



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

AUTOMATIZACE PROCESU ZAHOŘOVÁNÍ DIGITRONŮ

AUTOMATION OF THE DIGITRON TESTING PROCESS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Radim Říha

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Peter Honec, Ph.D.

BRNO 2024

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Bc. Radim Říha

ID: 221013

Ročník: 2

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Automatizace procesu zahořování digitronů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Zahoření digitronu je poslední fázi jeho výrobního procesu. Automatizujte tento krok.

1. Seznamte se se zahořovacím strojem a zhodnoťte současný stav.
2. Proved'te průzkum trhu existujících řešení a navrhnete řešení umožňující automatizaci celého procesu zahořování včetně čtení sériových čísel.
3. Vyberte vhodný hardware pro manipulaci s digitrony, uskladnění, řízení procesu, optickou inspekci atd.
4. Sestavte, oživte, a otestujte systém.
5. Implementujte kontrolu výstupní kvality s možností vyřazení vadných kusů.
6. Zhodnoťte dosažené výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

HLAVAC V., SONKA M., BOYLE R.: Image Processing, Analysis, and Machine Vision, ISBN 978-0495082521

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 15.5.2024

Vedoucí práce: Ing. Peter Honec, Ph.D.

doc. Ing. Petr Fiedler, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá automatizací procesu zahořování digitronů. Vznikla za účelem řešení problémů současného zahořovacího stroje ve firmě Dalibor Farný, která vyrábí digitrony a digitronové hodiny.

Práce nejdříve seznamuje čtenáře s digitrony, jejich konstrukcí a principy. Následuje zhodnocení současného stavu zahořovacího stroje a návrh automatizovaného řešení. Poté bude proveden návrh nového stroje, konstrukce a vývoj software. Závěrem budou zhodnoceny dosažené výsledky.

Klíčová slova

Automatizace stroje, digitron, znaková výbojka, zahořování, automatická optická inspekce, OCR

Abstract

This master's thesis is focused on automation of the nixie tube burn-in process. It was created to solve the problems of the current burn-in machine used in the company Dalibor Farny, which manufactures nixie tubes and nixie tube clocks.

The thesis first introduces the reader to nixie tubes, their construction, and principles. This is followed by an evaluation of the current state of the burn-in machine and a proposal for an automated solution. Then the new machine design, construction and software development will be carried out. Finally, the achieved results will be evaluated.

Keywords

Machine automation, nixie tube, gas discharge indicator tube, burn-in, automated optical inspection, OCR

Bibliografická citace

ŘÍHA, Radim. Automatizace procesu zahořování digitronů [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/160135>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Peter Honec.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	Radim Říha
VUT ID studenta:	221013
Typ práce:	Diplomová práce
Akademický rok:	2023/24
Téma závěrečné práce:	Automatizace procesu zahořování digitronů

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

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

V Brně dne: 14. května 2024

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	8
SEZNAM TABULEK.....	10
ÚVOD	11
1. DIGITRON	12
1.1 DOUTNAVÝ VÝBOJ.....	13
1.2 KONSTRUKCE DIGITRONŮ	16
1.3 ROZPRAŠOVÁNÍ ELEKTROD	18
1.4 ZAHOŘOVÁNÍ DIGITRONŮ	18
2. ZPRACOVÁNÍ OBRAZU	20
2.1 PŘEDZPRACOVÁNÍ	20
2.2 SEGMENTACE	22
2.3 OCR	23
2.3.1 <i>Extrakce a normalizace znaků</i>	23
2.3.2 <i>Rozpoznávání</i>	24
3. SOUČASNÝ STAV ZAHOŘOVACÍHO STROJE.....	25
3.1 FUNKCIONALITA.....	25
3.2 NÁROČNOST OBSLUHY A ÚDRŽBY	26
3.3 NAVRŽENÉ MODIFIKACE.....	26
4. AUTOMATIZACE PROCESU ZAHOŘOVÁNÍ.....	27
5. NÁVRH A KONSTRUKCE STROJE.....	28
5.1 MECHANICKÁ KONSTRUKCE.....	28
5.2 MANIPULÁTOR	31
5.3 SYSTÉM PŘIPOJENÍ DIGITRONŮ	32
5.3.1 <i>Návrh DPS adaptéru a patice</i>	33
5.3.2 <i>Výroba připojovacího systému</i>	34
5.4 AUTOMATICKÁ OPTICKÁ INSPEKCE	35
5.4.1 <i>Osvětlení</i>	36
5.4.2 <i>Návrh DPS optické inspekce</i>	37
5.4.3 <i>Výroba DPS optické inspekce</i>	40
5.5 UVOLŇOVÁNÍ RTUTI	41
5.6 UŽIVATELSKÉ ROZHRANÍ.....	42
5.6.1 <i>Návrh DPS uživatelského panelu</i>	43
5.6.2 <i>Výroba uživatelského panelu</i>	44
5.7 ŘÍDICÍ SYSTÉM.....	45
5.7.1 <i>Návrh DPS komunikace</i>	47
5.7.2 <i>Výroba DPS komunikace</i>	48
5.7.3 <i>Návrh rozvaděče</i>	48
5.7.4 <i>Výroba rozvaděče</i>	49
6. VÝVOJ SOFTWARE	50

6.1	ROBOTICKÉ RAMENO	50
6.1.1	<i>Komunikace</i>	50
6.1.2	<i>Výpočet pozic digitronů dle referenčních bodů</i>	51
6.1.3	<i>Kalibrace referenčních bodů</i>	53
6.2	AUTOMATICKÁ OPTICKÁ INSPEKCE	54
6.2.1	<i>Rozpoznávání sériových čísel</i>	54
6.2.2	<i>Komunikace</i>	58
6.3	ŘÍDICÍ SYSTÉM.....	59
6.3.1	<i>Běh programu a hlavní smyčka</i>	59
6.3.2	<i>Komunikace s ramenem</i>	61
6.3.3	<i>Komunikace s počítačem optické inspekce</i>	62
6.3.4	<i>Komunikace se zahořovacími sloupci</i>	62
6.3.5	<i>Uživatelské rozhraní</i>	62
7.	ZHODNOCENÍ	64
7.1	DOBA NÁVRATNOSTI	64
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	68
	SEZNAM PŘÍLOH	69

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Digitron F9020AA výrobce Thomson-CSF z roku 1962 [1].....	12
1.2	Dílo „Umashimenkana“ s digitrony typu H v muzeu současného umění Hiroshima MOCA [4]	12
1.3	Voltampérová charakteristika doutnavého výboje [2].....	14
1.4	Struktura doutnavého výboje [5]	14
1.5	Fialový výboj digitronu plněného argonem [4]	15
1.6	Konstrukce numerického a segmentového alfanumerického digitronu [2][3]	16
1.7	Popis utěsněného digitronu	17
1.8	Digitrony se silnou otravou katod [6].....	18
1.9	Digitrony před a po zahoření	19
2.1	Řetězec zpracování obrazu [12]	20
2.2	Konvoluce obrazu [11].....	21
2.3	Transformace jasové stupnice [12][16]	21
2.4	Porovnání operátorů detekce hran [14]	23
2.5	Porovnání metod normalizace znaku [18].....	24
3.1	Současný zahořovací stroj	25
5.1	Nový zahořovací stroj	28
5.2	Model stroje	29
5.3	Model skladovací bedny	30
5.4	Výroba mechanických dílů a sestavení konstrukce	30
5.5	Rameno UFactory xArm s vakuovým uchopovačem [7]	31
5.6	Model systému připojení digitronů	32
5.7	Pneumatické schéma zahořovacího sloupce	33
5.8	DPS adaptéru digitronu typu R	33
5.9	DPS patice zahořovací pozice	34
5.10	Mechanismus zahořovacího sloupce	35
5.11	Model pozice optické inspekce	36
5.12	LED osvětlení.....	36
5.13	Schéma posuvných registrů a spínání katod.....	37
5.14	Schéma nastavení proudu anody	38
5.15	Schéma SPI sběrnice zařízení.....	39
5.16	DPS optické inspekce.....	40
5.17	Fotografie DPS optické inspekce	40
5.18	Indukční ohřev dávkovače rtuti	41
5.19	Indukční ohříváč s chladičem.....	41
5.20	Ovládací prvky čelního panelu.....	42
5.21	Model uživatelského panelu	42
5.22	Schéma zpracování signálu enkodéru na uživatelském panelu	43
5.23	DPS uživatelského panelu.....	44
5.24	Fotografie uživatelského panelu.....	44
5.25	PLC Controllino MAXI [8].....	46
5.26	Diagram propojení zařízení s PLC	46
5.27	Schéma části DPS komunikace	47
5.28	DPS komunikace.....	48
5.29	Fotografie DPS komunikace	48
5.30	Model rozvaděče	49
5.31	Fotografie rozvaděče	49

6.1	Časování sběrnice řídicího modulu ramene.....	50
6.2	Časování resetu sběrnice	51
6.3	Pozicování bedny v prostoru ramene	52
6.4	Sériové číslo na digitronu.....	54
6.5	Řetězec zpracování snímku	55
6.6	Předzpracování snímku	55
6.7	Segmentace snímku.....	56
6.8	Normalizace segmentu	57
6.9	Struktura neuronové sítě.....	57
6.10	Výpis programu při klasifikaci sériového čísla	58
6.11	Hlavní stavový automat stroje.....	59
6.12	Diagram procesu zahořování.....	60
6.13	Stavový automat sběrnice ramene	61
6.14	Stavový automat sběrnice optické inspekce	62
6.15	Systém menu uživatelského rozhraní	63

SEZNAM TABULEK

5.1	Možnosti nastavení proudu digitronem	38
5.2	Zařízení a rozhraní	45
6.1	Příkazy ramene	51
6.2	Normalizační funkce poměru stran	56
6.3	Příkazy AOI	58
7.1	Návratnost stroje	65

ÚVOD

Digitrony, vyráběné především v 60. letech, jsou již překonanou zobrazovací technologií. V posledních letech o ně ovšem projevuje mnoho lidí opět zájem díky jejich unikátnímu vzhledu. Uvedení této zapomenuté technologie na trh vyžaduje velké množství výzkumu v oblasti vakuové techniky a vývoj výrobních strojů, které již nejsou k dispozici.

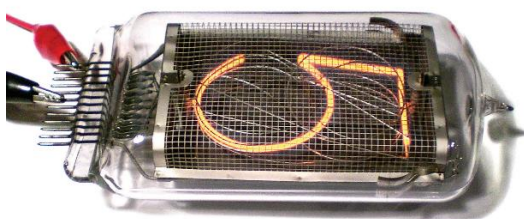
Cílem této práce je automatizovat stroj pro zahořování digitronů. Stroj se nachází ve firmě Dalibor Farný, která je jedním z mála výrobců nových digitronů. Hlavním produktem firmy jsou digitronové hodiny, ale má za sebou také mnoho úspěšných projektů, jako je např. digitronový kalibrační displej pro agenturu NASA nebo umělecké dílo „Umashimenkana“. V současné době vyrábí 50 digitronů týdně a klade si za cíl zvýšit objem výroby, dosáhnout nižších cen a zaujmout více zákazníků. Automatický zahořovací stroj by měl zcela nahradit práci člověka v poslední výrobní fázi, zrychlit ji a zamezit prodeji vadných kusů.

V první kapitole práce popisuje technologii digitronů, zabývá se teorií doutnavého výboje a zahořováním. Druhá kapitola seznamuje čtenáře s použitými metodami zpracování obrazu. Kapitola třetí zhodnotí současný stav stroje a navrhne modifikace nutné pro automatizaci. Čtvrtá kapitola blíže pojednává o krocích zahořovacího procesu, kapacitě výroby a potřebné kapacitě stroje. Kapitola pátá popisuje návrh všech mechanických a elektrických součástí nového stroje a v šesté kapitole proběhne návrh software všech programovatelných částí. Závěrem bude zhodnocen současný stav nového stroje a dosažené výsledky.

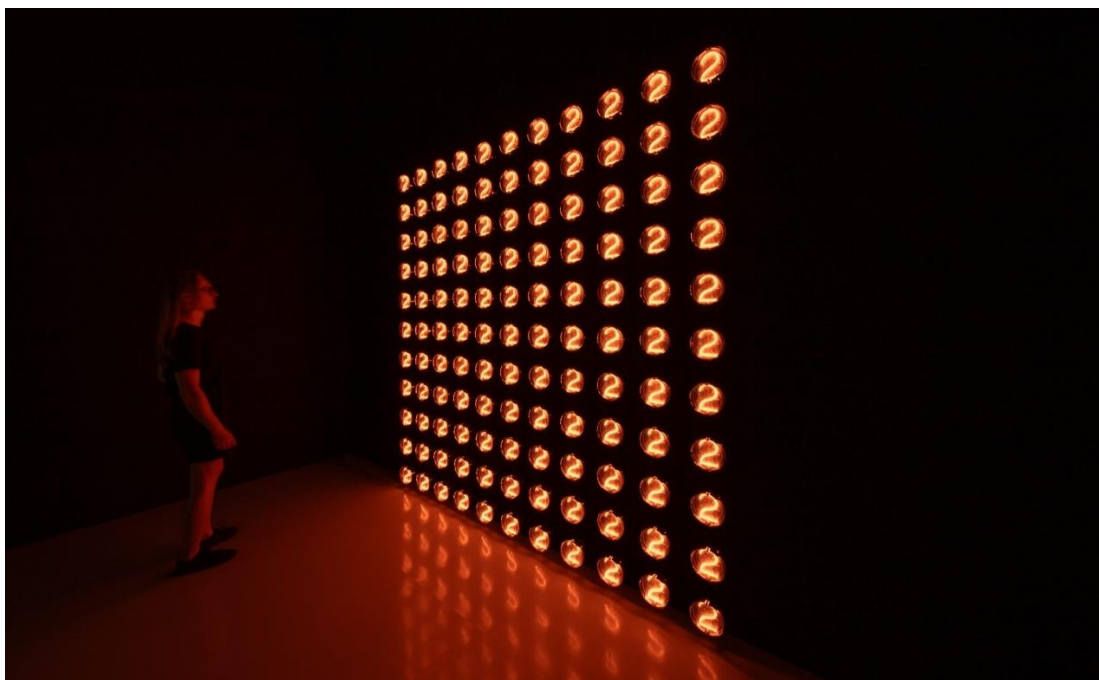
1. DIGITRON

Digitron je označení pro znakovou výbojku se studenou katodou, používanou pro zobrazování hodnot a textů v ranných dobách vývoje elektronických displejů. Digitrony byly všudypřítomné v 60. letech. Zobrazovaly důležitá data během přistání na měsíci, kritické parametry jaderných elektráren a značily růst a pokles cen akcií na burzách na Wall Street. I když byly v 70. letech překonány vynálezem LED, stále existuje komunita se zájmem o tuto starou technologii díky jejímu unikátnímu vzhledu. [1]

Dnes je vyrábí jen dvě firmy. Dalibor Farný v České republice a Millclock na Ukrajině. Kvůli nízkému objemu výroby a velkému množství ruční práce jsou digitrony drahé a jejich využití je omezené na místa, kde je nelze nahradit jinými zobrazovacími, a uměleckou tvorbu.



Obrázek 1.1 Digitron F9020AA výrobce Thomson-CSF z roku 1962 [1]



Obrázek 1.2 Dílo „Umashimenkana“ s digitrony typu H v muzeu současného umění Hiroshima MOCA [4]

1.1 Doutnavý výboj

Ve výbojkách se studenou katodou dochází k samostatnému doutnavému výboji. Pokud umístíme 2 paralelní elektrody do plynu za sníženého tlaku, bude se plyn při absenci iontů a elektronů chovat jako izolant. V praxi je plyn vždy mírně ionizován kosmickým zářením a při přivedení nízkého potenciálu na elektrody plynem prochází proud řádově 10^{-15} A. Se zvyšujícím se potenciálem roste podíl shromážděných iontů a elektronů, dokud nedojde k saturaci díky využití všech volných částic. To na obrázku 1.3 znázorňuje oblast A. [2]

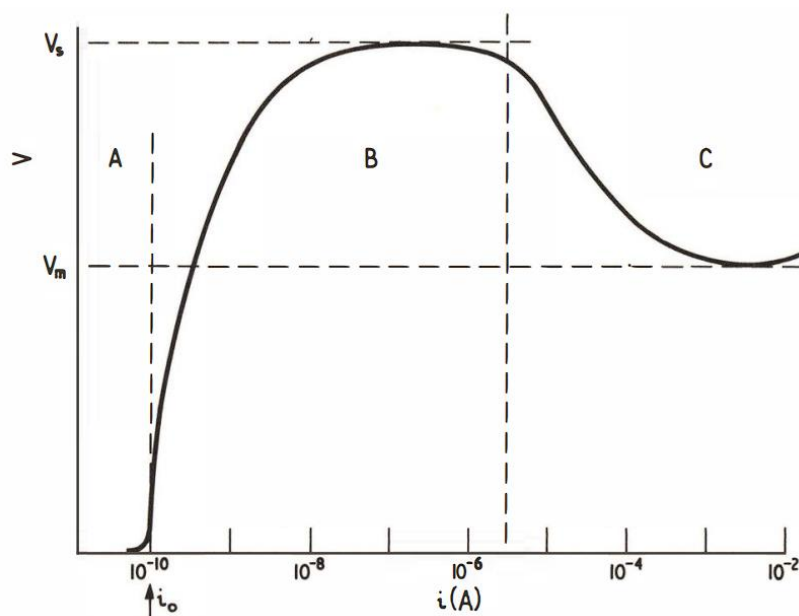
Při vyšších potenciálech elektrony dosáhnou dostatečné energie k ionizaci plynu kolizemi s jeho částicemi. Počet ionizačních kolizí elektronu s molekulou za uraženou vzdálenost d označujeme Townsendův první ionizační koeficient α . Závislost proudu plynem na tomto koeficientu vyjadřuje rovnice

$$i = i_0 * e^{\alpha * d} \text{ [A]}, \quad (1.1)$$

kde i_0 je proud na konci oblasti A. [2]

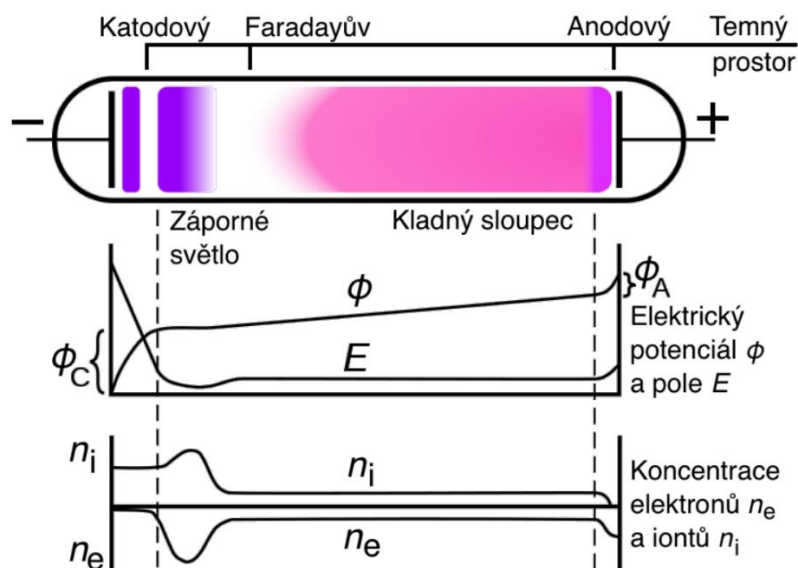
Další elektrony jsou také vyraženy z katody kladnými ionty, metastabilními atomy nebo fotony produkovanými v plynu. Výsledkem je rapidní nárůst proudu se zvyšujícím se potenciálem. Při určitém napětí V_s dojde k zápalu a výboj se stane samostatným (nezávislým na i_0). Rovnice zde přestává platit. Sekundární elektrony vyražené z katody nahradí primární elektrony a výboj začne být viditelný. Výboj v této oblasti je závislý na intenzitě elektrického pole, tlaku, použitém plynu, a geometrii elektrod. Oblast před zápalem je na obrázku 1.3 označena B. [2]

V oblasti C je výboj udržován s téměř konstantním napětím i při velkém rozsahu proudů a nazývá se oblastí normálního svitu. Při určitém proudu dosáhne napětí na elektrodách minima. Toto napětí V_m se nazývá udržovací a je vždy nižší než zápalné napětí V_s . Kvůli nutnosti překonat zápalné napětí vyžadují digitrony vyšší napájecí napětí než provozní. Při dalším zvyšování proudu začne napětí opět stoupat a dostáváme se do oblasti abnormálního svitu. Digitrony jsou často provozovány na začátku této oblasti. [2]



Obrázek 1.3 Voltampérová charakteristika doutnavého výboje [2]

Při provozu v oblasti C se ve výbojce může nacházet i více oddělených pozorovatelných oblastí svitu. Digitrony jsou konstruovány tak, aby byl viditelný jen svit v bezprostřední blízkosti katody. Elektrony musí z katody ovšem urazit určitou minimální vzdálenost pro nabrání dostatku energie k ionizaci, a proto výboj vzniká až v malé vzdálenosti od katody místo přímo na ní. [5]



Obrázek 1.4 Struktura doutnavého výboje [5]

Výbojky jsou nejčastěji plněny neonem, jehož výboj je nejjasnější ze všech inertních plynů. Přidáním malého podílu argonu (typicky 99 % Ne + 1 % Ar) je dále sníženo zápalné napětí. Příměs argonu také vyžaduje vyšší tlak pro stejnou proudovou hustotu, při kterém je výboj ostřejší. Vzniklá směs neonu a argonu s charakteristickým oranžovým svitem se nazývá Penningova a je běžně používána pro nejrůznější výbojky včetně digitronů. Pro zvýšení životnosti je do digitronů přidáváno malé množství rtuti, která způsobuje namodralý svit. K odfiltrování této barvy může být digitron pokryt červeným filtrem. [2]

Digitrony je možné plnit i jinými plyny, např. čistým argonem, vytvářejícím fialový výboj. Kvůli nízké intenzitě svitu je ale nutné provozovat tyto digitrony při velmi vysokých proudech a jejich životnost je velmi nízká.



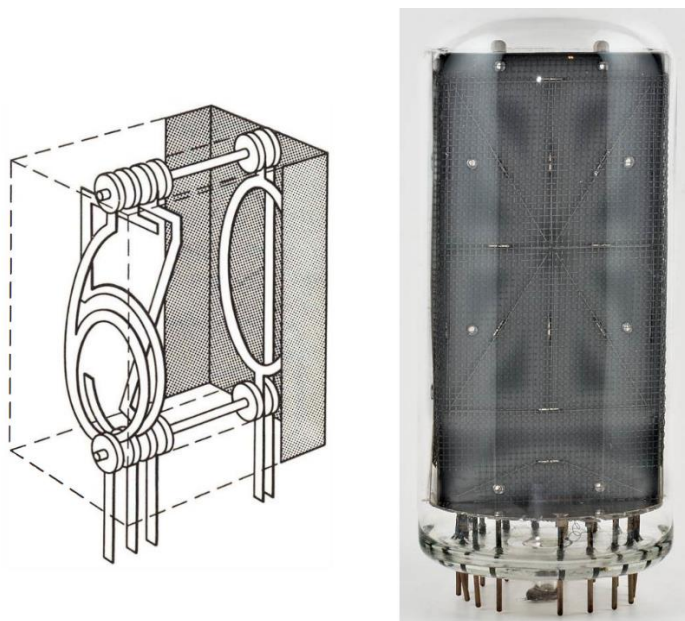
Obrázek 1.5 Fialový výboj digitronu plněného argonem [4]

1.2 Konstrukce digitronů

Při konstrukci je třeba dbát na podmínky uvnitř digitronu, kde je téměř úplné vakuum. To omezuje použitelné materiály především na sklo, kov a keramiku.

