



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

ŘÍZENÍ CNC PÍSKOVAČKY

CNC MILLING MACHINE CONTROL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. René Hanulík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.

BRNO 2020



Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Mikroelektronika**

Ústav mikroelektroniky

Student: Bc. René Hanulík

ID: 162359

Ročník: 2

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Řízení CNC pískovačky

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V rámci diplomové práce navrhnete a realizujete CNC zařízení pro pískování ornamentů. Seznamte se s technikou tvorby ornamentů a písma na kamenné desky. Navržené zařízení bude umožňovat na základě souboru v jazyce HPGL z PC samočinně zhotovit libovolný ornament na ploše formátu A4. Ověřte funkčnost vytvořeného zařízení. Obslužný program pro PC je součástí realizace diplomové práce.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 1.6.2020

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.

doc. Ing. Lukáš Fucík, Ph.D.
předseda oborové rady

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 ozřejmuje problematiku tvorby nápisů na kamenné desky. Popisuje některé druhy snímačů, akčních členů, jejich fyzikální principy a možnosti jejich užití. V práci jsou zmíněna omezení a specifika pískování, návrh řešení a realizace zařízení pro bezšablonové pískování. Na názorných příkladech je předvedena a ověřena funkčnost zařízení.

KLÍČOVÁ SLOVA

CNC, krokový motor, HPGL, pískování, ESP32

ABSTRACT

The diploma thesis clarifies the issue of creating inscriptions on stone slabs. It describes some types of sensors, actuators, their physical principles and possibilities of their use. The work mentions the limitations and specifics of sandblasting, design solutions and implementation of equipment for patternless sandblasting. The functionality of the device is demonstrated and verified on illustrative examples.

KEYWORDS

CNC, stepper motor, HPGL, sandblasting, ESP32

HANULÍK, René. *Řízení CNC pískovačky*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/126942>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Pavel Šteffan.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: René Hanulík

VUT ID studenta: 162359

Typ práce: Diplomová práce

Akademický rok: 2019/20

Téma závěrečné práce: Řízení CNC pískovačky

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: 31. května 2020

.....
Podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Pavlu Šteffanovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

Obsah

Úvod	1
1 TECHNIKY TVORBY NÁPISŮ A ORNAMENTŮ DO KAMENE	2
1.1 Ruční techniky	2
1.2 Automatizované strojní techniky	6
1.3 CNC	7
1.4 HPGL	8
2 SPECIFIKA PÍSKOVÁNÍ A NAVRŽENÉ ŘEŠENÍ	9
2.1 Šablony	9
2.2 Trysky a tlak	10
2.3 Navržené řešení pro bezšablonové pískování	11
3 ELEKTRONIKA ZAŘÍZENÍ	14
3.1 Koncepce	14
3.2 Mikrokontrolér ESP32-WROOM-32	15
3.3 Krokové motory a řízení	17
3.4 AD převodníky	21
3.5 Snímače tlaku.....	25
3.6 Pneumatické ventily.....	27
3.7 USB – UART převodník.....	28
3.8 Tlačítka a displej.....	29
3.9 Návrh a realizace DPS	30
4 KONSTRUKCE ZAŘÍZENÍ	32
4.1 Pískovačka	32
4.2 Přístrojová krabice	35
4.3 Pneumatický systém	37
5 POPIS SOFTWARE	40
5.1 Firmware pro ESP32.....	40

5.2	Obslužný program pro PC	42
6	OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI	44
6.1	Spotřeba a provozní vlastnosti	44
6.2	Nastavení exportu v prostředí CorelDraw	46
6.3	Test jednotlivých „per“	47
6.4	Vyplnění obrazce	49
6.5	Pískování křivky s velkým množstvím bodů	52
6.6	Pískování textu	54
6.7	Shrnutí a náklady na stavbu zařízení	56
7	ZÁVĚR	58
	Literatura	59
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	61
	Seznam PŘÍLOH	62
A.1	Obvodové zapojení, část 1	63
A.2	Obvodové zapojení, část 2	64
A.3	Obvodové zapojení, část 3	65
A.4	Obvodové zapojení, část 4	66
A.5	Osazovací plán, strana součástí	67

ÚVOD

Tvorba písma a ornamentů, v této práci myšlena jako text a grafika, bývala donedávna velice rozšířeným manuálním řemeslem s velmi dlouhou tradicí. S vývojem řezacích plotrů, růstem výkonu laserů a spolehlivostí CNC strojů došlo k přechodu od dlát, rydel a paliček k vektorovým grafickým programům, a tím k podstatnému zvýšení efektivity procesu.

Na sklonku druhé dekády 21. století je na trhu k dispozici nepřeberné množství snadno programovatelných mikrokontrolérů, driverů krokových motorů a v neposlední řadě trysek, které umožňují vytvořit menší průměr stopy a tím vytvořit zařízení, které bude, co do nákladů na provoz a rychlosti tvorby ornamentu, konkurenceschopné s moderními technikami.

Cílem této diplomové práce je realizovat elektroniku CNC pískovacího zařízení, která bude schopna interpretovat soubor v jazyce HPGL na pohyb krokových motorů a ovládat elektromagnetickými ventily přívod stlačeného vzduchu, adekvátně reagovat na jeho tlak a umožnit uživateli přebrat kontrolu nad vykonávanými instrukcemi. Motivací k tvorbě tohoto zařízení je zjednodušení a zautomatizování procesu manuálního pískování, které je v pracovním prostředí autora prováděno přes šablonu. Základem zařízení je mikrokontrolér Espressif ESP32.

Práce se zabývá přiblížením problematiky tvorby písma, popisem jednotlivých bloků systému a jejich principy. Součástí je též popis konstrukce, použitých komponent a elektroniky zařízení.

1 TECHNIKY TVORBY NÁPISŮ A ORNAMENTŮ DO KAMENE

Tato kapitola popisuje subtraktivní techniky tvorby ornamentů a písma. V první řadě „sekání“, rytí a pískování, které jsou nejpoužívanějšími ručními technikami, následuje frézování a laserové obrábění, které nabraly největšího rozšíření s rozmachem CNC technologií.

1.1 Ruční techniky

Sekání

Sekání (zpravidla písma) do kamene je jednou z nejstarších technik, která se však používá i dnes. Kameník nejprve provede hrubý náčrt písma na desku, jenž slouží jako označení jednotlivých znaků tak, aby byly v souladu se základními zásadami typografie. Následuje nevratná část techniky, kdy jsou perem s diamantovým hrotem narýsovány reálné obrysy.

Výsledný vryp po hrotu slouží k zapření hrany dláta. Používá se běžných kancelářských pravítek a rádiusů, které jsou však neustálým plošným pohybem po kameni znehodnocovány. Zhotovením finálního obrysu je možné přistoupit k odsekání vnitřní, či vnější plochy písma. Pro vnitřní plochu platí, že jsou odsekávány nejdříve svislé rovné úseky písma, a to od kraje ke středu. Tyto úseky se odsekávají dláty se špičkou z kaleného tvrdokovu, o šířce 8-10 mm. Z logiky věci plyne, že zaoblené úseky vyžadují použití užšího dláta, zpravidla šířky 2-4 mm.

