



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

## ROZŠÍŘENÍ UNIVERZÁLNÍHO CNC STROJE O DALŠÍ FUNKCE

UNIVERSAL CNC MACHINE EXTENSIONS FOR ADDITIONAL FUNCTIONS

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Pavelka

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Kamil Jaššo

BRNO 2022

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektrotechnická výroba a management**

Ústav elektrotechnologie

**Student:** Bc. Ondřej Pavelka

**ID:** 203159

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2021/22

**NÁZEV TÉMATU:**

## Rozšíření univerzálního CNC stroje o další funkce

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Prostudujte problematiku FDM 3D tiskáren a CNC strojů. Prozkoumejte stávající zařízení a identifikujte problémy ovlivňující jeho funkčnost. Navrhněte řešení pro zlepšení funkčnosti stávajícího zařízení. Navrhněte několik různých možností rozšíření funkcí stávajícího zařízení. Implementujte navržené řešení a otestujte jeho funkčnost.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 7.2.2022

**Termín odevzdání:** 25.5.2022

**Vedoucí práce:** Ing. Kamil Jaššo

**doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

První část této práce se zabývá teorií týkající se vlastností 3D tiskáren, jakožto jednoho z typů CNC strojů. Mimo teorie 3D tiskáren, konkrétně jejich principu funkce, popisu různých technologií tisku, jejich kinematiky a firmwaru, budou také přiblíženy základní charakteristické rysy CNC strojů. Budou popsány jednotlivé základní typy CNC strojů a bude probrán úvod do jejich programování. Praktická část diplomové práce se zabývá přestavbou reálné VUT FDM 3D tiskárny na univerzální modulární stroj. Této přestavbě předcházela podrobná kontrola stávajícího stavu a seznámí se s konstrukčním řešením dané tiskárny. Následovala nezbytná úprava, a odstranění nedostatků, kterými 3D tiskárna disponovala, čímž nesplňovala požadavky okamžité přestavby na funkční modulární stroj. S cílem zvýšení užité hodnoty stroje byl sestaven výměnný modul nejen na klasický 3D tisk, ale i druhý modul umožňující tisk pastovitých materiálů.

## **Klíčová slova**

CNC, CNC stroj, 3D tisk, 3D tiskárna, FDM, tisk pasty

## **Abstract**

Technology of 3D printers, which are regarded as a representative of a CNC machines, are the central point of this diploma thesis. Apart from the history and theory of 3D printers with the emphasis at their functioning principles, firmware, different methods of 3D printing and their respective kinematics, there are chapters concerned with typical CNC machines as well. There is insight into programming of CNC machines and different types of CNC machines regarding their utilization in many industries. The practical part of this diploma thesis is covering conversion of the real VUT FDM 3D printer to a universal modular machine. This conversion was preceded by identification and elimination of a faults, which this 3D printer had and therefore haven't been capable of becoming functional modular machine. With the aim of increasing the actual value and its utilization there were two switching modules created. One for 3D printing and second for extruding paste like materials.

## **Keywords**

CNC, CNC machine, 3D printing, 3D printer, FDM, paste extrusion

## **Bibliografická citace**

PAVELKA, Ondřej. *Rozšíření univerzálního CNC stroje o další funkce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie, 2022. 68 s., 1 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Kamil Jaško

# Prohlášení autora o původnosti díla

<b>Jméno a příjmení studenta:</b>	Ondřej Pavelka
<b>VUT ID studenta:</b>	203159
<b>Typ práce:</b>	Diplomová práce
<b>Akademický rok:</b>	2021/22
<b>Téma závěrečné práce:</b>	Rozšíření univerzálního CNC stroje o další funkce

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 25. května 2022

-----  
podpis autora

## **Poděkování**

Rád bych tímto textem upřímně poděkoval mému vedoucími diplomové práce Ing. Kamilu Jaššovi za odbornou, užitečnou a pohotovou pomoc a metodické vedení při zpracovávání celé práce. Zároveň bych rád poděkoval i Ing. Robertu Bayerovi za odbornou pomoc a společnosti Igus za materiálovou podporu.

V Brně dne: 25. května 2022

-----  
podpis autora

# Obsah

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>9</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>10</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
<b>1. CNC STROJE.....</b>	<b>12</b>
1.1 HISTORIE CNC STROJŮ .....	12
<b>2. ROZDĚLENÍ CNC OBRÁBĚCÍCH STROJŮ .....</b>	<b>15</b>
2.1 OBRÁBĚCÍ CNC STROJE .....	15
2.1.1 CNC soustruh.....	15
2.1.2 CNC frézka.....	15
2.1.3 CNC obráběcí centrum .....	16
2.1.4 Elektrojiskrový CNC obráběcí stroj.....	16
2.2 ŘEZACÍ CNC STROJE.....	17
2.2.1 CNC plazmové řezací stroje.....	17
2.2.2 CNC laserové řezací stroje .....	17
2.3 CNC PARALELNÍ KINEMATICKÝ STROJ .....	17
<b>3. PROGRAMOVÁNÍ CNC STROJŮ .....</b>	<b>19</b>
3.1 SOUŘADNICOVÝ SYSTÉM.....	19
3.2 VZTAŽNÉ BODY STROJE.....	20
3.3 ZPŮSOBY PROGRAMOVÁNÍ .....	21
3.4 ŘÍZENÍ CNC STROJŮ.....	21
<b>4. 3D TISK .....</b>	<b>23</b>
4.1 HISTORIE 3D TISKU .....	24
4.2 PRINCIP 3D TISKU .....	25
4.2.1 Vytvoření modelu .....	26
4.2.2 Slicování.....	27
4.2.3 Tisk.....	29
<b>5. TECHNOLOGIE 3D TISKU .....</b>	<b>30</b>
5.1 FUSED DEPOSITION MODELLING (FDM) .....	30
5.2 STEREOLITOGRAFIE (SLA).....	32
5.2.1 Digital Light Processing (DLP).....	32
5.2.2 Masked Stereolithography (MSLA).....	33
5.3 SELECTIVE LASER SINTERING (SLS).....	33
<b>6. KONSTRUKCE A ŘÍZENÍ 3D TISKÁREN .....</b>	<b>35</b>
6.1 KINEMATIKY 3D TISKÁREN.....	35
6.1.1 Delta tiskárny.....	36
6.1.2 Selective Compliance Assembly Robot Arm (SCARA) .....	37
6.1.3 CoreXY.....	38
6.1.4 H-bot.....	38
6.1.5 Polar tiskárny.....	39

6.2	FIRMWARE 3D TISKÁREN .....	39
6.2.1	<i>Marlin</i> .....	40
6.2.2	<i>Klipper</i> .....	41
6.2.3	<i>Repetier</i> .....	41
<b>7.</b>	<b>MODULÁRNÍ 3D TISKÁRNY .....</b>	<b>42</b>
<b>8.</b>	<b>VUT 3D FDM TISKÁRNA .....</b>	<b>45</b>
<b>9.</b>	<b>KONTRUKČNÍ ÚPRAVY STROJE .....</b>	<b>48</b>
9.1	ULOŽENÍ OSY Z .....	48
9.2	REALIZACE POHYBU OS X A Y .....	49
9.3	ELEKTRONIKA STROJE .....	53
9.4	OSTATNÍ VYLEPŠENÍ .....	55
9.5	MODUL NA 3D TISK .....	56
9.5.1	<i>Zkušební 3D tisk</i> .....	58
9.6	MODUL NA TISK PASTOVITÝCH MATERIÁLŮ .....	59
9.6.1	<i>Zkušební tisk</i> .....	60
<b>10.</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>62</b>
	<b>LITERATURA .....</b>	<b>63</b>
	<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>66</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>67</b>



# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Milwaukee-Matic II [3] .....	13
1.2	Vertikální CNC obráběcí centrum Haas VF-2 [31] .....	14
2.1	Typy CNC strojů [6] .....	16
2.2	Manipulátor Fanuc M-3 s paralelní kinematikou [10] .....	18
3.1	Souřadnicový systém CNC stroje [14] .....	19
3.2	Vztažné body CNC stroje [16] .....	20
3.3	Absolutní a přírůstkové programování .....	21
3.4	Řídící panel řídicího systému SINUMERIK [20] .....	22
4.1	3D tiskárna MakerBot Replicator+ [29] .....	24
4.2	RepRap projekt [22] .....	25
4.3	Princip 3D tisku [23] .....	26
4.4	Modelovací software Tinkercad [20] .....	27
4.5	Výplň výtisku [24] .....	28
5.1	Konstrukce FDM tiskárny [32] .....	31
5.2	Technologie 3D tisku DLP [25] .....	33
5.3	Výtisky z SLS 3D tiskárny [30] .....	34
6.1	Kartézská, polar a delta kinematika 3D tiskáren [36] .....	35
6.2	Delta 3D tiskárna [36] .....	37
6.3	SCARA 3D tiskárna [35] .....	37
6.4	Rozvodové řemeny CoreXY 3D tiskárny [38] .....	38
6.5	Polar 3D tiskárna [37] .....	39
6.6	Příklad konfigurace firmwaru Marlin .....	41
7.1	Creality CP-01 3v1 [43] .....	42
7.2	Tisk pastovitých materiálů [44] .....	43
8.1	VUT FDM 3D tiskárna před úpravami [42] .....	47
9.1	Nové držáky ložisek osy Z (vlevo) a jejich předchůdci .....	48
9.2	Porovnání nových pružných spojek a předchozího řešení .....	49
9.3	Porovnání nového řešení (vlevo) a původního .....	50
9.4	Realizace vzájemného pohybu os X a Y .....	50
9.5	Nový koncový blok osy X .....	51
9.6	Nová nástrojová hlava .....	52
9.7	Zapojení konektoru Molex v nástrojové hlavě .....	53
9.8	Řídící deska BIGTREETECH Octopus 1.1 .....	54
9.9	Pohled na spodní stranu tiskárny po úpravách .....	54
9.10	Původní a nové mechanické zpevnění konstrukce stroje .....	55
9.11	Tiskárna po všech úpravách .....	56
9.12	Nový modul na 3D tisk .....	57
9.13	Zapojení konektoru Molex na modulu na 3D tisk .....	57
9.14	Zkušební 3D tisk .....	59
9.15	Modul na tisk pastovitých materiálů .....	60
9.16	Zkušební tisk .....	61

# SEZNAM TABULEK

9.1	Zapojení konektoru Molex v nástrojové hlavě .....	53
9.2	Označení jednotlivých kabelů .....	55
9.3	Zapojení konektoru Molex na modulu na 3D tisk .....	58
9.4	Zapojení konektoru Molex na modulu na tisk pasty .....	60

# ÚVOD

V současné době většina produktů, se kterými se denně setkáváme, určitě obsahuje drobné díly, které byly vyrobeny na nějakém z typů počítačem řízeného stroje neboli CNC. Počítačem řízený stroj CNC vychází z číslicově řízených strojů NC jakožto jeho předchůdce. CNC stroje se primárně využívají k obrábění a vrtání různých materiálů, s cílem vytvoření požadovaného výrobku za pomoci subtraktivní metody. Pro subtraktivní metodu je charakteristický postup výroby, kdy na začátku celého procesu je polotovar z vhodného materiálu, ze kterého se pomocí různých nástrojů postupně odebírá materiál až do výsledné podoby výrobku. Mimo vrtání a obráběcí procesy se CNC stroje mohou používat i k řezání, gravírování, ohýbání plechů, frézování a dalších. Obecně se CNC stroj využívá tam, kde se vyrábí velký počet stejných dílů.

3D tiskárny jsou jistým způsobem také CNC stroje, ačkoliv v dostupné literatuře a na internetu se spíše tyto metody porovnávají. V obou případech, CNC stroje i 3D tiskárny, používají výrobní proces řízený počítačem, který pracuje v několika osách. Oproti CNC strojům, se technologie 3D tisku řadí mezi metody aditivní, kdy se na předem specifikované souřadnice nanáší materiál a vytváří se tak výsledný produkt. Odvětví, zabývající se 3D tiskem, zažívá v poslední dekádě veliký rozmach, i když vznik této technologie se datuje do 80. let minulého století. Dříve 3D tiskárny nebyly pro běžného člověka dostupné, jak z důvodu pořizovacích nákladů, tak i z důvodu složitých technologií a dostupných tiskových materiálů. Mimo to, technologie 3D tiskáren byla chráněna patentem, který v roce 2009 vypršel, což umožnilo rapidní nárůst výroby a prodeje osobních FDM tiskáren („Fused Deposition Modeling“). Dnes se trh s 3D tiskárnami rozšířil a není složité si pořídit solidní 3D tiskárnu v cenové relaci do 10 000 Kč. Na internetu lze nalézt rozsáhlé knihovny, již nakreslených digitálních 3D modelů, které mohou být bezplatně použity k tisku na vlastní 3D tiskárně. Jako tiskový materiál se dnes nepoužívají jen různé druhy plastů, ale například i stavební materiály jako je beton, nebo biologické materiály k tisku organických produktů. Tisk takto komplexních materiálů je možný pouze na speciálních 3D tiskárnách, tomu uzpůsobených. 3D tisk se nejvíce využívá ve vývoji prototypů, z důvodu nízkých nákladů a také na výrobu velmi tvarově komplikovaných dílů zejména se složitými vnitřními tvary.

V dnešní době existuje více druhů 3D tiskáren, mezi nejvíce rozšířené patří jednoznačně FDM tiskárny, které taví tenkou strunu nejčastěji plastového materiálu a umisťují ji na předem definované souřadnice. Mezi další typy se řadí stereolitografické (SL) tiskárny. Mimo klasické 3D tiskárny jsou nyní k dispozici i modulární 3D tiskárny, kdy standardní tisková hlava je vyměnitelná například za CNC frézku či laser. Tyto modifikace umožňují uživateli realizaci komplexnějších projektů bez větší náročnosti na prostor. Mimo koupi takových výměnných modulů na tomu uzpůsobené 3D tiskárny, je v dnešní době velice oblíbené tyto moduly vyrábět svépomocí a tím z vlastní klasické 3D tiskárny udělat modulární stroj.

# 1. CNC STROJE

Počítačem řízený stroj (z angličtiny „Computer Numerical Control“, CNC), je stroj, jehož činnost je řízena číslicovým počítačem. Tento počítač se stará o výpočty algoritmů pohybu nástrojů a materiálu, definovanou rychlosti v dané trajektorii nebo prostoru. To znamená, že všechny potřebné informace k vykonání pracovního úkonu, jako jsou informace o rozměru součástí, informace charakterizující funkce stroje a pomocné informace, jsou zaznamenány ve formě numerických znaků.

Vývoj číslicového řízení umožnil zautomatizování mnoha procesů stroje, s výsledkem zvýšení jeho efektivity. Nicméně číslicové řízení nejde implementovat na každý stroj. Předpokladem je kompletní konstrukční řešení stroje, které umožní vykonávat funkce související s číslicovým řízením. Hlavní složkou je průmyslový počítač, kterým musí být každý CNC stroj vybaven, ten pak zpracovává pokyny číslicového řízení a převádí je na pracovní pohyby jednotlivých částí stroje.

Mezi nejrozšířenější CNC stroje, patří stroje obráběcí, které mají tyto čtyři základní části [1]:

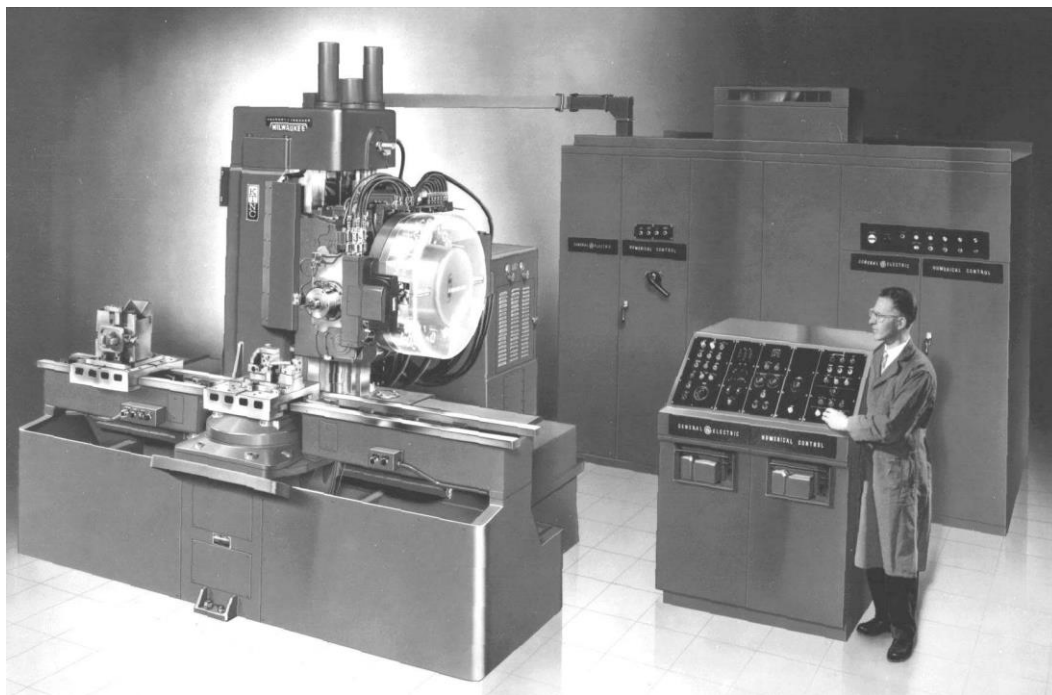
- **Mechanická část** – realizuje pohyb nástroje tak, aby docházelo k obrábění materiálu;
- **Elektrická část** – skládá se z CNC řízení a elektrické skříně, je zodpovědná za vykonání úkonů mechanické části na základě instrukcí;
- **Programovatelný logický automat (PLC)** – spojovací článek mezi CNC řízením a mechanickými částmi stroje;
- **Procesní média** – média nutná ke správné funkci stroje (vzduch, mazání, chlazení, ...).

## 1.1 Historie CNC strojů

Počátky obrábění materiálu se datují do 18. a 19. století, jako součást první průmyslové revoluce, kdy se průmysl všeobecně rozvíjel nevídanou rychlostí. Počátkem 19. století vznikají technologie podobné třískovému obrábění na manuálních strojích. Během 2. světové války vývoj techniky opět zaznamenává rapidní nárůst a začínají se aplikovat první myšlenky automatizace výroby, při stále rostoucích nárocích na přesnost výroby.