Digitron obsahuje několik katod obklopených společnou anodou, která má typický tvar mřížky. Katody mohou mít tvar jednotlivých znaků, nebo mohou reprezentovat segmenty, jejichž současnou aktivací je tvořen znak. V prvním případě jsou elektrody skládány za sebe, při čemž je nutné dbát na dostatečné izolační mezery mezi znaky. Takto vzniklý systém elektrod má velkou hloubku a počet znaků je omezen rozměry systému. U segmentového digitronu je dosažitelný počet znaků vyšší a znaky jsou zobrazovány v jedné rovině, ale tvar některých číslic či písmen nemusí být příliš uspokojivý. Systém elektrod může být orientován pro pohled shora nebo pohled z boku. [2]

Populární jsou především numerické digitrony zobrazující číslice 0-9 (často i desetinnou tečku), ale lze také nalézt velké množství digitronů se znaky + a – pro měřicí přístroje, sedmisegmentové, alfanumerické a bargrafy. Na obrázku 1.6 vlevo je systém elektrod numerického digitronu a vpravo je segmentový digitron Burroughs B-7971.



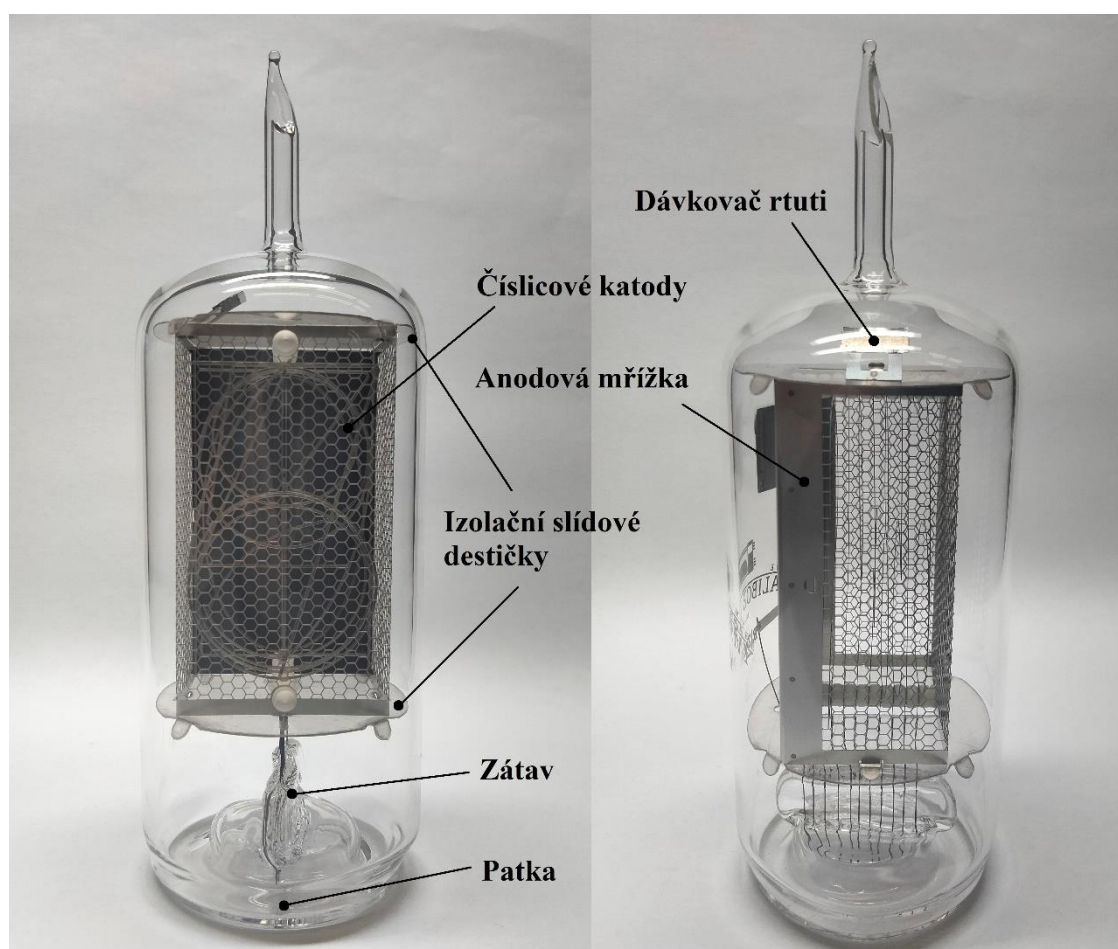
Obrázek 1.6 Konstrukce numerického a segmentového alfanumerického digitronu [2][3]

Dále se budeme soustředit na konstrukci numerického digitronu. Každá číslice má nahoře a dole otvory, které jsou navlečeny na keramické sloupky. Číslice jsou elektricky odděleny keramickými podložkami. Obklopuje je anodová mřížka, jenž musí mít dobrou optickou prostupnost a zajišťuje stejné průrazné napětí jednotlivých číslic. Při výboji v digitronu dochází k rozprašování materiálu katody a anodová mřížka také pomáhá tento materiál zachytit, aby se neusazoval na skle před číslicemi. [2]

Svit výboje může sahat i několik milimetrů do prostoru kolem katod, což napomáhá jejich rozpoznání v uspořádání za sebou. Dále katody bývají seřazeny v závislosti na použitém stylu písma tak, aby ty nejméně viditelné byly nejblíže pozorovateli. Zajímavostí některých starších typů digitronů je použití číslice 2 vzhůru nohama místo číslice 5. [2]

Další důležitou součástí digitronu je patka, která přivádí do digitronu proud skrz skleněný zátav. Systém elektrod je připojen k vývodům v patce pomocí drátků a bodových svárů. Aby nedošlo k výboji na připojovacích vodičích, je mezi elektrody a vodiče vložena slídová destička, nebo mohou být vodiče pokryty izolačním materiálem.

Celý systém je zataven do skleněné obálky. Zůstane jen skleněná trubice na patce nebo těle digitronu, pomocí které je odčerpán vzduch a přidány vzácné plyny. Odtavením trubice je digitron úplně utěsněn.

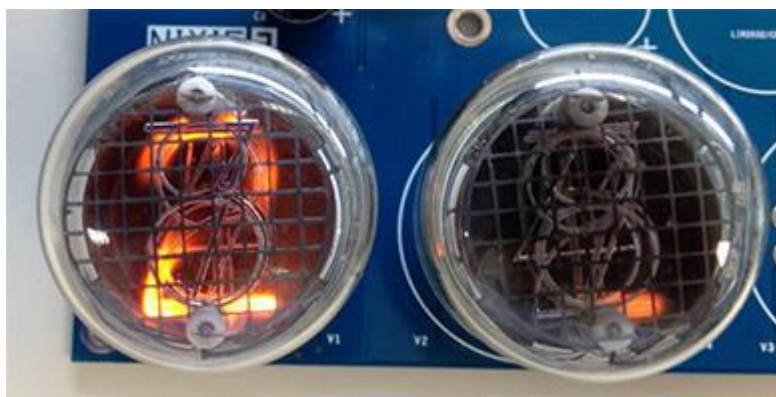


Obrázek 1.7 Popis utěsněného digitronu

1.3 Rozprašování elektrod

Během provozu výbojky se kov elektrod postupně usazuje na skle a okolních vnitřních součástech. Tento jev je způsoben uvolňováním materiálu katod vlivem nárazů iontů vzniklých při výboji. [2]

V digitronech je tento jev pozorovatelný především jako začernění skla a ostatních vnitřních součástí. Vrstva rozprášeného kovu může také způsobovat částečnou nebo úplnou absenci svitu na málo používaných katodách (tzv. otrava katod). Během svitu se ovšem vrstva naneseného kovu opět uvolňuje, čímž je možné tento jev do určité míry zvrátit. Toho je často využíváno například v digitronových hodinách, kde jsou nepoužívané číslice 8 a 9 náchylné k otravě. Občasným rozsvěcováním těchto číslic je rozprašována vrstva usazeného kovu. V extrémních případech může tento jev vést až ke zkratu elektrod a selhání digitronu.



Obrázek 1.8 Digitrony se silnou otravou katod [6]

1.4 Zahořování digitronů

Během výrobního procesu digitronu jsou elektrody vystavovány vysokým teplotám a jejich oxidace je nevyhnutelná. Vrstva oxidu a nečistot oslabuje nebo úplně zabraňuje výboji při normálních provozních podmínkách. K očištění elektrod je využit efekt rozprašování během procesu zahořování.

Rozprašování při provozu se snažíme zamezit, ale při výrobě ho lze využít. Kromě rozprášení oxidové vrstvy tento efekt také stabilizuje charakteristiky digitronu, nanese malou vrstvu kovu na povrch skla, která zabraňuje uvolňování plynů a rozptýlí kontaminanty v plynu. [2]

Při zahořování je digitron vystaven proudům daleko za hranicí normálního provozu, čímž je efekt rozprašování umocněn. Zahořovací proud je volen tak, aby digitron nepřešel do oblasti obloukového výboje. Zahřívání nadměrným proudem také uvolňuje plyny, které působí proti čistícímu účinku rozprašování. Teplota katod může dosahovat několika

stovek °C a je omezena roztažností kovu katod, které se mohou deformovat a zkratovat. Zahořování je proto často prováděno při vysokých pulzních proudech a nízkých střídách, zejména u digitronů s velkou plochou katod. [2]

Pro zamezení dalšího rozprašování v provozu je po zahoření do digitronu přidáno malé množství rtuti. Rtuť je obsažena v dávkovači, který je během výroby umístěn do digitronu a v této fázi je rtuť uvolněna indukčním ohřevem. Zatímco digitrony bez rtuti měly specifikovanou životnost do 1000 hodin, katalogy digitronů se rtutí uváděly desetitisíce hodin a někdy tento údaj ani nebyl znám. Po uvolnění rtuti je digitron zahořen druhým cyklem.

Na obrázku 1.9 je znázorněn rozdíl mezi zahořenými a nezahořenými digitrony. Digitron vlevo je plně zahořen včetně uvolnění rtuti. Digitron uprostřed nebyl zahořen ani v něm nebyla uvolněna rtuť. Svit má proto jinou barvu, je slabší a nepokrývá celou plochu číslice (oxidace na spodní části zabraňuje svitu). V digitronu napravo byla uvolněna rtuť, ale nebyl zahořen žádným cyklem. Barva svitu je tedy stejná jako u zahořeného kusu, ale svit opět nepokrývá celou plochu číslice. Je také jasnější, jelikož napájecí proud je stejný, ale pokrývá menší plochu katody a proudová hustota je vyšší. Ve firmě bylo experimentálně zjištěno, že nezahořené kusy nejsou schopny dosáhnout úplného svitu za normálních provozních podmínek ani po dlouhé době nepřetržitého provozu.

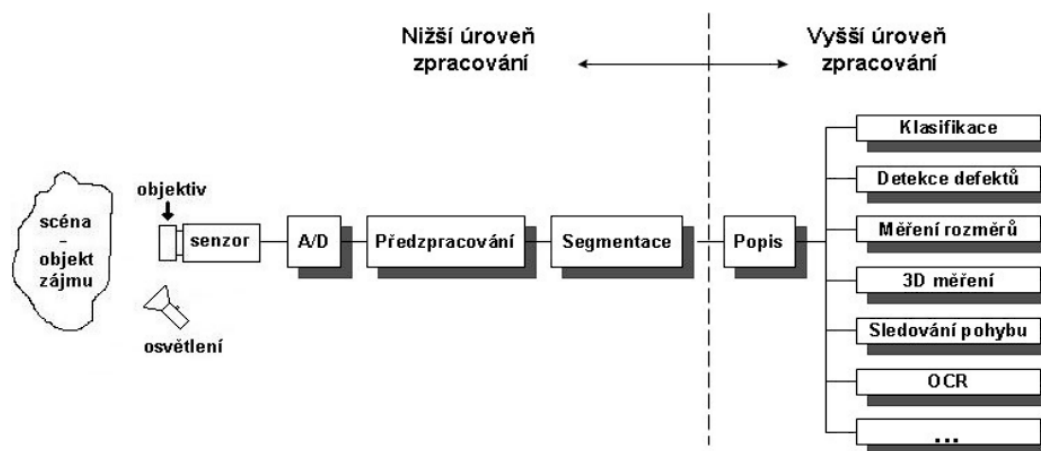


Obrázek 1.9 Digitrony před a po zahoření

2. ZPRACOVÁNÍ OBRAZU

Tato práce se zabývá zpracováním statických snímků výrobku. Bude vytvořena měřicí průmyslová scéna s řízeným osvětlením a jednolitým pozadím, díky níž bude řešený problém výrazně zjednodušen. [11]

Měřením scény získáme dvourozměrný barevný signál, reprezentující diskretizovaný průběh jasu ve scéně. Tento obraz je projekcí 3D objektu na 2D plochu, čímž je část informace ztracena. V práci ovšem bude snímán především obraz plochy rovnoběžné s čipem, a proto bude ztráta informace minimální. Se signálem pracujeme nejčastěji dle následujícího řetězce zpracování. [11]



Obrázek 2.1 Řetězec zpracování obrazu [12]

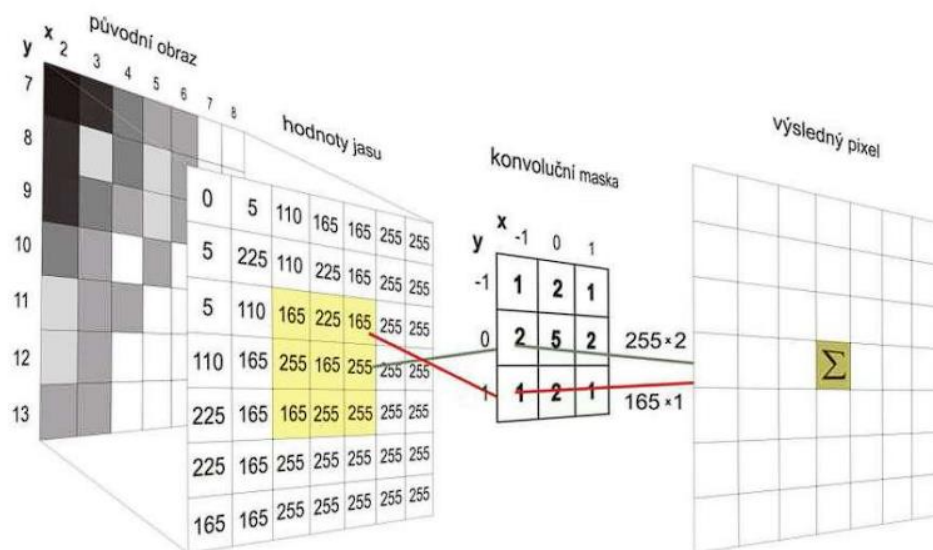
2.1 Předzpracování

Při záznamu a digitalizaci obrazu v něm mohou vznikat defekty ve formě šumu, poruch, geometrického zkreslení apod. Úkolem předzpracování je tyto defekty odstranit nebo alespoň zmírnit. V této práci je využito především lokálního předzpracování. Tyto metody pro výpočet jasu pixelu výstupního obrazu využívají lokální okolí pixelu vstupního obrazu, které většinou má podobné hodnoty. Je možné je využít pro vyhlazení nebo detekci hran. [11]

Lokální lineární filtry využívají matematické operace konvoluce. Jas v daném bodě obrazu je vypočítán dle vzorce:

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y) = \sum_{i=-M/2}^{M/2} \sum_{j=-N/2}^{N/2} f(x-i, y-j) h(i, j) \quad (2.1)$$

kde $g(x, y)$ je bod výstupního obrazu. Ten je závislý na vstupním obrazu f , jeho okolí o velikosti $M \times N$ a konvolučním jádru h (též konvoluční maska, kernel). [11]



Obrázek 2.2 Konvoluce obrazu [11]

Obrázek 2.2 podrobněji znázorňuje konvoluci obrazu s maskou pro jeden výstupní pixel. Opakovanou konvolucí pro všechny body získáváme výstupní obraz. Tento příklad ukazuje hodnoty konvoluční masky pro lokální průměrování, určené k vyhlazení obrazu. Součet váhových koeficientů vyhlazovacích filtrů musí být roven jedné (v tomto případě je konvoluční maska násobena koeficientem $\frac{1}{17}$, což není v obrázku pro přehlednost znázorněno). [11]

Práce dále využívá bodové jasové transformace, při nichž jas výstupního bodu závisí pouze na jas vstupního bodu. Příkladem je transformace jasové stupnice, která mapuje jas bez ohledu na pozici v obraze. Lze je využít k vytvoření negativu, zvýšení kontrastu, prahování apod. [12]



Obrázek 2.3 Transformace jasové stupnice [12][16]

2.2 Segmentace

Segmentace má za úkol rozdělit obraz do částí, které souvisí s objekty reálného světa. Může vycházet ze znalosti vlastností obrazu, jako např. barevná odlišnost objektů, určovat hranice mezi oblastmi, nebo oblasti vytvářet. Výsledkem je soubor oblastí, které jednoznačně korespondují s objekty (kompletní segmentace), nebo s objekty přímo nekorespondují (částečná segmentace). [12]

Problematika rozpoznávání sériových čísel vyžaduje kompletní segmentaci objektů (číslí). Pro segmentaci bude v práci využito metody určování hranic oblastí (detekce hran číslí). Tato metoda vyžaduje minimální počet chyb v obraze, které by mohly být vyhodnoceny jako hrany oblastí. Proto je nutné obraz v rámci předzpracování důsledně filtrovat. Detekce hran může být provedena jedním z hranových operátorů. [12]

Existuje několik přístupů k nalezení hran hranovými operátory. Jedním z nich je první derivace jasu obrazu, která nabývá vysokých hodnot v místech změn jasu (hran). Nalezením aproximací parciálních derivací v osách x a y získáváme 2 obrazy hran, jejichž kombinací a prahováním vzniká výsledný obraz. Příkladem tohoto přístupu je operátor Sobel. Kernely pro detekci hran v osách mají podobu:

$$X = \begin{bmatrix} -\frac{1}{4} & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{4} \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} \end{bmatrix} \quad Y = \begin{bmatrix} -\frac{1}{4} & 0 & \frac{1}{4} \\ -\frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{4} & 0 & -\frac{1}{4} \end{bmatrix}$$

Obrazy derivací f_x a f_y jsou sloučeny dle vzorce:

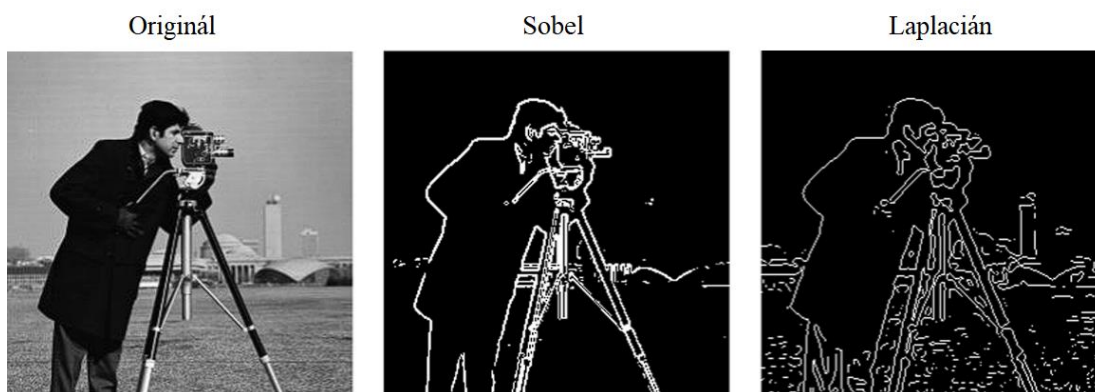
$$M = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \quad (2.2)$$

Obraz M vyjadřuje aproximaci gradientu původního obrazu a jeho prahováním vzniká výsledný obraz hran. Nastavením hodnoty prahu lze změnit citlivost detektoru. [15]

Jiným přístupem je nalezení míst v obraze, kde druhá derivace jasu prochází nulovou hodnotou (změna jasu je maximální). K nalezení druhé derivace může být využito kernelu Laplaciánu:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

K nalezení průchodu nulou existuje např. Marr-Hildreth algoritmus. Tento algoritmus vyhodnocuje přítomnost hrany v pixelu na základě osmi pixelů v jeho okolí. Daný pixel je hranou, pokud je znaménko hodnot jakýchkoliv dvou protějších pixelů opačné a jejich rozdíl je vyšší než určitý práh, který opět nastavuje citlivost detektoru. [15]



Obrázek 2.4 Porovnání operátorů detekce hran [14]

Pokud je obraz dostatečně kvalitní a objekty pro segmentaci se nepřekrývají, je možné dle souvislých hran určit hranice oblastí a rozdělit tak objekty. Toho bude využito v práci při segmentaci číslic.

