

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## NÁVRH A VÝROBA EXTRUZNÍHO STROJE PRO VÝROBU TISKOVÉ STRUNY.

DESIGN AND REALIZATION OF EXTRUSION MACHINE FOR PRODUCTION OF PRINTING FILAMENT.

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jozef Török

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Baštán

BRNO 2020

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

**Student:** Jozef Török

**ID:** 206287

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2019/20

## NÁZEV TÉMATU:

**Návrh a výroba extruzního stroje pro výrobu tiskové struny.**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s technologií výroby 3D tiskové struny a vypracujte literární rešerši na toto téma.
2. Definujte požadavky na HW a SW extruzního stroje.
3. Navrhněte vhodnou mechanickou konstrukci extruzního stroje a jeho příslušenství.
4. Navrhněte vhodný řídicí systém pro extruzní stroj a jeho příslušenství.
5. Za využití vývojových kitů implementujte a otestujte dílčí softwarové moduly.
6. Vyhodnoťte dosažené výsledky.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

SMUTNÝ, Vladimír. Pohony v automatizaci. In: [online]. Dostupné z: <http://cmp.felk.cvut.cz/cmp/courses/ROB/roblec/pohony-notecz.pdf>

Online zdroje

**Termín zadání:** 3.2.2020

**Termín odevzdání:** 8.6.2020

**Vedoucí práce:** Ing. Ondřej Baštán

**doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.**  
předseda rady studijního programu

## UPOZORNĚNÍ:

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

## **ABSTRAKT**

Táto bakalárska práca sa venuje technológii výroby tlačovej struny, ktorá sa využíva pri 3D tlači. Zaoberá sa návrhom konštrukcie, ako aj samotnou výrobou zariadení výrobnéj linky na spracovanie plastového granulátu a návrhom a implementáciou jej riadiaceho systému. Čiastočne rieši nadmerný výskyt nepotrebných plastov vo svete ako aj spracovanie neúspešných výtlačkov z 3D tlačiarne.

## **KĽÚČOVÉ SLOVÁ**

extrúzný stroj, tlačová struna, extrúzia plastov, výrobná linka, 3D tlač, riadiaci systém

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis deals with the technology of production of filament, which is used in 3D printing, with the design of the construction as well as the production of the equipment of the production line for the processing of plastic granulate and with the design and implementation control system of production line. It partially solves the excessive occurrence of unnecessary plastics in the world as well as the processing of unsuccessful prints from a 3D printer.

## **KEYWORDS**

extrusion machine, filament, plastic extrusion, production line, 3D print, control system

TÖRÖK, Jozef. *Návrh a výroba extrúzného stroje pro výrobu tiskové struny*. Brno, 2020, 70 s. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedúci práce: Ing. Ondřej Baštán

## VYHLÁSENIE

Vyhlasujem, že svoju bakalársku prácu na tému „Návrh a výroba extruzního stroje pro výrobu tiskové struny“ som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno 08.06.2020

.....  
podpis autora

## POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu bakalárskej práce pánovi Ing. Ondřejovi Baštánovi za odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť a podnetné návrhy k práci. Ďakujem taktiež pánovi doc. Ing. Petrovi Benešovi, Ph.D. za odbornú konzultáciu.

Brno 08.06.2020

.....

podpis autora

# Obsah

Úvod	12
<b>1 Technológia výroby 3D tlačovej struny</b>	<b>13</b>
1.1 Všeobecný rozhľad	13
1.1.1 3D tlačová struna	13
1.1.2 FFF 3D tlač	13
1.2 Extrúzia(vytláčanie)	14
1.3 Extrúzný stroj	15
1.3.1 Extrúzný šnek	16
1.3.2 Hnacia jednotka(motor)	17
1.4 Ohrev a snímanie teploty	17
1.5 Chladenie a sušenie	18
1.6 Snímanie priemeru filamentu	18
1.7 Snímanie farby filamentu	19
1.8 Ťahanie a navíjanie	20
1.9 Akumulácia	20
<b>2 Návrh extrúzneho stroja a jeho príslušenstva</b>	<b>21</b>
2.1 Bloková schéma výrobnéj linky	21
2.2 Modul 1 - Extrúzný stroj	22
2.3 Modul 2 - Vodný kúpeľ	24
2.4 Modul 3 - Sušič, snímač farby, snímač priemeru a ťahač	26
2.4.1 Sušič	26
2.4.2 Snímač farby	26
2.4.3 Snímač priemeru	27
2.4.4 Ťahač	28
<b>3 Požiadavky na hardvér a riadiacu elektroniku</b>	<b>29</b>
3.1 Extrúzný stroj	30
3.2 Vodný kúpeľ	31
3.3 Sušič, snímač farby, snímač priemeru a ťahač	31
3.4 Riadiaca elektronika	32
3.5 Napájací zdroj	33
3.6 Sumarizácia a návrh riadiacej DPS	34
<b>4 Požiadavky na softvér</b>	<b>35</b>
4.1 CAN bus	35
4.2 PlatformIO na báze VS Code	37

4.3	Regulačné slučky . . . . .	37
4.3.1	Regulácia ohrevu valca extrúzneho stroja . . . . .	37
4.3.2	Regulácia ohrevu vody teplého vodného kúpeľa . . . . .	38
4.3.3	Regulácia rýchlosti ťahania filamentu . . . . .	38
4.3.4	Regulácia farbenia filamentu . . . . .	39
<b>5</b>	<b>Návrh riadiaceho systému</b>	<b>40</b>
5.1	Modul 1 . . . . .	41
5.2	Modul 2 . . . . .	43
5.3	Modul 3 . . . . .	44
5.4	Dátový model komunikácie . . . . .	45
<b>6</b>	<b>Implementácia a testovanie softvérových modulov</b>	<b>47</b>
6.1	A/D prevodník . . . . .	47
6.2	Zosilňovač a kompenzátor teploty MAX6675 . . . . .	48
6.3	GPIO expander MCP23S08 . . . . .	48
6.4	12V PWM regulátor . . . . .	49
6.5	CAN bus transceiver SN65HVD230 . . . . .	50
6.5.1	Konfigurácia a inštalácia . . . . .	51
6.5.2	Odoslanie správy . . . . .	52
6.5.3	Prijatie správy . . . . .	52
6.6	Mooreov stavový automat . . . . .	53
6.6.1	Inicializácia a kontrola podmienok prechodu . . . . .	53
6.6.2	Implementácia algoritmu . . . . .	54
6.7	Regulátory . . . . .	55
	<b>Záver</b>	<b>56</b>
	<b>Literatúra</b>	<b>58</b>
	<b>Zoznam príloh</b>	<b>63</b>
<b>A</b>	<b>Obrázky 3D modelov</b>	<b>64</b>
A.1	Modul 1 . . . . .	64
A.2	Modul 2 . . . . .	65
A.3	Modul 3 . . . . .	65
<b>B</b>	<b>DPS</b>	<b>66</b>
B.1	Schémy zapojenia . . . . .	66
B.1.1	Rozvrhnutie pinov ESP32 . . . . .	66
B.1.2	Výkonový stupeň PWM . . . . .	66



B.1.3	Obvod MAX6675 . . . . .	67
B.1.4	Obvod MCP23S08 . . . . .	67
B.1.5	Prevodník I <sup>2</sup> C/CAN . . . . .	67
B.1.6	CAN bus RJ45 . . . . .	68
B.1.7	Prepínač zdrojov, stabilizácia, ochrana voči prepólovaniu a prepätová ochrana . . . . .	68
B.2	Návrh DPS . . . . .	69
B.2.1	Vizualizácia hornej strany DPS . . . . .	69
B.2.2	Vizualizácia spodnej strany DPS . . . . .	69
<b>C</b>	<b>Obsah priloženého média</b>	<b>70</b>

# Zoznam obrázkov

1.1	FFF 3D tlač . . . . .	14
1.2	Extrúzia . . . . .	14
1.3	Extrúzný stroj . . . . .	15
1.4	Extrúzný šnek . . . . .	16
1.5	Pásový ohrievač . . . . .	17
1.6	Akumulátor . . . . .	20
2.1	Výrobná linka - blokový diagram . . . . .	21
2.2	Modul 1 - blokový diagram . . . . .	22
2.3	Modul 2 - blokový diagram . . . . .	24
2.4	Modul 3 - blokový diagram . . . . .	26
2.5	Snímač farby . . . . .	27
2.6	Snímač šírky . . . . .	28
3.1	ESP32 DevKit V1 . . . . .	33
4.1	Namerané a riadiace dáta . . . . .	35
4.2	Schéma regulácie-typ 1 . . . . .	37
4.3	Schéma regulácie-typ 2 . . . . .	38
5.1	moore . . . . .	40
5.2	Mooreov stavový automat pre modul 1 . . . . .	41
5.3	Mooreov stavový automat pre modul 2 . . . . .	43
5.4	Mooreov stavový automat pre modul 3 . . . . .	44
A.1	3D model modulu 1 navrhnutý v programe Autodesk Inventor . . . . .	64
A.2	3D model modulu 2 navrhnutý v programe Autodesk Inventor . . . . .	65
A.3	3D model modulu 3 navrhnutý v programe Autodesk Inventor . . . . .	65
B.1	Schéma zapojenia modulu ESP32 DevKit V1 navrhnutá v programe Eagle . . . . .	66
B.2	Schéma zapojenia výkonového stupňa PWM navrhnutá v programe Eagle . . . . .	66
B.3	Schéma zapojenia obvodu MAX6675 navrhnutá v programe Eagle . . . . .	67
B.4	Schéma zapojenia obvodu MCP23S08 navrhnutá v programe Eagle . . . . .	67
B.5	Schéma zapojenia obvodu SN65HVD230 navrhnutá v programe Eagle . . . . .	67
B.6	Zapojenie RJ45 pre CAN bus navrhnuté v programe Eagle . . . . .	68
B.7	Prepínanie zdrojov, stabilizácia a ochrany navrhnuté v programe Eagle . . . . .	68
B.8	Vizualizácia hornej strany navrhnutej DPS . . . . .	69
B.9	Vizualizácia spodnej strany navrhnutej DPS . . . . .	69

# Zoznam tabuliek

4.1	Štruktúra vrstiev protokolu CAN . . . . .	36
5.1	Dátový model komunikácie . . . . .	46

## Zoznam výpisov

6.1	Ukážka implementácie A/D prevodníka . . . . .	47
6.2	Ukážka komunikácie s obvodom MAX6675 . . . . .	48
6.3	Ukážka komunikácie s obvodom MCP23S08 . . . . .	49
6.4	Ukážka implementácie 12V PWM . . . . .	50
6.5	Konfigurácia a inštalácia CAN bus . . . . .	51
6.6	Ukážka odoslania správy pri CAN bus komunikácii . . . . .	52
6.7	Ukážka prijatia správy pri CAN bus komunikácii . . . . .	52
6.8	Inicializácia a kontrola podmienok prechodu automatu pre modul 2 .	53
6.9	Implementácia algoritmu Mooreovho stavového automatu pre modul 2	54

# Úvod

Táto práca sa venuje technológii výroby tlačovej struny, ktorá sa využíva pri 3D tlači. Zaoberá sa návrhom konštrukcie, ako aj samotnou výrobou zariadení výrobnéj linky na spracovanie plastového granulátu. Definuje požiadavky na hardvér a softvér takejto výroby, pozostávajúcej z extrúzneho stroja a jeho príslušenstva, ktoré je potrebné pri extrúzii plastov. Čiastočne rieši problémy nadmerného množstva vyskytujúcich sa plastov a spracovanie neúspešných výtlačkov z 3D tlačiarne, kedy po rozomletí týchto plastov na drť alebo vločky je možné vďaka takejto výrobnéj linke patričné spracovanie a opätovné využitie.

Práca je rozdelená do šiestich častí. Prvú časť tvorí literárna rešerš, v ktorej je opísaná technológia výroby tlačovej struny. Druhá časť sa zaoberá návrhom jednotlivých zariadení výrobnéj linky, ktoré sú rozdelené do niekoľkých modulov. V tretej časti sú opísané požiadavky na hardvér a riadiacu elektroniku, voľba riadiacej elektroniky, napájacieho zdroja a výber vhodných hardvérových komponentov. Túto časť zakončuje návrh riadiacej DPS. Nasledujúca štvrtá časť definuje požiadavky na softvér, na ktoré nadväzuje výber vhodnej komunikácie medzi modulmi, výber vývojového prostredia, ako aj regulačné slučky vyskytujúce sa vo výrobnom procese. Piata časť pozostáva z návrhu riadiaceho systému, ktorý tvoria stavové automaty a dátový model komunikácie. V poslednej šiestej časti je obsiahnutá implementácia a testovanie softvérových modulov.

Cieľom tejto práce je navrhnúť a vyrobiť funkčný extrúzný stroj, ako aj jeho príslušenstvo, pozostávajúce zo zariadení, ktorých neodmysliteľná súčasť pri danej výrobnéj linke, zabezpečuje čo najvyššiu možnú kvalitu tlačovej struny. Rovnako tak, je cieľom navrhnúť, implementovať a otestovať vhodný riadiaci systém, schopný riadiť výrobu, produktom ktorej má byť tlačová struna využívaná pri 3D tlači.

# 1 Technológia výroby 3D tlačovej struny

Táto kapitola popisuje technológie a princípy uplatňované pri výrobe 3D tlačovej struny (známej aj ako filament), jej výrobný proces, z čoho pozostáva výroba a čo všetko je potrebné zabezpečiť pre správny chod výrobnéj linky na výrobu tlačovej struny.

## 1.1 Všeobecný rozhľad

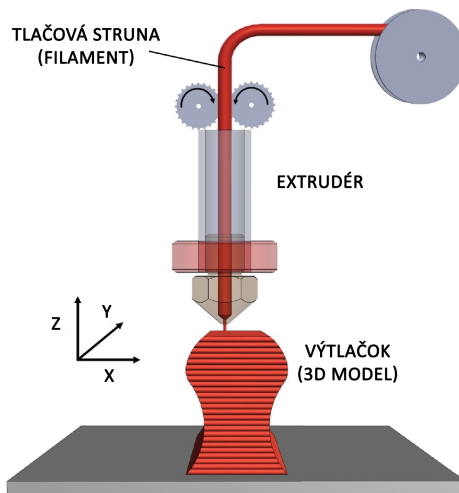
V tejto časti budú vysvetlené základné pojmy ktorým by sme mali rozumieť, aby sme lepšie pochopili výrobný proces a mohli sa tak pustiť do návrhu výrobnéj linky a do samotnej výroby.

### 1.1.1 3D tlačová struna

Pri FFF 3D tlači je to struna vyrobená z termoplastu, zvyčajne navinutá na kotúč(cievku). V určitej teplotnej oblasti je ľahko tvarovateľná a túto vlastnosť si zachováva. Po ochladení ju možno opäť zahriať a previesť na taveninu a tvarovať. [1] Na trhu nájdeme mnoho termoplastov, z ktorých môže byť filament vyrábaný. Líšia sa nie len svojimi fyzikálnymi vlastnosťami (tvrdosť, pružnosť, odolnosť voči chemikáliam, svietivosť v tme, reakcia na svetlo/teplotu, rozpustiteľnosť vo vode...) ale aj vzhľadom. Najznámejšie materiály na výrobu tlačovej struny sú: ABS, PLA, Nylon, PEEK, PET, PETG, ULTEM, HIPS, PVA a TPU [2]. Existuje taktiež široká škála termoplastických kompozitov, ktorými dokážeme získať materiál vhodný na 3D tlač so špecifickými vlastnosťami, pridaním rôznych prímiesí kovu či dreva. Je taktiež možné realizovať zmenu farby spomenutých materiálov a to pridaním pigmentu (tzv. masterbatch-u). Vyrábana je v štandardizovaných priemeroch 1.75mm / 2.85mm / 3mm [3].

### 1.1.2 FFF 3D tlač

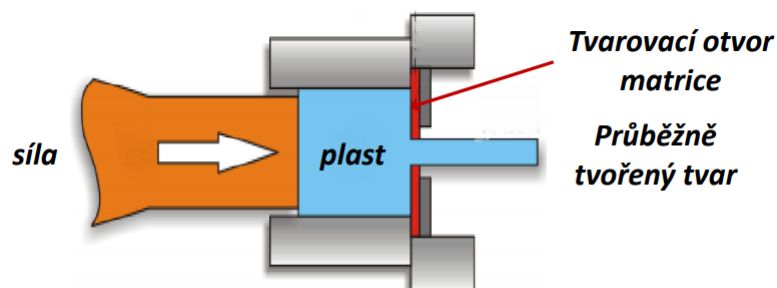
FFF (Fused Filament Fabrication) funguje na princípe plastovej extrúzie, kedy je vyššie spomínaná tlačová struna tavená a vytlačaná skrz extrudér (vytláčaciu hlavu) na podložku, na ktorej vytvára tenkú vrstvu. Pohybom tlačovej hlavy/podložky po x,y súradniciach je dosiahnutý požadovaný tvar vytlačanej vrstvy. Po dokončení vytlačania vrstvy sa hlavica/podložka posunie po z osi, aby sa vytvoril priestor na tlač ďalšej vrstvy. Tlač teda prebieha ukladaním vrstiev na seba, čím vo výsledku vznikne 3D model.



Obr. 1.1: Schematické znázornenie fungovania 3D tlačovej technológie FFF [4]

## 1.2 Extrúzia(vytlačanie)

Ako už z názvu vyplýva, extrúzia alebo vytlačanie je proces, pri ktorom je zahrievaný alebo studený materiál za pomoci tlaku pretlačený skrz tvarovací otvor(matricu), kedy sa stáva jedným kontinuálne tvarovaným kusom [5]. V súčasnej dobe môžu byť extrudované nielen materiály ako sú kovy, keramika, guma či plasty, ale aj potraviny ako napríklad cestoviny, hranolky, chrumky či žuvačky [6].



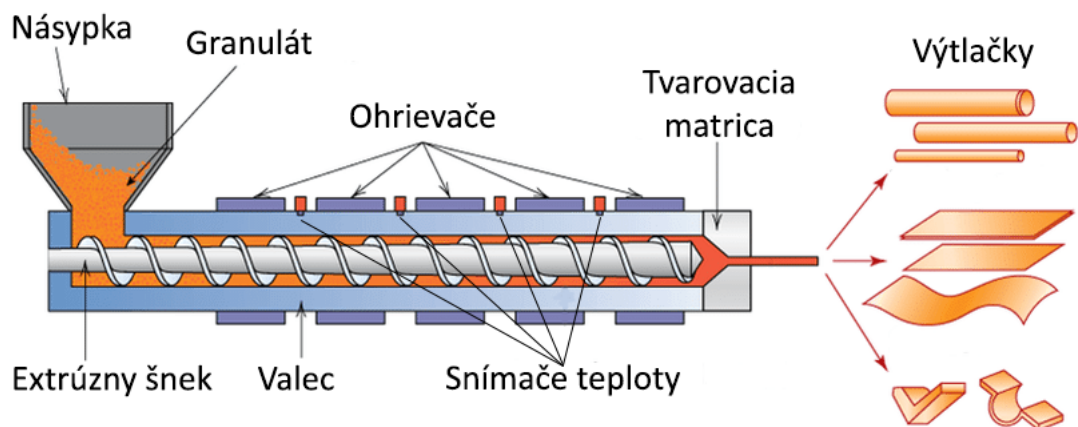
Obr. 1.2: Extrúzia[5]

Tento princíp sa využíva aj pri výrobe samotnej tlačovej struny, kde vstupným médiom je plastový granulát, ktorý je tavený na požadovanú teplotu a následne vytlačovaný. Jednoduchý vytlačovací stroj však pre plasty nefunguje a dochádza k 2 problémom:

1. Plast má nízku tepelnú vodivosť a vo veľkej komore sa neroztaví
2. Medzera medzi piestom a valcom nie je dost tesná a plastová tavenina vytečie.[5]

Riešením týchto problémov je použitie šnekového dopravníka v ohrievanom valci extrúzneho stroja, ktorým je materiál prepravovaný a vytlačávaný. Tým sa zabezpečí rozloženie plastu len po vnútornom okraji ohrievaného valca a plast je tak úplne roztavený. Tavenina aj napriek vytekaniu opačným smerom ako je vytlačaná, je neustále zachytávaná závitmi šneka ktorý ju pretláča požadovaným smerom a teda nedôjde k vytečeniu.

