

UNIVERZITA PARDUBICE

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
INFORMATIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2025

Tomáš Vorlíček

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky

3D Tisk robotem TX2-60 Stäubli
Bakalářská práce

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Tomáš Vorlíček**
Osobní číslo: **I22034**
Studijní program: **B0714A150008 Automatizace**
Téma práce: **3D Tisk robotem TX2-60 Stäubli**
Zadávající katedra: **Katedra automatizace a matematiky**

Zásady pro vypracování

Cílem práce je navrhnout a realizovat systém 3D tisku využívající šestiosý robot TX2-60 Stäubli, zahrnující mechanické i softwarové řešení pro přesnou kontrolu tiskového procesu. Práce se zaměří na vývoj a integraci technologií pro robotický 3D tisk s důrazem na praktické využití v průmyslových aplikacích. V rámci teoretické části bakalářské práce bude kladen důraz na analýzu současných přístupů k robotickému 3D tisku. Součástí této části bude rozbor metod komunikace mezi robotem a tiskovým zařízením a také přehled principů specifických tiskových technik.

Praktická část práce se zaměří na návrh mechanických komponent pro instalaci tiskové hlavy na robot, implementace komunikačního rozhraní umožňujícího přesnou kontrolu tiskového procesu a vývoj uživatelského prostředí pro efektivní řízení a monitorování tisku. Klíčovou částí bude vývoj software pro zpětnovazební komunikaci a přesnější řízení tiskové hlavy, s co nejmenší prodlevou. Výsledky práce budou ověřeny konkrétními implementacemi, včetně reálně vytisknutého modelu a jejich následnou analýzou.

Rozsah pracovní zprávy: **cca 40 stran**
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

JORDAN, John, [2018]. *3D printing*. The MIT Press essential knowledge series. Cambridge: The MIT Press. ISBN 978-0-262-53668-4.

AUAT CHEEIN, Fernando A.; PRIETO CABRERA, Pablo and FANTONI, Gualtiero (eds.), [2022]. *Rapid roboting: recent advances on 3D printers and robotics*. Intelligent systems, control and automation. Science and engineering. Cham, Switzerland: Springer. ISBN 978-3-319-40001-3.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Dominik Štursa, Ph.D.**
Katedra informačních technologií

Datum zadání bakalářské práce: **15. prosince 2024**
Termín odevzdání bakalářské práce: **16. května 2025**

L.S.

prof. Ing. Petr Doležel, Ph.D. v.r.
děkan

Ing. Libor Kupka, Ph.D. v.r.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 24. ledna 2025

Prohlašuji:

Práci s názvem 3D Tisk robotem TX2-60 Stäubli jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 10.5.2025

Tomáš Vorlíček

PODĚKOVÁNÍ

Zde bych rád poděkoval panu Ing. Dominiku Štursovi, Ph.D. za vedení bakalářské práce, cenné odborné rady a trpělivost, se kterou mě provázel celým řešením projektu. Jeho přístup mi umožnil rozšířit nejen technické znalosti, ale i přístup k systematické práci.

Velké poděkování si zaslouží také kolegové ze společnosti Stäubli Systems, zejména pan Tomáš Burian a pan Bc. Zdeněk Táborský, za technickou podporu, ochotu sdílet své zkušenosti a přístup k zařízení, bez něhož by realizace této práce nebyla možná.

ANOTACE

Práce se zabývá návrhem a realizací systému 3D tisku za využití šestiosého průmyslového robota Stäubli TX2-60. Cílem projektu bylo vytvořit plně funkční prototyp aditivní výroby založené na technologii FDM, který využívá průmyslový robot nejen pro řízení pohybu, ale i pro přesnou koordinaci tisku. Práce se zaměřuje jak na návrh mechanických komponent pro uchycení tiskové hlavy, tak i na elektronické zapojení systému, softwarovou architekturu, komunikační rozhraní a vývoj uživatelského programu pro převod G-code do formátu využitelného v prostředí robota. Dále se věnuje problematice regulace teploty pomocí PID, zpětné vazbě mezi subsystemy a synchronizaci pohybů robota s dávkováním filamentu. V praktické části je popsáno testování, kalibrace a vyhodnocení výsledků reálného 3D tisku. Výsledkem je stabilní a rozšiřitelný systém vhodný pro budoucí vývoj směrem k non-planar tisku nebo nasazení v průmyslovém prostředí.

KLÍČOVÁ SLOVA

3D tisk, Stäubli TX2-60, průmyslový robot, FDM, PID regulace, G-code, Arduino Nano, RS232, robotické řízení, extruder

ANNOTATION

This thesis focuses on the design and implementation of a 3D printing system utilizing a six-axis industrial robot Stäubli TX2-60. The aim of the project was to develop a fully functional prototype of additive manufacturing based on FDM technology, in which the industrial robot is used not only for motion control, but also for precise synchronization of the printing process. The thesis covers the design of mechanical components for mounting the print head, the electronic wiring of the system, software architecture, communication interface, and the development of a user program for translating G-code into a format readable by the robot. It also deals with temperature regulation via PID control, feedback between subsystems, and the synchronization of robot movements with filament extrusion. The practical section describes the testing procedures, calibration process, and evaluation of real 3D print results. The outcome is a stable and scalable system suitable for further development toward non-planar printing or integration into industrial environments.

KEYWORDS

3D printing, Stäubli TX2-60, industrial robot, FDM, PID control, G-code, Arduino Nano, RS232, robotic control, extruder

Obsah

Obsah	9
SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK.....	12
SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK	14
TERMINOLOGIE	16
ÚVOD.....	17
1 TEORETICKÁ ČÁST	18
1.1 Úvod do robotického 3D tisku.....	18
1.1.1 3D tisk a vývoj technologií.....	18
1.1.2 Rozdíl mezi klasickým a robotickým 3D tiskem.....	19
1.1.3 Možnosti průmyslového využití robotického 3D tisku.....	21
1.2 Průmyslový robot Stäubli TX2-60.....	23
1.2.1 Základní parametry	23
1.2.2 Kinematika a řízení	24
1.2.3 Průmyslové nasazení – kde se využívá.....	25
1.2.4 Možnosti programování	26
1.2.5 Připojení periferií	27
1.3 Elektronické a řídicí komponenty	29
1.3.1 Orbiter V3.0	29
1.3.2 MOSFET tranzistor.....	30
1.3.3 Dvoupolohové relé.....	31
1.3.4 RS232 - TTL převodník.....	32
1.3.5 Arduino Nano	33
1.3.6 PID regulace	35
1.3.7 G-code.....	36

1.4	Komunikace mezi robotem a tiskovým systémem	37
1.4.1	Kombinace robota a externího kontroléru (Arduina)	38
1.4.2	Způsoby komunikace	39
1.4.3	Možnosti synchronizace pohybu robota s tiskem	40
1.4.4	Časování a přesnost	41
1.5	Tiskové techniky vhodné pro robotický tisk.....	42
1.5.1	FDM (Fused Deposition Modeling)	43
1.5.2	CMT (Cold Metal Transfer)	44
1.5.3	WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing).....	45
1.6	Přehled výzkumu a aplikací v praxi.....	46
1.6.1	Kdo dnes dělá robotický tisk	46
1.6.2	Zajímavé projekty a články.....	46
1.6.3	Kam směřuje vývoj do budoucna	48
2	PRAKTICKÁ ČÁST	50
2.1	Mechanická konstrukce	50
2.1.1	Návrh mechanických komponent	50
2.1.2	Volba materiálů a způsob výroby (3D tisk, frézování, ...).....	52
2.1.3	Uchycení kabeláže a chlazení	53
2.1.4	Mechanismus kalibračního zařízení.....	54
2.2	Elektronické zapojení systému	55
2.2.1	Popis zapojení jednotlivých komponent (Arduino Nano, MOSFET, relé, převodník, zdroje).....	56
2.2.2	Blokové schéma celého systému	57
2.2.3	Ochrany, napájení a bezpečnostní prvky	57
2.2.4	Propojovací prvky mezi řídicími prvky a robotem.....	58
2.3	Řídicí architektura a komunikace	60

2.3.1	Vysvětlení řízení tisku: odkud se řídí který prvek	60
2.3.2	Vývojový (řídící) diagram systému řízení	62
2.3.3	Diagram tiskové sekvence	63
2.3.4	Synchronizace časování jednotlivých subsystémů	63
2.4	Softwarová implementace.....	64
2.4.1	Stručný přehled programovacích jazyků a prostředí:	64
2.4.2	Popis překladače pohybů G-code	65
2.4.3	Vysvětlení způsobu řízení PID, směřování signálů, reakce na chyby	67
2.5	Testování a kalibrace systému	68
2.5.1	Metodika testování: přesnost, rychlost, zpoždění	68
2.5.2	Kalibrace PID regulace a zpětné doladění parametrů.....	70
2.5.3	Řešení problémů během testování	72
2.5.4	Kalibrace tiskové podložky	74
2.6	Výsledky a demonstrace	74
2.6.1	Popis vytištěného modelu	75
2.6.2	Shrnutí dosažené přesnosti a kvality.....	76
2.6.3	Diskuse nad případnými nedostatky a návrhy zlepšení	77
ZÁVĚR		79
POUŽITÁ LITERATURA		80
PŘÍLOHY		83

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK

Obrázek 1: Robot TX2-60 [4].....	23
Obrázek 2: maximální zatížení robota [5]	24
Obrázek 3: Konektory na patě a zápěstí robota [5]	28
Obrázek 4: Smart Orbiter V3.0 [7]	29
Obrázek 5: MOSFET modul LR7843 [8]	30
Obrázek 6: 1-kanál relé modul High-Low level [10]	32
Obrázek 7: Převodník TTL na RS232 [12].....	33
Obrázek 8: Arduino Nano R3, ATmega328 [14]	34
Obrázek 9: Ukázka G-code.....	36
Obrázek 10: 3D model uchycení tiskové hlavy	50
Obrázek 11: Tisková podložka	51
Obrázek 12: Krabička řízení tisku	51
Obrázek 13: Uchycení DPS (test).....	53
Obrázek 14: Uchycení kalibračního tlačítka a kabeláže	54
Obrázek 15: Fast IO konektor.....	55
Obrázek 16: Blokové schéma celého systému.....	57
Obrázek 17: Zapojení kabeláže uvnitř robota [5]	59
Obrázek 18: Vývojový diagram zpětné vazby	61
Obrázek 20: Vývojový diagram systému.....	62
Obrázek 19: Vývojový diagram průběhu sekvence tisku	63
Obrázek 21: Vývojový diagram principu konverze.....	66
Obrázek 22: Vývojový diagram regulace teploty	67
Obrázek 23: Postupné vylepšování kvality výtisků.....	73
Obrázek 24: Vývojový diagram kalibrace podložky	74
Obrázek 25: Finální výtisk vázy	75
Obrázek 26: Srovnání výtisku od robota a Bambulab 3D tiskárny	77

Tabulka 1: Tabulka kalibrace dávkování.....	69
Tabulka 2: Tabulka rychlosti extruze	70
Tabulka 3: Tabulka PID, rychlosti a kalibrace	71
Rovnice 1: Vzorec PID	35

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

3D	Třídimenzionální
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
ASA	Acrylonitrile Styrene Acrylate
CAD	Computer-Aided Design
CMT	Cold Metal Transfer
CURA	Open source slicovací software
DPS	Deska plošných spojů
ENC	Enkodér
FDM	Fused Deposition Modeling
G-code	Jazyk příkazů pro řízení pohybů CNC a 3D tiskových zařízení
GPIO	General-Purpose Input/Output
HMI	Human-Machine Interface
IR	Infračervený
Kp, Ki, Kd	Parametry PID regulátoru (proporcionální, integrační, derivační)
NTC	Negative Temperature Coefficient
PLA	Polylactic Acid
PLA+	Vylepšená verze PLA
PID	Proporcionálně-integračně-derivační regulátor
RAM	Random Access Memory
RZ, RX, RY	Otočné osy průmyslového robota

SIO	Serial Input/Output
SP2	Pendant pro robota Stäubli TX2
STL	Standard Tessellation Language
TTL	Transistor-Transistor Logic
TX/RX	Transmit / Receive
UNC	Unified National Coarse
VAL3	Programovací jazyk pro roboty Stäubli
VCC	Napájecí napětí
WAAM	Wire Arc Additive Manufacturing

TERMINOLOGIE

Extruder – zařízení, které ve 3D tisku posouvá filament do vyhřívané trysky.

Filament – termoplastický materiál ve formě struny (nejčastěji 1,75 mm), který se ve FDM tiskárně taví a vytlačuje tryskou.

Flange – montážní plocha nebo příruba, ke které se upevňuje nástroj (v tomto případě držák extruderu) na konec ramene robota.

Fast I/O (Fast Input/Output) – rychlé vstupy a výstupy na průmyslovém robotu, určené pro detekci signálů s minimální latencí.

G-code – jazyk příkazů pro řízení pohybu nástrojů v CNC strojích a 3D tiskárnách.

Stepper driver (A4988) – elektronický modul, který převádí řídicí impulsy z mikrokontroléru na přesné kroky krokového motoru.

Slicer – software, který převádí 3D model do G-code souboru, podle kterého tiskárna tiskne

Non-planar tisk – tisk mimo rovinu, kdy je tisková hlava nakláněna a sleduje zakřivený povrch. Pokročilá varianta FDM tisku využitelná při víceosém tisku.

Babystep – jemná úprava výšky tiskové hlavy během tisku, obvykle po 0,1 mm, používaná pro doladění první vrstvy.

RS232-TTL převodník – zařízení, které převádí sériovou komunikaci mezi napěťově nekompatibilními zařízeními.

Zásobník pohybových příkazů – buffer (paměť), do kterého si řídicí jednotka robota přednačítá pohyby pro plynulý běh.

Appro – funkce v jazyce VAL3, která definuje přiblížení robota k souřadnici se zadanou bezpečnostní rezervou.

MOSFET – polovodičový tranzistor vhodný pro spínání výkonových zátěží, např. topného tělesa trysky.

Tryska (nozzle) – část extruderu, kterou vytéká roztavený filament. Její průměr ovlivňuje šířku vrstvy.

ÚVOD

V posledních letech se technologie 3D tisku staly nedílnou součástí moderního výrobního prostředí. Zejména v průmyslové sféře dochází k rychlému posunu od tradičních kartézských tiskáren ke komplexnějším systémům, které umožňují větší volnost pohybu, vyšší variabilitu zpracování a integraci pokročilých materiálů. Jednou z takových směrů je využití průmyslových robotů pro účely aditivní výroby. Tato kombinace přináší zásadní výhody – možnost tisku ve více osách, překonání omezení standardní tiskové geometrie, a především větší flexibilitu při návrhu celého výrobního procesu. Práce se zabývá návrhem a realizací kompletního systému 3D tisku pomocí průmyslového robota Stäubli TX2-60, který je standardně určen pro přesné manipulace v automatizovaných provozech. Cílem bylo vytvořit systém schopný vykonávat aditivní výrobní operace prostřednictvím klasického FDM principu, s plnou synchronizací pohybového řízení, dávkování materiálu a teplotní regulace tiskové hlavy. Důraz byl kladen nejen na samotnou funkčnost a ověření provozuschopnosti řešení, ale i na návrh konstrukčních a softwarových prvků, které umožní rozšiřitelnost celého systému v budoucnu. V teoretické části práce je nejprve vysvětlen princip 3D tisku, srovnání tradičních a robotických přístupů a popsány klíčové výhody spojené s použitím víceosého robota. Dále jsou podrobně analyzovány technické parametry robota Stäubli TX2-60 a popsány jednotlivé komponenty použité v systému, včetně řízení pomocí mikrokontroléru Arduino Nano, řízení teploty prostřednictvím PID regulace, spínání pomocí MOSFET tranzistoru, nebo převodníku RS232–TTL. Své místo zde má i popis tiskového jazyka G-code a principu komunikace mezi jednotlivými částmi systému. Praktická část je věnována návrhu mechanických komponent, vytvoření uchycení tiskové hlavy na robot, návrhu elektronického zapojení, řízení logiky a vývoji vlastního softwaru pro překlad G-code příkazů do formátu využitelného řídicím systémem robota. Významná část se zabývá kalibrací tiskového rámce pomocí mechanického tlačítka, experimentálním laděním PID parametrů a testováním systému jako celku. Součástí implementace je i vývojové prostředí v jazyce VAL3, řízení teploty pomocí Arduina v jazyce C++, a také aplikace v C# pro převod datových souborů. Výsledkem je plně funkční prototyp 3D tiskárny postavené na průmyslovém robotu, který je schopen samostatného provozu s kvalitativně srovnatelnými výsledky jako klasické desktopové tiskárny. Práce poukazuje na možnosti dalšího rozvoje této technologie, a to nejen směrem k non-planar tisku, ale i k plné integraci do flexibilních výrobních linek, kde robot zastává více funkcí než pouze pohybový nástroj.

1 TEORETICKÁ ČÁST

Tato část práce se věnuje teoretickým základům a technologickým principům, které souvisejí s robotickým 3D tiskem. Cílem je poskytnout čtenáři komplexní přehled o vývoji aditivních technologií, výhodách a nevýhodách robotického tisku oproti klasickým metodám, a také rozbor konkrétních hardwarových i softwarových komponent, které byly v rámci této práce využity. Dále budou popsány principy komunikace mezi řídicí jednotkou a robotem, přenos dat a řízení tisku pomocí G-kódu a zpětnovazebních algoritmů, zejména PID regulace.

1.1 Úvod do robotického 3D tisku

Robotický 3D tisk představuje moderní přístup k aditivní výrobě, který rozšiřuje možnosti běžných kartézských 3D tiskáren prostřednictvím víceosých průmyslových robotů. Tato kapitola poskytuje úvodní přehled o principu 3D tisku, jeho vývoji a základních rozdílech mezi klasickými a robotickými systémy.

1.1.1 3D tisk a vývoj technologií

Třírozměrný tisk, známý také jako aditivní výroba (Additive Manufacturing – AM), představuje skupinu technologií, které umožňují vytvářet pevné objekty přidáváním materiálu vrstvu po vrstvě. Na rozdíl od tradičních výrobních metod, které jsou často subtraktivní povahy (například obrábění, řezání či frézování), 3D tisk vytváří finální tvar bez nutnosti odebrání materiálu. Díky tomu je možné minimalizovat odpad a zefektivnit výrobu zejména u složitých nebo unikátních dílů.

Základní princip fungování 3D tisku je poměrně jednoduchý: na začátku je digitální model objektu, obvykle ve formátu STL nebo 3MF, který je rozdělen na jednotlivé vrstvy pomocí tzv. sliceru – softwarového nástroje, jenž generuje instrukce pro tiskárnu ve formě G-kódu. Tiskárna následně vrstvu po vrstvě nanáší, spéká, tuhne nebo vytvrzuje materiál, dokud není objekt dokončen.

Vývoj 3D tisku sahá do 80. let 20. století, kdy se začaly objevovat první patenty. Prvním významným milníkem bylo v roce 1984 podání patentu Charlesem Hullem, který představil technologii stereolitografie (SLA) – metodu vytvrzování fotopolymerní pryskyřice pomocí UV laseru. Hull později založil společnost 3D Systems, která uvedla na trh první komerční 3D tiskárnu. V následujících letech se objevily i další technologie.

- Fused Deposition Modeling (FDM) – metoda založená na tavení a vytlačování termoplastického vlákna přes trysku (nejrozšířenější technologie dnes).
- Selective Laser Sintering (SLS) – spékání práškových materiálů (plast, kov) pomocí laseru.
- Digital Light Processing (DLP) – vytvrzování fotopolymerní pryskyřice pomocí světelného projektoru.
- Binder Jetting – spojování práškového materiálu pomocí tekutého pojiva.

S nástupem nového tisíciletí došlo k výraznému posunu díky open-source projektům, jako byl RepRap, který v roce 2005 umožnil uživatelům sestavit vlastní tiskárnu z běžně dostupných komponent. Tím se technologie 3D tisku stala přístupnou širší veřejnosti a začala se šířit mezi hobby tvůrce, výzkumné instituce a později i malé podniky.

Současnost 3D tisku se vyznačuje širokým spektrem použití a neustálým vývojem. Technologie se prosadily nejen v prototypování, ale i v sériové výrobě a výrobě koncových dílů. Významně se uplatňují například v automobilovém průmyslu (prototypy, zakázkové díly, nástroje), leteckém a kosmickém průmyslu (lehké konstrukce, díly s optimalizovanou topologií), stavebnictví (3D tisk celých budov nebo jejich částí), zdravotnictví (zubní náhrady, implantáty, ortézy), nebo designu a módě (šperky, textilie, prototypy produktů).

Vedle technologií se rovněž rozšiřuje spektrum použitelných materiálů – od běžných plastů (PLA, ABS, PETG) přes technické materiály (nylon, polykarbonát) až po kompozity, keramiku a kovy (ocel, titan, hliník, měď). Každý z těchto materiálů má své specifické vlastnosti, výhody a omezení, což předurčuje jeho využití v konkrétních aplikacích.

Důležitou roli v rozvoji 3D tisku hraje i vývoj softwaru. Moderní slicery umožňují nejen generovat tiskové dráhy, ale také optimalizovat strukturu výplně, hustotu vrstev, rychlost tisku, chování chlazení, a mnoho dalších parametrů. Tím se výrazně zvyšuje kvalita a spolehlivost výtisků. [1]

1.1.2 Rozdíl mezi klasickým a robotickým 3D tiskem

Tradiční 3D tisk, jak ho známe z domácích nebo průmyslových kartézských tiskáren, je založen na pohybu ve třech osách – X, Y a Z – pomocí lineárních pohybových systémů (vodící tyče, kolejnice, šrouby, kladky). Tyto tiskárny jsou konstruovány převážně jako portálové systémy (např. konstrukce typu Prusa, CoreXY, Delta apod.) a jejich základní výhodou je jednoduchost, dostupnost a široká komunita uživatelů. Nicméně i přes svou rozšířenost mají kartézské

systemy značná omezení, zejména pokud jde o geometrii výtisku, orientaci trysek a celkovou flexibilitu pohybu. [2]

Omezení klasického 3D tisku

U běžných tiskáren je tisková hlava omezena v pohybu pouze na tři kolmé směry. To má za následek například nutnosti podpěr při tisku převislých částí, nemožnost měnit orientaci trysky během tisku, omezený přístup k podložce při tisku složitých struktur, problémy při tisku na netypické nebo zakřivené povrchy, nebo nulovou možnost interakce s prostředím během tisku (např. tisk na jiný objekt, v jiné orientaci).