2.3 OCR

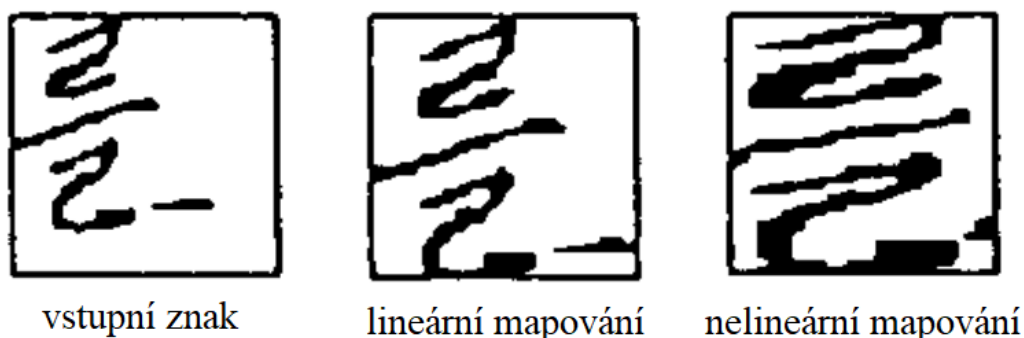
Optické rozpoznávání znaků neboli OCR je jednou z vyšších úrovní zpracování obrazu. Má za úkol převést tištěný nebo psaný text do upravitelného formátu pro další zpracování nebo ukládání. Na úspěšnost OCR má velký vliv kvalita vstupních dat. Je vyžadován vysoký kontrast mezi textem a pozadím, vysoké rozlišení, kvalitní osvětlení atd. Scéna s dokumentem by měla být co nejjednodušší, text by měl být rovnoměrně rozložen a zarovnan. [17]

2.3.1 Extrakce a normalizace znaků

Prvním z kroků je předzpracování, které má za úkol odstranit nežádoucí charakteristiky jako šum nebo zkreslení a zvýšit kontrast textu s pozadím. Následuje segmentace, jejíž postup se může výrazně lišit v závislosti na aplikaci. V případě rozpoznávání skenovaných dokumentů je nejdříve obraz rozčleněn na části obsahující textová pole, obrázky, tabulky atd. Následně je text segmentován na řádky, ty na slova a samotná písmena. Krom této metody tzv. top-down (shora dolů) existují také metody bottom-up (zdola nahoru) a hybridní. Přístup bottom-up nejdříve vyhledává významné pixely a následně rozšiřuje jejich okolí k nalezení písmen, slov, řádků a bloků textu. Hybridní metody kombinují oba přístupy. [17]

Výstupem segmentace jsou ve většině případů jednotlivé znaky. V případě rozpoznávání psaného textu nebo předem neznámého stylu tištěného textu mohou tyto znaky mít výrazně odlišné proporce, poměr stran, zešikmení apod. Nejdůležitějším krokem před samotným rozpoznáváním je tedy normalizace jejich tvaru. Metody normalizace mohou být lineární, např. mapování závislé pouze na rozměrech vstupního

obrazu. Nelineární metody berou v potaz charakteristické znaky každého bodu vstupního obrazu (např. rozložení černých bodů). [18]



Obrázek 2.5 Porovnání metod normalizace znaku [18]

Z obrázku 2.5 je patrné, že nelineární metody dovolují upravit variace psaných znaků, jako je v tomto případě korekce prodloužení posledního tahu vpravo dole. [18]

2.3.2 Rozpoznávání

První z metod rozpoznávání je porovnávání se vzorem. Tato metoda je vhodná pro kvalitní předlohy a je silně závislá na geometrickém a jasovém zkraslení obrazu. Principem je vytvoření etalonů představujících jednotlivé znaky a nalezení etalonu, kterému se hledaný znak nejvíce podobá. [12]

Dále je možné využít statistických metod, které na základě správné volby kritérií mohou vykazovat lepší rozpoznávací schopnosti. Hlavními statistickými metodami jsou NN (nearest neighbor), Bayesův klasifikátor, shluková analýza a kvadratický klasifikátor. [17]

Jednou z nejvhodnějších metod jsou umělé neuronové sítě, které simulují lidské heuristické rozhodování. Neuronová síť je architektura paralelních propojení mnoha flexibilních uzlů. Výsledek je založen na komplexní kolaboraci všech uzlů, která vede k rychlejšímu dosažení výsledku než u běžných metod. [17]

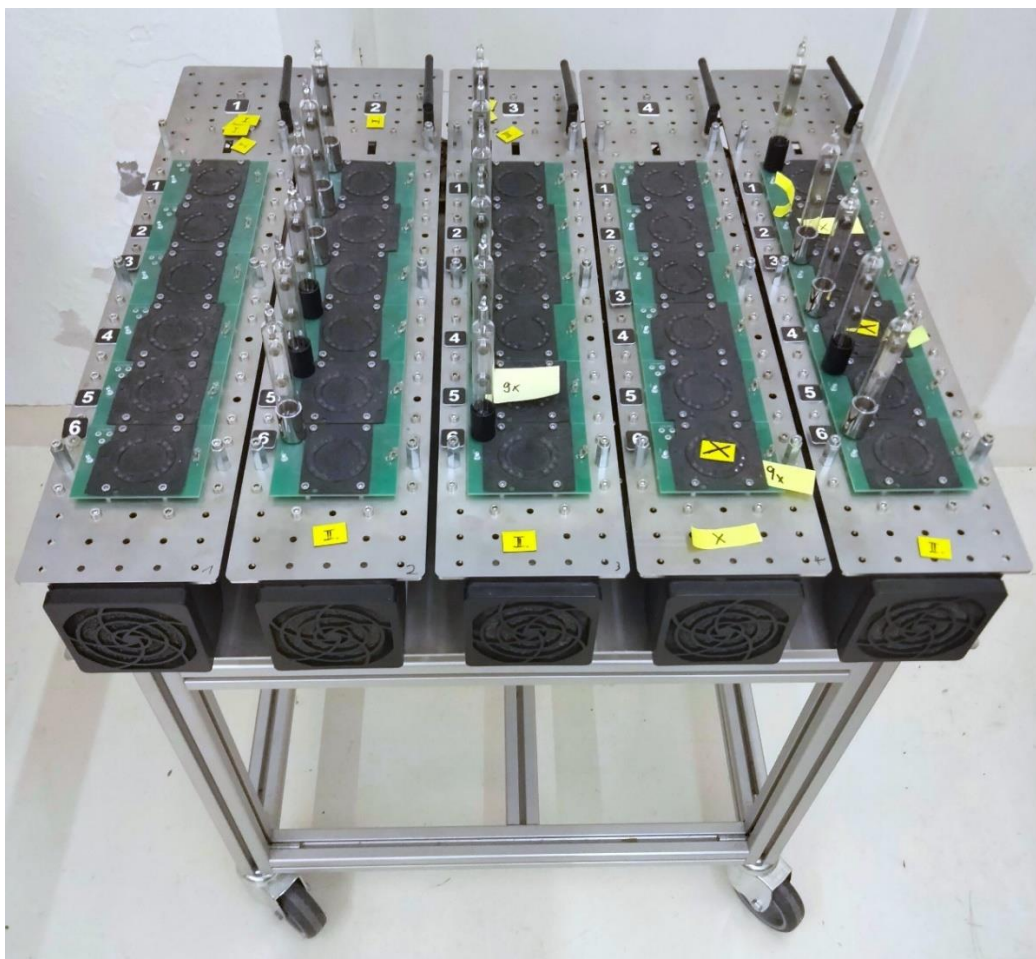
Všechny klasifikační metody mají svoje výhody a nevýhody, a proto mnoho aplikací využívá více metod jako např. neuronové sítě v kombinaci s KNN (K nearest neighbor) klasifikátorem. [17]

3. SOUČASNÝ STAV ZAHOŘOVACÍHO STROJE

3.1 Funkcionalita

Zahořování digitronů ve firmě Dalibor Farný probíhá na zahořovacím stroji s pěti identickými sloupci. Každý sloupec má 6 pozic a celý stroj tedy pojme 30 digitronů najednou. Na stroji je možné zahořovat digitrony typu R (jedna z jeho verzí je na obrázku 1.5), všechny speciální kusy, které sdílí patici tohoto typu a dvojtečky. Pro digitrony typu H je vyhrazen modifikovaný sloupec, který není součástí stroje.

Stroj obsahuje pro každý typ digitronu profil, který určuje rychlost přepínání katod, zahořovací proud každé katody, střidu a celkovou dobu zahořování. Přesnost nastavení elektrických parametrů je zajištěna pravidelnou kalibrací.



Obrázek 3.1 Současný zahořovací stroj

3.2 Náročnost obsluhy a údržby

Stroj je obsluhován zcela manuálně. Obsluha naplní pozice nezahořenými digitrony, zadá jejich typ, sériová čísla a pozice na stroji do uživatelského rozhraní na PC a spustí cyklus. Po prvním cyklu zahořování odebere digitrony a pomocí indukčního ohřívače uvolní rtuť. Poté opět naplní stroj a spustí druhý cyklus. Obsluha je zodpovědná za vizuální kontrolu kvality digitronů.

Cyklus zahořování R digitronů trvá jen 60 minut, a proto stroj vyžaduje častý zásah obsluhy. Mimo pracovní dobu je zcela nevyužitý a během pracovní doby obsluha není vždy u stroje. Efektivita využití je v současné době velmi nízká. Stroj má také několik chyb ve firmware, které způsobují ztrátu kalibračních dat a vyžaduje častou časově náročnou recalibraci. Hardware je nespolehlivý. Konektory na DPS jsou častým zdrojem poruch, zdroje konstantního proudu pro digitrony nejsou dostatečně robustní pro nárazy způsobené zkratovanými katodami a jednotlivé součásti jsou velmi špatně přístupné.

3.3 Navržené modifikace

Cílem práce je plně automatizovat proces zahořování. Současně používaný stroj byl navržen pro manuální provoz a neumožňuje jednoduchou montáž robotického ramene ani automatizované připojování digitronů. Proto je nutné stroj kompletně přepracovat a splnit následující hlavní body:

- Vybrat vhodný manipulátor
- Vytvořit systém pro automatické připojování digitronů k zahořovacím pozicím
- Vytvořit pozici pro optickou inspekci
- Připojit ke stroji indukční ohřev pro uvolňování rtuti
- Vybrat vhodnou instrumentaci a navrhnout způsob řízení stroje
- Vytvořit skladový systém s dostatečnou kapacitou
- Optimalizovat hardware a software zahořovacích sloupců

Vzhledem k velké časové náročnosti vytyčených cílů byl úkol optimalizace zahořovacích sloupců zadán jako bakalářská práce panu Lukáši Stuchlíkovi. Tato diplomová práce se jím nebude zabývat.

4. AUTOMATIZACE PROCESU ZAHOŘOVÁNÍ

Na trhu působí velké množství firem poskytující kompletní automatizované řešení na míru. Tato řešení jsou ovšem finančně nedostupná a řešila by pouze problematiku přemísťování digitronů, případně optické inspekce. Vzhledem k problematice zahořování by i tak bylo nutné velkou část stroje zhotovit samostatně. Proto bylo rozhodnuto, že stroj bude kompletně navržen a sestaven ve firmě Dalibor Farný.

V současné době je nejčtenějším výrobkem firmy digitron typu R. Kapacita výroby tohoto typu je 50 digitronů týdně. Pro splnění cíle zvýšení kapacity na 500 kusů týdně by měl vzniknout nový digitron typu F a zahořovací stroj by měl zvládnout zahořovat oba tyto typy. Zatímco digitrony R a F jsou numerické s 11 kontakty, budoucí plánované segmentové typy mohou mít kontaktů více. Nové zahořovací pozice tedy musí mít dostatečný rezervní počet kontaktů.

Kapacita 500 digitronů týdně odpovídá 100 kusům denně a budeme uvažovat, že stroj umožní téměř nepřetržitý provoz. V takovém případě, při současné délce zahořovacího cyklu 2 hodiny, bude potřeba alespoň 9 pozic pro zahořování (s rezervou 10 pozic). Stroj musí mít dostatek skladovacího prostoru pro jednodenní provoz bez zásahu obsluhy včetně prostoru pro vyřazené kusy. Musí být bezpečný pro obsluhu, uživatelsky přívětivý a robustní.

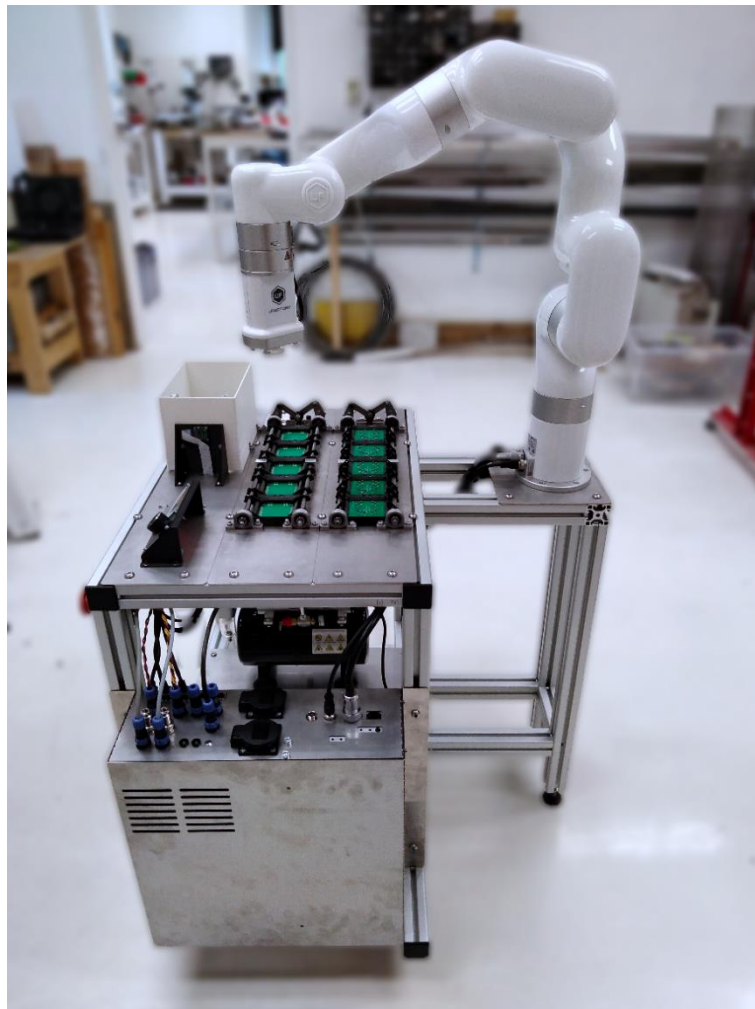
Postup procesu zahořování bude následující:

1. Obsluha naplní stroj bednami s nezahořenými digitrony, zvolí typ a spustí chod.
2. Robotické rameno každý digitron nejdříve přesune na pozici pro optickou inspekci a po kontrole na zahořovací pozici, nebo do vyřazovací bedny.
3. Po zahoření všech digitronů prvním cyklem rameno přesune digitrony k indukčnímu ohřevu, který uvolní rtuť.
4. Obdobně se opakuje zahoření druhým cyklem. Digitrony které po zahořování ukázaly známky nekvalitního svitu budou vyřazeny.
5. Obsluha odebere bedny se zahořenými a vyřazenými digitrony.

Pokud během chodu dojde k nezávažné chybě, jako například zaseknutí digitronu v zahořovací pozici, stroj zaznamená chybu a nebude tuto pozici používat, ale pokračuje dále. K úplnému zastavení dojde jen při závažné chybě, jako neschopnosti vyjmout digitron z pozice pro optickou inspekci. Všechny chyby a události budou hlášeny na uživatelském panelu, který také umožní ovládání a kalibraci stroje. Informace o zahořování jednotlivých kusů budou odesílány ze zahořovacích sloupců do databáze pod příslušná sériová čísla.

5. NÁVRH A KONSTRUKCE STROJE

Pro návrh byly využity především programy Fusion 360 a Eagle. 3D modely umožňují jednoduchou tvorbu výrobních dat pro díly vypalované laserem, tisklé z PLA pomocí 3D tiskárny, nebo obráběné. Program Eagle také umožňuje export DPS do 3D modelu a kontrolu mechanické kompatibility ještě před samotnou výrobou. Následující obrázek ukazuje současnou podobu stroje.



Obrázek 5.1 Nový zahořovací stroj

5.1 Mechanická konstrukce

U původního zahořovacího stroje se osvědčila konstrukce z hliníkového stavebnicového systému. Na konstrukci byly přišroubovány pláty nerezové oceli vypalované laserem pro přichycení jednotlivých součástí. Vypalované díly je možné ohýbat a vytvořit z nich velmi pevné krabice a jiné mechanické prvky. Tato robustní a jednoduchá konstrukce byla zvolena i pro nový stroj.

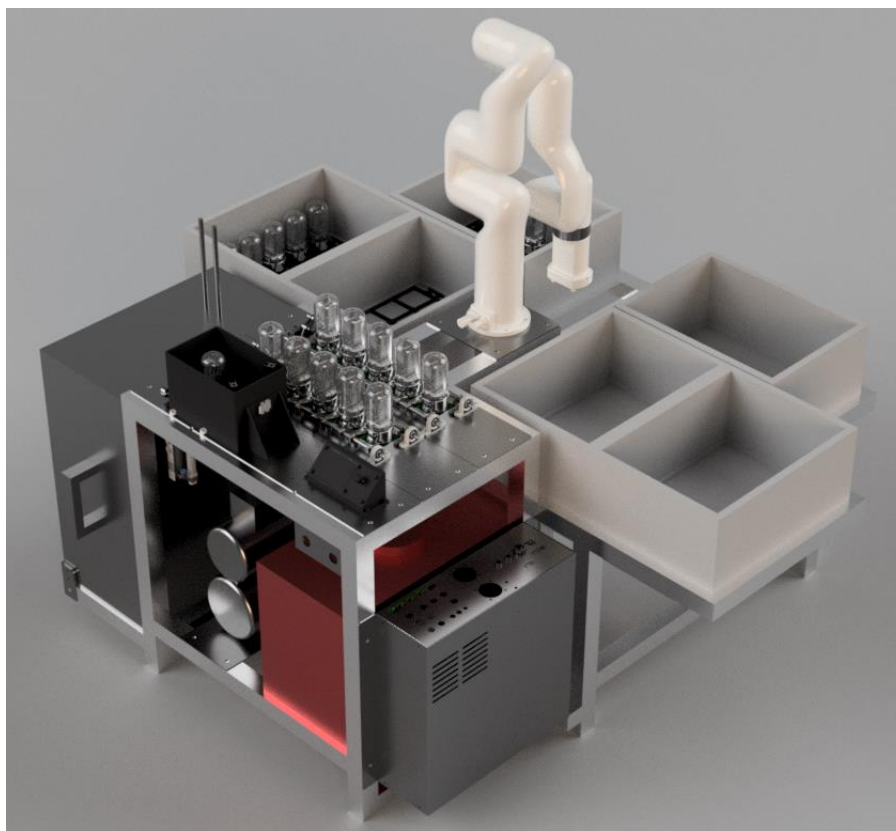
Model nového stroje v programu Fusion 360 je na obrázku 5.2.

Na přední straně stroje se nachází dva zahořovací sloupce s digitrony a také pozice optické inspekce a uživatelské rozhraní. Rameno bylo umístěno do středu konstrukce pro maximální využití jeho dosahu. Uvnitř je zabudován kompresor, indukční ohřívač a jeho chladič. Na pravé straně je přišroubován rozvaděč, který napájí a řídí součásti stroje.

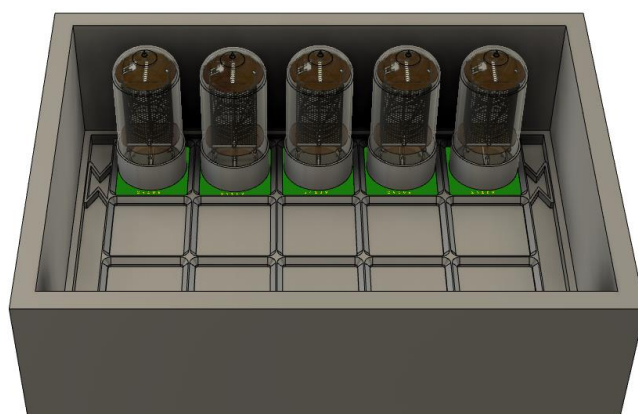
Na zadní straně je odnímatelná konstrukce se skladovacími bednami, kterou je možné jednoduše odšroubovat při přemísťování stroje. Bedny výrobce TBA mají standardní rozměry 40x30x12 cm. Do nich jsou umístěny rámečky pro oddělení a pozicování digitronů s paticemi (model na obrázku 5.3). Do každé bedny je možné umístit 20 digitronů. Pět beden je vyhrazeno pro nezahořené digitrony a jedna pro vyřazené kusy a volné místo při mezikrocích. Do stroje je tedy možné umístit zároveň až 100 digitronů (zásoba na 24 hodin provozu).

Malé rozměry beden umožňují maximální využití pracovního prostoru ramene. V případě nedostatku skladovacího místa by bylo možné dále umístit bednu do prostoru vpravo od zahořovacích pozic, nebo zkonstruovat dopravník přivážející nové bedny.

Vzhledem k velké hmotnosti konstrukce a součástí je přemísťování stroje problematické. Proto mají obě oddělitelné části stroje vespod konstrukce dostatek prostoru pro převoz paletovým vozíkem a jejich rozměry dovolují průchod zárubní o šířce alespoň 80 cm.

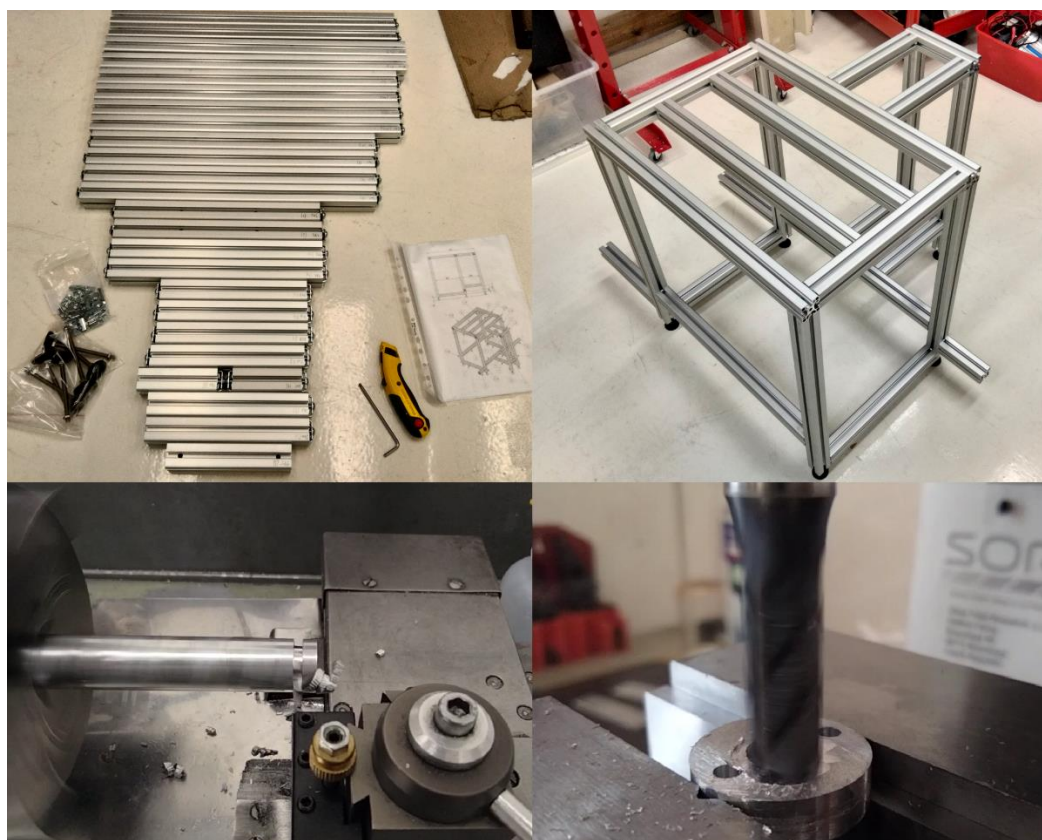


Obrázek 5.2 Model stroje



Obrázek 5.3 Model skladovací bedny

Hliníkové profily a spojovací materiál dodal výrobce ASKMT ve formě stavebnice včetně řezání závitů na základě modelu. Nerezové díly vypalované laserem včetně ohýbání dodal výrobce FEPEKO. Plastové díly byly vytisknuty na tiskárnách Prusa z PLA filamentu a jednoduché hliníkové díly byly obráběny na soustruhu a fréze dostupné ve firmě. Následující fotografie ukazují několik kroků výroby.