### 1.3 Extrúzný stroj



Obr. 1.3: Extrúzný stroj [7]

Extrúzný stroj pre extrúziu plastov nepretržite roztavuje materiál v ohrievanom valci, čerpá materiál šnekom a tým zaisťuje homogénny prietok taveniny.

Základné vlastnosti:

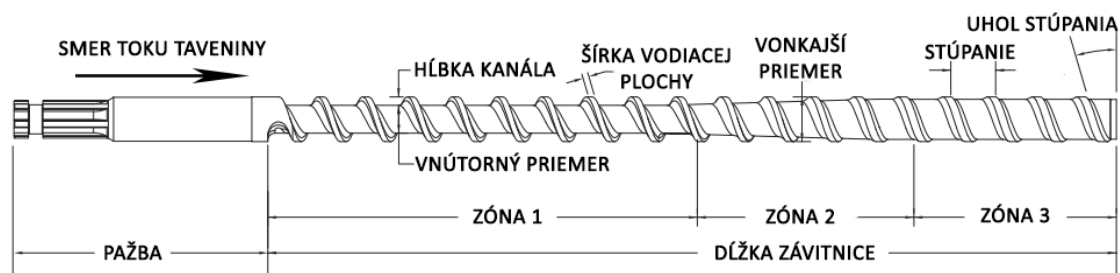
- veľká vytlačacia výkonnosť úmerná otáčkam šneka
- čo najmenšia závislosť na protitlaku
- miestne a časovo rovnomerný transport taveniny (bez pulzácií)
- homogénne premiešanie polyméru so všetkými prísadami
- poskytnutie taveniny plastu bez molekulárnej orientácie (ovplyvňovania ich fyzikálnych vlastností)
- vytlačenie výrobku bez pórov, bubliniek (z vlhkosti alebo degradácie polyméru) [5]

Valec, šnek ako aj tvarovacia matrica musia byť vyhotovené z nerezovej ocele, aby nedošlo ku korózii a následnej degradácii vytlačaného materiálu. V závislosti na tvare otvoru matrice je možné dosiahnuť rôzne výtlačky, viď. Obr. 1.3.

Rýchlosť vytlačania by mala byť počas celej výroby konštantná. [8]



### 1.3.1 Extrúzný šnek



Obr. 1.4: Extrúzný šnek [9]

Na obrázku vyššie môžeme vidieť parametre šneku od ktorých sa odvíja nie len vytlačací výkon. Nebudeme sa nimi ale bližšie strojársky zaoberať a zameriame sa na jeho 3 zóny:

- Zóna 1 (Prívodná zóna) - v tejto časti je hĺbka kanála rovnaká, plastový granulát je prepravovaný k zóne 2 a je potrebné ho udržiavať v pevnej forme, preto je taktiež nazývaná aj ako dopravná zóna tuhých látok.
- Zóna 2 (Taviaca zóna) - väčšina plastového granulátu sa v tejto časti roztaví. Hĺbka kanála sa konštantne znižuje, čím sa zvyšuje tlak vo valci a vtiahnutý vzduch je tak postupne vytlačovaný naspäť do zóny 1. Z tohoto dôvodu je nazývaná aj ako kompresná či prechodná zóna.
- Zóna 3 (Dávkovacia zóna) - plast je kompletne roztavený a je prepravovaný pri konštantnej hĺbke kanála, čím dosiahne požadovanú teplotu a viskozitu, ktorá je potrebná pre vytvorenie výtlaku.

Tieto 3 zóny je potrebné brať v úvahu pri návrhu ohrevu valca. Pri extrúznom stroji spracovávajúcom aditívne plasty, sa uplatňujú ešte ďalšie 2 zóny. Dekompresná zóna a ďalšia Dávkovacia zóna. Pri dekompresnej zóne sa uvoľňuje tlak a všetky prebytočné plyny, vodná para, vzduch, rozpúšťadlá alebo reaktanty sa odvádzajú pomocou vysávača.

Dĺžka závitnice šneka je daná jeho vonkajším priemerom. Pre extrúzný stroj spracovávajúci plasty sa uplatňuje pomer  $L:D = 24:1 - 30:1$  ( $L$  - dĺžka závitnice,  $D$  - vonkajší priemer). [9][10]

### 1.3.2 Hnacia jednotka(motor)

Pre pohon extrúzneho stroja (presnejšie extrúzneho šneka) je potrebný motor s vysokým krútiacim momentom pri nie veľmi vysokých otáčkach (rádovo desiatky otáčok za minútu).

Najčastejšie je používaný asynchrónny motor, ktorého chod (pracovná oblasť) je pri vyšších otáčkach, kedy je krútiaci moment nižší. Preto ho je potrebné cez prevodovku zosilniť, čím sú docielené taktiež požadované nižšie otáčky. Regulácia otáčok takéhoto motora je realizovaná frekvenčným meničom. Nevýhodou je vyššia cena frekvenčných meničov a potreba použitia prevodovky.

Iným variantom je použitie krokového motora, ktorý je schopný pracovať už pri nízkych otáčkach s vysokým krútiacim momentom. Výhodou je veľmi presná regulácia. Pre reguláciu je možné použiť driver alebo 2x H-mostík. Nevýhodou je potreba jednosmerného zdroja (pri vyšších výkonoch motora sa požaduje aj viac ako 80 V a 7 A). [13][12][11]

## 1.4 Ohrev a snímanie teploty

Valec extrúzneho stroja je potrebné ohrievať rovnomerne a pozdĺž celej zóny 2 a 3. Vid. Obr. 1.4. Na to sa využívajú tzv. pásové ohrievače (z angl. "band heaters"), ktoré túto požiadavku veľmi dobre spĺňajú. Fungujú na odporovom princípe ohrevu a teda nie sú nijako náročné na reguláciu. Vyrábané sú v rôznych rozmeroch či s rôznym výkonom.



Obr. 1.5: Ukážka pásového ohrievača [14]

Ako snímače teploty valca je možné použiť termočlánky, ktoré sa v podobných aplikáciach využívajú najčastejšie, kvôli ich nízkej cene, vysokému teplotnému rozsahu (200-1750 °C) či veľmi rýchlej odozve(0.1-10 s). Nevýhodou je nižšia presnosť (0.5-5 °C), potreba kompenzovať nameranú teplotu tzv. kompenzáciou referenčného konca a nelinearita.

Druhým variantom je kovový odporový snímač teploty RTD(z angl. resistance temperature detector), akým je napríklad PT100. Presnosť tohoto typu snímača je vyššia(0.1-1 °C) a jeho charakteristika je takmer lineárna. Teplotný rozsah je však nižší(-200-650 °C), odozva je pomalšia(1-50 s) a cena je o čosi vyššia.

Pre prípadné ďalšie snímanie teplôt s nižším rozsahom je taktiež možné použiť termistory ktorých teplotný rozsah je (-100-325 °C), sú špecifické rýchlou odozvou (0.12-20 s), či vysokou presnosťou(0.05-1.5 °C). Ich charakteristika je exponenciálna avšak cena je pomerne nízka. [15][16][17]

## 1.5 Chladenie a sušenie

Táto časť výrobného procesu môže byť realizovaná dvomi spôsobmi.

Prvým je chladenie vytláčaného plastu vzduchom a to pomocou ventilátorov. Tento spôsob však nie je ideálnym, pretože pri prudkom schladení roztaveného plastu sa naruší jeho štruktúra. V strede vlákna sa môžu vytvoriť malé dutinky a zhoršia sa tak jeho fyzikálne vlastnosti.

Druhým, lepším spôsobom je chladenie vytláčaného plastu vodou a to pomocou 2 vodných kúpeľov, teplého a studeného, kedy je plast schladený plynule a nenastáva tak k vyššie spomínanému zhoršeniu fyzikálnych vlastností. Dĺžka vodného kúpeľa sa odvíja od minimálnej doby po ktorú musí byť plast chladený a teda aj od rýchlosti výroby či teploty vody. Táto doba sa taktiež môže líšiť aj od druhu vytláčaného plastu.

Takto schladený plast je však potrebné vysušiť. Sušenie je možné realizovať napríklad záchytnými štetinkami a následným odsávaním prebytočnej vody za pomoci odsávača alebo fúkaním prudkého prúdu vzduchu za pomoci fukára. Nevýhodou chladenia vodnými kúpeľmi je omnoho vyššia cena.[18][8]

## 1.6 Snímanie priemeru filamentu

Dôležitými kritériami sú: vysoká presnosť, rýchla odozva, veľké rozlíšenie, časová stálosť a snímanie v 2 osiach (+- 45°).

V praxi je takéto snímanie realizované snímaním šírky filamentu v 2 osiach a to preto, aby sa korigovala guľatosť vytlačaného materiálu. Realizácia takéhoto snímania je možná niekoľkými spôsobmi:

- Najjednoduchším spôsobom je použitie mechanického princípu, kedy 2 kolieska(ložiská) zvierajú filament, pričom jedno z nich je vychyľované šírku filamentu. Túto výchylku sme schopný merať niekoľkými spôsobmi. Ako príklad uvediem odchýlkomer alebo potenciometer za pomoci zosilňovacieho prevodu.
- Ďalším riešením je optické snímanie s využitím riadkovej kamery. Filament je osvetľovaný LED svetlom alebo rozptýleným laserovým lúčom. Množstvo zatienených pixelov udáva jeho šírku. Nevýhodou je potreba použitia zaoštrovacej optiky aby sme neboli obmedzený veľkosťou pixelov.
- Tretím variantom je použitie fotocitlivého prvku (napríklad fotodiódy), kde narušenie od vyššie uvedeného spôsobu by bolo detekované množstvo dopadajúceho svetla, ktoré by sa menilo v závislosti na šírke struny. Snímaný by tak bol objem filamentu a následne prepočítaný na šírku.  
Nevýhodou tohoto a vyššie uvedeného spôsobu je problém snímania priesvitného filamentu, či potreba kalibrácie pri zmene farby snímaného filamentu.
- Štvrtou možnosťou je využitie diferenčného snímania kapacity, avšak to sa v praxi pri väčších vzdialenostiach realizuje len veľmi ťažko, preto sa ním nebudeme bližšie zaoberať.

## 1.7 Snímanie farby filamentu

Pre zabezpečenie konštantnej farby vytlačaného materiálu je vhodné snímať jeho farbu. Plast je farbený pomocou tzv. masterbatch-ov ako už bolo spomenuté v podkapitole 1.1.1. Sú to vysoko koncentrované farbivá v podobe plastového granulátu alebo vo forme tekutiny. Vďaka ich vysokej koncentrácii, pomer miešania masterbatch-ov k plastovému granulátu je 1:100 (gramov). Týmto pomerom je nastavené dávkovanie, avšak stále môžu vzniknúť menšie odchýlky. Tieto odchýlky, zmenu odtieňa či sýtosť farby je možné regulovať za pomoci snímača farby. Ten pomocou zdroja svetla(napríklad LED diódy) zasvieti na požadovaný objekt a snímané je tak množstvo odrazeného svetla určitých vlnových dĺžok, ktoré sa líši v závislosti na farbe snímaného objektu.[19]

Snímanie farby filamentu je taktiež vhodné pri použití optického snímania priemeru (viď. podkapitola 1.6).

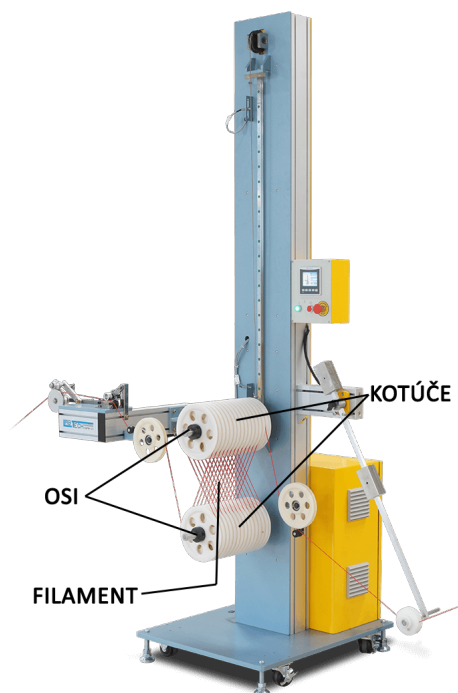
## 1.8 Ťahanie a navíjanie

Posledným bodom celého výrobného procesu je ťahanie filamentu za pomoci dvoch gumených alebo silikónových valčekov z ktorých jeden je poháňaný krokovým motorom. Následne je filament navíjaný na kotúč(cievku), ktorú otáča taktiež krokový motor. Rýchlosť ťahania je daná rýchlosťou vytlačania extrúzneho stroja a mení sa v závislosti na priemere struny. Čím rýchlejšie je struna vyťahovaná z extrúzneho stroja, tým je jej priemer menší a naopak. Rýchlosť navíjania zasa závisí od rýchlosti ťahania. Súčasťou navíjania je aj tzv. slider, ktorý zabezpečuje rovnomerné rozloženie navíjaného filamentu.

## 1.9 Akumulácia

Pre plné automatizovanie výrobného procesu je možné zakomponovať medzi ťahanie a navíjanie tzv. akumulátor. Ten zabezpečí plynulý chod výrobnéj linky počas výmeny už navinutého kotúča za prázdny.

V princípe ide o predĺženie dráhy ťahaného filamentu. Realizovaný je niekoľkými kotúčmi ktorými je filament vedený a ktoré sú nasadené na 2 osiach. Počas navíjania sú tieto osi pri sebe. Pri spustení akumulácie sa začnú od seba vzdalovať, čím sa zabezpečí požadované predĺženie dráhy. V konečnom dôsledku sa zabezpečí to, že filament na výstupe akumulátora sa nehýbe. [8]



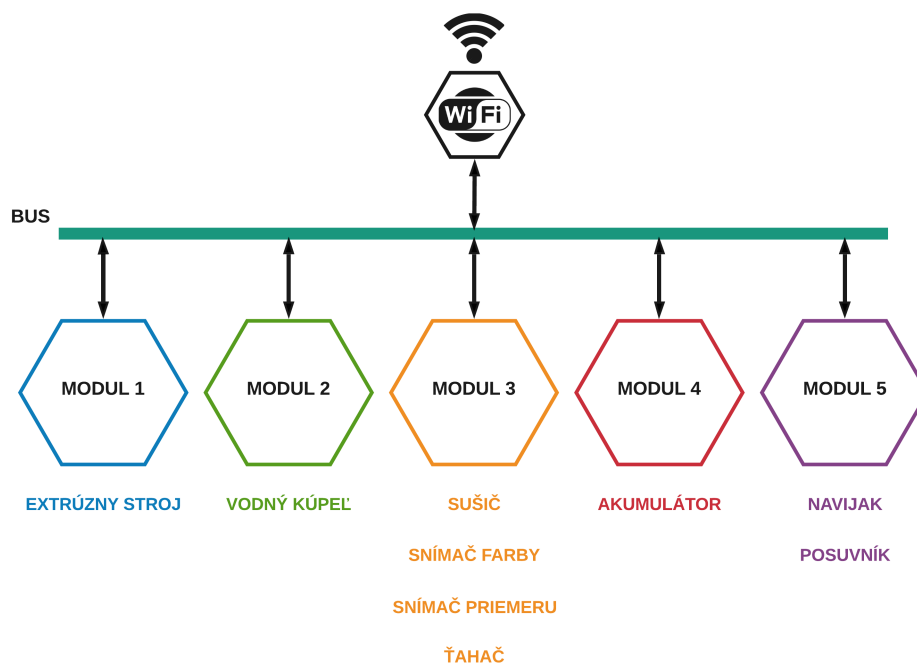
Obr. 1.6: Ukážka priemyselného akumulátora [20]

## 2 Návrh extrúzneho stroja a jeho príslušenstva

Táto kapitola sa zaoberá návrhom jednotlivých modulov výrobnéj linky a výberom vhodných inštrumentov.

Návrh výrobnéj linky je rozdelený na 5 modulov. Prvý modul obsahuje najdôležitejšie zariadenie celej výroby a tým je extrúznym strojom. Z dôvodu, že výroba tlačovej struny by dokázala fungovať iba so samotným extrúznym strojom, ďalšie moduly pokladáme za jeho príslušenstvo aj keď sú neoddeliteľnou súčasťou pre zabezpečenie najvyššej možnej kvality tlačovej struny. Všetky prvky výrobnéj linky boli navrhnuté v špecifickom duchu poly-designu, ktorý je jednotným a charakteristickým črtom celej práce, ako aj myšlienka výroby čo najväčšieho množstva prvkov za pomoci 3D tlače.

### 2.1 Bloková schéma výrobnéj linky

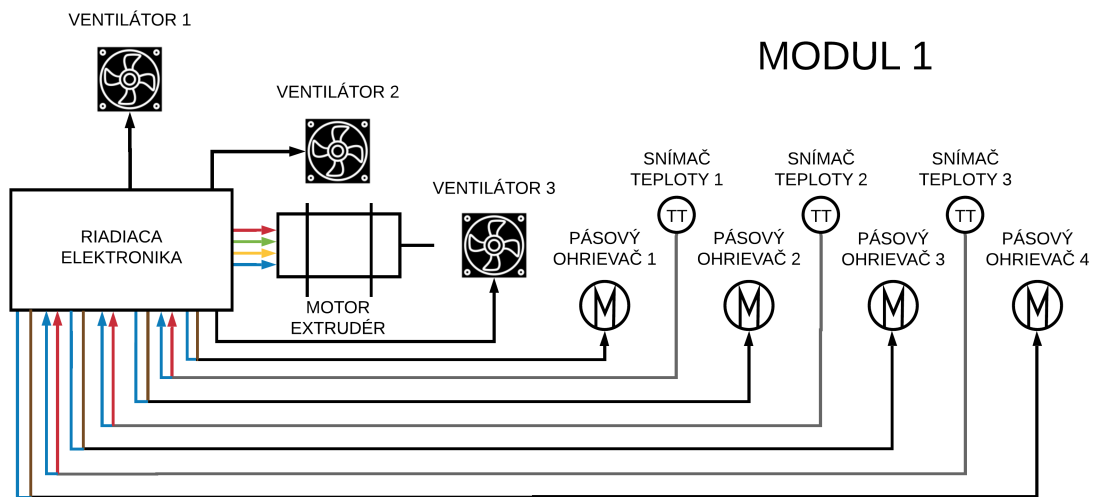


Obr. 2.1: Bloková schéma výrobnéj linky filamentu

Všetky moduly výrobnéj linky budú pripojené na zbernicu, na ktorú budú posielať, respektíve, z ktorej budú prijímať dáta. Tie ktoré sa budú týkať výrobných štatistík či chybových hlásení budú odosielané bezdrôtovo na lokálnu sieť, pre prehľadnejšiu a

komfortnejšiu kontrolu nad výrobou a pre prípadné riadenie. O komunikácii medzi modulmi či prípadnom odosielaní dát na sieť alebo riadení zo siete bude bližšie popísané v kapitole 4.