Za vynálezce číslicově řízeného („Numerical control“, NC) stroje je považován John T. Parson, který jako první využil děrných štítků, jako nositelů informací v podobě souřadnic a dalších pokynů. Společně s MIT (Massachusettský technologický institut) a Letectvem Spojených států amerických, které celý projekt financovalo, v roce 1952 vyrobili první tříosou (X, Y, Z) frézku. Ovládajícím médiem byla sedmistopá děrná páska, kdy tři stopy ovládaly funkční osy stroje a zbylé stopy nesly pomocné informace. Řízení stroje obstarávaly vakuové trubice, což zapříčinilo značnou rozměrovou náročnost

stroje. O několik let později, v roce 1959, představila firma Kearney & Trecker Corporation první komerčně dostupný obráběcí stroj Milwaukee-Matic II s číslicovým řízením. Na území dnešní České republiky byl první číslicový soustruh vyroben na začátku 60. let firmou ZPS Hulín (nyní TOSHULIN, a.s.) [2]

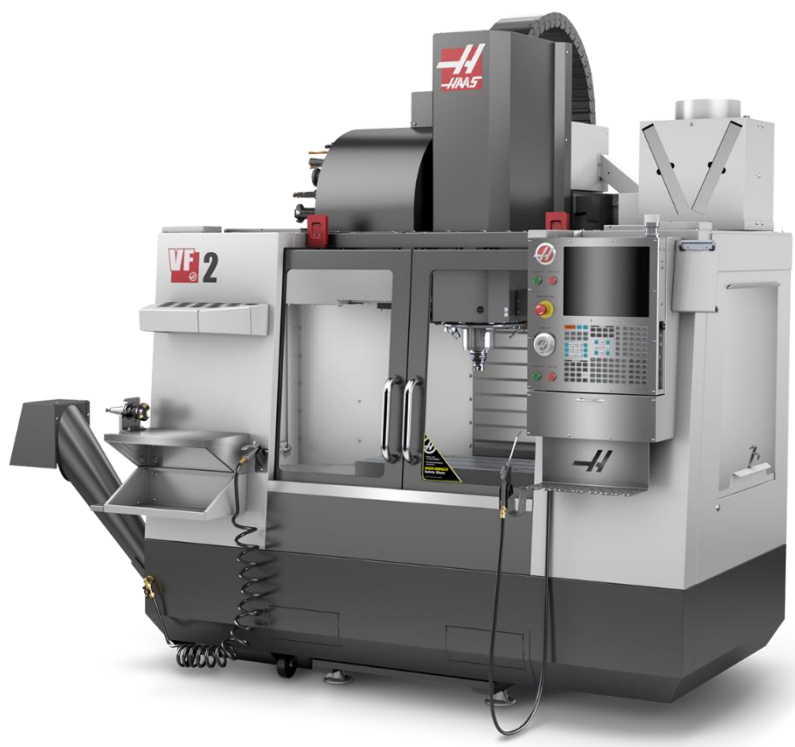


Obrázek 1.1 Milwaukee-Matic II [3]

70. a 80. léta zaznamenají další vývoj ve světě NC strojů, kdy se objevují možnosti editace programů a také se zkracuje doba nutná k vytvoření nového programu. Toto zprostředkovávají nově aplikované počítače, které řídí celý výrobní proces. To umožnily integrované obvody, ze kterých se osobní a průmyslové počítače začínají sestavovat, což vedlo k radikálnímu zmenšení rozměrů. Takový počítač se vstupní periferií, např. klávesnicí připojený ke stávajícímu NC stroji, stojí za zrodem CNC stroje. Tento krok v technologii třískového obrábění snižuje potřebu stálé přítomnosti obsluhy a zvyšuje efektivitu strojů. [4]

CNC stroje se začaly rozšiřovat a stále více výrobců je začalo vyrábět, společně s vlastním programovacím jazykem, což zákazníkům způsobovalo problémy. Pokud firma vlastnila stroje od více výrobců a každý byl programován v jiném programovacím jazyce přinášelo to časové prodlevy při potřebě přenesení programu mezi dvěma stroji. Tyto problémy stály za vznikem CAD (Computer Aided Design)/CAM (Computer Aided Manufacturing) systémů. CAD/CAM systémy umožňují softwarově navrhnout výrobek, jež následně převedou na G-kód. G-kód je univerzální programovací jazyk obráběcího stroje, pomocí kterého operátor ovládá pohyby a pracovní úkony stroje. Mimo hlavní „G“ kódy (*geometry* nebo *geometric*), které ovládají hlavní geometrické pohyby stroje,

existují mimo jiné i „M“ (*miscellaneous* nebo *machine*) kódy, které mají primárně pomocné a přídatné funkce. Příklady nejčastěji používaných instrukcí se nachází v Příloha A -. Vytvoření univerzálních softwarových systémů CAD/CAM umožnilo více firmám aplikování CNC strojů do jejich výroby, díky jednoduššímu procesu návrhu výrobku a samotné implementaci programu. [5]



Obrázek 1.2 Vertikální CNC obráběcí centrum Haas VF-2 [31]

## 2. ROZDĚLENÍ CNC OBRÁBĚCÍCH STROJŮ

CNC obráběcí stroje mohou být rozděleny dle několika různých kritérií. Jednotlivé vlastnosti z různých skupin se v praxi mohou kombinovat, a tím vytvořit výsledný obráběcí stroj.

**Rozdělení CNC obráběcích strojů dle [1]:**

- **Kinematiky** – sériové, paralelní a smíšené;
- **Polohy osy vřetena** – vertikální, horizontální a univerzální;
- **Počtu řízených os;**
- **Počtu vřeten** – jednovřetenové a vícevřetenové;
- **Tvaru obráběného obrobku** – rotační obrobky, nerotační obrobky a multifunkční;
- **Možnosti provedení většího počtu technologických operací** – obráběcí centra, semimultifunkční obráběcí centra a multifunkční obráběcí centra;
- **Aplikace** – speciální použití, v různých průmyslech, v různě objemné výrobě, ...

### 2.1 Obráběcí CNC stroje

Technologie obrábění spočívá v odebrání materiálu k dosažení požadovaného tvaru výrobku. Tomuto procesu se také říká třískové obrábění na základě odpadu (třísek), které během úkonu vznikají. Obráběcí stroje jsou pak zařízení, která jsou zkonstruována k procesu obrábění.

Mezi základní technologie třískového obrábění patří: frézování, soustružení, vrtání, zahlubování, závitování, broušení a výroba ozubení (technologii odvalováním). [2]

#### 2.1.1 CNC soustruh

CNC soustruh je obráběcí stroj, který pracuje na principu obrábění rotujícího materiálu, kterým bývá primárně železo. Existují ovšem i soustruhy například na dřevo či plasty. Na základě principu funkce soustruhu, jsou primárně vyráběny obrobky kruhovitěho tvaru. CNC soustruhy nahradily manuální soustruhy, kde byl nástroj posunován do řezu mechanicky, ručními koly pomocí převodů. Jelikož se jedná o stroj s minimem řízených os, patří soustruhy mezi kompaktnější obráběcí stroje. [7]

#### 2.1.2 CNC frézka

CNC frézka patří mezi nejrozšířenější obráběcí stroje vůbec. Rozdíl mezi soustruhem a frézku je v upnutí materiálu a princip obrábění. U frézky je materiál umístěn a zafixován na stole frézky a svislý rotující nástroj ho obrábí. CNC frézky mohou být

třiosé až šestiosé, kdy k základním lineárním pohybům v osách X, Y, Z jsou přidány rotační pohyby stolu. Moderní CNC frézky, mají jako součást své konstrukce automatický zásobník nástrojů, které si stroj může vyměnit dle požadavků programu. [7] Mezi CNC frézky patří i CNC routery, které umožňují obrábění materiálů jako je dřevo, plasty a měkké kovy. Také umožňují řezání tenkých materiálů jako kůže, fólie a textil. [8]

### 2.1.3 CNC obráběcí centrum

CNC obráběcí centrum pracuje v plně automatickém režimu (možnost pracovat v bezobslužném provozu), může provádět více druhů třískových obráběcích procesů, přičemž jedna technologie převažuje nad druhou, umí automaticky vyměňovat nástroje i obrobky a je vybaveno prvky diagnostiky a měření. Například frézování může být dominantní a soustružení jako vedlejší technologie. Konstrukčně vycházejí z CNC frézovacích nebo soustružnických strojů, dle primární funkce. Jejich hlavním úkolem je možnost provedení co nejvíce pracovních úkonů na obrobku během jednoho upnutí. [1]

### 2.1.4 Elektrojiskrový CNC obráběcí stroj

CNC elektrojiskrový obráběcí stroj („Electric discharge machine, EDM“) používá k tvarování materiálu elektrický výboj. Materiál je umístěn pod elektrodu v dielektrické lázni a na základě programu stroj vytvoří jiskru o vysoké teplotě, která materiál v daném místě roztaví a tím obrobí. [9]



Obrázek 2.1 Typy CNC strojů [6]



## 2.2 Řezací CNC stroje

### 2.2.1 CNC plazmové řezací stroje

CNC plazmové řezací stroje se používají k řezání tvrdých kovů např. oceli. Výkonným hořákem je vysokou rychlostí tryskán plyn na materiál. Plyn je jiskrou zapálen a vzniká plazma. Teplota plazmy je natolik vysoká, že materiál přetaví, a tím provede řez. Teploty se pohybují okolo 25 000 °C. [7]

### 2.2.2 CNC laserové řezací stroje

CNC laserové řezací stroje využívají vysoce výkonného laserového paprsku k velice přesnému řezání materiálů, nebo ke gravírování požadovaných tvarů na povrch materiálu. Laser svou teplotou způsobí tavení nebo vypařování materiálu, čímž se provede řez materiálem. Materiál je ve většině případech položen horizontálně, nad kterým se laser pohybuje, po naprogramovaných souřadnicích. Tento proces umožňuje tvorbu různých tvarů, které nelze zhotovit např. pomocí frézky. Výsledný řez ve většině případů nepotřebuje již další dokončovací úpravy. Při ideální kombinaci tvaru materiálu a požadovaného tvaru výrobku, je možné dosáhnout malého odpadu. Laserové gravírování umožňuje velice mělký zásah do materiálu a nejčastěji se používá ke značení nebo tvorbě dekoračních prvků, jako jsou např. loga. [9]

## 2.3 CNC paralelní kinematický stroj

Všechny dosud zmiňované typy CNC strojů měly stejný princip řízení. Jedná se o řízení založené na sériové kinematice. Ta je charakteristická tím, že každá řízená osa při vykonávání pohybu s sebou nese i ostatní osy. A to klade velké nároky na celý mechanismus a přináší nutnost komplexního řešení konstrukce celého stroje. Důraz musí být v tomto případě kladen zejména na pevnost a také tuhost jednotlivých montážních celků stroje, počínaje pevnou a robustní základnou. Jen tak lze předcházet ohýbání částí stroje, a tím plnit požadavky na vysokou opakovatelnou přesnost. Tento styl řízení CNC stroje je sice velice efektivní, nicméně stroje řízené tímto způsobem ztrácejí na dynamice, právě z důvodu požadavků na velkou tuhost, která s sebou nese vyšší hmotnosti a mnohdy i větší rozměry všech dílů, ze kterých se každá pohybová osa skládá.

Oproti tomu, paralelní kinematické stroje („Parallel Kinematic Machine, PKM“) poskytují větší dynamiku, vyšší rychlost pohybu a celkově vyšší tuhost s výsledně menšími rozměry a hmotností celého stroje. Základním principem paralelní kinematiky je kinematicky uzavřený řetězec celého mechanismu. Mechanismus se skládá z báze (rám nebo základna stroje, která nevykonává žádný pohyb), řízené hlavy a na ni několika nezávisle napojených vodících řetězců. Tyto řetězce jsou vůči bázi řazeny paralelně, což znamená, že pohyb jednoho ramene je podmíněn pohybem i všech ostatních.



Obrázek 2.2 Manipulátor Fanuc M-3 s paralelní kinematikou [10]

Mezi nevýhody PKM však patří složitější kalibrační operace při montáži stroje, délka jednotlivých ramen, která přispívá k rozměrové nestálosti a tření v kloubech těchto ramen. Vlastnosti ramen jsou velice náchylné na tlak, tah a teplotu, která na ně působí, a tím mění své charakteristiky. Požadavky na řízení jsou také vyšší, kdy všechna ramena musí být řízena současně, a ne jako u konvenčních strojů, kde je každá osa řízena zvlášť.

V minulosti se teorie paralelní kinematiky využívala primárně u simulátorů a až v posledních třech dekadách se studují možnosti využití této technologie ve výrobním průmyslu. Ve výrobních procesech se klasické PKM objevují jen zřídka, primárně z důvodů nízké přesnosti v reálných podmínkách. Nicméně se v praxi můžeme setkat s vysokorychlostními CNC frézkami využívající paralelní kinematiky a také odvětví průmyslových robotů tento druh řízení značně implementuje např. v automobilovém průmyslu. [11]

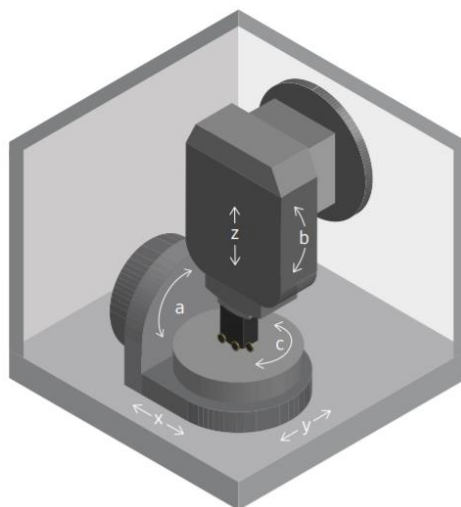
### 3. PROGRAMOVÁNÍ CNC STROJŮ

Program pro CNC obráběcí stroj obsahuje všechny informace, které jsou zapotřebí k obrobení polotovaru na požadovaný tvar. Jedná se o přípravné funkce, až po finální proces obrábění. Tyto informace mohou být rozděleny do tří základních kategorií [12]:

- **Geometrické informace** – popisují dráhy nástroje na základě rozměrů obrobku a jeho polohy. Jde o definování dráhy nástroje v kartézských souřadnicích. Aby mohly být tyto informace zakomponovány do programu, je nutné znát přesné rozměry obrobku z výkresové dokumentace;
- **Technologické informace** – popisují, jakou technologií bude stroj obrábět k dosažení požadovanému obrobku. Jde tedy o typ nástroje, jeho rychlost, otáčky, hloubku řezu, ...;
- **Pomocné informace** – popisují vedlejší povely pro stroj, nepřímo spojené s procesem obrábění (sepnutí čerpadla chladicí kapaliny, otáčky vřetene, ...).

#### 3.1 Souřadnicový systém

Obráběcí CNC stroje fungují a jsou programovány na základě kartézského systému souřadnic. Jejich definice je dána normou ČSN ISO 841 Terminologie os a pohybů. Systém se skládá z pravoúhlých os X, Y, Z. Pokud má stroj více řízených os, jde o osy rotační, které vycházejí z os X, Y, Z, a jsou s nimi rovnoběžné. Tyto osy se většinou nazývají A, B, C. Hodnoty se nevyskytují jen v kladném poli souřadnic, ale mohou i v záporném. Tento systém souřadnic je nutností, protože na jeho základě se nástroj pohybuje za účelem obrábění, dle zadaných příkazů z řídicího panelu nebo programu. Souřadnicový systém je možné posunovat a natáčet. [13]



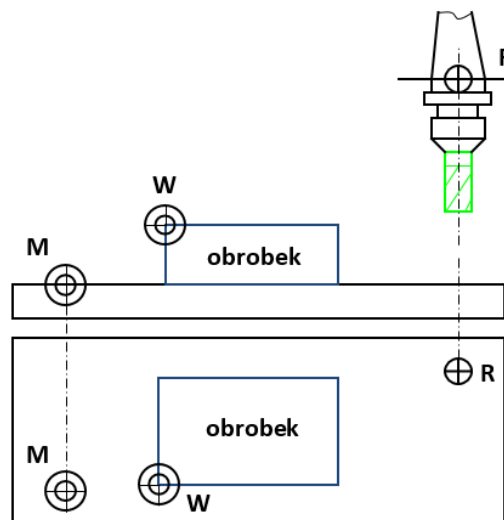
Obrázek 3.1 Souřadnicový systém CNC stroje [14]

## 3.2 Vztažné body stroje

Každý CNC stroj má ve svém pracovním prostoru minimálně tři základní vztažné body, jejichž pozice je důležitá, jak pro programátora, tak i operátora, k zajištění správné funkce stroje. Tyto body se liší u každého typu obráběcího stroje z důvodu rozdílných rozměrů stroje, pracovního prostoru a technologií obrábění. Tyto základní body jsou:

- **Referenční bod stroje R** – jde o bod s pevnou lokací, který bývá zaveden již při samotné konstrukci stroje. Do tohoto bodu by se měl stroj dostat za každých podmínek, většinou bývá realizován koncovými spínači. Po zapnutí a před vypnutím stroje, by se nástroj měl nacházet v tomto bodě;
- **Nulový bod obrobku W** – tento bod se liší s každým obrobkem, je navrhnout programátorem v počáteční fázi programování s ohledem na rozměry obrobku a technologický proces obrábění. Nachází se v libovolném místě pracovního prostoru stroje. U soustruhu bývá na ose rotace obrobku, odkud je obrobek kótován;
- **Nulový bod stroje M** – jedná se opět o pevně definovaný bod výrobcem. Nachází se v něm počátek souřadnicového systému.

Pro každé obrábění musí být pevně definované vztahy mezi všemi vztažnými body. Mimo výše zmíněné vztažné body existují i další, jako je nulový bod nástroje, nulový bod nástrojového držáku nebo výchozí bod programu. [15]

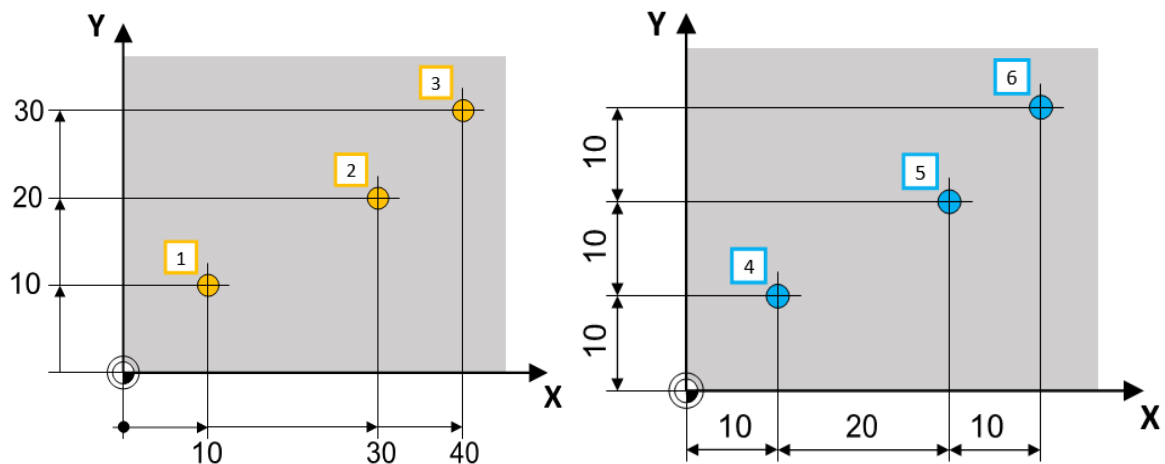


Obrázek 3.2 Vztažné body CNC stroje [16]

### 3.3 Způsoby programování

Zavedením vztažných bodů stroje a jim odpovídajícímu souřadnicovému systému, umožňuje programátorovi začít pracovat na programu pro daný výrobek. Jeho úkolem je naprogramovat cestu nástroje pomocí souřadnic. Jedná se většinou o nejkratší možnou cestu, která sníží celkový čas obrábění. Cesta, kterou se pohybuje během obrábění je definována souřadnicemi X, Y, Z. Tyto konkrétní souřadnice, po kterých se nástroj pohybuje jsou definovány absolutním programováním nebo přírůstkovým (inkrementálním) programováním.

- **Absolutní programování** – popisuje bod (pozici) nástroje v absolutních hodnotách souřadnic X, Y, Z vztažených k předem zvolenému počátečnímu bodu, většinou jde o nulový bod obrobku. Konkrétní souřadnice představují cílový bod nástroje.
- **Přírůstkové (inkrementální) programování** – jedná se o souřadnice X, Y, Z definované vzhledem k poslední pozici nástroje. Konkrétní souřadnice tedy představují vzdálenost mezi výchozím a cílovým bodem. Pokud se nástroj po obrábění vrátí do výchozího bodu, součet všech souřadnic se rovná nule. [17]



Obrázek 3.3 Absolutní a přírůstkové programování

### 3.4 Řízení CNC strojů

Konkrétní řídicí systémy CNC strojů se liší dle výrobce, nicméně princip je totožný. Tyto systémy mohou být děleny mnoha způsoby. Například podle pohybu po souřadnicích, kterým je u moderních obráběcích center nejčastěji souvislé řízení ve všech osách současně. To znamená, že všechny osy se pohybují nezávisle na ostatních. Dále se mohou dělit podle použité zpětné vazby:

- **Řídicí systém bez zpětné vazby** – jak už název napovídá, stroj s takovým řízením funguje bez jakékoliv zpětné vazby, konkrétně mezi motorem ovládající pohyb nástroje a řídicí jednotkou. Z čehož vychází, že jeho aktuální rychlost, otáčky ani poloha nejsou okamžitě známé. Takový řídicí systém pouze vysílá informace jednosměrně pohonné jednotce nástroje, a to jeho cílovou polohu. Jedná se obecně o levnější řízení, a spíše se používá u menších a méně náročných strojů. Mnohdy prvek zpětné vazby u takové stroje, může být sám operátor. Chyby v obráběcím procesu a poruchy v pracovním prostoru stroje jsou u takto řízeného stroje častější než u systému se zpětnou vazbou;
- **Řídicí systém se zpětnou vazbou** – takový řídicí systém je již složitější, jak ze softwarového hlediska, tak i hardwarového. Zadání z programu je neustále porovnáváno s aktuálními hodnotami (poloha, rychlost, otáčky, ...) nástroje. Systém je schopný upravit vyhodnocované hodnoty během procesu, pokud je potřeba. Pokud by mělo dojít k chybě, systém je sám schopen zastavit proces obrábění a předejít tím škodám na nástroji, stroji nebo polotovaru.