Dále je zde také geometrické omezení objemu – klasická tiskárna tiskne pouze v tzv. „boxu“ omezeném rozměry rámu. Tisk větších objektů vyžaduje segmentaci modelu, což snižuje pevnost a estetiku spoje. Lineární pohony navíc často naráží na mechanická omezení při vyšších rychlostech (vibrace, rezonance) a nejsou ideální pro komplexní pohybové trajektorie.

Výhody robotického 3D tisku

Robotický 3D tisk využívá víceosý průmyslový robot jako nosič tiskové hlavy. Typicky se jedná o roboty s šesti stupni volnosti (6DOF), které umožňují libovolný pohyb v prostoru včetně orientace nástroje (tiskové hlavy) v každém bodě trajektorie. To s sebou přináší zcela nové možnosti, které nejsou u klasických systémů možné.

- Tisk ve více osách: Robot není omezen na horizontální vrstvy – může tisknout „do vzduchu“, naklápět hlavu nebo tisknout na nakloněné či zakřivené povrchy.
- Eliminace podpěr: Díky možnosti změny orientace trysky lze tisknout převislé struktury bez nutnosti podpěr, což šetří materiál a čas.
- Tisk velkých objektů: Robot není limitován rámem tiskárny – jeho pracovní prostor může být výrazně větší, případně se může i pohybovat po dráze (např. na kolejnici), čímž se pracovní rozsah dále rozšiřuje.
- Plynulejší trajektorie: Průmyslové roboty mohou sledovat složitější pohybové trajektorie s plynulejšími změnami směru a rychlosti, což umožňuje kvalitnější výtisky.
- Přesnější kontrola nad geometrií: Díky pokročilé kinematice a interpolaci pohybu může robot dosahovat vyšší přesnosti i u geometricky náročných modelů.

Nevýhody a výzvy robotického 3D tisku

Přestože robotický 3D tisk přináší významné výhody, nelze opomenout i některé technické a technologické výzvy:

- Složitější plánování dráhy: Pro víceosé trajektorie je potřeba pokročilý software a algoritmy, které generují optimální G-kód respektující kinematiku robota.
- Synchronizace extruze a pohybu: Na rozdíl od běžných tiskáren, kde je extruder synchronizovaný s pohybem na základní úrovni, je zde nutné vytvořit robustní komunikační protokol mezi tiskovým systémem a robotickým ramenem.
- Zpětnovazební řízení: Zajištění konstantní kvality tisku vyžaduje pokročilé regulační mechanismy, často založené na zpětné vazbě (např. PID regulace).
- Větší nároky na bezpečnost: Pohyb víceosého robota s připojenou tiskovou hlavou vyžaduje dodržení bezpečnostních pravidel, zejména v kolaborativním prostředí. []

1.1.3 Možnosti průmyslového využití robotického 3D tisku

Robotický 3D tisk, jakožto dynamicky se rozvíjející oblast aditivní výroby, nachází své uplatnění napříč širokým spektrem průmyslových oborů. Tato technologie spojuje výhody klasického 3D tisku – zejména možnost tvorby složitých geometrií bez nutnosti použití tradičních forem a nástrojů – s výhodami robotických ramen, jako je vysoká míra pohybové flexibility, dosažitelnost v prostoru a schopnost práce s rozsáhlými nebo atypicky tvarovanými objekty. Právě tato kombinace umožňuje průmyslové využití nejen v rámci prototypování, ale čím dál častěji také v sériové nebo malosériové výrobě.

V automobilovém průmyslu se robotický tisk uplatňuje především při tvorbě designových a funkčních prototypů. Konstrukční oddělení využívají tuto technologii k rychlému ověření návrhů, montážních přípravků nebo krycích a ochranných prvků. Významnou výhodou je možnost upravit jednotlivé díly podle specifických požadavků daného modelu vozidla nebo zákazníka bez nutnosti přepracovávat celý výrobní proces. Kromě toho je technologie využívána i při tvorbě výrobních pomůcek – robot může například vytisknout tvarově přesné přípravky či formy, které slouží k montáži nebo kontrole kvality.

Dalším významným odvětvím, v němž se robotický 3D tisk prosazuje, je stavebnictví. Vzhledem k rozměrovým možnostem robotických ramen je možné tisknout rozsáhlé konstrukční prvky – stěny, klenby, výplně i dekorativní prvky – přímo na stavbě nebo v blízkosti výrobního místa. Použití speciálních směsí, jako je rychle tuhnoucí beton či směsi s

vláknovou výztuží, umožňuje tvorbu tvarově nestandardních konstrukcí, které by byly jinak technicky i ekonomicky neproveditelné. Významnou roli zde hraje i schopnost přizpůsobit se lokálním podmínkám – například tisku na nepravidelný podklad či do již existující struktury.

Letecký a kosmický průmysl klade na výrobní procesy mimořádné nároky z hlediska přesnosti, hmotnosti i materiálových vlastností. Robotický 3D tisk zde představuje atraktivní řešení zejména v oblasti výroby kompozitních struktur s optimalizovanou topologií. Díky vysoké přesnosti robotických systémů a možnosti přesně řídit trajektorii tiskové hlavy lze dosáhnout výrazného snížení hmotnosti při zachování potřebných mechanických vlastností. Zároveň dochází k úspoře materiálu, jelikož je proces výrazně efektivnější než tradiční obrábění z blokových polotovarů.

Specifické uplatnění nachází robotický 3D tisk rovněž v oblasti designu, umění a architektury. Návrháři a architekti mohou díky této technologii vytvářet komplexní a organicky tvarované struktury, které by nebylo možné realizovat jinými postupy. Zároveň zde není nutné držet se pravoúhlých a symetrických tvarů, což výrazně rozšiřuje spektrum designových možností. Vzhledem k tomu, že robot může tisknout i na zakřivené nebo šikmé plochy, je možné vytvářet jedinečné kusy nábytku, umělecké instalace nebo fasádní prvky zcela bez potřeby standardizace.

V neposlední řadě je třeba zmínit i možnosti v oblasti zdravotnictví. Individuální přístup ke každému pacientovi činí z aditivní výroby s využitím robotiky ideální nástroj pro tvorbu ortéz, protetických pomůcek či implantátů. Pomocí předchozího 3D skenování lze získat přesný model těla pacienta a následně vytvořit pomůcku na míru s ohledem na biomechanické požadavky. Robotická ramena zde hrají klíčovou roli v přesnosti výroby a možnostech opakovatelnosti při zachování individuálního přístupu.

Průmyslový potenciál robotického 3D tisku je značný. Jeho schopnost adaptace na specifické požadavky jednotlivých aplikací, možnost práce s širokou škálou materiálů a zejména rozšířená geometrická svoboda činí z této technologie důležitý nástroj pro budoucí vývoj výroby ve všech klíčových průmyslových odvětvích. Postupným vývojem řídicích systémů, přesnější synchronizací trajektorií a zdokonalením materiálových vlastností se navíc předpokládá další rozšíření využitelnosti této technologie do oblastí, kde dosud nebyla ekonomicky či technicky realizovatelná. [3]

1.2 Průmyslový robot Stäubli TX2-60



Obrázek 1: Robot TX2-60 [4]

Robot Stäubli TX2-60 je moderní šestiosý průmyslový robot švýcarské výroby, který v sobě spojuje vysokou přesnost, rychlost a bezpečnost. Patří do řady TX2, která je určena pro náročné automatizační úlohy napříč různými průmyslovými odvětvími, včetně jemné montáže, obrábění, kontroly kvality nebo právě robotického 3D tisku. Díky své flexibilitě a kompaktnímu provedení je vhodný pro integraci do složitých výrobních linek i výzkumných pracovišť. V této kapitole budou podrobně rozebrány jeho technické parametry, kinematika, způsoby programování a možnosti připojení periferií, které hrají klíčovou roli v rámci řízení aditivního výrobního procesu.

1.2.1 Základní parametry

Robot Stäubli TX2-60 představuje pokročilé řešení v oblasti průmyslové automatizace, které kombinuje vysokou přesnost, flexibilitu a bezpečnost. Tento šestiosý kloubový robot je navržen s ohledem na široké spektrum průmyslových aplikací, přičemž jeho technické parametry ho činí ideálním kandidátem i pro náročné úlohy, jako je robotický 3D tisk.

Model TX2-60 se řadí mezi kompaktní roboty s mimořádně vysokým poměrem mezi dosahem a nosností. Jeho maximální dosah činí přibližně 920 mm, což umožňuje obsluhu poměrně rozsáhlého pracovního prostoru bez nutnosti přemístování základny robota. Maximální nosnost se pohybuje kolem 3.5–9 kg, což je více než dostatečné pro manipulaci s tiskovou hlavou, včetně případných doplňkových periferií nebo přídavných senzorů. Co se týče opakovatelnosti,

tedy schopnosti vracet se do téhož bodu s minimální odchylkou, robot dosahuje preciznosti až $\pm 0,02$ mm, což je klíčové pro zajištění kvality vrstveného tisku.

Load capacity	X	Z	TX2-60		TX2-60L	
	mm	mm	kg	lb	kg	lb
At nominal speed	50	100	3.5	7.71	2	4.4
At reduced speed	50	100	4.5	9.92	3.7	8.15
Maximum load capacity at low speed	50	100	9	19.8	5	11

Obrázek 2: maximální zatížení robota [5]

Další důležitou vlastností je rychlost pohybu jednotlivých os. Rychlosti kloubů se liší podle zatížení a konkrétní konfigurace, ale v ideálních podmínkách může robot vykonávat pohyby s úhlovou rychlostí až $720^\circ/\text{s}$. To znamená, že je schopen rychle reagovat na změny trajektorie a dynamicky přizpůsobit svůj pohyb, což má pozitivní vliv na plynulost a kontinuitu tisku.

Velký důraz je u robota TX2-60 kladen také na bezpečnost. Robot je vybaven celou řadou bezpečnostních funkcí odpovídajících nejvyšším průmyslovým standardům. Mezi tyto funkce patří například detekce kolizí, bezpečnostní zóny, monitorování síly a krouticího momentu v reálném čase nebo integrace s bezpečnostními prvky prostřednictvím protokolů jako je Safe Ethernet. Díky těmto vlastnostem je možné nasazení robota i do kolaborativních aplikací, kde může sdílet pracovní prostor s člověkem, aniž by bylo nutné jeho pohyb mechanicky omezovat ochrannými klecemi.

Z pohledu robotického 3D tisku jsou právě tyto parametry klíčové. Vysoká přesnost, rychlost i opakovatelnost umožňují realizaci kvalitního výtisku bez deformací a s minimálním množstvím podpůrného materiálu. Možnost pracovat s většími objemy a komplexními geometriemi je navíc jednou z hlavních výhod, které robot TX2-60 do oblasti aditivní výroby přináší. [6]

1.2.2 Kinematika a řízení

Kinematika průmyslových robotů je obor, který se zabývá pohybem robotických článků bez ohledu na působící síly. V kontextu robota Stäubli TX2-60 je důležité chápat jeho konstrukci jako šestiosý kloubový mechanismus, kde každá osa (nebo přesněji kloub) poskytuje jeden stupeň volnosti. To znamená, že robot je schopen dosáhnout libovolné pozice a orientace koncového efektoru (např. tiskové hlavy) v prostoru – samozřejmě za předpokladu, že daná pozice je v jeho pracovním rozsahu.

Jeho kinematická struktura odpovídá typickému průmyslovému robotu se sériovým uspořádáním ramen. První tři osy (osa 1 až 3) slouží k umístění ramene do požadované pozice v prostoru, zatímco zbývající tři osy (osa 4 až 6) mají na starosti orientaci nástroje. Tato konfigurace je výhodná pro 3D tisk, protože umožňuje nejen pohyb po klasické kartézské trajektorii, ale i natáčení nástroje podle potřeby, což je zásadní např. při tisku na nakloněné nebo zakřivené povrchy.

Kinematický model robota lze popsat pomocí tzv. Denavit-Hartenbergovy (D-H) reprezentace, která slouží k formálnímu zápisu geometrických parametrů jednotlivých kloubů. Tento model pak umožňuje výpočet tzv. dopředné kinematiky (určení pozice a orientace nástroje při známých úhlech kloubů) a inverzní kinematiky (výpočet potřebných úhlů kloubů pro dosažení určité pozice nástroje). Z hlediska realizace robotického 3D tisku je inverzní kinematika naprosto zásadní, neboť umožňuje robota programovat tak, aby přesně sledoval požadovanou trajektorii v prostoru podle vstupního G-kódu.

Co se týče řízení robota, Stäubli využívá vlastní řídicí platformu CS9, která je vyvinuta speciálně pro jejich řadu TX2. Tento kontrolér obsahuje výkonné výpočetní jádro, komunikační rozhraní pro připojení periférií a bezpečnostní obvody, které splňují normy kategorie SIL3/PLe. Robot je řízen prostřednictvím softwarového jazyka VAL3, který je optimalizovaný pro práci s trajektoriemi, signály, podmínkami a řízením pohybu. Umožňuje detailní kontrolu jednotlivých os, interpolaci pohybů a také možnost zasahovat do běhu programu například na základě externích vstupů (což je výhodné při tisku řízeném například pomocí Arduina nebo PC).

Díky otevřenosti systému lze TX2-60 řídit nejen prostřednictvím vestavěného softwaru VAL3, ale i z vyšších vrstev pomocí ROS (Robot Operating System) nebo prostřednictvím PLC komunikace, například přes Profinet, EtherCAT či jiné průmyslové sběrnice. Tato flexibilita otevírá cestu k propojení robota s dalšími zařízeními v rámci komplexního tiskového systému. Přesné řízení pohybu robota umožňuje nejen kvalitní tisk, ale i zpětnovazební korekce, kontrolu rychlosti extruze a přesné plánování trajektorie s ohledem na dynamické parametry robota, jako je zrychlení, zpomalení nebo výkyvy v zatížení. [6]

1.2.3 Průmyslové nasazení – kde se využívá

Roboty řady TX2 od společnosti Stäubli, mezi které patří i model TX2-60, jsou konstruovány jako univerzální šestiosé průmyslové roboty vhodné pro široké spektrum aplikací. Díky své

kompaktní konstrukci, vysoké přesnosti a rychlosti jsou často nasazovány v prostředích, kde je kladen důraz na přesnost, čistotu a opakovatelnost. Mezi typické oblasti použití patří automatizace montážních procesů, manipulace s materiálem, balení a paletizace, lepení, šroubování, svařování a také aplikace v oblasti měření a kontroly kvality.

Významnou výhodou TX2-60 je i jeho kompatibilita s normami pro bezpečnou spolupráci člověka a robota (tzv. kolaborativní režim), což umožňuje jeho integraci do sdíleného pracovního prostoru bez nutnosti složitých bezpečnostních bariér – za předpokladu, že je robot správně nakonfigurován a využívá vestavěné bezpečnostní funkce. To je klíčové zejména v menších výrobních provozech nebo v podmínkách flexibilní výroby, kde se operátoři a roboti pohybují v těsné blízkosti.

Kromě klasického průmyslu (například automobilového, elektrotechnického nebo farmaceutického) nachází tento model uplatnění také ve specifických aplikacích, jako je manipulace s citlivými komponenty v čistých prostorách, kde jsou kladeny extrémně vysoké nároky na hygienu a preciznost. Stäubli totiž vyrábí i speciální verze svých robotů uzpůsobené pro práci v tzv. cleanroom prostředích, což zahrnuje například výrobu polovodičů nebo zdravotnických prostředků.

V oblasti výzkumu a vývoje se TX2-60 využívá díky své otevřenosti vůči externím systémům, možnosti detailního programování a poměrně snadné integraci do experimentálních sestav. V posledních letech se roboty tohoto typu čím dál častěji uplatňují i v oblasti aditivní výroby – a to jak při experimentech s novými tiskovými metodami (například robotické nanášení kompozitních materiálů), tak při vývoji víceosých tiskových strategií, které překračují možnosti klasického 3D tisku v kartézském prostoru.

Schopnost robota TX2-60 pracovat v šesti stupních volnosti a přizpůsobit orientaci nástroje aktuálním požadavkům trajektorie ho předurčuje pro aplikace, kde je potřeba vysoká míra flexibility – ať už jde o svařování nepravidelných tvarů, aplikaci tmelů, nebo právě robotický 3D tisk. [6]

1.2.4 Možnosti programování

Robot Stäubli TX2-60 disponuje velmi robustním a sofistikovaným řídicím systémem CS9, který umožňuje programování prostřednictvím proprietárního jazyka VAL3, jenž tvoří základní kámen celého ekosystému Stäubli. VAL3 je strukturovaný jazyk orientovaný na sekvenční řízení s možností definice proměnných, podmínek, smyček, volání funkcí a práce s periferiemi.

Syntaxí a filozofií připomíná klasické procedurální jazyky typu C nebo Pascal, ovšem se specifickými prvky určenými pro robotické řízení.

Jednou z hlavních předností VAL3 je jeho těsná integrace s řízením robota, díky čemuž umožňuje extrémně přesné časování pohybových trajektorií a událostí – což je zásadní v aplikacích jako je aditivní výroba nebo kooperativní montáž. Programy lze psát buď přímo na robotickém teach pendantu, nebo na počítači a poté je nahrát do řídicí jednotky. Kromě toho je možné simulovat chování robota v offline prostředí a optimalizovat trajektorie ještě před nasazením do reálného provozu.

Vedle nativního VAL3 lze robot TX2-60 propojit i s dalšími systémy a prostředím, například prostřednictvím PLC řídicích systémů (např. Siemens S7) pomocí průmyslových protokolů jako EtherNet/IP, Modbus TCP, nebo Profinet. Díky tomu je možné robot integrovat do širších automatizačních celků, kde jeho činnost navazuje na jiné procesy, ať už se jedná o vstřikovací lisu, dopravníky nebo inspekční stanice. V takových případech bývá robot částečně nebo plně řízen nadřazeným PLC systémem.

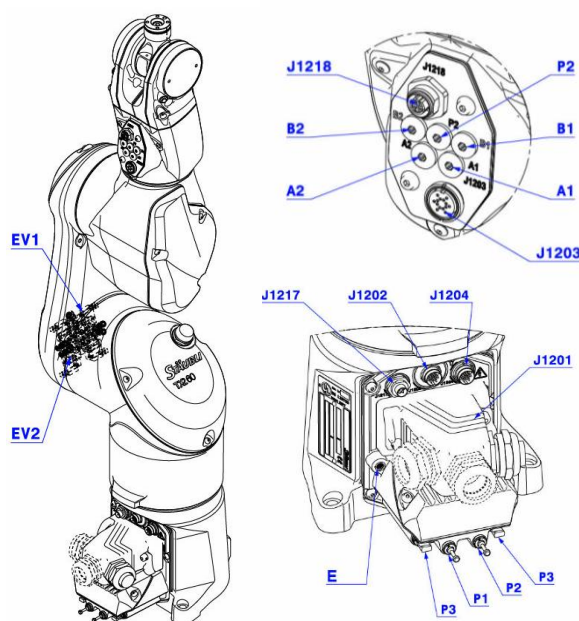
Velmi zajímavou a stále častěji využívanou možností je propojení s open-source prostředím ROS (Robot Operating System). Stäubli poskytuje rozhraní umožňující komunikaci mezi řídicím systémem robota a ROS prostřednictvím tzv. ROS bridge, čímž je umožněna integrace robota do pokročilých aplikací, například vizuální lokalizace, dynamické plánování trajektorií, nebo propojení s AI algoritmy. Pro výzkumné a experimentální účely je ROS díky své flexibilitě a rozsáhlé knihovně balíčků velmi atraktivní volbou.

TX2-60 lze rovněž propojit s vlastními aplikacemi běžícími na PC, a to prostřednictvím soketové komunikace (TCP/IP) nebo pomocí knihoven pro vyšší programovací jazyky jako Python, C++ nebo C#. Tímto způsobem je možné z vnější aplikace předávat souřadnice, příkazy nebo dynamicky měnit trajektorie robota za běhu. [6]

1.2.5 Připojení periferií

Robot Stäubli TX2-60 je navržen tak, aby umožňoval snadnou integraci širokého spektra periferních zařízení. Tato otevřenost je zásadní zejména v aplikacích, které přesahují běžné manipulační operace, jako je právě robotický 3D tisk, kde robot musí spolupracovat s externí extruzní jednotkou, senzory nebo další elektronikou.

Na úrovni hardwaru je robot vybaven rozhraním na přírubě (tool flange), které kromě standardního mechanického uchycení poskytuje i elektrická a pneumatická připojení. Elektrické vedení umožňuje napájení externích zařízení přímo z robota a současně poskytuje několik digitálních i analogových vstupů a výstupů. V závislosti na konfiguraci robota může jít například o 8 digitálních I/O signálů, proudové analogové výstupy nebo napájecí zdroje 24 VDC.



Obrázek 3: Konektory na patě a zápěstí robota [5]

Kromě toho robot využívá vnitřní kabeláž vedenou ramenem robota, což umožňuje bezpečné vedení kabelů bez rizika mechanického poškození při pohybu. To je výhodné nejen z hlediska estetiky a ergonomie, ale i pro zvýšení provozní spolehlivosti.

Komunikace s nadřazenými systémy nebo dalšími periferiemi probíhá pomocí průmyslových komunikačních protokolů jako jsou Profinet, EtherCAT, EtherNet/IP nebo Modbus TCP. Tyto protokoly umožňují nejen čtení a zápis signálů, ale i složitější výměnu dat, jako jsou pozice, stavové informace nebo bezpečnostní signály. Pro potřeby pokročilého řízení lze využít i TCP/IP soketové spojení, které poskytuje přímou datovou komunikaci mezi robotem a PC nebo jinými zařízeními.