## 2.2 Modul 1 - Extrúzný stroj



Obr. 2.2: Bloková schéma modulu č.1

Hlavným prvkom tohoto modulu ako už názov napovedá je extrúzný stroj. Ten bol navrhnutý s myšlienkou priblížiť sa čo najviac k priemyselnej úrovni takéhoto zariadenia za čo možno najlepšiu cenu, s ohľadom na kvalitu, dizajn a možnosť ne-pretržitej prevádzky. Inšpiráciou boli rôzne DIY (z angl. Do It Yourself, v preklade urob si sám) zariadenia, ktoré boli takým tým výkričníkom, čomu sa vyvarovať a na čo naopak klásť dôraz. [21][22][23]

Ako hnacia jednotka bol zvolený 2 fázový krokový motor Nema 42 s driverom DM2722A, kvôli jeho presnej regulácii otáčok a cenovej dostupnosti (pri vzatí v úvahu aj cenu regulátora otáčok a porovnaní ho s cenou frekvenčných meničov). Maximálny možný prídržný moment tohoto motora činí 28 N.m, uhol jedného kroku je  $1.8^\circ$ , menovité napätie na fázu je 8 V a menovitý prúd na fázu je 8 A [25]. S použitým driverom je maximálna možná dosiahnuteľná rýchlosť 300 rpm a najmenšie možné uhlové pootočenie motora je 1/40000 otáčky. Driver je napájaný sieťovým napätím a disponuje jednosmerným napájacím zdrojom ktorým je napájaný motor. Tento motor by preto mal spĺňať potrebné požiadavky. Váha motora je 11,7 kg a preto bolo potrebné navrhnuť robustné a vhodné uloženie. To je realizované nosným

držiakom, ku ktorému je motor pripevnený 4 skrutkami a protilahlým oporným držiakom, aby nebol ten nosný príliš namáhaný.

Pre prípadné prehrievanie motora, ktoré je predpokladané z vlastnej skúsenosti používania krokových motorov pri vyšších krútiacich momentoch, bol pridaný chladiaci ventilátor. Ďalší ventilátor bol určený k riadiacej elektronike a hardvéru a je použitý v každom z modulov kvôli cirkulácii vzduchu v krabičke. Tretí ventilátor slúži ako deliaci ventilátor zóny 1 a zóny 2 vid. Obr.1.4, pod ktorým je umiestnený chladič z plechov, navrhnutý špeciálne pre tento účel.

Extrúzný šnek je uchytený v držiaku, ktorého ložiskové uloženie bolo navrhnuté tak, aby zvládalo ako axiálne, tak aj radiálne zaťaženie. To je docielené použitím axiálneho guľôčkového ložiska, na ktoré tlačí extrúzný šnek pri vytlačaní taveniny. Následne je umiestnené dvojradové guľôčkového ložisko, ktoré slúži ako hlavný nosný prvok a ako posledné je radené kuželové ložisko pre radiálne namáhanie ako aj axiálne, v prípade potreby spätného chodu extrúzneho šneka. V rovnakom držiaku je uchytená aj prírubu, ktorá je súčasťou valca. Prepojenie s motorom je realizované pružnou dvojitou diskovou spojkou ktorá eliminuje nesúososť hriadeľa motora a pažby extrúzneho šneka a ktorá je schopná zvládať zaťaženia krútiaceho momentu až do 50 N.m. Priemer šneka činí 26 mm kvôli možnosti spracovania väčšieho množstva plastov a jeho dĺžka závislá na známom pomere popísanom v podkapitole 1.3.1 je 620 mm, z čoho dĺžku závitnice tvorí 500 mm. Od neho odvíjajúca sa dĺžka valca bola mierne predĺžená kvôli nahromadeniu taveniny na konci valca a zabezpečeniu tak konzistentnosti vytlačania.

Valec stroja má tak dĺžku 540 mm (aj s prírubou) a hrúbku steny 7 mm. Aby nebol príliš namáhaný nosný držiak kvôli tejto dĺžke, bol navrhnutý ďalší, ktorý slúži ako opora valca avšak aj ako držiak násypky.

Bude ohrievaný pásovými ohrievačmi s napájaním 230 V, výkonom 200 W a dĺžkou 55 mm. Pri použití štyroch je tak dostatočne pokrytá celá zóna 2 a 3 vid. Obr.1.4. Ich teplota bude regulovaná zapínaním a vypínaním pomocou SSR(solid state relay) a to každého samostatne. Tento variant regulácie teploty je využívaný pri väčších výkonoch výhrevných telies a je cenovo najdostupnejším.

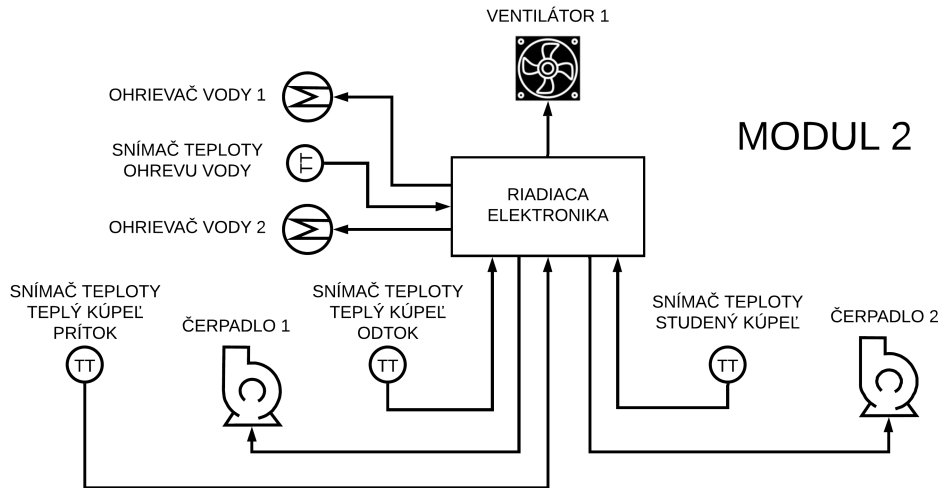
Medzi ohrievače boli umiestnené snímače teploty zapustené do valca, aby bolo možné zistiť čo naj dôveryhodnejšiu teplotu taveniny. Zvolené boli termočlánky, kvôli výhodám spomenutým v podkapitole 1.4. Konkrétne boli zvolené termočlánky typu K zložené z materiálov chromel a alumel.

Pod blokom riadiacej elektroniky, ktorý je súčasťou každého z modulov je zahrnutá nie len samotná riadiaca elektronika ale aj hardvér či napájací zdroj, o ktorých bude bližšie popísané v kapitole 3.



Celkový návrh modulu 1 vypracovaný vo forme 3D modelu, vid. príloha A.1.

## 2.3 Modul 2 - Vodný kúpeľ



Obr. 2.3: Blokovaná schéma modulu č.2

Pre chladenie filamentu bol zvolený variant chladenia vodou pomocou 2 vodných kúpeľov, kvôli výhodám spomenutým v podkapitole 1.5, nehľadiac na vyššiu cenu. Myšlienka vodného kúpeľa spočíva vo vytvorení dvoch pozdĺžnych otvorených nádrží (jedna slúžiaca ako odtoková a druhá ako tryska) do seba vnorených, medzi ktorými sa prečerpáva voda. Tým sa dvihne hladina v menšej nádrži, keďže jej objem je menší a filament prechádzajúci skrz je tak ponorený a chladený v celom svojom objeme.

Väčšia(odtoková) nádrž bola navrhnutá s dvomi otvormi zo spodnej strany (jedným pre prítok vody do trysky a druhým pre odtok) a s krytom, ktorý slúži ako uzáver pre zníženie úniku tepla. Vnútoraná nádrž(tryska) má otvor zo spodnej strany pre prítok, kde to odtok je realizovaný pretečením. Ako prípojky na prítok a odtok boli zvolené trňové rýchlospojky.

Výpočet dĺžok vodných kúpeľov bol zanedbaný z dôvodu zjednodušenia návrhu a taktiež obmedzenia veľkosti tlačového objemu 3D tlačiarne. Dĺžka oboch tak bola stanovená na 280 mm. Maximálny možný objem vody v odtokovej nádrži činí 0.256 l (nádrž bez trysky) a v tryske 0.159 l. (Údaje boli vypočítané na vymodelovanej nádrži v programe Autodesk Inventor).

Pre cirkuláciu vody medzi nádržami tak boli zvolené čerpadlá s prietokom 800 l/h, výkonom 22 W a napájaním 12 V.

Teplý vodný kúpeľ obsahuje okrem iného aj ohrev vody. Zvolený bol variant priameho ohrevu vody, kedy je mimo nádrže ohrievaná priamo voda, pred nepriamym, kedy je ohrievaná celá nádrž vodného kúpeľa. Rozhodujúca bola efektívnosť ohrievania ako aj modularita celého ohrevu. Priamy ohrev vody bol navrhnutý modulárne, aby ho bolo možné v prípade potreby rozšíriť a zvýšiť tak jeho výkon či naopak. Pozostáva z hliníkových blokov 40x40 mm ktorými cirkuluje voda a ktoré sú ohrievané silikónovými ohrievačmi s výkonom 5 W a napájaním 12 V. Voda v tomto kúpeli bude zohrievaná na teplotu v rozmedzí 50-80 °C (závisí na vytlačanom materiáli a rýchlosti vytlačania).

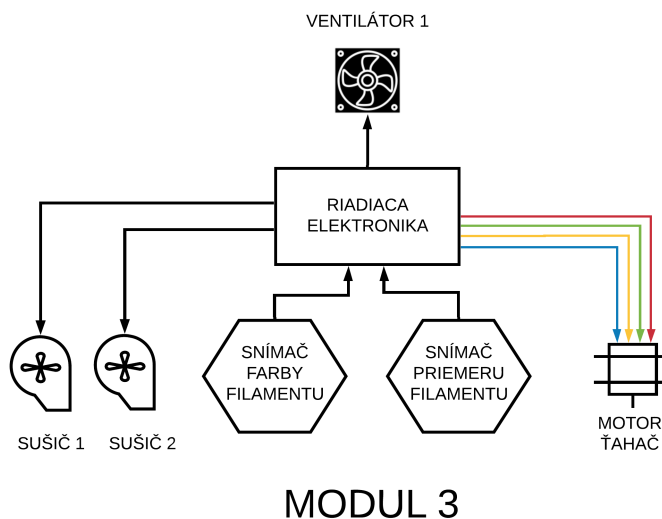
Na strane kde filament vstupuje, bol umiestnený prítok a na opačnej strane odtok. To zabezpečí plynulé ochladenie filamentu, keďže aj teplota vody sa znižuje vplyvom teplotných strát materiálu odtokovej nádrže a trysky. Kvôli týmto stratám bolo navrhnuté meranie teplotného spádu vody, vytvorením 2 meracích komôr. Jednej na strane prítoku a druhej na strane odtoku. Rozdielom teplôt tak vieme určiť o koľko bola voda ochladená. Ako snímače teploty boli zvolené NTC termistory s odporom 10 k $\Omega$ , z dôvodov spomenutých v podkapitole 1.4.

Studený vodný kúpeľ bol konštrukčne navrhnutý úplne rovnako, avšak je otočený kvôli inverzii prítoku a odtoku pre už vyššie spomínané plynule ochladenie filamentu. V tomto prípade je však kľúčové mierne ohrievanie vody vstupujúcim filamentom. Jedinými rozdielmi sú absencia ohrievača vody a snímania teplotného spádu vody, ktorý je v tomto prípade pre nás nepodstatný, keďže teplotu vody nebudeme ničím regulovať. Bolo však navrhnuté snímanie celkovej teploty vody v tomto kúpeli pre informatívne účely a to meracou komorou na strane prítoku. Ako snímač teploty bol zvolený taktiež NTC termistor s odporom 10 k $\Omega$ .

Všetky prepojenia sú realizované silikónovými hadičkami, ktoré je možné kedykoľvek odpojiť v prípade servisu, výmeny či zmeny inštrumentov.

Celkový návrh modulu 2 vypracovaný vo forme 3D modelu, viď. príloha A.2.

## 2.4 Modul 3 - Sušič, snímač farby, snímač priemeru a ťahač



Obr. 2.4: Blokovaná schéma modulu č.3

Tento modul je veľmi dôležitý, pretože obsahuje prvky, ktoré budú priamo ovplyvňovať priemer vytlačenej struny. Pozostáva z častí, ktoré môžeme vidieť na blokovej schéme uvedenej vyššie a o ktorých je bližšie popísané v nasledujúcich podkapitolách.

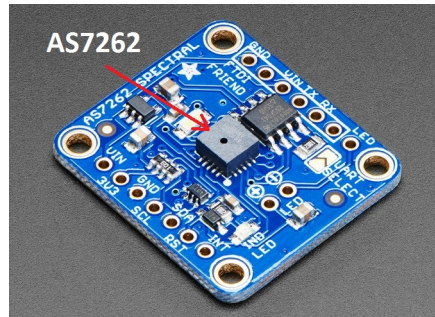
### 2.4.1 Sušič

Sušenie filamentu bolo navrhnuté metódou fúkania prudkého vzduchu za pomoci jedného radiálneho ventilátora. Bola k nemu navrhnutá tryska, z ktorej prúdi vzduch na filament v dvoch osiach ( $\pm 30^\circ$ ). Pred nimi je filament ťahaný skrz záchytné štetinky, ktoré zachytávajú veľké kvapôčky vody. Prietok vzduchu ventilátora je  $92,93 \text{ m}^3/\text{h}$ . Výber tohoto ventilátora bol daný odhadom.

### 2.4.2 Snímač farby

Ako snímač farby filamentu bol zvolený čip AS7262 od spoločnosti ams. Tento chip disponuje šiestimi spektrálnymi kanálmi, ktoré dokážu detekovať svetlo v rozmedzí od 430-670 nm. Má v sebe zabudované 2 LED ovládače pre riadenie LED diód, ktorých svetlo odrazené od snímaného objektu zaznamenáva a vyhodnocuje. O princípe snímania farby bolo spomenuté v podkapitole 1.7.

Komunikácia s týmto čipom prebieha prostredníctvom rozhrania I<sup>2</sup>C alebo UART. Pre prácu s čipom bol zvolený modul od spoločnosti Adafruit.



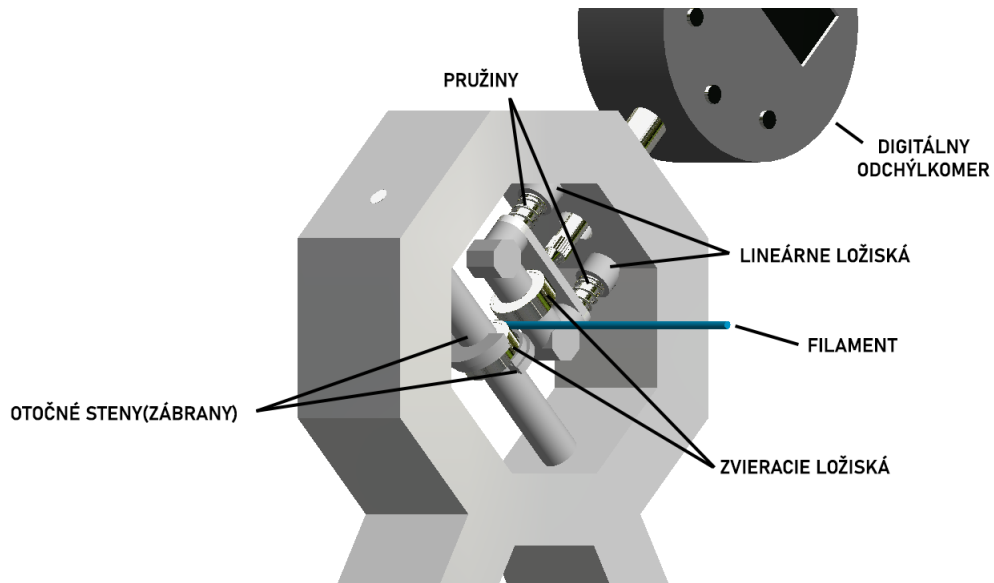
Obr. 2.5: Modul od spoločnosti Adafruit využívajúci čip AS7262 [24]

### 2.4.3 Snímač priemeru

Snímanie priemeru bolo navrhnuté mechanickým princípom o ktorom bolo zmienené v podkapitole 1.6. Ako snímač výchylky ktorá sa mení v závislosti na šírke snímaného filamentu bol zvolený digitálny odchýlkomer. Vybraný typ je schopný merať s rozlíšením 0,001 mm, presnosťou 0,005 mm a jeho merací rozsah je 0-12.5 mm[27]. Disponuje číslcovým displejom ako aj digitálnym výstupom, takže je možné snímané dáta spracovať, či už vizuálne alebo elektronicky, čo je veľkým plus.

Takéto snímanie výchylky bolo navrhnuté v požadovaných 2 osiach. Prechádzajúci filament skrz snímač je vystredovaný záchytnými stenami, ktoré znemožňujú vykláznutie filamentu spod zovretia ložísk. Tieto zábrany boli navrhnuté tak, aby sa dali otáčať a pri prvotnom spúšťaní výrobnéj linky bolo možné rýchlo vložiť ručne ťahaný filament. Na vychyľované ložisko je pôsobené silou 2 pružín, ktoré zabezpečujú pevné zovretie filamentu medzi ložiskami a zamedzujú tak neistotám merania ako sú pretočenie filamentu či vibrácie, ktoré by mohli vychyľovanie ovplyvniť. Vertikálny pohyb vychyľovaného ložiska je zabezpečený lineárnymi ložiskami ktoré sú pevne ukotvené a skrz ktoré sa pohybujú kovové tyče. Tie sú pevne pripevnené k osi vychyľovaného ložiska.

Kalibrácia navrhnutého snímača spočíva v očistení plôch ložísk ktoré prichádzajú do styku s filamentom a následnom vynulovaní odchýlkomera pri nulovej polohe vychyľovaného ložiska(oba zvierajúce ložiská sa dotýkajú). Návrh snímača priemeru filamentu v jednej osi a teda snímača šírky, je zobrazený na nasledujúcom obrázku.



Obr. 2.6: Navrhnutý snímač šírky filamentu s otvorenou zábranou

#### 2.4.4 Ťahač

Pre ťahanie filamentu bol navrhnutý jednoduchý ťahač pozostávajúci z dvoch gumených valčekov, ktoré medzi sebou zvierajú filament, ako bolo spomenuté v podkapitole 1.8. Jeden je prídržný a druhý aktívne otáčajúci sa. Otáčaním aktívneho valčeka je filament ťahaný. Prídržný valček pomocou sily 2 pružín pritláča filament k aktívnemu valčeku. Je osadený na nepohyblivej sa osi a pre zníženie trenia pri otáčaní boli použité ložiská vo vnútri valčeka. Pre otáčanie aktívneho valčeka bol zvolený 2 fázový krokový motor Nema 17 s driverom TB6600, aby bolo možné presne riadiť otáčanie valčeka a teda aj samotné ťahanie. Tento valček je upevnený priamo na hriadeli motora. Špecifikácia zvoleného motora je nasledovná: maximálny prídržný moment 0.45 N.m, uhol jedného kroku  $1.8^\circ$ , menovité napätie na fázu 3.3 V a menovitý prúd na fázu 1.5 A. Driver je napájaný jednosmerným napätím 9-40 V a najmenšie možné uhlové pootočenie motora s ním je 1/6400 otáčky. [28][30]

Celkový návrh modulu 3 vypracovaný vo forme 3D modelu, viď. príloha A.3.

### 3 Požiadavky na hardvér a riadiacu elektroniku

Aby bolo možné prostredníctvom riadiacej elektroniky pracovať so všetkými použitými inštrumentami (ventilátormi, ohrievačmi, termočlámkami ...), je potrebný nejaký hardvér ako aj definícia požiadaviek naň. Hardvér a teda vlastne DPS (doska plošného spoja) so súčiastkami, bude akýmsi prepojením medzi riadiacou elektronikou a použitými inštrumentami. Pre zvolené inštrumenty bude potrebný hardvér na digitálnu reguláciu napätia a prúdu, spínanie alebo na zosilnenie signálu (napríklad v prípade termočlánkov). Poďme sa teda bližšie pozrieť na hardvérové požiadavky celej výrobnéj linky kúsok po kúsok.

