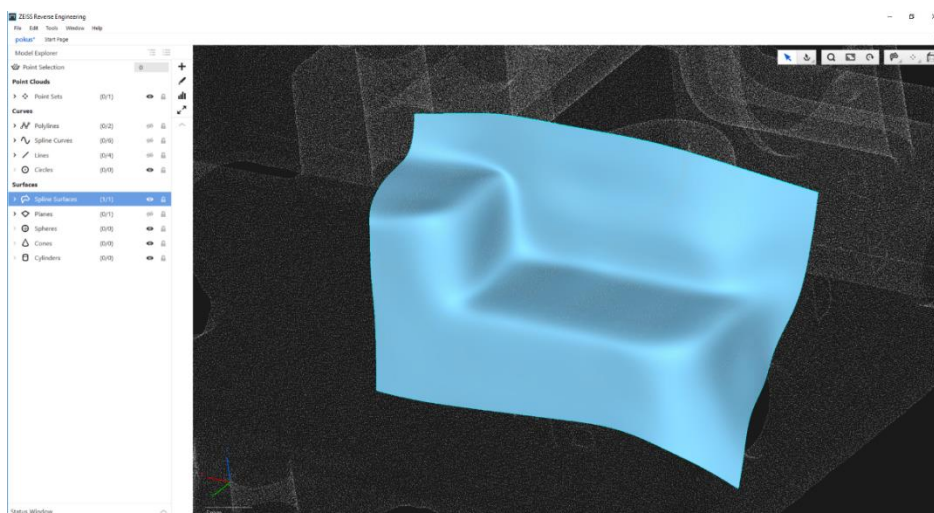
Při práci s těmito křivkami vznikají povrchy s různou návazností. Poziční návaznost (G0) se označuje spojení, kde jsou pozice spojovaných povrchů náhodné a jejich přechod vypadá jako skok. U tangenciální návaznosti (G1) koncové vektory křivek ovládají společnou ostrou hranu. Přechod poté působí mnohem přirozeněji a je spojitý. Křivková

návaznost (G2) požaduje stejnou délku a rychlost její změny u koncových vektorů. Takto spojené plochy tvoří dohromady jednu hladkou plochu a přechod není viditelný. [25]



Obr. 3-21 Rovinná plocha proložená body na stěně

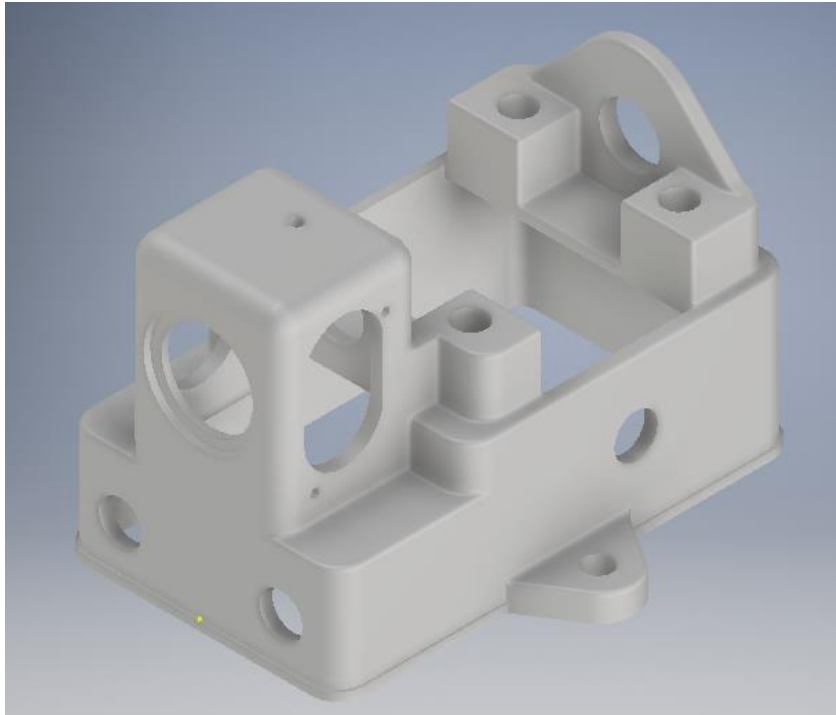
Pro získání modelu na základě mraku bodů, je nutno mrak postupně prokládat pomocí známých geometrií (jako jsou roviny, válce aj.) nebo již zmíněné obecné plochy. Rovinné plochy se používají například pro boční plochy, válcové geometrie jsou vhodné pro opis děr. Pro složitější tvary, jako jsou například složité přechody, se využívá obecných ploch. Při vytváření obecných ploch je nutné správně vybírat body, aby docházelo ke korektnímu vykreslování ploch. Při napojování ploch vznikají přechodové prvky, které je nutné ořezat. U této práce je třeba postupovat pečlivě, a proto se jedná o časově náročnou záležitost. Finální model byl vyexportován do formátu .STEP, aby bylo možné model dále upravit v CAD softwaru.



Obr. 3-22 Proložená obecná plocha

### 3.5.4 3D model

Model získaný z předchozího kroku je třeba ještě upravit, neboť není tvořen objemovým tělesem, ale pouze hraničními plochami. Vnitřní prostor lze vyplňovat ručně, nebo automaticky pomocí softwaru umístěného v CAD programech. Některé softwary nabízejí možnost vyplnění rovnou při importu tělesa. Na obr. 3-22 je zobrazen výsledný získaný model tělesa křížového přepínače.



*Obr. 3-23 Model křížového přepínače*



## 4 Optimalizace modelu pro tisk

Získaný model je nutné konstrukčně optimalizovat pro následnou realizaci pomocí 3D tiskárny. Všechny tyto změny mají za úkol snížit cenu výrobku, snadnou realizovatelnost tisku a spotřebu materiálu při zachování stejných vlastností. Taktéž je nutné brát v úvahu, že vytisknutý výrobek bude mít jiné materiálové vlastnosti než původní odlitek.