Obrázek 5.4 Výroba mechanických dílů a sestavení konstrukce

5.2 Manipulátor

Pro manipulaci s digitrony bylo pro svou cenovou dostupnost vybráno kolaborativní 5 osé rameno UFactory xArm 5. Digitrony zvedne pomocí vakuového uchopovače, který je standardním příslušenstvím ramene. Dosah 700 mm a opakovatelnost 0,1 mm jsou dostačující. Kvůli absenci šesté osy jsou dosažitelné polohy koncového bodu omezeny a rameno je vhodné především pro „pick and place“ aplikace, jako je právě tato.



Obrázek 5.5 Rameno UFactory xArm s vakuovým uchopovačem [7]

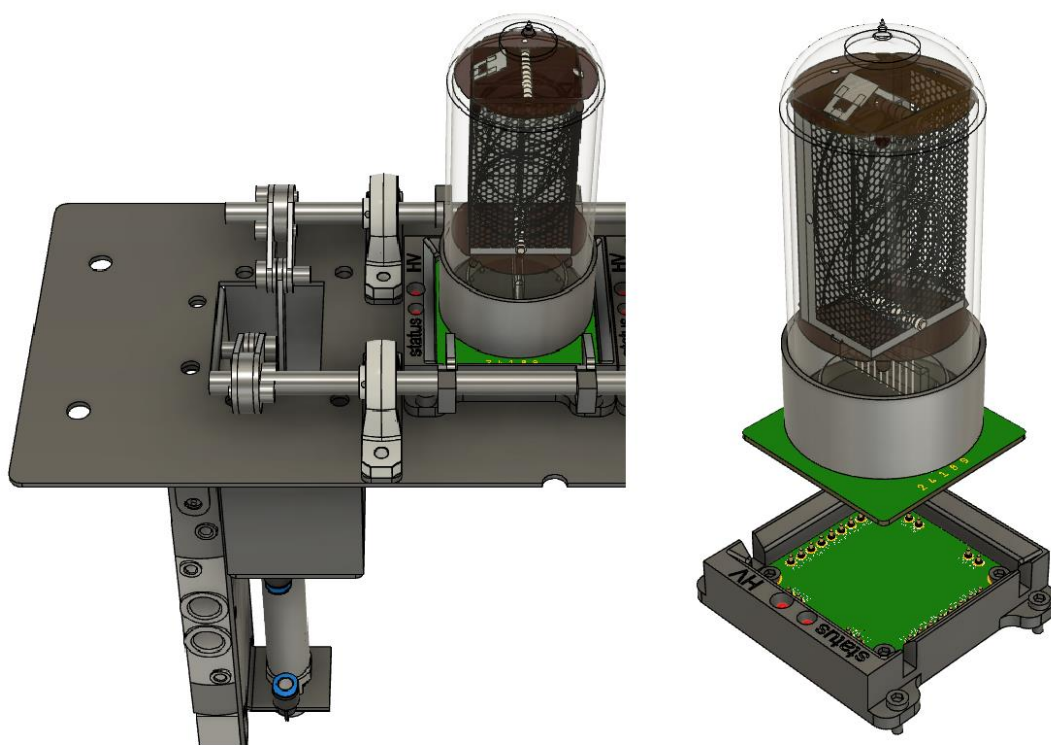
Rameno je řízeno příslušným řídicím a napájecím modulem. Modul umožňuje připojení sběrnici ethernet a poskytuje rozhraní pro ovládání a programování pomocí Blockly, Python nebo C++. Je možné i naprogramovat jednotlivé úlohy, nahrát je do řídicího modulu a následně je spouštět pomocí konfigurovatelných digitálních vstupů. Tento přístup byl zvolen, protože umožňuje řídit rameno i pomocí jednoduchého PLC bez nutnosti připojovat výkonnější počítač. [13]

Jelikož rameno je kolaborativní a disponuje detekcí kolize, je možné jej provozovat bez bezpečnostní klece. Modul také umožňuje připojení tlačítka nouzového vypnutí, které rameno zabrzdí a odpojí všechny motory.

5.3 Systém připojení digitronů

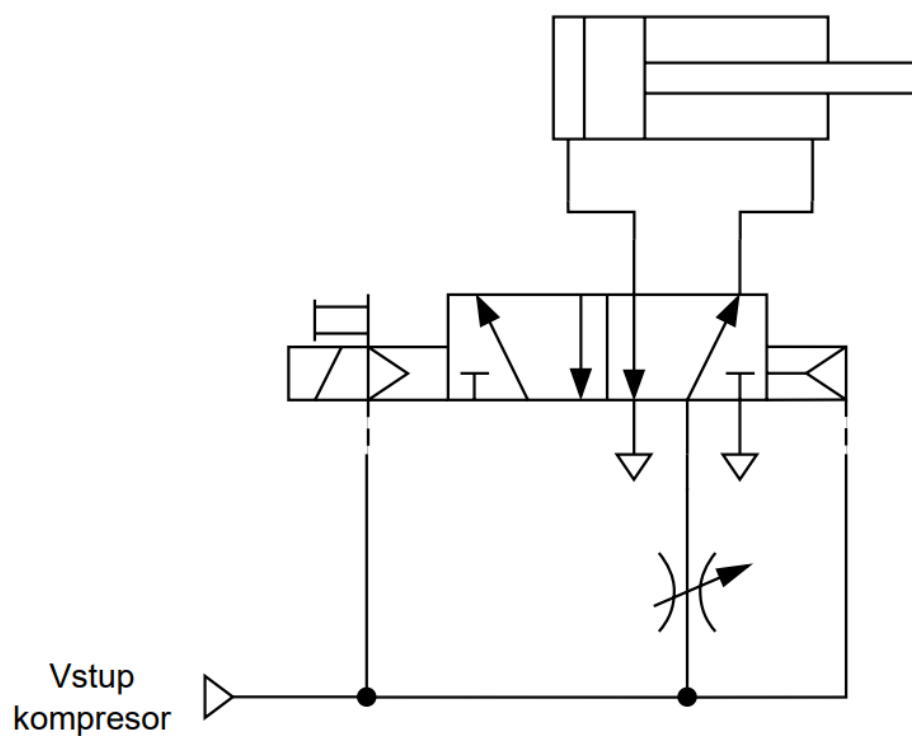
Byl zvolen systém připojení pomocí pružinových kontaktů s vysokou životností. Orientování digitronů v prostoru je ovšem problematické, jelikož jediným vnějším prvkem určujícím správnou rotaci jsou kontakty na patce. Válcová obálka opticky zkresluje vnitřní systém a komplikuje vizuální rozpoznání správného natočení. Proto byl vytvořen adaptér, specifický pro typ digitronu, do kterého je každý kus nejdříve zasazen. Kontakty a náběhy na rámečku kolem patice umožňují správné připojení i při nepřesné manipulaci.

Digitron s adaptérem je nutné do pozice přitlačit pro správné připojení všech kontaktů. K tomu slouží páky umístěné na dvou osách po stranách zahořovacího sloupce. Osami otáčí pneumatický válec pomocí systému pák umístěný na levé straně sloupce.



Obrázek 5.6 Model systému připojení digitronů

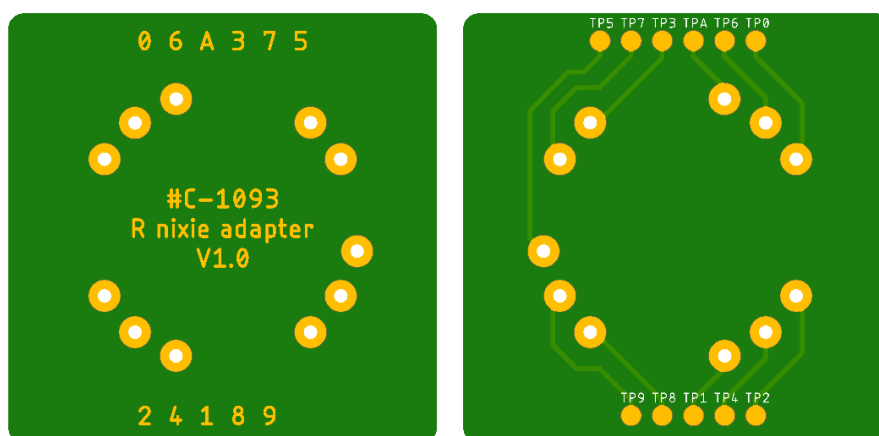
Pneumatický systém je samostatný pro každý sloupec. Je zde umístěn jeden 5/2 ventil, dvojčinný pneumatický válec a škrticí ventil omezující rychlost pohybu válce. Ventil je ovládán solenoidem a pilotním vzduchem. Kompresor v základně stroje je společný pro všechny sloupce a tlak vzduchu je snižován regulátorem na jeho výstupu.



Obrázek 5.7 Pneumatické schéma zahořovacího sloupce

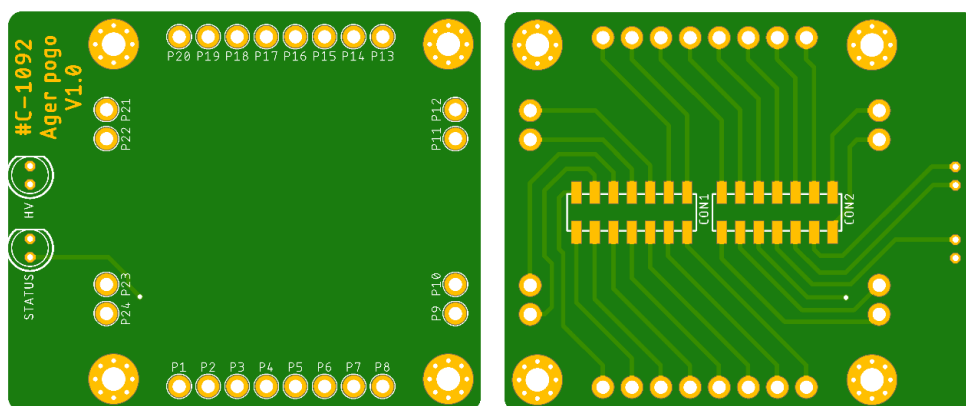
5.3.1 Návrh DPS adaptéru a patice

DPS adaptéru i patice jsou velmi jednoduché s minimem součástek. Adaptér pro digitron typu R obsahuje kolíkové zásuvky pro jeho 10 katodových a 1 anodový kontakt.



Obrázek 5.8 DPS adaptéru digitronu typu R

Patice pro připojení digitronů obsahuje 24 pružinových kontaktů. Digitrony typu F a R budou využívat 11 z nich. Zbytek je rezervní pro případné budoucí typy. Dále je zde výbojka (HV) indikující přítomnost napájecího napětí, LED (STATUS) indikující stav zahořování a konektory (CON1, CON2).



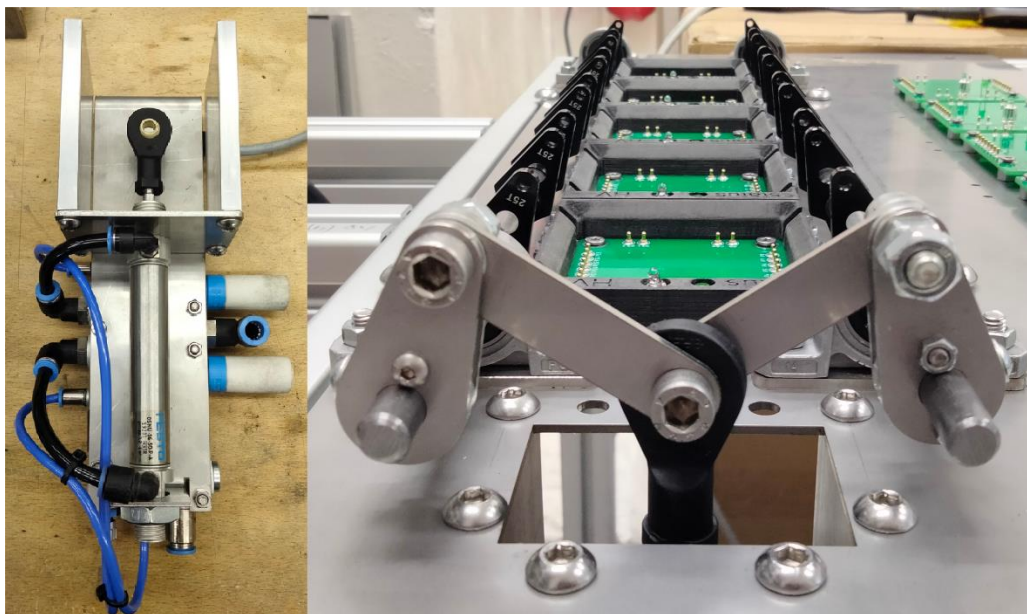
Obrázek 5.9 DPS patice zahořovací pozice

Konektory na patičích budou připojeny k řídicí elektronice na spodní straně zahořovacího sloupce, jejímž návrhem se zabývá pan Lukáš Stuchlík v rámci jeho bakalářské práce.

5.3.2 Výroba připojovacího systému

Pro všechny DPS byl zvolen výrobce JLCPCB se standardní konfigurací (substrát FR-4 tloušťky 1,6mm, zelená nepájivá maska, 2 vrstvy).

DPS patic bylo vyrobeno a osazeno celkem 10 kusů, 5 pro každý zahořovací sloupec. Na každou patici byl nasazen plastový rámeček (3D tisk PLA), který má za úkol navést digitron na správné místo. Dále byly zhotoveny pneumatické systémy pro oba sloupce. Byly vybrány písty a ventily od výrobce FESTO označení DSNU-16-50-P-A a CPE18-M1H-5LS-1/4. Jako přitlačné páky byly použity upravené páky pro servopohony 1B-25T. Systém spojující pístnící s osami je zhotoven z dvojice nerezových pák a hliníkového kroužku. Upínací ložiska jsou typu KP08. Všechny díly byly namontovány na nosný nerezový panel, určený k jednoduchému vyjmutí ze stroje při případné opravě.



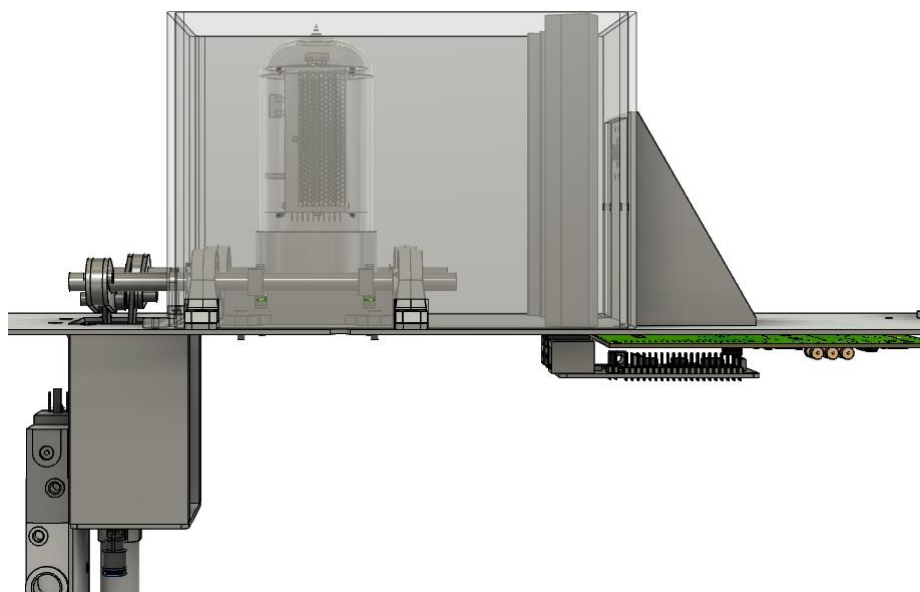
Obrázek 5.10 Mechanismus zahořovacího sloupce

5.4 Automatická optická inspekce

Před a po zahořovacích cyklech bude na všech digitronech kontrolována funkčnost a kvalita svitu segmentů. Také je třeba přechíst sériová čísla digitronů. K tomuto účelu byla vytvořena pozice pro optickou inspekci se stejným systémem připojení jako zahořovací pozice, obohacená o kameru a osvětlení. Zpracování obrazu z kamery je výpočetně náročné, a proto byl k pozici připojen počítač, který výsledky analýzy snímků posílá řídicímu systému.

Výběr počítače vzal do úvahy dostupná rozhraní, výpočetní výkon, cenu, odběr a dostupnost. Jako nejlepší volba se zdálo Raspberry Pi 4 model B s oficiálním kamerovým modulem verze 3, který podporuje MIPI CSI-2 rozhraní. Toto rozhraní je rychlejší než USB 3.0 a zároveň využívá méně prostředků procesoru. Kamera disponuje rozlišením 11,9 Mpx a automatickým ostřením na minimální vzdálenost 10 cm, což umožnilo montáž blízko digitronu bez dalšího objektivu.

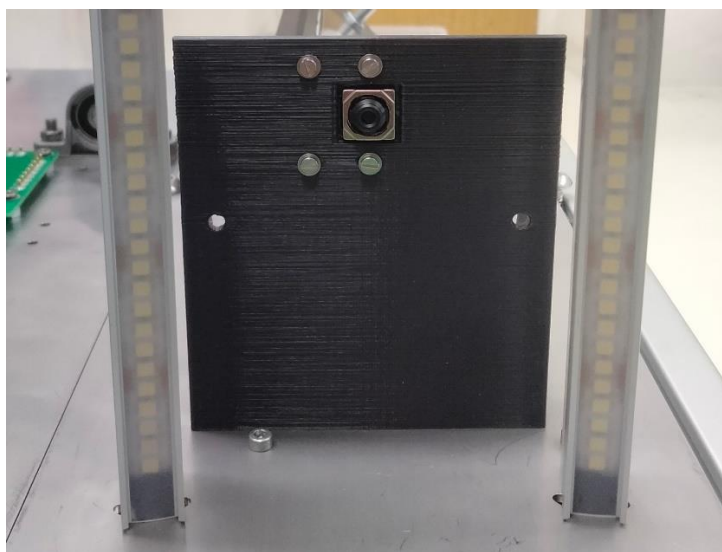
Kolem pozice byl vytvořen uzavřený prostor s LED osvětlením, který má za úkol vytvořit stálé světelné podmínky při pořizování snímků.



Obrázek 5.11 Model pozice optické inspekce

5.4.1 Osvětlení

Osvětlení digitronu musí být dostatečně výkonné, aby okolní proměnlivé osvětlení nemělo velký vliv na nasvícení scény. Byly vybrány LED pásy o výkonu 24 W/m a světelném toku 4300 lm/m. Pásy byly nalepeny na 2 profily o délkách 13 cm a překryty difuzorem. Profily byly namontovány na hliníkové sloupky, které je možné otáčet okolo svislé osy pro doladění úhlu dopadu světla. Intenzita osvětlení v prostoru pro digitron byla dle luxmetru 500 lx při běžném osvětlení místnosti a 15000 lx při osvětlení LED pásy. Okolní podmínky tedy nemají na osvětlení scény velký vliv.

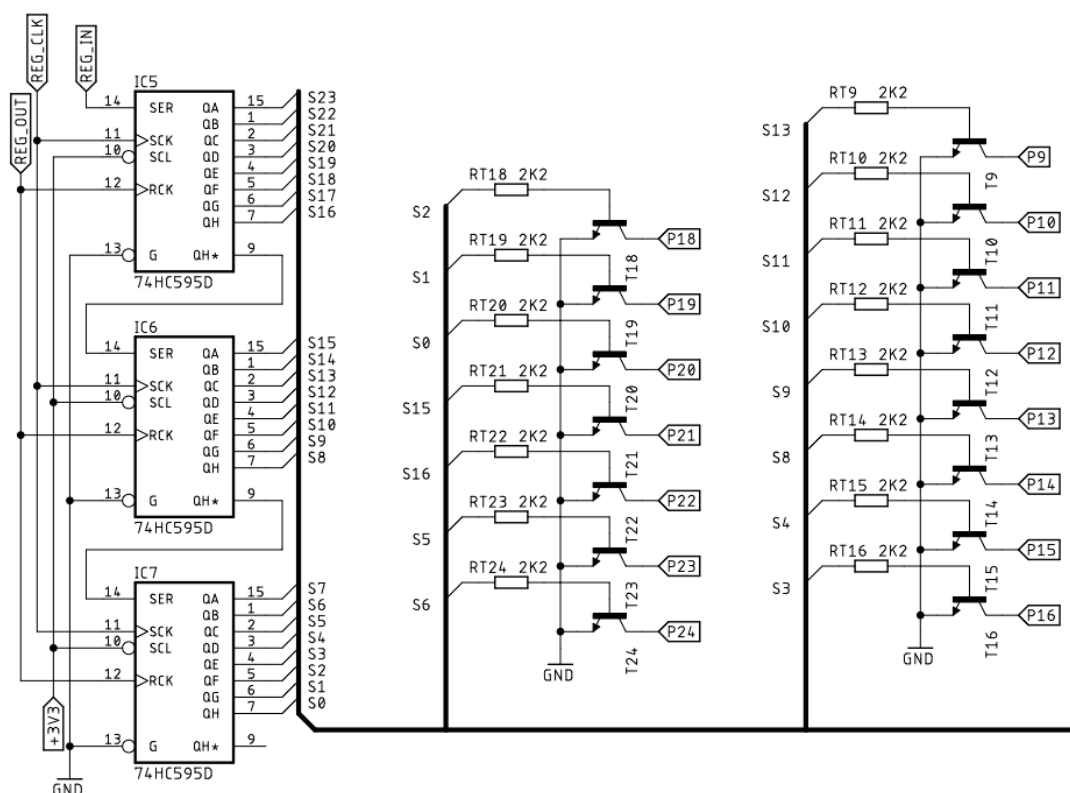


Obrázek 5.12 LED osvětlení

5.4.2 Návrh DPS optické inspekce

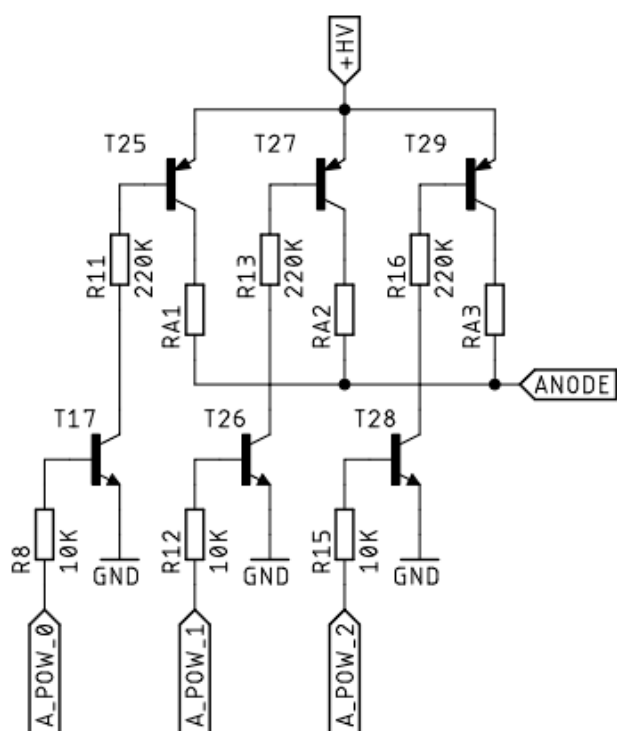
Počítač Raspberry má kromě pořizování a analýzy snímků za úkol ovládat osvětlení, pneumatický ventil, rozsvěcet digitron a komunikovat s řídicím systémem. Proto byla vytvořena DPS, na kterou je namontován.