Snímanie teploty termočlámkami si vyžaduje zosilniť veľmi malé termoelektrické napätie a je potreba snímať teplotu okolia kvôli kompenzácii teploty meraného konca (termočlánku). To nám umožní integrovaný obvod MAX6675, ktorý spĺňa obe požiadavky. Priamo konverzuje výstup termočlánku na digitálny 12-bit signál s rozlíšením  $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}$  až do  $1024\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Pre komunikáciu s týmto obvodom slúži rozhranie SPI. Napájacie napätie obvodu je v rozsahu  $3\text{--}5.5\text{ V}$  a maximálny prúd činí  $1.5\text{ mA}$ . [31]

V prípade potreby ušetrenia gpio pinov na riadiacej elektronike, kvôli použitým obvodom MCP23S08, ktoré pre komunikáciu využívajú rozhranie SPI a ktoré pre správnu činnosť potrebujú samostatne vedený signál CS (chip select), bol vybraný 8 bitový expander MCP23S08 od spoločnosti Microchip. 8 bitový, z dôvodu možného pridania ďalších zariadení do budúcnosti, využívajúcich SPI komunikačný protokol, či potreby ovládať viacero digitálnych výstupov. Napájacie napätie tohoto modulu je v rozmedzí  $1.8\text{--}5.5\text{ V}$  a prenosová rýchlosť  $10\text{ Mbps}$ . [32]

K riadení otáčok ventilátora, teploty ohrievačov či prietoku čerpadla je potrebná PWM regulácia. Keďže všetky vymenované inštrumenty sú napájané napätím  $12\text{ V}$ , je nutné navrhnuť výkonový stupeň PWM regulátora, ktorý by bolo možné riadiť nižším napätím pri predpokladanom použití riadiacej elektroniky s  $3.3/5\text{ V}$  logikou. Na tento účel bol navrhnutý obvod s tzv. high side spínaním a aktívnou úrovňou log. 1, ktorý využíva NPN bipolárny a P-kanálový MOSFET tranzistor. Schéma tohoto obvodu, viď príloha B.2. Tento navrhnutý obvod je schopný zvládnuť prúdové zataženie až  $6\text{ A}$  pri  $30\text{ V}$  čo plne postačuje pre inštrument s najvyššou spotrebou ktorým je  $42\text{ W}$  radiálny ventilátor (sušič).

SSR regulácia teploty pásového ohrievača si vyžaduje SSR relé 5 A DC/AC. Zvolené bolo na základe výkonu ohrievača ktorý bol spomenutý v kapitole 2.2. Relé je možné spínať DC napätím v rozsahu 3-32 V.

Pre komunikáciu medzi modulmi bol zvolený komunikačný protokol CAN bus o ktorom bude bližšie popísané v nasledujúcej kapitole 4. K jeho činnosti je potrebný prevodník I<sup>2</sup>C/CAN ktorý slúži ako prijímač a vysielač dát na fyzickú vrstvu. Zvolený bol integrovaný obvod SN65HVD230 od spoločnosti Texas Instruments, s napájacím napätím 3.3 V [33]. Prepojenie medzi jednotlivými modulmi bolo navrhnuté použitím priameho tieneneho sieťového kábelu s rovnako tienenými koncovkami rj45 ktorých usporiadanie vývodov je 8p8c. Navrhnuté zapojenie jednotlivých žíl je zobrazené v priloženom obrázku B.6.

Pri výbere súčiastok bola priorita použitia SMD prevedenia. Ako vstupné a výstupné konektory boli zvolené 2-pólové svorkovnice. Výnimku tvoria konektory pre pripojenie signálov na riadenie motorov, tie sú pripájané skrz pinovú lištu (na strane DPS).

V nasledujúcich podkapitolách bude rozpis požiadaviek na hardvér pre každý z navrhnutých modulov, ich celková maximálna spotreba kvôli vhodnému výberu napájacieho zdroja ako aj počet potrebných vstupov a výstupov pre výber vhodnej riadiacej elektroniky.

### 3.1 Extrúzný stroj

Požiadavky a spotreba modulu 1:

- 3x PWM regulácia ventilátora DC 12 V:
  - ventilátor 1: príkon = 3.42 W
  - ventilátor 2: príkon = 12 W
  - ventilátor 3: príkon = 1.53 W - 3x PWM výstup
- 4x snímanie teploty s termočlánkom:
  - expander MCP23S08: max spotreba = 687.5 mW (pri použití všetkých výstupov a napájaní 5.5 V)
  - 4x zosilňovač a kompenzátor MAX6675: max spotreba = 11 mW (pri napájaní 5.5 V)
  - SPI rozhranie
- 4x SSR regulácia teploty pásového ohrievača:
  - 4x logický výstup
- ovládanie drivera krokového motora extrúzného stroja:
  - 3x logický výstup

- komunikácia CAN bus:
  - prevodník I<sup>2</sup>C/CAN bus SN65HVD230: max spotreba = 158.4 mW (pri napájaní 3.3 V)
  - I<sup>2</sup>C rozhranie

## 3.2 Vodný kúpeľ

Požiadavky a spotreba modulu 2:

- PWM regulácia ventilátora DC 12 V:
  - Ventilátor 1: príkon = 1.53 W
  - PWM výstup
- 2x PWM regulácia ohrievača vody DC 12 V:
  - 2x Ohrievač: spotreba = 5 W
  - 2x PWM výstup
- 4x snímanie teploty - NTC termistor:
  - 4x A/D vstup
- 2x PWM regulácia prietoku čerpadla DC 12 V:
  - 2x Čerpadlo: príkon = 22 W - 2x PWM výstup
- komunikácia CAN bus:
  - prevodník I<sup>2</sup>C/CAN bus SN65HVD230: max spotreba = 158.4 mW (pri napájaní 3.3 V)
  - I<sup>2</sup>C rozhranie

## 3.3 Sušič, snímač farby, snímač priemeru a ťahač

Požiadavky a spotreba modulu 3:

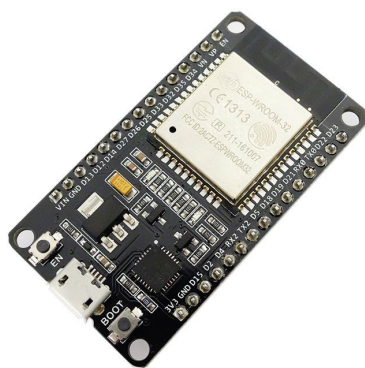
- PWM regulácia ventilátora DC 12 V:
  - ventilátor 1: príkon = 1.53 W
  - PWM výstup
- PWM regulácia sušiča DC 12 V:
  - Radiálny ventilátor: príkon = 42 W
  - PWM výstup
- Snímanie farby filamentu:
  - snímač farby AS7262: max spotreba = 500 mW [38] (pri použití napájania 5 V) - UART rozhranie



- Snímanie priemeru filamentu
  - snímač priemeru: spotrebu odchýlkomera sa nepodarilo dohľadať avšak jeho štandardné napájanie je 1,5 V gombíkovou batériou, predpokladá sa tak veľmi malá spotreba ktorú zanedbáme
  - 3x A/D vstup
- ovládanie drivera krokového motora ťahača:
  - 3x logický výstup
- komunikácia CAN bus:
  - prevodník I<sup>2</sup>C/CAN bus SN65HVD230: max spotreba = 158.4 mW (pri napájaní 3.3 V)
  - I<sup>2</sup>C rozhranie

### 3.4 Riadiaca elektronika

Pre riadenie je možné vyberať z širokého množstva mikrokontrolérov. Na základe hardvérových požiadaviek je potrebná riadiaca elektronika s minimálne 4 vstupmi s A/D prevodníkom, 5 PWM výstupmi, 7 dvojúrovňovými logickými výstupmi, rozhraním SPI, I<sup>2</sup>C, UART a v neposlednom rade aj s Wi-Fi konektivitou pre bezdrôtové odosielanie dát na lokálnu sieť. Určitú úlohu hraje taktiež cena, pretože každý modul výrobnéj linky potrebuje vlastnú riadiacu elektroniku. Na základe týchto požiadaviek bol zvolený práve ESP32, konkrétne modul ESP32 DevKit V1. Tento mikrokontrolér disponuje dvojjadrovým 32-bitovým procesorom Xtensa LX6 s frekvenciou 160-240 MHz, bezdrôtovou konektivitou Wi-Fi a Bluetooth v4.2, všetkými potrebnými rozhraniami a dostatočným počtom vstupov a výstupov. Za zmienku taktiež stojí zabudovaný snímač teploty, dotyku či implementovaná hallova sonda. Pracuje s 3.3 V logikou a jeho napájacie napätie je 3.3 V.[36] Na samotnom module nájdeme stabilizátor na 3.3 V 1 A a tak je potrebné použiť 5V napájanie modulu. Nájdeme tam aj tlačidlo pre bootovanie(nahrávanie programu), resetovacie tlačidlo, ako aj indikačné LED diódy. Modul je možné napájať prostredníctvom micro USB portu. Táto možnosť však bude využitá iba na nahrávanie programu do mikrokontroléra, vďaka prevodníku USB/UART ktorý je už implementovaný na doske tohoto modulu.



Obr. 3.1: Ukážka modulu ESP32 DevKit V1 [37]

Zistenie spotreby všetkých použitých integrovaných obvodov sa požadovalo kvôli ich možnosti napájania z 3.3V výstupu na riadiacej elektronike. Maximálna spotreba mikrokontroléra ESP32 je 792mW. Maximálny výstupný prúd GPIO pinov je 40mA. Pri použití všetkých výstupov (19) sa tak spotreba môže navýšiť až o 2.508W. Celková spotreba tohoto modulu tak môže dosiahnuť 3.3W. Na module je použitý stabilizátor napätia 3.3V 1A, avšak žiaden z modulov nebude využívať všetky GPIO piny a tak je možné použiť napájanie pre integrované obvody z tohoto stabilizátora. [39]

### 3.5 Napájací zdroj

Celkové maximálne možné spotreby jednotlivých modulov sú nasledovné:

Modul 1 = 23.88W

Modul 2 = 58.99W

Modul 3 = 44.49W

Na základe týchto spotrieb bol zvolený spínaný napájací zdroj AC 230/12V 5A. Týmto zdrojom bude disponovať každý z modulov kvôli zabezpečeniu modularity a bude pokladaný za primárny.

Z hľadiska bezpečnosti bol pre prípad poruchy vybraného zdroja pridelený záložný zdroj. Ten bude umiestnený iba v module 1 a prostredníctvom dátovej linky, ktorú využíva aj CAN bus, bude distribuovaný do každého z modulov. Napätie tohoto zdroja bude nižšie, z dôvodu použitia automatického prepínania zdrojov za pomoci diód aby bolo jasne určené, ktorý zdroj má prednosť aj pri kolísaní napätia na zdroji. Veľkosť napätia primárneho zdroja bude nepretržite sledovaná mikrokontrolérom skrz delič napätia. V prípade poruchy tak riadiaca elektronika bude môcť

odoslať chybové hlásenie na zbernicu a všetky moduly tak môžu byť okamžite zastavené.

Kvôli napájaniu modulu ESP32 DevKit V1 napätím 5V, bolo potrebné implementovať stabilizátor napätia. Vybraný bol stabilizátor MIC39100-5 od spoločnosti Microchip, ktorého výstupný prúd je 1A a tak pre túto aplikáciu plne postačuje.

Ochrana voči prepólovaniu ako aj prepäťová ochrana bola navrhnutá použitím transilu. Prúdová ochrana je zabezpečená auto poistkou, ktorá sa líši v každom z modulov.

Schéma navrhnutého obvodu prepínania zdrojov, stabilizácie, ochrany voči prepólovaniu a prepäťovej ochrany je v prílohe B.7

## 3.6 Sumarizácia a návrh riadiacej DPS

Na základe predchádzajúcich informácií a súbežne s návrhom riadiacej DPS bolo rozhodnuté, že sa na riadiacej DPS budú nachádzať nasledujúce komponenty a to v týchto počtoch:

- 1 x prevodník I<sup>2</sup>C/CAN bus SN65HVD230
- 3 x zosilňovač a kompenzátor MAX6675
- 1 x expander MCP23S08
- 1 x stabilizátor napätia 5V/1A MIC39100-5
- 1 x transil SMAJ13A pre primárny zdroj
- 1 x transil SMAJ10A pre záložný zdroj
- 2 x Schottkyho dióda STPS1L40A pre automatické prepínanie medzi zdrojmi
- 1 x LED dióda 3V/20mA indikujúca napájanie
- 5 x výkonový PWM regulátor (pre podrobnejší zoznam súčiastok viď. Schéma zapojenia B.2)
- 3 x pinová lišta (4x1) pre pripojenie driverov na ovládanie krokových motorov
- 2 x pinová lišta (4x2) pre vyvedenie napájania 12V a 3.3V
- 2 x pinová lišta-zásuvka (15x1) pre pripojenie riadiacej elektroniky
- 2 x pinová lišta (15x1) pre možnosť pripojenia sa priamo na riadiacu elektroniku
- 2 x konektor RJ45 (8p8c) pre vzájomné prepojenie modulov
- 2 x držiak poistky
- 13 x svorkovnica (2-pólová) pre pripojenie inštrumentov a zdrojov

Riadiaca DPS bola navrhnutá obojstranne, kde SMD súčiastky boli umiestnené na hornej strane. Bol kladený dôraz na vedenie ciest pod maximálnym uhlom 45°, ako aj na hrúbky ciest, rozmiestnenie súčiastok či rozmery samotnej DPS.

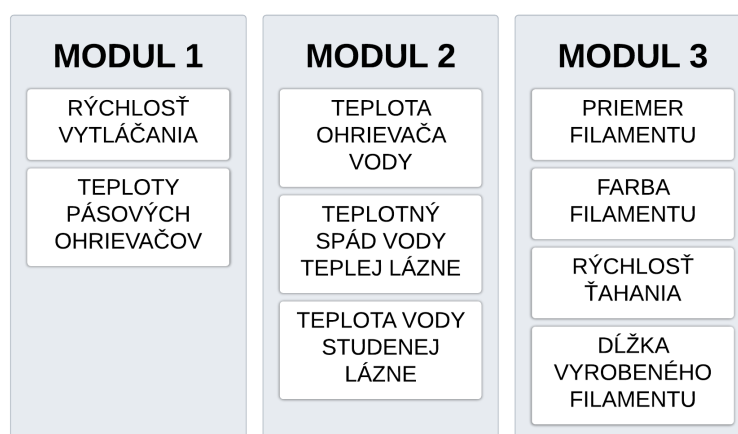
Vizualizácia navrhnutej riadiacej DPS, viď. Obr. B.8, B.9.

## 4 Požiadavky na softvér

Komunikácia medzi modulmi musí prebiehať v reálnom čase, čo najrýchlejšie a s možnosťou chybových hlásení. V ideálnom prípade by si mali byť všetky zariadenia rovné a teda nie je vhodná komunikácia master-slave.

Na nasledujúcom obrázku môžeme vidieť dáta, ktorými budú disponovať jednotlivé moduly a ktoré bude potrebné si medzi jednotlivými modulmi vymieňať, aby bolo možné regulovať celý výrobný proces.

### NAMERANÉ A RIADIACE DÁTA



Obr. 4.1: Namerané a riadiace dáta

Tieto požiadavky, spĺňa komunikačný protokol CAN bus, ako už bolo spomenuté v kapitole 3. Podme si ho teda bližšie špecifikovať.

### 4.1 CAN bus

Komunikačný protokol CAN(Controller Area Network) bol vyvinutý firmou Bosch a predstavený na trh v roku 1986. Spočiatku bol vyvinutý pre automobilový priemysel ako spoľahlivá komunikácia medzi senzormi a riadiacou elektronikou. Vďaka svojej spoľahlivosti a relatívne vysokej rýchlosti ktorá činí 1 Mb/s sa rýchle rozšíril aj do sféry priemyselnej automatizácie. Norma má 2 varianty: so základným formátom správy CAN 2.0A a s rozšíreným formátom správy CAN 2.0B.

Tab. 4.1: Štruktúra vrstiev protokolu CAN

2.0A	2.0B	
<b>Object Layer</b>	<b>Logical Link Control (LLC)</b>	<b>Linková vrstva</b>
- filtrovaní zpráv - hlášení o přetížení		
<b>Transfer Layer</b>	<b>Medium Access Control (MAC)</b>	
- tvorba rámců - řízení přístupu k médiu - detekce a hlášení chyb - potvrzování - časování bitů - synchronizace		
<b>Physical Layer</b>	<b>Physical Layer</b>	<b>Fyzická vrstva</b>
- kódování a dekódování bitů (NRZ, bit-stuffing) - reprezentace logických úrovní - vlastní přenosové médium		

- Fyzická vrstva: - definuje, ako je v skutočnosti signál prenášaný. Zaisťuje prevod dát na elektrický signál ako aj prevod elektrického signálu na dáta. V našom prípade túto funkciu vykonáva obvod SN65HVD230, ktorého schéma zapojenia je v prílohe B.5.
- Transfer layer: - je akýmsi jadrom protokolu CAN. Poskytuje správy prijaté zo zbernice a preberá správy určené k vysielaniu. Stará sa o časovanie, synchronizáciu či riadenie zbernice.
- Object layer: - zaoberá sa spravovaním dát a ich filtráciou

Funguje na modeli komunikácie multimaster(každé z pripojených zariadení má možnosť získať zbernicu pre seba). Tento princíp je kombinovaný s náhodným prístupom k sieti, ktoré rieši kolíziu na základe prioritného kódovania. Komunikácia na sieti prebieha pomocou predávania správ(dátová správa a žiadosť o dáta).

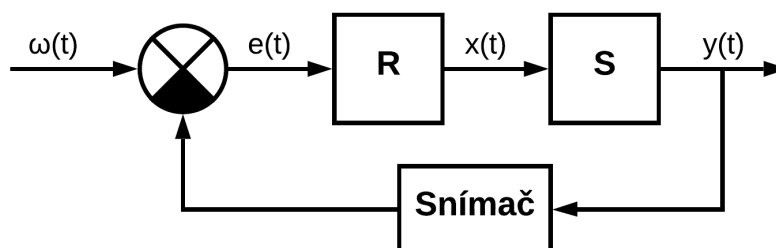
Riadenie siete(signalizácia chyb či pozastavenie komunikácie), je zaistené pomocou chybovej správy a správy o preťažení. Táto komunikácia je taktiež špecifická tým, že správa neobsahuje adresu príjemcu a je možné ju prijímať všetkými zariadeniami. Obsahuje totižto identifikátor ktorý určuje obsah správy ako aj jej prioritu. Nižší identifikátor značí vyššiu prioritu. Správy s vyššou prioritou tak v prípade kolízie dostanú prednosť.[42][43]

## 4.2 PlatformIO na báze VS Code

Pre programovanie mikrokontroléra je potrebné vývojové prostredie. Voľba padla na PlatformIO v podobe rozšírenia pre vývojové prostredie VS Code. V súčasnej dobe podporuje viac než 33 platform, 19 frameworkov, 769 programovateľných dosiek a funkcionality na najznámejších operačných systémoch Windows, Linux a Mac. Disponuje viac než 6900 knižnicami, okrem iného aj pre prácu s ESP32, ktoré sú automaticky stiahnuté pri ich použití. [44]

## 4.3 Regulačné slučky

Softvér by mal byť taktiež schopný realizovať rôzne typy regulačných slučiek. V tejto podkapitole sa pozrieme na regulačné slučky, ktoré sú súčasťou výrobného procesu, ako aj samotných zariadení výrobných liniek. Všetky tieto regulačné slučky vychádzajú zo zjednodušenej schémy uvedenej nižšie.