Řídicí jednotka CS9 nabízí také USB, Ethernet a sériové porty, čímž se otvírá možnost připojení mikrokontrolérů (například Arduino), kamerových systémů, čteček RFID nebo dalších

specifických zařízení. Programátor má zároveň k dispozici prostředky pro řízení těchto zařízení přímo ze skriptů v jazyce VAL3, nebo přes externí aplikace.

Důležitým aspektem je i podpora bezpečnostních funkcí Safety over Ethernet, kde může robot reagovat na stav bezpečnostních systémů v okolí (např. světelné závory, tlačítka nouzového zastavení) a provádět řízené přerušení činnosti bez ohrožení integrity probíhajícího procesu. [6]

1.3 Elektronické a řídicí komponenty

V rámci návrhu a realizace systému robotického 3D tisku je nezbytné kromě samotného robota Stäubli TX2-60 navrhnout a integrovat také sadu podpůrných elektronických a řídicích komponent, které společně zajišťují funkčnost celého procesu. Vzhledem k tomu, že robot standardně neobsahuje žádné prvky pro řízení tisku jako je extruder, ohřev trysky nebo řízení dávkování materiálu, je nutné tyto funkce doplnit externím zařízením.

1.3.1 Orbiter V3.0

Jedním z klíčových komponentů pro zajištění kvalitního a přesného dávkování tiskového materiálu je extruder. Model Orbiter V3.0 patří mezi extrudery nové generace navržené s důrazem na vysoký výkon, přesnost a kompaktní konstrukci. Tento extruder byl vyvinut pro potřeby pokročilého FDM/FFF 3D tisku a vyznačuje se především nízkou hmotností, vysokou tahovou silou a velmi přesným podáváním filamentu, což je v robotickém tisku zásadní parametr.



Obrázek 4: Smart Orbiter V3.0 [7]

Na rozdíl od běžných Bowden extruderů je Orbiter V3.0 přímopohonový, což znamená, že je motor umístěn přímo u trysky. Tento přístup eliminuje zpoždění a nepřesnosti při změně směru podávání filamentu, což je zvláště důležité u robotického tisku, kde se mění směr a rychlost pohybu výrazně častěji než u klasického 3D tisku. Díky integrovanému planetovému převodu s vysokým převodovým poměrem (např. 7.5:1) je možné dosáhnout vysoké síly při zachování

velmi jemného kroku podávání, což umožňuje lepší kontrolu nad extruzí i při nízkých rychlostech.

Dalším významným parametrem je i hmotnost. Orbiter V3.0 váží přibližně 140 gramů, což z něj činí jeden z nejlehčích extruderů ve své třídě. Nízká hmotnost má zásadní vliv na setrvačné síly, a tedy i na přesnost tisku, obzvláště v případě, kdy je extruder uchycen na konci robotického ramene, kde jakákoli přidaná hmotnost ovlivňuje dynamiku pohybu.

Konstrukce extruderu je modulární a umožňuje snadnou údržbu nebo výměnu jednotlivých dílů, jako jsou ozubená kola, těleso nebo motor. Orbiter využívá kvalitní kovová ozubená kola s precizním záběrem filamentu, která minimalizují prokluz a zároveň chrání filament před poškozením. Extruder je rovněž kompatibilní s běžnými krokovými motory typu NEMA 14 nebo NEMA 17, což poskytuje značnou flexibilitu při jeho použití v různých aplikacích. [7]

1.3.2 MOSFET tranzistor



Obrázek 5: MOSFET modul LR7843 [8]

MOSFET (zkratka pro Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) je jedním z nejrozšířenějších typů tranzistorů používaných v elektronických obvodech pro spínání a zesilování elektrických signálů. Jeho vlastnosti ho činí ideálním komponentem pro aplikace, kde je potřeba spolehlivě a rychle řídit proud vysoké hodnoty pomocí nízkého napětí řídicího signálu. V oblasti řízení výkonných částí zařízení, jako jsou topné elementy, motory nebo výkonné LED systémy, se MOSFET stal standardem.

Princip činnosti MOSFET tranzistoru je založen na řízení vodivosti kanálu mezi dvěma elektrodami – „source“ (zdroj) a „drain“ (vývod) – pomocí napětí přivedeného na „gate“ (řídící elektrodu). Na rozdíl od bipolárních tranzistorů není potřeba pro sepnutí MOSFETu dodávat proud na gate, ale postačí jen vhodné napětí, což snižuje energetickou náročnost řídicích

obvodů. MOSFETy se vyrábějí v provedení N-kanálovém a P-kanálovém, přičemž v oblasti řízení výkonu se častěji využívá N-kanálová varianta kvůli nižšímu odporu v sepnutém stavu.

Jednou z klíčových výhod MOSFET tranzistorů je jejich velmi rychlá spínací doba. Díky tomu je možné jejich použití i v aplikacích, kde se signály spínají s vysokou frekvencí nebo kde je nutné minimalizovat zpoždění mezi řídicím signálem a reakcí výkonového prvku. To je zásadní například při pulzním řízení teploty nebo otáček motoru.

Z konstrukčního hlediska se MOSFETy liší například velikostí a typem pouzdra, maximálním proudem, který dokáže přenést, nebo napětím, při kterém se začnou otevírat. Ve výkonových aplikacích jsou často vybaveny chladičem nebo se montují na chladičí plochy, protože při spínání vyšších proudů dochází ke ztrátám a zahřívání.

Při návrhu obvodů s MOSFETy je rovněž důležité řešit ochranu samotného tranzistoru – například pomocí diod proti zpětnému proudu (tzv. flyback diod), případně rezistorů na řídicí elektrodě k omezení rychlosti náběhu napětí (ochrana před tzv. gate capacitance).

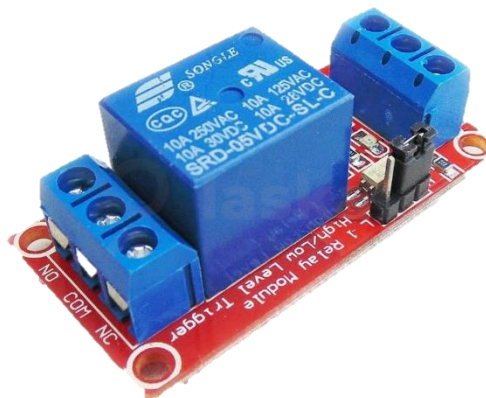
Ve výpočetní technice, automatizaci i embedded systémech jsou MOSFETy nepostradatelným nástrojem pro propojení nízkonapěťové logiky s výkonovými prvky, a umožňují elegantní a efektivní řízení napájení ve složitějších zařízeních. [9]

1.3.3 Dvoupolohové relé

Dvoupolohové relé představuje základní spínací prvek používaný v mnoha elektronických a elektrotechnických systémech, kde je třeba oddělit nízkonapěťovou řídicí logiku od vysokonapěťového nebo proudově náročného obvodu. Na rozdíl od tranzistorových spínačů, které pracují na principu polovodičového řízení, relé využívá elektromagnetickou indukci k mechanickému sepnutí nebo rozepnutí elektrického kontaktu.

Fyzicky se jedná o zařízení obsahující cívku, která po přivedení napětí vytváří magnetické pole. To následně přitáhne kovový jazýček (kotvu), čímž dojde ke spojení nebo rozpojení kontaktů. V případě dvoupolohového relé jsou k dispozici dvě stabilní polohy – jedna, kdy je obvod sepnutý, a druhá, kdy je rozepnutý. Většina běžných relé přechází mezi těmito stavy v závislosti na napětí přivedeném na cívku.

Z hlediska využití v řídicích systémech má relé několik specifických výhod. Nejzásadnější z nich je galvanické oddělení mezi ovládacím a spínaným obvodem. Díky tomu je možné zcela oddělit citlivou elektroniku od vysokonapěťových částí, čímž se zvyšuje bezpečnost a zároveň se snižuje riziko poškození řídicí jednotky vlivem přepětí nebo rušení.



Obrázek 6: 1-kanál relé modul High-Low level [10]

Dvupolohové relé je navíc schopno spínat i střídavé napětí, což bývá limitací některých polovodičových spínačů. Umožňuje tak snadné řízení zařízení napájených ze sítě, jako jsou motory, topná tělesa nebo osvětlení. V průmyslovém prostředí je relé často nasazováno v kombinaci s dalšími ochrannými prvky, jako jsou pojistky, varistory nebo proudové chrániče.

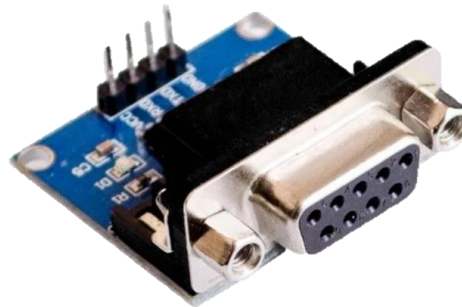
Nevýhodou mechanických relé je oproti polovodičovým řešením pomalejší odezva, vyšší hluchnost a omezená životnost daná mechanickým opotřebením kontaktů. Přesto se i nadále hojně využívají tam, kde je požadována vysoká odolnost vůči výkyvům napětí, jednoduchost zapojení, a především robustní oddělení řídicí části od zátěže. [11]

1.3.4 RS232 - TTL převodník

Převodník mezi rozhraními RS232 a TTL představuje klíčový prvek při propojování moderních mikrokontrolérů nebo vývojových desek s tradičními komunikačními zařízeními, která používají standard RS232. Jedná se o jednoduchý, ale zcela nezbytný prostředek pro zajištění kompatibility mezi dvěma elektricky odlišnými úrovněmi logických signálů.

Rozhraní RS232, které vzniklo již v 60. letech 20. století, bylo historicky používáno pro sériovou komunikaci mezi počítači, modemem a dalšími periferiemi. Typicky pracuje s napěťovými úrovněmi od -12 V do +12 V, přičemž logická „1“ odpovídá napětí kolem -12 V a logická „0“ pak +12 V. Naproti tomu TTL (Transistor-Transistor Logic) logika, běžná například u mikrokontrolérů jako je Arduino Nano, operuje s mnohem nižšími napěťovými úrovněmi – logická „1“ je typicky +5 V (případně +3.3 V u novějších systémů) a „0“ je 0 V.

Přímé propojení těchto dvou systémů by vedlo k nekompatibilitě a potenciálnímu poškození citlivých obvodů, protože vysoké kladné nebo záporné napětí z RS232 by mohlo zničit vstupy mikrokontroléru. Z tohoto důvodu se používá převodník, který signály obousměrně konvertuje mezi těmito standardy.



Obrázek 7: Převodník TTL na RS232 [12]

Nejběžnějšími integrovanými obvody pro tento účel jsou například MAX232, SP232 nebo jejich modernější a úspornější varianty. Tyto čipy obsahují vnitřní nábojové pumpy pro generování potřebného záporného napětí a zároveň zajišťují správnou interpretaci signálů. Převodník obvykle nevyžaduje externí napájení vyšší než +5 V a bývá vybaven několika kanály pro příjem (RX) a vysílání (TX), čímž umožňuje plně duplexní komunikaci.

V aplikačním kontextu je RS232 ↔ TTL převodník používán například při propojení řídicího systému s počítačem, programovacím zařízením, nebo průmyslovým zařízením, které ještě nevyužívá moderní standardy jako USB nebo Ethernet. Díky své jednoduchosti, nízké ceně a vysoké spolehlivosti zůstává toto řešení i dnes běžně nasazované, obzvláště v embedded systémech, automatizaci a robotice.

Přesná konfigurace sériové komunikace, jako je baudová rychlost, počet datových bitů, parita nebo stop bity, musí být na obou stranách linky identická, jinak dojde k chybné interpretaci přenášených dat. I přesto je tento způsob komunikace považován za velmi robustní, zejména na kratší vzdálenosti, kde není přenos výrazně ovlivněn rušením. [13]

1.3.5 Arduino Nano

Arduino Nano je jedním z nejkompaktnějších a zároveň nejrozšířenějších modelů vývojových desek v rámci platformy Arduino. Je navrženo tak, aby poskytovalo dostatečný výpočetní výkon a množství I/O pinů v co nejmenším fyzickém provedení, což jej činí ideálním pro

aplikace, kde je nedostatek místa nebo kde není žádoucí použití větších verzí jako Arduino Uno nebo Mega.

Základem této desky je 8bitový mikrokontrolér ATmega328P, který pracuje na frekvenci 16 MHz a nabízí 32 kB paměti pro program, 2 kB RAM a 1 kB EEPROM. I přes tyto skromné parametry je schopen obsluhovat řadu periferních zařízení, komunikovat přes sériové rozhraní, generovat PWM signály, číst analogové vstupy nebo komunikovat s dalšími zařízeními prostřednictvím sběrnic I2C a SPI.



Obrázek 8: Arduino Nano R3, ATmega328 [14]

Jedním z největších přínosů platformy Arduino je její otevřená architektura a rozsáhlá podpora vývojové komunity. Díky tomu je možné s minimálními zkušenostmi vytvářet pokročilé aplikace, a to nejen ve výuce, ale i v prototypování nebo přímo v průmyslových systémech. Vývojový jazyk vycházející z C/C++ je jednoduchý na naučení, a prostředí Arduino IDE umožňuje rychlý návrh, kompilaci a nahrání programů do mikrokontroléru přes USB.

Arduino Nano se ve srovnání s většími deskami často používá právě tehdy, když je potřeba pouze základní logika řízení bez přídavných modulů náročných na prostor nebo výkon. Přesto však zvládá velmi dobře úlohy typu čtení sensorových dat, řízení motorů, generování PWM signálů pro topné elementy, nebo jako prostředník pro komunikaci mezi různými částmi systému.

Z hlediska napájení je možné Arduino Nano provozovat buď přes USB, nebo pomocí napájecího pinu VIN s napětím v rozsahu 6–12 V. Na desce je také integrovaný lineární stabilizátor napětí, který sice není ideální z hlediska účinnosti, ale pro nenáročné aplikace je plně dostačující.

V rámci integrovaných systémů, automatizace nebo robotických aplikací, jako je robotický 3D tisk, Arduino Nano často slouží jako prostředník mezi vyšší řídicí jednotkou (například PLC nebo průmyslovým PC) a konkrétními fyzickými komponentami – například motory, relé,

teplotními čidly nebo dalšími digitálními a analogovými zařízeními. Jeho jednoduchost, levnost a vysoká flexibilita z něj dělají jednu z nejpoužívanějších desek v embedded světě. [15]

1.3.6 PID regulace

PID regulace patří mezi nejpoužívanější metody zpětnovazebního řízení v oblasti automatizace a mechatroniky. Její univerzálnost, jednoduchost implementace a schopnost adaptace na široké spektrum úloh z ní činí ideální volbu pro systémy, které vyžadují přesné a stabilní řízení veličin, jako je teplota, rychlost, poloha nebo průtok.

Zkratka PID označuje tři základní složky regulátoru – Proporcionální (P), Integrační (I) a Derivační (D). Každá z těchto složek má specifický úkol v řízení:

- Proporcionální složka reaguje přímo úměrně na okamžitou odchylku mezi žádanou a skutečnou hodnotou řízené veličiny. Čím větší je chyba, tím silnější je zásah regulátoru.
- Integrační složka vyhodnocuje dlouhodobou sumu odchylek a slouží k eliminaci trvalé statické chyby, která by mohla zůstat i po působení proporcionálního řízení.
- Derivační složka předpovídá budoucí chování systému na základě rychlosti změny chyby. Díky tomu může regulátor reagovat na dynamické změny v systému dříve, než dojde k větší odchylce.

Dohromady tyto tři složky tvoří robustní a flexibilní nástroj, který lze přesně vyladit pro konkrétní řízenou soustavu. Samotné ladění PID parametrů (zpravidla označovaných jako K_p , K_i a K_d) je klíčovým krokem, který ovlivňuje výslednou kvalitu regulace – od rychlosti odezvy, přes regulační přesnost, až po stabilitu systému bez nechtěného kmitání nebo překmitů.

Z matematického hlediska lze chování PID regulátoru vyjádřit součtem tří členů, přičemž výstup regulátoru $u(t)$ v čase t je dán jako:

Rovnice 1: Vzorec PID

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

- $e(t)$ je regulační odchylka, tedy rozdíl mezi požadovanou a skutečnou hodnotou řízené veličiny,
- K_p je proporcionální zesílení,
- K_i je integrační konstanta,
- K_d je derivační konstanta.

V oblasti 3D tisku se PID regulace běžně používá zejména pro řízení teploty tiskové trysky a vyhřívané podložky. Přesné udržení teploty je zde zásadní pro kvalitu výtisku, protože jakákoli výkyvy mohou způsobit špatnou přilnavost vrstev, deformace nebo nestabilní tok filamentu.

Kromě řízení teploty může být PID regulátor nasazen i na další části systému – například při řízení otáček extruderového motoru, kde je cílem zajistit plynulý a rovnoměrný posun filamentu bez pulsací. V pokročilejších implementacích lze PID použít dokonce i pro řízení pohybových os nebo adaptivní korekci rychlosti v závislosti na stavu systému.

Výhodou použití PID regulace v embedded systémech, jako je Arduino, je její relativní výpočetní nenáročnost. Algoritmus lze snadno implementovat i bez operačního systému a při správném nastavení může pracovat s velmi nízkou latencí. Existují navíc knihovny (např. Arduino PID Library), které zjednodušují práci s tímto typem regulace a umožňují rychlé nasazení i bez hluboké znalosti regulační teorie. [16]

1.3.7 G-code

G-code představuje standardizovaný jazyk určený pro řízení CNC strojů, mezi které spadají také 3D tiskárny. Jeho historie sahá až do sedmdesátých let minulého století, kdy vznikl jako způsob, jak unifikovaně popsat sekvence pohybů a operací výrobních zařízení. I přes dlouhou historii si tento jazyk zachoval vysokou míru relevance a stal se nedílnou součástí prakticky každého aditivního výrobního procesu. V oblasti 3D tisku plní G-code roli prostředníka mezi návrhovým softwarem (např. slicerem) a samotným hardwarem tiskárny či robotického systému. Výstupem sliceru je soubor obsahující sekvenci příkazů, které krok po kroku definují, jak se má zařízení chovat.

```
G92 E0
G1 F1800 E-1.5
;LAYER_COUNT:1482
;LAYER:0
M106 S178.5
G1 F300 Z1.7
G0 F3600 X-3.86 Y-9.812 Z1.7
;TYPE:SKIRT
G1 F300 Z0.2
G1 F1800 E0
G1 F3600 X-2.134 Y-10.513 E0.06196
G1 X-1.189 Y-10.755 E0.09441
G1 X-.499 Y-10.832 E0.1175
G1 X0.586 Y-10.804 E0.1536
G1 X1.5 Y-10.637 E0.1845
```

Obrázek 9: Ukázka G-code

Typický příkaz v G-codu začíná písmenem označujícím typ operace (např. „G“ pro geometrický pohyb, „M“ pro pomocné příkazy) následovaným číslem a případnými parametry. Například příkaz `G1 X50 Y25.3 E22.4 F1500` znamená: „posuň se na souřadnice $X = 50$ mm, $Y = 25,3$ mm, vytlač 22,4 mm filamentu rychlostí 1500 mm/min“. I přes jednoduchý syntaktický formát představuje G-code komplexní řídicí jazyk schopný popsat velmi složité výrobní úlohy. Kromě pohybových instrukcí totiž obsahuje i příkazy pro změnu teploty trysky a podložky, řízení ventilátorů, čekací doby, nastavování absolutních nebo relativních souřadnic a mnoho dalších operací.

Velkou výhodou G-codu je jeho transparentnost a možnost snadného manuální zásahu. Operátoři a vývojáři tak mohou nejen analyzovat vzniklé trajektorie, ale také do kódu přímo zasahovat, optimalizovat jej nebo přidávat vlastní sekvence. V rámci robotického 3D tisku hraje G-code ještě složitější roli, neboť musí být transformován do formátu srozumitelného pro víceosé systémy. U klasických tiskáren bývá trajektorie jednoduchá, protože se pohybují ve 3 osách, ale robotická ramena jako TX2-60 využívají šest stupňů volnosti, což vyžaduje složitější převod kinematiky. Tento převod obvykle zajišťuje speciální middleware nebo postprocesor, který G-code převede na posloupnost pohybových instrukcí odpovídajících robotickému řídicímu systému. [17]

1.4 Komunikace mezi robotem a tiskovým systémem

Spolehlivá komunikace mezi robotickým ramenem a řídicím systémem tisku představuje základní stavební kámen úspěšného robotického 3D tisku. Jelikož je robot pouze nástrojem schopným vykonávat přesně definované pohyby, musí být zajištěna koordinace mezi tímto mechanickým zařízením a periferními prvky, jako je extrudér, elektronika řízení teploty či zpětnovazební senzory. Právě tato vrstva propojující fyzickou a řídicí složku tiskového systému tvoří často nejsložitější část celého řešení.

Na rozdíl od běžných 3D tiskáren, které mají integrované řízení pohybu a extruze v jediném kontroléru, robotický 3D tisk vyžaduje rozdělení těchto funkcí mezi více zařízení. Z toho vyplývá nutnost definovat rozhraní, která umožní jednotlivým subsystémům vzájemně komunikovat v reálném čase, předávat si stavové informace a správně synchronizovat své činnosti. Klíčovým požadavkem je minimalizace latencí a zajištění deterministického chování, což je nezbytné zejména při řízení extruze materiálu v závislosti na trajektorii pohybu robota.

Komunikační vrstva v robotickém tisku tak často kombinuje několik paralelních kanálů — například digitální signály pro synchronizaci kroků, sériovou linku pro datové přenosy a různé formy zpětné vazby z čidel a kontrolérů. Návrh této vrstvy musí být přizpůsoben konkrétnímu hardwarovému rozhraní robota i použité tiskové elektronice, přičemž často bývá nutné nasadit převodníky, izolátory nebo logické úrovně adaptéry pro zajištění elektrické kompatibility a ochrany systémů.