Řídicí systémy bez zpětné vazby jsou v dnešní době pomalu vytlačovány moderními CNC stroji s mnoha prvky zpětných vazeb, včetně prvků umělé inteligence. [18]

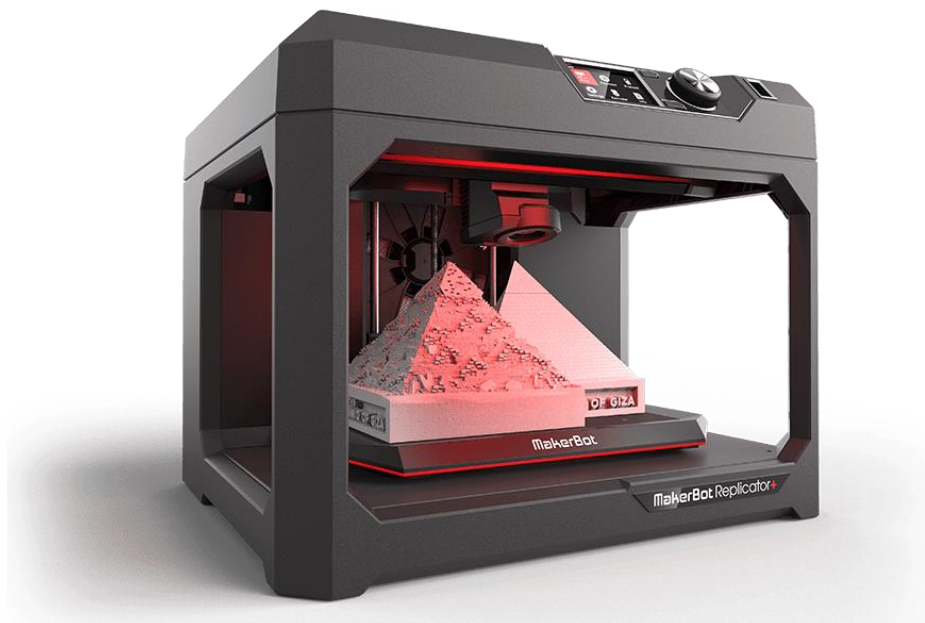


Obrázek 3.4 Řídicí panel řídicího systému SINUMERIK [20]

## 4. 3D TISK

Technologie 3D tisku, jako nejmladší z odvětví CNC strojů, prochází velice důležitou vývojovou fází, kdy popularita 3D tisku stále narůstá, a to nejen díky domácím tiskárnám. Nově vznikající technologie a možnosti, které dnes 3D tiskárny nabízejí, nacházejí své uplatnění i v širokém spektru průmyslů, od menších výroben až po velké projekty týkající se např. využití 3D tiskáren na vesmírných aplikacích. V dnešní době je možné na 3D tiskárně vytisknout mimo nejtýpějších plastových výrobků, jako jsou dekorace, hračky nebo součástky různého využití, i jídlo, biologické produkty pro zdravotnictví, tisknou se i kovové a další produkty. Mezi hlavní důvody rapidního růstu průmyslu zabývající se 3D tiskem jsou možnosti, které nám 3D tisk samotný nabízí. Umožňuje nám přeměnit pouhé myšlenky na reálné produkty složitých tvarů se speciální strukturou, které by nebylo možné dříve vyrobit pomocí subtraktivní metody. Toto je možné díky rostoucím technologickým možnostem tisku a tím i stále větší popularitě 3D tiskáren, které jsou nabízeny velkým a stále se zvyšujícím počtem výrobců a prodejců, z čehož my jako zákazníci těžíme v podobě nižších pořizovacích nákladů a širokého spektra výběru. Cenový rozsah osobních základních 3D tiskáren začíná již okolo částky 2000 Kč, avšak může vyšplhat až částkám blízkým se 200 000 Kč (např. Ultimaker S5). Pomocí osobní tiskárny je majitel schopen doma vytvořit vlastní prototypovou výrobu pro své potřeby a realizaci nápadů, například na základě svých koníčků, jakým může být např. modelářství. Kromě vlastních produktů, které si majitel musí sám nakreslit v CAD programu, existují rozsáhlé knihovny, již hotových modelů, které jsou buď zdarma nebo zpoplatněné ke stažení a k použití na vlastní tiskárně. Mimo prototypovou výrobu se dnes 3D tiskárny aplikují i v masové výrobě, která dříve byla závislá na nástrojích potřebných k výrobě daného produktu a dalších důležitých procesních krocích, které byly specifické pro každý výrobek, nicméně prototypová výroba značně převládá.

3D tisk patří mezi aditivní metody výroby, což ho jednoznačně odlišuje od jiných výrobních technologií, které primárně využívají subtraktivní metody, jakými jsou například frézování, soustružení či lisování. Tyto metody byly probrány v dřívější části práce. Aditivní metoda pokládá materiál různými technikami na předem definované pozice v prostoru, vrstvu po vrstvě, čímž vzniká 3D objekt. Takový druh výroby s sebou nese jednoznačně menší množství odpadu při značné složitosti výrobku obsahující jinak velmi obtížně tvořené vnitřní tvary. To všechno při možnostech použít recyklovatelné materiály, což v dnešní době zaměřené na udržitelnost, dělá takovou výrobu velice populární, efektivní a užitečnou.



Obrázek 4.1 3D tiskárna MakerBot Replicator+ [29]

## 4.1 Historie 3D tisku

Podobně jako u jiných technologií v minulosti, i technologie 3D tisku, dříve spíše známá pod pojmem rapid prototyping (rychlá výroba prototypů), vznikala nezávisle na sobě na více místech na světě, a to na začátku 80. let minulého století. Mezi prvními byl Hideo Kodama z Japonska, který v roce 1981 vytvořil první technologie podobné dnešnímu 3D tisku. Mimo to byl první na světě, který zažádal o patent na stroj podobný dnešní 3D tiskárně, pod názvem rapid prototyping. Nicméně se mu nepodařilo patent získat a po tomto neúspěchu se přestal své technologii nadále věnovat. Mimo něj, francouzský tým vědců ve složení Alain Le Méhauté, Olivier de Witte a Jean Claude André také experimentovali s myšlenkou stroje na technologii rapid prototyping. Prototyp takového stroje sestavili a v roce 1984 jim byl na jejich technologii udělen patent. [21] Tři týdny před nimi, americký vynálezce Charles Hull zažádal o patent na technologii nazvanou stereolitografie (SL/SLA), která se velice podobala vynálezu francouzského týmu. Jelikož francouzský tým nepokračoval ve vývoji své technologie z důvodu nedostatku financí, je Charles Hull považován za zakladatele technologie 3D tisku, protože mu v roce 1986 byl patent uznán. Na rozdíl od ostatních, své technologie dále rozvíjel a založil firmu 3D Systems, která v roce 1987 vydala první 3D tiskárnu SLA-1. Firma v roce 1988 také představila stereolitografický formát (STL), jakožto formát souboru, který umí nést všechny informace potřebné k vytisknutí 3D objektu na 3D tiskárně. Tento formát je dodnes stále používán. Soubor formátu STL popisuje tvar předmětu, bez dalších informací, jako je jeho barva nebo typ povrchu. [21] Ve stejném roce, kdy byla předvedena tiskárna SLA-1, student Texaské univerzity Carl Deckard vynalezl další



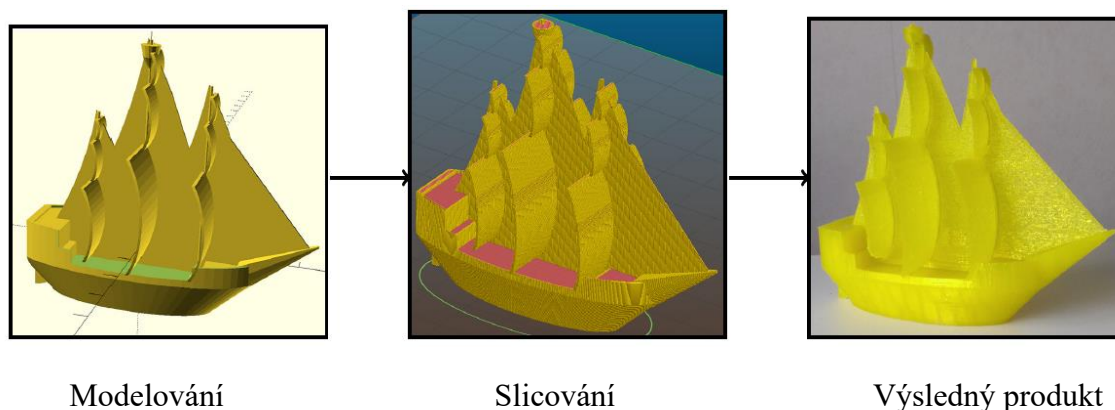
technologii 3D tisku, SLS („Selective Laser Sintering“), která využívá tekutý tiskový materiál a UV světlo k vytvrzení 3D objektu. První volně dostupná SLS 3D tiskárna se na trh dostala až v roce 2006. Na přelomu 80. a 90. let Scott Crump zažádal o patent na dnes nejrozsáhlejší technologii 3D tisku, a to FDM. V roce 1992 firmě ve které působil, byl patent udělen, což rapidně nastartovalo vývoj FDM tiskáren. Přelomovým rokem pro 3D tisk je také rok 2005, kdy Dr. Adrian Bowyer přišel s myšlenkou sestavení 3D tiskárny, která by byla schopná vytisknout díly, k postavení stejné 3D tiskárny. Tento projekt je znám pod zkratkou RepRap neboli „The Replication Rapid-Prototyper Project“. Jednalo se o open-source projekt, což znamená, že veškerý software a potřebné informace k vytvoření vlastního RepRap projektu, jsou volně komukoli přístupné. Koncem roku 2008 vznikla první RepRap 3D tiskárna Reprap Darwin. V roce 2009 patenty na FDM z 80. let přešly do stavu volného díla, což umožnilo prudký nárůst ve vývoji a ve výrobě 3D tiskáren. Od tohoto data se značně začala zvyšovat dostupnost osobních 3D tiskáren, z důvodů nižších pořizovacích nákladů. Technologie 3D tisku se tímto začala rozšiřovat mezi širokou veřejnost. [22]



Obrázek 4.2 RepRap projekt [22]

## 4.2 Princip 3D tisku

3D tisk vychází z technologie klasického 2D tisku na papír, kdy soubor digitálních dat je přenesen do reality v podobě uchopitelného objektu. S tím rozdílem, že se jedná o tří rozměrný objekt. Samotný proces 3D tisku může být rozdělen do tří základních kroků, které jsou potřebné k tisku samotnému. V první řadě se jedná o vytvoření modelu požadovaného výrobku, následuje jeho slicování a poté samotný proces tisku.



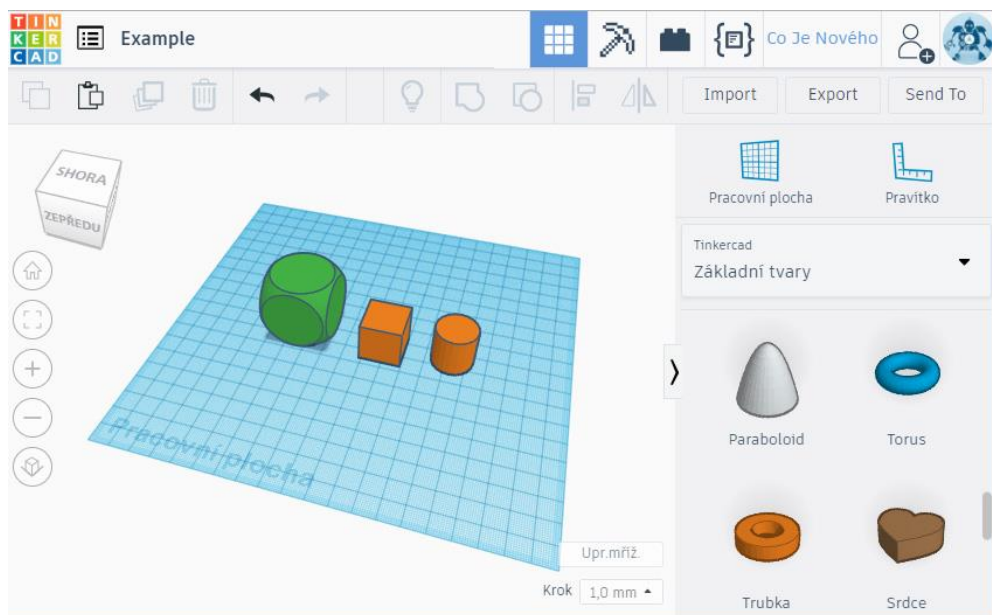
Obrázek 4.3 Princip 3D tisku [23]

#### 4.2.1 Vytvoření modelu

Hned na začátku práce musí být jasně definováno, co za objekt se bude tisknout, a tím zvolit vhodnou techniku modelování. Existuje více možností, jak dosáhnout požadovaného modelu. První variantou je naskenování již existujícího 3D objektu. Tato metoda je velice účinná a rychlá, nicméně podmínkou je existence předlohy, která musela být vytvořena jiným způsobem. Mimo to, jsou skenery velice nákladné a u levnějších typů se skokově přichází o stupně kvality. Podobnou metodou blízkou skenování je fotogrammetrie, která je založena na sadě fotografií předlohy z různých úhlů, které poté vhodný software převede na 3D model. [20] Druhou možností je získání již namodelovaného objektu. Toho může být dosaženo stažením volně dostupných modelů nebo získáním modelu od zákazníka, který je zadavatelem celé zakázky na 3D tisk. Online knihovny nabízející hotové modely, které jsou buď zdarma ke stažení nebo v některých případech i placené. I tak se většinou dají v CAD programu upravovat, čímž je možné model přizpůsobit vlastním požadavkům a zároveň ušetřit velké množství času, který by byl potřebný k namodelování celé předlohy. Poslední a třetí možností, jak získat model, je jeho samotné namodelování v CAD systémech. V dnešní době je mnoho CAD softwarů, které se liší svým pracovním polem a postupem tvorby modelu. Příkladem může být Tinkercad, který je vhodný pro začátečníky, Autodesk Fusion 360, který umožňuje tvorbu komplexnějších modelů, včetně možnosti tvoření sestavy modelů, ZBrush, který je vhodný pro umělce, Blender, nejčastěji využíván vývojáři počítačových her, a pro funkční modely bývá jedním z nejpoužívanějších Solidworks či AutoCAD. Obecně modelování složitějších tvarů patří mezi velice náročné procesy, jejichž naučení zabere jistý čas. Mezi nejčastější formáty souborů obsahující výsledné modely jsou STL, OBJ, AMF nebo 3MF, jenž patří mezi novější formáty a má možnost nést informace i o barvě výtisku. [23]

**Během modelování je potřeba vzít v úvahu [20]:**

- **Podpěry** – pokud se množství podpěr omezí na nejpotřebnější minimum, bude celkový čas tisku kratší a také bude spotřebováno méně materiálu;
- **Orientace modelu na podložce** – povrch strany výtisku umístěného na podložce bude mít hladší povrch, proto je to důležité ji brát na vědomí;
- **Možnost tisku modelu na více částí** – některé tvary výtisků budou mít lepší povrchové a vzhledové vlastnosti, pokud se zváží tisk modelu na více částí, které mohou být poté např. slepeny;
- **Pevnost výtisku** – pokud je pevnost výtisku důležitou charakteristickou vlastností výtisku, je nutné vzít na vědomí, že největší pevnost má výtisk kolmo na jednotlivé tiskové vrstvy;
- **Tolerance u soustav modelů** – soustavy modelů, které do sebe mají zapadat musí být vytisknuty s tolerancemi na místech, které budou zapadat do jiného modelu;
- **Otvory** – kulaté otvory mají hladší povrch, pokud je otvor orientován kolmo na podložku;
- **Šířka perimetru** – je daná tryskou a ovlivní tím šířku stěn modelu.



Obrázek 4.4 Modelovací software Tinkercad [20]

#### 4.2.2 Slicování

Slicování (přejato z anglického *slicing*) je nutný krok mezi modelováním a tiskem. Úkolem je vytvořit z modelu formát, kterému bude tiskárna rozumět a bude možné postupovat dále k tisku. Slicování vytvoří z STL souboru posloupnost G-kódů, pomocí

kterých tiskárna vytiskne objekt. Ke slicování se používají softwarové nástroje, kterým se obecně říká slicery. Jedná se o náročný proces na centrální procesorovou jednotku, proto tento krok musí být proveden předem na počítači, a ne až na tiskárně samotné. Mezi nejpoužívanější programy na slicování patří Slic3r, Cura a Simplify3D. Do těchto programů se mimo 3D modelu také vkládají další informace, které mají výsledný dopad na kvalitu produktu. Jedná se o nastavení teplot, chlazení, výšky vrstvy, podpěr, výplň aj. V sliceru je také možné naposledy změnit rozměry objektu před tiskem. [23]

#### **Jednotlivé kroky slicování:**

1. nahrání modelu ve formátu STL;
2. možná změna rozměrů, umístění v souřadnicovém systému, rotování a další finální úkony;
3. zadání informací potřebných k tisku (teplota podložky, výška vrstvy, ...);
4. slicovací proces, jehož výsledkem je série G-kódů;
5. přenesení G-kódů na tiskárnu.

Ad.3 v tomto kroku je důležité se ujistit, že model je položen na podložce a nevisí „ve vzduchu“, umožňuje to nastavení umístění modelu v souřadnicovém systému. Také je vhodné na základě používaného tiskového materiálu, navýšit o jistý koeficient, všechny rozměry modelu z důvodu „smrštění“ materiálu po vychladnutí.

Ad.4 jednotlivé slicery se mohou v tomto kroku lišit, nicméně by se mělo jednat o nastavení tiskárny (typ tiskárny, velikost podložky a maximální hodnota v ose Z, počet tiskových hlav, průměr trysky ...), typ vlákna (jeho průměr, teplota podložky a trysky, chlazení, ...), nastavení tisku (výška vrstvy, šířka perimetrů, výplň, tvar výplně, skirt, ...). [24]



Obrázek 4.5 Výplň výtisků [24]

### 4.2.3 Tisk

K vytisknutí namodelovaného a vyslicovaného objektu, je zapotřebí přenést G-kód do tiskárny. To může být provedeno za pomoci USB, přes paměťovou kartu, přes síť, ... Některé slicovací programy umožňují přímý přenos do tiskárny po skončení slicování. Na základě řízení a konstrukce tiskárny, všechny její osy na začátku procesu najedou do nulových pozic, odkud se začnou pohybovat dle instrukcí zadaných v G-kódu. Tiskárna poté začne procházet souborem G-kódů krok za krokem, čímž nastartuje samotný proces tisku. Ten probíhá již zcela automaticky a není potřeba žádných zásahů operátora. Nicméně z bezpečnostních důvodů je přítomnost operátora doporučována. Mezi další počáteční přípravy také patří nahřívání podložky a tiskové hlavy neboli extruderu. Následuje samotný proces tisku, jeho doba trvání je závislá na velikosti a komplexnosti tisknutého objektu. Většina tiskáren operátorovi na ovládacím panelu ukazuje, kolik času zbývá odhadem do dokončení, nebo v jaké procentuální fázi tisku se zrovna proces nachází. Po dokončení tisku všechny osy opět najedou do nulových pozic, tím je proces ukončen a operátorovi je umožněno odebrat hotový výtisk. [23]

## 5. TECHNOLOGIE 3D TISKU

Je mnoho technologií, pomocí kterých může být dosaženo 3D objektu, nicméně všechny jsou založeny na stejném principu, a to vytvoření výtisku pomocí nanášení jednotlivých vrstev na sebe, dle programu. Každá níže zmíněná technologie má své výhody i nevýhody, proto mají rozdílné primární využití. Při výběru 3D tiskárny, jak pro osobní nebo komerční využití, je proto potřeba pečlivě zvážit míru požadavků, které budou kladeny na tiskárnu. Tyto technologie se liší použitou formou tiskového materiálu a principu jeho vytvrzení. [20]