Patice má kapacitu pro až 23 katod, které musí být počítač schopný řídit. Vzhledem k nedostatku výstupů byly k počítači připojeny 3 posuvné registry 74HC595, jejichž výstupy spínají vysokonapěťové tranzistory MMBTA42. Každý tranzistor tak připojuje jednu z katod na nulový potenciál.



Obrázek 5.13 Schéma posuvných registrů a spínání katod

Jednotlivé číslice digitronu mají rozdílný provozní proud, a proto je nutné měnit proud v závislosti na aktuálně sepnuté katodě. Ideální řešení by umožnilo jej řídit plynule, ale pro optickou inspekci není přesný katodový proud klíčový. Proto bylo zvoleno řešení s několika přibližnými hodnotami. Nastavení proudu je možné pomocí 3 výstupů, které anodu připojí k napájení jedním ze 3 rezistorů. Kombinacemi různých rezistorů je možné dosáhnout až 7 různých nastavení proudu.



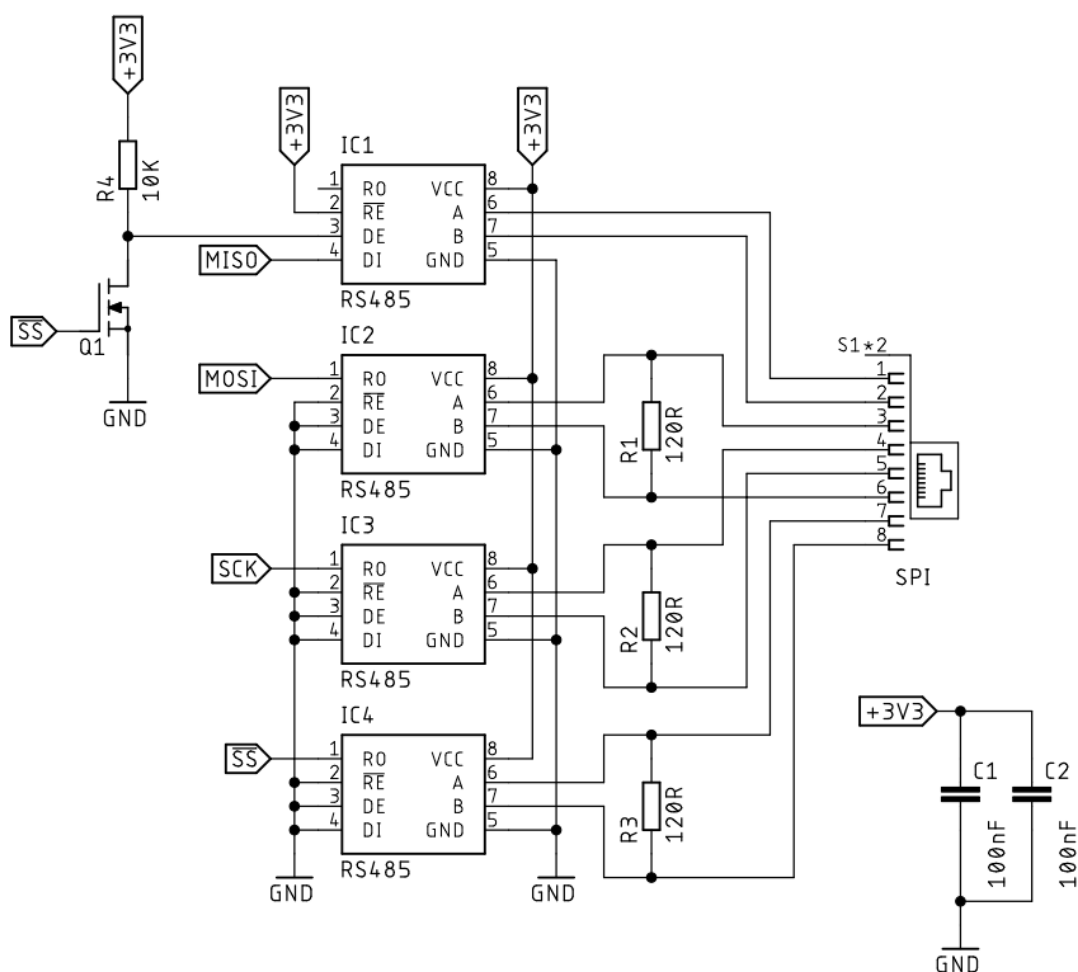
Obrázek 5.14 Schéma nastavení proudu anody

Následující tabulka udává katodový proud pro všechny kombinace výstupů při daném napájecím napětí, udržovacím napětí a konkrétních hodnotách rezistorů RA1-3. Rozsah 1-10 mA je dostačující pro všechny plánované digitrony. Udržovací napětí se může lišit mezi jednotlivými katodami v řádu několika V, což bylo v tomto případě zanedbáno.

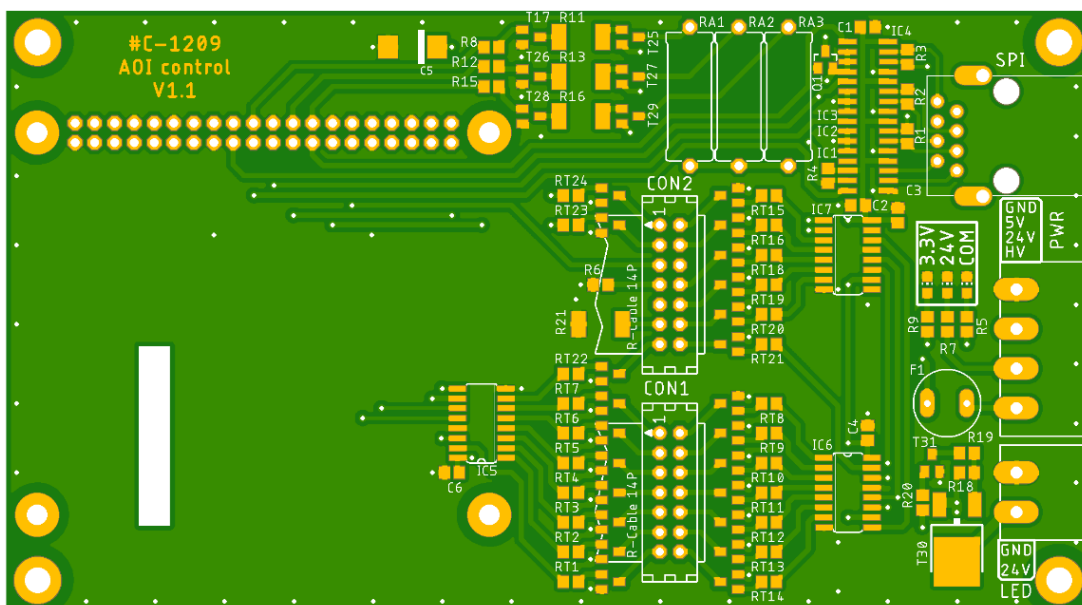
Tabulka 5.1 Možnosti nastavení proudu digitronem

A_POW_0	A_POW_1	A_POW_2	proud [mA]	napájecí napětí [V]	220
0	0	0	0	udržovací napětí [V]	130
0	0	1	1	RA1 [kΩ]	15
0	1	0	3	RA2 [kΩ]	30
0	1	1	4	RA3 [kΩ]	90
1	0	0	6		
1	0	1	7		
1	1	0	9		
1	1	1	10		

Pro komunikaci s řídicím systémem bylo vybráno rozhraní SPI (podrobnosti a zdůvodnění výběru v kapitole 5.7). Komunikace ovšem musí být robustní vůči rušení v průmyslovém prostředí a probíhat na vzdálenost až cca 1 metr. Proto implementace sběrnice využívá převodníky TTL na RS485 (ST3485ECDR). Ty umožňují signál přenášet přes RJ45 kabel se stíněnými rozdílovými páry vodičů. Vodiče signálu MISO ze všech zařízení jsou ovšem na straně řídicího systému spojeny do jednoho převodníku, a proto je nutné výstupní budič IC1 deaktivovat signálem SS, pokud není toto zařízení vybráno k přenosu.



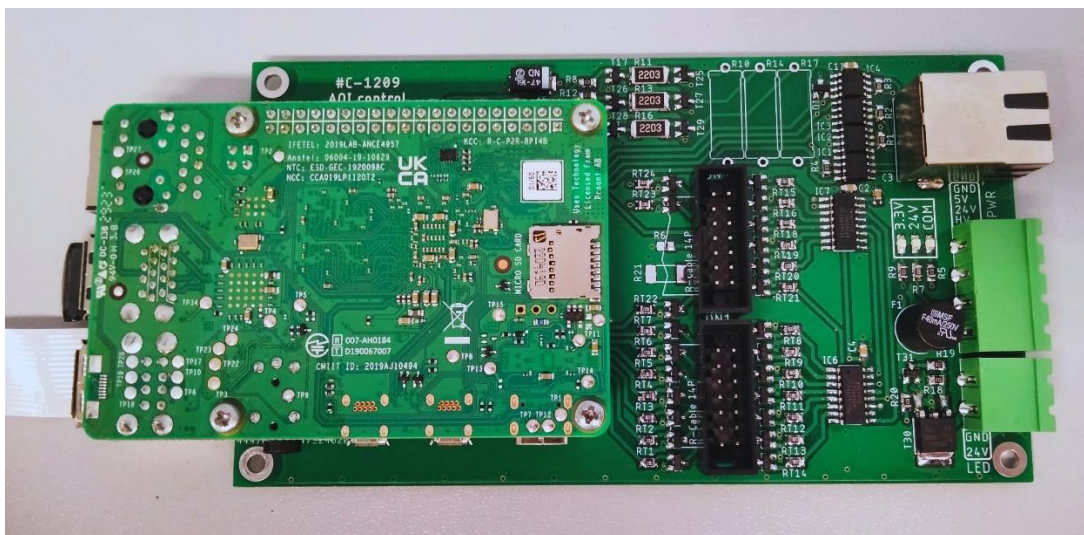
Obrázek 5.15 Schéma SPI sběrnice zařízení



Obrázek 5.16 DPS optické inspekce

5.4.3 Výroba DPS optické inspekce

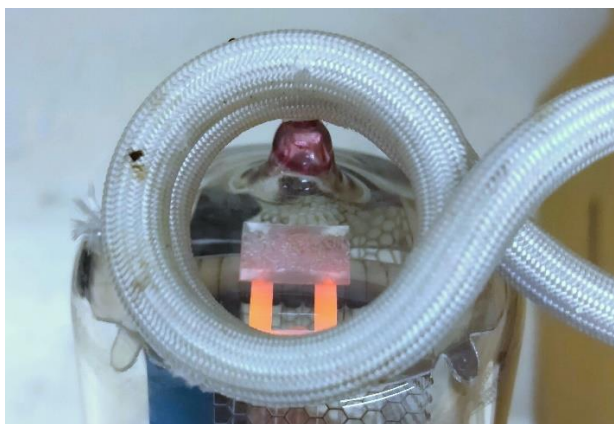
DPS byla vyrobena v JLCPCB a osazena ručně. Raspberry je k ní připojeno pomocí kolíkové lišty a distančních sloupků. Tato sestava je namontována na spodní stranu pozice optické inspekce.



Obrázek 5.17 Fotografie DPS optické inspekce

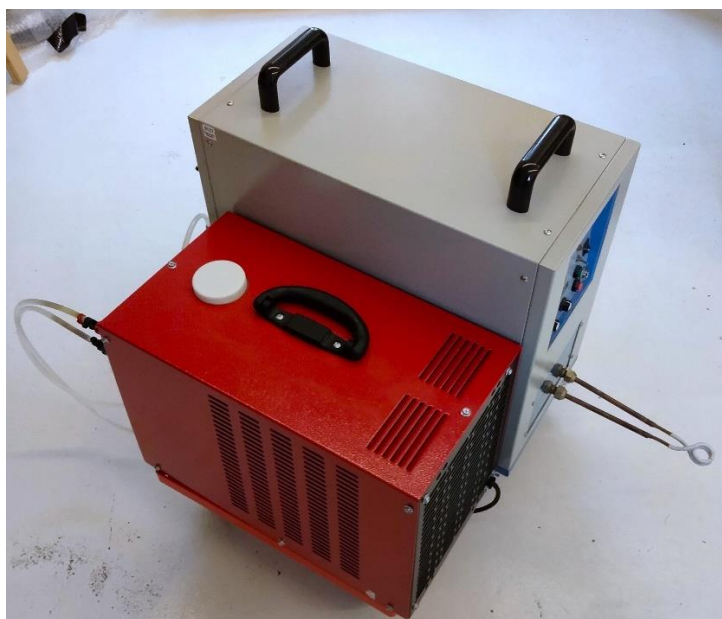
5.5 Uvolňování rtuť

Po prvním zahořovacím cyklu je nutné uvolnit v digitronu rtuť z dávkovače pomocí indukčního ohřívачe. Ohřívач je samostatná jednotka, běžně spínaná manuálně pedálem. Pro spuštění řídicím systémem byl pedál nahrazen relé. Digitron je v tomto kroku přiblížen ramenem k indukční cívce a na patřičnou dobu je spuštěn ohřev, který rozpálí dávkovač a tím uvolní rtuť ze sloučeniny na jeho povrchu.



Obrázek 5.18 Indukční ohřev dávkovače rtuť

K ohřívачi je také připojeno vodní chladicí zařízení, které je společně s ohřívачem umístěno do základny stroje. Není žádoucí, aby oba přístroje běžely neustále. Proto byly připojeny k zásuvkám na rozvaděči, spínanými stykači. Ve fázi uvolňování je nejdříve spuštěno chladicí zařízení a po krátké prodlevě indukční ohřev. Jakmile je rtuť uvolněna ve všech digitronech, jsou oba přístroje opět vypnuty.



Obrázek 5.19 Indukční ohřívач s chladičem

5.6 Uživatelské rozhraní

Stroj je spuštěn spínačem na jeho čelní straně, který spíná stykač připojující síťové napětí ke všem elektronickým součástem. Vedle něj je i tlačítko nouzového vypnutí pro zastavení chodu ramene v případě hrozícího nebezpečí.



Obrázek 5.20 Ovládací prvky čelního panelu

Hlavním ovládacím prvkem je uživatelský panel, který informuje obsluhu o chodu stroje, aktuálním stavu procesu a umožňuje nastavení parametrů i manuální ovládání. Uživatelský panel obsahuje LCD displej a rotační enkodér s tlačítkem. Zvolený barevný displej s řídícím čipem ILI9341 má rozlišení 240x320 pixelů a úhlopříčku 3,2 palce.

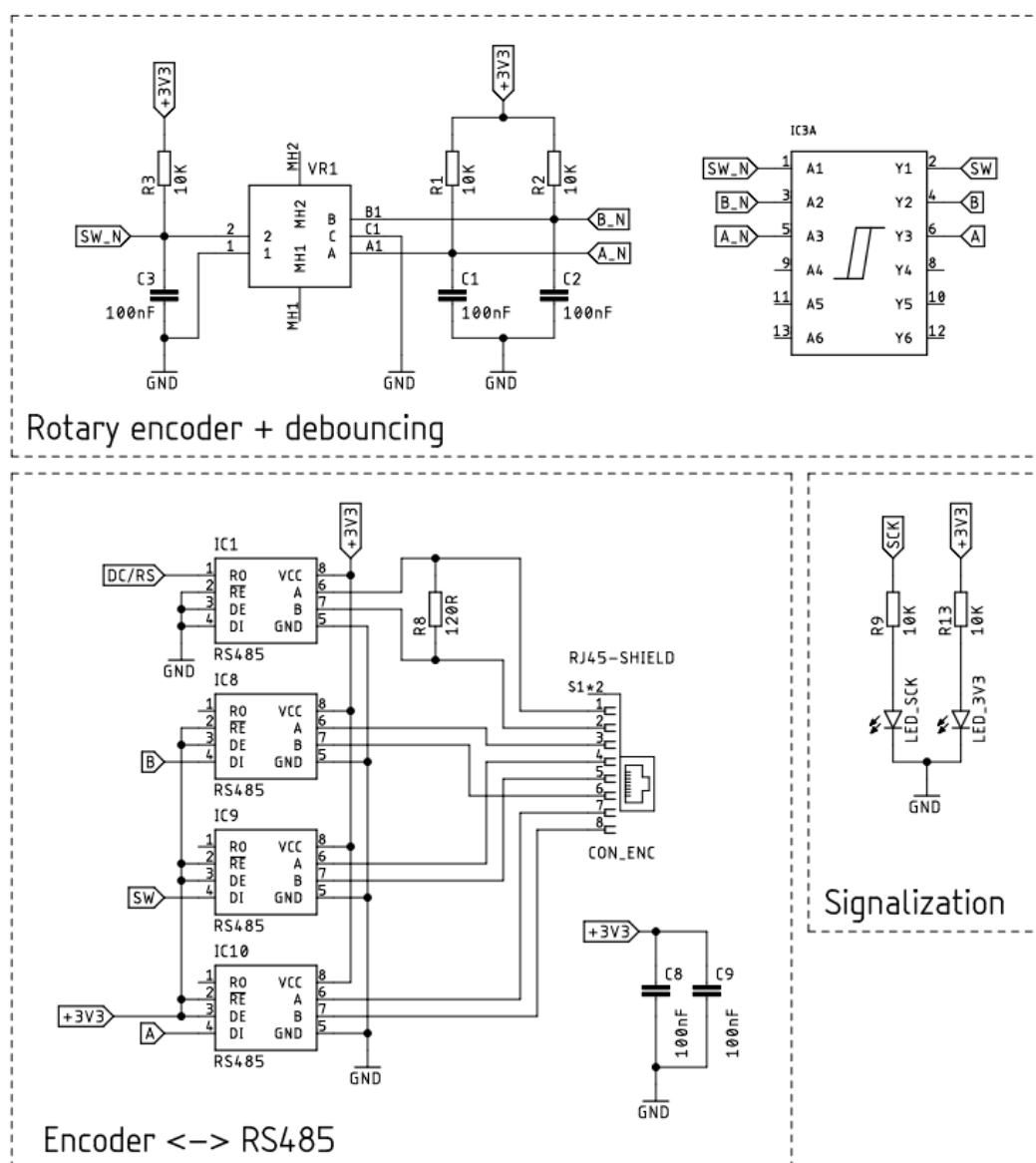


Obrázek 5.21 Model uživatelského panelu

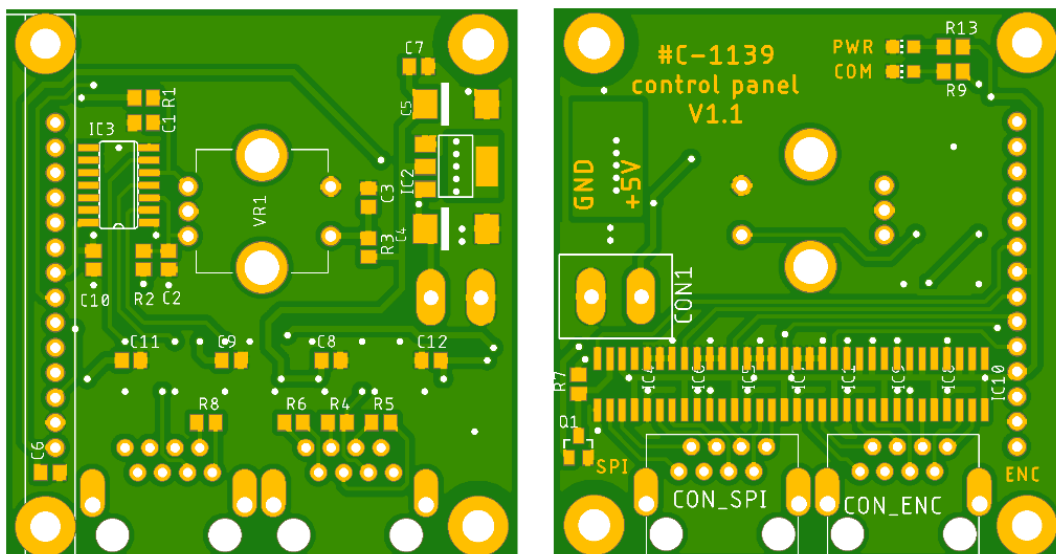
5.6.1 Návrh DPS uživatelského panelu

Panel je napájen napětím 5 V, které je regulováno na 3,3 V pomocí AZ1117H-3.3. Použitý inkrementální enkodér (VR1) má výstupy A, B a stisk tlačítka SW. Signály jsou filtrovány pomocí RC filtrů a Schmittova klopného obvodu 74HC7014 (IC3), který také zajišťuje nízkou výstupní impedanci. Poté jsou převedeny na rozdílové signály pomocí RS485 převodníků a připojeny k řídicímu systému RJ45 kabelem.

LCD displej komunikuje po SPI sběrnici, která je zapojena stejně jako sběrnice počítače optické inspekce (sekce 5.4.2) a také připojena k řídicímu systému.



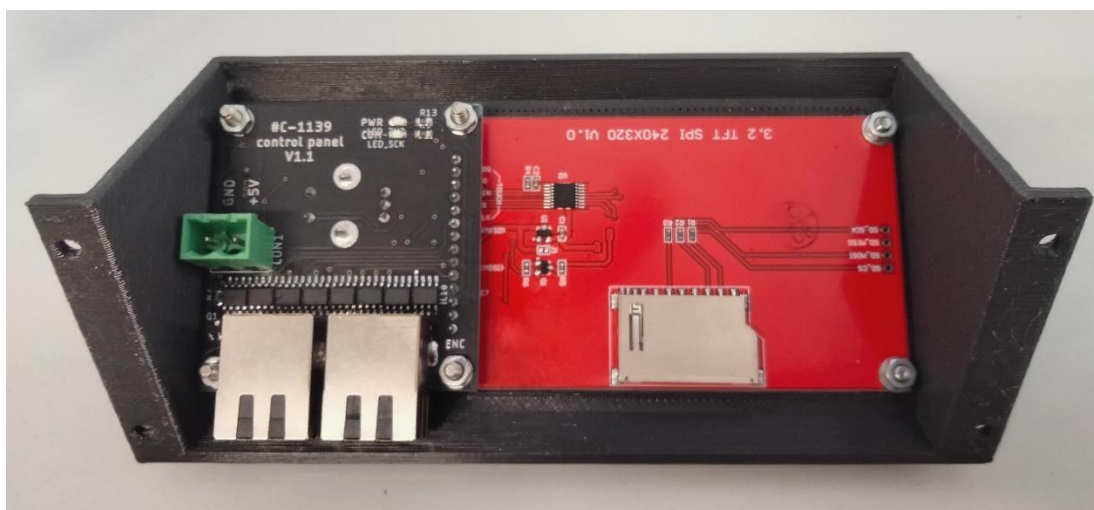
Obrázek 5.22 Schéma zpracování signálu enkodéru na uživatelském panelu



Obrázek 5.23 DPS uživatelského panelu

5.6.2 Výroba uživatelského panelu

Tělo panelu bylo vytisknuto na 3D tiskárně z PLA. Do něj byl namontován LCD displej a vyrobená DPS na distančních sloupcích.