Cílem této kapitoly je přiblížit hlavní principy komunikace mezi robotem a externím řídicím systémem tisku, představit běžně využívané komunikační metody a upozornit na klíčové požadavky kladené na takové rozhraní z hlediska přesnosti, odezvy i robustnosti. V návaznosti na to budou rozebrány různé možnosti synchronizace pohybu robota s procesem extruze a také výzvy spojené s časováním a latencemi, které přímo ovlivňují kvalitu výsledného výtisku. [18]

1.4.1 Kombinace robota a externího kontroléru (Arduina)

V případě robotického 3D tisku je nezbytné, aby robotické rameno a řídicí elektronika extrudéru fungovaly v úzké součinnosti. Průmyslový robot, jako je Stäubli TX2-60, je standardně navržen pro pohyb podle předem definovaných drah, často v prostředí programovacího jazyka VAL3. Naproti tomu systémy pro řízení extruze materiálu — typicky postavené na jednoduchém mikrokontroléru typu Arduino — obvykle vyžadují odlišný způsob komunikace a ovládání. Z toho vyplývá potřeba vytvořit rozhraní, které umožní těmto rozdílným světům „mluvit stejným jazykem“.

Nejběžnějším přístupem je oddělení úloh: robot se stará pouze o řízení pohybu a Arduino či PC ovládá extruzi filamentu, zahřívání trysky a případně další podpůrné funkce. Aby tento systém fungoval správně, je nutné definovat signály a protokoly, které zajistí synchronizaci činností. Nejčastěji se používají digitální výstupy robota pro spouštění konkrétních akcí na straně mikrokontroléru (např. začátek extruze, pauza, změna parametrů). Komunikace může probíhat v jednom nebo dvou směrech podle náročnosti implementace.

Jednoduchý příklad může vypadat tak, že robot pomocí digitálního výstupu (např. 24V logika) aktivuje optočlen, jehož výstup je připojený na digitální vstup Arduina. Tímto způsobem lze bezpečně přenášet binární informace o stavu nebo příkazu. Alternativou je využití sériové komunikace (např. přes RS232 nebo TTL), kdy robot periodicky posílá datové zprávy obsahující parametry extruze nebo pokyny k její úpravě. V takovém případě se ale zvyšují nároky na spolehlivost komunikace a robustnost implementace.

Další možností je použití počítače jako mezivrstvy — PC přijímá G-code, zpracovává jednotlivé instrukce, řídí robota i extruzi, a zajišťuje synchronizaci v reálném čase. Tento přístup vyžaduje pokročilé softwarové řešení, ale přináší výhodu v centralizaci řízení a snadnější laditelnosti chování systému.

Důležitým aspektem je také rozdílné napájecí napětí jednotlivých částí systému. Zatímco průmyslový robot používá signály na úrovni 24 V, běžná mikrokontrolérová zařízení pracují na 5 V nebo 3,3 V. Proto je často nutné zařadit mezi tato zařízení převodníky úrovní nebo galvanické oddělení, aby nedošlo k poškození citlivé elektroniky. V praxi se využívají různé formy převodníků – od optočlenů až po integrovaná zařízení s funkcemi převodu úrovní a sériové komunikace. [19]

1.4.2 Způsoby komunikace

Aby bylo možné úspěšně integrovat řídicí elektroniku tiskového systému s průmyslovým robotem, je potřeba zvolit vhodný komunikační protokol. V prostředí robotického 3D tisku se nejčastěji používají tři základní typy komunikace: jednoduché digitální signály, sériová komunikace a tzv. „handshake“ mechanismy pro obousměrnou synchronizaci.

Digitální signály představují nejjednodušší formu přenosu informace. Typicky jde o logickou úroveň (0 nebo 1), reprezentovanou například 0 V a 5 V nebo 24 V v průmyslových systémech. Digitální signál může sloužit jako příkaz pro zapnutí extruze, ukončení tisku, spuštění zahřívání trysky nebo jinou binární operaci. Výhodou této komunikace je jednoduchost, nízká latence a vysoká spolehlivost. Nevýhodou je omezené množství informace, kterou lze tímto způsobem předat – každá akce vyžaduje samostatný vodič, což komplikuje složitější scénáře.

Sériová komunikace (např. UART, RS232, RS485 nebo TTL) umožňuje přenos složitějších datových struktur po jediném páru vodičů. Mikrokontrolér a robot (nebo PC jako prostředník) mohou prostřednictvím sériové linky sdílet příkazy, parametry extruze, teploty, chybová hlášení či diagnostiku. Sériová linka funguje na principu postupného odesílání datových bitů jedním vodičem podle předem dohodnuté přenosové rychlosti (baud rate). Přesné fungování závisí na použitých zařízeních a je nutné zajistit napětíovou kompatibilitu — například pomocí RS232 ↔ TTL převodníků.

Handshake protokoly pak slouží k zajištění synchronizace mezi dvěma systémy. Představme si situaci, kdy robot vyšle signál k zahájení extruze, ale mikrokontrolér ještě není připravený (například kvůli zahřívání trysky). V takovém případě handshake zajistí, že oba systémy čekají

na vzájemné potvrzení, než přejdou do další fáze. Implementace může být buď čistě hardwarová (pomocí digitálních vstupů a výstupů), nebo softwarová – kdy si zařízení posílají potvrzovací zprávy po sériové lince. Například robot pošle Arduino zprávu „START_EXTRUSION“ a čeká, dokud nepřijde zpět „READY“.

V praxi se často kombinuje více komunikačních metod — např. robot spouští digitálním signálem zahájení cyklu, ale detailní parametry posílá sériově. Stejně tak Arduino může informovat robota o dokončení nějaké operace pomocí dalšího digitálního vstupu nebo krátkého datového paketu. Tento hybridní přístup kombinuje výhody jednoduchosti a nízké latence (u digitálních signálů) s flexibilitou a bohatostí dat (u sériové komunikace). [20]

1.4.3 Možnosti synchronizace pohybu robota s tiskem

Synchronizace pohybu robota s procesem tisku představuje jednu z klíčových výzev robotického 3D tisku. Na rozdíl od klasických kartézských 3D tiskáren, kde jsou pohybové osy jednoznačně svázané s instrukcemi G-code, u průmyslového robota je třeba řešit komplexnější koordinaci mezi generovanými trajektoriemi a řízením extruze. Aby bylo dosaženo kvalitního výtisku, musí být tok materiálu naprosto přesně sladěn s aktuální pozicí tiskové hlavy a její rychlostí v prostoru.

Jedním z nejběžnějších způsobů synchronizace je takzvané časové řízení extruze, kdy řídicí jednotka (například Arduino nebo jiný mikrokontrolér) nezávisle ovládá extruzi na základě časových údajů nebo pevně daného sledu kroků. Tento způsob je sice jednoduchý, ale jeho nevýhodou je omezená schopnost reagovat na reálný pohyb robota – například zpomalení v zatáčkách nebo při náhlé změně rychlosti může vést k přetoku nebo naopak nedostatku materiálu.

Lepší variantu představuje synchronizace na základě polohy nebo rychlosti robota. Pokud je k dispozici rozhraní pro čtení nebo odhad aktuální rychlosti konce efektoru (například v podobě feedforward signálu nebo prostřednictvím softwarové integrace), může mikrokontrolér plynule upravovat rychlost extruze tak, aby odpovídala aktuálnímu pohybu. Tato forma synchronizace vyžaduje přesnější propojení obou systémů a většinou i softwarovou nadstavbu, která umožní z robotického systému extrahovat stavové informace v reálném čase.

Další možností je využití tzv. triggerovacích signálů – tedy jednoduchých digitálních impulsů vysílaných robotem v předem definovaných časových okamžicích nebo pozicích. Mikrokontrolér pak na tyto signály reaguje spuštěním konkrétních částí tiskové sekvence.

Například: „jakmile robot dosáhne začátku trajektorie vrstvy, odešle signál k zahájení extruze“ a obdobně při jejím ukončení.

Ve složitějších scénářích je možné uvažovat i o přímé softwarové integraci mezi systémem robota (např. Stäubli s prostředím CS9 a jazykem VAL3) a tiskovým systémem na bázi počítače. V tomto případě dochází k výměně dat přes TCP/IP, MODBUS nebo jiný protokol, přičemž řízení extruze může být plně závislé na parametrickém výpočtu nebo na zpětnovazebním systému monitorujícím rychlost koncového efektoru. Tato varianta poskytuje největší přesnost a flexibilitu, ale také klade vysoké nároky na softwarové zpracování a synchronizaci časových úseků.

Zvláštní pozornost je třeba věnovat i případům, kdy robot mění orientaci trysky – například při náklonech nebo tisku po zakřivených plochách. V takových situacích je nutné, aby systém řízení extruze bral v úvahu nejen aktuální rychlost, ale také orientaci trysky a změny vzdálenosti k podložce. Tento problém se zpravidla řeší v kombinaci s 3D plánovači dráhy, případně pokročilou interpretací G-code, která zohledňuje orientaci nástroje v prostoru.

Správná synchronizace tedy zásadně ovlivňuje výslednou kvalitu výtisku – od rovnoměrnosti vrstev přes přesnost rozměrů až po estetický vzhled. A právě v prostředí robotického 3D tisku, kde se pohyb odehrává v šesti stupních volnosti, je tato výzva ještě o úroveň komplexnější než u běžných desktopových tiskáren. [21]

1.4.4 Časování a přesnost

Jedním z nejzásadnějších aspektů v oblasti řízení robotického 3D tisku je přesnost časování a minimalizace latence mezi jednotlivými systémy. Jinými slovy – když robot „řekne“ tiskovému systému, že se právě nachází v určitém bodě trajektorie, je naprosto klíčové, aby na tuto informaci tiskový systém zareagoval okamžitě, a ne až za zlomek vteřiny. I nepatrné zpoždění může totiž způsobit významné defekty na výtisku.

V tradičních 3D tiskárnách je časování řízeno z jedné centrální jednotky, která má plnou kontrolu nad pohybem i extruzí, a tak k problémům s latencí prakticky nedochází. V robotickém prostředí ale většinou pracujeme s oddělenými systémy – řídicí jednotka robota, samostatný mikrokontrolér ovládající extruzi, a někdy i další subsystémy sledující teplotu, chlazení nebo napětí v osách. Mezi těmito bloky probíhá komunikace přes sériové linky nebo ethernetové sítě, které vždy nesou určité zpoždění.

Latence (tedy zpoždění mezi vysláním signálu a jeho zpracováním) může být způsobena:

- hardwarovým omezením komunikační sběrnice (např. sériová linka běžící na nízké baudové rychlosti),
- zpožděním na straně přijímacího zařízení (např. Arduino čekající na kompletní zprávu),
- nebo prostě nevhodně navrženou strukturou softwaru, která pracuje ve zpožděných cyklech.

Jakmile se toto zpoždění stane měřitelným v řádu desítek nebo stovek milisekund, může v praxi dojít k tomu, že extruder začne tisknout o něco později, než by měl, nebo naopak vytlačuje filament ještě ve chvíli, kdy se tryska už přesunula jinam. Výsledkem jsou chyby ve výtisku – nerovnosti, vynechané části nebo tzv. "stringing" (tahání vláken při přejezdech).

Snížení latence je možné dosáhnout několika způsoby:

- použitím rychlejší komunikační linky – například místo běžného UART zvolit SPI nebo Ethernet,
- asynchronním zpracováním dat – tedy reakcí na přijatý signál ihned bez čekání na dokončení smyčky,
- optimalizací přenosového protokolu (např. odesílat pouze rozdílová data nebo binární zprávy místo textových),
- a v pokročilejších systémech implementací real-time operačních systémů (RTOS), které garantují přesné časování i v přetížených podmínkách.

U některých moderních řídicích jednotek (např. CS9 od Stäubli) je možné časování výrazně zpřesnit pomocí tzv. real-time výstupů a plánovaných událostí (např. pomocí funkcí typu EventAtPosition), které umožňují vysílat signály s přesností v řádu milisekund nebo i mikrosekund. Tyto mechanismy pak mohou sloužit k přesnému spouštění extruze, změně parametrů tisku nebo monitorování průběhu tisku. [22]

1.5 Tiskové techniky vhodné pro robotický tisk

Robotický 3D tisk rozšiřuje možnosti konvenčních aditivních technologií o prostorovou flexibilitu a možnost zpracovávat větší či složitější objekty, než je běžně možné na klasických kartézských tiskárnách. Pro dosažení kvalitních výsledků je ale klíčové zvolit vhodnou tiskovou technologii, která je schopná kooperovat s víceosým pohybem robota, zvládá požadovanou

přesnost a je technicky kompatibilní s typem materiálu i požadovanou mechanickou vlastností výsledného dílu.

1.5.1 FDM (Fused Deposition Modeling)

Fused Deposition Modeling (FDM) patří mezi nejrozšířenější a technicky nejdostupnější metody 3D tisku, která se v robotickém prostředí používá vůbec nejčastěji. Je založena na principu postupného vytlačování termoplastického materiálu – typicky PLA, ABS, PETG či jiných polymerů – skrze nahřívanou trysku, přičemž materiál tuhne téměř okamžitě po uložení na předchozí vrstvu. Výsledkem je pevný, vrstevnatý objekt, jehož geometrie je určena trajektorií pohybu trysky.

Nasazení FDM technologie na šestiosého robota přináší několik specifických výzev i výhod. V klasickém kartézském uspořádání se tisková hlava pohybuje převážně po osách X, Y a Z, což omezuje orientaci trysky vůči podložce a často vede k nutnosti použití podpěr. Robot s šesti stupni volnosti však umožňuje orientovat trysku v libovolném směru, což otevírá dveře k tisku šikmých ploch, převisů i víceosých struktur bez nutnosti podpěr.

Tato geometrická flexibilita umožňuje například:

- tisk na zakřivené podklady nebo složité výztužné struktury,
- redukci podpěr a tím i materiálových nákladů,
- tisk větších objektů složených z více segmentů,
- zvýšení pevnosti díky lepší orientaci vláken v konstrukčně namáhaných oblastech.

Na druhou stranu však přicházejí i technické komplikace. Zajištění rovnoměrného podávání materiálu je u víceosého pohybu složitější – jakákoli změna orientace trysky může ovlivnit viskózní tok materiálu nebo způsobit deformaci výtisku při nevhodné teplotní distribuci. Klíčová je proto kvalitní regulace extruze (např. pomocí extruderu typu Orbiter s přesným převodem) a přesná synchronizace pohybu robota s podáváním filamentu. K tomu se často přidává potřeba pokročilého řízení teploty a aktivního chlazení, obzvláště při tisku šikmých nebo vertikálních struktur.

FDM v kombinaci s robotickým ramenem tedy nabízí vysokou míru konstrukční svobody, ale vyžaduje výrazně sofistikovanější kontrolu procesu a stabilní mechanickou platformu. Pokud je však správně navržena, představuje velmi efektivní řešení pro velkoobjemový nebo prostorově členitý tisk v průmyslových aplikacích. [23]

1.5.2 CMT (Cold Metal Transfer)

Cold Metal Transfer (CMT) je pokročilá technologie obloukového svařování, která si v posledních letech nachází uplatnění také v oblasti aditivní výroby kovových objektů. Oproti tradičním metodám svařování se CMT vyznačuje nízkým tepelným příkonem a přesně řízeným odtavováním drátu, což výrazně snižuje rozstřík kovu a zvyšuje kvalitu spoje. Právě díky těmto vlastnostem se CMT stalo vhodnou volbou pro tzv. Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), kde je kovový drát vrstven na sebe podobně jako u FDM tisku – jen s tím rozdílem, že místo plastu se používá kov a místo trysky oblouk.

Z hlediska robotického 3D tisku je technologie CMT výjimečně atraktivní. Kombinace robota s více stupni volnosti a řízeného odtavování kovového materiálu umožňuje tisknout složité kovové konstrukce, které by jinak bylo nutné frézovat z bloku nebo pracně svařovat. Robotické rameno zde plní dvojí roli – jednak nese svařovací hořák, jednak zabezpečuje přesné navádění a rovnoměrné vrstvení kovu podle požadované geometrie.

Mezi hlavní výhody CMT v kontextu robotického tisku patří:

- nízký tepelný příkon → minimalizace deformací a pnutí v materiálu,
- možnost tisku z různých kovových slitin (nerez, hliník, bronz, ocel...),
- vysoká rychlost nanášení materiálu,
- relativně nízké provozní náklady oproti jiným kovovým aditivním metodám (např. selektivnímu laserovému tavení).

Nicméně i zde se objevují významné technické výzvy. Práce s kovem vyžaduje přesnou koordinaci hořáku a podávání drátu, což klade důraz na kvalitní programování dráhy robota, správné nastavení parametrů svařovacího zdroje a řízení chlazení. Dále je nutné počítat s potřebou následného opracování – výsledné díly často vykazují vyšší drsnost povrchu a vyžadují obrábění nebo broušení pro dosažení finální podoby. Stejně tak je zásadní bezpečnostní zajištění celého procesu kvůli vysokým teplotám, UV záření a vznikajícím zplodinám.

I přes tato omezení se CMT rychle stává klíčovou technologií pro kovový 3D tisk ve velkém měřítku. V kombinaci s robotickými systémy umožňuje vytvářet rozměrné, robustní a funkční kovové díly – od prototypů po koncové komponenty pro strojírenství, stavebnictví nebo automobilový průmysl. [24]

1.5.3 WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing)

Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) představuje technologii aditivní výroby kovových dílů, která spojuje principy 3D tisku s procesy obloukového svařování. WAAM využívá svařovací oblouk k postupnému nanášení roztaveného kovu ve vrstvách podle digitálního modelu, přičemž vstupním materiálem je obvykle kovový drát. Tato metoda je považována za jednu z nejperspektivnějších cest, jak dosáhnout rychlé a nákladově efektivní výroby velkorozměrových kovových komponentů.

Na rozdíl od práškových technologií, jako je SLM (Selective Laser Melting) nebo EBM (Electron Beam Melting), WAAM nevyžaduje speciální prostředí, drahé lasery ani vakuové komory. Díky tomu je systém relativně jednoduchý, levnější na pořízení i údržbu a snadněji škálovatelný. K dosažení požadované geometrie je však potřeba velmi přesné řízení dráhy hořáku, přívodu drátu a celkové tepelné bilance procesu – právě zde se uplatňují průmyslové roboty, které umožňují koordinovaný a plynulý pohyb v prostoru.

Typické varianty obloukového svařování používané ve WAAM zahrnují:

- GMAW (Gas Metal Arc Welding) – nejběžnější metoda, často ve spojení s technologií CMT,
- TIG (Tungsten Inert Gas) – s vyšší kvalitou povrchu, ale nižší rychlostí,
- Plazmové svařování – umožňuje vyšší výkon a přesnější oblouk.

Robotické rameno v systému WAAM zastává klíčovou úlohu: zajišťuje nejen přesné vedení hořáku, ale i adaptaci pohybu na složité geometrie, úhly náklonu a víceosé interpolace, což by bylo pro klasický kartézský 3D tisk nepředstavitelné. Zároveň robot může provádět korekce během procesu pomocí zpětné vazby z kamerových nebo senzorových systémů.

Mezi největší výhody WAAM patří:

- vysoká produktivita – vrstvení až několika kilogramů kovu za hodinu,
- nízká cena vstupního materiálu – využití běžného svařovacího drátu,
- možnost tisku velkých struktur – například rámců, konstrukcí, dílů pro letectví či energetiku,
- snadná integrace do stávajících výrobních linek.

Nevýhodou oproti práškovým technologiím je nižší rozlišení a vyšší míra následného opracování. Výsledný povrch bývá hrubý a může vyžadovat frézování nebo broušení. Také je

důležité kontrolovat vnitřní pnutí a defekty způsobené tepelnými cykly, což si žádá pečlivé procesní řízení.

Přesto WAAM nachází stále širší uplatnění v průmyslu, zejména tam, kde je potřeba rychle vyrábět kovové prototypy, opravy nebo strukturálně náročné komponenty. V kombinaci s víceosými roboty otevírá tato metoda zcela nové možnosti pro tvarovou svobodu a flexibilitu výroby. [25]

1.6 Přehled výzkumu a aplikací v praxi

Oblast robotického 3D tisku se v posledním desetiletí stala předmětem intenzivního akademického i průmyslového zájmu. Z původně experimentální disciplíny se postupně formuje robustní technologický směr s jasně definovanými aplikačními oblastmi a rostoucí mírou komercializace. Šestiosé roboty, dříve vnímané primárně jako nástroje pro manipulaci nebo svařování, se dnes stále častěji využívají jako platforma pro aditivní výrobu – a to nejen v plastu, ale i v kovu, betonu či kompozitech.

Zatímco v akademické sféře převažuje zájem o zkoumání přesnosti, optimalizace trajektorií a vývoje nových tiskových technik, průmyslová praxe se zaměřuje spíše na integraci robotického tisku do stávajících výrobních procesů, zkracování doby výroby a zvyšování efektivity produkce. Výzkumné projekty často slouží jako testovací pole pro inovace, které následně nacházejí své uplatnění v průmyslových aplikacích – například při stavbě konstrukcí, výrobě forem, náhradních dílů, nebo dokonce při pokusech o tisk v extrémních podmínkách, jako je vesmír nebo podmořské prostředí.

1.6.1 Kdo dnes dělá robotický tisk

Výzkum a vývoj v oblasti robotického 3D tisku je v současnosti veden jak univerzitními pracovišti, tak soukromým sektorem, přičemž obě sféry se často vzájemně prolínají. Akademické instituce hrají klíčovou roli zejména v oblasti základního výzkumu – tedy v objevování nových technologií, testování materiálů a vývoji algoritmů pro optimalizaci trajektorií či regulaci extruze. Průmyslové firmy naopak přetvářejí tyto poznatky do konkrétních produktů a výrobních systémů, které lze implementovat do reálných provozů. [26]

1.6.2 Zajímavé projekty a články

V posledních letech se robotický 3D tisk stal předmětem řady odvážných projektů, které dokazují, že kombinace robotiky a aditivní výroby může přesáhnout rámec laboratoří a stát se

funkčním nástrojem pro průmyslové, umělecké i stavební aplikace. Některé realizace překvapují svým rozsahem, jiné inovativním přístupem k materiálům nebo geometrii. Zde je přehled několika nejzajímavějších příkladů, které ilustrují současný stav a směřování této technologie:

MX3D – Kovový most v Amsterdamu

Jeden z nejvíce medializovaných projektů robotického tisku je bezesporu kovový most vytištěný společností MX3D. Tento most, vyrobený pomocí robotického ramene a technologie WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing), byl zkonstruován z nerezové oceli a nainstalován přes kanál Oudezijds Achterburgwal v Amsterdamu. Most je nejen funkční, ale obsahuje i senzorický systém, který v reálném čase monitoruje mechanické zatížení a prostředí. Projekt demonstruje, že robotický tisk může tvořit strukturálně složitě a zároveň bezpečné konstrukce pro reálné použití.