Obr. 4.2: Zjednodušená schéma regulácie

Kde R-regulátor, S-sústava,  $\omega(t)$ -riadiaca(žiadaná) veličina,  $e(t)$ -regulačná odchýlka,  $x(t)$ -akčná veličina,  $y(t)$ -výstupná(regulovaná) veličina

### 4.3.1 Regulácia ohrevu valca extrúzneho stroja

Regulácia pozostáva z 4 rovnakých regulačných slučiek, z dôvodu použitia 4 pásových ohrievačov a teda možnosti regulovať teplotu každého ohrievača zvlášť.

Bližší popis jednej regulačnej slučky je nasledovný:

- sústava - pásový ohrievač
- aktuátor(akčný člen) - SSR relé
- riadiaca(žiadaná) veličina - teplota valca v mieste použitia pásového ohrievača
- regulovaná veličina - aktuálna teplota valca v mieste použitia pásového ohrievača
- spätná väzba - snímač teploty, termočlánok

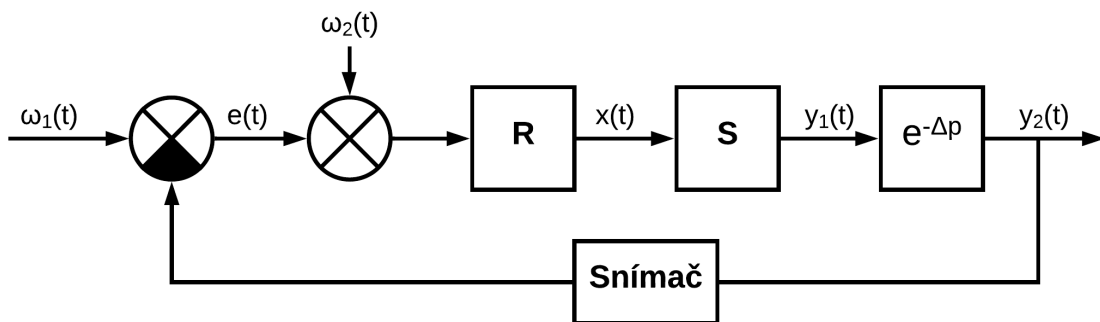
### 4.3.2 Regulácia ohrevu vody teplého vodného kúpeľa

Rovnako ako v predošlej regulačnej slučke, aj v tejto je regulovaná teplota, avšak parametre regulácie sa líšia. Bližší popis regulačnej slučky vychádzajúci zo schémy na Obr. 4.2 je nasledovný:

- sústava - ohrievač vody
- aktuátor(akčný člen) - 12V PWM riadiacej DPS
- riadiaca(žiadaná) veličina - nastavená teplota prítoku vody do kúpeľa
- regulovaná veličina - aktuálna teplota vody v mieste prítoku vody do kúpeľa
- spätná väzba - snímač teploty, NTC termistor

### 4.3.3 Regulácia rýchlosti ťahania filamentu

V tomto prípade sa jedná o MIMO systém (Multiple-Input & Multiple-Output). Regulácia rýchlosti ťahania je realizovaná v závislosti na aktuálnom priemere struny a rýchlosti vytlačania extrúzneho stroja. Rýchlosť ťahania vplýva na aktuálny priemer filamentu, čím nám vzniká ďalšia regulovaná veličina, priemer filamentu. Táto regulačná slučka navyše obsahuje dopravné oneskorenie, ktoré je spôsobené snímaním priemeru filamentu až v mieste, kde to je možné a teda, keď je filament v pevnom skupenstve a vysušený. To spôsobí oneskorenie prejavu akčného zásahu.



Obr. 4.3: Zjednodušená schéma regulácie s dopravným oneskorením

Kde R-regulátor, S-sústava,  $\omega_1(t)$ -riadiaca(žiadaná) veličina,  $\omega_2(t)$ -riadiaca veličina 2,  $e(t)$ -regulačná odchýlka,  $x(t)$ -akčná veličina,  $y_1(t)$ -výstupná(regulovaná) veličina,  $y_2(t)$ -výstupná(regulovaná) veličina 2

Bližší popis regulačnej slučky je nasledovný:

- sústava - krokový motor
- aktuátor(akčný člen) - driver krokového motora
- riadiaca(žiadaná) veličina - nastavený priemer filamentu
- riadiaca veličina 2 - rýchlosť extrúzie
- regulovaná veličina - rýchlosť ťahania filamentu
- regulovaná veličina 2 - aktuálny priemer filamentu
- spätná väzba - snímač priemeru filamentu

#### **4.3.4 Regulácia farbenia filamentu**

V tomto prípade je riadené dávkovanie masterbatch-ov, v závislosti na aktuálnej farbe filamentu, s prihliadnutím na dávkovací pomer. Viac o farbení filamentu bolo spomenuté v podkapitole 1.7. Táto regulačná slučka taktiež obsahuje dopravné oneskorenie, ktoré je len o čosi kratšie, ako pri regulácii rýchlosti ťahania filamentu uvedenej vyššie. Kratšie z dôvodu umiestnenia snímača farby filamentu ešte pred snímač priemeru filamentu.

Regulačná slučka vychádza zo schémy na Obr. 4.3 a jej bližší popis je nasledovný:

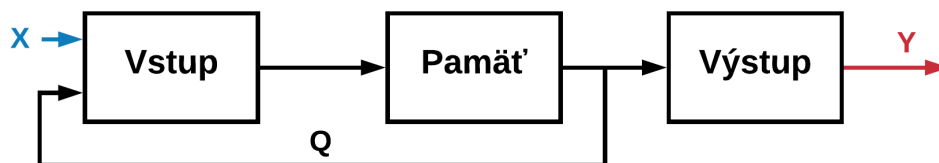
- sústava - dávkovač masterbatch-ov(krokový motor)
- aktuátor(akčný člen) - driver krokového motora
- riadiaca(žiadaná) veličina - nastavená farba filamentu
- riadiaca veličina 2 - dávkovací pomer
- regulovaná veličina - množstvo nadávkovaných masterbatchov
- regulovaná veličina 2 - aktuálna farba filamentu
- spätná väzba - snímač farby filamentu



## 5 Návrh riadiaceho systému

Celý návrh riadiaceho systému je realizovaný za pomoci Mooreových stavových automatov. Každý z navrhnutých automatov reprezentuje a popisuje riadiaci systém daného modulu. Mooreov stavový automat obsahuje 3 časti:

1. Vstup - zmena stavu na základe podmienok prechodu I
2. Pamäť (Register) - aktualizácia aktuálneho stavu S na stav zvolený
3. Výstup - priradenie výstupu O na základe aktuálneho stavu



Obr. 5.1: Blokový diagram Moorovho stavového automatu

Kde X-vstup, Y-výstup, Q-aktuálny stav. Výhoda tohoto typu stavového automatu je v neustálom poskytovaní hodnôt na výstup. Softvérová implementácia bude znázornená v kapitole 6.

Rozhranie medzi systémom a operátorom tvoria tlačidlá ON, STARTUP, RUN, STOP a TOTAL STOP. Systém je navrhnutý s niekoľkými režimami, ktoré sú podstatné pre správny chod výroby. Prvý je Inicializácia, nasleduje Ready režim, Startup režim a nakoniec Režim prevádzky. Keďže nie každé tlačidlo bude priamo vplývať na všetky moduly a zároveň, nie všetky moduly sa budú môcť nachádzať v každom režime, respektíve, nebudú vykonávať rovnakú činnosť v danom režime, funkcie týchto tlačidiel a účely daných režimov budú bližšie popísané pri jednotlivých stavových automatoch. Výnimky tvoria tlačidlo ON a režim Inicializácia, v ktorom každý modul inicializuje svoje premenné a nastaví všetky svoje parametre na defaultné hodnoty.

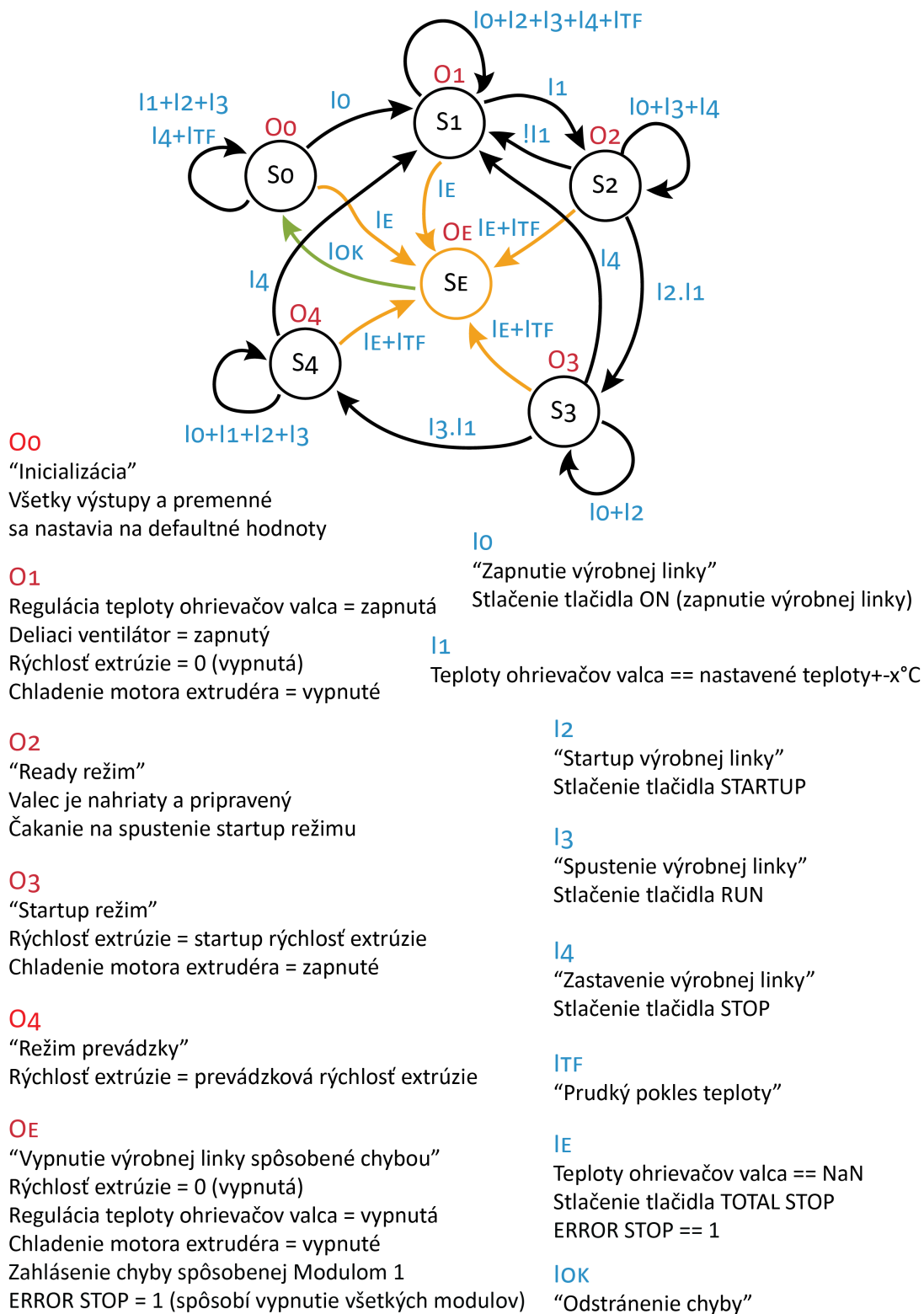
Každý stavový automat obsahuje stav SE signalizujúci chybu, ako aj k nemu smerujúce vetvy zo všetkých stavov, aby bolo možné v prípade chyby v akomkoľvek stave, bezpečne vypnúť alebo pozastaviť výrobnú linku a predísť tak nechceným komplikáciám či prípadnému nebezpečenstvu. Do stavu SE sa taktiež dostane každý automat stlačením tlačidla TOTAL STOP. V prípade prechodu do stavu SE daný automat zahlásí chybu, ktorá tento prechod vyvolala. Následne prejdú všetky ostatné automaty do stavu SE, aby mohlo byť vykonané patričné vypnutie každého modulu.

Po odstránení chyby ktorá spôsobila prechod do stavu SE, systém a teda všetky stavové automaty prejdú do stavu S0, čím dôjde k reštartu celej výrobnéj linky.

V nasledujúcich podkapitolách sa bližšie pozrieme na stavové automaty jednotlivých modulov.

## 5.1 Modul 1

Funkcionalita tohoto modulu spočíva v riadení motora a ohrevu extrúzného stroja.



Obr. 5.2: Mooreov stavový automat pre modul 1

Bližší popis stavového automatu pre modul 1 je nasledovný.

V počiatočnom stave S0, je automat v režime Inicializácia. Následne automat čaká na zapnutie výrobnjej linky (stlačenie tlačidla ON). Po stlačení tlačidla sa prepne do stavu S1, kde sa zapne deliaci ventilátor a regulácia teplôt ohrievačov na nastavené teploty. Po dosiahnutí všetkých nastavených teplôt s určitou hysteréziou, sa automat prepne do stavu S2, kedy nastane Ready režim. Tento režim signalizuje, že je valec nahriaty a pripravený na "Startup režim". Zmenou nastavenej teploty ohrievačov valca sa automat prepne späť do stavu S1.

V stave S2, stlačením tlačidla STARTUP, nastane prepnutie do stavu S3, v ktorom sa vykonáva Startup režim. Tento režim slúži na rozbehnutie výrobnjej linky, kedy je potrebné vytláčaný filament chytiť pinzetou, a prevliecť ho skrz vodné kúpele, sušič, snímač farby, snímač priemeru a ťahač. Rýchlosť extrúzie sa preto nastaví na startup rýchlosť, čo je rýchlosť dosť pomalá na to, aby bol užívateľ schopný stihnúť prevliecť filament. Rovnako tak sa v tomto stave zapne chladenie motora extrúzneho stroja. Až je vytlačanie a zároveň ťahanie ustálené a filament je ťahaný bez zásahu operátora, je možné prepnúť automat do stavu S4 stlačením tlačidla RUN.

Stav S4 pre tento modul signalizuje Režim prevádzky, kedy je rýchlosť extrúzie plynule zvýšená na prevádzkovú rýchlosť. V tomto stave je extrúzny stroj v plnej prevádzke.

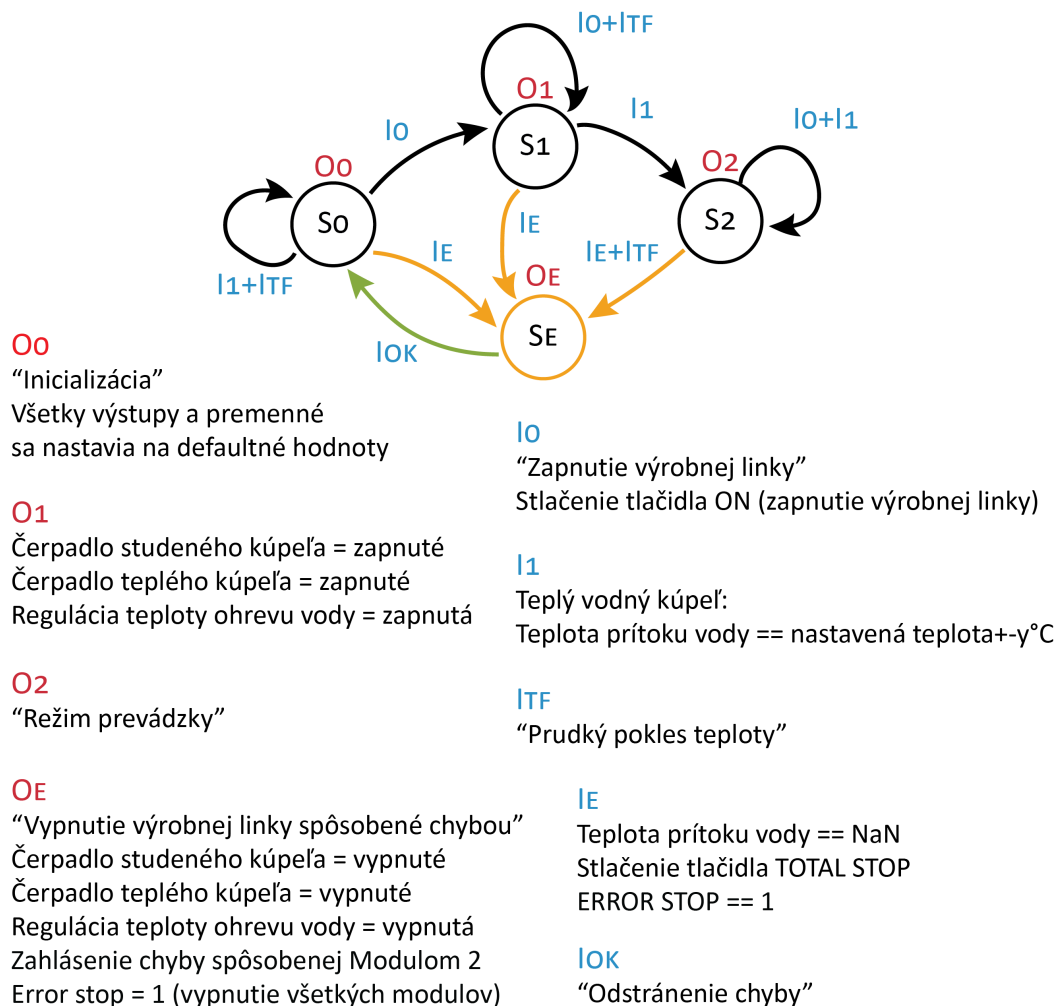
V prípade potreby zastaviť prevádzku z dôvodu servisovania alebo z dôvodu chyby, ktorá nebola detekovaná systémom avšak nie je tak fatálna, aby bolo potrebné vypínať celú výrobnú linku, sa naskytá možnosť stlačenia tlačidla STOP. Toto tlačilo slúži pre zastavenie výrobnjej linky, nie pre jej vypnutie. Pri tomto module sa prepne automat zo stavu S3 alebo S4 do stavu S1, kedy sa zastaví extrúzia a vypne chladenie motora extrúzneho stroja.

Zmena nastavenej teploty ohrievačov valca je možná v každom stave bez vplyvu na zmenu stavu a to z dôvodu nájdania optimálnych teplôt pre vytláčaný materiál.

V prípade prudkého poklesu akejkoľvek meranej teploty v tomto module sa automat prepne do stavu SE. Rovnako tak učiní v prípade straty signálu zo snímačov teploty. V stave SE, ktorý signalizuje vypnutie výrobnjej linky spôsobené chybou, sa zastaví extrúzia, vypnú ohrievače valca a vypne sa chladenie motora extrúzneho stroja.

## 5.2 Modul 2

Funkcionalita tohoto modulu spočíva v riadení čerpadiel vodných kúpeľov a ohrevu vody teplého vodného kúpeľa.



Obr. 5.3: Mooreov stavový automat pre modul 2

Bližší popis stavového automatu pre modul 2 je nasledovný.

Rovnako ako pri predošlom module sa v stave S0 automat nachádza v režime Inicializácia. Po stlačení tlačidla ON sa automat prepne do stavu S1, v ktorom zapne čerpadlá oboch kúpeľov a reguláciu teploty ohrevu vody. Po dosiahnutí nastavenej teploty s určitou hystereziou sa automat prepne do stavu S2.