Výhodou je možnost vyhotovit nápis/ornament bez demontáže desky, hloubka a hrubost vysekaného motivu. Proto vyniká mezi ostatními díky dobré adhezi k podkladním vrstvám pro nanášení plátkového zlata. Nevýhodou této techniky je časová a fyzická náročnost, nutná manuální zručnost kameníka, nutnost použití ochranných brýlí, vzhledem k odlétávajícím částem kamene a dodatečné ruční broušení hran dlát. Případné nerovnosti na okrajích lze opticky zlepšit stínováním.

Rytí

Tato technika má některé společné rysy s předchozí. Výsledný motiv je tvořen rytím a údery diamantovým hrotem, či jehlou z tvrdokovu. Výsledný bodový motiv je barven, zpravidla bílou barvou, pro zvýšení kontrastu. S rozvojem elektrických nástrojů

typu Dremel došlo k renesanci této techniky, kdy může být upnuta k souřadnicovému zapisovači a vzniká tzv. gravírovačka.

Pískování

Jedná se v dnešní době o jednu z nejpoužívanějších metod. Základem je transport abraziva pomocí stlačeného vzduchu skrz trysku, kde je abrazivum urychlováno, důkazem budiž Bernoulliho rovnice. Následně dojde k nárazu do pískovaného materiálu. Dle hmotnosti, geometrie a tvrdosti jednotlivých zrn abraziva dochází odstraňování částic materiálu.

Boyle-Mariottův zákon praví:

$$pV = \textit{konst.} \text{ [Pa}\cdot\text{m}^3\text{]}, \quad (1.1)$$

p ... tlak [Pa],

V ... objem plynu [m^3].

Na rozdíl od většiny kapalin jsou plyny stlačitelné, proto je nutno upravit a rozšířit původní Bernoulliho rovnici. Výsledkem je rovnice 1.2:

$$\frac{v^2}{2} + g \cdot h + \frac{\kappa}{\kappa-1} \cdot \frac{p}{\rho} = \textit{konst.}, \quad (1.2)$$

v ... rychlost proudění [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],

g ... tíhové zrychlení [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$],

κ ... Poissonova konstanta (za normálního tlaku 1013,25 hPa a teploty 0 °C je 1,4),

p ... tlak plynu [Pa],

ρ ... hustota plynu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$].

Musí též platit rovnice kontinuity (1.3), v poměrném vyjádření:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\rho_2 \cdot S_2}{\rho_1 \cdot S_1}, \quad (1.3)$$

v_1, v_2 ... rychlost proudění [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],

ρ_1, ρ_2 ... hustota plynu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$],

$S_1, S_2 \dots$ průřez potrubí [m^2].

Důsledkem tzv. hydrodynamického paradoxu je skutečnost, že ve vytvořeném otvoru poblíž zúženého místa (trysky) dojde ke snížení tlaku pod atmosférický a je proto umožněno „přisávat“ abrazivo k trysce. To je využito u jednodušších typů pískovaček s tzv. sacím systémem. Druhým typem je tlakový systém, u kterého je abrazivo a vzduch smíchán v tlakové nádobě. K trysce dále vede pouze jedna hadice, která musí být odolná proti abrazi, aby nedocházelo ke kontaminaci a nevratnému poškození hadice.

Pro ostrá a tvrdá zrna platí, že dochází k odstranění větších částic (2x větší, než je průměr zrna) hodí se proto k čištění koroze, pískování do kamene a odolných nánosů barev, či stavebních hmot. Naproti tomu zrna oblého tvaru, ať už tvrdá, či měkká slouží k čištění, leštění a zpevňování povrchu (např. dřevo a jiné měkké materiály). [1] Z praktického hlediska platí vztah mezi středním průměrem abraziva a průměrem trysky:

$$d_A < \frac{d_T}{8} \text{ [m]} , \quad (1.1)$$

d_A ... střední průměr abraziva [m],

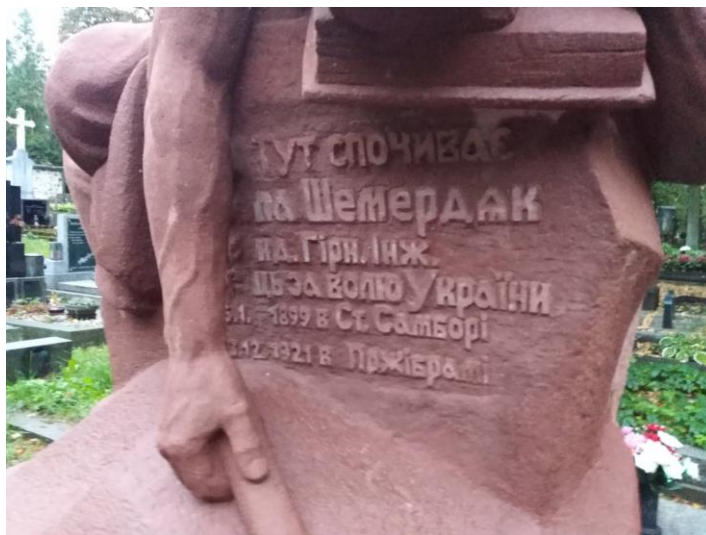
d_T ... průměr trysky [m].

Specifika, omezení a možnosti, jak uzpůsobit tuto techniku tak, aby nebylo nutné použít šablonu, jsou dále popsány v kapitole 2. Obr. 1.1 a 1.2 zobrazují spojení technik sekání a pískování, jednotlivá písmena tvořící motiv, byla vyřezána na plotru, poté přenesena na pískovcovou plochu. Vzhledem k nízké adhezi lepidla folie a pískovce bylo nutné jednotlivá písmena podlepit. Motiv byl pískován při tlaku 0,4 MPa při průměru trysky 6 mm. Jakmile byl negativní motiv dostatečně zřetelný, bylo přistoupeno k ručnímu odsekání a zarovnání plochy, což bylo v tomto konkrétním případě rychlejší, než kdyby byl motiv dále pískován. [1]



Obr. 1.1: Kombinace techniky pískování a sekání, odsekávání velkých ploch pískovce.

Mezistupněm mezi klasickým ručním pískováním a CNC pískovačkou je např. pískovací automat Optimo Blueline od výrobce Weha, viz obr. 1.1, který operuje v osách X a Y. Operátorem zadané souřadnice a hloubka pískování jsou zpracovány počítačem, který provede pískování plochy, maximem je čtverec o straně 1200 mm. Nevýhodou je vyšší cena (cca 259000 Kč bez DPH) a nutnost použití šablony. Samozřejmostí je integrovaný odtah abraziva. Přístroj je dodáván bez kompresoru a průmyslového vysavače. [2]



Obr. 1.2: Nápis po finální úpravě.



Obr. 1.3: Příklad pískovacího stroje: Optimo BlueLine fy Weha [2].