ETH Zürich – DFAB House

Tento experimentální dům postavený v rámci projektu NEST ve Švýcarsku spojuje několik digitálních výrobních technik, přičemž jednou z nich je i robotický 3D tisk. Pomocí šestiosých robotů zde byla například vytvořena lehká betonová struktura stropu nebo organicky tvarované bednění. DFAB House není jen technologickým demonstrátorem, ale i reálně obyvatelnou budovou, která posunula možnosti robotického navrhování a výroby v architektuře.

MIT – Digital Construction Platform

Projekt DCP vznikl jako robotický systém schopný autonomního tisku rozsáhlých objektů na staveništi. Využívá pohyblivé robotické rameno s extruzním systémem, které dokáže nanášet vrstvy materiálu na základě 3D modelu. Experimentální struktury, jako je například „iglu“ z polyuretanové pěny, byly vytvořeny zcela bez zásahu člověka. Cílem projektu je umožnit výstavbu nouzových obydlí, stanovišť v extrémních prostředích nebo dočasných struktur s minimálními náklady.

So Concrete – Betony tvarované robotem (ČR)

Český projekt firmy So Concrete ve spolupráci s ČVUT ukazuje, že i v lokálním kontextu lze dosáhnout zajímavých výsledků. Firma se zaměřuje na robotické zpracování betonu, včetně 3D tisku nebo robotického frézování forem. Výsledkem jsou například designové prvky pro

městský mobiliář nebo fasádní panely s komplexní geometrií. Využití robotů umožňuje snížit množství odpadu, zrychlit výrobu a otevřít cestu novým architektonickým formám.

IAAC – Pylos project

Institut for Advanced Architecture of Catalonia v Barceloně se věnuje výzkumu udržitelných materiálů pro robotický tisk. Projekt Pylos zkoumá možnosti tisku z hlíny a přírodních směsí bez potřeby dalších pojiv. Cílem je vytvořit technologii, která je levná, dostupná a ekologicky šetrná, vhodná například pro rozvojové země nebo dočasné obydlí. [27]

1.6.3 Kam směřuje vývoj do budoucna

Vývoj robotického 3D tisku se dnes neomezuje pouze na zdokonalování přesnosti nebo rozšiřování rozsahu tisknutelných objektů. Směr, kterým se technologie ubírá, je do značné míry definován experimenty s novými materiály a snahou o jejich kombinaci s pokročilými výrobními algoritmy. Klíčovým trendem je snaha překonat omezení klasického FDM a SLA tisku a nabídnout průmyslu i architektuře technologie, které zvládnou pracovat s komplexními, silově zatíženými, nebo i biologicky aktivními strukturami.

Kompozitní materiály

Jedním z hlavních směrů vývoje je využívání kompozitních materiálů, především kombinací termoplastů a vláken (uhlíkových, skelných, kevlarových). Tyto materiály umožňují vyrábět komponenty s výrazně vyšší pevností při zachování nízké hmotnosti. U robotického 3D tisku lze díky šestiosému pohybu navíjet vlákna ve směru mechanického namáhání, což je v běžných kartézských tiskárnách téměř nemožné. Technologie Continuous Fiber Fabrication (CFF) je tak v kombinaci s roboty ideální například pro výrobu dílů v leteckém a automobilovém průmyslu.

Beton a cementové směsi

Beton je dalším klíčovým materiálem, se kterým se v oblasti robotického tisku experimentuje stále více. Technologie známá jako „concrete 3D printing“ nebo „contour crafting“ umožňuje stavět celé budovy, zdi a konstrukce s minimem bednění a lidské práce. Roboti zde poskytují potřebnou flexibilitu a přesnost při extruzi těžkého materiálu, přičemž lze využívat i materiály s příměsí recyklátů, vláken nebo aditiv pro zlepšení struktury. Výzkum v této oblasti se soustředí i na potlačení smršťování a zlepšení soudržnosti mezi vrstvami, což jsou klíčové faktory pro dlouhodobou pevnost staveb.

Biologické a udržitelné materiály

Zajímavým směrem je i vývoj tisknutelných materiálů s biologickým základem. Patří sem například směsi s houbovými vlákny (myceliem), bioplasty nebo dokonce živé buňky. V architektuře se objevují snahy o tisk „živých struktur“, které dokážou reagovat na prostředí nebo se samy regenerovat. Tato oblast je však zatím spíše v rané fázi vývoje a vyžaduje výrazné propojení mezi biotechnologií, materiálovým inženýrstvím a robotikou. Výsledky ale mohou být v budoucnu zásadní například pro udržitelné stavby nebo biolékařské aplikace.

Chytré materiály a funkcionalizace

Další vývoj se zaměřuje na tzv. chytré materiály – tedy takové, které mění své vlastnosti v závislosti na okolí (teplota, vlhkost, elektrické napětí). Díky robotickému tisku je možné tyto materiály strukturovat přesně tam, kde je potřeba. Vznikají tak funkční objekty s integrovanými senzory, aktory nebo elektrickými obvody, které mohou fungovat samostatně bez dodatečné montáže. Tím se z 3D tisku stává plnohodnotná výrobní metoda pro tzv. „embedded systems“ – zařízení, která spojují mechaniku, elektroniku a software v jediném výrobním kroku. [28]

2 PRAKTICKÁ ČÁST

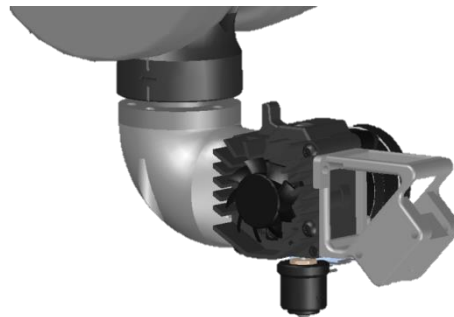
Praktická část této bakalářské práce se zaměřuje na návrh, realizaci a testování funkčního systému pro robotický 3D tisk s využitím průmyslového robota Stäubli TX2-60. Cílem je vytvoření technického řešení umožňujícího přesné řízení pohybu tiskové hlavy a řízenou extruzi materiálu v souladu s generovanými tiskovými trajektoriemi. Systém zahrnuje jak mechanické konstrukční úpravy, tak vývoj elektronického zapojení, softwarové zpracování G-code dat a realizaci komunikačního rozhraní mezi robotem a řídicí elektronikou. Součástí je také návrh zpětnovazebních prvků zajišťujících přesnější řízení tiskového procesu.

2.1 Mechanická konstrukce

Tato část práce se zabývá návrhem a realizací mechanického uchycení tiskové hlavy na průmyslový robot Stäubli TX2-60. Správné uchycení tiskového nástroje je zcela zásadní pro zajištění přesnosti a stability celého tiskového procesu, přičemž konstrukce musí zohlednit jak fyzické vlastnosti robota, tak požadavky vyplývající z technologie 3D tisku. Bylo nutné vytvořit takové řešení, které umožní spolehlivou montáž, minimalizaci vibrací a zároveň nezpůsobí nežádoucí omezení pohybového rozsahu robota. Dále bylo nezbytné zajistit kompatibilitu se zvoleným extruderem a jeho napájecími i datovými vstupy, a to s ohledem na uspořádání kabeláže, hmotnostní zatížení i snadnou údržbu.

2.1.1 Návrh mechanických komponent

Návrh mechanických součástí systému probíhal v prostředí Autodesk Inventor, které poskytlo dostatečnou flexibilitu i přesnost pro tvorbu potřebných modelů. Klíčovým výchozím bodem byl existující 3D model robota Stäubli TX2-60, včetně přesné dokumentace rozměrů příruby (flange), což eliminovalo nutnost jakéhokoliv dodatečného měření. Významným prvkem návrhu byla také tvorba vlastního 3D modelu tiskové hlavy – konkrétně extruderu Orbiter V3.0.



Obrázek 10: 3D model uchycení tiskové hlavy

Extruder byl uchycen k tištěné redukci, která byla následně připevněna přímo na flange robota pomocí čtyř šroubů M4 o délce 15 mm. Redukce samotná byla vyrobena technologií FDM z materiálu PLA+ a k extruderu byla upevněna čtyřmi šrouby M3 o délce 20 mm. Celý systém byl koncipován jako modulární, což umožňuje snadnou výměnu a případné úpravy jednotlivých dílů.

Kromě základního uchycení tiskové hlavy bylo třeba navrhnout i řadu dalších konstrukčních prvků, zejména držáků kabeláže a krabiček pro elektronické komponenty. Kabeláž byla vedena skrze tělo robota v duchu plug-and-play filozofie: jediný konektor na patě robota a druhý u zápěstí zajišťují rychlou výměnu nástroje. Držáky kabelů byly pevně integrovány jak do vnějších částí zařízení, tak i přímo do stěn krabičky pro elektroniku. Tyto držáky byly konstruovány s ohledem na robustnost a stabilitu.



Obrázek 11: Tisková podložka

Tisková podložka byla řešena jako samostatný celek. Jednalo se o magnetickou tiskovou plochu s aktivní tiskovou oblastí 200×200 mm, která byla fixována k šikmé plastové platformě (se sklonem 15°) pomocí oboustranné lepicí pásky. Magnetická podložka byla rovněž přilepena na platformu oboustranou lepicí páskou a tisková deska se k ní pouze pokládá. Systém byl navržen s určitou vůlí, přičemž přesná kalibrace probíhá před každým tiskem, což umožňuje snadnou výměnu podložky bez nutnosti přesného usazení.



Obrázek 12: Krabička řízení tisku

Během vývoje bylo zhotoveno několik provizorních držáků pro komponenty jako MOSFET, TTL převodník, Arduino Nano a další prvky. Tyto části byly nejprve montovány na dřevěnou desku pomocí vrtů. Následně, po ověření funkčnosti celého systému, byl celý elektronický blok převeden do tištěné krabičky z PLA+, která zahrnovala jak otvory pro chlazení, tak montážní body pro všechny komponenty – ty byly upevněny šrouby M3×8 mm. Všechny části jsou snadno přístupné a v případě potřeby i demontovatelné, což výrazně usnadňuje údržbu systému.

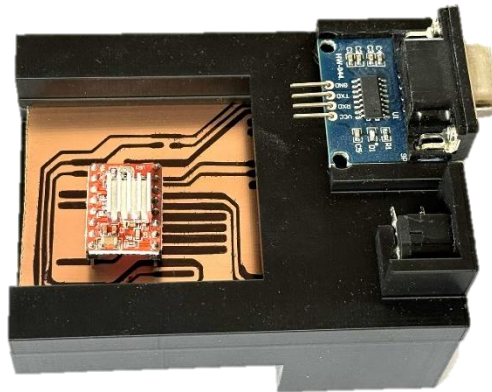
Součástí mechanického návrhu byla rovněž tvorba vlastního schématu řídicí desky v programu Eagle. Schéma bylo nejen navrženo, ale následně i fyzicky realizováno formou leptané dvouvrstvé desky, i když většina vodičů byla vedena pouze po jedné vrstvě. Deska integruje veškeré napájení, logiku, spínací prvky a datovou komunikaci mezi jednotlivými částmi systému.

2.1.2 Volba materiálů a způsob výroby (3D tisk, frézování, ...)

Výběr materiálů použitých při konstrukci mechanických komponent projektu vycházel z praktických experimentů, jejichž cílem bylo nalézt kompromis mezi dostatečnou pevností a schopností deformace či destrukce v případě kolize tiskové hlavy s tiskovou podložkou. Pro tento účel byly testovány nejběžnější filamenty určené pro 3D tisk: PLA, PLA+, PETG, ASA a ABS. Každý z materiálů byl vytištěn ve stejném geometrickém tvaru, přičemž se lišila míra vnitřní výplně. Následně byly prováděny mechanické zátěžové testy – nejprve za použití svěráku a poté simulací nárazu pomocí kladiva nebo přes šrouby vedené v montážních otvorech.

Na základě výsledků těchto zkoušek bylo zvoleno PLA+, které vykazuje vyšší pevnost než běžné PLA, avšak zůstává dostatečně křehké na to, aby při nechtěném kontaktu s podložkou došlo ke kontrolovanému poškození samotného držáku, nikoli citlivé tiskové hlavy. Materiály s vyšší tepelnou i mechanickou odolností (například ASA či ABS) byly vyhodnoceny jako příliš rizikové – v případě kolize by mohly způsobit vážné škody na tiskové sestavě. Vzhledem k tomu, že mechanické části extruderu nejsou vystaveny zvýšené teplotě, nebyla vyšší teplotní odolnost těchto materiálů relevantní.

Veškeré mechanické komponenty byly vyráběny metodou 3D tisku, přičemž jako tiskový materiál bylo využito PLA+ a tisk probíhal s výškou vrstvy 0,16 mm. Výroba nevyžadovala použití CNC strojů ani frézování.



Obrázek 13: Uchycení DPS (test)

Pro výrobu řídicí desky byl použit standardní dvouvrstvý kuprextit o tloušťce 1,2 mm. Geometrie vodivých cest byla vytvořena s využitím řezacího plotru, pomocí kterého byly z běžného vinylu vyřezány masky pokrývající části mědi, které měly zůstat zachovány. Tyto masky byly aplikovány na kuprextitovou desku, jež byla následn

ě ponořena do leptací lázně s roztokem chloridu železitého ($FeCl_3$). Po přibližně dvou hodinách byla deska z lázně vyjmuta, opláchnuta vodou, případně lehce očištěna odmašťovačem a fólie byly bez větších obtíží odstraněny. Po vysušení byla deska opatřena otvory pro piny jednotlivých komponent. Celý proces výroby tištěného spoje tak proběhl plně v režimu ručního leptání s využitím dostupných a cenově nenáročných prostředků.

2.1.3 Uchycení kabeláže a chlazení

Při návrhu a montáži kabeláže byla klíčová flexibilita a jednoduchost uchycení, zejména v testovací fázi. Kabel vedoucí k tiskové hlavě byl zpočátku upevňován pomocí samolepicího suchého zipu, přičemž jedna strana byla přilepena na tělo robota a druhá na samotný kabel. Tento způsob umožňoval rychlou montáž i případné úpravy polohy během vývoje a ladění celého systému.

Pro fixaci kabelu k provizorní montážní desce, vyrobené ze dřeva, byl navržen a vytištěn plastový držák ve tvaru písmene U, dimenzovaný těsně pod průměr použitého kabelu ($25 \times 0,5$ mm²). Držák byl připevněn k podkladu pomocí vrutů a umožňoval pevné a přitom snadno demontovatelné uchycení kabelu. Vnitřní kabeláž samotného robota je vedena výrobcem přímo v jeho konstrukci a nevyžadovala žádné úpravy.

Chlazení jednotlivých komponent bylo řešeno odděleně podle jejich charakteru a požadavků na odvod tepla. Řídicí jednotka robota disponuje vlastním vestavěným chladicím systémem, který zajišťuje stabilitu provozu i při dlouhodobém zatížení. Tisková hlava je vybavena stálým 5V ventilátorem, umístěným na těle extruderu Orbiter, který je v provozu nepřetržitě během tisku.

Speciální pozornost byla věnována chlazení driveru A4988, který je součástí samostatně navržené desky s Arduino Nano. Pro ověření provozních teplot byly prováděny opakované měřicí testy pomocí bezkontaktního infračerveného teploměru. Měření probíhalo v různých scénářích – při nečinnosti, pod zátěží, v maximálním výkonu i v uzavřeném prostoru. V žádném z případů nebyla zaznamenána teplota přesahující 50 °C, což je hluboko pod kritickou hranicí pro stabilní provoz driveru. Z tohoto důvodu nebylo nutné použít aktivní chlazení. Pro pasivní odvod tepla stačilo do krytu desky přidat několik větracích otvorů.

Celý systém včetně robota a řídicí elektroniky byl následně uzavřen do ochranné konstrukce z hliníkových profilů a průhledného plexiskla. Ani v této uzavřené konfiguraci nedocházelo k přehřívání – teplotní stabilita zůstávala zachována po celou dobu provozu.

2.1.4 Mechanismus kalibračního zařízení

Jako nezbytná součást navrženého systému byl integrován kalibrační mechanismus umožňující opakované a přesné zjištění relativní polohy tiskového prostoru (tzv. *frame*). Z důvodu eliminace systematických odchylek v poloze tiskové plochy bylo nutné zajistit automatizované snímání výchozí souřadnice v ose Z před každým tiskem.



Obrázek 14: Uchycení kalibračního tlačítka a kabeláže

Zvolené řešení využívá mechanické dvoupolohové tlačítko s výstupy typu NO (normally open) a NC (normally closed). Tlačítko bylo upevněno přímo na těle extruderu Orbiter pomocí speciálně navrženého držáku (redukce), vyrobeného metodou 3D tisku z materiálu PLA+. Konstrukce držáku byla záměrně navržena s tenkými styčnými nožkami, které v případě chyby

během kalibrace (například při selhání elektroniky nebo přerušení napájení) fungovaly jako mechanická pojistka a zamezily poškození dražších částí tiskové hlavy – došlo pouze k prasknutí redukce.

Signál z výstupu NO sloužil jako hlavní kalibrační spínač – při kontaktu s podložkou robot zaznamenal přesnou výšku v ose Z. Výstup NC byl využit jako bezpečnostní diagnostický kanál – ověřoval přítomnost napájení v obvodu a správnou funkci tlačítka. V případě výpadku napájení by totiž nedošlo k aktivaci výstupu NO a robot by mohl pokračovat v pohybu směrem dolů, což se během vývoje skutečně několikrát stalo a vedlo ke zlomení držáku.



Obrázek 15: Fast IO konektor

Celý systém byl připojen na Fast IO vstup kontroleru Stäubli CS9, konkrétně pomocí standardního 9pinového konektoru typu UNC 4/40 (tzv. DE-9, vizuálně podobného konektoru VGA). Robot při kalibraci přesunul tiskovou hlavu nad střed pracovní plochy, otočil ji o 45° podle definované osy a následně provedl pomalý sjezd v ose Z, dokud nedošlo k sepnutí tlačítka. Následně se toto opakovalo ve 3 rohách tiskové podložky. Zjištěná výška byla zaznamenána jako výchozí kalibrační bod a následně vypočítaný frame.

Pro minimalizaci rizika kolize v případě selhání kalibrace byla ve firmwaru robota definována bezpečnostní rezerva 50 mm, po jejímž překročení by byl pohyb v ose Z automaticky zastaven a hlášena chyba.

2.2 Elektronické zapojení systému

Celý systém je navržen tak, aby spolehlivě řídil proces robotického 3D tisku za pomoci sady elektronických komponent, napájených ze dvou větví – 12 V pro logiku, řízení a běžné prvky, a 24 V pro žhavení trysky a napájení rozhraní Fast IO robota Stäubli. V zapojení figurují

mikrokontrolér Arduino Nano, výkonové tranzistory MOSFET, dvoupolohové relé, převodník RS232-TTL, krokový driver A4988 a další pomocné prvky. Systém byl navržen s důrazem na oddělení výkonových a signálních částí, s ochranami proti přetížení a robustním propojením s robotem.

2.2.1 Popis zapojení jednotlivých komponent (Arduino Nano, MOSFET, relé, převodník, zdroje)

Elektronická část systému byla navržena s důrazem na řízení mikrokontrolérem Arduino Nano, který zajišťuje logiku řízení krokového motoru, spínání topného tělesa pomocí MOSFET tranzistoru a sběr teplotních dat. Vzhledem k potřebě vysoké proudové kapacity a oddělení napájecích větví byl celý systém napájen ze dvou nezávislých zdrojů s oddělenou zemí.

Arduino Nano je napájeno přes pin VIN napětím 12 V a jeho role v systému je klíčová. Pomocí digitálních pinů D2 a D3 generuje signály pro ovládání krokového driveru A4988 – konkrétně signály STEP a DIR. Pin D4 je využit k řízení výkonového MOSFET tranzistoru typu LR7843, který pracuje jako spínací prvek pro napájení topného tělesa tiskové hlavy. Tento tranzistor je schopen přenášet vysoké proudy (až 161 A při 30 V), což zajišťuje dostatečnou výkonovou rezervu i pro případné rozšíření systému.

Analogový vstup A0 na Arduinu slouží pro snímání teploty pomocí čidla umístěného v blízkosti topného tělesa. Tato hodnota je dále využívána v řídicím algoritmu typu PID, implementovaném přímo v programu běžícím na Arduinu, který reguluje výkon topného tělesa a udržuje požadovanou teplotu.

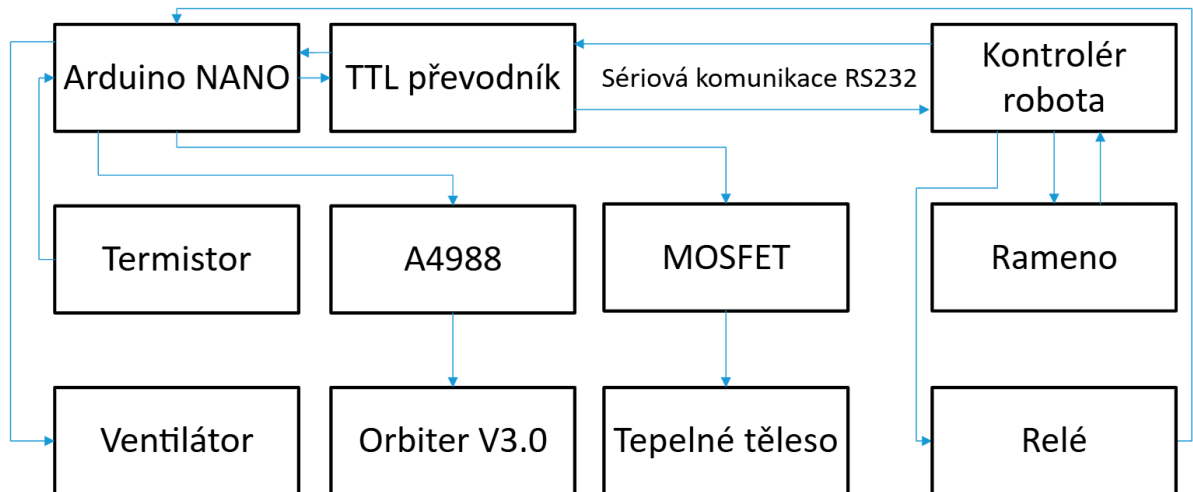
Pro sériovou komunikaci mezi Arduinem a řídicím kontrolérem robota byl použit převodník TTL–RS232 s obvodem MAX3232. Ten umožňuje bezpečné a stabilní připojení k portu RS232 na kontroléru robota, a to pomocí standardního 9pinového konektoru.