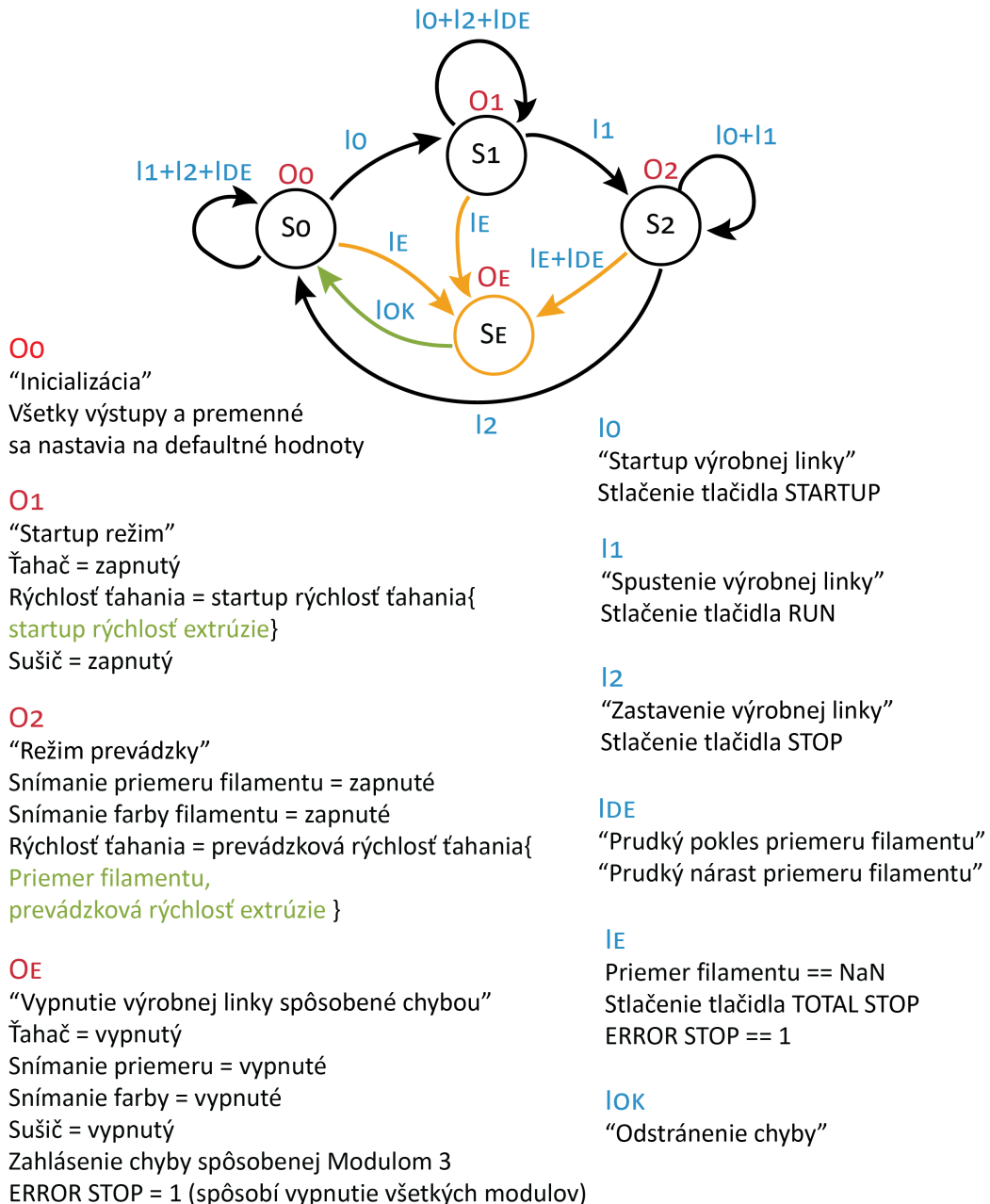
Stav S2 signalizuje Režim prevádzky. V tomto režime sú vodné kúpele v plnej prevádzke.

Pri prudkom poklese teploty prítoku vody alebo pri strate signálu zo snímača teploty prítoku vody sa automat prepne do stavu SE. V tomto stave sa vypnú oba čerpadlá a vypne sa regulácia teploty ohrevu vody. Toto riešenie je na prvý pohľad

možno drastické, avšak ak chcem zabezpečiť čo najvyššiu možnú kvalitu tlačovej struny, ako už bolo spomenuté v podkapitole 1.5, je potrebné si udržať plynulé schladzovanie filamentu.

## 5.3 Modul 3

Funkcionalita tohoto modulu spočíva v riadení sušiča, snímača farby, snímača priemeru a ťahača filamentu.



Obr. 5.4: Mooreov stavový automat pre modul 3

Bližší popis stavového automatu pre modul 3 je nasledovný.

Na počiatku sa automat nachádza v stave S0, ktorý signalizuje režim Inicializácia, ako tomu bolo aj pri predchádzajúcich moduloch. Modul 3 nepotrebuje žiaden ďalší stav na prípravu a tak po stlačení tlačidla STARTUP sa prepne do stavu S1.

Stav S1 signalizuje Startup režim, kedy sa zapne sušič a ťahač. Rýchlosť ťahania v tomto režime závisí iba od startup rýchlosti extrúzie, ktorá je známa z modulu 1. Až je filament prevlečený a až je ťahanie a zároveň vytlačanie ustálené a filament je ťahaný bez zásahu operátora, ako už bolo spomenuté v podkapitole 5.1, stlačením tlačidla RUN je možné automat prepnúť do stavu S2.

V stave S2 sa začne vykonávať Režim prevádzky. V tomto režime sa zapne snímanie farby filamentu ako aj snímanie priemeru filamentu. Rýchlosť ťahania tak bude ovplyvňovaná nie len rýchlosťou extrúzie, ale aj odchýlkou od požadovaného priemeru struny. Modul 3 je v tomto stave v plnej prevádzke.

Pri pretrvávajúcom prudkom poklese alebo náraste priemeru filamentu, či straty signálu zo snímača priemeru filamentu, sa automat prepne do stavu SE. V tomto stave sa vypne ťahač, sušič, snímanie priemeru a snímanie farby.

## 5.4 Dátový model komunikácie

Aby bolo možné rozlišovať dáta odoslané na zbernicu, je potrebné si vytvoriť dátový model komunikácie, ktorý hovorí o tom, ako sú dáta sprostredkované. V prípade komunikačného protokolu CAN je dôležité, prideliť jednotlivým typom správ ich adresy a teda aj prioritu. Adresa správy je jej identifikátorom, ktorý zároveň tvorí prioritu danej správy, ako už bolo spomenuté v podkapitole 4.1. Tento identifikátor pre jednotlivé typy správ bol tvorený s využitím 11-tich možných bitov podľa štandardu so základným formátom správy CAN 2.0A. Rovnako tak boli pridelené hodnoty k jednotlivým správam, aby bolo jasné, aké dáta sú odosielané či prijímané. Dáta jednej správy tvorí maximálne 8 bytov a teda 64 bitov. Zoradenie jednotlivých typov správ v nasledujúcej tabuľke zodpovedá zoradeniu od najvyššej priority po najnižšiu.

Tab. 5.1: Dátový model komunikácie

ID	Popis	Dĺžka správy [Byte]	Byte							
			7	6	5	4	3	2	1	0
<b>Núdzové dáta, chyby, chybové hlásenia</b>										
0x0	Tlačidlo TOTAL STOP	1	---	---	---	---	---	---	---	0 = OFF 1 = ON
0x1 - 0xFF	Chyby, chybové hlásenia	8	*	*	*	*	*	*	*	*
<b>Riadiace dáta - potrebné k vzájomnému riadeniu medzi modulmi</b>										
0x100	Režimy: Inicializácia, Ready režim, Startup režim, Režim prevádzky	4	---	---	---	---	Režim prevádz. 0 = OFF 1 = ON	Startup režim 0 = OFF 1 = ON	Ready režim 0 = OFF 1 = ON	Inicializ. 0 = OFF 1 = ON
0x101	Tlačidlá ON, STARTUP, RUN, STOP	4	---	---	---	---	Tlačidlo STOP 0 = OFF 1 = ON	Tlačidlo RUN 0 = OFF 1 = ON	Tlačidlo STARTUP 0 = OFF 1 = ON	Tlačidlo ON 0 = OFF 1 = ON
0x102	Modul 1 riadiace dáta	1	---	---	---	---	---	---	---	Rýchlosť extrúzie [0-150] RPM
0x103	Modul 2 riadiace dáta	1	---	---	---	---	---	---	---	Teplý kúpeľ prítok [0-100] °C
0x104	Modul 3 riadiace dáta	2	---	---	---	---	---	---	---	Rýchlosť ťahania [0-5000] mm/s
<b>Informačné a štatistické dáta - nepotrebné k vzájomnému riadeniu medzi modulmi</b>										
0x400	Teploty ohrievačov valca	8	4. ohrievač [0-500]°C		3. ohrievač [0-500]°C		2. ohrievač [0-500]°C		1. ohrievač [0-500]°C	
0x401	Teploty vodných kúpeľov	3	---	---	---	---	---	Studený [0-100] °C	Teplý - odtok [0-100] °C	Teplý - ohrievač [0-150] °C
0x402	Priemer filamentu	8	Nastavený [0 - 5.000]mm				Aktuálny [0 - 5.000]mm			
0x403	Farba filamentu nastavená	8	Zelená [0-1024]		Žltá [0-1024]		Oranžová [0-1024]		Červená [0-1024]	
0x404		4	---	---	---	---	Fialová [0-1024]		Modrá [0-1024]	
0x405	Farba filamentu aktuálna	8	Zelená [0-1024]		Žltá [0-1024]		Oranžová [0-1024]		Červená [0-1024]	
0x406		4	---	---	---	---	Fialová [0-1024]		Modrá [0-1024]	

## 6 Implementácia a testovanie softvérových modulov

Táto kapitola sa bude zaoberať implementáciou jednotlivých softvérových modulov a testovaním funkčnosti navrhnutého hardvéru, za pomoci riadiacej elektroniky. Jednotlivé hardvérové súčasti sú testované samostatne, z dôvodu spoľahlivého overenia funkčnosti bez vzájomného vplyvu.

Na navrhnutú DPS, ktorá bude umiestnená v každom z modulov výrobnéj linky bolo potrebné otestovať hardvér, na ktorého proces testovania sa bližšie pozrieme v nasledujúcich podkapitolách. Testovanie prebiehalo s využitím Arduino frameworku na báze PlatformIO vo vývojovom prostredí VS Code. Štruktúra testovacích programov je vždy zložená z dvoch hlavných funkcií: funkcie *Setup()*, ktorá sa vykoná hneď po zapnutí alebo reštartovaní riadiacej elektroniky a funkcie *Loop()*, ktorá predstavuje nekonečnú slučku a vykonáva sa donekonečna a hneď po funkcii *Setup()*.

### 6.1 A/D prevodník

Ako prvý bol implementovaný a otestovaný softvérový modul zabudovaného A/D prevodníka. Tento prevodník je využívaný pri väčšine operácií ktoré vykonáva riadiaca elektronika ak potrebuje získať dáta "z vonku", napríklad s využitím snímačov. Testovaných bolo všetkých 15 A/D prevodníkov, ktorými je modul ESP32 DevKit V1 vybavený, v spojení s navrhnutou DPS. Na vstup A/D prevodníku bol privádzaný signál z regulovateľného deliča napätia s napájacím napätím 3,3V priamo z riadiacej elektroniky. Snímané tak bolo napätie v rozsahu 0-3.3 V. Načítanie hodnôt z A/D prevodníka je znázornené na nasledujúcom výpise.

Výpis 6.1: Ukážka implementácie A/D prevodníka

```
//nastavenie šírky záznamu na 12 Bitov 1
adc1_config_width(ADC_WIDTH_BIT_12); 2
//redukcia vstupného napätia o 1/1 na kanále 3 3
adc1_config_channel_atten(ADC1_CHANNEL_3,ADC_ATTEN_DB_0); 4
//načítanie dát z kanála 3 (GPIO39) 5
int val = adc1_get_raw(ADC1_CHANNEL_3); 6
//výpis dát z kanála 3 /(GPIO39) 7
Serial.print("GPIO_39_=_"); 8
Serial.println(val); 9
```



## 6.2 Zosilňovač a kompenzátor teploty MAX6675

Každý z použitých termočlánkov je pripojený na samostatný obvod MAX6675. Komunikácia s týmito zariadeniami prebieha prostredníctvom SPI rozhrania s využitím knižníc *Thermocouple.h* a *MAX6675\_Thermocouple.h* a to nasledovne. Na počiatku sa inicializuje zbernica SPI. Následne sa vyčíta hodnota teploty zo snímača priamo v požadovaných jednotkách s využitím funkcie *readCelsius()* alebo *readKelvin()*. Testovanie prebiehalo s referenčným snímačom teploty, na základe ktorého bola potvrdená funkčnosť.

Výpis 6.2: Ukážka komunikácie s obvodom MAX6675

```
void setup() {
Serial.begin(115200);
sensor = new MAX6675_Thermocouple(SCK_PIN, CS_PIN, SO_PIN);
}

void loop() {
// Načítanie teploty
const double celsius = sensor->readCelsius();
const double kelvin = sensor->readKelvin();

// Výpis teploty
Serial.print("Temperature: ");
Serial.print(celsius);
Serial.print("C,");
Serial.print(kelvin);
Serial.print("K,");

delay(500);
}
```

## 6.3 GPIO expander MCP23S08

Voľba SPI zariadenia, s ktorým má riadiaca elektronika komunikovať je zabezpečená prostredníctvom CS signálu. Tento signál má každé zariadenie implementované samostatne a tak pre ušetrenie gpio pinov, je použitý GPIO expander s knižnicou *SPI.h* a to nasledovne.

Najprv je inicializovaná SPI zbernica, následne sa vynuluje register, ktorý udáva smer toku dát IODIR a teda je smer nastavený na výstup a následne sa celý GPIO

register nastaví na úroveň log.1, pretože voľbu SPI zariadenia (CS) budeme realizovať aktívnou úrovňou log. 0. Zápis do registrov vykonávame pomocou funkcie *SPIWrite()* a načítanie aktuálnych hodnôt z registrov vykonávame pomocou funkcie *SPIRead()*.

Počas testovania GPIO expandera bola overovaná funkčnosť s využitím nasledujúceho kódu, ako aj premeraním log. úrovni na výstupe expandera voltmetrom.

Výpis 6.3: Ukážka komunikácie s obvodom MCP23S08

```
void setup() { 1
Serial.begin(115200); 2
while (!Serial){} 3
pinMode(SS, OUTPUT); 4
digitalWrite(SS, HIGH); 5
SPI.begin(); 6
SPIWrite(IO_DIR_REG, 0x00); 7
SPIWrite(GPIO_REG, 0xff); 8
} 9
void loop() { 10
//|bit7|bit6|bit5|bit4|bit3|bit2|bit1|bit0| 11
//|GP7 |GP6 |GP5 |GP4 |GP3 |GP2 |GP1 |GP0 | 12
// 0000 0000 -> hexa číslo -> zapísať do gpio registra 13
// Príklad: ovládanie výstupu GP7 14
SPIWrite(GPIO_REG, 0x7f); //GP7 OFF, všetky ostatné GP ON 15
Serial.println(SPIRead(GPIO_REG)); //načítanie a výpis gpio reg 16
delay(500); 17
SPIWrite(GPIO_REG, 0xff); //všetky GP ON 18
Serial.println(SPIRead(GPIO_REG)); //načítanie a výpis gpio reg 19
delay(500); 20
} 21
```

## 6.4 12V PWM regulátor

Pre otestovanie funkčnosti bol na výstup regulátora pripojený voltmeter pre referenčné odčítanie napätia. Následne bol tento regulátor otestovaný na LED dióde, kde spätnou väzbou bola svietivosť, na ventilátore, kde spätnou väzbou boli otáčky a teda aj prietok vzduchu a rovnako tak na čerpadle, kde spätnou väzbou bol prietok vody. Spätná väzba bola detekovaná iba vizuálne.

Nižšie je uvedená implementácia kódu, ktorá bola použitá pri všetkých vyššie spomenutých zariadeniach.

Výpis 6.4: Ukážka implementácie 12V PWM

```

void setup(){
Serial.begin(115200);
// konfigurácia PWM
ledcSetup(PWM_channel, freq, resolution);

//pripojenie kanálu k GPIO pinu, ktorý chceme ovládať
ledcAttachPin(PWM_pin, PWM_channel);
ledcWrite(PWM_channel, dutyCycle);
delay(1000);
ledcWrite(PWM_channel, dutyCycle);
}

void loop(){
//zvyšovanie striedy
for(int dutyCycle = 0; dutyCycle <= 255; dutyCycle++){
    ledcWrite(PWM_channel, dutyCycle);
    delay(100);
}

//znižovanie striedy
for(int dutyCycle = 255; dutyCycle >= 0; dutyCycle--){
    ledcWrite(PWM_channel, dutyCycle);
    delay(100);
}
}

```

## 6.5 CAN bus transceiver SN65HVD230

Testovanie CAN bus komunikácie prebiehalo vzájomným fyzickým prepojením dvoch transceiverov podľa navrhnutého zapojenia ako už bolo znázornené na obrázku B.6. Pre zabezpečenie komunikácie s týmto obvodom, bola využitá knižnica *can.h*, v ktorej sú zahrnuté všetky potrebné náležitosti pre spojzdenie CAN bus komunikačného protokolu, ako sú konfigurácia a inštalácia, odoslanie a prijatie správy, čítanie výstražných signálov, či odinštalácia, ako aj s týmto všetkým spojené časovanie signálov, na základe priority správ a predpisu komunikačného protokolu CAN bus. Pozrime sa teda bližšie na jednotlivé náležitosti CAN bus komunikácie.

## 6.5.1 Konfigurácia a inštalácia

Výpis 6.5: Konfigurácia a inštalácia CAN bus

```
//Konfigurácia 1
can_general_config_t g_config = CAN_GENERAL_CONFIG_DEFAULT( 2
GPIO_NUM_21, GPIO_NUM_22, CAN_MODE_NORMAL); 3
can_timing_config_t t_config = CAN_TIMING_CONFIG_500KBITS(); 4
can_filter_config_t f_config = CAN_FILTER_CONFIG_ACCEPT_ALL(); 5
6
//Inštalácia 7
if(can_driver_install(&g_config,&t_config,&f_config)==ESP_OK){ 8
    printf("Driver installed\n"); 9
} else{ 10
    printf("Failed to install driver\n"); 11
    return; 12
} 13
//Štart CAN drivera 14
if(can_start() == ESP_OK){ 15
    printf("Driver started\n"); 16
} else{ 17
    printf("Failed to start driver\n"); 18
    return; 19
} 20
```

## 6.5.2 Odoslanie správy

Výpis 6.6: Ukážka odoslania správy pri CAN bus komunikácii

```
//Konfigurácia správy na odoslanie 1
can_message_t message; 2
message.identifier = 0xAA; 3
message.extd = 1; 4
message.data_length_code = 4; 5
for(int i = 0; i < 4; i++){ 6
    message.data[i] = 0; 7
} 8
//Zaradenie správy do rady 9
if(can_transmit(&message, pdMS_TO_TICKS(1000)) == ESP_OK){ 10
    printf("Message queued for transmission\n"); 11
} else{ 12
    printf("Failed to queue message for transmission\n"); 13
} 14
```

## 6.5.3 Prijatie správy

Výpis 6.7: Ukážka prijatia správy pri CAN bus komunikácii

```
//Čakanie na prijatie správy 1
can_message_t message; 2
if(can_receive(&message, pdMS_TO_TICKS(10000)) == ESP_OK){ 3
    printf("Message received\n"); 4
} else{ 5
    printf("Failed to receive message\n"); 6
    return; 7
} 8
//Prečítanie správy 9
if(message.extd){ 10
    printf("Message is in Extended Format\n"); 11
} else{ 12
    printf("Message is in Standard Format\n"); 13
} 14
printf("ID is %d\n", message.identifier); 15
if(!(message.rtr)){ 16
    for(int i = 0; i < message.data_length_code; i++){ 17
        printf("Data byte %d = %d\n", i, message.data[i]); 18
    } 19
```

## 6.6 Mooreov stavový automat

Pre názornú, krátku a zrozumiteľnú ukážku softvérovej implementácie Mooreovho stavového automatu, bol vytvorený program, v ktorom je jasne vidieť algoritmy všetkých troch blokov stavového automatu. Ako už bolo spomenuté a vysvetlené v kapitole 5, sú to Vstup, Pamäť(Register), Výstup. Rovnako tak je znázornená inicializácia a kontrola podmienok prechodu.