1.2 Automatizované strojní techniky

Frézování

Jedná se o techniku vhodnou k hlubšímu průniku, tzn. k většímu kontrastu písma/ornamentu a leštěné plochy, nicméně proti zbylým používaným metodám není z estetického hlediska vhodná. Příčinou je použití frézy jediného průměru, který má rozměr uzpůsoben na $\frac{1}{2}$ šířky písma. Tento způsob se v praxi používá pro tvorbu hlubokých reliéfů, odtokových drážek a pro hrubší opracování kamene, např. 3D model soch. [3]

Laserové obrábění

S nárůstem výkonu a zároveň snížením cen polovodičových laserů došlo k rozmachu nejrůznějších typů CNC laser „engraverů“. Základním principem je zahřátí materiálu nad bod tavení, díky kolimaci laserového paprsku do plochy v řádu desetin mm^2 se tak stane v řádu jednotek ms. Pro žulové desky se používá maximální hloubka 1 mm, což vylučuje povrchovou úpravu písma plátkovým zlatem. Největší výhodou oproti předchozím technikám je zejména rychlost, bezprašnost a přesnost (cca 0,05 mm), díky tomu lze docílit velice strmých hran na rozhraní původní (zpravidla leštěná) plocha – obrobena plocha. [4] Na obr. 1.4 je zobrazen proces dvouvrstvého laserového gravírování, při kterém dochází k odpařování jak kamene, tak papírové pásky, čímž je vytvořena šablona pro jednoduché barvení. Nevýhodou stále zůstává nepříznivá cena, daná cenou laseru. U základních modelů vhodných k serióznímu použití však stále přesahuje 100 000 Kč. [5]



Obr. 1.4: Proces gravírování laserem [6].

1.3 CNC

Číslicově řízené systémy vznikly přímým vývojem NC strojů v druhé polovině 20. století společně s rozšířením výpočetní techniky. Použitím počítačů bylo dosaženo flexibility programování strojů, kdy již nebylo potřeba děrných štítků, šablon a podobně. Blokové schéma CNC vrtačky je na obr. 1.5.

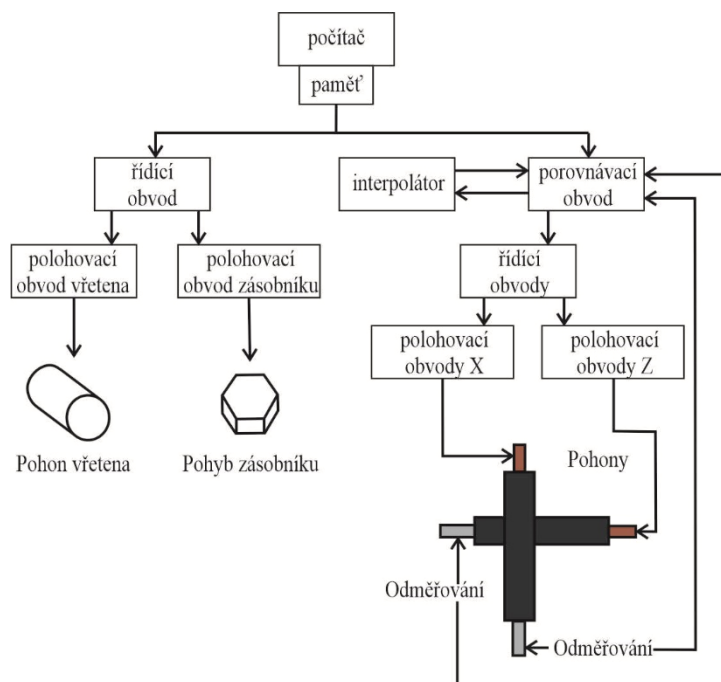
Části CNC systému

Počítač – obsluhým reálným operačním systémem jsou zpracovávána zadaná data. Může se tak dít pomocí uloženého programu, nebo ručně pomocí klávesnice. Výstupními prvky informuje obsluhu o provozních stavech systému.

Řídicí obvody – slouží k buzení výkonových obvodů, úpravě signálu ze snímačů a podobně.

Interpolátor – zpracovává posuv nástroje, jenž je definován geometrickými body, neobejde se bez nutných korekcí. Slouží též k výpočtu jednotlivých částí dráhy od počáteční do koncové. Jedná se o nejdůležitější část z hlediska přesnosti výrobku.

Porovnávací obvody – zprostředkovávají informaci o odchylce mezi skutečnými a zadanými souřadnicemi systému. [7]



Obr. 1.5: Blokové schéma CNC vrtačky [7].

1.4 HPGL

Tento jazyk vznikl z důvodu zjednodušení práce s plotry z produkce firmy Hewlett-Packard v 70. letech 20. století. Slouží k vykreslování vektorové grafiky a našel použití také v CAD systémech. Jedná se o čistě textový formát, který byl zvolen z důvodu částečné eliminace nespolehlivosti sériové linky skrze rozhraní RS-232. Dále je na začátku přenosu dat vysláno počítačem jeden, či více netisknutelných znaků, které slouží k inicializaci. Jazyk obsahuje 75 instrukcí, z nichž část je specifická pro určité typy plotterů. Níže je uveden příklad zápisu: příkaz začíná dvoupísmennou mnemotechnickou zkratkou, následuje argument, který není povinný. V případě více argumentů jsou odděleny čárkou, znakem „+“ nebo „-“ pro záporná čísla. Každá instrukce je oddělena středníkem. Výstupní soubor má obvykle příponu *PLT*. [8] V rámci diplomové práce je pro tvorbu výstupních souborů používán program CorelDRAW, který používá pouze instrukce *IN*, *VS*, *WU*, *PU*, *PD*, *SP* a *PW*. Úkolem firmwaru v mikrokontroléru bude tedy překlad instrukcí na pohyby krokových motorů v osách x a y. Vznikne tzv. **HPGL interpreter**. Základní rozlišení HPGL kompatibilních plotterů je 1016 bodů na palec, což odpovídá přesnosti 25 μm.

Příklad zápisu instrukce *Pen Down*:

PD x [int], y [int];

PD 732, 4903;

2 SPECIFIKA PÍSKOVÁNÍ A NAVRŽENÉ ŘEŠENÍ

2.1 Šablony

Při návrhu textu nebo grafiky v počítačovém programu je nutno brát v potaz fyzická omezení daná šablonou, která je lepena na kamennou desku. Samotný řezací plotr bez protestu provede řezání motivu (obr. 2.1), avšak míra přenesených detailů pod 1 mm je ztracena. To je dáno nízkou pevností materiálu šablony, kterým je zpravidla polyvinylchlorid. Tloušťka se pohybuje v rozmezí 0,25 - 0,8 mm. [9] Analogicky s procesem fotolitografie platí, že s vyšší tloušťkou masky/šablony dochází k nižšímu podpískování, tj. úbytku materiálu v laterálním směru.

Pokud by byla šablona řezána laserem, může dojít k dalšímu nárůstu elasticity a ztrátě přesnosti motivu. Zdlouhavým procesem v rámci tvorby šablony je odstranění vnitřních nebo vnějších částí motivu. Tyto části jsou odpadem při výrobě a vzhledem k odlišné povaze jednotlivých vyráběných motivů je nelze použít pro jiné šablony. Pro sériovou výrobu většího množství kamenných desek se stejným motivem jsou šablony nevhodné, jelikož jsou po pískování poničeny abrazivem a při odstranění šablony z desky dojde ke změně rozměrů a kontaminaci polyakrylátového lepidla. [9]



Obr. 2.1: Návrh nápisu dle původní předlohy v programu CorelDRAW.