Obrázek 5.24 Fotografie uživatelského panelu

5.7 Řídicí systém

Řídicí systém stroje má za úkol komunikovat se všemi periferiemi a ovládat chod zahořování. Pro tento účel je nejvhodnější průmyslové PLC. V tabulce 5.2 je přehled všech zařízení a jejich dostupných rozhraní, se kterými musí PLC komunikovat.

Tabulka 5.2 Zařízení a rozhraní

Zařízení	Rozhraní
Zahořovací sloupec 1 (particle photon)	I2C, SPI, UART, CAN
Zahořovací sloupec 2 (particle photon)	I2C, SPI, UART, CAN
Optická inspekce (Raspberry PI)	I2C, SPI, UART
Robotické rameno xArm 5	digitální vstupy a výstupy
LCD displej	SPI + digitální výstup 1x
Enkodér	digitální vstup 3x (interrupt)
Tlačítko nouzového vypnutí	digitální vstup 1x
Relé vodního chladicího zařízení	digitální výstup 1x
Relé indukčního ohříváče	digitální výstup 1x
Spuštění indukčního ohříváče	digitální výstup 1x

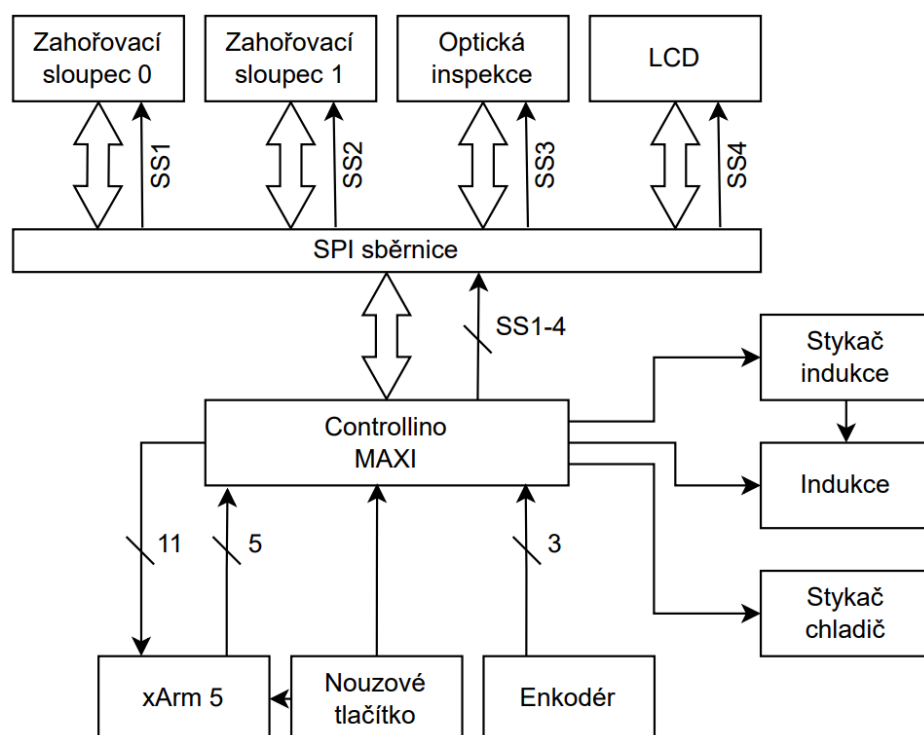
Všechna zařízení se sériovou sběrnici podporují SPI, a proto byla vybrána právě tato. Nevýhodou je nutnost využití samostatných signálů pro výběr zařízení, což není při nízkém počtu problematické. Případně by bylo možné přidat dekodér. Sběrnice je také synchronní a rychlejší než I2C nebo UART.

Komunikace s robotickým ramenem probíhá po univerzálních digitálních vstupech a výstupech. Rameno má za úkol sahat do mnoha různých beden, je třeba jej kalibrovat a zjišťovat stav jednotlivých úkonů. Řízení chodu programu není úplně triviální, a proto bylo vytvořeno jednoduché paralelní rozhraní, využívající 5 vstupů a 11 výstupů PLC, blíže popsáno v kapitole 6.1.1.

Celkem je tedy třeba mít na PLC k dispozici SPI sběrnici, 9 digitálních vstupů a 19 digitálních výstupů. Na základě těchto požadavků bylo vybráno PLC Controllino MAXI, založené na platformě arduino. Disponuje mimo jiné SPI sběrnici a 42 digitálními vstupy/výstupy, které je možné připojit na svorkovnici s logickými úrovněmi 12/24 V nebo konektor s úrovněmi 5 V. Výhodou je nízká cena a dostupnost, flexibilita a velké množství knihoven, včetně knihovny pro LCD čipy ILI9341. Případné rozšíření je možné výměnou za model Controllino MEGA bez nutnosti změny kódu nebo připojeného hardware.



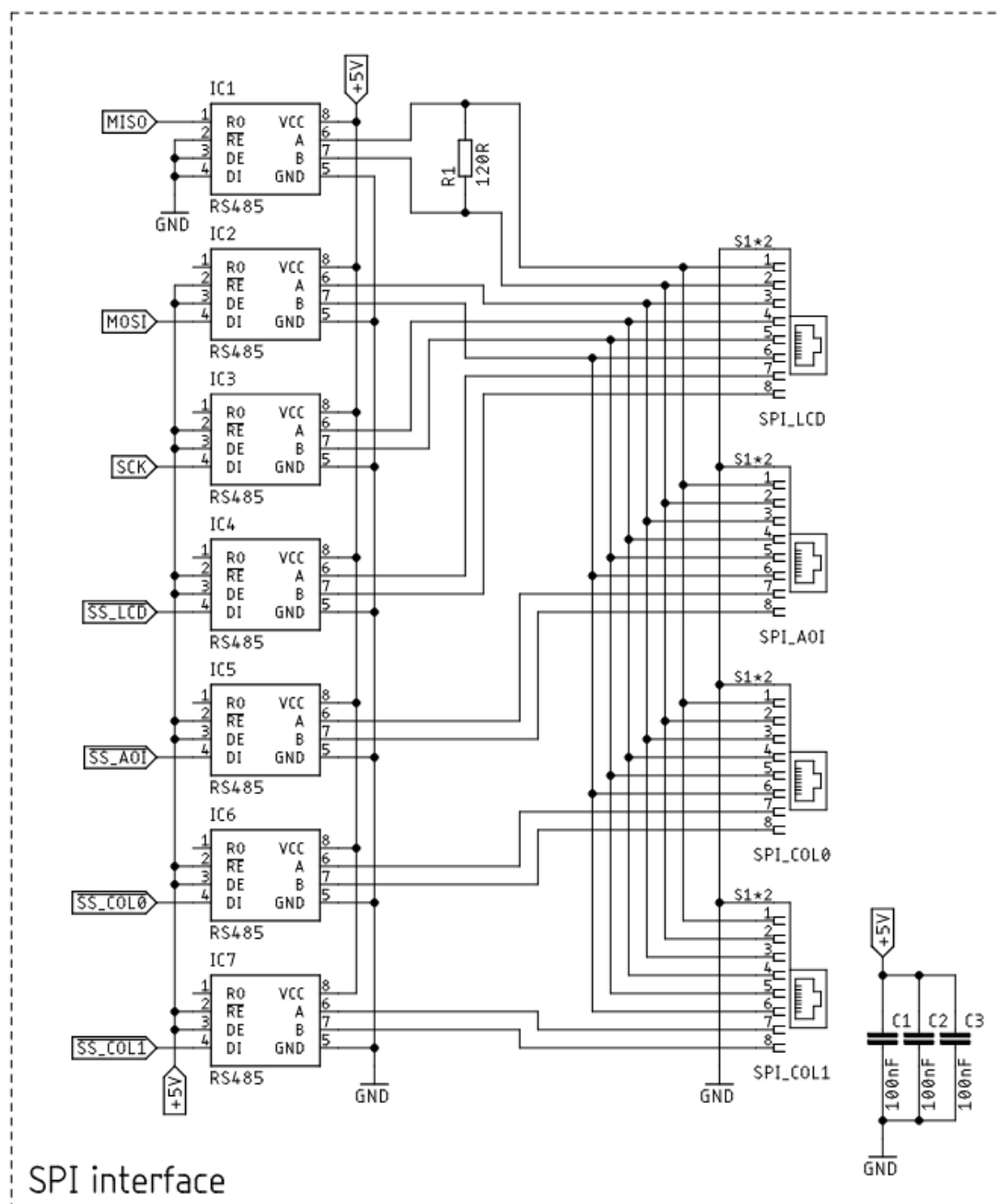
Obrázek 5.25 PLC Controllino MAXI [8]



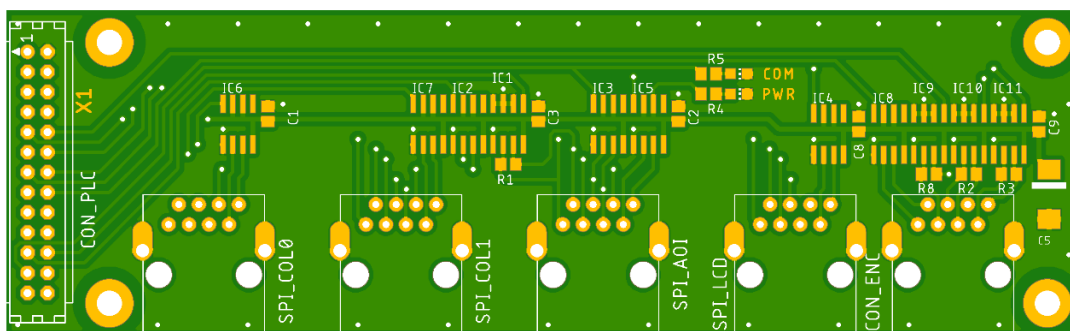
Obrázek 5.26 Diagram propojení zařízení s PLC

5.7.1 Návrh DPS komunikace

SPI sběrnici PLC s 5 V napěťovými úrovněmi je třeba připojit ke čtyřem zařízením pomocí rozdílových signálů RS485. K tomuto účelu byla vytvořena DPS komunikace, která navíc převádí i rozdílové signály z enkodéru. Použité převodníky jsou typu ST485ECDR. DPS je k PLC je připojena na konektory X1 a X2 pomocí plochého 24 žilového kabelu, který ji také napájí.

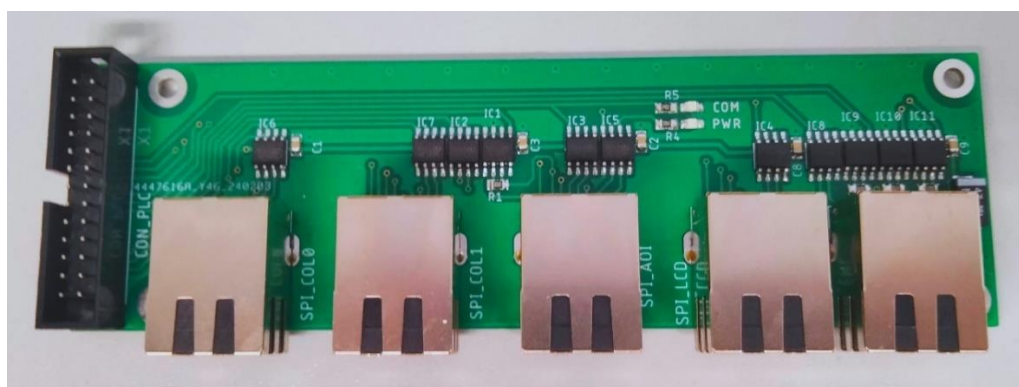


Obrázek 5.27 Schéma části DPS komunikace



Obrázek 5.28 DPS komunikace

5.7.2 Výroba DPS komunikace



Obrázek 5.29 Fotografie DPS komunikace

5.7.3 Návrh rozvaděče

PLC bylo zabudováno do rozvaděče spolu s elektronikou pro napájení a řízení stroje. Byla k němu připojena DPS komunikace, řídicí modul ramene, AC-DC napájecí měniče a další elektronické komponenty. Odhadovaný maximální příkon všech komponent je 1,5 kW, a tak stačilo jednofázové napájení. Přívod byl připojen přes 10 A jistič ke stykači, který izoluje systém ve vypnutém stavu. Otočením spínače na čelní straně stroje je stykač sepnut a napájení přivedeno na měniče a ostatní elektroniku. Kompletní schéma rozvaděče lze nalézt v elektronické příloze.

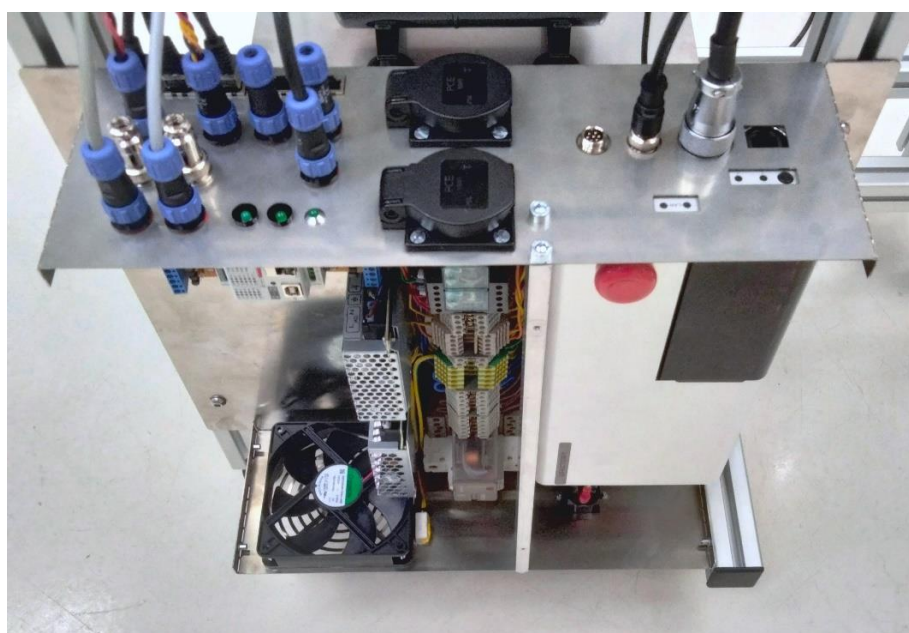
Rozvaděč byl sestaven ze dvou dílů (tělo a kryt). Strany těla byly spojeny hliníkovou tyčí pro vyšší pevnost. Na přední straně se nachází otvory pro napájecí a komunikační konektory. Ve spodní straně jsou otvory pro montáž DIN lišt a komponentů. Na zadní straně je otvor pro ventilátor, který zajišťuje chlazení komponent, a napájecí konektor stroje.



Obrázek 5.30 Model rozvaděče

5.7.4 Výroba rozvaděče

Nerezové díly dodal výrobce ASKMT v tloušťce 1 mm. Ty byly následně ohnuty, byly vloženy nýťovací matice a namontována spojovací tyč. Do vzniklého těla rozvaděče byly přišroubovány DIN lišty a elektrické komponenty. Většina kabeláže byla provedena pomocí krimpovacích dutinek a šroubovacích terminálů nebo faston konektorů. Pájené spoje byly opatřeny smršťovacími bužírkami.



Obrázek 5.31 Fotografie rozvaděče

6. VÝVOJ SOFTWARE

6.1 Robotické rameno

Robotické rameno xArm 5 je řízeno přiloženým modulem. V modulu byl vytvořen program v jazyce Python, který je spuštěn po startu externím vstupem z PLC. Běh programu signalizuje výstup, který periodicky mění svoji hodnotu (watchdog). Tento program má za úkol komunikovat s PLC, řídit pohyb ramene a ukládat referenční body v jeho pracovním prostoru.

6.1.1 Komunikace

Komunikace mezi PLC a řídicím modulem ramene probíhá po paralelní sběrnici, jejíž časování a průběh jsou znázorněny na následujícím obrázku. Pro přenos bajtu je vyhrazeno 8 datových vodičů a dalších 6 přenos řídí.



Obrázek 6.1 Časování sběrnice řídicího modulu ramene

Sběrnice je synchronní, časována hodinovým signálem clk z PLC. Rameno potvrzuje přijetí dat signálem ack. Zpráva sestává z příkazu a až dvou parametrů. Po přijetí celé zprávy rameno signalizuje správnost dat signálem „příkaz ok“ a po dobu vykonávání příkazu je signál „vykonávání“ v log. úrovni 1. Po vykonání je návratová hodnota platná a komunikace je ukončena.

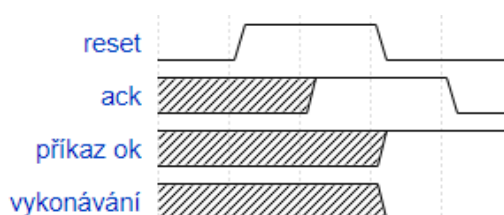
Příkazy jsou sepsány v tabulce 6.1. Jako příklad analyzujeme příkaz pro pohyb. Příkaz má parametr pozice, např. 0 pro první skladovací bednu. Druhý parametr udává jeden z 20 digitronů v této bedně. Po přijetí tohoto příkazu rameno najede na danou pozici a signalizuje dokončení. Návratová hodnota zde není využita, vždy je předpokládán úspěch.

Příkazem otočení lze natočit koncový bod o daný úhel. Příkazy pro uchopení a puštění digitronu ovládají pneumatický uchopovač. Typ digitronu je možné nastavit na R nebo F (rameno patřičně upraví nastavení výšky uchopování) a pomocí kalibračních příkazů lze měnit referenční body jednotlivých pozic.

Tabulka 6.1 Příkazy ramene

bajt 0 příkaz	bajt 1 parametr	bajt 2 parametr	návratová hodnota
pohyb	pozice	místo v pozici	-
otočení	úhel	-	-
uchopení	-	-	úspěch
puštění	-	-	-
změna typu digitronu	type	-	-
start kalibrace	pozice	referenční bod	-
stop kalibrace	-	-	-
změna kalibrační hodnoty	osa	vzdálenost	-

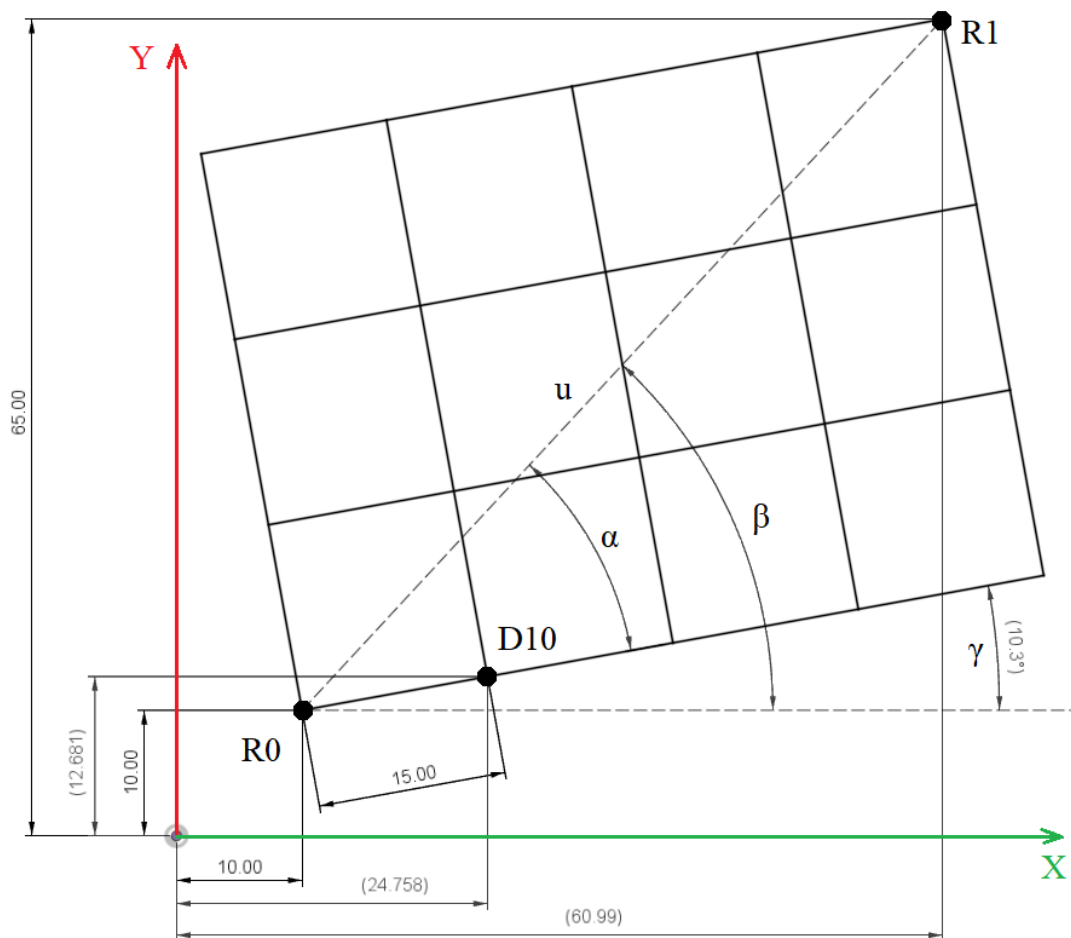
V případě přijetí neplatných dat (např. neznámého příkazu) rameno signalizuje chybu log. úrovní 0 signálu „příkaz ok“. V takovém případě PLC zaznamená chybu a sběrnici resetuje. Časování resetovací sekvence je na následujícím obrázku. Po přijetí resetu rameno uvede program pro komunikaci do výchozího stavu.



Obrázek 6.2 Časování resetu sběrnice

6.1.2 Výpočet pozic digitronů dle referenčních bodů

Rameno má ve svém pracovním prostoru několik pozic s digitrony (6 beden a 2 zahořovací sloupce) uspořádanými v mřížce. Tyto pozice se mohou vůči souřadnému systému ramene při přesouvání nebo výměně beden mírně posunout, a proto je nutné mít možnost jejich pozici kalibrovat. Pro usnadnění tohoto úkolu je každá pozice charakterizována dvěma referenčními body v jejich rozích a počtem digitronů v obou osách. Z těchto informací rameno dopočítá při změně referenčních bodů pozice jednotlivých digitronů v jeho pracovním prostoru.