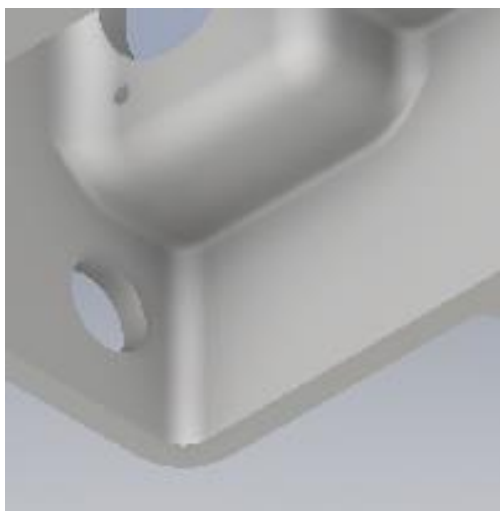
### 4.1 Konstrukční změny modelu

Konstrukční změny, které je nutné provést, jsou dvojího typu. První vycházejí z principů použité technologie výroby, tedy 3D tisku. Druhé řeší možné konstrukční úpravy výrobku s ohledem na smontovanou sestavu a možné sjednocení některých dílů do společného celku.

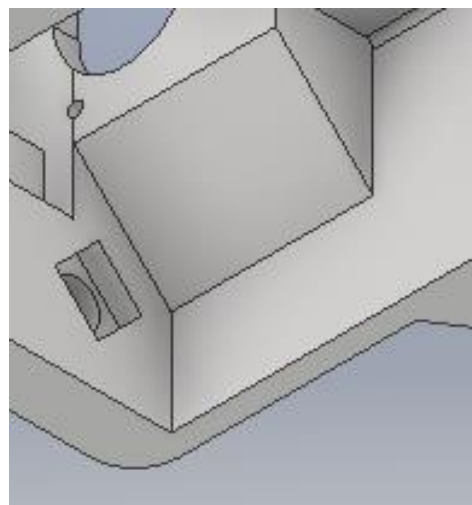
#### 4.1.1 Technologické hledisko

S ohledem na výrobu pomocí 3D tisku, je nutné dodržet určité požadavky na tisknutý model. Nedodržení těchto požadavků vede v lepším případě k větším finančním nárokům na tisk, v horším případě k deformacím či úplnému zborcení tělesa. [26]

3D tisk je realizován virtuálním rozřezáním tělesa na slabé plátky, které jsou poté vrstva po vrstvě na sebe nanášeny. Z tohoto plyne, že nelze bez podpor tisknout vodorovné plochy, které neleží na pracovní ploše. Pro minimalizaci podpor je třeba dodržovat pravidlo 45°. Zkosení do tohoto úhlu je vytisknutelné bez podpor a značně šetří čas tisku i materiál. V místech, kde to bylo konstrukčně dovoleno, byly hrany zkoseny. Bohužel tak nemohlo být učiněno všude.



Obr. 4-1 Původní detail tělesa



Obr. 4-2 Upravený detail tělesa

Další podmínka limitující tisk je minimální tloušťka stěny, která se však netýká tohoto případu, neboť těleso má sílu stěny téměř všude 3 mm. Taktéž nehrozí zhroucení modelu vahou některých částí, protože celek tvoří kompaktní tuhé těleso. [26]

Poslední podmínka, a u nekrytých tiskáren velmi důležitá, je udržování optimální a konstantní teploty v místnosti kde se tiskne, neboť by mohlo dojít k deformaci tělesa a bylo by nutné tisknout znovu. Pro jistější a kvalitnější tisk jsou vhodnější uzavřené tiskárny, které jsou vytápěné a udržují potřebnou teplotu pro tisk.



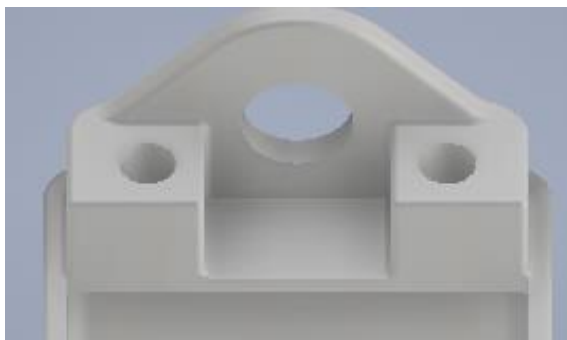
*Obr. 4-3 Deformace tisknuté součásti [27]*

Všechny podmínky zvyšující šance na správný výtisk výrobku je vhodné dodržovat nejen z důvodu ekonomických, ale také i z hlediska ekologických. Protože pokud se něco nepovede, zbyde z toho pouze neúčinná hromádka plastového odpadu. Naštěstí se pomalu rozbíhají možnosti jak určitý plastový odpad recyklovat a tisknout znovu. [27]

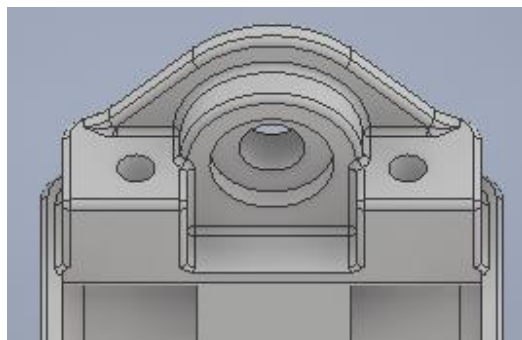
#### 4.1.2 Konstrukční hledisko

Jelikož je křížový přepínač zařízení pracující s elektrickým proudem a má těleso vyrobené z vodivého hliníku, je u originálního dílu použito spoustu izolačních pertinaxových dílců. Z tohoto důvodu bylo provedeno několik konstrukčních opatření. Na osmi otvorech, kterými prochází silové kontakty, byl zmenšen průměr, aby nebylo nutné použít izolační

podložky. Taktéž byly zmenšeny vodící otvory táhla spínače, neboť i zde byly použity izolační dílce.