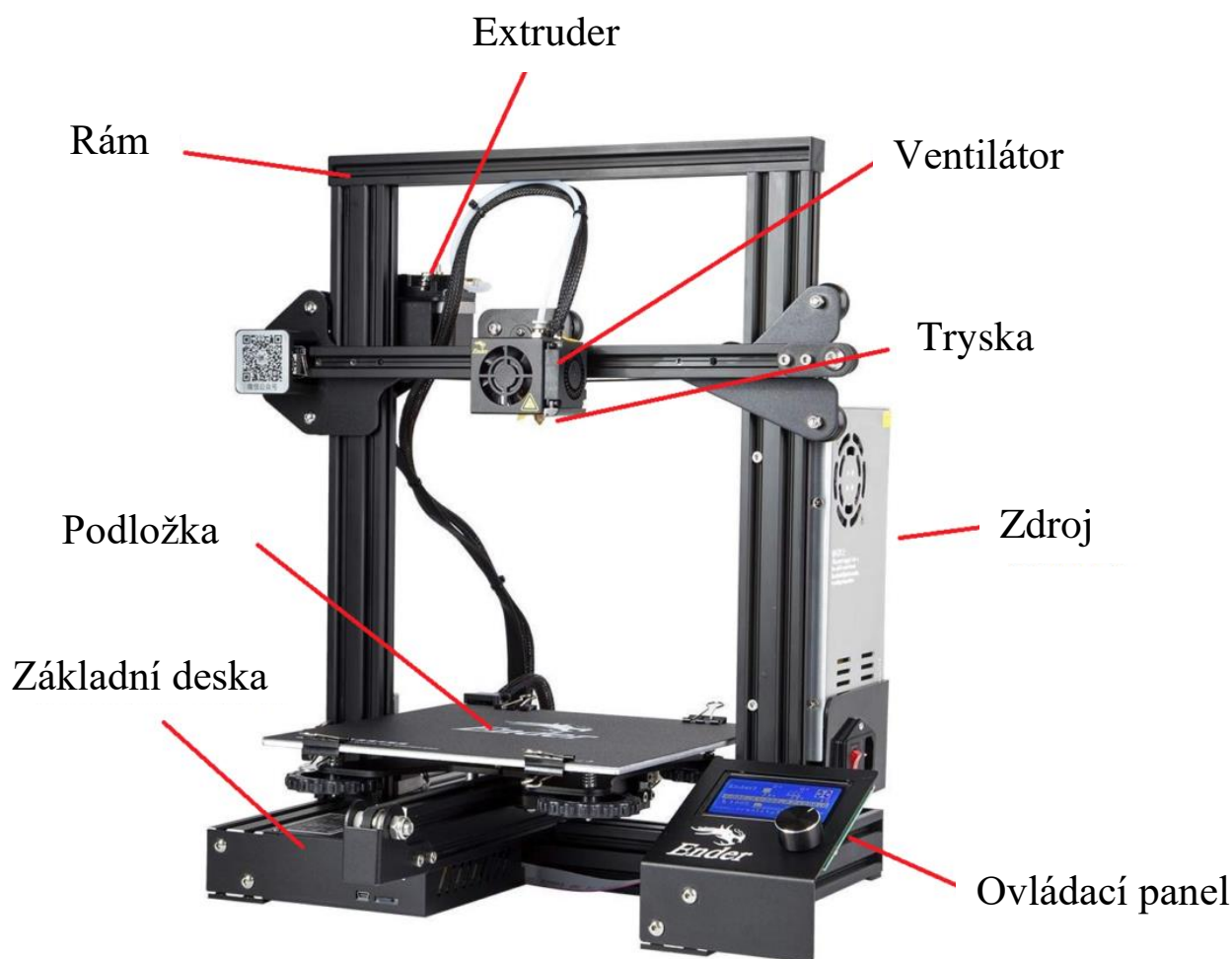
### Základní rozdělení dle tiskového materiálu:

- **Tisková struna** – materiál ve formě struny je vytlačován přes rozehrátou trysku;
- **Tekutý materiál** – materiál je vytvrzován UV světelným paprskem na předdefinovaných místech;
- **Jemný prášek** – materiál je spékán nebo taven světelným paprskem. [20]

### 5.1 Fused Deposition Modelling (FDM)

Obecně se jedná o nejrozšířenější a nejdostupnější technologii 3D tisku. Tiskovým materiálem bývá nejčastěji plast ve formě struny většinou o průměru 1,75 mm. Struna pak prochází tiskovou hlavou (extruderem) skrz nahřátou trysku a už jako natavená, je postupně nanášena vrstvu po vrstvě na místa definovaná G-kódem. Tento proces je opakován, dokud tiskárna neprojde celým souborem G-kódů. Tisková hlava během procesu tisku má možnost vypínat a zapínat tok materiálu, z důvodu změny pozice. Existují i tiskové struny o vyšším průměru, nicméně s sebou nesou i nevýhodu v podobě obtížnějšího dávkování materiálu. Tisková struna není na manipulaci nijak škodlivá či nebezpečná, a tak zacházení s ní je velice jednoduché. Ve srovnání s technologiemi používající jako tiskový materiál prášek či pryskyřici, u kterých se objevují rizika spojená s jejich manipulací. Zásobník tiskového materiálu je ve formě cívky, na které je tisková struna namotána a během tisku odvíjena. Na výsledném výtisku jsou patrné jednotlivé tiskové vrstvy, jejichž výška se pohybuje v rozmezí 0,05 mm do 0,30 mm, při použití trysky o průměru 0,40 mm. [20]





Obrázek 5.1 Konstrukce FDM tiskárny [32]

#### Konstrukce FDM tiskárny:

- **Tisková hlava** – vtahuje tiskový materiál ze zásobníku a následně ho elektrickým topným tělesem natavuje;
- **Tryska** – poslední část tiskové hlavy, kterou prochází již roztavený tiskový materiál a nanáší se na podložku. Trysky se musejí čistit a lze je vyměňovat za trysky s jiným průměrem;
- **Vyhřívaná podložka** – horizontálně umístěná rovná plocha, na kterou je tisk realizován. Její vyhřívání brání kroucení materiálu;
- **Rám a základna** – dohromady tvoří nosnou konstrukci celé 3D tiskárny, jejich tuhost se promítá v kvalitě tisku z důvodů eliminací vibrací;
- **Cívka s tiskovým materiálem;**
- **Krokové motory** – ovládají veškeré pohyby tiskové hlavy a podložky v prostoru 3D tiskárny. Mimo to zajišťují vtahování tiskového materiálu do tiskové hlavy;

- **Ventilátor** – reguluje proces chlazení jednotlivých vrstev, k zajištění kvalitnějšího spojení mezi nimi; [25]
- **Řídící jednotka** – skládá se ze základové desky, která řídí celý proces tisku, konající tak na základě čtení G-kódu a ovládacího panelu s displejem. [20]

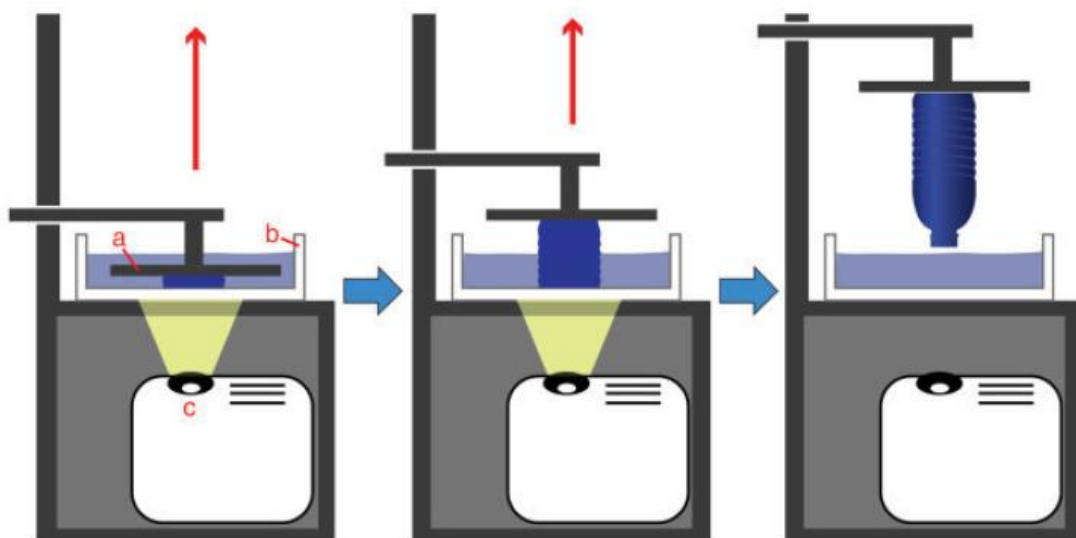
## 5.2 Stereolitografie (SLA)

Stereolitografie byla první technologií 3D tisku a je stále používána, nicméně v menší míře než technologie FDM. SLA používá principy fotopolymerizace, kde paprsek UV světla (popř. laseru) o dané vlnové délce, způsobuje spojování molekul tekutého tiskového materiálu k tvorbě polymeru, 3D výtisku. Nejčastěji se jako tiskový materiál používá světlocitlivá pryskyřice. Výtisk je formován na perforované podložce, umístěné těsně pod hladinou tiskového materiálu. Paprsek světla se pak dle G-kódů pohybuje v osách X a Y a osvětluje tato místa, a tím a tvoří vrstvu materiálu na hladině tiskového materiálu. Osvícením tiskového materiálu se materiál okamžitě vytvrzuje a platforma se po dokončení celé vrstvy posune v ose Z nahoru, vždy o vzdálenost ekvivalentní výšce jedné vrstvy. Na základě konstrukce 3D tiskárny se podložka buď pohybuje v ose Z nahoru nebo dolů, dle umístění zdroje světla. Výška jedné vrstvy záleží na výkonu světla a jeho rychlosti. Další vrstva je pak vytvořena na vrstvě předešlé a pokračuje se tak až do dokončení výtisku. Výtisky vytvořené touto metodou jsou charakteristické hladším povrchem a detailnějším provedením, nicméně tisková plocha je menších rozměrů a také je celý tisk časově náročnější. Mimo to, výtisky složitějších tvarů potřebují podpěry, což omezuje svobodnou volbu orientace výtisku na podložce. Po manuálním odstranění podpěr zůstávají na povrchu drobné stopy, proto je nutné vzít v úvahu na jaké straně se tyto podpěry nacházejí. Většina hotových výtisků musí ještě projít dotvrzovacím procesem pod UV světlem, a mimo to musí být umyty v izopropylalkoholu od zbytků pryskyřice zanechané na povrchu výtisku. Další odlišností oproti technologii FDM je vyšší cena tiskového materiálu. Operace s neošetřenými výtisky se musí provádět v rukavicích a také je doporučeno odvětrávání během tisku, z důvodu zápachu pryskyřice. [26]

### 5.2.1 Digital Light Processing (DLP)

Technologie DLP vychází z SLA s tím rozdílem, že je zdroj UV světla nahrazen digitálním projektorem. Tento projektor je ve většině případů umístěn vespuď pod nádobou s tiskovým materiálem. Požadovaný tvar je pak promítnut na celý zásobník pryskyřice, a tím se na daných místech vytvoří pevná vrstva na podložce. Tato metoda umožňuje vytvrzování celé vrstvy zároveň. U menších osobních DLP 3D tiskáren je projektor umístěn naboku a obraz je promítán přes sérii zrcadel. Tato technologie si nese výhody spojené s technologií SLA, ze které vychází. V porovnání s technologií SLA s laserem je DLP vhodnější na tisk větších objektů, z důvodu osvětlení celé plochy najednou. [27]





Obrázek 5.2 Technologie 3D tisku DLP [25]

### 5.2.2 Masked Stereolithography (MSLA)

MSLA používá jako zdroj světla síť UV LED diod, které svítí na LCD displej, jež působí jako předloha/maska. Požadovaný tvar je zobrazen na displeji ve formě čtvercových pixelů. Velikost těchto pixelů ovlivňuje kvalitu tisku. Pokud je pixel rozsvícen, projde ním UV světlo a v tom místě dojde k vytvrzení pryskyřice, pokud nesvítí světlo neprojde. Rozlišení displeje má dopad na rozlišení výsledného výtisku, protože je v osách X a Y pevně dané. Při použití této technologie je opět možné tisknout více objektů najednou. Nízké pořizovací ceny LCD displejů umožnily rozšíření této technologie pro domácí 3D tiskárny používající pryskyřici jako tiskový materiál. [28]

### 5.3 Selective Laser Sintering (SLS)

U technologie SLS je tiskový materiál ve formě jemného prášku a jako zdroj světla je použit laser. Na začátku je jemný prášek nanesen válcem na podložku a poté se na ni sintruje (spéká), další vrstvy jsou již nanášeny na vrstvy předchozí. Paprsek působí jen na místa předdefinována modelem, čímž vzniká pevný objekt požadovaného tvaru. Proces tisku končí kompletně zasypaným hotovým výtiskem. Laser je součástí řízené hlavy, která se pohybuje v osách X, Y, zatímco podložka se pohybuje v ose Z. Po každé vrstvě se tato podložka sníží o výšku jedné vrstvy a válec nanese novou vrstvu prášku. Proces tisku včetně podložky se nachází v uzavřené komoře, která zabezpečí uchování nepoužitého prášku, který je možno na konci tisku shromáždit do zásobníku a opět použít. Tento nespečený prášek také funguje jako opora pro výtisk, proto je při této technologii tisku menší potřeba podpěr. V této komoře, při některých technologiích práškového tisku, je přítomen inertní plyn jako je argon, k předcházení oxidace. Při tisknutí modelu

s dutými prostory, je důležité zanechat drobné otvory pro vysypání nepoužitého prášku. Kvalita tisku je závislá na průměru a výkonu paprsku a jeho rychlosti pohybu. [26]

Obdobnou technologií je Selective Laser Melting (SLM), s tím rozdílen, že zde je tiskový materiál úplně roztaven. Primárně se využívá pro výtisky, kde je potřeba vysoká pevnost a hustota materiálu, proto tiskovým materiálem bývá nejčastěji kov. Výsledný výtisk bývá z jednoho typu kovu. U této technologie je větší nutnost podpěr z důvodů vyšších hmotností výtisku a možných látkových deformací, jako výsledek působení vysokých teplot. [28]

Pro slitiny kovů se používá technologie Direct Metal Laser Sintering (DMLS), opět fungující na stejném principu včetně sintrování a ne úplného tavení. [28]

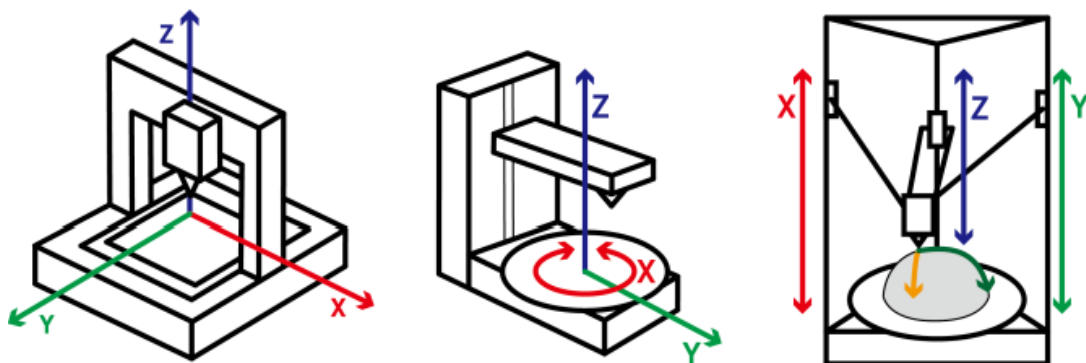


Obrázek 5.3 Výtisky z SLS 3D tiskárny [30]

## 6. KONSTRUKCE A ŘÍZENÍ 3D TISKÁREN

Doposud byly probrány technologie samotného 3D tisku, nicméně to, jakým způsobem se tiskový materiál dostane na požadované souřadnice bude probráno v této kapitole. Problematika konstrukce a tím i kinematiky 3D tiskáren vychází z řízení klasických CNC strojů.

Se stále se rozvíjejícími technologiemi 3D tisku se zároveň vyvíjí i jejich kinematika. V podstatě jde o způsob, jakým se tisková hlava 3D tiskárny pohybuje v trojrozměrném prostoru, který je definovaný třemi souřadnicemi X, Y a Z, s cílem tisknutí materiálu. Vlastnosti výsledného výtisku jsou velice závislé na konstrukci a kinematice dané 3D tiskárny. Různá provedení kinematiky mají odlišné charakteristické vlastnosti, které se promítají do kvality výtisku a samotné délky tisku. Proto je důležité nebrat při výběru tiskárny v úvahu pouze technologii tisku, ale i kinematiku.



Obrázek 6.1 Kartézská, polar a delta kinematika 3D tiskáren [36]

### 6.1 Kinematiky 3D tiskáren

Drtivá většina domácích 3D tiskáren je založena na kartézské kinematice, jejichž konstrukce je nejčastěji čtvercového či obdélníkového tvaru. Mezi jejich výhody patří nižší pořizovací náklady, nenáročný servis a také jsou jednodušší na pochopení. Příklad takové tiskárny je na obrázku 5.1.

Kartézské tiskárny jsou charakteristické tím, že každá osa je řízena minimálně jedním krokovým motorem, a to pouze v lineárním pohybu. Pohyby v ose X bývají nejčastěji doprava a doleva, v ose Y dopředu a dozadu a v ose Z nahoru a dolů. Ovládací krokové motory, pak pomocí řemenů nebo závitových tyčí realizují zadané pohyby k dosažení požadované destinace tiskové hlavy. Systémy užívající řemeny jsou charakteristické vyššími rychlostmi, proto bývají ve většině případech využity k pohybu v ose X a Y, zatím co závitové tyče se používají k pohybu v ose Z. V praxi se můžeme ve většině případů setkat s dvěma základními typy kartézských tiskáren. Jedna varianta pohybuje

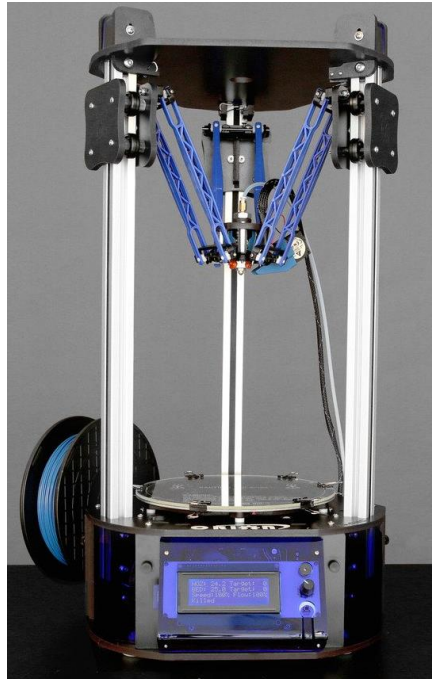
tiskovou hlavou v ose X a Z, a podložka se pohybuje v ose Y. Druhou možností je pohyb tiskové hlavy v osách X a Y, zatímco podložka se pohybuje nahoru a dolů v ose Z. [23]

Vyspělejší kinematiku nabízejí non-planar 3D tiskárny, které umožňují tisk zaoblených tvarů. Takové povrchy jsou typické absencí viditelných „schodků“, vytvořených jednotlivými vrstvami, které jsou typické pro klasický FDM tisk. Non-planar tiskárny eliminují tento nedostatek díky pohybu ve všech osách zároveň, což umožňuje vytvořit velice jemný zaoblený povrch na výsledném výtisku. Nevýhodou této technologie je náročnější software, který musí generovat specifický soubor G-kódu. Další podmínkou k non-planar tisku je více volného prostoru v okolí trysky a tiskové hlavy. [39]

### **6.1.1 Delta tiskárny**

Extruder delta tiskárny je zavěšen na třech (nebo více) ramenech uprostřed konstrukce tiskárny. Tato ramena jsou všechna dohromady spojena právě v místě extruderu. Opačné konce ramen jsou připojeny na vertikální kolejnice, které tvoří konstrukci tiskárny a jsou umístěny v trojúhelníkovém rozložení v němž se dole nachází nepohyblivá tisková podložka. Pohyb v ose Z je realizován pohybem všech ramen současně stejným směrem, zatímco pohyby v osách X a Y jsou výsledkem relativní pozice jednotlivých ramen. To znamená, že k dosažení požadované pozice musí ramena vykonávat vhodné kombinace pohybů i ve směrech opačných, k sobě navzájem. Během realizování všech požadovaných pohybů v osách X, Y, Z musí být zajištěna vodorovná poloha samotného extruderu. [33]

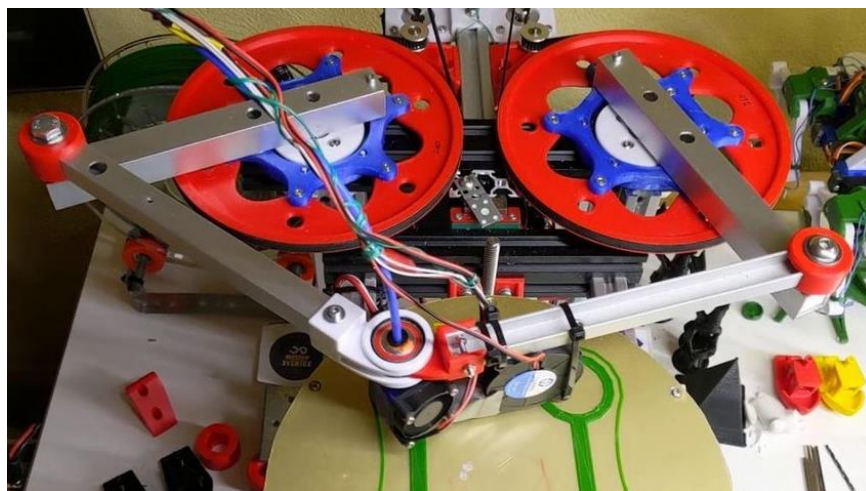
Výhodou provedení delta oproti kartézským tiskárnám je velikost tiskového prostoru v ose Z, ačkoliv je velká část tohoto prostoru nevyužita z důvodu délky ramen, a vyšší rychlost pohybu tiskové hlavy. To umožňuje nižší hmotnost pohybované aparatury, které je dosaženo díky umístění extruderu na konstrukci tiskárny a tiskový materiál je pak naváděn do trysky pomocí bowdenu (PTFE trubičky). Mezi nevýhody, mimo vyšší pořizovací náklady, patří i náročnost spojená se stavbou a následnou kalibrací. [34]