2.2 Trysky a tlak

V případě pískování motivu přes masku jsou používány trysky o průměru 4–6 mm, které zaručují dostatečný průměr stopy, kdy hloubka odběru materiálu činí zhruba 5 mm/min. Průřez trysky je téměř shodný s průřezem trubky na výstupu z kompresoru, proto tlak tryskou klesá jen minimálně. Pro zařízení byla navrženo použití trysky s průměrem cca 1,05 mm, u které v ideálním případě dojde k tvorbě stopy srovnatelného průměru. Nutnou podmínkou je použití abraziva se středním průměrem zrn 0,1 mm. Z toho důvodu je nutné chránit všechny pohyblivé mechanické části proti přímému působení a usedání abraziva. [1]

V současné době jsou nejčastěji používány keramické trysky, jenž představují rozumný kompromis mezi cenou a trvanlivostí, která činí při tlaku 0,3 MPa zhruba 8 hodin nepřetržitého pískování. Poté dochází k neúměrnému nárůstu průměru, které je způsobeno frikcí mezi abrazivem a vnitřní plochou trysky. Nízkonákladovou variantou jsou pak trysky z oceli, jenž jsou nenáročné na výrobu a z toho důvodu i podstatně levnější (100 Kč/ks), výdrž je zhruba 2 hodiny. Nanesením wolframové vrstvy na povrch trysky dojde ke zvýšení odolnosti, což se vyplatí zejména pro menší průměry. Cena je oproti keramickým vyšší zhruba o 200 Kč.

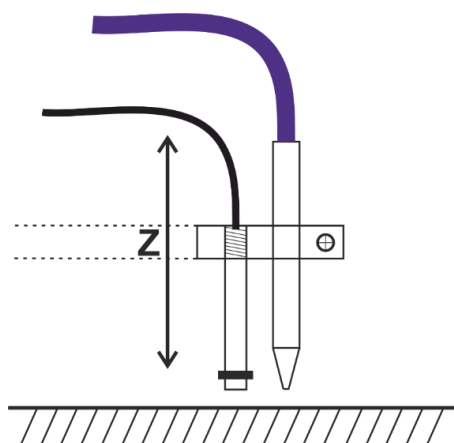
Tab. 1 zobrazuje doporučený výkon kompresoru při daném tlaku, průtoku vzduchu a průměru trysky. Z ní vyplývá, že při vstupním tlaku 0,4 MPa postačí kompresor nižšího výkonu, s průtokem vzduchu pod $300 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$. Maximální tlak soustavy byl stanoven na 0,6 MPa s přihlédnutím k největšímu přípustnému tlaku spojek, který činí 1,2 MPa.

Tab. 1: Srovnání provozního tlaku, průtoku vzduchu a doporučeného výkonu kompresoru pro různé průměry trysek [10].

Průměr trysky [mm]	Tlak [bar]								Průtok vzduchu [l.m ⁻¹]	Výkon kompresoru [kW]
	3,5	4	5	5,5	6	7	8,5	9,5		
3	311	368	425	481	524	566	708	793	Výkon kompresoru [kW]	Průtok vzduchu [l.m ⁻¹]
	2	2	2,5	3	3,5	3,5	4	4,5		
5	736	850	934	1076	1161	1274	1557	1756	Výkon kompresoru [kW]	Průtok vzduchu [l.m ⁻¹]
	4,5	5	6	6,5	7,5	7,5	9	9,5		
6,5	1331	1529	1727	1926	2095	2294	2775	3115	Výkon kompresoru [kW]	Průtok vzduchu [l.m ⁻¹]
	8	9	10	12	12,5	13	16	18		
8	2180	2520	2860	3370	3568	3879	4757	5324	Výkon kompresoru [kW]	Průtok vzduchu [l.m ⁻¹]
	13	15	17	19	21	23	27	30		
9,5	3058	3568	4219	4559	4899	5550	6711	7504	Výkon kompresoru [kW]	Průtok vzduchu [l.m ⁻¹]
	18	21	24	26	29	32	38	43		
11	4163	4814	5493	6145	6796	7192	8891	9968	Výkon kompresoru [kW]	Průtok vzduchu [l.m ⁻¹]
	24	28	32	36	40	42	51	57		
12,5	5522	6343	7136	7929	8750	9571	11582	12969	Výkon kompresoru [kW]	Průtok vzduchu [l.m ⁻¹]
	32	37	41	46	51	55	66	74		

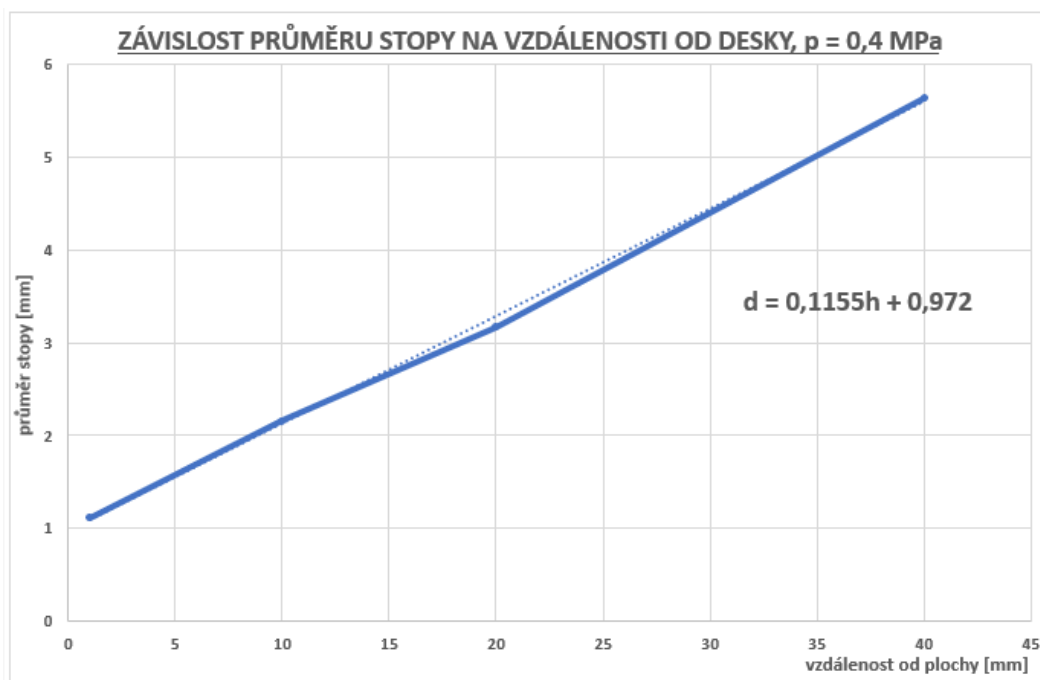
2.3 Navržené řešení pro bezšablonové pískování

Nutnou podmínkou pro realizaci CNC pískovačky je použití trysky s minimálním možným průměrem, od které se odvíjí tloušťka čáry. Oproti standardnímu šablonovému pískování je nutné řešit problém s odpískováním vnitřku motivu tak, aby nedošlo k přesahu mimo motiv. Řešením je úprava grafiky v rámci návrhu v prostředí počítačového programu.