*Obr. 4-4 Původní uspořádání stěny*



*Obr. 4-5 Přepracované uspořádání stěny*

Vhodné je nepohlížet na výrobek jen jako na holé těleso, ale i jako na kompletní sestavu. Sestava obsahuje opěrné mističky pro vratná péra táhla, které jsem se rozhodl integrovat do modelu tělesa. Tato úprava slouží i k vyztužení opěrných stěn, které by mohli v původní šířce praskat. Pomocí těchto úprav dojde sice k nepatrnému zvýšení časové i finanční náročnosti tisku, ale dojde ke značné úspoře díky nepotřebě vyrábět izolační a redukční vložky.

## 5 3D tisk

3D tisk se řadí mezi aditivní technologie, tedy dochází k přidávání materiálu na rozdíl od většiny klasických výrobních technologií. Ač se to nezdá, 3D tisk není výmysl moderní doby. S jeho principy se pracuje již od konce 80. let minulého století. V poslední době lze zaznamenat značný nárůst využití tohoto odvětví, který je způsoben postupným vývojem a snižováním nákladů. Mezi hlavní výhody patří možnost výroby složitých součástí, které by se klasickými nástroji vyráběli velmi složitě. Naproti tomu je problém v cenách tisku a různých pevnostních vlastnostech v různých směrech součástí. [29]

Celý princip tisku je založen na postupném skládání vrstev materiálu na sebe, aby ve finále vytvořili potřebné těleso. Nejprve je tedy model tělesa počítačově rozřezán na jednotlivé vrstvy, které jsou pomocí rozličných technologií vrstveny na sebe. Tisk je možné provádět několika možnými způsoby, danými možnostmi tiskárny a použitým materiálem. Dá se tisknout nejen z plastu, ale běžně se tiskne i z kovů a je možné tisknout i třeba z čokolády či písku. [29]

Díky nižším cenám tiskáren i materiálu se 3D tisk rozšiřuje postupně i do domácností, neboť patří k oblíbeným koníčkům a při slušné kvalitě tisku si lze i přivydělat. Využití 3D tisku je však do značné míry omezeno cenou tisku a materiálu, a tak je dnes nejrozšířenější prototypová výroba z plastů. Technologie tisku se však neustále vyvíjejí a tak snad se v brzké době dočkáme levného tisku kovových součástí v přijatelné kvalitě. [29]



*Obr. 5-1 Princip vrstvení tělesa [29]*

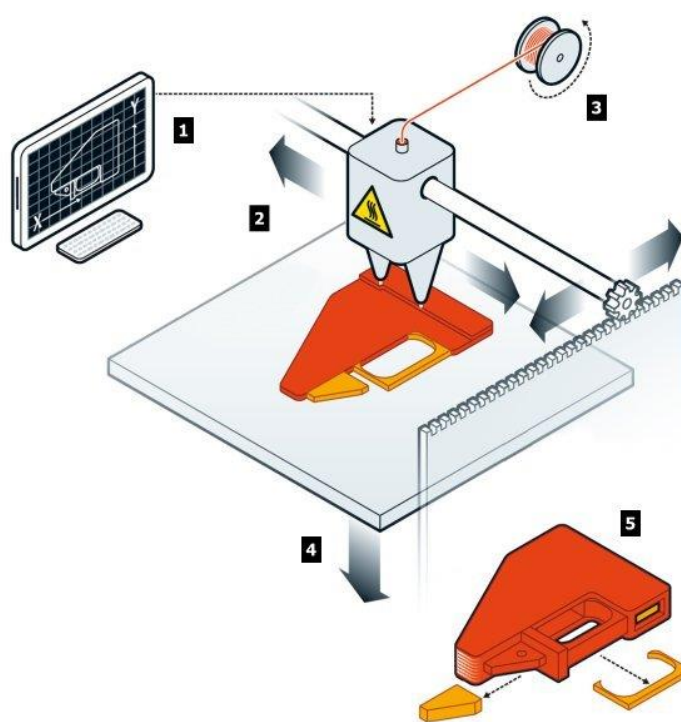
## 5.1 Technologie tisku

Jak již bylo zmíněno, tisk je možné provádět pomocí několika různých technologií. Každá z nich má svá specifika a je vhodná k jinému použití. Všechny technologie však mají některé věci společné. Například nezáleží na orientaci tělesa v prostoru tiskárny, pouze se bude měnit množství podpor použitých pro tisk, jak již bylo uvedeno v kapitole 4.1. Pro tisk je používán většinou formát souborů STL, který je kompatibilní s téměř všemi tiskárnami. [29]

### 5.1.1 FDM

FDM (Fused Deposition Modeling) patří mezi nejrozšířenější technologii. V posledních letech došlo nejen v ČR ke značnému rozšíření této technologie díky firmám jako Průša, které tento systém využívají. Díky tomuto rozšíření patří tento tisk mezi levnější varianty. Jedná se o postupné nanášení vrstev termoplastu na plochu tiskárny. Termoplast je dodáván namotaný na cívkách, odkud se odmotává do tiskových hlav, kde je taven a nanášen. Dražší tiskárny používají různé materiály pro výrobek a pro podpory, kvůli snadnějšímu odstranění bez poškození výrobku. [30]

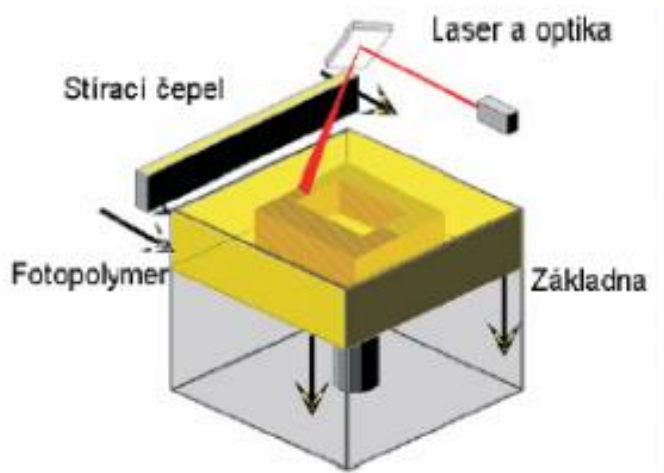
Postup tisku pomocí FDM lze vidět na obr 5-2. Nejprve software tiskárny zpracuje 3D data obsažená v STL souboru. Následně dochází k postupnému nanášení vrstev materiálu. Po dokončení tisku je třeba odstranit podpůrné části. Nejčastěji se odstraňují mechanicky, avšak dají se vytisknout i z materiálu, který lze rozpustit. Výsledný výrobek je poměrně odolný vůči různým negativním vlivům, jako je teplota, UV záření a další. [30]