Obrázek 6.2 Delta 3D tiskárna [36]

### 6.1.2 Selective Compliance Assembly Robot Arm (SCARA)

Tiskárny založené na kinematice SCARA mají extruder připojený na dvojici robotických ramen ovládaných dvěma krokovými motory, které pohybují s extruderem v ose X a Y, zatím co se celá konstrukce pohybuje nahoru pomocí dalšího krokového motoru v ose Z. Častá je také absence klasické tiskové podložky, což zajišťuje celkově kompaktnější konstrukci tiskárny. Další výhodou je relativně vysoká rychlost tisku. Mezi nevýhody patří jednoznačně vysoké pořizovací náklady a také absence jisté úrovně tuhosti konstrukce, které jiné kinematiky nabízejí. [35]



Obrázek 6.3 SCARA 3D tiskárna [35]

### 6.1.3 CoreXY

Pohyb tiskové hlavy v osách X a Y u CoreXY tiskáren realizuje sestava rozvodových řemenů a kladek, poháněných dvěma krokovými motory. Požadovaná pozice v osách X a Y je dosažena kombinací pohybů řemenů, realizovaných oběma motory. Pohyb v ose Z obstarává tisková podložka pomocí závitových tyčí. Mezi jejich výhody patří velká tisková plocha, minimum vibrací, z důvodu umístění krokových motorů na konstrukci tiskárny a ne přímo na ose, nízká váha konstrukce a relativně vysoká kvalita tisku. Nevýhodou je pak jejich vysoká cena, nízká účinnost a vyšší náchylnost na chyby způsobené např. vytaháním řemenů. [35]



Obrázek 6.4 Rozvodové řemeny CoreXY 3D tiskárny [38]

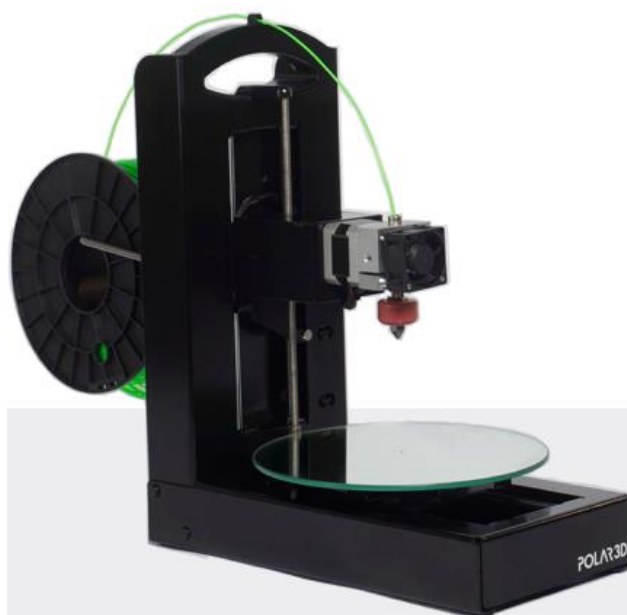
### 6.1.4 H-bot

H-bot kinematika využívá stejného principu jako CoreXY, a to pohybů realizovaných pomocí rozvodového řemene a soustavy kladek. H-bot využívá pouze jeden řemen a dva krokové motory. Řemen na konstrukci tiskárny tvoří písmeno „H“, z čehož vychází jeho název. Tímto řemenem je realizován pohyb v osách X a Y, zatímco podložka se stará o pohyb v ose Z. Výhodou H-bot kinematiky je veliký tiskový prostor, nízká váha pohyblivých dílů a minimum vibrací. Na druhou stranu jde o drahé a rozměrné stroje. [35]



### 6.1.5 Polar tiskárny

Polar tiskárny nevyužívají kartézských souřadnic, jako všechny výše zmíněné kinematiky. Namísto toho využívají polární soustavu souřadnic, která je definována jako dvojrozměrný souřadnicový systém využívající vztahu vzdálenosti daného bodu na kruhové rovině a jeho úhlu vzhledem k počátku souřadnic. Samotný tisk pak probíhá na rotační tiskové podložce, která se navíc pohybuje v jedné horizontální ose, zatím co tisková hlava se nad podložkou pohybuje v ose Z. Mezi jejich výhody patří menší celkové rozměry a menší počet krokových motorů, který dělá tiskárnu tišší a méně energeticky náročnou. Bohužel výsledná kvalita tisku není na tak vysoké úrovni jako u jiných kinematik. [35]



Obrázek 6.5 Polar 3D tiskárna [37]

## 6.2 Firmware 3D tiskáren

Termínem firmware se označuje software, který slouží jako komunikační člen s hardwarem stroje. Jeho funkcí je číst instrukce definované v G-kódu vygenerované slicerem a převádět je na elektrické signály, které ovládají hardware jako jsou například motory. V závislosti na typu firmwaru bývá nahraný buďto přímo na řídicí desce tiskárny nebo na jinou externí výpočetní techniku. Mimo pohyb krokových motorů zajišťuje i spínání nahřívání extruderu, ovládání rychlosti tisku a otáčky motorů, definování tiskové plochy, definování maximálních hodnot hardwarových položek a mnoho dalšího. V dnešní době většina prodávaných 3D tiskáren má již nějaký firmware nahraný, ať už se jedná o volně dostupný Marlin, Repetier či Klipper nebo firmware daný výrobcem jako je Prusa firmware.

Všechny firmwary obsahují ve svých konfiguračních souborech již předepsané instrukce, které si uživatel aktivuje a definuje dle potřeby na vlastní tiskárnu. Může jít o její rozměry, maximální teplotu a počet extruderů, počet motorů, umístění koncových spínačů, PID regulaci a další. Přesný název takových proměnných se může u různých firmwarů lišit, proto není přechod z jednoho firmwaru na druhý úplně přímočarý, nicméně se všichni autoři firmwarů snaží dělat svá prostředí co nejintuitivnější. Rozdíly mezi několika typy firmwaru budou detailně popsány v následujících podkapitolách. Uživatel si na základě svých požadavků a možností vlastního hardwaru vybere typ, který mu bude nejvíce vyhovovat k jeho tiskárně, řídicí desce a plánovanému použití. K modifikaci firmwaru a jeho nahrání do 3D tiskárny je zapotřebí počítač a programovací rozhraní odpovídající programovacímu jazyku firmwaru. Tím může být C/C++ či například Python. [40]

### **6.2.1 Marlin**

Marlin je jednoznačně nejrozšířenějším firmwarem mezi 3D tiskárnami. Nejen uživatelé samotní, kteří si ho volně můžou stáhnout a použít, ale dokonce i někteří výrobci 3D tiskáren ho již automaticky dodávají k jejich produktům. Jedná se o open-source firmware, což zajišťuje rozsáhlou komunitu, která představuje jeden veliký zákaznický servis, který se stará o co nejrychlejší identifikace a odstranění případných chyb. Nynější verze Marlinu (2.0.x) jsou zaměřené primárně na 32bitové desky, které na trhu převažují, nicméně jeho verze 1 fungovala na 8bitových deskách AVR od firmy Atmel. Aktuálně Marlin funguje pro architektury, jakou jsou STM32, ESP32 nebo například SAMD51. Mezi jeho znatelné výhody se řadí vysoká kompatibilita nejen pro 3D tiskárny, řízení teploty PID, krokování motorů, definice délky os, podporuje velké množství jazyků, možnost načítání SD karty, ovládání na LCD displeji či snadné intuitivní prostředí. Mimo to běží na tiskárně samotné, takže není potřeba mít připojený žádný další počítač k fungování 3D tiskárny. Z toho vyplývá i nevýhoda, že část výpočetní kapacity řídicí desky se stará o jeho chod, a ne o funkce tisku. Programovacím jazykem Marlinu je C/C++, proto jeho konfigurování může být například v prostředí Arduino IDE. [41]



```

//#define Z_STEPPER_AUTO_ALIGN
#if ENABLED(Z_STEPPER_AUTO_ALIGN)
  // Define probe X and Y positions for Z1, Z2 [, Z3]
  #define Z_STEPPER_ALIGN_X { 10, 150, 290 }
  #define Z_STEPPER_ALIGN_Y { 290, 10, 290 }
  // Set number of iterations to align
  #define Z_STEPPER_ALIGN_ITERATIONS 3
  // Enable to restore leveling setup after operation
  #define RESTORE_LEVELING_AFTER_G34
  // Use the amplification factor to de-/increase correction step.
  // In case the stepper (spindle) position is further out than the test point
  // Use a value > 1. NOTE: This may cause instability
  #define Z_STEPPER_ALIGN_AMP 1.0
  // Stop criterion. If the accuracy is better than this stop iterating early
  #define Z_STEPPER_ALIGN_ACC 0.02
#endif

```

Obrázek 6.6 Příklad konfigurace firmwaru Marlin

### 6.2.2 Klipper

Klipper je novější, ale opět open-source firmware z čehož vyplývá velká podpora komunity. Na rozdíl od Marlinu je ke Klipperu potřeba další zařízení, na kterém firmware běží. Ať už je to to klasický počítač nebo menší deska, jako je např. Raspberry Pi. Toto přináší jisté výhody i nevýhody. Další rozdílem oproti Marlinu je jeho programovací jazyk, kterým je Python. Nejdůležitější výhodou je jednoznačně rychlejší a přesnější vykonávání pokynů, protože veškerá výpočetní kapacita fungující na externím počítači se stará o tisk samotný. Z čehož také může vycházet vyšší kvalita výtisků. Nevýhodou jsou další náklady a větší prostorová náročnost v závislosti na zvolené výpočetní technice. [40]

### 6.2.3 Repetier

Open-source firmware podobající se svým prostředím a funkcemi Marlinu. Rozdílem je například vyšší počet extruderů, které Repetier podporuje. Další jeho výhodou je přímá kooperace s Repetier-Host slicerem. Celý firmware se konfiguruje stejně jako Marlin a to například v prostředí Arduino IDE. [41]

## 7. MODULÁRNÍ 3D TISKÁRNY

Snaha výrobců 3D tiskáren rozšiřovat funkčnost svých produktů a zároveň tím podpořit kreativitu svých zákazníků stála za vznikem tzv. modulárních 3D tiskáren. Ty jsou schopny několika technologií týkající se zejména prototypové výroby. Jedná se o vylepšení umožňující více výrobních a dokončovacích operací za použití stejné kinematiky původního stroje. Takový modulární stroj pak může šetřit náklady, prostor i čas. Nejčastěji na trhu můžeme nalézt stroje v provedení 3v1. Jedná se v základě o klasickou 3D tiskárnu, která disponuje dalšíma dvěma vyměnitelnými hlavami, které umožňují navzájem odlišné technologie výroby. Příkladem může být Snapmaker 2.0 nebo cenově dostupnější Creality CP-01 3v1. Tyto tiskárny mají mimo klasickou tiskovou hlavu další výměnné moduly, jako je laser a CNC frézka. Náhradní moduly se vyměňují pomocí jednoduchého rychloupínacího systému a následného zapojení kabelu.

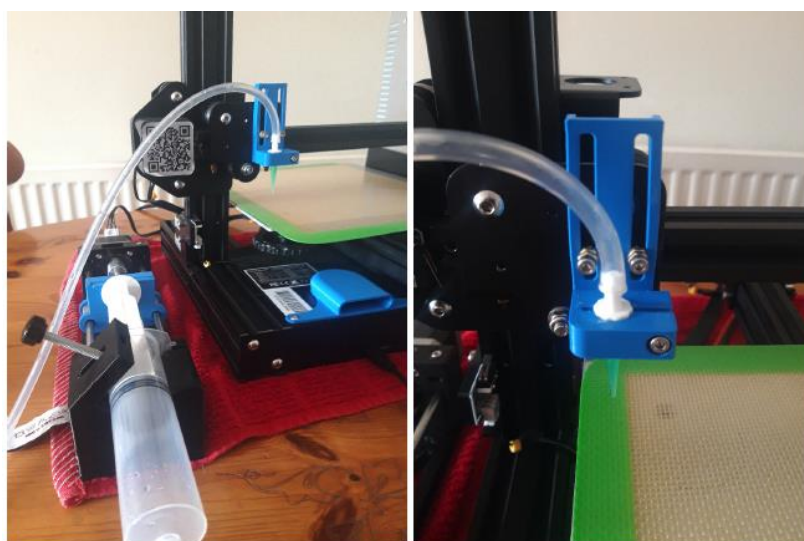


Obrázek 7.1 Creality CP-01 3v1 [43]

Laserový modul umožňuje řezání a gravírování do materiálů jako je dřevo, kůže či akryl. Hlavním parametrem laseru je jeho výkon, na kterém bude záviset schopnost celého stroje pracovat jako laserová gravírovačka. Pokud si tuto modifikaci dělá uživatel sám, jedná se o méně náročnější úkon, u kterého se musí zajistit jen řízení výkonu dodávaného do laseru a jeho uchycení. Laser se poté pohybuje dle definovaných souřadnic stejně jako FDM tiskárna na základě G-kódu, zatímco je výkon jeho paprsku regulován. Dalším důležitým bodem u takové modifikace je bezpečnost, a to především povinnost nosit ochranné brýle při práci nebo zakrytovat pracovní prostor stroje.

CNC frézka umožňuje zásadní změnu technologie, a to z aditivního procesu, jakým je 3D tisk, na subtraktivní metodu, která je charakteristická odebráním materiálu ze surového kusu. Jedná se o velice univerzální modifikaci, která umožňuje vrtání nebo frézování nejčastěji dřeva. Výhodou je možnost použití různých velikostí vrtáků, fréz či jiných nástrojů v závislosti na dostupném kroučícím momentu a otáčkách vřetene. Proces odebrání materiálu s sebou nese velké množství odpadu, na které musí být stroj připraven, aby např. nedošlo k nechtěnému vniku částic do pohyblivých částí stroje.

Mezi další možné modifikace patří změna na tisk pastovitých materiálů. K této technologii je zapotřebí nádoba, nejčastěji válcovitého tvaru, s otvorem na konci (např. velká injekční stříkačka), ze které je vytlačován materiál na definované souřadnice, stejně jak u klasického FDM tisku. Proces extruze může být realizován např. závitovou tyčí s maticí, která zajišťuje rovnoměrný tlak na píst extrudéru. Rotační pohyb závitové tyče zajišťuje krokový motor s převodovým ústrojím. Nákladnější, ale preciznější realizace mohou být s aktuátorem, který umožňuje velmi přesné dávkování včetně retrakce. Celé tiskové ústrojí může být buď umístěno na nástrojové hlavě nebo na rámu či úplně mimo prostor stroje. Vytlačovaný materiál je pak v tomto případě dopravován do tiskové hlavy pomocí vhodné trubičky. Toto provedení je uvedeno v [44] a na obrázku níže.



Obrázek 7.2 Tisk pastovitých materiálů [44]

Cílem vzniku modulárních 3D tiskáren je využití principů 3D strojů i pro jiné technologie při zachování kvality 3D tisku a zajištění stejné přesnosti při použití výměnných modulů. V ideálním případě budou všechny tři technologie na stroji fungovat bezchybně a bez výrazných změn v kvalitě. Dalším benefitem modulárních tiskáren je používaná jednoduchost výměny jednotlivých modulů, jejich zapojení a změny ve firmwaru.

## 8. VUT 3D FDM TISKÁRNA

Praktická část této práce se bude zabývat 3D tiskárnou, která byla postavena studentem v roce 2019, jako projekt bakalářské práce. Jedná se o kartézskou FDM 3D tiskárnu, která byla navržena, jako přesné, rychlé, konstrukčně jednoduché ale modifikovatelné zařízení.

Rám tiskárny je sestaven z kombinace hliníkových T-slotových profilů 3030 a 2020, dle vzoru tiskáren Cube. Menší z dvojice profilů byl využit na stavbu rámečku pro tiskovou podložku, kde není takový nárok na tuhost a nižší hmotnost rámečku je výhodou. I když hlavním konstrukčním prvkem jsou hliníkové profily, jedná se ve výsledku o relativně těžký a prostorný stroj.

Pohyb v osách X a Y je zajištěn krokovými motory s kuličkovými šrouby o průměru 16 mm se stoupáním 16 mm. Zároveň tyto šrouby slouží jako nosná konstrukce tiskové hlavy tiskárny. Vzniklý osový kříž při náhlých změnách pohybu, zejména ve dvou osách současně, se stranově vychyluje, což by mohlo vyřešit nasunutí kuličkových šroubů v koncových pouzdrech do víc než jednoho radiálního ložiska, jak sám autor v závěru své práce navrhuje. Obě strany jsou pak přidělovány na lineární vozíky a kolejnice.

Osa Z byla inspirována klasickým systémem, který je realizován vodícími a trapézovými tyčemi o průměru 12 mm a dvěma krokovými motory. Bohužel se ukazuje, že zvolená ložiska pohybující se po vodících tyčích disponují vůlí, a tak se celá tisková podložka vychyluje ze strany na stranu. Toto je pravděpodobně způsobeno nekvalitními ložisky jejichž výměnou by se tato chyba měla aspoň z části eliminovat. Další variantou může být výměna POM matic, které zajišťují pohyb po trapézových tyčích a jejich uložení. Teoretický tiskový prostor tiskárny je 20x22x21 cm (VxŠxH).

Velká část konstrukčních prvků byla vytisknuta na 3D tiskárně v duchu RepRap z PET-G plastu se 70% výplní, které jsou s ostatními konstrukčními částmi spojeny sešroubováním. Některé z nich se ukázaly jako poddimenzované a došlo u nich ke změně vlastností či znehodnocení, kvůli čemuž budou muset být přemodelovány a přetisknuty. Zároveň bude možné vyztužení kolmých spojení profilů úhelníky, vyřezanými na laseru z 2 mm tlusté nerezové oceli. Toto bude mít dopad na zvýšení hmotnosti, nicméně by se tak mohl stát stroj pevnějším, stabilnějším a přesnějším.

Tisková hlava byla s úmyslem vytvoření modifikovatelného stroje navržena se slotem, do kterého se požadovaný nástroj zasouvá. Elektronika celé tiskové hlavy je pak propojena se zbytkem řídicího systému pomocí 15-ti pinového konektoru Canon. Tisk obstarává celokovová hlava E3D V6 s tryskou 0,4 mm. Autor ke konci práce také navrhuje vyměnění extruderu za model s převodovkou, který by zajistil větší kvalitu výtisku při vyšších rychlostech tisku. S tím se také pojí návrh na jiný model trysky, a to s delší tavnou zónou. Nicméně jde spíše už o vylepšování než nutný zákrok.