Každý z modulov disponuje štruktúrne rovnakým algoritmom stavového automatu. Pre túto ukážku bol zvolený Mooreov stavový automat modulu 2, z dôvodu najkratšieho algoritmu zo všetkých troch modulov.

### 6.6.1 Inicializácia a kontrola podmienok prechodu

Výpis 6.8: Inicializácia a kontrola podmienok prechodu automatu pre modul 2

```
enum State {S0,S1,S2,SE}; 1
enum Output {00,01,02,0E}; 2
State Q = S0; 3
State next_Q; 4
Output Y; 5
//Podmienky prechodu 6
bool IO,I1,ITF,IE,IOK = 0; 7
//Kontrola podmienok prechodu----- 8
if(0/*podmienky pre IO*/){ 9
IO = 1; 10
}else IO = 0; 11
//. 12
//. 13
//. 14
if(0/*podmienky pre IOK*/){ 15
IOK = 1; 16
}else IOK = 0; 17
```

## 6.6.2 Implementácia algoritmu

Výpis 6.9: Implementácia algoritmu Mooreovho stavového automatu pre modul 2

```
//Vstup-----
next_Q = Q;
switch (Q){
case S0:
    if(I0) next_Q = S1;
    if(IE) next_Q = SE;
    break;
case S1:
    if(I1) next_Q = S2;
    if(IE) next_Q = SE;
    break;
case S2:
    if(IE || ITF) next_Q = SE;
    break;
case SE:
    if(IOK) next_Q = S0;
    break;
default:
    next_Q = Q;
    break;}
//Pamät(Register)-----
Q = next_Q;
//Výstup-----
switch (Q){
case S0:
    Y = 00;
    break;
case S1:
    Y = 01;
    break;
case S2:
    Y = 02;
    break;
case SE:
    Y = 0E;
    break;
default:
    break;}
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
```

## 6.7 Regulátory

Všetky regulátory, ktoré sú využívané v regulačných slučkách 1-3 popísaných v podkapitole 4.3, boli implementované s využitím PID regulátora, ktorého parametre sa líšia v závislosti od danej regulačnej slučky. Zdrojové kódy jednotlivých regulátorov sú okomentované tak, aby bol postup implementácie jasný a zrozumiteľný. Samotná implementácia regulátorov bola však kvôli svojej rozsiahlosti umiestnená na priložené médium.



## Záver

Cielom tejto práce bolo navrhnuť a vyrobiť zariadenia výrobnéj linky na spracovanie plastového granulátu, ktoré sa využívajú pri výrobe 3D tlačovej struny. Rovnako tak navrhnuť, implementovať a otestovať vhodný riadiaci systém, schopný takúto výrobu riadiť. Práca popisuje technológiu výroby 3D tlačovej struny literárnou rešeršou, definuje požiadavky na hardvér a softvér zariadení výrobnéj linky, medzi ktoré patrí extrúzný stroj a jeho príslušenstvo a vykresľuje návrh vhodného riadiaceho systému. Pri návrhu bol kladený dôraz na robustnosť, priemyselnosť, jedinečný dizajn, schopnosť spracovania väčšieho množstva plastu ako aj na celkovú cenu s ohľadom na kvalitu zariadení a v konečnom dôsledku na kvalitu tlačovej struny.

Z dôvodu časovej náročnosti celej práce bol vynechaný návrh modulov 4 a 5, ktoré mali pozostávať z akumulátora, navijaka a slidera. Moduly 1, 2 a 3 sa podarilo úspešne navrhnuť bez časového sklzu a ich návrh je popísaný v kapitole 2.

Na základe definovaných požiadaviek na riadiacu elektroniku a na hardvér výrobnéj linky, boli vypočítané maximálne možné spotreby energie jednotlivých modulov, využívajúcich daný hardvér, následne zvolený napájací zdroj a nakoniec navrhnutá riadiaca DPS. Vid. kapitola 3.

Požiadavky na softvér obsahovali voľbu komunikácie medzi modulmi a jej popis, všetky regulačné slučky ako aj voľbu vývojového prostredia. Vid. kapitola 4

Návrh riadiaceho systému sprevádzala tvorba stavových automatov a vytvorenie dátového modelu komunikácie, vid. kapitola 5. Systém bol navrhnutý tak, aby bol prehľadný, jednoduchý a aby ho bolo možné v prípade potreby editovať a rozširovať.

Ďalšou časťou práce bola kapitola 6, ktorej predmetom bolo implementovanie a testovanie jednotlivých softvérových modulov. To prebiehalo bez značných komplikácií. A/D prevodník, zosilňovač a kompenzátor teploty MAX6675, GPIO expander MCP23S08 a 0-12V výstup riadený 0-3.3V PWM reguláciou, fungovali podľa očakávaní a bez problémov. Problém nastal jedine pri CAN bus transceiveroch SN65HVD230, kedy nebolo možné spojzdať komunikáciu. Namiesto nich boli použité transceivery TJA1050, s ktorými komunikácia následne prebiehala v poriadku.

Zadanie práce bolo potrebné mierne pozmeniť, z dôvodu pandémie koronavírusu, v dôsledku ktorej nebolo možné dokončiť praktickú realizáciu v plnom rozsahu a preto v tejto práci nie je uvedená. Rovnako tak implementácia a testovanie riadiaceho systému ako aj súvisiacich regulačných slučiek nemohli byť realizované s reálnymi zariadeniami výrobnéj linky.

Kvalitu návrhu výrobnéj linky ukáže až prax a určite je potrebné rátať s určitými úpravami, avšak už teraz sú jasné niektoré idey do budúcnosti:

- Dokončiť návrh a vyhotoviť moduly 4 a 5, zakomponovať ich do výrobnéj linky, riadiaceho systému a spustiť automatizovanú výrobu.
- Vytvoriť vylepšenú verziu riadiacej DPS.
- Realizovať farbenie filamentu navrhnutím dávkovača masterbatchov a implementáciou regulačnej slučky farbenia filamentu.

# Literatúra

- [1] Wikipedia, *Termoplast* [online]. poslední aktualizace 30. 1. 2019 [cit. 6. 1. 2020]. Dostupné z URL: <<https://sk.wikipedia.org/wiki/Termoplast>>.
- [2] ALL3DP, *CONTENTS* [online]. [cit. 6. 1. 2020]. Dostupné z URL: <<https://all3dp.com/1/3d-printing-materials-guide-3d-printer-material>>.
- [3] Dyzedesign, *3D printing filament size: 1.75mm vs 3.00mm* [online]. poslední aktualizace 4. 2. 2018 [cit. 6. 1. 2020]. Dostupné z URL: <<https://dyzedesign.com/2018/02/3d-printing-filament-size-1-75mm-vs-3-00mm>>.
- [4] FFF 3D tlač. ScienceDirect [online]. [cit. 2020-01-06]. Dostupné z URL: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221486041730458X>>.
- [5] Krebs S.:Technologie zpracování plastů a kompozitů Přednáška č. 3 – Extruze plastů [online]. [cit. 2020-01-06]. Dostupné z URL: <<http://u12133.fs.cvut.cz/assets/subject/files/116/Pedmt-2331507-c-3-2016-03-08.pdf>>.
- [6] Wikipedia, *Extruze (technika)* [online]. poslední aktualizace 8. 8. 2019 [cit. 6. 1. 2020]. Dostupné z URL: <[https://cs.wikipedia.org/wiki/Extruze\\_\(technika\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Extruze_(technika))>.
- [7] Extruzny stroj. In: ResearchGate [online]. [cit. 2020-01-06]. Dostupné z URL: <[tiny.cc/splhqz](https://tiny.cc/splhqz)>.
- [8] 3D Printing Nerd:Prusa Factory Tour! Print Farm / Prusament / SL1 / MK3S / Prusa Lab! [online video] [cit. 05.01.2020] Dostupné z URL: <<https://www.youtube.com/watch?v=BjoQw5fGk6Q&t=488s>>.
- [9] Reiloy USA:BARREL & SCREW HANDBOOK tenth edition 2015 [online] [cit. 05.01.2020] Dostupné z URL: <<http://fordhamplastics.com/wp-content/uploads/2016/08/HANDBOOK-REILOY-USA-BARREL-SCREW.pdf>>.
- [10] Wikipedia, *Plastics extrusion* [online]. poslední aktualizace 26. 4. 2019 [cit. 6. 1. 2020]. Dostupné z URL: <[https://en.wikipedia.org/wiki/Plastics\\_extrusion](https://en.wikipedia.org/wiki/Plastics_extrusion)>.

- [11] Dave Hakkens, *(Almost) Definitive guide on Motors (WIP)* [online]. poslední aktualizace 13. 5. 2016 [cit. 6. 1. 2020]. Dostupné z URL: <<https://davehakkens.nl/community/forums/topic/almost-definitive-guide-on-motors-wip/>>.
- [12] ROUBÍČEK, Ota. Elektrické motory a pohony: příručka techniky, volby a užití vybraných druhů. Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-730-0092-X.
- [13] ATP Journal, *Zmysluplný striedavý pohon v extrúzii plastov* [online]. poslední aktualizace 12. 12. 2019 [cit. 6. 1. 2020]. Dostupné z URL: <[https://www.atpjournalsk/rubriky/exkluzivne-clanky/zmysluplny-striedavy-pohon-v-extruzii-plastov.html?page\\_id=29844](https://www.atpjournalsk/rubriky/exkluzivne-clanky/zmysluplny-striedavy-pohon-v-extruzii-plastov.html?page_id=29844)>.
- [14] Pásový ohrievač [online]. In: . [cit. 2020-01-06]. Dostupné z URL: <<https://www.vsec.top/product/mica-band-heater-with-thermocouple/>>.
- [15] CHUDÝ, Vladimír. Meranie technických veličín. V Bratislave: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 1999. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 80-227-1275-2.
- [16] KREIDL, Marcel. Měření teploty: senzory a měřící obvody. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličín. ISBN 80-730-0145-4.
- [17] OMEGA, *Temperature probes* [online]. [cit. 6. 1. 2020]. Dostupné z URL: <<https://www.omega.co.uk/temperature/z/thermocouple-rtd.html>>.
- [18] CONAIR:Optimizing Precious and Productivity in Extrusion of 3D Printing Filament [online] [cit. 6. 1. 2020]. Dostupné z URL: <<https://www.conairgroup.com/wp-content/uploads/2018/02/Conair-3D-Printing-Whitepaper-Aug2015.pdf>>.
- [19] Wikipedia, *Masterbatch* [online]. poslední aktualizace 2. 1. 2020 [cit. 6. 1. 2020]. Dostupné z URL: <<https://en.wikipedia.org/wiki/Masterbatch>>.
- [20] Akumulátor. In: LabTechengineering [online]. [cit. 2020-01-06]. Dostupné z URL: <<https://www.labtechengineering.com/product/3d-printer-filament-lines-2/>>.
- [21] rwg42985:Making Stuff:Filament Extruder Project [online video] [cit. 05.01.2020] Dostupné z URL: <<https://www.youtube.com/watch?v=jFxUgaUOX6M&list=PL41ExYUFHSPxhQJA10KtS9-WjsKxAYJUo>>

- [22] Werbewunder:youtubekanal [online video] [cit. 05.01.2020] Dostupné z URL: <<https://www.youtube.com/channel/UCxkd2FJ1tPA2vwofdKxn-cw/featured>>
- [23] davehakkens:Precious Plastic - Build the extrusion [online video] [cit. 05.01.2020] Dostupné z URL: <[https://www.youtube.com/watch?v=p4NoY33-Tfo&feature=emb\\_title](https://www.youtube.com/watch?v=p4NoY33-Tfo&feature=emb_title)>
- [24] Adafruit:7262 modul [online]. [cit. 2020-01-05]. Dostupné z URL: <<https://www.adafruit.com/product/3779>>
- [25] Changzhou Longs Motor , *HYBRID STEPPER MOTOR-NEMA42* [online]. [cit. 05.01.2020] Dostupné z URL: <<https://www.longs-motor.com/hybrid-stepper-motor-nema42.html>>.
- [26] GrabCAD Community, Marcus  
*Nema 42 stepper motor* [online] [cit. 06.01.2020]  
Dostupné z URL: <<https://grabcad.com/library/nema-42-stepper-motor-21nm-torque-jk-110hs150-6504-1>>.
- [27] Kmitex, Návod k použití Úchylkoměr číselníkový digitální [online] [cit. 05.01.2020] Dostupné z URL: <[https://www.primadilna.cz/fotky49990/fotov/\\_ps\\_2999Kmitex-uchylkomer-1155-6-digitalni---tisicinovy.pdf](https://www.primadilna.cz/fotky49990/fotov/_ps_2999Kmitex-uchylkomer-1155-6-digitalni---tisicinovy.pdf)>.
- [28] joy-it, NEMA17-04 Bipolar Stepper Motor [online] [cit. 06.01.2020] Dostupné z URL: <<https://joy-it.net/files/files/Produkte/NEMA17-04/Datasheet%20NEMA17-04.pdf>>.
- [29] GrabCAD Community, Sisul Galog  
*Nema 17 Stepper Motor 17HS4401* [online] [cit. 06.01.2020] Dostupné z URL: <<https://grabcad.com/library/nema-17-stepper-motor-17hs4401-2>>.
- [30] Sorotec, TB6600 Stepper Motor Driver [online] [cit. 06.01.2020] Dostupné z URL: <[https://www.mcielectronics.cl/website\\_MCI/static/documents/TB6600\\_data\\_sheet.pdf](https://www.mcielectronics.cl/website_MCI/static/documents/TB6600_data_sheet.pdf)>.
- [31] Maxim Integrated, MAX6675 Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-to-Digital Converter (0°C to +1024°C) [online]. ©2014 [cit. 06.01.2020]. Dostupné z URL: <<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX6675.pdf>>.

- [32] Microchip Technology, MCP23008/MCP23S08 8-Bit I/O Expander with Serial Interface [online]. ©2007 [cit. 06.01.2020]. Dostupné z URL: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/MCP23008-MCP23S08-Data-Sheet-20001919F.pdf>>.
- [33] Texas Instruments, SN65HVD23x 3.3-V CAN Bus Transceivers [online]. ©2019 [cit. 06.01.2020]. Dostupné z URL: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn65hvd230.pdf>>.
- [34] GrabCAD Community, Nazzareno Pasqual *C16 AC power connector* [online] [cit. 06.01.2020] Dostupné z URL: <<https://grabcad.com/library/c16-ac-power-connector-1>>.
- [35] GrabCAD Community, Ioannis Skarlatakis *IEC International Electrotechnical Commission 6320* [online] [cit. 06.01.2020] Dostupné z URL: <<https://grabcad.com/library/iec-international-electrotechnical-commission-6320>>.
- [36] ESP32, *ESP32* [online]. [cit. 6. 1. 2020]. Dostupné z URL: <<http://esp32.net>>.
- [37] ESP32 modul [online]. [cit. 2020-01-06]. Dostupné z URL: <<https://www.electronics-lab.com/project/esp32-webserver-tutorial/>>.
- [38] ams, AS7262 6-Channel Visible Spectral\_ID Device with Electronic Shutter and Smart Interface [online]. ©2017 [cit. 06.01.2020]. Dostupné z URL: <[https://cdn-learn.adafruit.com/assets/assets/000/052/623/original/AS7262\\_DS000486\\_2-00\\_%281%29.pdf?1522179774](https://cdn-learn.adafruit.com/assets/assets/000/052/623/original/AS7262_DS000486_2-00_%281%29.pdf?1522179774)>.
- [39] Espressif, ESP32-WROOM-32 [online]. ©2019 [cit. 06.01.2020]. Dostupné z URL: <[https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf)>.
- [40] GrabCAD Community, carlos lopez *conector RJ45* [online] [cit. 06.01.2020] Dostupné z URL: <<https://grabcad.com/library/conector-rj45-1>>.
- [41] GrabCAD Community, Jonathan Oxer *1-port RJ45 socket* [online] [cit. 06.01.2020] Dostupné z URL: <<https://grabcad.com/library/1-port-rj45-socket-1>>.

- [42] Průmyslové komunikační sítě: ÚAMT FEI VUT v Brně, skriptá [cit. 2020-01-05]
- [43] Wikipedia, *CAN bus* [online]. poslední aktualizace 24. 11. 2019 [cit. 6. 1. 2020].  
Dostupné z URL:  
<[https://cs.wikipedia.org/wiki/CAN\\_bus](https://cs.wikipedia.org/wiki/CAN_bus)>.
- [44] PlatformIO, *Get Started* [online]. [cit. 6. 1. 2020]. Dostupné z URL:  
<<https://platformio.org>>.