Obr. 5-2 Princip technologie FDM [30]

### 5.1.2 SLA

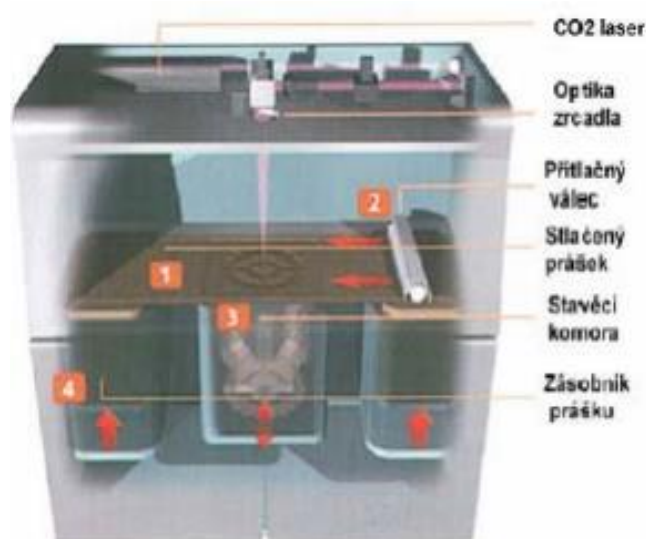
SLA (Stereolithography) je nejpřesnější metoda a jedná se o nejstarší metodu 3D tisku. Základní materiál pro tvorbu výrobků je tekutý polymer. Pomocí UV laseru se vykresluje vrstva na hladinu polymeru, a jakmile je hotova, dojde k jejímu ořezu pomocí čepele pro zarovnání výšky vrstvy. Následně se výrobek posune o šířku vrstvy pod hladinu a tiskne se další vrstva. Výsledný výrobek je třeba vložit do UV komory, kde se doladí požadovaná tvrdost a povrch. Technologie má širší použití hlavně v automobilovém průmyslu. [31]



Obr. 5-3 Princip metody SLA [31]

### 5.1.3 SLS

SLS (Selective Laser Sintering) metoda používající práškové materiály z plastu, kovů, písku či keramiky. V praxi se nejčastěji používá k výrobě složitých součástí (například forem), které by se klasickými způsoby vyráběly velmi složitě. Na pracovní desku



Obr. 5-4 Princip metody SLS [31]

tiskárny je nanесena vrstva prášku, ve které se pomocí laseru natavuje požadovaná vrstva výrobku. Následně je nanесena další vrstva prášku a vytvrzena vrstva výrobku. Díky nanášenému prášku není potřeba u této technologie používat systém podpor, avšak nelze vyrábět uzavřené dutiny a jedná se o velmi energeticky náročnou metodu s malou přesností výsledného povrchu. [31]

## 5.2 Tiskárna

Trh s 3D tiskárnami disponuje rozmanitou škálou produktů. Nejjednodušší tiskárny se dají pořídit v řádu pár tisíců korun, ale tyto tiskárny jsou spíše jako hobby nářadí pro domácí použití a nelze od nich očekávat nejlepší výrobky. Také pro tiskárny platí, jako u každého výrobního přístroje, že je nutné si uvědomit, v jaké kvalitě výrobky potřebujeme, jak často budeme tisknout a hlavně jaký na to máme rozpočet, neboť cena nejčastěji ovlivňuje volbu strojů.

K vytištění modelu křížového přepínače byla použita 3D tiskárna od firmy STRATASYS typově označenou F370. Jedná se o velmi jednoduše obsluhovatelnou tiskárnu, která je schopna tisknout ze čtyř typů materiálu (ABS-M30, ASA, PLA, PC-ABS) v deseti různých barvách, a také používá dva rozličné materiály pro tisk podpor. Tiskárna má vytápěnou komoru, což podporuje výslednou kvalitu tisku. Maximální velikost tištěného modelu je 355x254x355 mm. Používá software GrabCAD, který běží na bázi SolidWorksu a je kompatibilní s běžným pracovním prostředím Windows 7 a vyšší. [32]



Obr. 5-5 Stratasys F370 [32]

## 5.3 Materiály

Škála materiálu používaná pro 3D tisk je poměrně široká. Díky rozšířeným tiskárnám používajícím technologii FDM jsou nejrozšířenější termoplasty ABS, ASA, PLA a další. Tiskárny pracující s technologiemi SLA používají fotopolymery vznikající vytvrzením kapalných pryskyřic. Pro technologii SLS se používají materiály ve formě kovových prášků. Mezi základní patří nerezová ocel, slitina bronz-nikl, titan nebo kobalt-chrom. [31] [33]

### 5.3.1 ABS

Materiál ABS (Akrylonitrilbutadienstyren) je dnes asi nejrozšířenější tisknoucí materiál v několika dostupných modifikacích s poměrně nízkou pořizovací cenou. Jedná se o průmyslový termoplastický kopolymer, který je tuhý, houževnatý a odolný proti teplotám. Při tisku je nutné dodržovat konstantní teplotu prostředí a udržovat předehřátou podložku, aby nedošlo k deformaci během tisku. ABS se tiskne při teplotách 220-240 °C a finální výrobek je teplotně odolný zhruba do 100 °C, kdy začíná měknout. [33] [34]



*Obr. 5-6 ABS vlákna pro tisk [34]*

### 5.3.2 ASA

ASA (Akrylonitril Styren Akryl) je vlastnostmi velmi podobný ABS, oproti kterému disponuje větší mechanickou pevností a je tedy vhodnější pro větší zatížení. Výsledný výrobek má lesklý povrch a je vhodný pro tisknutí drobných detailů. Opět je vhodné tisknout na předehřívané podložce za konstantní teploty okolí. Taktéž je velmi odolný vůči povětrnostním vlivům a UV záření, díky čemuž je velmi rozměrově stabilní a vzhled zůstává dlouho nezměněný. [33]