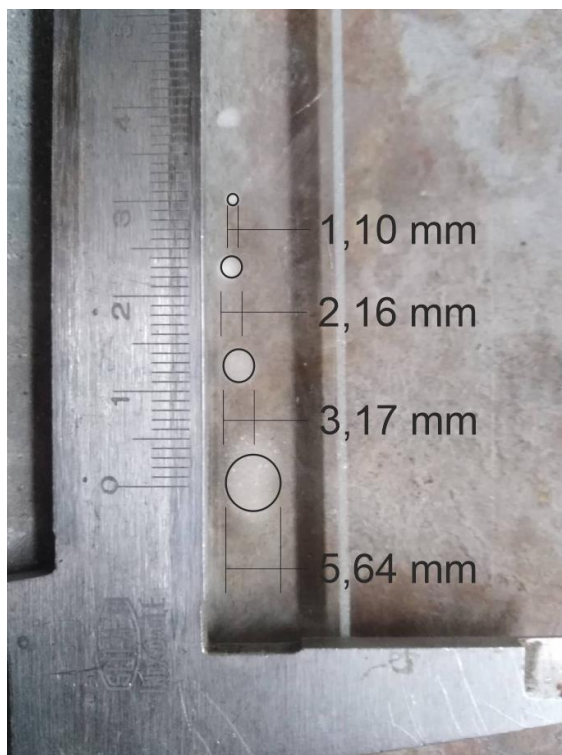
Obr. 2.2: Schematické naznačení možného upevnění trysky a snímače přiblížení.

Program CorelDRAW nabízí dvě možnosti: simulovanou výplň pomocí mřížky při exportu (obr. 2.5b) do formátu HPGL, která však nenabízí širší možnosti nastavení a jednotky tloušťky jsou neznámé. Druhou možností (obr. 2.5c) je úprava atribut křivky, přičemž je možno využít tzv. Postscriptovou vektorovou výplň, jenž má bohaté možnosti nastavení. Je však nutno při exportu dodržet barvu, šířky per a rychlost posuvu. Obrys je definován nejmenší šířkou, dle obr. 2.4 jde o 1,1 mm.

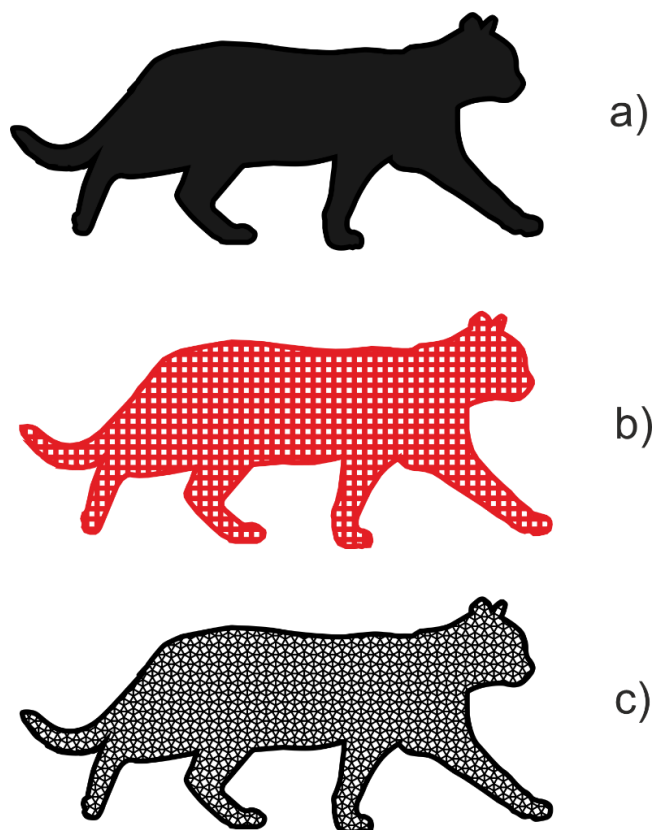


Obr. 2.3: Závislost průměru stopy na vzdálenosti od povrchu; tryska d = 1,1 mm.

Na základě měření byla stanovena vzdálenost, při které dochází ke zvětšování průměru stopy, ta může být použita pro výplň vnitřku. Z hlediska mechaniky musí být realizován posun trysky v ose Z. Aby nedošlo k nárazu a následnému zničení, bude na společném držáku připevněn snímač přiblížení, který bude zároveň sloužit jako koncový spínač pro kalibraci kroků. Schématické naznačení je na obr. 2.2. Samotné zařízení umožňuje pohyb v ose X, která je poháněna dvěma krokovými motory se závitovou hřídelí a kuličkovými šrouby s ucpávkami. Tvoří nosnou konstrukci pro pohyb v ose Y, jenž je koncipována s dalším krokovým motorem na jedné straně a pohybem vozíku pomocí ozubeného řemenu. Na vozíku je umístěn mechanismus umožňující posuv kompletu trysky a snímače přiblížení v ose Z. Stlačený vzduch z kompresoru bude muset být z důvodu čistoty prostý oleje a v co největší možné míře zbaven vlhkosti. Při testování prototypu byl použit sklářský písek udržovaný v suchých, vytápěných prostorech.



Obr. 2.4: Test průměru stop trysky, $p = 0,4$ MPa, $d = 1,1$ mm.

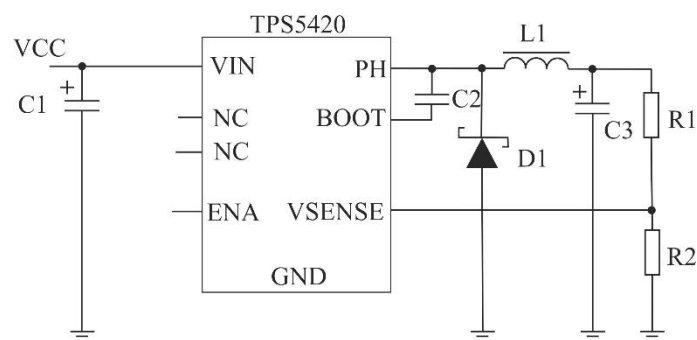


Obr. 2.5: Původní ornament (a) simulovaná výplň (b) výplň „Archimedes“ (c).

3 ELEKTRONIKA ZAŘÍZENÍ

3.1 Koncepce

Napájení zařízení je navrženo a realizováno, vzhledem k uvažovanému provozu v exteriéru, na stejnosměrný rozvod. Napájecí napětí bylo zvoleno 12 V. Z důvodu bezpečnosti obsluhy zařízení a nízké ceny spínaných zdrojů vyšších výkonů (20-60 VA). Pro napájení mikrokontroléru ESP32, expandérů, obvodu CH340 a invertorů bylo zvoleno napájecí napětí 3,3 V. Návrhový maximální proud je 1,5 A. Vzhledem k vysokým ztrátám na lineárním regulátoru bylo přistoupeno k použití spínaného step-down měniče fy Texas Instruments TPS5420 v pouzdře SO-8. Při vstupním napětí 12 V je účinnost tohoto měniče v rozmezí výstupního proudu 0,5 – 2 A nad 90 %. Základní zapojení obvodu je na obr. 3.1.



Obr. 3.1: Základní zapojení step-down měniče TI TPS5420[11].