Součástí zapojení je také mechanické relé, které slouží k fyzickému odpojení napájení Arduina. Toto relé je řízeno přímo kontrolérem robota a jeho funkcí je zajištění automatického vypnutí systému po dokončení tisku nebo při havarijní situaci. Vypnutí napájení tímto způsobem zvyšuje celkovou bezpečnost systému a zároveň minimalizuje spotřebu energie.

Napájení systému je rozděleno do dvou větví. První větev pracuje s napětím 12 V a napájí samotné Arduino, MOSFET modul a ostatní nízkonapěťové prvky. Druhá větev pracuje s napětím 24 V a napájí krokový motor přes Vmot na driveru A4988, topné těleso, relé a také

Fast IO vstupy řídicího kontroléru robota. Pro napájení 12 V byl použit běžný spínaný zdroj s výstupem 12 V / 3 A, zatímco 24 V větev je napájena univerzálním notebookovým adaptérem značky Connect-IT o výkonu 90 W. Obě napájecí větve mají oddělenou zem (GND), čímž se předešlo možným interferencím a poruchám v měření či řízení.

2.2.2 Blokové schéma celého systému



Obrázek 16: Blokové schéma celého systému

2.2.3 Ochrany, napájení a bezpečnostní prvky

I přesto, že systém neobsahuje rozsáhlé redundantní ochrany, byly při jeho návrhu zohledněny základní bezpečnostní principy jak z pohledu hardwarového zapojení, tak softwarového řízení. Základní úroveň ochrany je samotné oddělení napájecích větví – napájecí zdroje 12 V a 24 V jsou fyzicky nezávislé, každá větev je napájena z vlastní zásuvky. Toto oddělení snižuje riziko nechtěného přepětí či proudových smyček a přispívá k celkové stabilitě systému.

Z hardwarových ochranných prvků je nejvýznamnějším prvkem mechanické relé, které je řízeno přímo z robota a umožňuje fyzicky odpojit napájení Arduina Nano po skončení tisku. Díky tomu lze efektivně vypnout napájecí logiku systému bez nutnosti zásahu obsluhy. Samotný kontrolér robota je navíc vybaven integrovanou pojistkou na straně napájení, která chrání vnitřní elektroniku před přetížením.

Na úrovni řízení výkonu krokového motoru byla použita jednoduchá, ale funkční ochrana v podobě ručně nastaveného limitu výstupního proudu pomocí potenciometru přímo na driveru A4988. Proud byl nastaven na přibližně polovinu možné hodnoty, což snižuje riziko přehřátí

nebo poškození driveru i samotného motoru. Toto nastavení rovněž přispívá ke snížení ztrátového tepla v systému.

Softwarová ochrana topného systému je implementována přímo v programu ve VAL3, který běží na kontroléru robota. V případě, že teplota měřená termistorem překročí hranici 320 °C, dojde okamžitě k deaktivaci výstupu řídicího MOSFETu, a tím k přerušení napájení topného tělesa. Stejný postup nastane i v případě, kdy senzor hlásí hodnotu nižší než 0 °C, což obvykle značí chybu v zapojení, poškozený nebo odpojený vodič. MOSFET zůstane deaktivovaný, dokud nedojde k opětovnému poklesu teploty pod definovanou mez nebo obnovení signálu ze senzoru.

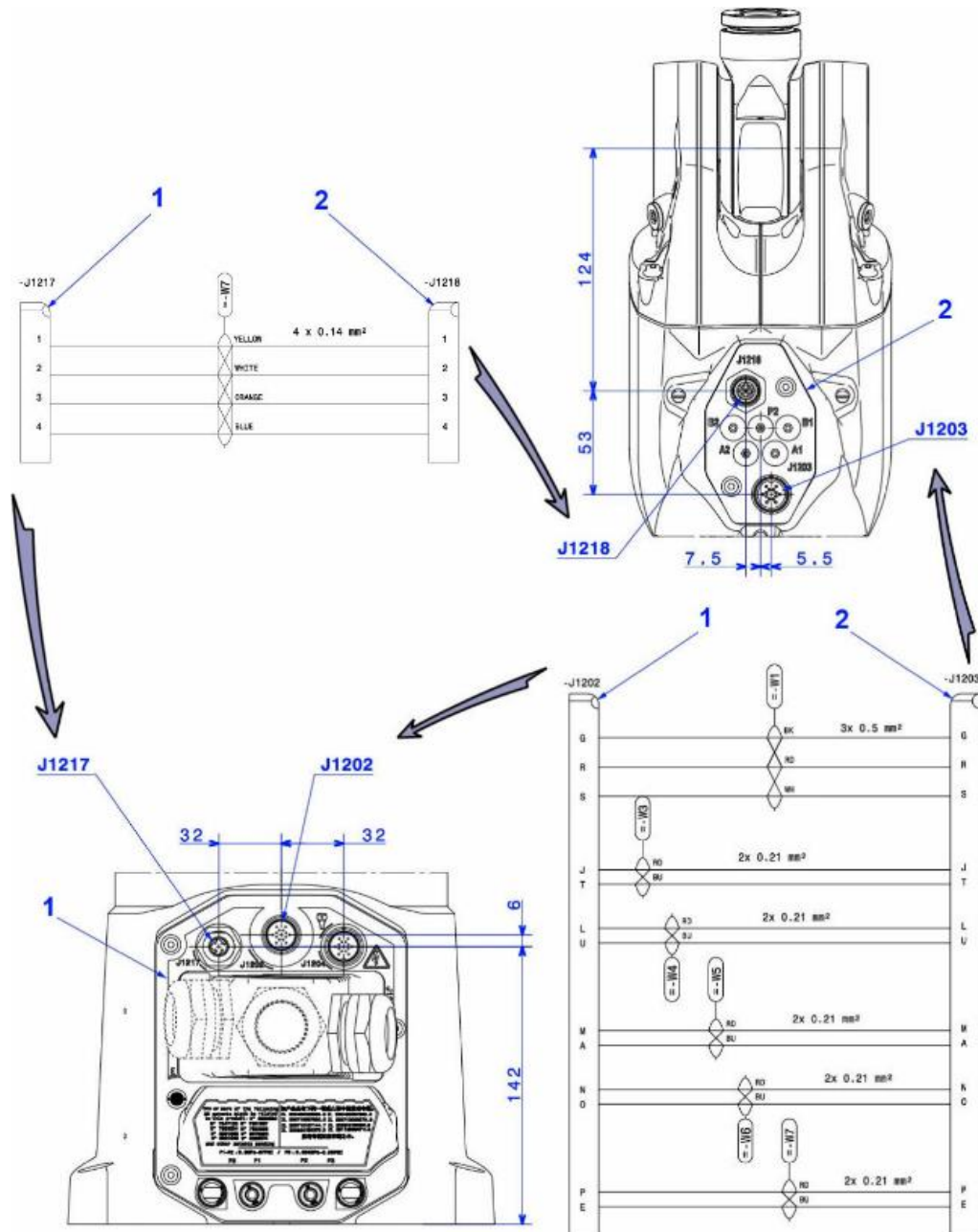
Za důležitý bezpečnostní prvek lze považovat i mechanismus kalibrace výšky, který využívá fyzicky snadno zničitelný držák s tlačítkem. V případě selhání systému při kalibraci v ose Z dojde raději k destrukci této levné plastové části než k poškození tiskové hlavy nebo podložky. Tento záměrně slabý článek tak funguje jako mechanická pojistka a zamezuje vzniku závažnějších škod.

2.2.4 Propojovací prvky mezi řídicími prvky a robotem

Propojení mezi řídicí elektronikou systému a robotem Stäubli TX2-60 je realizováno s důrazem na mechanickou stabilitu, srozumitelnost a jednoduchou údržbu. Vzhledem k umístění bylo nutné volit pevné, standardizované a snadno dostupné komponenty, které umožní i pozdější servis nebo výměnu bez nutnosti přepracování zapojení.

Základním komunikačním prvkem je sériový kabel typu RS232, konkrétně prodlužovací verze PREMIUMCORD (Canon 9M/9F) o délce 10 metrů. Tento kabel zajišťuje obousměrnou komunikaci mezi mikrokontrolérem Arduino Nano a kontrolérem robota. Na straně robota je konektor RS232 pevně uchycen v jeho kontroléru, zatímco na straně řídicí jednotky je druhý konektor připevněn ke stěně krabičky řízení pomocí dvojice šroubů M3x8, což zajišťuje jeho fixaci proti pohybu a zároveň umožňuje snadný přístup.

Napájení vstupů Fast IO na robota je zajištěno pomocí externího 24V zdroje, který je galvanicky oddělený od ostatních napájecích větví systému. Všechny vodiče jsou vedeny skrze tělo robota pomocí vestavěné kabeláže. Konkrétně jsou v těle robota integrovány dvě samostatné linky: první tvoří 13pinový kabel, který obsahuje 3 vodiče o průřezu 0,5 mm² a 10 vodičů o průřezu 0,25 mm², druhou tvoří 4pinový kabel se čtyřmi vodiči o průřezu 0,16 mm². Oba kabelové svazky jsou vedeny vnitřkem robota od základny (paty) až po zápěstí, kde jsou zakončeny identickými konektory jako na vstupu.



Obrázek 17: Zapojení kabeláže uvnitř robota [5]

Pro vlastní propojení mezi elektronikou (uloženou v krabici řízení 3D tisku) a patou robota byl použit samostatný vícežilový kabel $25 \times 0,5 \text{ mm}^2$, kterým jsou vedeny veškeré signálové i napájecí větve. Tento kabel přenáší signály řízení a snímání. Od zápěstí robota pak pokračuje vedení ke konektorům na tiskové hlavě, přičemž každý signál nebo napájecí větev je propojena konkrétní žilou, podle předem určeného schématu.

Kalibrační signál je veden samostatně skrze 4pinový kabel s tenkými vodiči, což odpovídá jeho nízkým proudovým nárokům a mechanickému provedení. Ostatní signály – například výstupy pro motor z driveru A4988, teplotní čidlo, napájení ventilátoru a řídicí vedení pro MOSFET – jsou soustředěny do 13pinového kabelu, který má dostatečnou proudovou rezervu i mechanickou odolnost.

Na úrovni konektorů bylo zvoleno jednoduché a funkční řešení pomocí DuPont konektorů s roztečí 2,54 mm, které se osvědčily díky své variabilitě. Použity jsou jednotlivé i vícenásobné (např. 2–4pinové) konektory v závislosti na počtu vodičů pro konkrétní komponentu. Toto řešení umožňuje snadnou výměnu nebo úpravu zapojení bez nutnosti pájení nebo použití specializovaných konektorových systémů.

2.3 Řídicí architektura a komunikace

Tato část se zabývá strukturou řízení celého 3D tiskového systému, způsobem rozdělení funkcí mezi jednotlivé řídicí prvky a implementací vzájemné komunikace. Popisuje, jak jsou úkoly rozděleny mezi robotický kontrolér, mikrokontrolér Arduino Nano a nadřazený software pro přípravu a interpretaci tiskových dat. Dále jsou zde vysvětleny principy přenosu signálů, datových zpráv a časové synchronizace mezi jednotlivými subsystémy. Celý návrh byl vytvořen tak, aby umožnil efektivní řízení tiskového procesu s důrazem na přesnost, nízkou latenci a vysokou spolehlivost.

2.3.1 Vysvětlení řízení tisku: odkud se řídí který prvek

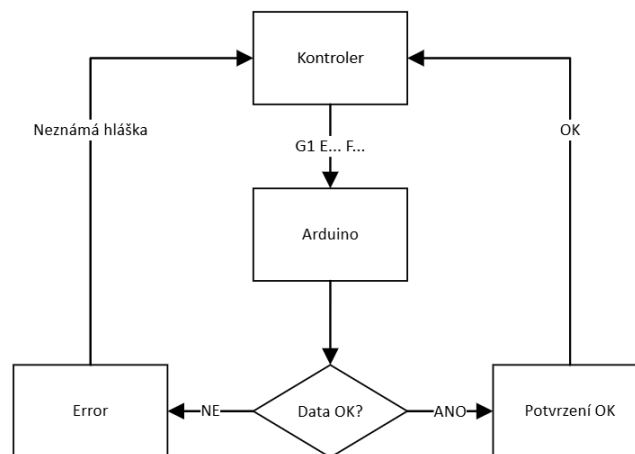
Řízení tiskového procesu je rozděleno mezi dva hlavní prvky: robotický kontrolér robota Stäubli TX2-60 a mikrokontrolér Arduino Nano. Každý z nich má v systému jasně vymezenou roli a jejich vzájemná koordinace probíhá prostřednictvím sériové komunikace, konkrétně po lince RS232, přizpůsobené převodníkem MAX3232 na úroveň TTL.

Kontrolér robota je zodpovědný za samotné prostorové řízení – vykonává přesné pohyby v šesti osách podle definovaných souřadnic X, Y, Z, RX, RY a RZ. V rámci tohoto systému jsou

rotační osy RX a RY nastaveny jako konstantní hodnoty (0° a 180°), stejně tak i osa RZ, která je fixně nastavena na 45° . Tyto hodnoty nebylo nutné měnit vzhledem k tomu, že v projektu nebyl realizován non-planar tisk. Hlavní osa řízení trajektorie tak zůstává plně v kompetenci robota, včetně interpolace a synchronizace lineárních pohybů.

Kromě pohybové logiky ovládá robot i napájení mikrokontroléru. Pomocí výstupu z Fast IO řídí relé, které slouží k zapínání a vypínání Arduina Nano, například při startu nebo ukončení tisku. Dále kontrolér přijímá signál z kalibračního tlačítka, který je připojen přímo na jeho vstup, bez přechodu přes další elektroniku. Tento signál se využívá při kalibraci výšky v ose Z, kde slouží k určení přesné výšky tiskové plochy.

Arduino Nano zajišťuje veškerou činnost spojenou s řízením extruze a teploty. Pomocí výstupů D2 a D3 řídí krokový driver A4988, který ovládá extruder. V průběhu tisku odesílá Arduino kontroléru robota pohybové příkazy ve formátu G-code, konkrétně typu G1 E... F..., které definují množství extrudovaného (nebo retrahovaného) materiálu a rychlost jeho podávání. Tyto příkazy jsou odesílány v reálném čase s krátkým předstihem – typicky v momentu, kdy robot dokončuje předchozí pohyb, což umožňuje plynulé navázání na další sekvenci bez zpoždění.



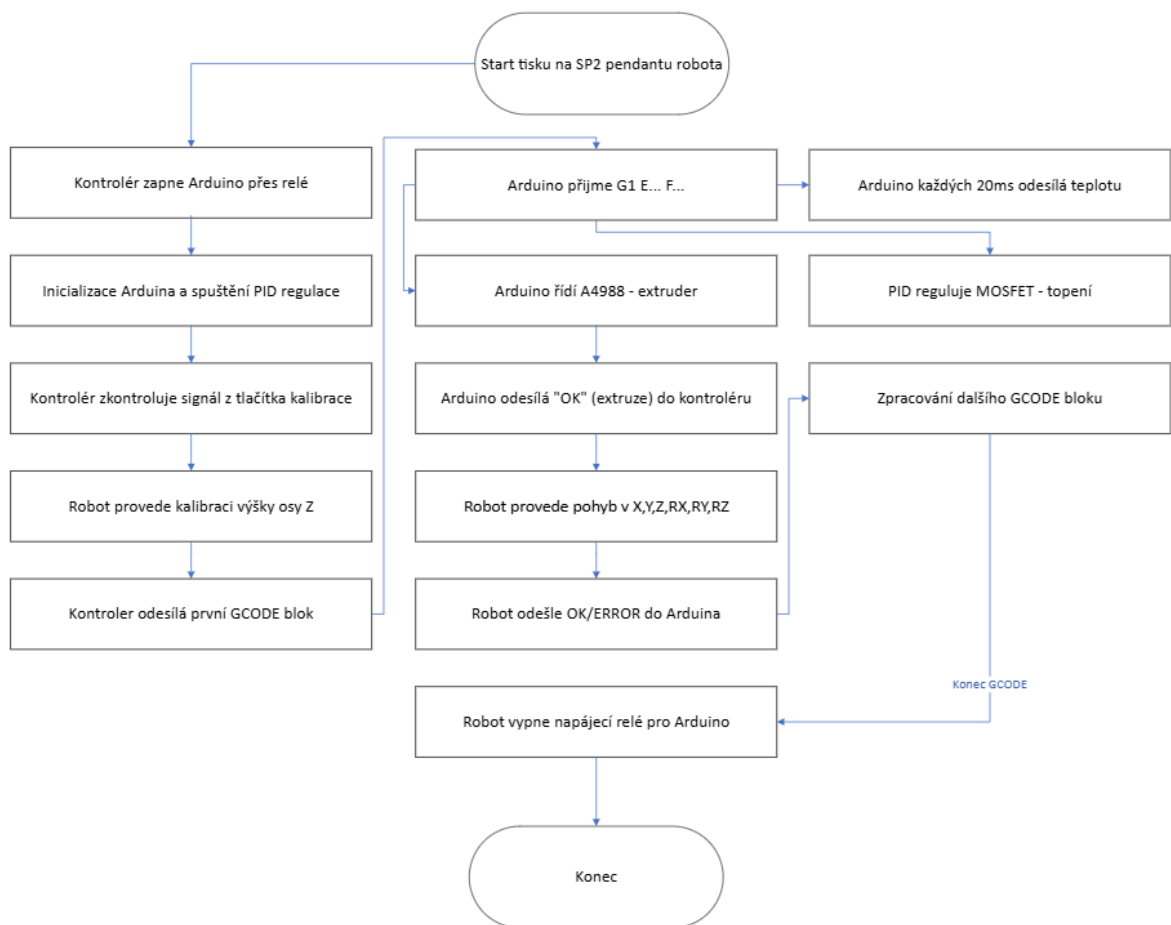
Obrázek 18: Vývojový diagram zpětné vazby

Zpětná vazba z robota přichází v podobě potvrzovací zprávy, která může být buď OK, nebo chybová (ERROR), v závislosti na tom, zda byl příkaz přijat a zpracován bez problému. Paralelně s tím Arduino každých 20 ms odesílá i aktuální hodnotu teploty trysky, která je měřena pomocí čidla připojeného na analogový vstup A0. Tato hodnota je využívána nejen pro informování robota, ale především pro řízení výkonu topného tělesa prostřednictvím MOSFETu řízeného výstupem D4.

Samotný ventilátor pro chlazení tiskové hlavy je napájen trvale a není řízen žádným signálem – jeho úkolem je pouze zajistit stálé proudění vzduchu v okolí extruderu. Tím se předchází přehřívání citlivých plastových částí, zejména držáku hotendu.

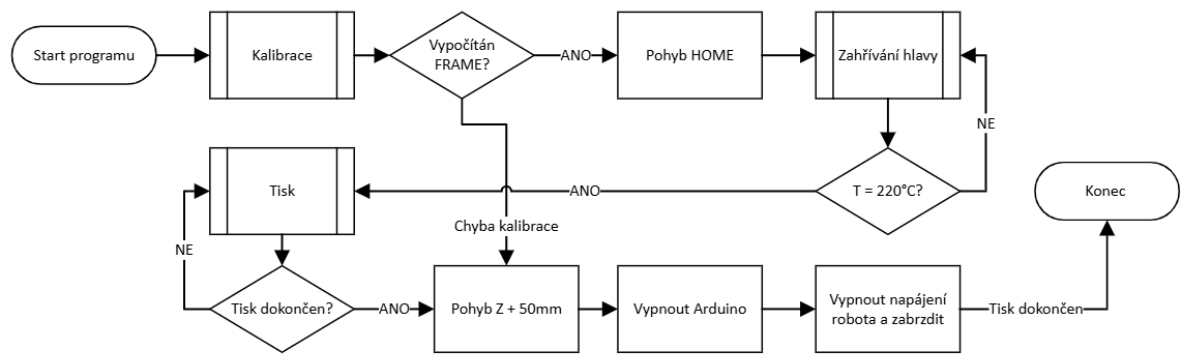
Díky tomuto dělení funkcí je možné dosáhnout vysoké přesnosti, nízké latence a stabilního řízení, aniž by bylo nutné integrovat všechny procesy do jediného zařízení. Robot tak plní úlohu prostorového manipulátoru, zatímco Arduino funguje jako specializovaný subsystém pro řízení extruze a teplotní stabilizaci.

2.3.2 Vývojový (řídící) diagram systému řízení



Obrázek 19: Vývojový diagram systému

2.3.3 Diagram tiskové sekvence



Obrázek 20: Vývojový diagram průběhu sekvence tisku

2.3.4 Synchronizace časování jednotlivých subsystémů

Koordinace jednotlivých částí systému, zejména časová synchronizace mezi řízením pohybu robota a řízením extruze prostřednictvím Arduino Nano, patřila mezi zásadní aspekty celého návrhu. Vzhledem k tomu, že se jedná o distribuovaný řídicí systém s oddělenými procesory (robotický kontrolér a mikrokontrolér), bylo nutné časování sladit experimentálně s důrazem na spolehlivost, plynulost a minimalizaci zásahů do běhu tiskové sekvence.

V počáteční fázi bylo správné nastavení synchronizace řešeno čistě experimentálně – sledováním výsledku při různých rychlostech a objemech extrudovaného materiálu. Postupným laděním se dospělo k vytvoření univerzální konstanty, která umožňuje přepočítat rychlost extruze v závislosti na aktuální rychlosti pohybu robota. Tato konstanta byla implementována přímo ve zdrojovém kódu robota v jazyce VAL3 a umožňuje, aby při zrychlení či zpomalení robotického pohybu docházelo zároveň k proporcionální změně v množství vytlačeného filamentu.