Obrázek 6.3 Pozicování bedny v prostoru ramene

Obrázek 6.3 ukazuje příklad pozicování bedny s kapacitou 5x4 digitronů pomocí referenčních bodů R0 a R1. Pozice středů digitronů se nachází v průsečících mřížky. Červená a zelená osa určují souřadný systém ramene. Prvním krokem ke zjištění pozic digitronů v tomto systému je výpočet délky úhlopříčky bedny dle pozic referenčních bodů.

$$u = \sqrt{(R1_x - R0_x)^2 + (R1_y - R0_y)^2} = \sqrt{(60,99 - 10)^2 + (65 - 10)^2} = 75 \quad (6.1)$$

Z délky úhlopříčky (u) a poměru rozměrů mřížky (r) je možné dopočítat délky stran bedny (B).

$$B_x = \frac{u}{\sqrt{1+r^2}} = \frac{75}{\sqrt{1+\left(\frac{4-1}{5-1}\right)^2}} = 60 \quad (6.2)$$

$$B_y = B_x * r = 60 * \frac{4-1}{5-1} = 45 \quad (6.3)$$

Úhel natočení bedny (γ) je dán rozdílem úhlů α a β .

$$\gamma = \beta - \alpha = \text{atan2}\left(\frac{R1_y - R0_y}{R1_x - R0_x}\right) - \text{atan2}\left(\frac{B_y}{B_z}\right) = \text{atan2}\left(\frac{65-10}{60,99-10}\right) - \text{atan2}\left(\frac{45}{60}\right) = 10,3^\circ \quad (6.4)$$

Následně lze zjistit hodnoty, které je třeba přičíst k pozici referenčního bodu R0 při pohybu v mřížce o jeden krok v ose x nebo y (A). Počet digitronů v mřížce je značen P.

$$A_{x/x} = \cos(\gamma) * \frac{B_x}{P_x-1} = \cos(10,3^\circ) * \frac{60}{5-1} = 14,758 \quad (6.5)$$

$$A_{x/y} = -\sin(\gamma) * \frac{B_y}{P_y-1} = -\sin(10,3^\circ) * \frac{45}{4-1} = 2,681 \quad (6.6)$$

$$A_{y/x} = \sin(\gamma) * \frac{B_x}{P_x-1} = \sin(10,3^\circ) * \frac{60}{5-1} = 2,681 \quad (6.7)$$

$$A_{y/y} = \cos(\gamma) * \frac{B_y}{P_y-1} = \cos(10,3^\circ) * \frac{45}{4-1} = 14,758 \quad (6.8)$$

Závěrem lze sestavit rovnice pro výpočet pozice digitronu D na základě pozice v bedně P, referenčního bodu R0 a hodnot A (uvedený příklad je pro pozici P = (1,0)).

$$D_x = R0_x + A_{x/x} * P_x + A_{x/y} * P_y = 10 + 14,758 * 1 + 2,681 * 0 = 24,758 \quad (6.9)$$

$$D_y = R0_y + A_{y/x} * P_x + A_{y/y} * P_y = 10 + 2,681 * 1 + 14,758 * 0 = 12,681 \quad (6.10)$$

Lze vidět, že dopočítaná pozice D10 = (24,758; 12,681) souhlasí s původním nákresem.

6.1.3 Kalibrace referenčních bodů

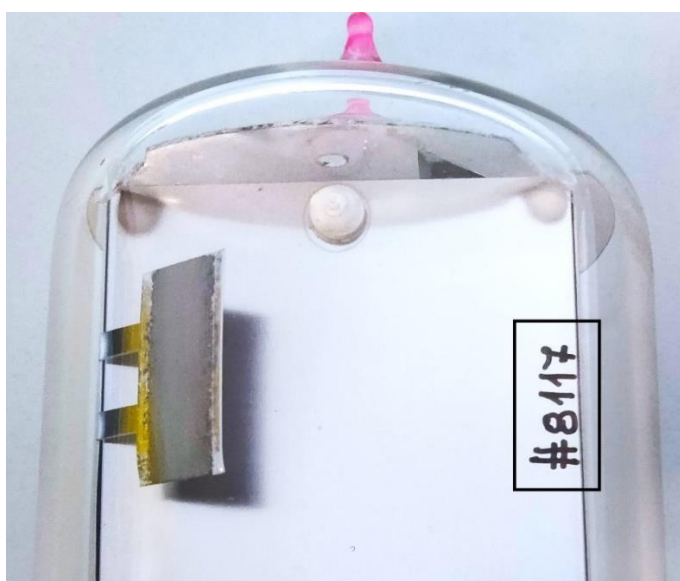
Referenční body je možné změnit pomocí příkazů kalibrace. Ty jsou dostupné na uživatelském panelu. Nejdříve je spuštěna kalibrace daného bodu příkazem start, který navede rameno na referenční bod. Poté je bod upraven posouváním ramene o malé kroky a kalibrace je ukončena. Pozice digitronů jsou přepočítány dle nových referencí. Body jsou ukládány do souboru v řídicím modulu ramene a při restartu systému jsou z něj načteny.

6.2 Automatická optická inspekce

Na vybraný počítač Raspberry Pi 4 Model B byl nainstalován oficiální operační systém, založený na distribuci Linux Debian. Počítač umožňuje připojení pomocí VNC a práci na vzdálené ploše bez nutnosti připojení periférií. Díky tomu jej lze jednoduše programovat přímo ve stroji. Pro program optické inspekce byl vybrán jazyk Python díky velkému množství dostupných knihoven, zejména k řízení kamerového modulu a zpracování obrazu.

6.2.1 Rozpoznávání sériových čísel

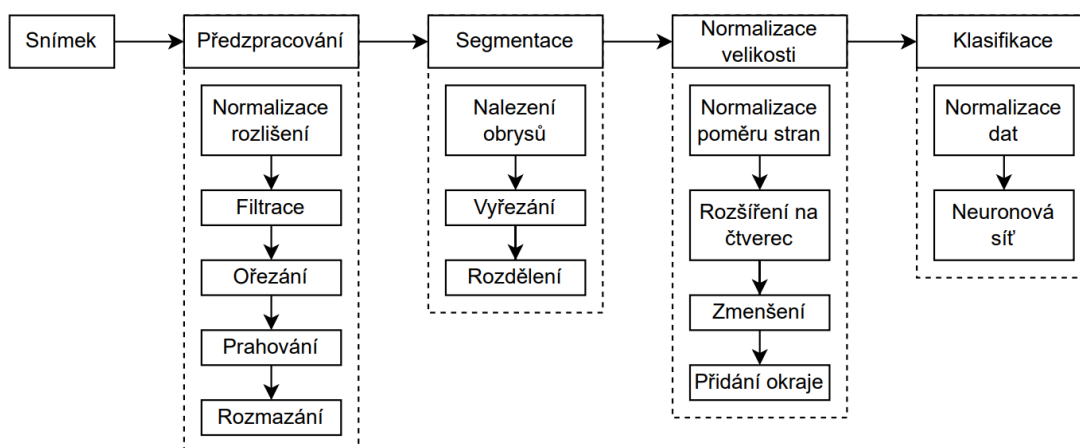
Hlavním úkolem počítače je rozpoznat ručně psané sériové číslo na zadní straně digitronu.



Obrázek 6.4 Sériové číslo na digitronu

Existuje několik knihoven pro rozpoznávání textu z obrázků, jako např. Tesseract OCR a Karas OCR. Při testování těchto knihoven ovšem vyvstalo hned několik problémů. Modely neuronových sítí jsou často naučeny na strojově psaný text, který ve většině případů rozpoznají, ale s ručně psaným textem si neporadí. V této aplikaci je třeba rozpoznávat pouze číslice, ale existující řešení rozpoznávají i písmena, což vede k menší úspěšnosti, než pokud by byly určeny jen pro číslice.

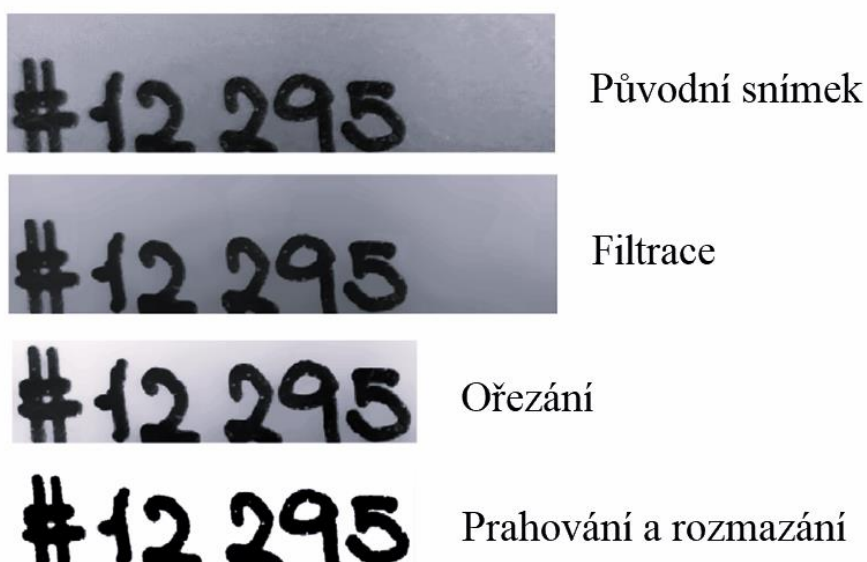
Z těchto důvodů byl vytvořen vlastní algoritmus pro rozpoznávání čísel. Program byl napsán v jazyce Python za pomoci knihoven OpenCV pro zpracování obrazu a Keras pro tvorbu neuronových sítí. Řetězec zpracování snímku je na následujícím obrázku.



Obrázek 6.5 Řetězec zpracování snímku

6.2.1.1 Předzpracování

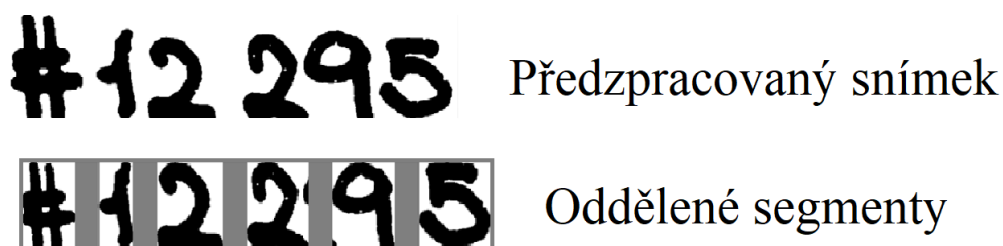
Úkolem předzpracování je sjednotit vstupní obraz a zvýšit kontrast textu s pozadím pro vyšší úspěšnost segmentace. Prvním krokem je normalizace rozlišení, jelikož řada následujících funkcí je na rozlišení závislá. Filtrace pomocí nelokálního průměrování má za úkol odstranit šum a vyhladit případné šmouhy nebo prach na digitronu. Dále je nutné obraz ořezat, protože sériová čísla mohou mít různou délku a nemusí vyplňovat celý snímek. Při prahování je snímek rozdělen na několik stejně velkých částí, které jsou prahovány samostatně a následně složeny. Tak je možné úspěšně prahovat i snímek s proměnným jasnem. Posledním krokem je mírné rozmazání prahovaného obrazu pro vyhlazení hran.



Obrázek 6.6 Předzpracování snímku

6.2.1.2 Segmentace

Předzpracovaný snímek obsahuje černý text na bílém pozadí. V tomto obrazu je možné nalézt obrysy jednotlivých číslic a ty vyřezat. Problémem mohou být dotýkající se číslice, které by byly klasifikovány jako jediná. Proto je po vyřezání části obrazu ještě kontrolován poměr stran dané části. Výřez s příliš velkým poměrem nejspíše obsahuje více než jednu číslici, a proto je rozdělen na více částí. Tím vzniknou jednotlivé segmenty obrazu, každý s jednou číslicí nebo symbolem #.



Obrázek 6.7 Segmentace snímku

6.2.1.3 Normalizace velikosti

Jelikož každý člověk má unikátní styl písma, je nutné normalizovat poměr stran číslic. V tomto kroku ovšem není známo, jaká číslice se v segmentu nachází. Proto je poměr upraven jednou z normalizačních funkcí. Bylo testováno 5 funkcí uvedených v následující tabulce, kde r udává původní poměr stran.

Tabulka 6.2 Normalizační funkce poměru stran

Normalizační funkce	Nový poměr stran
ponechání poměru	r
2. odmocnina	$\sqrt{r}$
3. odmocnina	$\sqrt[3]{r}$
sinus	$\sqrt{\sin\left(\frac{\pi}{2} * r\right)}$
1:1	1

Experimentálně bylo zjištěno, že nejlepší výsledky pro styl písma na digitronech dávají funkce 3. odmocnina, sinus a 1:1. Proto jsou při rozpoznávání použity tyto 3 funkce a porovnány jejich výsledky. Za správnou je považována číslice s nejčastější klasifikací, nebo v případě rozdílné klasifikace všech funkcí je výsledek považován za neplatný.

Po normalizaci poměru stran je obraz rozšířen na čtverec zaplněním menší strany bílou barvou. Je zmenšen na vstupní velikost pro neuronovou síť a je přidán stejný okraj jako v původním souboru snímků, na který byla síť naučena.

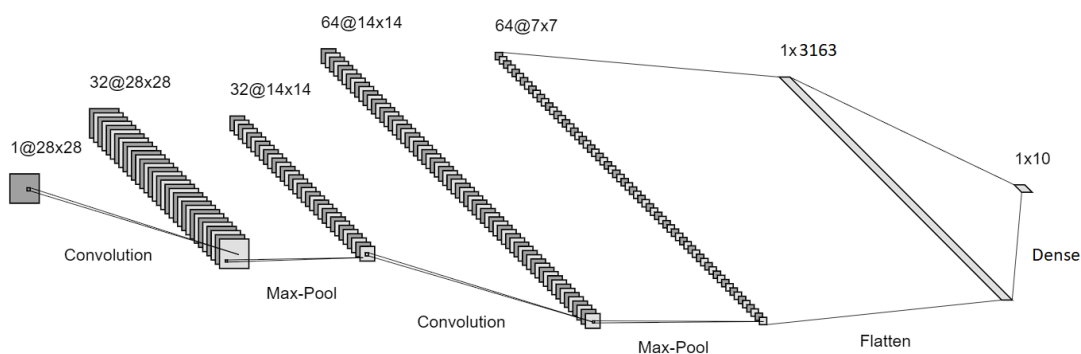


Obrázek 6.8 Normalizace segmentu

6.2.1.4 Klasifikace

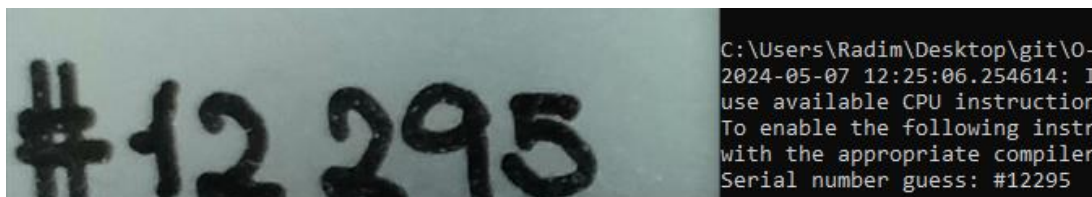
Nejdříve je nutné převést data na správný datový typ (float) a rozměry pole. Poté je možné jej předat do předpřipraveného modelu neuronové sítě, jejímž výstupem je klasifikace do jedné z tříd 0-9. Klasifikací každého ze segmentů vznikne série čísel v obrazu. První znak (#) je ignorován a ze zbylých číslic je sestaveno sériové číslo digitronu.

Anotované soubory dat pro učení neuronové sítě byly získány ze zdroje [9], který obsahuje ručně psané číslice a ze zdroje [10], který obsahuje strojově augmentované číslice v několika variantách. Z těchto souborů byly vybrány vzorky, které se nejvíce podobaly stylu písma na digitronech a následně byly zpracovány na standardní formát (28x28 px, černé číslice na bílém pozadí, okraj 2 px). Výsledkem je cca 100 000 vzorků číslic. Neuronová síť vytvořená v rozhraní Keras má následující podobu.



Obrázek 6.9 Struktura neuronové sítě

Učením po 10 epoch model dosáhl přesnosti 99 % na učícím souboru dat a 98 % na validačním souboru, který byl vytvořen oddělením náhodných 20 % z původního souboru.



Obrázek 6.10 Výpis programu při klasifikaci sériového čísla

6.2.2 Komunikace

Počítač komunikuje s PLC po sběrnici SPI v režimu slave. SPI řadič ovšem slave režim nepodporuje, a proto byla využita knihovna k emulaci sběrnice pomocí GPIO pinů. PLC zahajuje komunikaci posláním prvního bajtu, udávajícím příkaz, který má být na počítači vykonán. Přehled všech příkazů je v následující tabulce.

Tabulka 6.3 Příkazy AOI

Příkaz	Význam	Vrací
0,255	nepoužito	0xFE
1	výčet návratové hodnoty	návratová hodnota
2	kontrola komunikace	0x5A
3	rozpoznat sériové číslo	číslice sériového čísla / 0xFE
4	kontrola vykonávání	0xAA / 0x55
5	zapnutí osvětlení	-
6	vypnutí osvětlení	-
7	otevření ventilu	-
8	zavření ventilu	-

Příkazy s čísly 0 a 255 jsou nepoužity, protože tyto hodnoty počítač může přijmout i při elektronické chybě a je tak možné ji detekovat. Příkaz s číslem 1 vyčítá návratovou hodnotu předchozího příkazu. Ta nemůže být vyčtena hned při přijetí příkazu, protože komunikace probíhá obousměrně současně a je třeba, aby počítač měl čas k vychystání návratové hodnoty. Pomocí příkazu 2 je kontrolována funkčnost komunikace. Vždy vrací specifickou hodnotu 0x5A (hex), kterou je těžké zaměnit. Příkaz rozpoznání sériového čísla odstartuje proces zachycení snímku z kamery, zpracování a rozpoznání. Během rozpoznávání PLC kontroluje vykonávání pomocí příkazu 4, na který počítač vrací odpověď 0xAA (vykonávání probíhá) nebo 0x55 (vykonávání dokončeno). Po rozpoznání počítač signalizuje dokončení příkazu a PLC vyčte výsledek opakovaným

použitím příkazu 1. Počítač signalizuje poslední číslici vrácením hodnoty 0xFE. Příkazy 5 a 6 ovládají osvětlení pozice a příkazy 7 a 8 ovládají pneumatický ventil připojovacího systému.

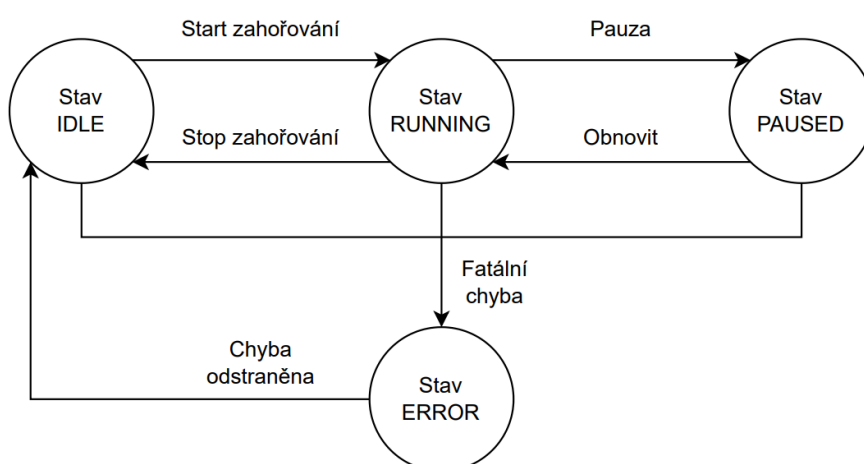
6.3 Řídicí systém

Vybrané PLC Controllino MAXI bylo naprogramováno za pomoci Arduino IDE v jazyce C++. Funkcionalita byla rozdělena do několika dílčích knihoven popsanych v následujících kapitolách.

6.3.1 Běh programu a hlavní smyčka

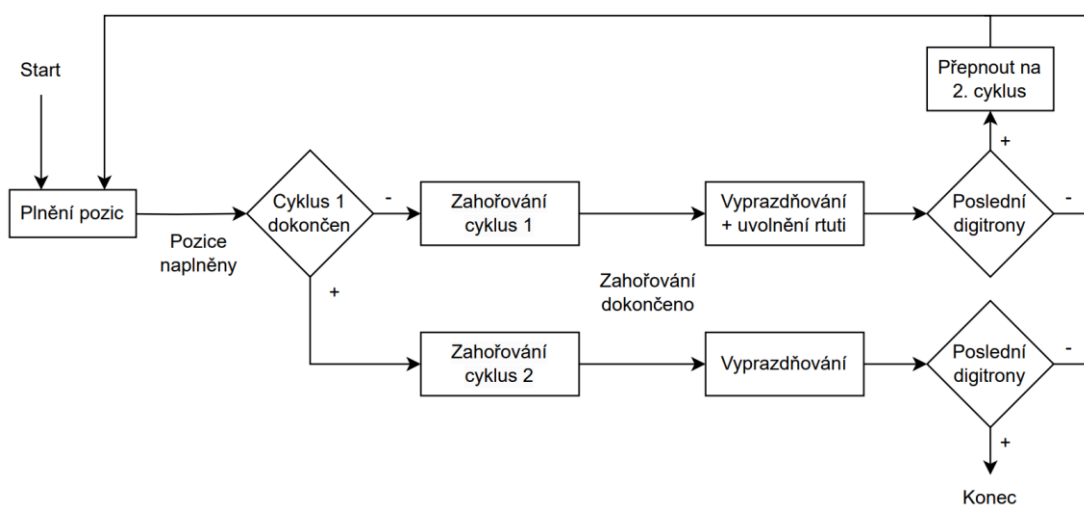
Program nejdříve inicializuje všechny knihovny a vstoupí do hlavní smyčky. Ta volá stavový automat stroje a funkce jednotlivých knihoven, obsahující stavové automaty sběrnic a všechnu potřebnou funkcionalitu. Program používá pro vstupně výstupní operace a čekání výhradně přerušeni nebo dotazování. Běh tedy není nikdy blokován a uživatelské rozhraní zůstává responzivní.

Stroj byl koncipován jako stavový automat se čtyřmi hlavními stavy. Ve stavu IDLE se stroj nachází po spuštění a čeká na akci uživatele. Pokud uživatel spustí zahořování, stroj přechází do stavu RUNNING a v něm setrvává, dokud není zahořování dokončeno nebo zrušeno uživatelem. Zahořování je možné přerušit a stroj uvést do stavu PAUSED, kdy může uživatel např. upravit orientaci digitronů nebo provést jiné akce bez nutnosti zahořování úplně vypnout. V případě fatální chyby, kdy stroj nemůže pokračovat v práci a vyžaduje zásah technika přechází do stavu ERROR. Příkladem fatální chyby je výpadek komunikace s důležitou součástí. Po detekci odstranění chyby nebo opravě technikem je stroj opět provozuschopný.