Srdcem tiskárny je řídicí deska Re-ARM s 32bitovým mikroprocesorem LPC1768 Cortex-M3 a rozšiřující nadstavbou RAMPS 1.6+, která mimo jiné nese motorové drivery TMC2208 firmy Trinamic. Koncovými spínači na osách X a Y jsou optické brány, a na

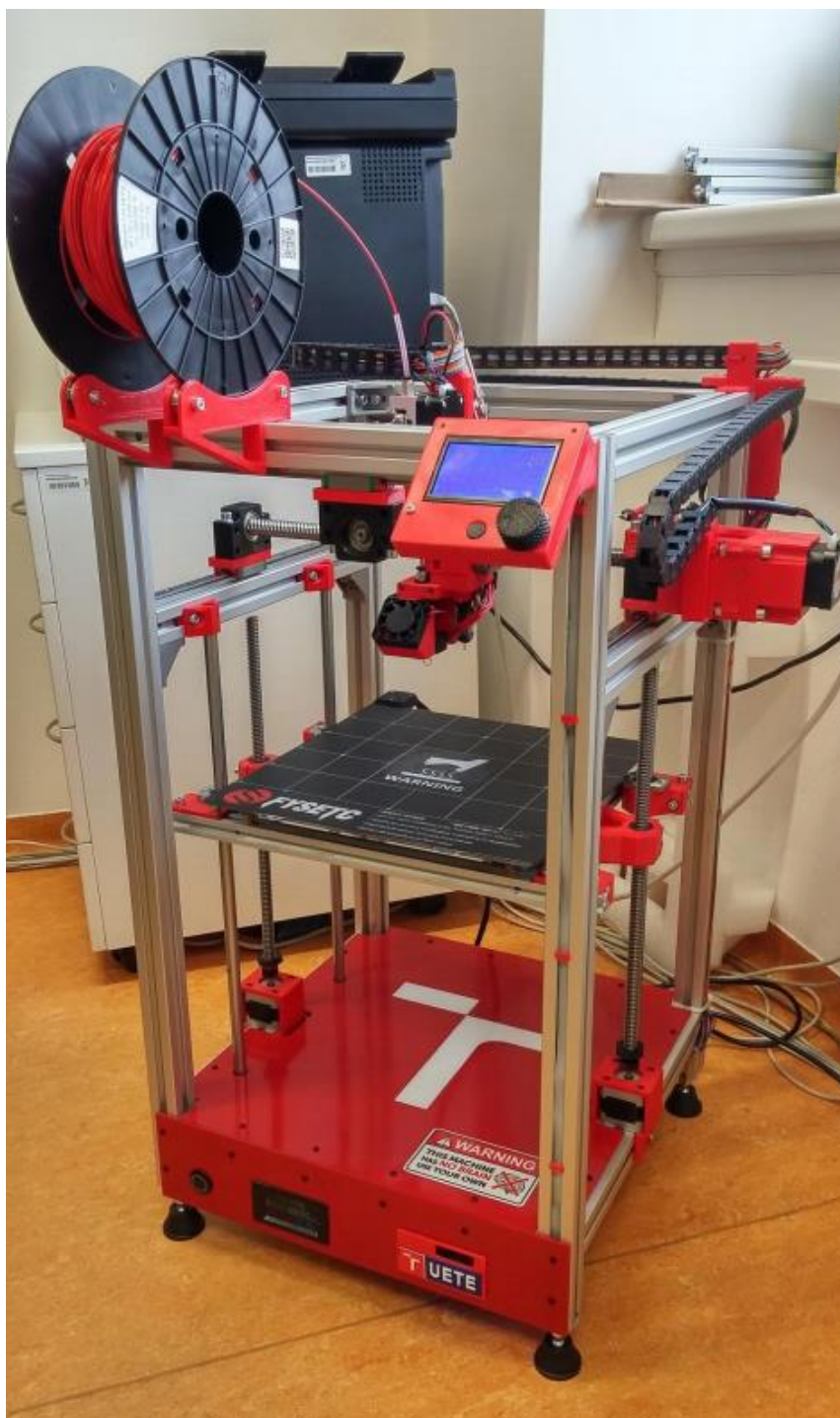
ose Z dotyková sonda 3DTouch, která umožňuje v kombinaci s firmwarem funkci vyrovnání vyhřívané tiskové podložky. I když je stávající řešení funkční, z bezpečnostního hlediska by bylo vhodné zvážit doplnění o další dva kusy limitních spínačů na opačné konce os, které bezpečně zastaví nežádoucí pohyb a předejde se destrukci materiálu, při nečekaných potížích. Další variantou mohou být softwarové endstopy. Jedná se o nenákladné bezpečnostní vylepšení, které z dlouhodobého hlediska může ušetřit náklady spojené s náhradou některých součástí.

Celý stroj pohání 350 W zdroj s napájecím napětím všech prvků 24 V, který je umístěn, včetně řídicí desky a další elektroniky, na spodní straně tiskárny. Kabeláž a celkové rozložení jednotlivých prvků je značně neuspořádané, jelikož byla funkčnost upřednostněna před mechanickým provedením. K uspořádání všech vodičů lze nainstalovat kabelové žlaby, které učiní spodní část tiskárny úhlednější a bezpečnější.

Komunikace s tiskárnou probíhá přes LCD displej 12864 s dvěma tlačítky a s nainstalovaným firmwarem Marlin verze 2.0.0. Verze firmwaru, jež ovládá stroj již zastarala, takže bude vhodné zvážit aktualizaci na novější verzi. Část práce se bude věnovat i doděláním předchystaných nápadů, jako je například tlačítko s aretací a červeně podsvíceným logem VUT, které v tuto chvíli nemá žádnou jinou než okrasnou funkci. Přesná funkce bude ještě upřesněna, na základě poznatků posbíraných během práce na tiskárně.

Část ze zmíněných nedostatků, které se na stroji objevily mohou být způsobeny faktem, že tiskárna byla postavena již před dvěma lety a nebyla pravidelně používána a servisována. Jiné se zanesly již při stavbě a vyhodnotily se v tu chvíli jako optimální řešení nebo jde o drobnosti, na které se přišlo až ke konci práce při kontrolních tiscích. Důsledkem některých nedostatků může být fakt, že dokončování práce na tiskárně probíhalo v časovém presu.

I přes výše zmíněné nedokonalosti se jedná o velice promyšlený stroj, který byl student schopen od základu postavit a zprovoznit do funkčního a použitelného stavu.



Obrázek 8.1 VUT FDM 3D tiskárna před úpravami [42]



## 9. KONTRUKČNÍ ÚPRAVY STROJE

Jak již bylo zmíněno výše, uvedená 3D tiskárna, kterou se práce zabývala, byla předchozím autorem dokončena a splňovala zadání. Po podrobném seznámením se s její funkcí a konstrukčním řešením bylo nutno eliminovat určité nedostatky, které nebránily klasickému 3D tisku, ale zabraňovaly přestavbě na modulární stroj. Změny v technickém řešení, jejich úpravy a nové konstrukční uzly budou popsány v následujících podkapitolách.

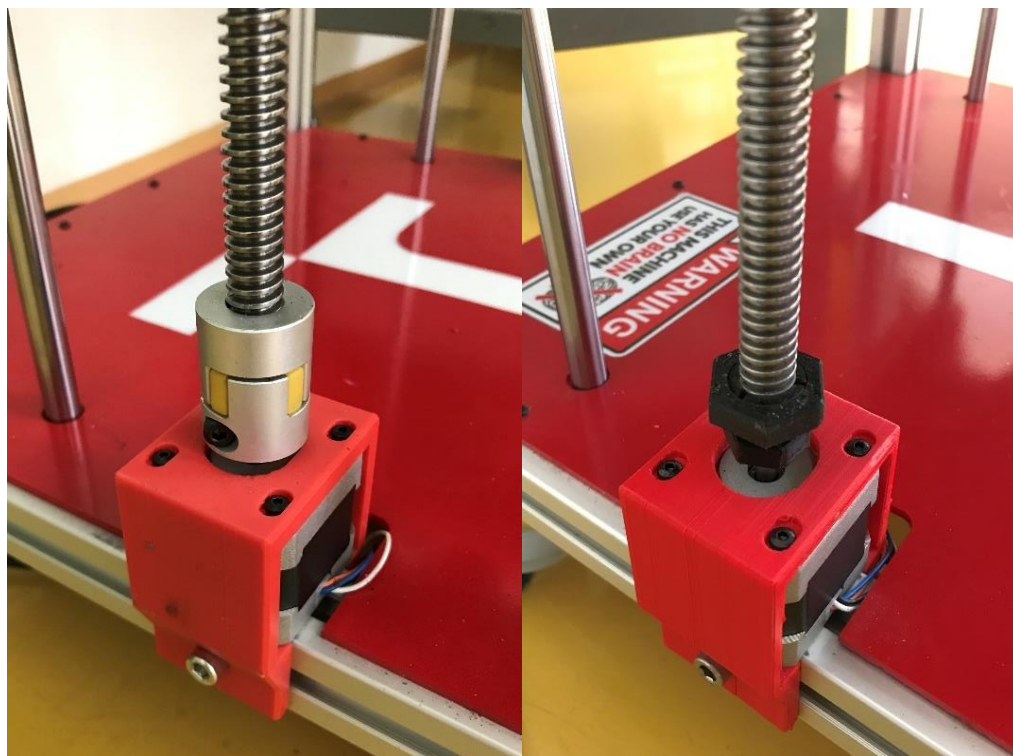
### 9.1 Uložení osy Z

Jedním z nedostatků bylo vychylování tiskové podložky ze strany na stranu ve vertikální rovině způsobené použitím levných a nevyhovujících komponentů. Konkrétně se jednalo o kluzná ložiska a jejich uložení. Stávající ložiska byla nahrazena ložisky od firmy Igus, které dělají celou konstrukci osy Z lehčí, přesnější a také bezúdržbovou. Bylo tedy nutné přemodelovat a přetisknout držáky těchto ložisek z důvodu rozdílných rozměrů a jiného způsobu uložení. Tímto krokem se nežádoucí vychylování podložky vyřešil jen z části, drobné vychylování se stále vyskytuje. Zde by bylo variantou ještě vyměnit POM závitovou maticí, která se pohybuje po trapézových tyčích, za novou kvalitnější kovovou, namísto stávající plastové. Dalším krokem by mohlo být umístění vodících tyčí a jejich uložení přesně do rohů tiskové podložky, a tím se vychylování dále omezilo. Vyměněny byly všechny čtyři držáky ložisek, na obrázku níže jsou na ukázkou porovnány dva nové a dva staré. Součástí přestavby osy Z byla náhrada z plastových a konstrukčně neodpovídajících pružných spojek na precizní pružné spojky z hliníku, které svými stálými vlastnostmi zajistí delší životnost a přesnost pohybů osy Z. Jedná se o pružné spojky s pryžovou vložkou, která odstraňuje možnou nesouosost hřídele krokového motoru a trapézové tyče. Dalším vylepšením celé konstrukce osy Z byl přetisk obou držáků krokových motorů, které zajišťují pohyb dvou trapézových tyčí, které byly popraskané a již tak nesplňovaly svoji funkci v požadované míře.



Obrázek 9.1 Nové držáky ložisek osy Z (vlevo) a jejich předchůdci

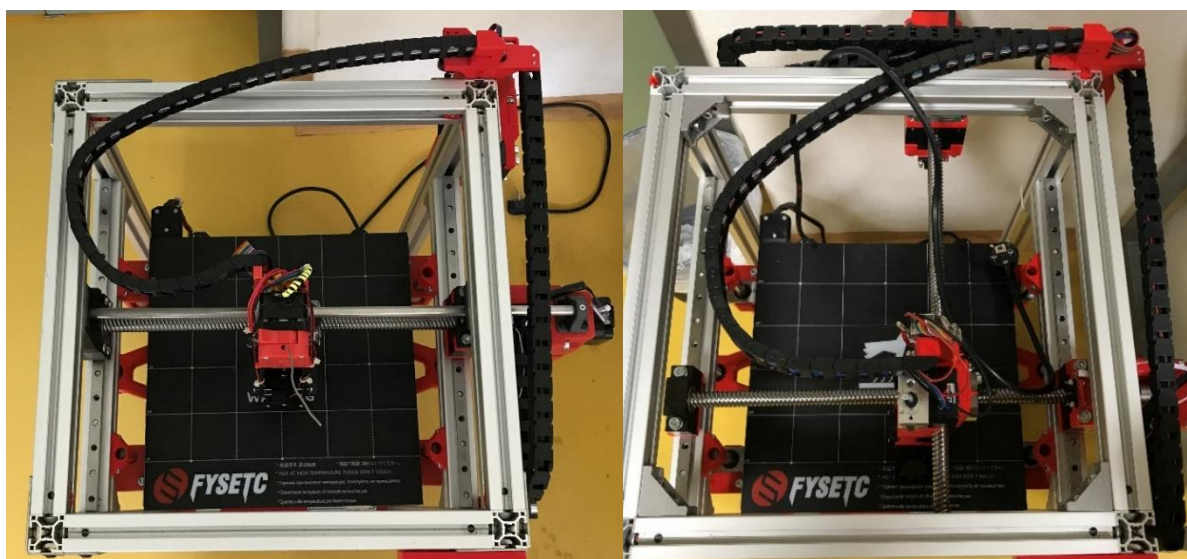




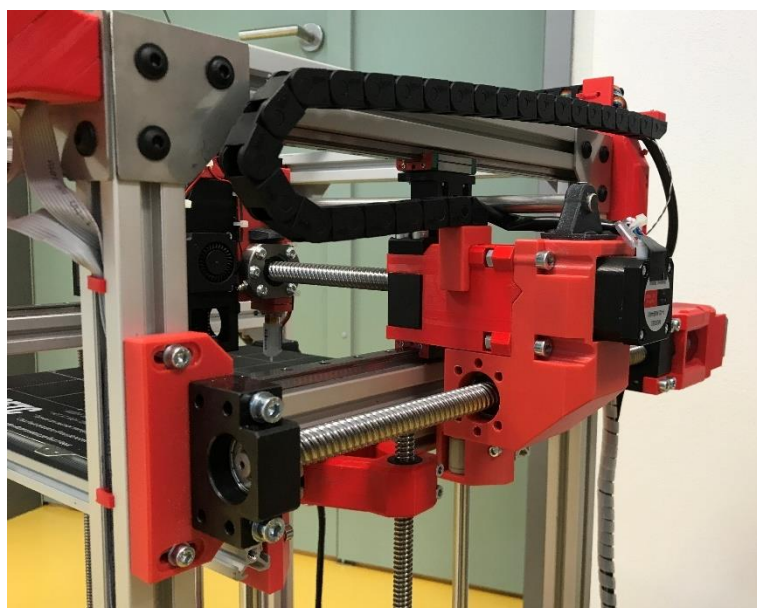
Obrázek 9.2 Porovnání nových pružných spojek a předchozího řešení

## 9.2 Realizace pohybu os X a Y

Modifikací prošlo také původní konstrukční řešení pohybu v osách X a Y, kdy nosným prvkem nástrojové hlavy byla dvojice kuličkových šroubů typu 1616. Tyto šrouby v původním řešení tvořily osový kříž, který znemožňoval jakoukoliv úpravu na modulární stroj a jednoduché řešení vyměňování jednotlivých modulů tak nebylo možné. Zmiňovaný osový kříž měl znatelné vůle, které opět měly negativní vliv na tisknutý výrobek. Kříž byl tvořen robustními kuličkovými šrouby a kuličkovými matkami. Vyšší hmotnost ovlivňovala kinematiku ideální pro pohybující se aparaturu 3D tiskárny. Řešením bylo přesunutí kuličkového šroubu osy Y na vnější stranu tiskárny, mimo tiskový prostor, čímž se značně uvolnil pracovní prostor stroje a snížila hmotnost pohybovaného aparátu. Toto umožnil vymodelovaný a vytisknutý blok, který využil stávající uchycení krokových motorů a spojil tak krokový motor osy X s kuličkovou maticí HIWIN osy Y, čímž je realizován vzájemný pohyb obou os. Provedení těchto úprav je možné vidět na Obrázku 9.3 a Obrázku 9.4 na další straně.



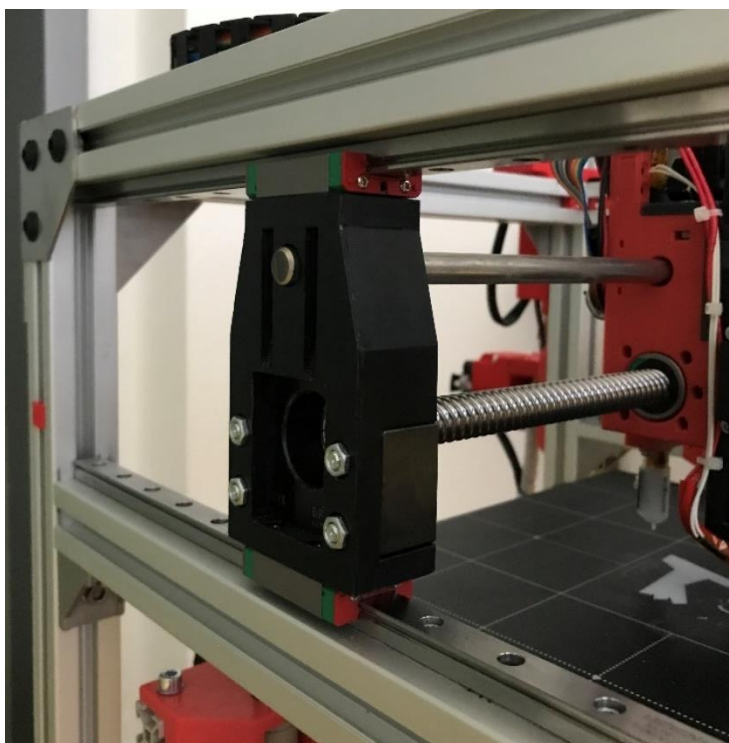
Obrázek 9.3 Porovnání nového řešení (vlevo) a původního



Obrázek 9.4 Realizace vzájemného pohybu os X a Y

Zároveň byly na bočních stranách osy X přidány dvě kolejnice s vozíky značky HIWIN, které byly nainstalovány na vrchní profily naproti stávajícím kolejnicím a vozíků na profilech spodních. Tímto krokem je pohyb koncových bloků osy X realizován po dvou rovnoběžných kolejnicích, což do jisté míry snížilo vůle, které stroj měl. Nově namodelované a vytisknuté koncové bloky na kolejnice, musely být nainstalovány k realizování úpravy. Tento krok se kompletně neosvědčil, a to z důvodu nepřesné základní konstrukce stroje, čímž nebyly zajištěny stálé rozchody vrchního a spodního profilu, na které se kolejnice a vozíky instalovaly, což způsobovalo nadměrné pnutí a tím

i mechanický odpor. K zajištění kolmosti nové nástrojové hlavy a snížení vychylování osy X byla použita ocelová hlazená vodící tyč o vnějším průměru 10 mm. Ta prochází čtyřmi otvory (koncový blok osy X, nástrojová hlava, druhý koncový blok osy X a dodatečné uchycení na krokovém motoru osy X) a v posledním z nich je uchycená šroubem. Během práce s kolejnicemi a vozíky značky HIWIN došlo i k jejich servisu v podobě vyčistění a namazání.

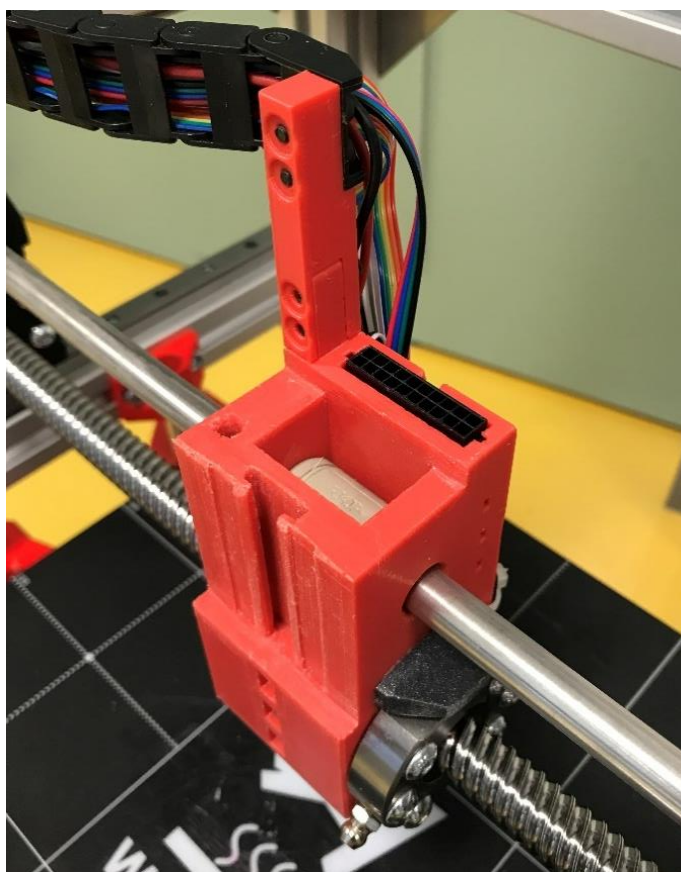


Obrázek 9.5 Nový koncový blok osy X

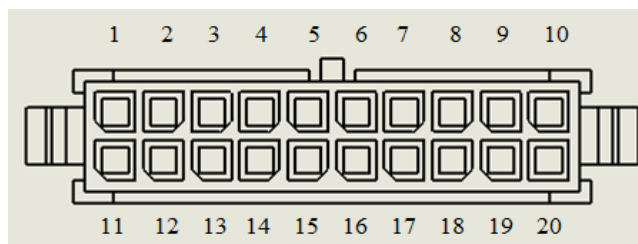
Nejdůležitějším bodem celé přestavby z osového kříže pouze na jednu osu v tiskovém prostoru stroje, bylo namodelování nové nástrojové hlavy. Ta v sobě nese kuličkovou přírubovou matici HIWIN, stejně jako na druhé ose, a další ložisko od firmy Igus, kterým prochází vodící ocelová tyč. Podmínkou nové nástrojové hlavy byla jednoduchá a rychlá výměna jednotlivých nástrojových modulů včetně zapojení elektroniky. To je zajištěno tvarovanou drážkou, kterou disponuje nástrojová hlava, do které se jednotlivé moduly zasunou v kolmém směru a poté zafixují jedním M4 šroubem. V kombinaci s přepojením konektoru Micro-Fit od firmy Molex s 20-ti piny, jde o všechny mechanicky nutné kroky k výměně modulu. Samotná výměna tedy zabere přibližně 3 minuty v kombinaci se změnou firmwaru. K zapojení byly vybrány pozlacené krimpovací piny pro lepší vodící schopnosti, které v kombinaci s tělem konektoru garantují maximální možné proudové zatížení až 5A. Proto tento konektor je schopen obsáhnout v plné míře silové i signálové vodiče tj. méně zatěžované vodiče. Silový je zejména vyhřívání hot endu, kde je větší proudové zatížení. Zásuvka konektoru je elegantně umístěna v těle nástrojové



hlavy, kde je zapuštěna v předem namodelovaných drážkách tomu uzpůsobených. Zároveň zde byly vytvořeny dva montážní otvory, a tak je konektor možné vytáhnout k případným servisním úkonům. Konektor v této chvíli obsahuje 6 nevyužitých pinů pro případná vylepšení či servisní zásahy. Všechny vodiče vstupující do zásuvky i vidlice tohoto konektoru jsou označeny čísly, jejíž identifikační tabulka je zde také přiložena. Toto opět na původním řešení chybělo, a tak veškeré servisní práce byly značně časově náročnější. Jediný prvek, který zůstává bez ohledu na typ nástroje, a tak není součástí konektoru, je dotyková sonda BLtouch, která se používá jako koncový spínač osy Z. Mimo jiné také umožňuje vyrovnaní tiskové podložky. BLtouchem byl nahrazený původní 3D Touch, který je méně kvalitním klonem BLtouche od firmy Antclabs. BLtouch je uchycen na konzoly, která je zasouvána do drážky na spodní straně nástrojové hlavy, což zajišťuje při budoucích změnách nástrojů jednoduché nastavení odsazení ve směru osy Z. Nicméně i přes fakt, že BLtouch zůstává na nástrojové hlavě konstantě, je jeho přívodní kabel vybaven rozebíratelným konektorem pro potřeby servisu, výměny či jiného zásahu. Zároveň při přestavbě tiskárny došlo k nahrazení koncových spínačů z optických na mechanické, a to za účelem stálé funkčnosti, která předtím nebyla vyhovující.