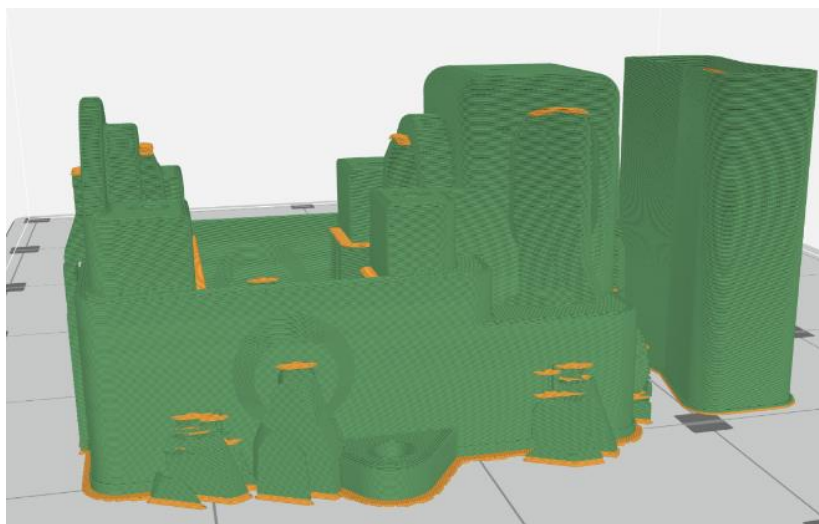
### 5.3.3 PLA

PLA (polylactic acid) je plně biologicky odbouratelný materiál, který se vyrábí z bramborového či kukuřičného škrobu. Jeho průmyslové využití je v oblasti prototypů, neboť díky jeho odbouratelnosti nevzniká plastový odpad. Taktéž se využívá jako podpůrný materiál při tisku jiných materiálů, jelikož se pak podpory jednoduše rozpustí v roztoku. Jedná se o pružný a odolný materiál, který však pohlcuje okolní vlhkost a je nutné na to dbát při jeho skladování či aplikaci. Oproti ABS je méně tepelně odolný a hůře se u něj odstraňují podpory. [33]



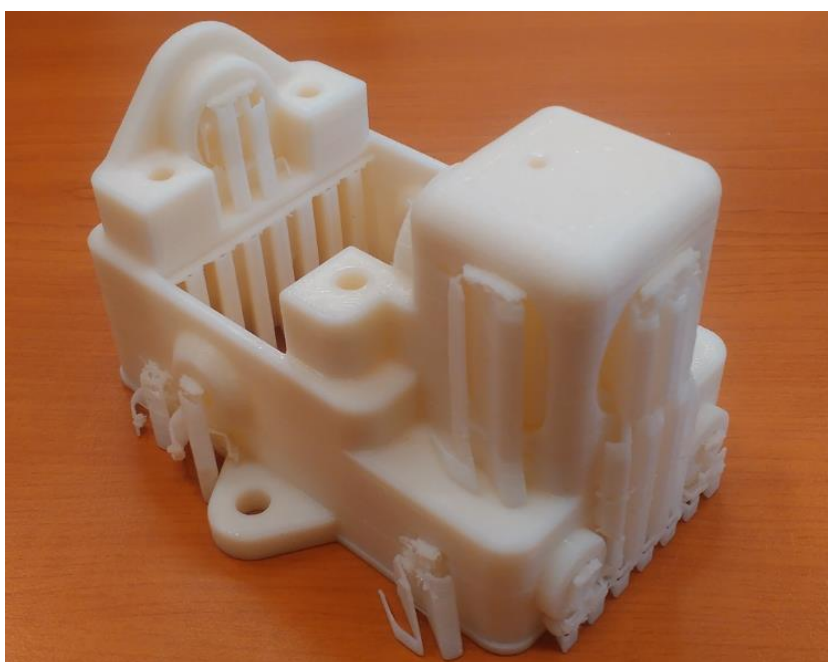
#### 5.4 Tisk modelu

Před tiskem samotným je nutné nastavit několik parametrů a vybrat rozvrhnutí podpor. Mezi podpory a těleso je použit materiál QSR pro jejich snadné odstranění. Tento materiál je na Obr. 5-7 znázorněn oranžovou barvou, zatímco těleso bylo vytisknuto z termoplastu ABS znázorněného zelenou barvou. Pro tisk této součásti bylo spotřebováno zhruba 120 g ABS plastu a 18g podpůrného materiálu QSR.



*Obr. 5-7 Náhled v softwaru tiskárny*

Tisk součásti 7 zabral téměř osm hodin. Tisk tělesa se povedl, nevznikly žádné deformace nebo hrubší nedostatky, pro které by bylo nutné tisk opakovat.



*Obr. 5-8 Vytisknutý model tělesa*

## 6 Ověření

Pro dokončení procesu reverzního inženýrství bylo nutné provést alespoň částečné srovnání s původním tělesem křížového přepínače. Částečně z toho důvodu, že byl model konstrukčně upraven a není tedy úplně shodný s originálním dílem. Před samotným porovnáním bylo ještě třeba odstranit podpory. Ty byly sice vytisknuty z odbouratelného materiálu, avšak jejich mechanické odstranění šlo velmi rychle, takže nebylo nutné těleso máčet v roztoku. Jediné místo, které bylo potřeba propilovat, byly otvory, kterými vede vodící táhlo. Taktéž byly díry pro vruty vzhledem k velikosti vrutů držících kontakty pro zapalování. Stav tělesa po odstranění podpor je viditelný na obr 6-1.