Aby se minimalizovalo riziko záseků způsobených přetížením komunikační linky nebo zásobníku instrukcí, byl do řízení zaveden mechanismus, kdy se nový G-code příkaz pro pohyb zasílá do robota v okamžiku, kdy je 90 % předchozího pohybu dokončeno. Tím se zajišťuje plynulý přechod mezi jednotlivými kroky bez zbytečného zpoždění a zároveň se zabrání zahlcení řídicího zásobníku robota, který je sice schopný pojmout přibližně 10 000 řádků, ale nadměrné plnění může zpomalit odezvu systému.

Arduino zajišťuje řízení teploty i krokového motoru pomocí nesmyčkového časování založeného na funkci `millis()`, což umožňuje přesné časové řízení i bez použití zpožďovacích funkcí. Aktuální teplota trysky je do kontroléru robota odesílána v intervalu 20 ms. Tato

hodnota je využívána k vyhodnocení bezpečnostních podmínek a případné korekci pohybových sekvencí.

Během vývoje se projevila důležitost této synchronizace zejména v případech, kdy Arduino nestihlo včas odeslat data o extruzi. Takové zpoždění vedlo ke zpoždění celé smyčky řízení, přetížení procesoru Arduina a v extrémních případech i k přehřátí topného tělesa, protože se včas nezměnila hodnota PWM signálu řízeného MOSFETem. Tento problém byl vyřešen implementací jednoduché korekce přímo v programu robota – pokud nebylo přijato potvrzení o dokončení příkazu (signál OK z Arduina), robot automaticky zpomalí a čeká, než bude předchozí řádek dokončen.

Komunikace mezi robotem a Arduinem je obousměrná a založena na potvrzovacím systému. Robot po přijetí příkazu odesílá zprávu OK zpět, zatímco Arduino potvrzuje příkazy až po jejich úplném vykonání, tedy například po dokončení extruze. Tento způsob zajišťuje robustní řízení i při proměnlivé rychlosti tisku a garantuje, že žádná z operací nebude zahájena před dokončením předchozí.

2.4 Softwarová implementace

Tato kapitola se zaměřuje na programové řešení celého systému robotického 3D tisku. Podrobně popisuje jednotlivé části softwarové architektury, konkrétní programovací jazyky a nástroje použité k řízení robota, mikrokontroléru a interpretaci tiskových dat. Vysvětluje, jak jednotlivé vrstvy softwaru spolupracují, jak jsou propojeny a jak byla zajištěna přesnost, rychlost a spolehlivost při řízení celého tiskového procesu.

2.4.1 Stručný přehled programovacích jazyků a prostředí:

Řídicí systém robotického 3D tisku byl realizován ve třech různých programovacích prostředích, z nichž každé mělo specifickou roli v rámci celkové architektury. Výběr těchto nástrojů vycházel z požadavků na kompatibilitu s použitým hardwarem, přesnost řízení a možnost optimalizace jednotlivých částí podle specifických potřeb projektu.

Řízení samotného robota bylo realizováno v programovacím jazyce VAL3, který je nativní pro roboty značky Staubli. Celý program byl vytvořen ručně v prostředí Staubli Robotics Suite 2022 (SRS), bez využití automatických generátorů trajektorií. Struktura programu je přehledně členěna do hlavní smyčky a sady menších podprogramů, které pokrývají například kalibraci výšky, řízení pohybu, spouštění nebo ukončení tisku. V rámci projektu byla rovněž vytvořena

vlastní knihovna pro sériovou komunikaci (SIO), která umožnila jednodušší a přehlednější práci s daty přicházejícími z Arduina.

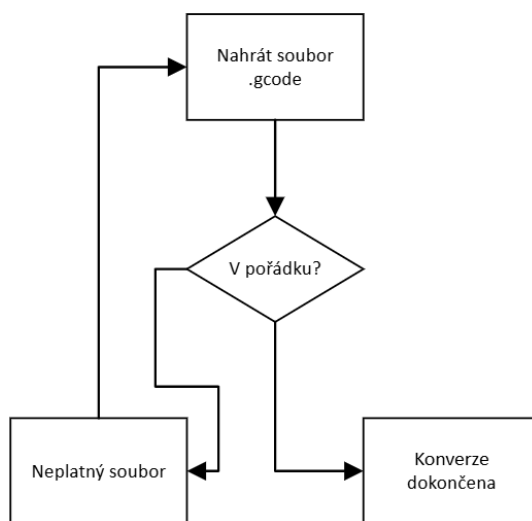
Řídicí logika pro teplotu, extruzi a komunikaci byla implementována na platformě Arduino Nano, s využitím prostředí Arduino IDE. Program byl napsán v jazyce C++ a využívá mimo jiné knihovnu pro řízení PID regulace, která byla upravena a doladěna na základě experimentálních testů. Pro komunikaci po sériové lince byla použita také knihovna SIO. Funkce millis() se používá pro správu časování bez blokování programu. Resetovací logika není řešena přímo v programu Arduina, ale je zajištěna externě – v případě detekce selhání ze strany robota je Arduino automaticky restartováno pomocí výstupu z kontroléru.

Zcela samostatnou částí je desktopová aplikace sloužící jako překladač G-code, která byla kompletně vyvinuta v jazyce C# v prostředí Visual Studio 2022. Úlohou tohoto překladače je převést běžný G-code vygenerovaný například ze sliceru Cura do speciálního formátu s příponou .pjt, který je kompatibilní s robotickým systémem. Každý výstupní soubor obsahuje převedené trajektorie pohybu, rozšířené o další tři rotační osy (RX, RY, RZ), a zároveň doplněné o informace o délce extruze a rychlosti podávání filamentu. Překladač byl navržen tak, aby fungoval jako samostatně spustitelná aplikace (.exe) bez závislosti na prostředí, a tedy byl snadno použitelný na libovolném počítači bez nutnosti instalace dalších nástrojů.

2.4.2 Popis překladače pohybů G-code

Jedním z klíčových prvků celého systému je vlastní desktopová aplikace, která slouží jako překladač klasického G-code do formátu kompatibilního s robotickým řídicím systémem. Aplikace byla napsána kompletně v jazyce C# v prostředí Visual Studio 2022 a slouží jako mezičlánek mezi běžným slicerem (například Cura) a robotem Stäubli.

Princip je jednoduchý. Uživatel si nejprve připraví 3D model, který slicuje do běžného .gcode formátu. Tento .gcode soubor je následně nahrán do překladače pomocí jednoduchého grafického rozhraní. Po stisknutí tlačítka „Nahrát“ se otevře standardní dialog pro výběr souboru, načež se zobrazí další možnosti konfigurace. Překladač umožňuje zvolit, které části původního G-code mají být zachovány nebo upraveny. Například lze zvolit, zda se má zachovat řízení extruze, řízení teploty, zapínání a vypínání ventilátoru nebo zda má být za každý pohybový příkaz vložena funkce waitEndMove() pro přesné dokončení předchozí trajektorie před dalším krokem.



Obrázek 21: Vývojový diagram principu konverze

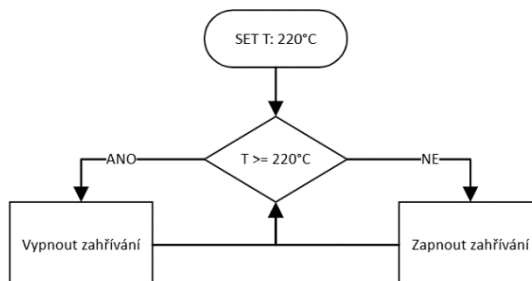
Důležitou funkcí je nastavení maximálního počtu řádků na výstupní soubor. S ohledem na omezenou velikost zásobníku robota si uživatel může určit, kolik řádků má obsahovat každý výstupní .pjt soubor. Například při zadání hodnoty 5000 a vstupním G-code o velikosti 56164 řádků dojde k automatickému vytvoření dvanácti výstupních souborů – draha1.pjt až draha12.pjt. Doporučená hodnota je 10000 řádků na soubor, což představuje optimální kompromis mezi výkonem robota a přehledností. Tato hodnota se v praxi osvědčila jako stabilní, robot neztrácí plynulost a zároveň nevzniká zbytečně velké množství souborů.

Samotná konverze probíhá téměř okamžitě. Po stisknutí tlačítka „Konvertovat“ trvá celý proces řádově méně než jednu sekundu (čas nebyl přesně měřen, ale odezva je prakticky okamžitá). Výstupní soubory se automaticky uloží do zvolené cílové složky. Po dokončení se zobrazí potvrzení o úspěšnosti a aplikaci lze bez dalších kroků uzavřít.

Exportované .pjt soubory lze následně přenést do robota několika způsoby. Nejčastější je využití FTP připojení nebo přímé nahrání přes aplikaci Stäubli Robotics Suite (SRS). V případě

potřeby lze použít také běžný USB flashdisk a soubory přenést přímo do kontroléru. Překladač byl navržen jako přenosný, takže jej lze spustit z libovolného počítače bez nutnosti instalace, což je výhodné při práci v různých prostředích.

2.4.3 Vysvětlení způsobu řízení PID, směřování signálů, reakce na chyby



Obrázek 22: Vývojový diagram regulace teploty

Regulace teploty trysky je v celém systému klíčovým prvkem, a proto byla implementována pomocí klasické PID smyčky. Řídicí algoritmus běží na mikrokontroléru Arduino Nano a zajišťuje stabilní teplotu v průběhu celého tisku. Výchozí teplota (setpoint) byla nastavena na 220 °C. Původně byly hodnoty parametrů P, I a D vypočítány pomocí standardních vzorců, avšak výsledky neodpovídaly požadovanému chování, a tak bylo přistoupeno k experimentálnímu ladění. To spočívalo ve sledování reakce systému na náhlé změny zátěže a postupném doladění hodnot, dokud nebylo dosaženo požadované stability a rychlosti náběhu. Regulace probíhá v pravidelných intervalech přibližně 4 ms, s využitím funkce millis() pro časování, což umožňuje bezproblémový běh bez blokování ostatních částí programu.

Arduino Nano řídí všechny výstupní signály relevantní pro tisk. Pin D2 slouží k nastavení směru otáčení krokového motoru (DIR), pin D3 generuje impulsy pro krokování (STEP), oba směřují přímo na vstupy driveru A4988. Pin D4 ovládá MOSFET tranzistor typu LR7843, který spíná napájení pro topné těleso trysky. Výstupní signál z D4 tak určuje, zda bude topné těleso zahříváno, nebo zda zůstane vypnuto. Komunikace mezi Arduinem a robotem probíhá prostřednictvím sériového rozhraní po linkách TX a RX.

Přímá zpětná vazba na úrovni krokového motoru nebo extruze k dispozici není – Arduino nemá žádný enkodér nebo senzor, který by vyhodnocoval, zda k fyzické extruzi opravdu došlo. Předpokládá se, že pokud jsou signály DIR a STEP správně generovány, a motor i driver fungují bez závad, extruze probíhá podle zadání. V případě řízení teploty je situace jiná – zde je zpětná vazba jednoznačně přítomna díky měření pomocí teplotního čidla. Pokud teplota neodpovídá

požadované hodnotě, nebo nedochází k žádné změně při aktivním zahřívání, systém automaticky vyhodnotí chybu.

Chybové stavy jsou rozpoznávány softwarově a jejich řešení probíhá na úrovni řízení robota. Ve VAL3 programu je nastavena podmínka, že pokud teplota trysky překročí hranici 320 °C, nebo pokud senzor vrátí hodnotu menší než 0 °C (což signalizuje možný výpadek vedení nebo poruchu čidla), robot okamžitě přeruší tisk. V prvním případě se vizuálně projeví i kouř vycházející z trysky, což je další indikace přehřátí. V obou případech se zastaví proces tiskového cyklu, deaktivuje se výstupní signál MOSFETu a systém přechází do bezpečnostního režimu.

Robotický kontrolér má v sobě implementovaný ochranný systém, který při detekci závažné chyby odstaví celý systém včetně napájení ze sítě 230 V, čímž dojde k okamžitému vypnutí napájecích zdrojů a tím i celé řídicí logiky. Kromě toho má obsluha možnost ručně ukončit tisk pomocí ovládacího panelu SP2, tzv. pendantu. Po ručním zásahu je nutné systém opětovně inicializovat a spustit celý tiskový proces od začátku, případně z mezipozice.

2.5 Testování a kalibrace systému

Pro ověření funkčnosti celého systému bylo nutné provést řadu testovacích a kalibračních měření. Tato fáze zahrnovala jak kontrolu přesnosti prostorového pohybu robota, tak i stabilitu teplotní regulace, rychlost reakce systému a spolehlivost při dlouhodobém provozu. Zvláštní pozornost byla věnována kalibraci tiskového prostoru, doladění PID parametrů a ověření časové synchronizace mezi jednotlivými subsystemy. Testování probíhalo postupně, s cílem odhalit slabá místa návrhu ještě před ostrým provozem a zároveň potvrdit, že systém splňuje požadavky na kvalitu, bezpečnost a opakovatelnost.

2.5.1 Metodika testování: přesnost, rychlost, zpoždění

Testování systému probíhalo postupně a prakticky, ověřením reálné přesnosti, konzistence pohybu a synchronizace mezi jednotlivými částmi řízení. První fáze byla zaměřena na přesnost polohování robota, která byla ověřena přímo pomocí oficiálního kalibračního zařízení společnosti Stäubli. Tento systém využívá laserový měřicí systém, do jehož paprsku robot najíždí se speciálním terčem. Po provedení celé kalibrace byla přesnost pohybu potvrzena na úroveň $\pm 0,01$ mm, což robota zařadilo do nejvyšší možné kategorie přesnosti podle interních standardů výrobce. Stejnou metodou byla ověřena i opakovatelnost pohybu.

Následovalo testování extruze a její přesnosti. Nejprve byl měřen rozdíl mezi požadovaným a skutečně spotřebovaným filamentem při vytlačení 100 mm. Původní hodnota ukazovala odchylku přibližně +120 % – filament byl tedy podáván výrazně rychleji, než odpovídalo zadání. Pro odladění byla na filament nakreslena ryska a pomocí digitálního posuvného měřidla byl sledován reálný posun materiálu. Po několika iteracích úprav bylo dosaženo přesnosti $\pm 0,1$ mm. Dalším krokem bylo porovnání požadovaného času extruze s reálným časem trvání – i zde bylo zjištěno, že extruder měl tendenci podávat filament přibližně o 60 % rychleji. Rychlost byla následně upravena a sladěna s reálnou dynamikou rozjezdu robota.

Tabulka 1: Tabulka kalibrace dávkování

Pokus	Zadaná délka [mm]	Naměřeno [mm]	Konstanta	Hodnocení
1	100	213.6	50.00	Vysoká hodnota
2	100	141.1	47.50	Vysoká hodnota
3	100	108.5	45.00	Blíží se požadavku hodnoty
4	100	91.4	43.00	Nízká hodnota
5	100	97.6	43.60	Hodnota stále nízká
6	100	104.1	43.90	Hodnota stále vysoká
7	100	101.2	43.88	Optimální hodnota
8	100	100.1	43.86	Finální hodnota

Významnou částí testovací fáze bylo provedení zkušební tisku. Pro tento účel byl vybrán jednoduchý model vázy (simple_vase.stl), který byl nasliceován jako BP_vaza.gcode. Celková doba tisku činila přibližně 1 hodinu a 3 minuty. V průběhu tisků byly zkoušeny různé rychlosti pohybu robota – výsledky ukázaly, že nejlepší kvality bylo dosaženo při hodnotách 10 % až 25 % maximální rychlosti. Při vyšších rychlostech docházelo k mechanickým vibracím natolik výrazným, že robot začal pohybovat i částmi kotvící konstrukce, což se negativně projevilo na kvalitě výtisku.

Tabulka 2: Tabulka rychlosti extruze

Pokus	Rychlost robota [%]	Rychlost extruze [mm/s]	Výsledek
1	10	8	Pomalá extruze
2	10	10	Pomalá extruze
3	10	13	Pomalá extruze
4	10	16	Pomalá extruze
5	10	35	Rychlá extruze
6	10	22	Optimální extruze
7	10	27	Optimální extruze
8	10	25	Finální extruze

Zpoždění mezi řízením a reakcí jednotlivých částí systému nebylo měřeno přesnou instrumentací, protože nebyly k dispozici potřebné nástroje. Subjektivně však bylo zřejmé, že klíčovou roli hraje rozdílná doba náběhu mezi extruderem a robotem. Zatímco krokový motor extruderu reaguje téměř okamžitě, robot potřebuje výrazně delší čas na rozjezd. Tento rozdíl byl vyrovnán úpravou rychlostních konstant v řídicím algoritmu, tak aby extruze nezačala dříve, než robot skutečně zahájí plynulý pohyb. Výsledné nastavení umožnilo sladit oba subsystémy natolik, že k viditelnému předextrudování či mezerám mezi segmenty již nedocházelo.

2.5.2 Kalibrace PID regulace a zpětné doladění parametrů

Kalibrace systému byla rozdělena na několik úrovní, z nichž každá se zaměřovala na jiný aspekt funkce. Důležitou roli hrála jak přesná definice pracovního prostoru robota, tak i správné nastavení teplotní regulace a doladění rychlostních konstant pro extruzi a pohyb. Cílem bylo dosáhnout vyváženého stavu, ve kterém budou jednotlivé komponenty spolupracovat bez nadbytečných výkyvů nebo zpoždění.

Pro nastavení pracovního prostoru byla využita kalibrace pomocí mechanického dvoupolohového tlačítka, které bylo uchyceno přímo na nástrojovou část robota. Nejprve byly ručně určeny tři rohové body tiskové plochy – robot najel do každé pozice a souřadnice byly zaznamenány. Následně se v programu VAL3 definoval ofset v ose Z ve výšce 50 mm od požadovaného bodu pomocí funkce „appro“, která zajistí bezpečný nájezd robota shora. Při každé nové inicializaci systému robot postupně najíždí nad jednotlivé body, poté klesá dolů a

při doteku tlačítka se zaznamená aktuální souřadnice jako jeden z bodů nového pracovního rámce (frame). Ten je následně používán během tisku jako referenční. Pro jemné doladění výšky během tisku je k dispozici funkce tzv. „babystep“, která umožňuje měnit výšku v ose Z po 0,1 mm přímo během tisku. Po ukončení každého cyklu se dočasný rámec maže a opět se používají výchozí hodnoty zapsané v programu. Uživatel má samozřejmě možnost je ručně přepsat.

Ladění PID regulace pro topné těleso bylo poměrně časově náročné. Přes prvotní výpočty bylo nutné provést přibližně třicet testovacích iterací, než se podařilo nastavit parametry, které zajistily stabilní chod. Aktuálně se hodnota teploty drží v toleranci přibližně $\pm 3-5$ °C, což je pro daný způsob tisku akceptovatelné. Doba potřebná k roztopení trysky ze studeného stavu je přibližně 22 sekund. Stabilizace na cílové hodnotě (typicky 220 °C) trvá dalších 27 sekund v závislosti na předchozím ochlazení.

Tabulka 3: Tabulka PID, rychlosti a kalibrace

Pokus	Kp	Ki	Kd	Překmit [°C]	Ustálení [s]	Hodnocení
1	100	2.5	0.8	20	-	Nestabilní systém
2	75	2	0.6	15	-	Nestabilní systém
3	60	1.5	0.4	12	-	Nestabilní systém
4	45	1.2	0.3	13	93	Systém osciluje
5	60	1	0.5	7	50	Systém se ustálí
6	54	1.2	0.3	6.5	45	Přijatelný systém
7	54	1.3	0.3	5	41	Přijatelný systém
8	54	1.1	0.6	4	36	Optimální systém
9	54	1.2	0.4	3.5	31	Optimální systém
10	54	1.2	0.5	3	27	Finální systém

Zpětné doladění ostatních parametrů probíhalo průběžně během všech testovacích cyklů. V rámci ladění byly postupně upraveny téměř všechny dostupné hodnoty – od rychlosti robota, přes extruzi až po synchronizační zpoždění. První tisk vykazoval výrazné nedostatky, ale postupným doladováním došlo k výraznému zlepšení. Nejsilnější vliv na kvalitu výstupu mělo dávkování materiálu a rychlost pohybu. Teplota měla vliv především na ostrost detailů, ale v rozmezí 190 až 230 °C byla kvalita tisku stále považována za velmi dobrou.

V několika případech došlo k tomu, že byly parametry přenastaveny natolik, že výsledek byl horší než předchozí verze. V takových situacích bylo nutné vrátit se zpět k předchozím hodnotám a začít ladit znovu od stabilního bodu. Tato zkušenost ukázala, že i přes snahu o maximální optimalizaci je někdy vhodné zachovat jednodušší, ale osvědčené nastavení.

2.5.3 Řešení problémů během testování

Testování celého systému nebylo pouze otázkou ověření funkce, ale také odhalilo řadu problémů, které nebylo možné předvídat během návrhu. Některé závady byly očekávané, jiné vznikly zcela neplánovaně a vyžadovaly podrobnou diagnostiku i opakované úpravy.

Mezi nejčastější mechanické komplikace patřily kolize kalibračního tlačítka s podložkou. K těmto situacím došlo několikrát – pokaždé však podle očekávání selhal navržený pojistný mechanismus, kdy úchyt tlačítka praskl v místě slabého spoje, aniž by došlo k poškození samotné tiskové hlavy. Výjimkou byla jedna situace, kdy se tryska zastavila přímo o desku a zanechala na ní lehký škrábanec. V průběhu testů se zlomilo několik držáků tlačítka, nejčastěji při ruční manipulaci, a opakovaně došlo k přetržení nebo ukroucení jednotlivých vodičů u špatně nalisovaných konektorů. Z hlediska stability systému bylo kritické chování robotické základny – při vyšších rychlostech došlo k výrazným vibracím celého stolu, což se následně projevilo jako snížení přesnosti tisku. Tento jev vedl ke zpomalení rychlostních parametrů robota.