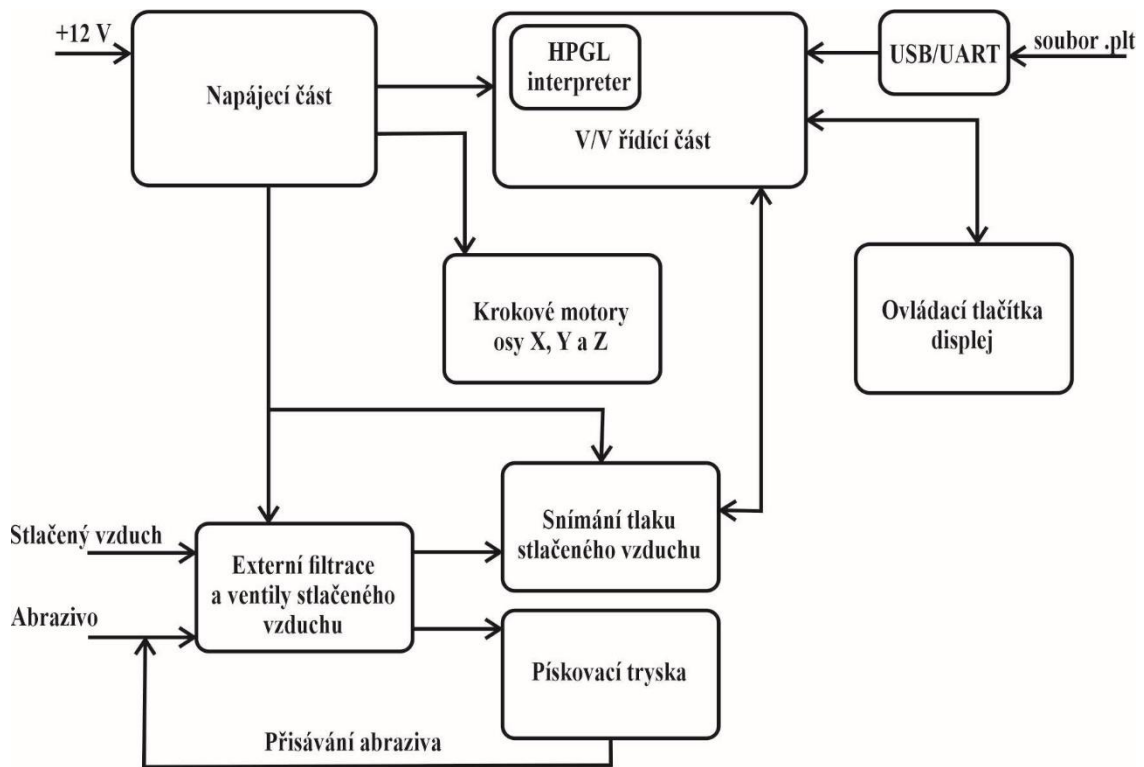
Výstupní napětí step-down měniče je porovnáváno pomocí vstupu VSENSE přes odporový dělič, kde hodnota odporu rezistoru R_1 byla zvolena 10k Ω . Pro rezistor R_2 platí rovnice 3.1:

$$R_2 = \frac{R_1 \cdot 1,221}{V_{OUT} - 1,221} = \frac{10^4 \cdot 1,221}{3,3 - 1,221} = 5,878 \cdot 10^3 \Omega \quad (3.1) [11]$$

V řadě E48 je k dispozici nejbližší vyšší hodnota 5,9 k Ω . Vzhledem k navrhovanému nejvyššímu proudu 1,5 A byla zvolena indukčnost L_1 o hodnotě 22 μ H. Vstupní kapacita (C_1) je tvořena třemi paralelně zapojenými keramickými kondenzátory s celkovou kapacitou 30 μ F. Podobně je tvořena výstupní kapacita (C_3), která zahrnuje

dva kondenzátory o celkové kapacitě 50 μF . Bootstrapový kondenzátor (C_2) má kapacitu 10 nF.

Displej je připojen k mikrokontroléru přes I2C sběrnici. Vzhledem ke způsobu ovládání řadiče HD44780 je toto realizováno expandérem PCF8574. Stejně tak v případě tlačítek, které jsou hardwarově ošetřeny proti záskmitům Schmittovým klopným obvodem. Hlavní DPS realizuje napájení digitální části (3,3 V) pro mikrokontrolér, expandéry a další podpůrné obvody. AD převodník je napájen z lineárního stabilizátoru LM7805 s výstupním napětím 5 V. Řadiče krokových motorů a cívka pneumatického ventilu využívají vstupní napětí 12 V. Přívod stlačeného vzduchu je navržen jako externí. Blokové schéma je na obr. 3.2.



Obr. 3.2: Původní blokové schéma navrhovaného zařízení.

3.2 Mikrokontrolér ESP32-WROOM-32

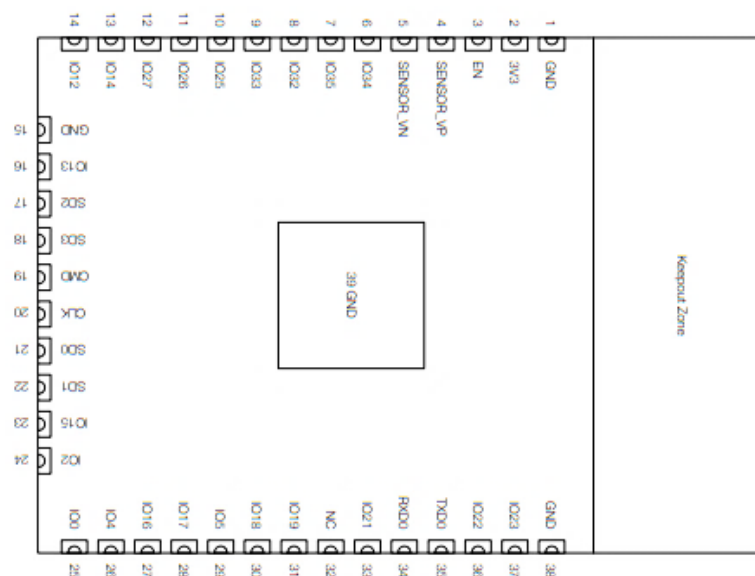
Pomyslným mozkiem zařízení je SoC mikrokontrolér od firmy Espressif Systems, který byl zvolen z důvodu nízké ceny (200 Kč), snadnému programování a dostupné podpoře z hlediska HW a SW. Jádro je založeno na mikroprocesoru Tensilica (Cadence) Xtensa LX6, který je 32bitový a jeho frekvence je 160 nebo 240 MHz. Maximální výkon

udávaný výrobcem je 600 DMIPS. Dle jednotlivých modelů existují verze s jedním, či dvěma jádry. Samotný čip je vyráběn 40 nm procesem v TSMC. Vyznačuje se nízkou spotřebou (<0,1W) při vypnuté bezdrátové konektivitě. Dále je SoC vybaveno 448 kB ROM, 520 kB SRAM a 4 MB paměti typu flash. [12]

Pro komunikaci s okolím je mikrokontrolér vybaven bezdrátovým připojením standardu 802.11 b/g/n a technologií Bluetooth verze 4.2. Z fyzických periférií a sběrnic jde zejména o:

- SPI (4 kanály)
- I²C (2 kanály)
- UART (3 kanály)
- SD kontrolér
- PWM (16 kanálů)
- AD převodník (12 bitů, 12 kanálů)
- DA převodník (8 bitů, 2 kanely)

Jednotlivé sběrnice jsou popsány v následujících podkapitolách. Je nutno však zmínit, že vzhledem k počtu pinů nelze využít zároveň všech kanálů všech periférií.



Obr. 3.3: Přehled V/V pinů ESP32-WROOM-32 [13].

Programování mikrokontroléru je možné pomocí nepřeberného množství nástrojů, od oficiálního Espressif IoT Development Frameworku (IDF), Arduino IDE rozšířené o knihovny podporující ESP32 nebo například MicroPython. Při tvorbě firmwaru a programování bylo použito prostředí Arduino IDE.