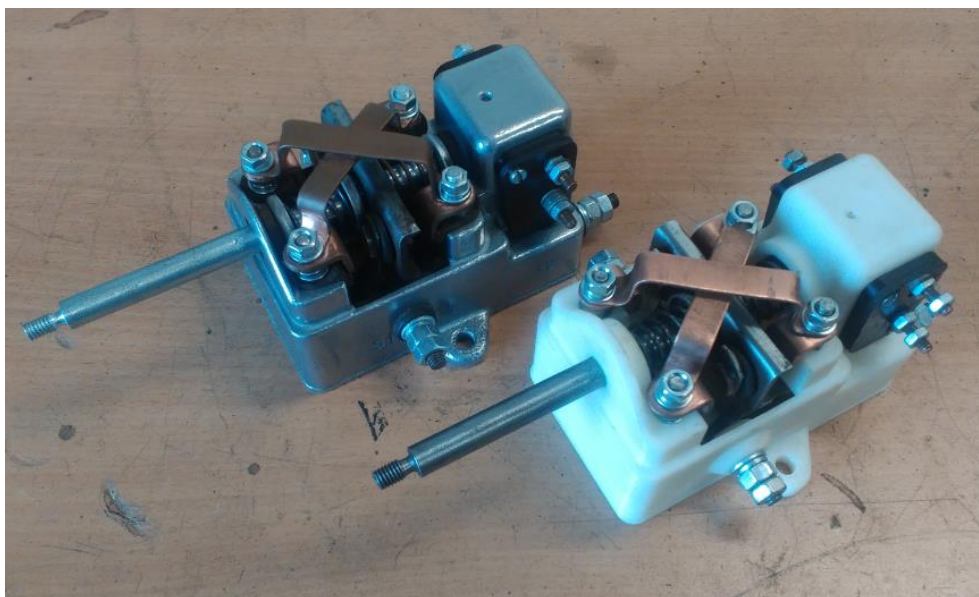


*Obr. 6-1 Dokončené těleso přepínače*

Takto dokončené těleso je připravené pro osazení dalšími součástmi.

### 6.1 Porovnání

Pro finální porovnání kopie s originálem byla obě tělesa osazena součástkami, abych zároveň proběhlo ověření smontovatelnosti a funkčnosti výrobku. Pro osazení plastového tělesa jsem použil díly z jiného přepínače. Kopie křížového přepínače šla smontovat bez obtíží a přepínání funguje. Vzhledem k upravené konstrukci jsem oproti původnímu dílu nepotřeboval 23 drobných, převážně izolačních, součástek což by v celkové výrobě přepínače znamenalo značnou úsporu.



Obr. 6-2 Originál a kopie křížového přepínače

## 6.2 Návrh změn

Závěrečné smontování a ověření funkčnosti neodhalilo žádné veliké konstrukční nedostatky. Pouze je třeba zvětšit otvory pro vodící táhlo a vruty držící zapalovací kontakty. Další úpravy modelu by se již týkaly pouze technologického hlediska 3D tisku. Například bych mohl udělat konstrukční podpěru napříč kruhovými otvory, která by byla postačující, a nebylo by nutné tisknout veliké podpory od spodku součástí. Jako další variantu lze zařadit použití jiného softwaru, kde lze podpory stavět libovolně.

## 6.3 Kalkulace nákladů

Pro správnou kalkulaci výrobních nákladů je třeba zahrnout veškeré činnosti související s výrobou dané součásti. Mezi hlavní náklady patří materiál, software, hardware, práce a energie. Za vedlejší náklady lze považovat údržbu zařízení, odpisy strojů, režijní náklady a další. Tyto všechny náklady lze shrnout do rovnice celkových nákladů, psané ve tvaru:

$$Cost = P + O + M + L$$

kde P představuje odpisy stroje, O provozní náklady, M materiálové náklady a L náklady na obsluhu stroje. Na základě tohoto vzorce byla stanovena přibližná cena tisku křížového přepínače na 800 Kč. Při spotřebě 120 g materiálu a orientační ceně ABS plastu 600 Kč/kg tvoří materiálové náklady 72 Kč. Pokud bychom se rozhodli tisknout těleso z původního materiálu, tedy hliníku, bylo by třeba cca 350 g materiálu. Při ceně okolo 4000 Kč/kg tvoří materiálové náklady 1365 Kč. Výsledný kovový tisk by byl mnohem dražší díky jeho energetické náročnosti. [37]

## Závěr

V této bakalářské práci jsem se zabíral tématem reverzního inženýrství, konkrétněji problematikou získání mraku bodů, jeho zpracování a využití pro reprodukci konkrétní součásti.

V první kapitole jsem nastínil principy a základní informace o reverzním inženýrství. Popsal jsem jeho historický význam a oblasti, ve kterých se dnes využívá. V druhé kapitole jsem popsal reprodukováný objekt. Nastínuji historické souvislosti, důvod jeho kopírování a přípravu pro samotný proces.

Ve třetí kapitole jsem popsal možné principy snímání mraku bodů pomocí několika metod. Následně jsem popsal mé měření pomocí ramene a SMS. Dále jsem popsal, jak jsem na základě naměřených dat vytvořil 3D model měřeného tělesa. Ve čtvrté kapitole jsem řešil proč a jak těleso konstrukčně upravit pro možnosti 3D tisku, aby došlo ke zlevnění výroby kompletní sestavy.

V páté kapitole jsem popsal možnosti 3D tisku, používané materiály a využití. Dále zde uvádím postup tisku tělesa. Tisk byl realizován z ABS plastu pomocí tiskárny Stratasys. Šestá kapitola uzavírá kruh reverzního inženýrství. Porovnal jsem zde výrobek se vzorem tělesa, navrhl drobné konstrukční změny a stanovil výrobní cenu na 800 Kč.

Cílem této bakalářské práce bylo popsat reverzní inženýrství a ověřit jeho využitelnost. Tato bakalářská práce ověřila, že reverzní inženýrství má značné využití v oblasti historických vozidel, neboť je zde vysoká poptávka po kusové výrobě dílů. Základní těleso křížového přepínače se povedlo zreprodukovat a byl vytvořen funkční díl. Díky uvažování o výrobku z pohledu funkčního celku došlo k úspoře 23 kusů drobných dílů. Tato úspora by při výrobě kompletní součásti značně snížila cenu výrobku.