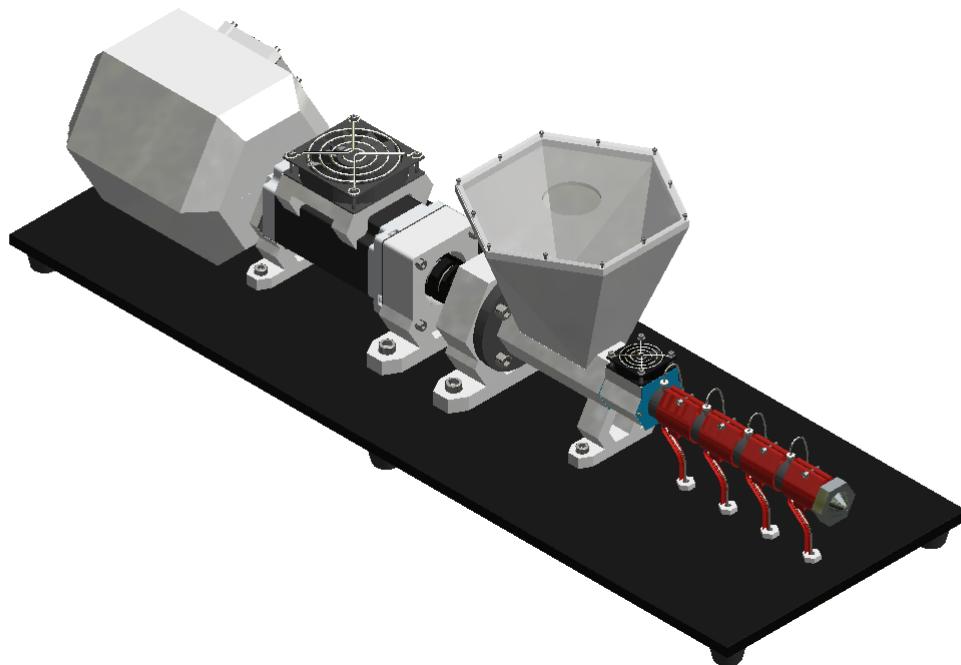
# Zoznam príloh

<b>A</b>	<b>Obrázky 3D modelov</b>	<b>64</b>
A.1	Modul 1 . . . . .	64
A.2	Modul 2 . . . . .	65
A.3	Modul 3 . . . . .	65
<b>B</b>	<b>DPS</b>	<b>66</b>
B.1	Schémy zapojenia . . . . .	66
B.1.1	Rozvrhnutie pinov ESP32 . . . . .	66
B.1.2	Výkonový stupeň PWM . . . . .	66
B.1.3	Obvod MAX6675 . . . . .	67
B.1.4	Obvod MCP23S08 . . . . .	67
B.1.5	Prevodník I <sup>2</sup> C/CAN . . . . .	67
B.1.6	CAN bus RJ45 . . . . .	68
B.1.7	Prepínač zdrojov, stabilizácia, ochrana voči prepólovaniu a prepäťová ochrana . . . . .	68
B.2	Návrh DPS . . . . .	69
B.2.1	Vizualizácia hornej strany DPS . . . . .	69
B.2.2	Vizualizácia spodnej strany DPS . . . . .	69
<b>C</b>	<b>Obsah priloženého média</b>	<b>70</b>



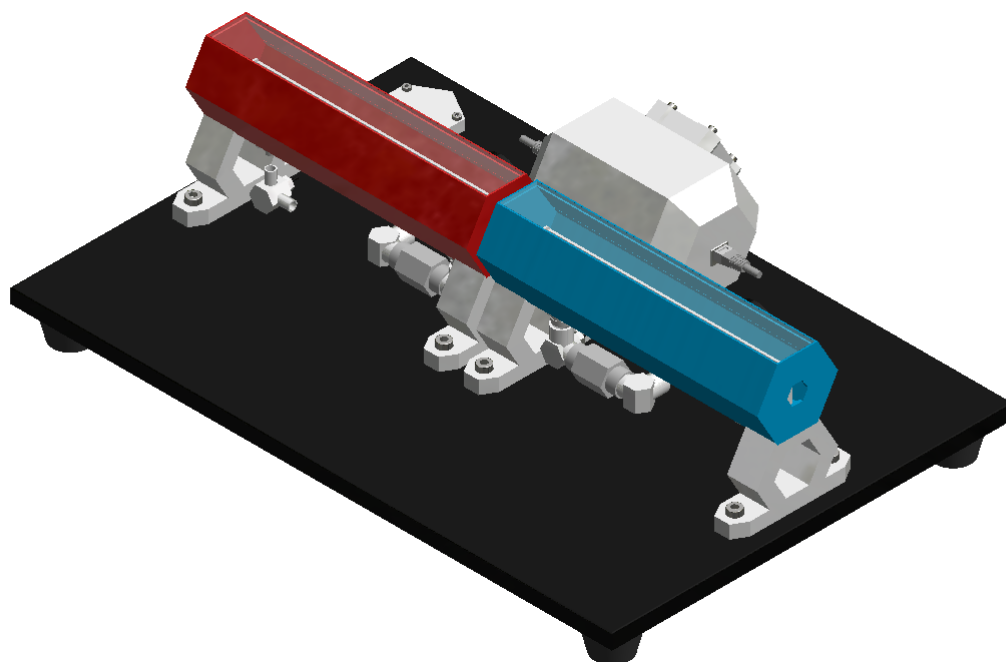
# A Obrázky 3D modelov

## A.1 Modul 1



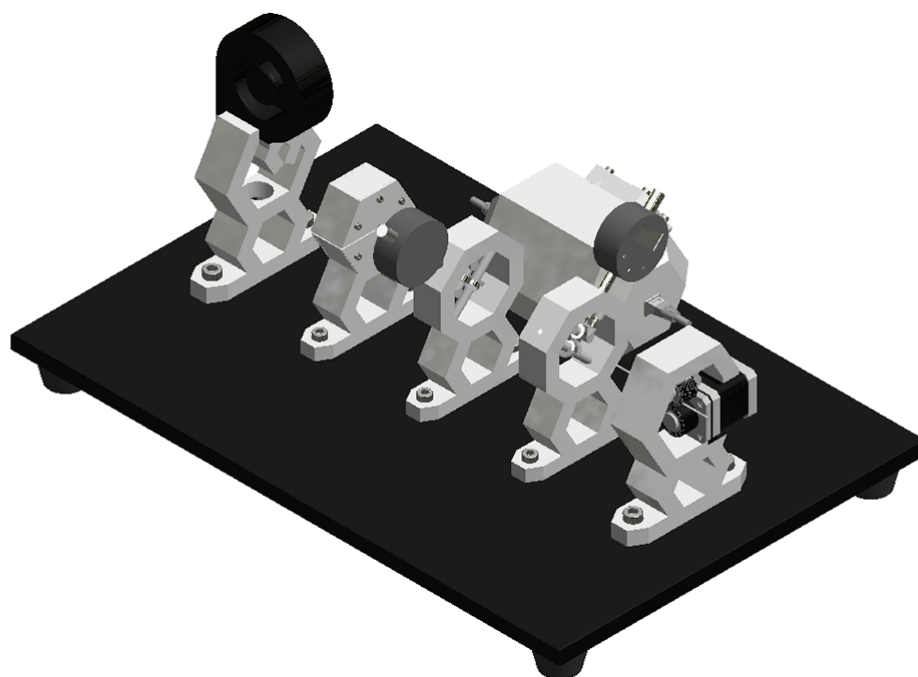
Obr. A.1: 3D model modulu 1 navrhnutý v programe Autodesk Inventor

## A.2 Modul 2



Obr. A.2: 3D model modulu 2 navrhnutý v programe Autodesk Inventor

## A.3 Modul 3

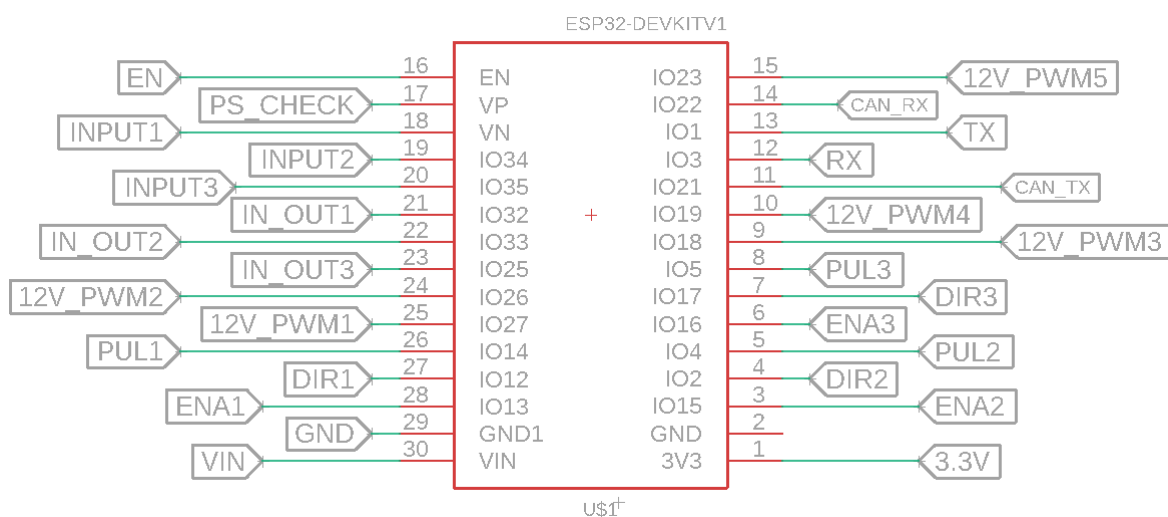


Obr. A.3: 3D model modulu 3 navrhnutý v programe Autodesk Inventor

## B DPS

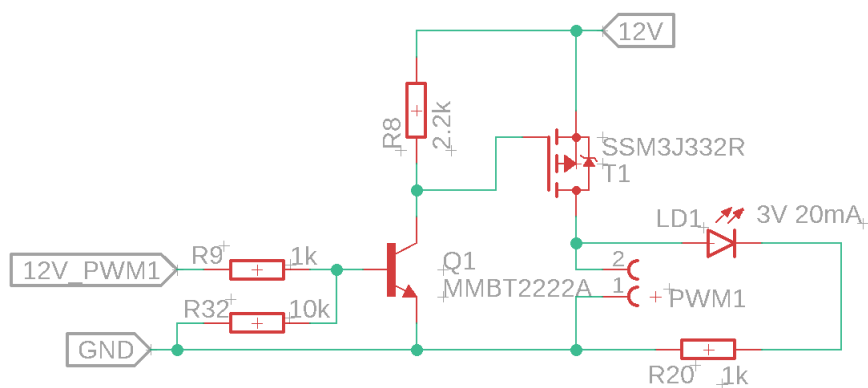
### B.1 Schémy zapojenia

#### B.1.1 Rozvrhnutie pinov ESP32



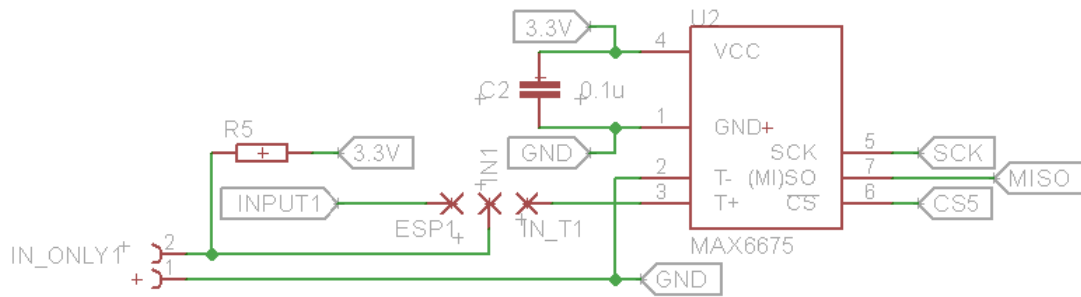
Obr. B.1: Schéma zapojenia modulu ESP32 DevKit V1 navrhnutá v programe Eagle

#### B.1.2 Výkonový stupeň PWM



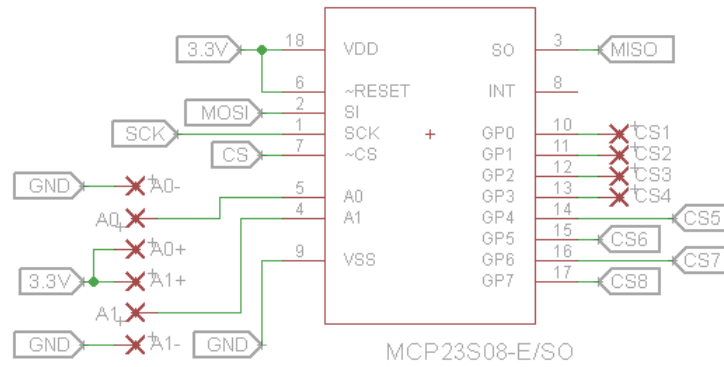
Obr. B.2: Schéma zapojenia výkonového stupňa PWM navrhnutá v programe Eagle

### B.1.3 Obvod MAX6675



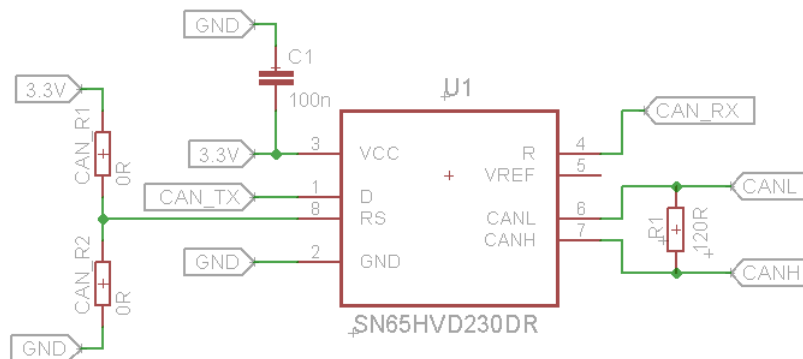
Obr. B.3: Schéma zapojenia obvodu MAX6675 navrhnutá v programe Eagle

### B.1.4 Obvod MCP23S08



Obr. B.4: Schéma zapojenia obvodu MCP23S08 navrhnutá v programe Eagle

### B.1.5 Prevodník I<sup>2</sup>C/CAN



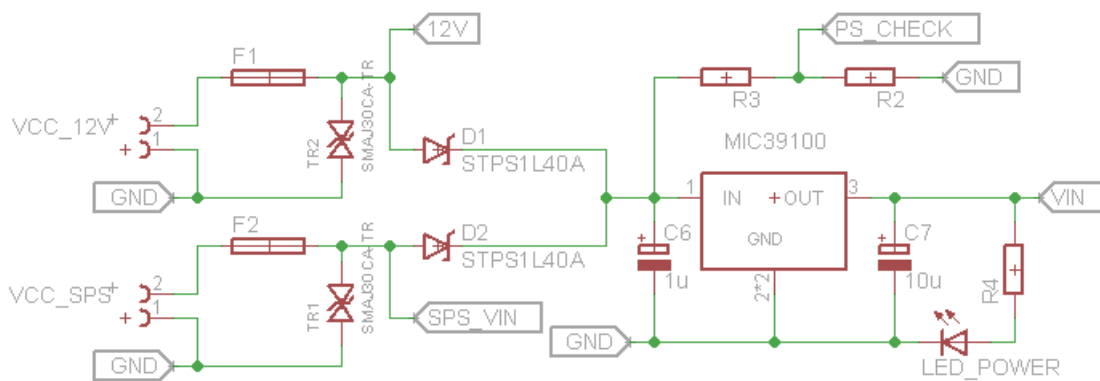
Obr. B.5: Schéma zapojenia obvodu SN65HVD230 navrhnutá v programe Eagle

## B.1.6 CAN bus RJ45



Obr. B.6: Zapojenie RJ45 pre CAN bus navrhnuté v programe Eagle

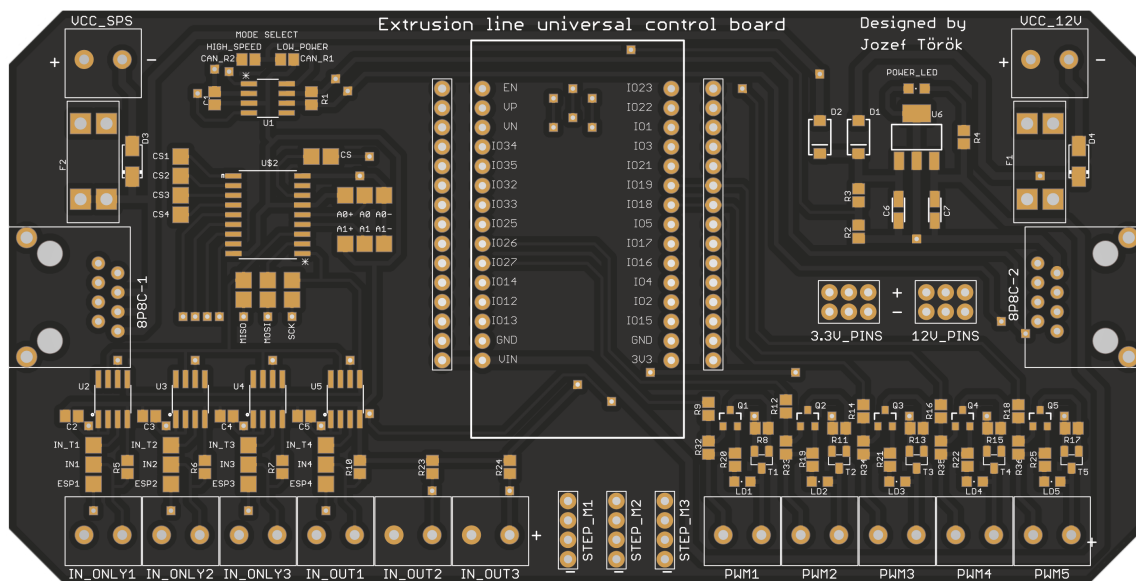
## B.1.7 Prepínač zdrojov, stabilizácia, ochrana voči prepólovaniu a prepäťová ochrana



Obr. B.7: Prepínanie zdrojov, stabilizácia a ochrany navrhnuté v programe Eagle

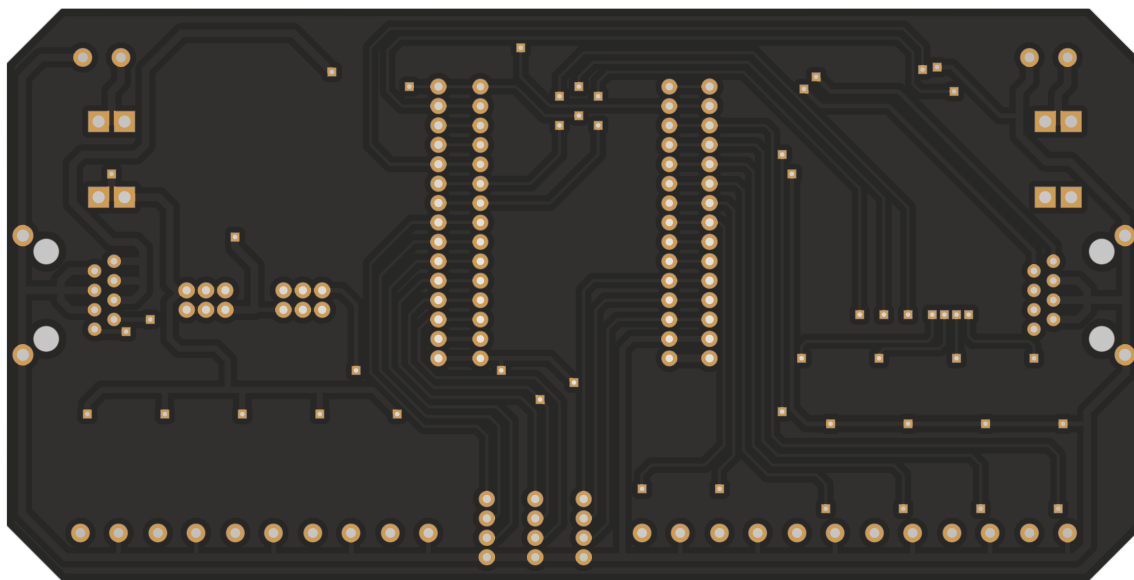
## B.2 Návrh DPS

### B.2.1 Vizualizácia hornej strany DPS



Obr. B.8: Vizualizácia hornej strany navrhnutej DPS

### B.2.2 Vizualizácia spodnej strany DPS



Obr. B.9: Vizualizácia spodnej strany navrhnutej DPS

## C Obsah priloženého média

Na priloženom médiu sa nachádza samotná bakalárska práca vo formáte .pdf. Rovnako tak návrh riadiacej DPS, navrhnutý v programe Eagle vo verzii 9.6.0, obsahujúci schému zapojenia a samotnú dosku plošného spoja. Ďalej médium obsahuje rendery 3D modelov samotných modulov. V poslednom priečinku nájdeme zdrojové kódy z jednotlivých implementácií vo formáte .txt, ako aj celistvý súbor so všetkými kódmi vo formáte .zip, ktorý je možné importovať do prostredia VS Code s rozšírením PlatformIO, v ktorom boli aj písané a testované. Konkrétne vo verziách 1.45.1 pre VS Code a 1.10.0 pre PlatformIO. Nakoniec je priložený súbor README.txt, v ktorom je taktiež opísaný obsah priloženého média.

```
/ ..... koreňový adresár priloženého média
├── Bakalárska práca
│   └── Bakalárska práca - Jozef Török.pdf
├── Riadiaca DPS
│   ├── Extrusion line universal control board.brd
│   └── Extrusion line universal control board.sch
├── 3D modely
│   └── 3D modely.zip
├── Zdrojové kódy
│   ├── _Implementácia vo VS Code + PlatformIO.zip
│   ├── 12V_PWM.txt
│   ├── ad_prevodnik.txt
│   ├── CAN_bus.txt
│   ├── GPIO_expander_MCP23S08.txt
│   ├── MAX6675_termoclanky.txt
│   ├── moore1.txt
│   ├── moore2.txt
│   ├── moore3.txt
│   ├── regulator1.txt
│   ├── regulator2.txt
│   └── regulator3.txt
└── README.txt ..... súbor s popisom obsahu priloženého média
```