Velké komplikace nastaly v oblasti teplotní regulace. V několika případech došlo k odpojení čidla, což způsobilo přehřátí trysky a následnou softwarovou chybu. Dvě Arduino desky byly zničeny přepětím – omylem došlo k připojení napětí 24 V na vstup, který byl určený pro 12 V, a následoval zkrat. Nejzákladnější porucha se však týkala opakovaného odcházení A/D převodníku na Arduino, který z ničeho nic začal vracet nereálné hodnoty teploty. Po delším zkoumání se ukázalo, že hlavní příčinou byla statická elektřina. Extruder (Orbiter V3.0) byl uchycen pomocí plastové redukce, která izolovala vodivou část od země. Tím docházelo k přímému vybíjení statického náboje přes signálovou cestu do A/D převodníku. Řešením bylo přidání zemního vodiče mezi flange robota a vodivou část extruderu – od té doby se problém již neobjevil.

Regulace teploty prostřednictvím PID smyčky byla ověřena dvojicí nástrojů – bezkontaktním IR teploměrem a fyzickým termistorem připojeným k voltmetru. Tyto hodnoty byly porovnány

s tím, co vracelo Arduino. Stav sepnutí topného tělesa bylo navíc možné kontrolovat vizuálně pomocí LED diody na modulu MOSFETu, což pomáhalo při ladění algoritmu.

Z hlediska softwaru byly největší problémy spojeny s načasováním extruze. V některých případech extruder začal dávkovat materiál dříve, než se robot dostal do plynulého pohybu, nebo naopak reagoval se zpožděním. To vedlo ke vzniku mezer, případně k tzv. stringování. Tyto jevy byly eliminovány úpravou rychlostí a zavedením „časových závor“ v programu. Příliš rychlé posílání příkazů vedlo také ke zpoždění vykonání, což způsobovalo záseky systému – zejména pokud se příkazy hromadily a Arduino nestíhalo zpracovávat extruzi včas.

Komunikační problémy na lince RS232 se vyskytly především při prvním nastavování systému. Chyby vznikaly při neodpovídajícím nastavení přenosové rychlosti (baudrate) nebo při zadání nesprávného COM portu. Jakmile bylo vše sladěno, komunikace fungovala stabilně. Jediný hardwarový výpadek postihl TTL převodník, který pravděpodobně selhal opět v důsledku elektrostatického výboje. Tento prvek byl poté nahrazen novým kusem a zajištěn proti pohybu.

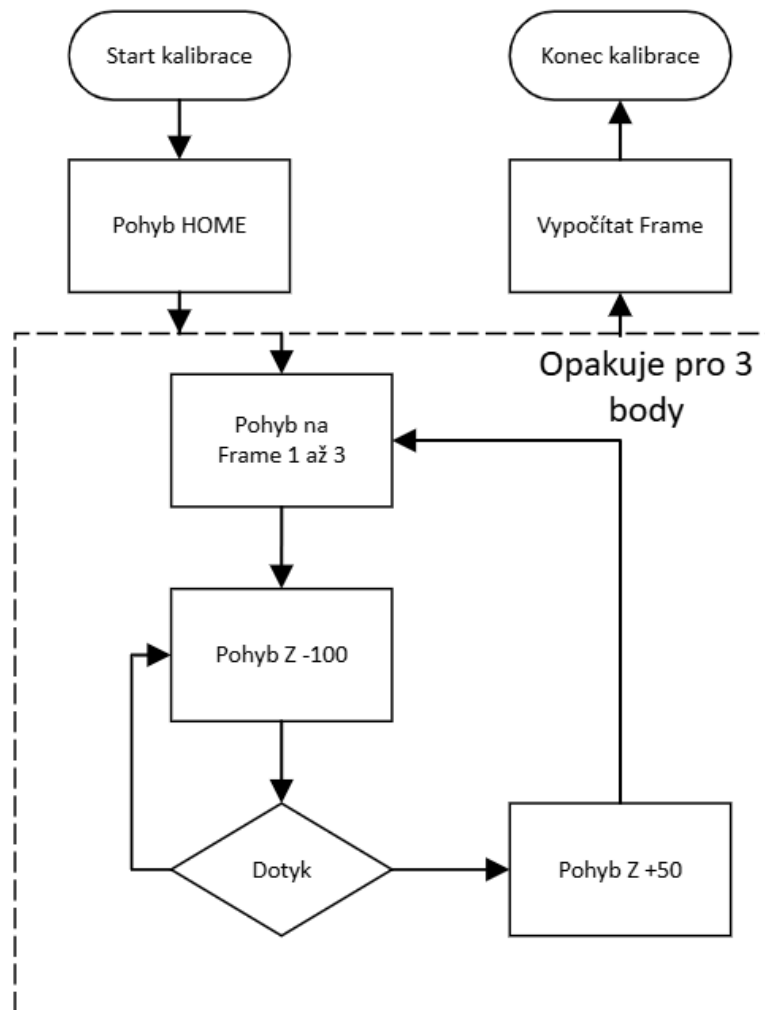
Z hlediska údržby a hledání závad se za nejnáročnější problém ukázalo právě opakované odcházení A/D převodníků a přerušení vodičů. Diagnostika spočívala v postupném měření všech signálových cest a kontrola správné vodivosti všech spojů, což bylo časově náročné a vyžadovalo trpělivost. Další problém byla občasná ztráta komunikace přes sériovou linku, způsobená uvolněným kabelem. Tento problém byl trvale vyřešen mechanickým přichycením konektoru šrouby.



Obrázek 23: Postupné vylepšování kvality výtisků

S odstupem času by bylo nejrozzumnější volbou zvolit robustnější systém řízení, ideálně mikrokontrolér s větším výkonem a schopností paralelního zpracování více úloh. Zpětně by také stálo za zvážení použití jiného typu extruderu než Orbiteru V3.0, který je sice výkonný, ale svým konstrukčním uspořádáním přinášel určité komplikace v rámci integrace do celého systému.

2.5.4 Kalibrace tiskové podložky



Obrázek 24: Vývojový diagram kalibrace podložky

2.6 Výsledky a demonstrace

Závěrečná fáze práce se zaměřila na ověření funkčnosti celého navrženého systému v reálném provozu. Během této části byly analyzovány jak technické parametry výstupu, tak i celková kvalita tisku, konzistence chování systému a schopnost přesné reprodukce připravených dat. Výsledky byly hodnoceny na základě testovacích tisků, přičemž hlavní důraz byl kladen na

spolehlivost, přesnost a kvalitu finálního modelu. Součástí demonstrace je rovněž rozbor dosažené přesnosti, zhodnocení dosažených hodnot a úvaha nad možnými směry budoucí optimalizace.

2.6.1 Popis vytištěného modelu



Obrázek 25: Finální výtisk vázy

Pro finální ověření funkčnosti celého systému byl zvolen jednoduchý model vázy, uložený ve formátu `simple_vase.stl`. Model byl záměrně vybrán tak, aby neobsahoval složité detaily a umožnil plynulé testování tisku v režimu spirálové trajektorie. Váza měla výšku přibližně 120 mm a její základna byla kulatá o průměru přibližně 50 mm. Díky svému tvaru a průběžně rostoucí geometrii byla ideálním kandidátem pro test plynulosti extruze a přesnosti prostorového řízení robota.

Model byl připraven v prostředí Cura slicer, a to s využitím režimu Vase Spiral Mode. Tento režim umožňuje tisk jedním plynulým perimetrem bez přerušení vrstvy, přičemž výška vrstvy byla nastavena na 0,2 mm a tisková rychlost na 60 mm/s. V tomto režimu je tisková sekvence založena na jednom spodním plátu a jedné stěně, která plynule přechází do výšky v jedné šroubovici, bez klasického vrstvení. Filament použitý při tisku byl šedý PLA+ od výrobce Plasty Mladeč, tedy identický s materiálem použitým při všech předchozích testech systému.

Celková doba tisku činila 1 hodinu a 3 minuty. Po inicializaci tiskového cyklu byla aktivována standardní kalibrace výšky podložky, jako u každého tisku, přičemž nebylo nutné provádět žádné manuální korekce výšky pomocí funkce babystep. Průběh tisku probíhal zcela bez zásahu obsluhy a nedošlo k žádným technickým komplikacím, výpadkům komunikace ani mechanickým problémům.

Výsledný výtisk byl vysoce konzistentní, s rovnoměrně navinutou vrstvou a viditelně hladkým spirálovým přechodem. Jediným patrným vizuálním prvkem byly jemné texturované vroubky po obvodu, které však nebyly považovány za vadu – naopak, dodávaly výtisku estetickou hodnotu a potvrzovaly konzistenci extruze. Neobjevily se žádné viditelné chyby v ose Z, vrstvy byly pravidelné a bez projevů podtlacení či přetlačení materiálu. Rozměrová přesnost výtisku odpovídala originálnímu 3D modelu v plném měřítku 1:1, což potvrzuje správnou funkci celé řídicí a tiskové architektury.

2.6.2 Shrnutí dosažené přesnosti a kvality

Přesnost výtisků dosažená během finálních testů byla na velmi dobré úrovni. Odchylka ve vnějším průměru modelu se pohybovala kolem $\pm 0,1$ mm, což odpovídá běžné toleranci i u klasických kartézských 3D tiskáren. Stejná odchylka byla naměřena také u výšky a dalších kritických rozměrů. Veškerá měření byla prováděna pomocí digitální posuvky a potvrdila stabilitu celé tiskové sestavy.

Po finálním nastavení nebylo nutné dále upravovat žádné parametry PID regulace, rychlosti či dávkování. Jediným krokem, který se opakuje při každém novém tisku, je kalibrace výšky pracovní plochy, což je běžný postup i u komerčně dostupných tiskáren.

Opakovatelnost výsledků byla velmi dobrá – všechny výtisky stejného modelu při identické rychlosti vykazovaly prakticky shodnou kvalitu i rozměrovou přesnost. Odchylky se objevily pouze při experimentech s vyšší rychlostí pohybu robota, kdy docházelo k drobným odchylkám vlivem vibrací stolu/tiskové podložky.

Při srovnání kvality tisku s klasickými stolními 3D tiskárnami byla výstupní kvalita překvapivě srovnatelná. Přestože systém nedosahuje přesnosti profesionálních zařízení typu BambuLab X1 Carbon, výsledek byl považován za velmi uspokojivý. Největším překvapením byla jednoduchost celého systému – při správné kalibraci a nastavení je možné pomocí průmyslového robota realizovat 3D tisk s minimem externích komponent.



Obrázek 26: Srovnání výtisku od robota a Bambulab 3D tiskárny

2.6.3 Diskuse nad případnými nedostatky a návrhy zlepšení

Přestože byl výsledný systém plně funkční a schopný realizovat kvalitní 3D tisk pomocí průmyslového robota, během vývoje se ukázalo několik slabín, které omezovaly jeho efektivitu i další rozšiřitelnost. Nejvýraznějším limitem byla samotná výpočetní platforma v podobě mikrokontroléru Arduino Nano. Ten sice zvládl základní řízení PID, ovládání extruderu a komunikaci, ale jeho výkon není dostačující pro paralelní zpracování většího počtu procesů. V určitých momentech se tak systém přiblížil hranici svých možností a nebylo možné jej dále škálovat bez výměny řídicí jednotky.

Dalším kritickým bodem byl samotný extruder Orbiter V3.0. Ten se sice osvědčil z hlediska mechaniky a síly podávání filamentu, ale výrazně postrádá technickou dokumentaci, schémata nebo alespoň základní uživatelskou podporu. Komunikace s výrobcem bohužel nepřinesla odpovědi na některé zásadní technické otázky, což v praxi komplikovalo jeho integraci do systému. Tento faktor snižuje spolehlivost celého řešení a vylučuje nasazení v přísně kontrolovaných průmyslových prostředích.

Z hlediska konstrukce a elektronického zapojení byl systém hodnocen pozitivně – problémy se neprojevíly a komunikace mezi subsystemy probíhala stabilně. Hlavním omezením je tak spíše oblast řízení a zpracování dat. Do budoucna by bylo vhodné využít modernější desku s vyšším výpočetním výkonem – například elektroniku z komerčně dostupné 3D tiskárny, která by umožnila přesnější řízení extruderu, podporu pokročilejších driverů a potenciálně i rozšíření o zpětnovazební prvky, jako je enkodér na ose filamentu. Vyšší výkonový driver by umožnil přesnější řízení motoru a zároveň by uvolnil prostor pro tisk vyššími rychlostmi.

Směr dalšího rozvoje systému je poměrně jasný – rozšíření pracovního prostoru, integrace non-planar tisku (tisk na nakloněné či nerovné ploše) a možnost výměny trysky za variantu s větším průměrem. Tyto kroky však budou vyžadovat nejen čas a prostředky, ale i hlubší výzkum synchronizace víceosého řízení s extruzní logikou. Možný posun směrem k profesionálnímu zařízení by byl podmíněn jednak integrací pokročilejší elektroniky, ale i spoluprací více odborníků, kteří by mohli systém společně dále rozvíjet a optimalizovat.

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout a realizovat funkční systém 3D tisku za využití šestiosého průmyslového robota Stäubli TX2-60. Výsledkem je plně provozuschopné řešení, které umožňuje tisk pomocí metody FDM s důrazem na synchronizaci všech řídicích prvků – od řízení pohybu robota, přes teplotní stabilizaci trysky, až po samotnou dávkovací logiku extruderu.

Celý proces vývoje zahrnoval návrh mechanických komponent pro uchycení tiskové hlavy, vytvoření elektronického zapojení s využitím komponent jako je Arduino Nano, MOSFET tranzistor, dvoupolohové relé a převodník RS232–TTL. Byl navržen a realizován i vlastní tiskový software v jazyce C#, který umožňuje překlad běžného G-code do formátu využitelného v prostředí VAL3 pro robotické řízení. Dále byla implementována PID regulace pro udržení teploty trysky, doplněná o bezpečnostní logiku a zpětnou vazbu v reálném čase.

Součástí práce bylo také detailní testování systému – ověřena byla přesnost pohybu robota, reakční doby jednotlivých subsystémů i konzistence kvality výtisků. Finální testy prokázaly, že systém je schopen dosahovat rozměrové přesnosti v řádu desetin milimetru, přičemž kvalita tisku byla srovnatelná s běžnými stolními FDM tiskárnami. Největší výzvy představovalo ladění komunikační logiky mezi jednotlivými prvky a přizpůsobení rychlosti extruze na pohyb robota – tyto oblasti vyžadovaly opakované experimenty a doladění časování.

Práce prokázala, že i s omezeným počtem komponent a za využití dostupného hardwaru lze realizovat komplexní 3D tiskový systém založený na průmyslovém robotu. Řešení je modulární a otevřené pro další rozvoj – ať už směrem k integraci přesnějších senzorů, použití pokročilejších mikrokontrolérů, nebo rozšíření směrem k tisku na nakloněných nebo nerovných plochách (non-planar tisk).

Z dlouhodobého hlediska se ukazuje, že využití průmyslových robotů pro aditivní výrobu má značný potenciál – zejména tam, kde běžné tiskové sestavy nedostačují svou variabilitou nebo rozměrovým rozsahem. Práce tímto projektem nejen potvrzuje tuto možnost, ale zároveň nabízí základní implementaci, kterou lze dále rozvíjet podle konkrétních požadavků výrobní praxe.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ULTIMAKER. The history of 3D printing. Online. In: Ultimaker Documentation. Dostupné z: <https://ultimaker.com/learn/the-complete-history-of-3d-printing/>. [cit. 2025-05-12].
- [2] RAYPCB. Robotic 3D Printing – How to Select the Right 3D Printer. Online. In: RayPCB. Dostupné z: <https://www.raypcb.com/robotic-3d-printing/>. [cit. 2025-05-12].
- [3] HLH Prototypes. 3D Printing in Robotics & Automation: A Comprehensive Overview. Online. In: HLH Prototypes. Dostupné z: <https://www.hlhprototypes.com/3d-printing-in-robotics-automation-a-comprehensive-overview/>. [cit. 2025-05-12].
- [4] Stäubli Robotics. TX2-60 Photo. Online. In: Stäubli. Dostupné z: <https://www.staubli.com/content/dam/robotics/products/robots/tx2/TX2-60-6-axis-product-data-sheet-EN.pdf>. [cit. 2025-05-04].
- [5] Stäubli Robotics. TX2-60 Manual. Online. In: Stäubli. Dostupné z: <https://www.staubli.com/content/dam/robotics/products/robots/tx2/TX2-60-6-axis-product-data-sheet-EN.pdf>. [cit. 2025-05-04].
- [6] STÄUBLI. TX2-60 Range. Online. In: Stäubli. Dostupné z: <https://www.staubli.com/content/dam/robotics/products/robots/tx2/TX2-60-6-axis-product-data-sheet-EN.pdf>. [cit. 2025-05-12].
- [7] ORBITER PROJECTS. Smart Orbiter v3.0. Online. In: Orbiter Projects. Dostupné z: <https://www.orbiterprojects.com/so3/>. [cit. 2025-05-12].
- [8] LASKAKIT. PWM MOSFET modul LR7843, 30VDC 161A. Online. In: LASKAKIT.cz. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/pwm-mosfet-modul-lr7843--30vdc-161a/>. [cit. 2025-05-12].
- [9] ELECTRONICS TUTORIALS. The MOSFET and Metal Oxide Semiconductor Tutorial. Online. In: Electronics Tutorials. Dostupné z: https://www.electronics-tutorials.ws/transistor/trans_6.html. [cit. 2025-05-12].
- [10] LASKAKIT. 1kanál 5V relé modul s optickým oddělením (High/Low level, 250VAC/10A). Online. In: Laskakit.cz. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/1-kanal-5v-rele-modul-s-optickym-oddelenim--high-low-level--250vac-10a/>. [cit. 2025-05-12].
- [11] ELECTRONICS TUTORIALS. Relay Switching Circuit. Online. In: Electronics Tutorials. Dostupné z: <https://www.electronics-tutorials.ws/blog/relay-switching-circuit.html>. [cit. 2025-05-12].

- [12] Farnell. RS232 to TTL Serial Converter - DB9, F/M. Online. In: Farnell. Dostupné z: <https://www.farnell.com/datasheets/1910106.pdf>. [cit. 2025-05-04].
- [13] TEXAS INSTRUMENTS. MAX232 Dual EIA-232 Drivers and Receivers datasheet (Rev. N). Online. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/gpn/MAX232>. [cit. 2025-05-12].
- [14] Arduino. Arduino Nano. Online. In: Arduino Documentation. Dostupné z: <https://docs.arduino.cc/hardware/nano>. [cit. 2025-05-04].
- [15] ARDUINO. Arduino Nano. Online. In: Arduino Documentation. Dostupné z: <https://docs.arduino.cc/hardware/nano>. [cit. 2025-05-12].
- [16] ARDUINO. PID Library. Online. In: Arduino Reference. Dostupné z: <https://playground.arduino.cc/Code/PIDLibrary/>. [cit. 2025-05-12].
- [17] PRUSA RESEARCH. G-code explained: Understanding the basics. Online. In: Prusa Knowledge Base. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/article/g-code-explained_112012. [cit. 2025-05-12].
- [18] MAKRIS, Sotiris, PAPAKOSTAS, Nikolaos a CHRYSSOLLOURIS, George. Robot control architecture for an integrated manufacturing environment. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* [online]. 2006, 22(5), 473–485. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2005.10.004>. [cit. 2025-05-12].
- [19] GEBHARDT, Andreas. *Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing*. 2. vyd. München: Hanser Publishers, 2016. ISBN 978-1-56990-582-1.
- [20] KUBÍČEK, Tomáš. *Průmyslová komunikace: od sériových linek po průmyslový Ethernet*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2020. ISBN 978-80-7300-549-6.
- [21] RAPID FUSION. Revolutionising 3D Printing with Real-Time Speed and Throughput Synchronisation. Online. In: Rapid Fusion. Dostupné z: <https://rapidfusion.co.uk/blogs/case-studies/revolutionising-3d-printing-with-real-time-speed-and-throughput-synchronisation>. [cit. 2025-05-12].
- [22] 3D ADEPT. Real-time Speed Synchronisation Improves 3D Printing Quality. Online. In: 3D ADEPT Media. Dostupné z: <https://3dadept.com/real-time-speed-synchronisation-improves-3d-printing-quality/>. [cit. 2025-05-12].
- [23] STRATASYS. Fused Deposition Modeling (FDM) Technology. Online. In: Stratasys. Dostupné z: <https://www.stratasys.com/en/resources/technologies/fdm-technology/>. [cit. 2025-05-12].

- [24] FRONIUS. Cold Metal Transfer – the intelligent process for joining metal. Online. In: Fronius International. Dostupné z: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/products/arc-welding/arc-welding-processes/cmt>. [cit. 2025-05-12].
- [25] KRUTH, Jean-Pierre et al. Wire-Arc Additive Manufacturing. In: CIRP Encyclopedia of Production Engineering. Springer, 2019. Dostupné online z: https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007%2F978-3-662-53120-4_16733. [cit. 2025-05-12].
- [26] GEBHARDT, Andreas. Understanding Additive Manufacturing. München: Hanser Publishers, 2012. Dostupné online z: <https://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9783446436421>. [cit. 2025-05-12].
- [27] MX3D. 3D Printed Steel Bridge. Online. In: MX3D. Dostupné z: <https://mx3d.com/projects/bridge/>. [cit. 2025-05-12].
- [28] LE, Hoa Van. Trends in Additive Manufacturing: From Composites to Smart Materials. Online. In: MDPI – Polymers. 2022. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/3/430>. [cit. 2025-05-12].

PŘÍLOHY

A: Archiv

Příloha k bakalářské práci
OVLÁDACÍ SW A PŘEKLADAČ POHYBŮ
PRO 3D TISK ROBOTEM STAUBLI
Tomáš Vorlíček

Archiv

OBSAH

1. Zdrojový kód pro Arduino
2. Zdrojový kód pro překladač pohybů gcode
3. 3D modely pro mechanickou konstrukci ve formátu step
4. 3D modely pro testovací a finální tisk
5. Timelapse (časosběrné) video finálního výtisku
6. Návrh desky plošných spojů
7. Fotodokumentace zapojení