Obrázek 6.11 Hlavní stavový automat stroje

Ve stavu RUNNING jsou vykonávány jednotlivé operace procesu zahořování. První z nich je naplnění všech deseti pozic na zahořovacích sloupcích. V této fázi je každé pozici přiřazeno sériové číslo digitronu rozpoznané kamerou. Po naplnění začíná první zahořovací cyklus. Cykly řídí elektronika sloupců a PLC pouze kontroluje jeho stav. Po zahoření prvním cyklem jsou digitrony přesunuty zpět do beden. Během přesunu je v nich uvolněna rtuť. Po zahoření posledních digitronů prvním cyklem je proces přepnut na druhý cyklus a po zahoření druhým cyklem je proces ukončen. Stroj přechází do stavu IDLE a obsluha jej může vyprázdnit.

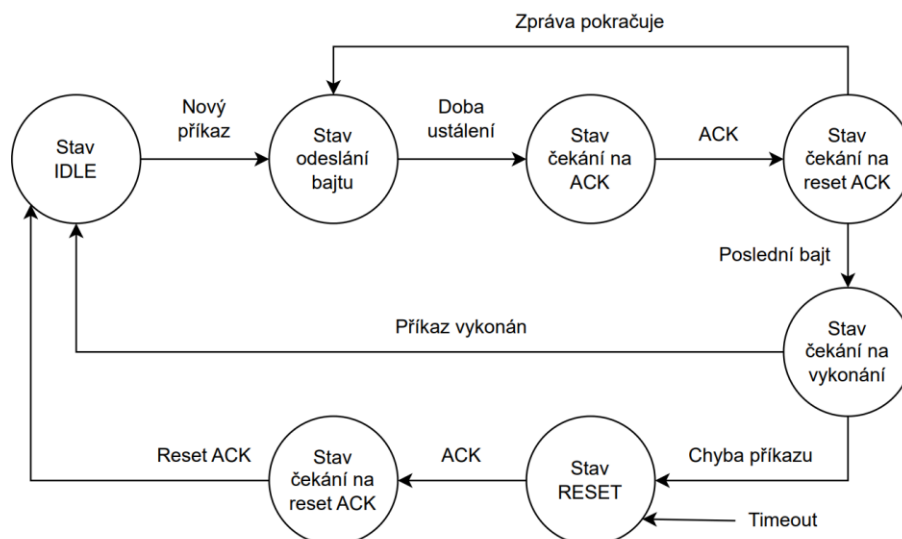


Obrázek 6.12 Diagram procesu zahořování

Diagramy procesů plnění pozic, vyprazdňování pozic a uvolnění rtuti jsou velké, a proto zde nejsou uvedeny. Lze je najít v elektronické příloze.

6.3.2 Komunikace s ramenem

Komunikace probíhá po paralelní sběrnici popsané blíže v kapitole 6.1.1. PLC tuto sběrnici řídí dle následujícího stavového automatu.

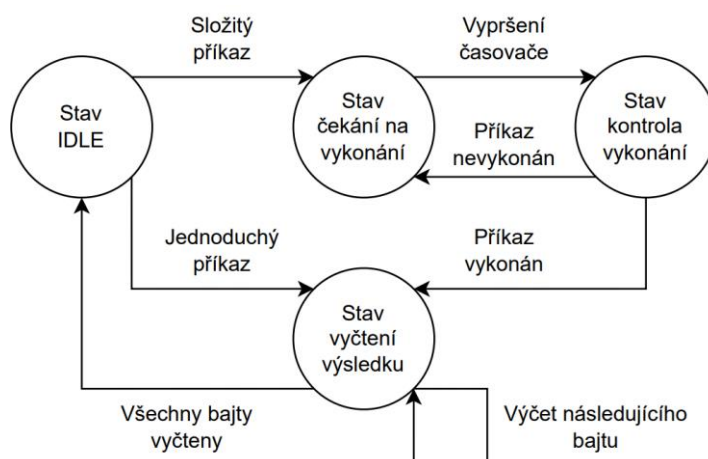


Obrázek 6.13 Stavový automat sběrnice ramene

Sběrnice se po startu nachází ve stavu IDLE, kde čeká, až nadřazený program odešle nový příkaz rameni. Po předání nového příkazu přechází do stavu odesílání bajtu, kde nastaví výstupní datové vodiče na příslušné hodnoty a čeká po přednastavenou dobu na ustálení přechodných dějů na sběrnici. Poté nastaví hodinový signál CLK na log. úroveň 1 a čeká, až rameno potvrdí příjem bajtu nastavením ACK. Po nastavení ACK resetuje CLK a čeká na reset ACK. Po dokončení potvrzení je odeslán následující bajt, dokud není přenesena celá zpráva. Po přenesení posledního bajtu sběrnice přechází do stavu čekání na vykonání, ve kterém by mělo rameno signalizovat správnost přeneseného příkazu signálem „příkaz ok“. Pokud tomu tak není, nebo došlo v kterémkoliv z kroků čekání k vypršení bezpečnostního časovače (Timeout), sběrnice je resetována. Při správném přenosu příkazu sběrnice vyčká na vykonání, vyčte návratovou hodnotu a vrací se zpět do stavu IDLE.

6.3.3 Komunikace s počítačem optické inspekce

Komunikace probíhá po SPI sběrnici v plném duplexu. Příkazy jsou popsány v kapitole 6.2.2. Sběrnice je řízena následujícím stavovým automatem.



Obrázek 6.14 Stavový automat sběrnice optické inspekce

Sběrnice se po startu nachází ve stavu IDLE, kde čeká na odeslání příkazu. Příkazy se dělí na jednoduché a složité dle toho, jestli je třeba čekat na jejich vykonání. Příkladem jednoduchého příkazu je kontrola komunikace, kdy má počítač po přijetí příkazu hned vychystat specifickou hodnotu pro vyčtení. Složitým příkazem je např. rozpoznání sériového čísla, které může trvat i několik vteřin. Během rozpoznávání se sběrnice nachází ve stavu čekání na vykonání, kde periodicky dle časovače posílá počítači příkaz pro kontrolu vykonání a vyčítá jeho výsledek. Po detekci vykonání příkazu se přesouvá do stavu vyčtení, kde získá z počítače několik bajtů, odpovídajících číslům sériového čísla. Po vyčtení posledního bajtu si výsledek zaznamená a je připravena pro další přenos.

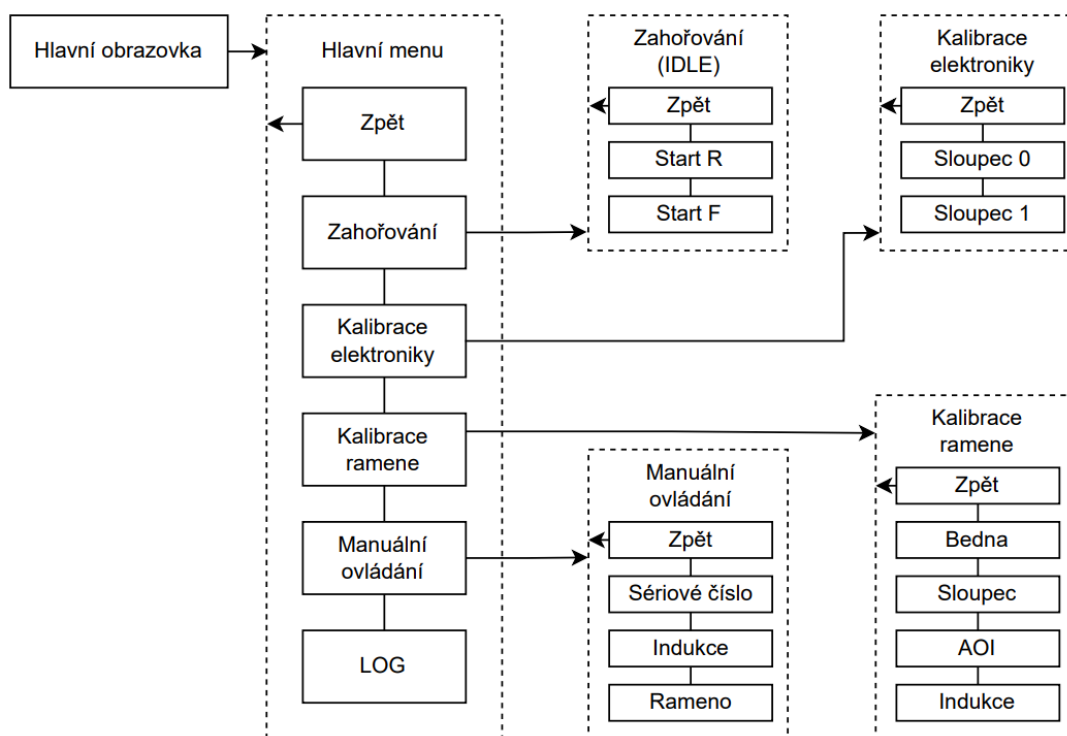
6.3.4 Komunikace se zahořovacími sloupci

Elektronika zahořovacích sloupců, na které pracuje pan Lukáš Stuchlík, není v současné době kompletní. Proto nebyla komunikace zatím implementována. PLC má ovšem přichystány konektory SPI sběrnice, na které bude možné sloupce připojit a implementovat jednoduchý protokol, podobně jako pro komunikaci s optickou inspekcí.

6.3.5 Uživatelské rozhraní

Uživatelské rozhraní sestává z barevného maticového LCD displeje a rotačního enkodéru s tlačítkem, poskytující široké možnosti implementace. Hlavní obrazovka rozhraní poskytuje informace o aktuálním stavu stroje, stavu komunikace a zobrazuje důležitá varování nebo chyby. Knihovna rozhraní periodicky kontroluje stav proměnných a aktualizuje poskytované informace na panelu.

Stiskem enkodéru je uživateli zpřístupněn systém menu, pomocí kterého lze stroj ovládat.



Obrázek 6.15 Systém menu uživatelského rozhraní

Obrázek 6.15 ukazuje jen první 2 úrovně menu. Rotací enkodéru je změněn výběr položky nebo aktuální nastavovaná hodnota a stiskem je výběr nebo hodnota potvrzena. Hlavní menu obsahuje položku zahořování, která zpřístupní menu pro ovládání běhu zahořování v závislosti na aktuálním stavu stroje. Obrázek ukazuje případ ve stavu IDLE, kdy je možné spustit zahořování digitronů typu R nebo typu F. Ve stavu RUNNING má menu možnosti stop a pauza atd. Menu kalibrace elektroniky umožní po konstrukci elektroniky zahořovacích sloupců její kalibraci. Tím je udržována přesnost nastavení zahořovacích proudů a jiných elektrických parametrů. Menu kalibrace ramene umožňuje kalibraci pozic referenčních bodů v pracovním prostoru ramene. Menu manuálního ovládání je přístupné jen pokud je stroj ve stavu IDLE nebo PAUSED a umožňuje např. zadat sériová čísla manuálně nebo pohyb ramene blokujícího pracovní prostor. Položka LOG zobrazí uživateli několik posledních událostí procesu a statistiky zahořování.

7. ZHODNOCENÍ

V současné době je konstrukce a program nového zahořovacího stroje téměř kompletní. Jednotlivé části spolu komunikují a bylo provedeno několik úspěšných cyklických testů pohybu ramene, připojovacího systému a rozpoznávacího systému (fotografie stroje v provozu při těchto testech jsou v příloze B).

Zatím ovšem nebyla zhotovena skladovací část stroje a elektronika pro zahořování nebyla dokončena. Stroj tedy není možné plně uvést do provozu. Dokončení těchto částí je plánováno v několika následujících měsících. Program optické inspekce bude nutné otestovat na větším množství vzorků a doladit případné nedostatky v rozpoznávání. Také bude doplněna funkcionality analýzy svitu katod. Uživatelské rozhraní bude nejspíše nutné pozměnit na základě poznatků pracovníka obsluhy, které vyvstanou během testování.

Stroj by měl po dokončení těchto bodů a odstranění nedostatků postupně nahradit starý zahořovací stroj a přispět tak k produktivitě výroby. Společně s dalšími stroji by se měl podílet na automatizované výrobě digitronu typu F, který má přinést zákazníkům po mnoha letech opět možnost vlastnit nově vyrobený digitron za přijatelnou cenu a ulevit tak vyčerpaným zásobám digitronů z 20. století.

7.1 Doba návratnosti

Konstrukce automatizovaného stroje byla pro firmu nemalá investice, a proto byl proveden výpočet odhadované doby návratnosti řešení. Návratnost byla vypočtena na základě znalosti doby obsluhy stroje, od které se přímo odvíjí cena zahoření jednoho digitronu. Stroj musí vyrobit dostatečný počet kusů, aby ušetřené výdaje za obsluhu a servisování pokryly náklady na jeho konstrukci. To vyjadřuje rovnice

$$N = \frac{CZ_S - CZ_N}{CS}, \quad (7.1)$$

kde N je počet kusů pro pokrytí investice, CZ_S je cena zahoření digitronu na starém stroji, CZ_N je cena zahoření digitronu na novém stroji a CS je cena nového stroje. Tabulka 7.1 ukazuje relevantní parametry a výsledky návratnosti.

Tabulka 7.1 Návratnost stroje

	Starý stroj	Nový stroj
kapacita [ks]	24	100
doba obsluhy [min]	48	50
náklady obsluhy [kč]	480,0	500,0
frekvence poruch [/rok]	6	2
doba opravy poruchy [h]	4	1
cena zahoření [kč/ks]	20,74	5,06
cena materiálu [kč]	-	180000
doba návrhu [h]	-	300
cena stroje [kč]	-	420000

Parametry	
náklady obsluhy [kč/h]	600
náklady konstruktéra [kč/h]	800
počet digitronů [ks/týden]	500

Návratnost	
počet digitronů [ks]	26791
doba [měsíců]	12

Do ceny zahoření digitronu je započítána jak cena obsluhy, tak cena případných oprav poruch. Frekvence poruch nového stroje a jejich opravy jsou pouze odhady, ale vzhledem k modulárnosti elektroniky a jednoduché vyměnitelnosti je odhad výrazně nižší než u předchozího stroje. Kapacita starého stroje byla snížena z maximálních 30 na 24, protože zahořovací sloupce jsou nespolehlivé a většinou je alespoň jeden mimo provoz. Náklady obsluhy a konstruktéra zahrnují mzdy a materiál spotřebovaný zaměstnancem. Celkem tedy musí nový stroj zahořet 26791 digitronů, aby byly pokryty náklady na jeho konstrukci. To zvládne v ideálním případě za 12 měsíců. Je také nutné vzít v potaz, že konstrukce nového stroje byla provedena i z důvodu rozšíření výroby na 500 ks za týden, kterou by starý stroj nedokázal pokrýt během 8h směny.

Literatura

- [1] BOOS, Jens. The Nixie tube story. Online. IEEE Spectrum. 2018, roč. 2018, č. 55, s. 36 - 41. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/MSPEC.2018.8389186>. [cit. 2023-10-11].
- [2] WESTON, G. F. Cold cathode glow discharge tubes. London: ILIFFE Books, 1968.
- [3] Burroughs B-7971 Alphanumeric Nixie Indicator Tube. Online. BASILE, Giorgio. Lamps & Tubes. 2024. Dostupné z: <http://lamps-et-tubes.info/cd/cd036.php>. [cit. 2024-05-14].
- [4] FARNÝ, Dalibor. Dalibor Farný. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.daliborfarny.com/>. [cit. 2024-05-14].
- [5] MRÓZEK, Kryštof. Diagnostika klouzavého výboje. Bakalářská práce. Brno: Masarykova univerzita, 2019.
- [6] IN-18 Nixie Tubes. Online. AiV Electronics. 2020. Dostupné z: <https://aivelectronics.ru/in-18-nixie-tubes-eng/>. [cit. 2024-05-14].
- [7] UFACTORY xArm Vacuum Gripper. Online. UFactory. Dostupné z: <https://www.ufactory.cc/product-page/ufactory-xarm-vacuum-gripper/>. [cit. 2023-12-26].
- [8] Controllino MAXI. Online. Controllino. Dostupné z: <https://www.controllino.com/product/controllino-maxi/>. [cit. 2023-12-26].
- [9] Kensanata numbers. Online. SCHROEDER, Alex. GitHub. 2024. Dostupné z: <https://github.com/kensanata/numbers>. [cit. 2024-04-15].
- [10] JC-ProgJava Handwritten-Digit-Dataset. Online. GitHub. 2024. Dostupné z: <https://github.com/JC-ProgJava/Handwritten-Digit-Dataset>. [cit. 2024-04-15].
- [11] RICHTER, Miloslav. Processing of Multidimensional Signals. Online. Machine Vision Group. 2024. Dostupné z: <http://vision.uamt.feec.vutbr.cz/?course=ZVS>. [cit. 2024-04-30].
- [12] JANÁKOVÁ, Ilona. Computer Vision. Online. Machine Vision Group. 2024. Dostupné z: <http://vision.uamt.feec.vutbr.cz/?course=POV>. [cit. 2024-04-30].
- [13] UFactory xArm User Manual. Online. UFactory. 2024. Dostupné z: <https://www.ufactory.cc/wp-content/uploads/2024/02/xArm-User-Manual-V2.3.0.pdf>. [cit. 2024-05-02].
- [14] BALOCHIAN, Saeed a BALOOCHIAN, Hossein. Edge detection on noisy images using Prewitt operator and fractional order differentiation. Online. Multimedia Tools and Applications. 2022, roč. 2022, č. 81, s. 9759-9770. Dostupné z: <https://www.proquest.com/docview/2642112249>. [cit. 2024-05-06].
- [15] SPONTÓN, Haldo a CARDELINO, Juan. A Review of Classic Edge Detectors. Online. Image Processing On Line. 2015, roč. 2015, č. 2105–1232, s. 90-123. Dostupné z: <https://www.ipol.im/pub/art/2015/35/article.pdf>. [cit. 2024-05-06].

- [16] Thresholding-Based Image Segmentation. Online. GeeksforGeeks. 2023. Dostupné z: <https://www.geeksforgeeks.org/thresholding-based-image-segmentation/>. [cit. 2024-05-06].
- [17] HAMAD, Karez a KAYA, Mehmet. A Detailed Analysis of Optical Character Recognition Technology. Online. International Journal of Applied Mathematics, Electronics and Computers. 2016, roč. 2016, č. 2147-8228, s. 244-249. Dostupné z: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/236939>. [cit. 2024-05-06].
- [18] LEE, Seong-Whan a PARK, Jeong-Seon. Nonlinear shape normalization methods for the recognition of large-set handwritten characters. Online. Pattern Recognition. 1994, roč. 1994, č. Vol. 27, 7, s. 895-902. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0031320394901554>. [cit. 2024-05-07].

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
DPS	deska plošných spojů
PLC	programmable logic controller (programovatelný logický automat)
LED	light emitting diode (elektroluminiscenční dioda)
VU	volume unit (jednotka hlasitosti)
PLA	polylactic acid (kyselina polymléčná)
LCD	liquid crystal display (displej z tekutých krystalů)
USB	universal serial bus (univerzální sériová sběrnice)
OCR	optical character recognition (optické rozpoznávání znaků)
px	pixel (obrazový bod)
SPI	serial peripheral interface (sériové periferní rozhraní)
UART	universal asynchronous receiver-transmitter (univerzální asynchronní přijímač-vysílač)
CAN	controller area network
I2C	inter-integrated circuit
TTL	transistor-transistor logic (tranzistorově-tranzistorová logika)
CLK	clock (hodinový signál)
ACK	acknowledge (signál potvrzení)
DIN	Deutsches Institut für Normung (Německý institut pro standardizaci)
VNC	virtual network computing (virtuální síťová výpočetní technika)
GPIO	general-purpose input/output (univerzální vstup/výstup)
AOI	automatická optická inspekce
IDE	integrated development environment (integrované vývojové prostředí)

Symbyly:

i	proud	(A)
e	Eulerovo číslo	(-)
α	Townsendův první ionizační koeficient	(-)

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - OBSAH ELEKTRONICKÉ PŘÍLOHY	70
PŘÍLOHA B - FOTOGRAFIE STROJE V PROVOZU	72

Příloha A - Obsah elektronické přílohy

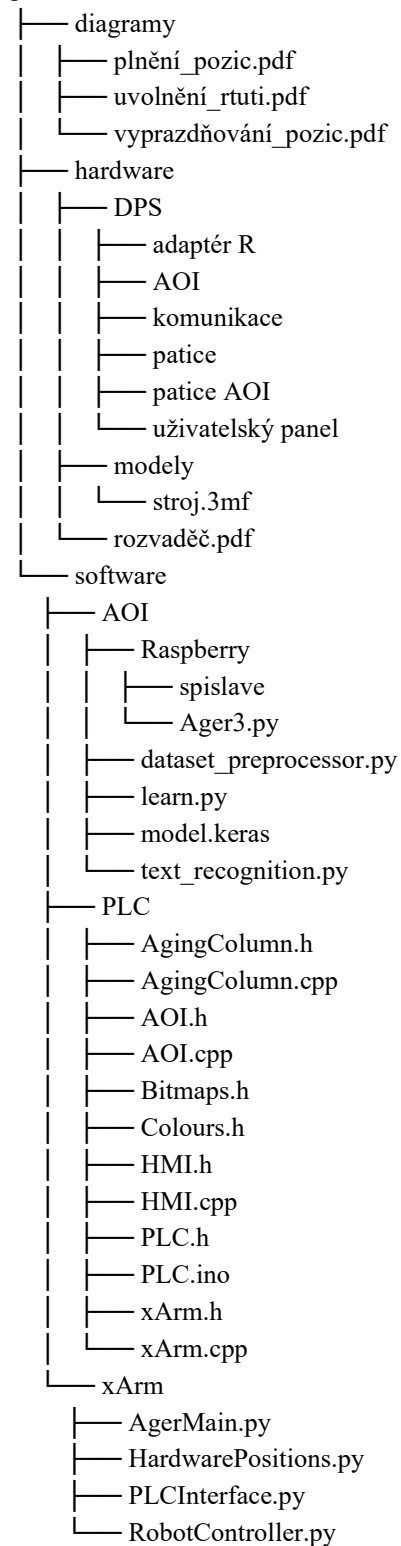
Elektronická příloha obsahuje veškerou dokumentaci a zdrojové kódy. Následující strana ukazuje strukturu adresáře.

Adresář s diagramy obsahuje detailnější procesy zahořování.

V adresáři hardware lze nalézt model stroje, adresář DPS s projektovými soubory Eagle včetně schémat v PDF a samostatné liniové schéma rozvaděče.

Adresář software obsahuje Python projekt pro kontroler ramene xArm, rozdělen do několika knihoven. Adresář AOI obsahuje kód pro počítač Raspberry a také Python skripty pro předzpracování datasetu (`dataset_preprocessor.py`), učení neuronové sítě (`learn.py`), zpracování obrazu a rozpoznávání (`text_recognition.py`) a naučený model (`model.keras`). Adresář PLC pak obsahuje Arduino IDE projekt v C++ pro Controllino s knihovnami jednotlivých zařízení a knihovnami rozšiřujícími funkcionalitu displeje (`Bitmaps.h`, `Colours.h`).

příloha



Příloha B - Fotografie stroje v provozu