Obrázek 9.6 Nová nástrojová hlava



Obrázek 9.7 Zapojení konektoru Molex v nástrojové hlavě

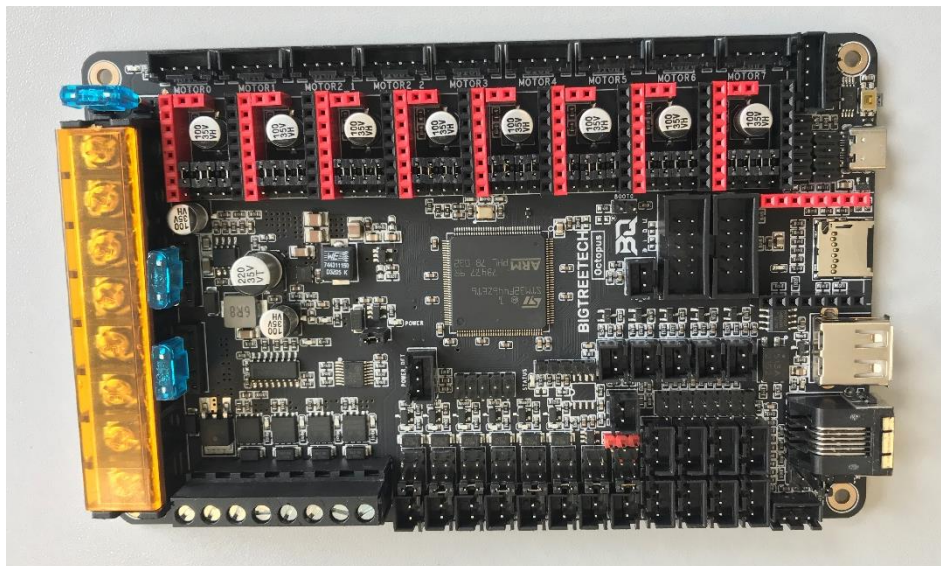
Tabulka 9.1 Zapojení konektoru Molex v nástrojové hlavě

1	První pin termistoru	11	Druhý pin termistoru
2	Ventilátor tisku 2 24V	12	GND 24V
3	Ventilátor tisku 3 24V	13	GND 24V
4	Ventilátor trysky 4 24V	14	GND 24V
5	Heat 2 +	15	Heat 2 -
6	M E/PE B1	16	M E/PE B2
7	M E/PE A1	17	M E/PE A2
8	Rezerva	18	Rezerva
9		19	
10		20	

### 9.3 Elektronika stroje

Mimo konstrukční vylepšení celého stroje došlo i ke značnému zdokonalení výměnou řídicí desky ze stávající zastaralé Arduino s nadstavbou RAMPS na novější a výkonnější řídicí desku BIGTREETECH Octopus 1.1. s 32bitovým mikroprocesorem ATM. Tato deska tiskárně dává větší výpočetní kapacitu a tím i rychlost všech procesů, čímž se dostala o krok blíže k moderním strojům stejného charakteru. Tato deska byla ještě doplněna chladičem čipu desky, který umožňuje lepší odvod tepla, a tak stálejší funkci. Samozřejmě byla aktualizace verze firmwaru, která byla nutná ke spuštění nové desky. Deska je nyní upevněna na nové namodelované držáky na spodní straně stroje, čímž je opět možný servisní zásah, namísto předchozího řešení realizovaného pomocí tavného lepidla. Při přepojování desky také došlo k označení všech vodičů, které na začátku mé práce byly anonymní, a tím nebylo možné rychle identifikovat jednotlivé funkce a trasu, kterou je vodič veden. K označení byly použity štítky s vepsanými zkratkami, které jsou zde přiloženy. Toto umožní budoucím uživatelům přehledně a rychle se orientovat. Součástí celého procesu zvýšení přehlednosti a servisovatelnosti byl vytvořen a zlepšen kabelový management uložením do kabelových žlabů, a tak již nejde o změt neoznačených kabelů různých barev a průřezů. Během těchto činností byly všechny vodiče na koncích řádně nasunuty a zalisovány do dutinek, které jsou v elektrotechnice standardem. Dalším bodem bylo zapojení, na začátku nevyužitého tlačítka s aretací

a logem VUT, na LED podsvícení, kterým tiskárna disponuje. Toto tlačítko je nastaveno na režim NO (Normally Open), kdy při zapnutí tiskárny je LED podsvícení vypnuté a až po jeho zmáčknutí se osvětlení zapne.



Obrázek 9.8 Řídicí deska BIGTREETECH Octopus 1.1.



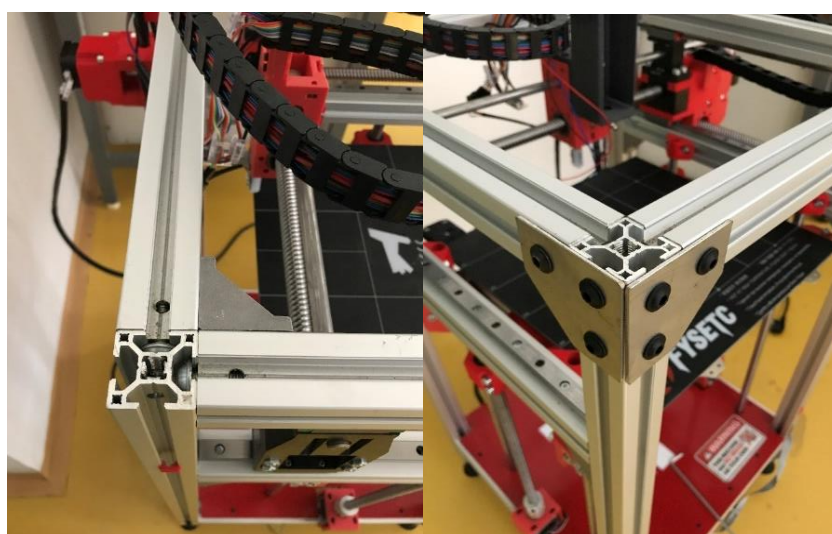
Obrázek 9.9 Pohled na spodní stranu tiskárny po úpravách

Tabulka 9.2 Označení jednotlivých kabelů

Označení vodičů			
Prvek	Zkratka	Prvek	Zkratka
Koncový spínač X	KON X	Ovládací displej	DISP 1
Koncový spínač Y	KON Y	Měřicí displej	DISP 2
Motor X	M X	LED osvětlení	LED
Motor Y	M Y	Vyhřívací prvek tiskové podložky	HEAT 1
Motor Z1	M Z1	Vyhřívací prvek trysky	HEAT 2
Motor Z2	M Z2	Termistor tisková podložka	T 1
Motor extruder / tisku pasty	M E/PE	Termistor tryska	T 2
BLtouch	BLT	Napájení tisková podložka	BED PWR
Ventilátor ovládací desky 1	VENT 1	Napájení krokových motorů	M PWR
Ventilátor tisku 2	VENT 2	Napájení +24V	VCC+
Ventilátor tisku 3	VENT 3	Napájení -24V	VCC-
Ventilátor trysky 4	VENT 4		

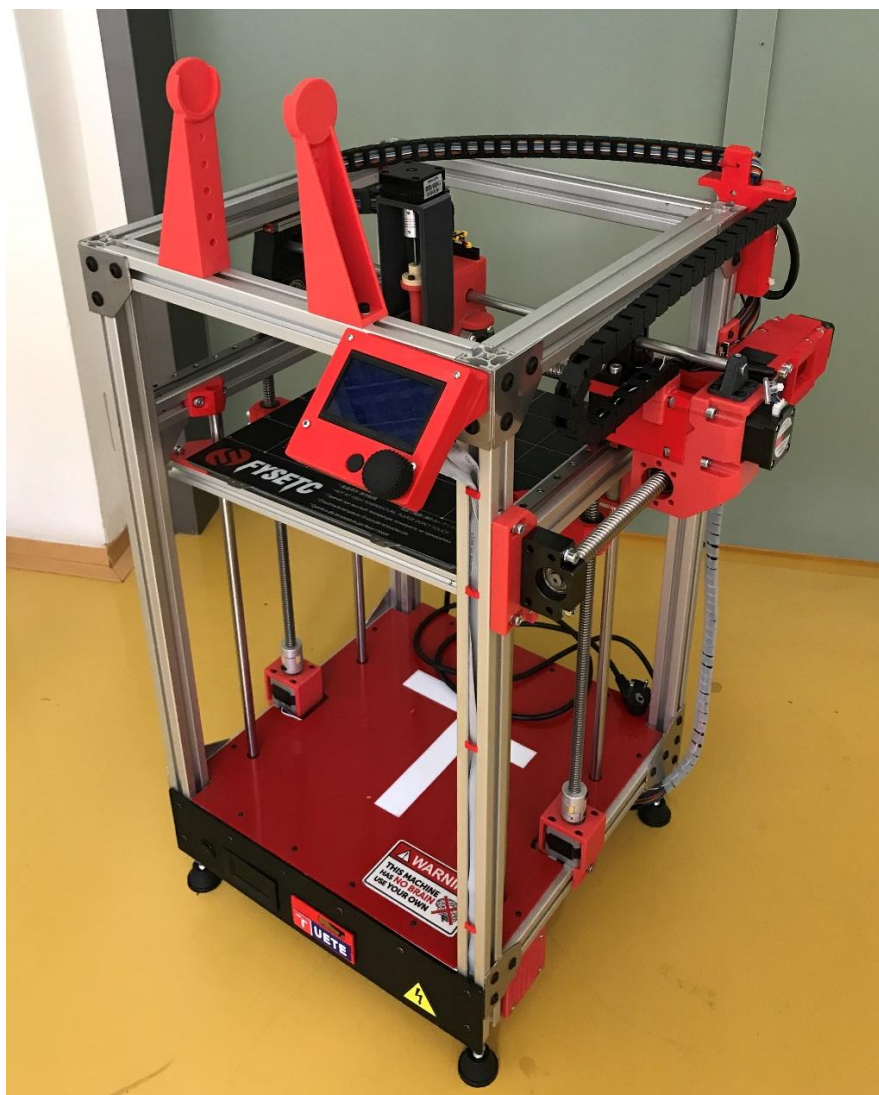
## 9.4 Ostatní vylepšení

K lepšímu ustavení 3D tiskárny byly na stávající nohy našroubovány i kontra matky, které tiskárnu zajišťují ve stabilní poloze a omezují možnou nestabilitu celé konstrukce. Tiskárna tak byla vyrovnána pomocí vodováhy a tyto kontra matky zafixovány. Zpevnění celého stroje bylo dosaženo nainstalováním nerezových prvků ve tvaru „L“ do rohů kostry stroje. Tyto prvky byly vypáleny na laserovém CNC stroji. Což mimo jiné nahradilo minulé řešení, které zasahovalo do tiskového prostoru, jelikož spojovalo dva sousední na sebe kolmé profily ze vnitřní strany stroje. Tímto krokem tak byl zvětšen i tiskový prostor ve směrech X a Y.



Obrázek 9.10 Původní a nové mechanické zpevnění konstrukce stroje





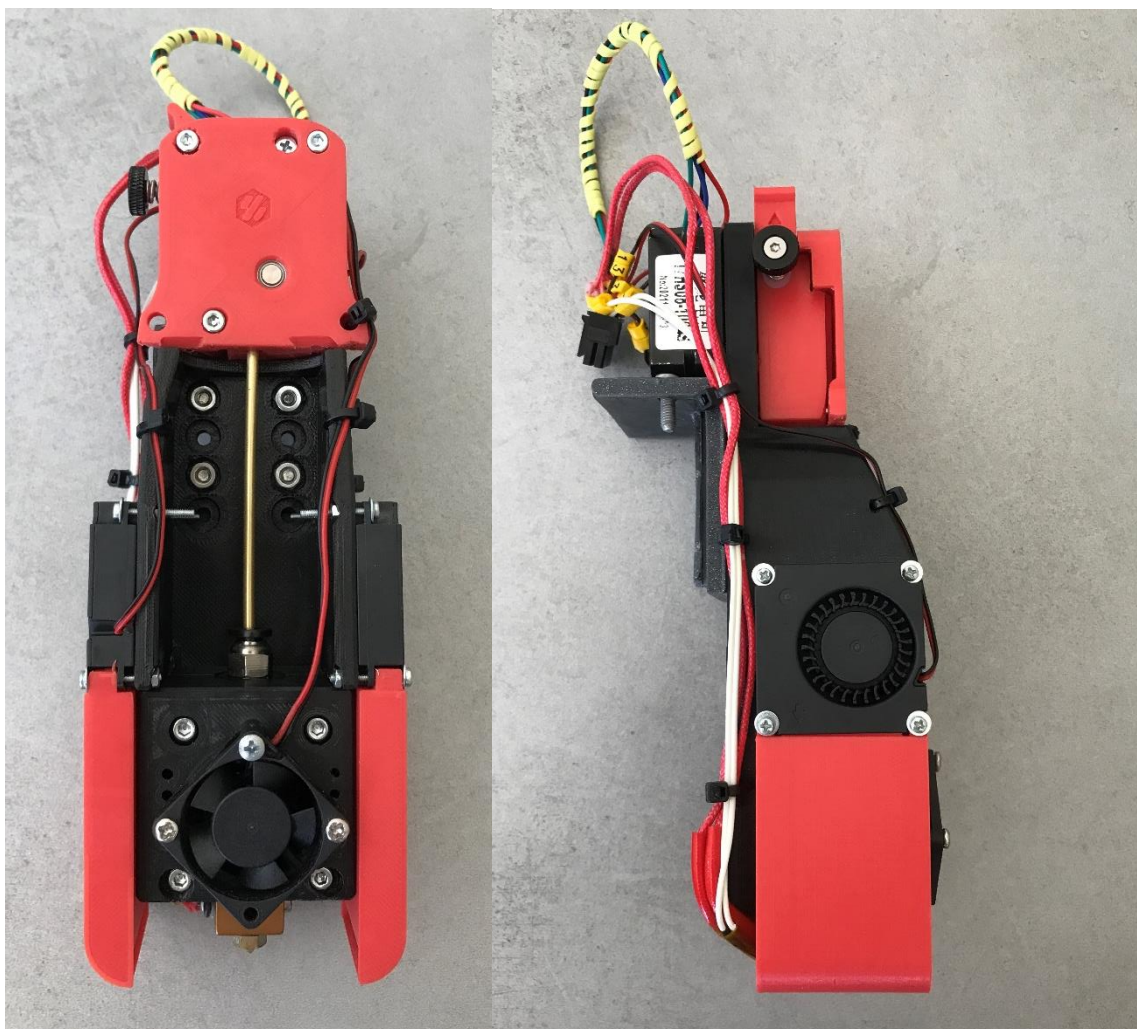
Obrázek 9.11 Tiskárna po všech úpravách

## 9.5 Modul na 3D tisk

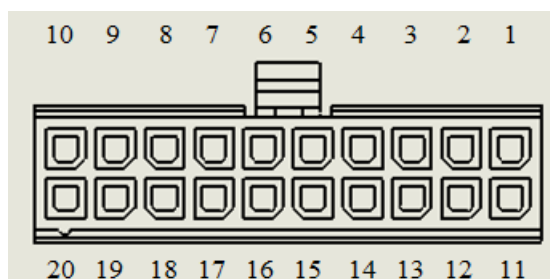
Modul na 3D tisk byl také kompletně přepracován, a to z původního jednoduchého systému *Direct drive*, kdy plastová struna byla natahována jedním krokovým motorem, na jehož hřídeli byl prvek s hrubým povrchem, proti kterému bylo pouze napružené klasické kuličkové ložisko s hladkým vnějším kroužkem. Mezi těmito dvěma prvky byla struna stlačena a natahována do trysky. Toto řešení nevyhovovalo vyšším rychlostem tisku, kdy extruder nestíhal podávat a docházelo k prokluzování struny na hladkém kuličkovém ložisku. Toto bylo vyřešeno použitím převodového ústrojí BMG extruderu s převodovým poměrem 3:1. Extruder nyní obsahuje sérii ozubených převodů, které zajišťují přesnější vtahování tiskové struny i při vyšších rychlostech tisku. Navíc je možné šroubem kalibrovat sílu přitlaku kolečka na strunu, které ji vtahuje. Dalším vylepšením bylo nahrazení měkkého vodícího bowdenu tiskové struny z TPU materiálu za mosaznou



trubičku, která svými stálými vlastnostmi a větší tuhostí zajišťuje větší kvalitu tisku. K sestavení extruderu a nových radiálních ventilátorů tisku do jednoho celku byl opět namodelován nový nosný modul, který odpovídá novým rozměrům a vlastnostem stroje s ohledem na servisovatelnost, přehlednost a výměnu celého modulu.