Sběrnice mikrokontroléru ESP32

SPI neboli Serial Peripheral Interface. Oproti zbylým implementovaným sběrnicím v čipu vyžaduje pro správnou funkci nejvíce vodičů (linek). Jmenovitě *MOSI* (Master Out Slave In), *MISO* (Master In Slave Out), *SCK* (Serial CLock) a *CS* (Chip Select). V hierarchii sběrnice existuje jedno zařízení master a více zařízení slave, tzn. pro každé slave zařízení je potřeba jedna CS linka. Jejich aktivací zařízením typu master dojde k navázání komunikace. V rámci jedné periody hodinového signálu je odeslán bit linky MOSI a na druhé straně přijat bit MISO linky. [14]

I²C je dvouvodičová sběrnice navržená firmou Philips určená pro komunikaci několika desítek zařízení na dvou společných vodičích, většinou v rámci jedné aplikace. První vodič je nazýván SDA (serial data) a druhý SCL (serial clock). Frekvence SCL linky je maximálně 100 kHz. Odlišení jednotlivých zařízení je dosaženo adresací, které má každé zařízení zcela jinou. Podmínkou správné komunikace je nutnost uvedení obou linek do stavu log, „1“ pomocí tzv. pull-up odporů. [15]

UART je více než 50 let, standardizovaným rozhraním sériové komunikace. Nejčastěji se používá tzv. duplex, kdy jsou využity linky Tx a Rx. Standardem pro RS-232 jsou napěťové úrovně +/- 15 V, avšak mikrokontrolér ESP32 pracuje s 3,3 V logikou. V případě použití původního rozhraní je nutné použít převodník pro původní napěťové úrovně, např. obvod MAX232 firmy Maxim. Pro odchozí a příchozí „zprávy“ je použito nejčastěji bloků po 8 bitech. Start a stop bity slouží k synchronizaci datového toku. Podmínkou nutnou, nikoli však postačující, je stejná tzv. baudová rychlost, na které oba účastníci komunikují. [16]

3.3 Krokové motory a řízení

Krokové motory

Krokovým motorem rozumíme synchronní stejnosměrný motor s dvěma a více póly, průchodem proudu vinutím dojde k posuvu hřídele kolem axiální osy. Motor se v ideálním případě pohybuje mezi n stabilními stavy, které jsou dány celkovým počtem kroků na jednu otáčku. Staly se základem všech typů CNC zařízení, tiskáren a jiných průmyslových strojů. Existují dva základní typy a) unipolární a b) bipolární. Unipolární

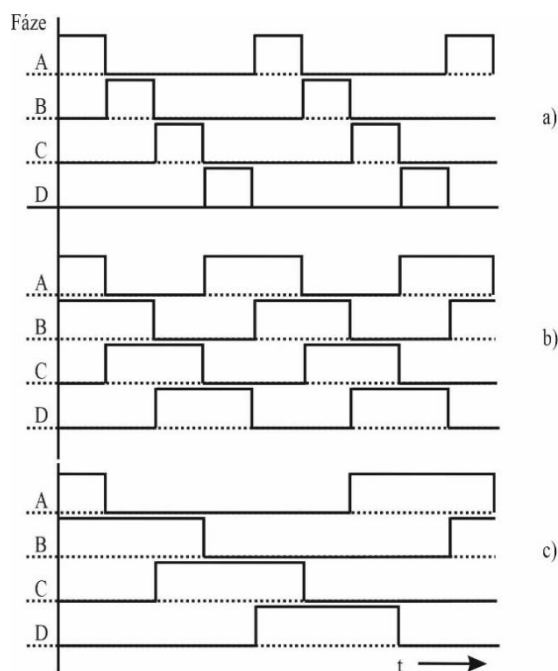
motory mívají zpravidla 6 vývodů, z nichž dva jsou střední vývody každého vinutí, ke kterým je připojeno napájecí napětí a zbylé jejich konce. Z hlediska řízení je tento typ méně náročný na obvodové zapojení, kdy stačí spínat jednotlivé konce vinutí. Polarita napětí je tedy neměnná. [16]

Bipolární typ motorů naproti tomu vyžaduje změnu polarity napětí na vinutí. To je řešeno pomocí tzv. H-můstků, pro každou fázi motoru jeden. Všechny spínací tranzistory musí být chráněny před VN špičkami při vypínání indukční zátěže rychlými antiparalelními diodami. Úhel kroku α je vyjádřen rovnicí 3.2:

$$\alpha = \frac{360}{m \cdot N_z} [^\circ], \quad (3.2)$$

N_z ... počet zubů rotoru [-],

m ... počet fází statoru [-].

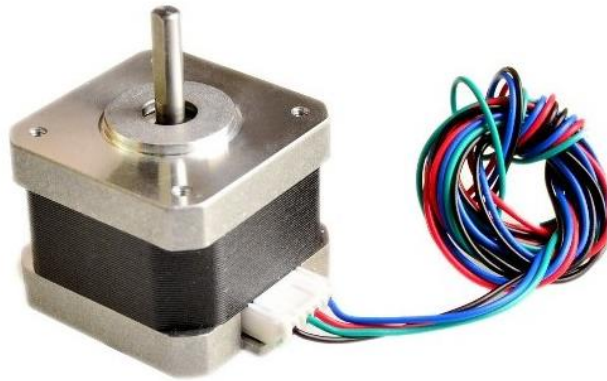


Obr. 3.4: Tři různé způsoby sledu fází 4 taktního průběhu [17].

Pro zařízení byly vybrány bipolární krokové motory typové řady NEMA 17 (obr. 3.5) s úhlem kroku $1,8^\circ$, kde maximální proud cívkami je 2 A. Motor je schopen vyvinout točivý moment 0,027 Nm, při 20°C je odpor vinutí cca 180Ω .

Drivery krokových motorů

Řízení krokového motoru, ať už bipolárního, či unipolárního, vyžaduje množství aktivních polovodičových a pasivních součástek. Řadič lze samozřejmě postavit diskrétně, avšak za cenu vyšší zabrané plochy na DPS. V 90. letech 20. století se používaly HIO s velkou plochou pro odvod tepla, nutnou z důvodu použití bipolárních tranzistorů a s tím související větší tepelnou ztrátou. Na přelomu století se objevily drivery typu L298N (typicky v pouzdře Pentawatt), které dosáhly masivního rozšíření a jsou dodnes velmi oblíbené mezi nadšenci a amatéry. Obvod však postrádá složitější logiku, čili sled jednotlivých fází je nutno zabezpečit programovým vybavením přímo v aplikaci.



Obr. 3.5: Krokový motor NEMA 17 s kabeláží.