## Zdroje

- [1] BELL, Walter. *Reverse Engineering* [online]. Global Media, 2006 [cit. 2018-07-02]. ISBN 9788189940164. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/cvut/detail.action?docID=3011014>
- [2] Přehled pravěkých období. *Archeologie na dosah* [online]. [cit. 2018-07-02]. Dostupné z: <http://www.archeologienadosah.cz/o-archeologii/chronologie/prehled-pravekych-obdobi-na-nasem-uzemi>
- [3] HOŠŤÁLEK, Petr. Legenda Pérák. *Jihočeské motocyklové muzeum* [online]. 2011 [cit. 2018-07-02]. Dostupné z: [https://motomuseum-hostalek.cz/index.php?grhead=6&nav=01&id\\_group=60&t=art\\_print&id\\_art=486](https://motomuseum-hostalek.cz/index.php?grhead=6&nav=01&id_group=60&t=art_print&id_art=486)
- [4] BMW R61. *BMW club* [online]. 2016 [cit. 2018-07-02]. Dostupné z: [http://www.bmw-club.cz/gallery\\_detail.php?id=3130&ddlb\\_model=176](http://www.bmw-club.cz/gallery_detail.php?id=3130&ddlb_model=176)
- [5] Nejdrzejší čínské kopie. *Autoforum* [online]. 2017 [cit. 2018-07-02]. Dostupné z: <http://www.autoforum.cz/zajimavosti/nejdrzejsi-cinske-kopie-aut-poslednich-let-dal-se-vykrada-vse-od-audi-po-rolls-royce/>
- [6] Star Model BM : A Colt 1911. *Guns* [online]. 2014 [cit. 2018-07-02]. Dostupné z: <https://www.guns.com/review/star-model-bm-a-colt-1911-for-the-cash-strapped/>
- [7] The Achilles heel of IP protection for 3D printing. *3D Printing industry* [online]. 2015 [cit. 2018-07-02]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/3d-scanning-the-achilles-heel-of-ip-protection-for-3d-printing-54302/>
- [8] Malaysia Airlines Flight MH370. *Inquisitr* [online]. 2014 [cit. 2018-07-02]. Dostupné z: <http://www.inquisitr.com/1425895/malaysia-airlines-flight-mh370-hackers/>
- [9] JARONĚ, Tomáš. Konstruktor Jaromír Kábrt a Velorex. *Velorex* [online]. 2011 [cit. 2018-07-02]. Dostupné z: <http://www.velorex.cz/clanek/konstrukter-jaromir-kabrt-a-velorex>
- [10] KÁBRT, Jaromír. *Třípolohový přepínač elektrického spouštěče*. ČSSR. 110026. Uděleno 15.9.1963. Zapsáno 15.2.1964.
- [11] KOPTIŠ, Michal. *Využití snímacího systému laserscanneru pro aplikace reverzního inženýrství*. Praha, 2016. Magisterská práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Beránek Libor Ph.D.
- [12] History and Evolution of CMM. *Hexagon* [online]. [cit. 2018-07-02]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/en-IN/solutions/technical-resources/technical-articles/the-history-and-evolution-of-coordinate-measuring-machine-cmm-controllers>
- [13] Elshennawy, Ahmad K. Weheba, Gamal S.. (2015). *Manufacturing Processes and Materials (5th Edition) - 16.4.2 Contacting Probes*. Society of Manufacturing Engineers (SME). [online]. [cit. 2018-07-02]. Dostupné z

- <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00UOSCP4/manufacturing-processes/contacting-probes>
- [14] Zeiss Accura. *Zeiss* [online]. [cit. 2018-07-03]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/bridge-type-cmms/accura.html>
- [15] Vztažná a souřadnicová soustava. *IF VSB* [online]. [cit. 2018-07-03]. Dostupné z: <http://if.vsb.cz/bf/04.html>
- [16] Campbell, F.C.. (2013). Inspection of Metals - Understanding the Basics - 3.2.1.3 Gantry CMMs. ASM International. [online]. [cit. 2018-07-03]. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00U5NVT7/inspection-metals-understanding/gantry-cmms>
- [17] ZEISS PRO. *Zeiss* [online]. [cit. 2018-07-07]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/merici-stroje-s-horizontalnim-ramenem/pro-and-pro-t.html>
- [18] Nikon MCax 7os. *Topmes* [online]. [cit. 2018-07-07]. Dostupné z: <http://www.topmes.cz/technologie/ramena/merici-ramena-nikon/31-nikon-mcax-7-os>
- [19] Nikon. *Nikon* [online]. [cit. 2018-07-07]. Dostupné z: [https://www.nikon.com/products/industrial-metrology/lineup/3d\\_metrology/portable\\_arms/mcax/](https://www.nikon.com/products/industrial-metrology/lineup/3d_metrology/portable_arms/mcax/)
- [20] Spínací dotekové sondy. *Renishaw* [online]. [cit. 2018-07-08]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/spinaci-dotekove-sondy--6652>
- [21] Fahr, Abbas. (2014). Aeronautical Applications of Non-Destructive Testing - 10.7.3 Capabilities and Limitations. DEStech Publications. [online]. [cit. 2018-07-08]. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011EPSI1/aeronautical-applications/computed-t-capabilities>
- [22] Kutz, Myer. (2013). Handbook of Measurement in Science and Engineering, Volume 1 - 1.3.7.4 Ground-Penetrating Radar. John Wiley & Sons. [online]. [cit. 2018-07-08]. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011AXARE/handbook-measurement/ground-penetrating-radar>
- [23] Senzor pro přesnou a komplexní inspekci. *MMSpektrum* [online]. [cit. 2018-07-08]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/senzor-pro-presnou-a-komplexni-inspekci-ci-reverzni-inzenyrstvi.html>
- [24] Počítačová tomografie. *CAD* [online]. [cit. 2018-07-09]. Dostupné z: <https://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/2114-pocitacova-tomografie-pro-presne-mereni-defektoskopii-i-reverzni-inzenyrstvi.html>
- [25] Aproximační křivky. *Mendelu* [online]. [cit. 2018-07-10]. Dostupné z: [https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz\\_cast.pl?cast=6348](https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=6348)
- [26] Základní pravidla 3D modelování pro 3D tisk. *Futur3D* [online]. [cit. 2018-07-10]. Dostupné z: <https://www.futur3d.net/zakladni-pravidla-3d-modelovani-pro-3d-tisk>
- [27] Where failed 3D prints Go To Die. *Filabot* [online]. [cit. 2018-07-10]. Dostupné z: <https://www.filabot.com/blogs/news/where-failed-3d-prints-go-to-die-and-what-you-can-do-about-it>