Obrázek 9.12 Nový modul na 3D tisk



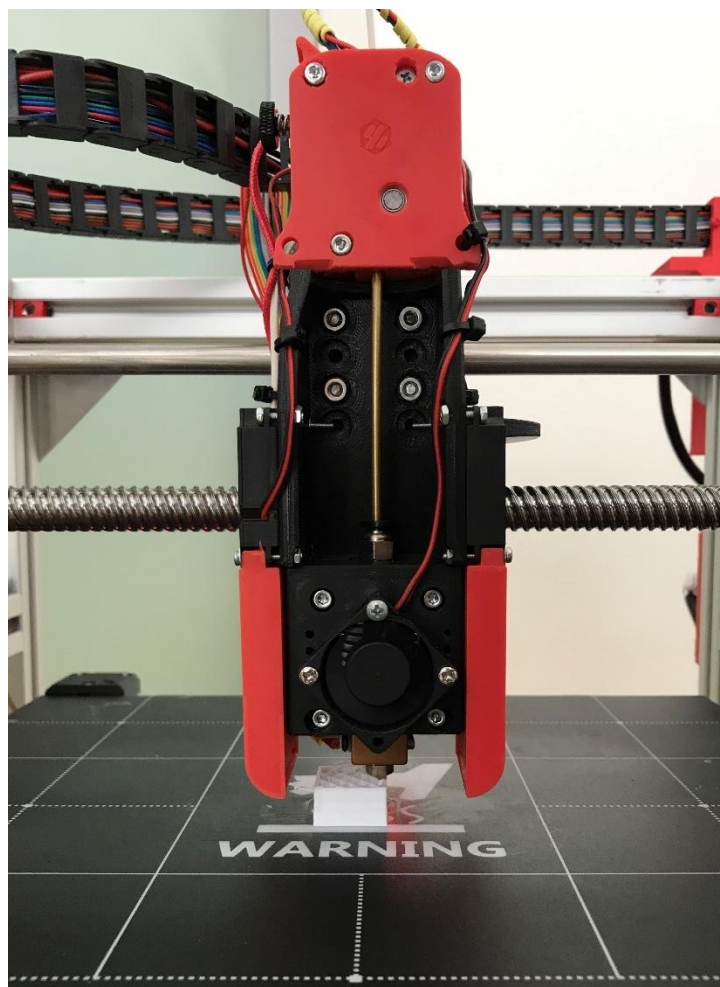
Obrázek 9.13 Zapojení konektoru Molex na modulu na 3D tisk

Tabulka 9.3 Zapojení konektoru Molex na modulu na 3D tisk

1	První pin termistoru	11	Druhý pin termistoru
2	Ventilátor tisku 2 24V	12	GND 24V
3	Ventilátor tisku 3 24V	13	GND 24V
4	Ventilátor trysky 4 24V	14	GND 24V
5	Heat 2 +	15	Heat 2 -
6	M E/PE B1	16	M E/PE B2
7	M E/PE A1	17	M E/PE A2

### 9.5.1 Zkušební 3D tisk

Po kompletaci modulu a odstranění všech nedostatků, které jí předcházely, byl nový modul podroben zkušebnímu tisku. Pro tisk byl použit materiál PLA, jakožto nejrozšířenější a také nejsnáze tisknutelný materiál. Pro tento tisk byla zvolena teplota trysky 215 °C a teplota vyhřívané podložky 50 °C. Rychlost tisku byla nastavena na 100 mm/s a jako zkušební prvek byla vybrána kalibrační krychle o délce strany 20 mm. Tiskem byla ověřena funkčnost modulu, a zároveň odhalena dílčí nedokonalost ve formě nevyhovujících motorových driverů TMC2208, které byly nahrazeny za kvalitnější TMC2209, které umožňují větší proudové zatížení a jeho softwarové nastavení. S těmito drivery již během samotného tisku nedocházelo k neočekávaným problémům. Kalibračních krychlí bylo vytištěno více kusů k přesnějšímu nastavení celého stroje. Ačkoliv výtisk nese drobné nedostatky způsobené přetrvávajícím problémem vychylování osy Z, byl výsledek tohoto zkušebního tisku při stávajících vlastnostech stroje uznán za dostačující.



Obrázek 9.14 Zkušební 3D tisk

## 9.6 Modul na tisk pastovitých materiálů

Modul na tisk pastovitých materiálů je tvořen z držáku, krokového motoru, pružné spojky, trapézové tyče od firmy Igus o průměru 4 mm, namodelovaného pístu s těsněním a tělem standardní injekční stříkačky. Tělo injekční stříkačky se do držáku nasazuje pomocí bajonetového systému upínání, čímž je zajištěna jednoduchost a rychlost výměny. Krokový motor přes pružnou spojku v kombinaci s trapézovým šroubem ovládá píst, který vytlačuje obsah injekční stříkačky na definované souřadnice. Volitelnou šířku trysky, a tak možnost různého použití, zajišťují tomu uzpůsobené dávkovací jehly o různých průměrech. K realizaci tisku pastovitých materiálů není zapotřebí žádného speciálního softwaru a nadále je možné využívat klasického sliceru, který musí být na tuto technologii přenastaven. Primárně v podobě úpravy rychlosti tisku, vyhřívání, šířky trysky a šířky struny. Nezbytným krokem k použití tohoto modulu je také přenastavení kroků motoru.

Tabulka 9.4 Zapojení konektoru Molex na modulu na tisk pasty

6	M E/PE B1	16	M E/PE B2
7	M E/PE A1	17	M E/PE A2



Obrázek 9.15 Modul na tisk pastovitých materiálů

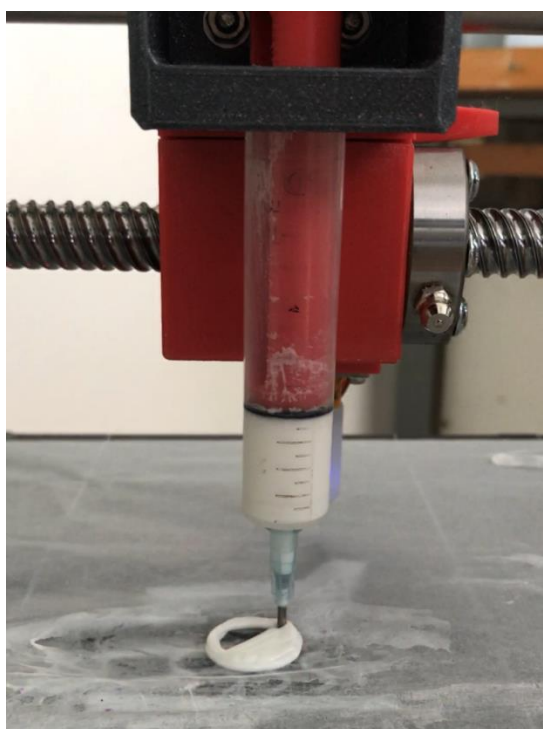
### 9.6.1 Zkušební tisk

Ke zkušebnímu tisku byla zvolena zubní pasta jakožto typ pastovitého materiálu o průměrných vlastnostech z pohledu viskozity. Po sérii odlaďovacích kroků bylo dosaženo dostačující kvality tisku zubní pasty a materiálů jí podobných. Mezi odlaďovací kroky patřilo precizní seřízení rychlosti tisku, nastavení kroků ovládacího krokového motoru a různé průměry jehel. Rychlost tisku byla nastavena na 30 mm/s, při kterém bylo dosaženo nejlepších výsledků. Obecně se jedná o velice nízkou rychlost, nicméně objem injekční stříkačky je vhodný spíše pro menší výtisky, a tak nižší rychlost není až takovou nevýhodou. Dále se testovala různá nastavení jednotlivých kroků krokového motoru, kde nejlepších kvalit bylo dosaženo s 40 kroky na milimetr pohybu. Variantou, jak předejít manuálnímu nastavování kroků dle zvolené trysky, by bylo podrobné nastavení sliceru,



do kterého by byl zadán vnitřní průměr injekční stříkačky, jako průměr struny, a šířka jedné vrstvy by se nastavovala dle zvolené trysky. Toto by teoreticky přenechalo celý výpočet firmwaru za předpokladu správného počátečního nastavení kroků. Zkušební tisk probíhal s jehlou o průměru 1,36 mm. Fotografie z procesu zkušebního tisku je zobrazena na Obrázku 9.16 Zkušební tisk. Cílem bylo vytisknout válec v podobě knoflíkové baterie a průměru 20 mm. Výsledek zkušebního tisku byl opět uznán za dostačující a ověřil tak funkci celého modulu.

Je zřejmé že se specifikace budou měnit s rozdílnou viskozitou vytlačovaných materiálů, s požadavky na vzhled a přesnost a s volbou jehly. Nicméně pokud bude zařízení používáno pouze na jeden druh materiálu, toto nastavení je možné uložit do firmwaru a proces výměny modulu bude o to rychlejší.



Obrázek 9.16 Zkušební tisk

## 10. ZÁVĚR

Teoretická část této diplomové práce se zabírala 3D tiskárnami a CNC stroji, v podobě jejich historie, různých typů obráběcích CNC strojů a jejich programování. Ačkoliv jsou v současnosti CNC stroje hlavním výrobním prostředkem ve většině odvětvích průmyslu a jejich využitelnost stále roste při vyšší aplikaci umělé inteligence, trh s 3D tiskárnami se také neustále rozrůstá. A to zejména v odvětvích, kde klasické CNC stroje nemohou být implementovány, jako například v prototypové výrobě tvarově náročných dílců.

Praktickou část diplomové práce tvořila přestavba stávající VUT FDM 3D tiskárny na modulární stroj schopný více technologických výrobních procesů s předpokladem jednoduché výměny mezi nimi. Samotné práci s moduly z velké části předcházely konstrukční úpravy na stroje, které bylo nutné udělat, aby vůbec mohl takový modulární stroj vzniknout. Mezi ně patřilo vylepšení vzájemného pohybu os X a Y, namodelování a nainstalování nové nástrojové hlavy, nahrazení mnoha konstrukčně nevyhovujících dílů, výměna řídicí elektroniky a dalších. Úpravami bylo dosaženo vyhovujícího stavu stroje k jeho přestavbě. Krom toho úpravy zvětšily tiskový prostor stroje, zlepšila se jeho tuhost, rychlost výpočetních procesů a obecně servisovatelnost stroje.

Byly navrženy dva výměnné moduly s odlišnou technologií výrobního procesu. První z modulů představuje modul na klasický 3D tisk, který prošel kompletní přestavbou za použití extruderu s převody, nových ventilátorů a krokového motoru, a to vše v celkově novém vzhledu a rozložení. Užitná hodnota 3D tiskárny se výrazně zvedla, jelikož prvky použité ke stavbě modulu jsou schopny rychlejšího a přesnějšího tisku.

Druhým modulem byl modul na tisk pastovitých materiálů, který byl postaven kompletně nový. K jeho realizaci bylo použito tělo injekční stříkačky, namodelovaný píst, krokový motor s pružnou spojkou a závitová tyč s matkou. Výsledná funkce modulu splňuje zadání, nicméně pro přesné výtisky bych doporučoval modul zkalibrovat na požadovaný materiál, který bude primárně používán.

Při práci na stroji a implementaci výměnných modulů bylo dosaženo závěru, že stroj je schopný obou výrobních procesů dle zadání. Konstrukce a volba zvolených komponent má stále určitá omezení. Pro další zvýšení kvality bych doporučil přemístění tiskové podložky do středu celé konstrukce, umístění vodících tyčí osy Z do rohů této podložky a jejich nainstalování rovnoběžně s konstrukcí. To by umožnilo další zvětšení tiskového prostoru. Vhodným vylepšením stroje by bylo použití soustavy řemenů a kladek k zajištění souměrného pohybu osy X,

Krom definovaného zadání mé práce byl tento stroj značně vylepšen, zdokonalen a vznikla tak modulární 3D tiskárna schopná více technologických výrobních procesů.

## LITERATURA

- [1] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů IV.0*. Praha: MM publishing, 2018. MM speciál. ISBN 9788090631083.
- [2] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů III*. Praha: MM publishing, 2014. MM speciál. ISBN 9788026067801.
- [3] First commercially available numerically controlled machining center. In: *ASME Milwaukee* [online]. [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: <http://asmemilwaukee.org/21-ncmachinelv.html>
- [4] SMITH, Graham T. *CNC machining technology*. New York: Springer-Verlag, c1993. ISBN 9783540195863.
- [5] APRO, Karlo. *Secrets of 5-axis machining*. New York: Industrial Press, c2009. ISBN 9780831133757.
- [6] Optimum Maschinen - Germany, CNC metal working machinery 2016/17. In: *Diceltro Garraf* [online]. [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: <https://www.diceltro.com/wp-content/uploads/2017/05/OPTIMUM.pdf>
- [7] Comparing the Different Types of CNC Machines. *Monroeengineering* [online]. 3.1.2019 [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://monroeengineering.com/blog/comparing-the-different-types-of-cnc-machines/>
- [8] CNC router. *Raptor Technologies* [online]. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://www.raptor-cnc.com/router.html>
- [9] The 5 Most Common Types of Precision CNC Machining. *Pioneer Service, Inc.* [online]. 16.6.2020 [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://pioneerserviceinc.com/blog/most-common-types-of-precision-cnc-machining/>
- [10] FANUC Delta Robot M3iA. In: *TurboSquid* [online]. 20.10.2015 [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: <https://www.turbosquid.com/3D-Models/delta-robot-m3ia-3ds/970830?referral=3dsecure>
- [11] MAJOU, Félix, Philippe WENGER a Damien CHABLAT. *The Design of Parallel Kinematic Machine Tools Using Kinetostatic Performance Criteria* [online]. 2001 [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0705/0705.1038.pdf>
- [12] ŠTULPA, Miloslav. *CNC: programování obráběcích strojů*. Praha: Grada, 2015. ISBN 9788024752693.
- [13] ŠTULPA, Miloslav. *CNC obráběcí stroje a jejich programování*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 9788073002077.
- [14] JAJE, Jeff. Types of CNC Machining. In: *Autodesk* [online]. [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: <https://damassets.autodesk.net/content/dam/autodesk/www/pdfs/fy17-Types-of-CNC-Machining-ebook-en-FINAL.pdf>
- [15] SMID, Peter. *CNC Control Setup for Milling and Turning*. New York: Industrial Press, 2010. ISBN 978-0-8311-3350-4.

- [16] Vztažné body stroje. In: *Elektronická učebnice* [online]. [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1295>
- [17] KANDRAY, Daniel E. *Programmable Automation Technologies: An Introduction to CNC, Robotics and PLCs*. New York: Industrial Press, 2010. ISBN 978-0-8311-3346-7.
- [18] SMITH, Graham T. *CNC Machining Technology 1: Design, Development and CIM Strategies*. Southampton: Springer-Verlag, 1993. ISBN 978-3-540-19828-4.
- [19] KRÁTKÝ, L. Řídicí systém Sinumerik 808D. In: *První hanácká BOW* [online]. 1.07.2019 [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: <https://www.bow.cz/clanky/ridici-system-sinumerik-808d-22>
- [20] PRŮŠA, Josef. *Základy 3D tisku s Josefem Průšou*. Praha: Prusa Research s.r.o., 2019.
- [21] ZHANG, Jing a Yeon-Gil JUNG, ed. *Additive Manufacturing - Materials, Processes, Quantifications and Applications*. Butterworth-Heinemann, 2018. ISBN 978-0-12-812155-9.
- [22] FLYNT, Joseph. A Detailed History of 3D Printing. In: *3D Insider* [online]. [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: <https://3dinsider.com/3d-printing-history/>
- [23] AHLERS, Daniel. *3D Printing of Nonplanar Layers for Smooth Surface Generation*. Hamburg, 2018. Diplomová práce. Universität Hamburg. Vedoucí práce Prof.Dr. Jianwei Zhang.
- [24] CANESSA, Enriquer, Carlo FONDA a Marco ZENNARO. *Low-cost 3D Printing for Science, Education & Sustainable Development*. ICTP—The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, 2013. ISBN 92-95003-48-9.
- [25] KLOSKI, Liza Wallach a Nick KLOSKI. *Make: Getting Started with 3D Printing*. San Francisco: Maker Media, 2016. ISBN 978-1-680-45020-0.
- [26] GEBHARDT, Andreas. *Understanding additive manufacturing: rapid prototyping - rapid tooling - rapid manufacturing*. Munich: Hanser, c2012. ISBN 978-1-56990-507-4.
- [27] BARNATT, Christopher. *3D Printing: Third Edition*. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2016. ISBN 978-1539655466.
- [28] The Types of 3D Printing Technology. *All3DP* [online]. 7.2.2020 [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/>
- [29] THE MAKERBOT REPLICATOR+. In: *MakerBot* [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.makerbot.com/3d-printers/replicator/>
- [30] Guide to Selective Laser Sintering (SLS) 3D Printing. In: *Formlabs* [online]. [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/what-is-selective-laser-sintering/>
- [31] Haas VF-2. In: *Haas Automation* [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.haascnc.com/cs/machines/vertical-mills/vf-series/models/small/vf-2.html>



- [32] FDM printing basics. In: *ISD* [online]. 23.12.2020 [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://isd-soft.com/tech-blog/enoh-we-have-a-3d-printer-in-the-office-or-fdm-printing-basics/>
- [33] HORVATH, Joan. *Mastering 3D Printing*. Technology In Action, 2014. ISBN 978-1-4842-0026-1.
- [34] FLYNT, Joseph. Cartesian, Delta, and Polar 3D Printers: What are They and What's the Difference? *3D Insider* [online]. 13.3.2019 [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: <https://3dinsider.com/cartesian-vs-delta-vs-polar/>
- [35] O'CONNELL, Jackson. FDM 3D Printers Explained: Cartesian, Delta, CoreXY, & More. *All3DP* [online]. Zář 2020 [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/cartesian-3d-printer-delta-scarab-belt-corexy-polar/>
- [36] CAROLO, Lucas. 3D Printer Axis: The Basics – Simply Explained. In: *All3DP* [online]. Červen 2020 [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/3d-printer-axis-the-basics-simply-explained/>
- [37] Polar 3D Launches Unique Polar Coordinate-Based FFF 3D Printer at CES 2015. In: *3D Print* [online]. 7.1.2015 [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: <https://3dprint.com/35656/polar-3d-printer-ces-2015/>
- [38] *CoreXY Belt Drive* [online]. In: [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <http://www.r2-3d.media-conversions.net/nextgen/Belt.Drive.html>
- [39] O'CONNELL, Jackson. Non-Planar 3D Printing: All You Need to Know. *All3DP* [online]. Únor 2021 [cit. 2021-4-27]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/non-planar-3d-printing-simply-explained/>
- [40] GHARGE, Pranav. 3D Printer Firmware: Best Options in 2021. *All3DP* [online]. Červenec 2021 [cit. 2021-11-01]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/3d-printer-firmware-which-to-choose-and-how-to-change-it/>
- [41] SOARES, Italo. *How to choose a 3D Printer Firmware* [online]. Duben 2016 [cit. 2021-11-01]. Dostupné z: <https://3dprinterchat.com/how-to-choose-a-3d-printer-firmware/>
- [42] INDRA, Zdeněk. *Multifunkční modulární 3D FDM tiskárna* [online]. Brno, 2019  
Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/119588>.  
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Kamil Jaššo.
- [43] Creality3D CP-01 3 in 1 Modular 3D Printer Laser Engraver. *Creality 3D* [online]. [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: <https://creality3d.shop/products/creality3d-cp-01-3-in-1-modular-3d-printer>
- [44] LEECH, Damien, Sonny LIGHTFOOT, David HUSON a Alexandros STRATAKOS. Low-Cost, Modular Modification to a Desktop 3D Printer for General Purpose Gel/Paste Extrusion & Direct Ink Writing. *BioRxiv*. Nottingham, UK, 2021. Dostupné z: doi:10.1101/2021.03.10.434735
- [45] HUDEC, Roman a Zdeněk ONDŘÍŠEK. *Jak naprogramovat N-céčko*. 2016. ISBN 978-80-88058-62-5.

# SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

CNC	Computer Numerical Control
NC	Numerical Control
FDM	Fused Deposition Modelling
FFF	Fused Filament Fabrication
PLC	Programmable logic controller
MIT	Massachusetts Institute of Technology
ZPS	Závody přesného strojírenství
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
EDM	Electrical discharge machining
PKM	Parallel Kinematic Machine
ČSN	Česká soustava norem
ISO	International Organization for Standardization
SLA/SL	Stereolithographic apparatus / stereolitografie
STL	Stereolitografie (formát)
OBJ	Object file
AMF	Additive manufacturing format
DLP	Digital Light Processing
MSLA	Mask Stereolithography
LED	Light Emitting Diode
LCD	Liquid Crystal Display
UV	Ultraviolet
SLS	Selective Laser Sintering
SLM	Selective Laser Melting
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
SCARA	Selective Compliance Articulated Robot Arm
PET-G	Polyethylene terephthalate glycol
VUT	Vysoké učení technické v Brně
PWM	Pulse width modulation
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
NO	Normally Open
PLA	Polylactic Acid
TPU	Thermoplastic Polyurethane
GND	Ground

# SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - PROGRAMOVÁNÍ CNC STROJŮ .....	68
---	----

## Příloha A - Programování CNC strojů

### A.1 Příklady nejčastěji používaných G-kódů a M-kódů [45]

G-kód	Funkce
G00	Lineární interpolace rychloposuvem
G01	Lineární interpolace pracovním posuvem
G02	Kruhová interpolace ve směru hodinových ručiček
G03	Kruhová interpolace proti směru hodinových ručiček
G04	Časová prodleva
G17	Volba pracovní roviny X-Y
G18	Volba pracovní roviny Z-X
G19	Volba pracovní roviny Y-Z
G40	Zrušení korekce poloměru nástroje
G41	Korekce poloměru vlevo
G42	Korekce poměru vpravo
G54-G59	Posunutí nulového bodu
G90	Absolutní odměřování
G91	Přírůstkové (inkrementální) odměřování
M-kód	
M00	Zastavení programu programem
M01	Podmíněný programový stop
M02	Ukončení programu
M03	Vřeteno zapnuto – směr otáčení ve směru hodinových ručiček
M04	Vřeteno zapnuto – směr otáčení proti směru hodinových ručiček
M05	Vypnutí vřetena
M06	Výměna nástroje
M07-M08	Vnitřní / vnější chlazení zapnuto
M09	Chladicí čerpadla vypnuta
M17	Konec podprogramu
M99	Konec hlavního programu