- [28] Industrial CT scanning. *3D* [online]. [cit. 2018-07-17]. Dostupné z:  
<https://3dproscan.com/industrial-ct-scanning-terms-what-is-the-scatter-effect/>
- [29] Gebhardt, Andreas Hötter, Jan-Steffen. (2016). Additive Manufacturing - 3D Printing for Prototyping and Manufacturing - 1.2 Systematics of Layer Technology. Hanser Publishers. [online]. [cit. 2018-07-10] Dostupné z:  
<https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt010ZI2ED/additive-manufacturing/systematics-layer-technology>
- [30] FDM technologie. *Ob Jet* [online]. [cit. 2018-07-17]. Dostupné z:  
<http://www.objet.cz/3D-tiskarny/technologie-fdm>
- [31] Aditivní technologie. *VUT Brno* [online]. [cit. 2018-07-18]. Dostupné z:  
[http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/podklady/sto\\_bak/cv\\_STV\\_04\\_Aditivni\\_technologie\\_metody\\_Rapid\\_Prototyping.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/podklady/sto_bak/cv_STV_04_Aditivni_technologie_metody_Rapid_Prototyping.pdf)
- [32] Stratasys F123 Series. *MCAE* [online]. [cit. 2018-07-18]. Dostupné z:  
<https://www.mcae.cz/cs/produkty/stratasys-f123-series/>
- [33] Seznam materiálu pro 3D tisk. *Materiál pro 3D tisk* [online]. [cit. 2018-07-18]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/>
- [34] ABS. *Tender* [online]. [cit. 2018-07-18]. Dostupné z:  
<http://www.t3nder.com/abs/>
- [35] *Nikon Metrology* [online]. [cit. 2018-07-29]. Dostupné z:  
<https://www.nikonmetrology.com/en-gb/product/modelmaker-mmdx>
- [36] *Contact and optical sensors* [online]. [cit. 2018-07-29]. 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)
- [37] SCHOLZ, Pavel a František FREIBERG. Economic Evaluation of Preparation and Building Stage of Additive Manufacturing Process. *GRANT Journal*. **4(2)**, 122-127. ISSN 1805-062X.

## Seznam obrázků

Obr. 1-1 BMW R 61 [4].....	12
Obr. 1-2 Jawa Pérák.....	12
Obr. 1-3 JAC A6 [5] .....	12
Obr. 1-4 Audi A6 [5] .....	12
Obr. 1-5 Porovnání Star BM (vlevo) a Colt 1911 [6].....	13
Obr. 1-6 Michelangelova socha a její 3D scan [7] .....	14
Obr. 2-1 Velorex 16/350.....	15
Obr. 2-2 Schéma zapojení křížového přepínače [10] .....	15
Obr. 2-3 Jaromír Kábrt a prototyp vozítka Motorex.....	16
Obr. 2-4 Křížový přepínač v nálezovém stavu .....	17
Obr. 2-5 Odstrojené těleso přepínače .....	17
Obr. 2-6 Těleso po chemickém čištění .....	17
Obr. 3-1 Kartézský souřadnicový systém [15] .....	18
Obr. 3-2 Sférický souřadnicový systém [15] .....	18
Obr. 3-3 Konstrukce mostového SMS [13] .....	19
Obr. 3-4 Zeiss Accura [14] .....	20
Obr. 3-5 Konstrukce portálového stroje [16].....	20
Obr. 3-6 Zeiss Pro [17] .....	20
Obr. 3-7 Nikon MCAx [19].....	21
Obr. 3-8 Taktilní sensorika [20] .....	22
Obr. 3-9 Pasivní sensorika [20] .....	23
Obr. 3-10 Aktivní sensorika [20].....	23
Obr. 3-11 Princip měření laser scannerem [23] .....	24
Obr. 3-12 Křížový přepínač po nanesení křídového prášku .....	25
Obr. 3-13 Model Kinder Surprise získaný z tomografu [24].....	25
Obr. 3-14 Princip měření tomografu[28].....	26
Obr. 3-15 Měření pomocí laser scanneru na rameni.....	27
Obr. 3-16 Měření na mostovém SMS.....	28
Obr. 3-17 Průběh měření .....	28
Obr. 3-18 Detail mraku bodů.....	29
Obr. 3-19 Naměřené mraky bodů .....	29



Obr. 3-20 Získaný mrak bodů.....	30
Obr. 3-21 Rovinná plocha proložená body na stěně.....	31
Obr. 3-22 Proložená obecná plocha.....	31
Obr. 3-23 Model křížového přepínače.....	32
Obr. 4-1 Původní detail tělesa.....	33
Obr. 4-2 Upravený detail tělesa.....	33
Obr. 4-3 Deformace tisknuté součásti [27].....	34
Obr. 4-4 Původní uspořádání stěny.....	35
Obr. 4-5 Přepřepávané uspořádání stěny.....	35
Obr. 5-1 Princip vrstvení tělesa [29].....	36
Obr. 5-2 Princip technologie FDM [30].....	37
Obr. 5-3 Princip metody SLA [31].....	38
Obr. 5-4 Princip metody SLS [31].....	38
Obr. 5-5 Stratasys F370 [32].....	39
Obr. 5-6 ABS vlákna pro tisk [34].....	40
Obr. 5-7 Náhled v softwaru tiskárny.....	41
Obr. 5-8 Vytisknutý model tělesa.....	41
Obr. 6-1 Dokončené těleso přepínače.....	42
Obr. 6-2 Originál a kopie křížového přepínače.....	43