Driver A4988

Tento typ driveru pro krokové motory kompaktních rozměrů byl zvolen kvůli své nízké ceně (40 Kč/ks) a jeho masovému rozšíření, díky kterému je k dispozici dostatek referenčních materiálů a souvisejících informací pro případné řešení nedostatků/problémů. V neposlední řadě je kompatibilní s napětovými úrovněmi použitého mikrokontroléru ESP32. Jedná se o driver v pouzdře QFN s termální ploškou na spodní straně pouzdra. Jedná se o bipolární můstkový driver s tranzistory typu DMOS, který je schopen dodat krokovému motoru proud ± 2 A při maximálním napětí 35 V. Dle log. úrovní na pinech MS1-MS3 je možné dále dělit krok až na 1/16, kde se jedná o tzv. *microstepping*. Bez něj by nebylo možné docílit požadované přesnosti na všech osách. Omezení středního proudu cívkami motoru je provedeno pomocí PWM kontroléru. Blokové schéma je na obr. 3.6. Platí:

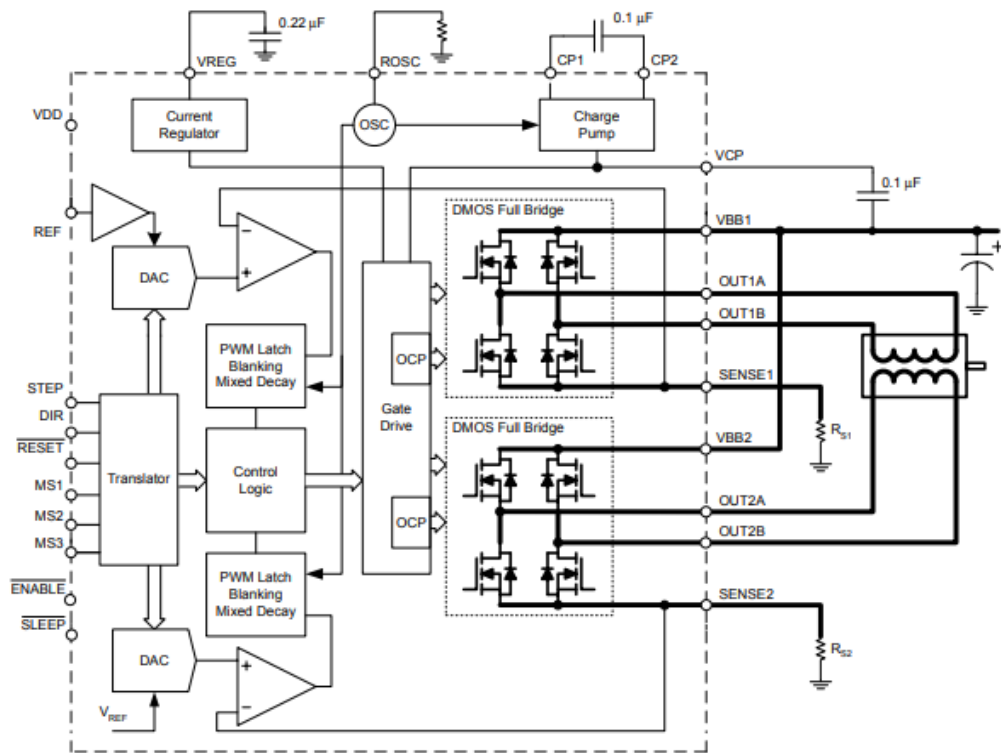
$$I_{\text{TripMAX}} = \frac{V_{\text{REF}}}{8 \cdot R_S} \text{ [A]}, \quad (3.2) \text{ [17]}$$

I_{TripMAX} ... maximální střední hodnota proudu [A],

V_{REF} ... referenční napětí [V],

R_S ... hodnota odporu snímacího rezistoru [Ω].

V rámci realizace došlo k doplnění trimru místo odporového děliče pro přesné nastavení referenčního napětí. Dříve navrhovaný maximální proud vinutím 2 A se ukázal jako zbytečně velký, a proto dle empirického pokusu byla zvolena hodnota proudu cca 1 A. Tomu odpovídá referenční napětí 0,5 V. Hodnota odporu snímacího rezistoru byla ponechána na 0,068 m Ω .



Obr. 3.6: Blokové schéma driveru A4988 v základním zapojení [17].

3.4 AD převodníky

Každý analogový signál, který má být zdigitalizován, musí být nejprve navzorkován. Vzorkovací obvody mohou být tvořeny např. spínanými kapacitami, jenž slouží jako krátkodobá paměť. Spojitý analogový signál je vzorkován v neměnných časových intervalech a reprezentuje tak hodnotu signálu v čase. Pro rekonstrukci signálu je však třeba vzorkovat neustále. Vzhledem ke konečné periodě vzorkovací frekvence je logické, že původní a rekonstruovaný signál bude odlišný.

Základní podmínkou je dodržení vzorkovacího teorému, který praví, že vzorkovací frekvence převodníku musí být minimálně dvojnásobná oproti vzorkovanému signálu (rovnice 3.4). Přiřazením určitého čísla vzorkovanému napětí dochází ke kvantizaci. Rozsah převodníku je rozdělen na N úrovní a je zavedena kvantizační chyba, která může být v rozsahu $-\frac{1}{2}$ až $\frac{1}{2}$ kvanta. Např. 32bitový převodník má přesně 2^{32} úrovní, tj. 4294967296 možných stavů. Aby nedošlo ke zkreslení signálu, který je vzorkován, jsou vstupní obvody doplněny filtrem typu dolní propust. [18]

Z hlediska rozhraní jsou používány paralelní a sériové sběrnice, např. SPI, JESD204B a podobně. Analogové vstupy mohou být diferenciální, což přispívá eliminaci rušení a tzv. single ended, kdy všechny vstupy sdílí společný nulový potenciál.

$$f_{vz} \geq 2 \cdot f_s \text{ [Hz]}, \quad (3.4)$$

kde f_{vz} označuje vzorkovací frekvenci a f_s frekvenci signálu.

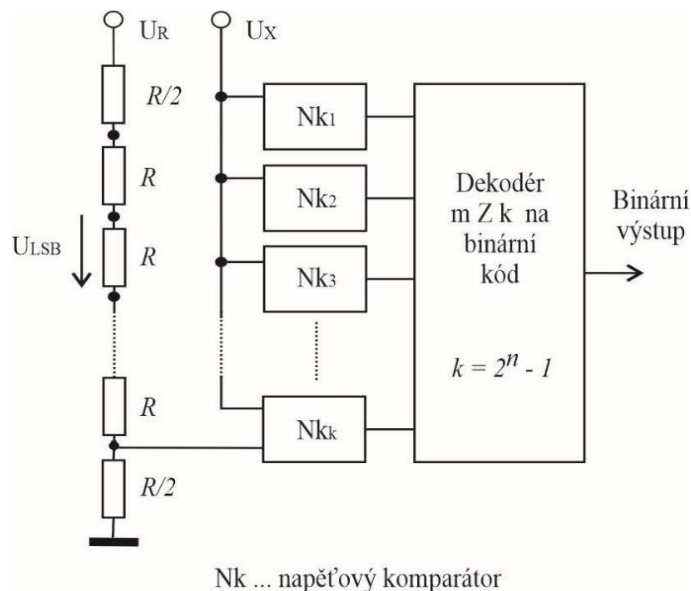
Paralelní A/D převodník

Tento druh převodníků má ze všech jmenovaných nejrychlejší dobu převodu, která je dána propagačním zpožděním logických členů. Těmito členy jsou zejména komparátory, pro n bitové rozlišení musí převodník obsahovat $2^n - 1$ komparátorů (obr. 3.7). Na první vstup každého komparátoru je připojeno referenční napětí, na druhý vstup pak napětí měřené, jenž je produktem napěťového děliče. Z toho plyne nutnost dostavovat rezistory na čipu tak, aby byla linearita převodu ovlivněna co nejméně. Synchronizačním pulsem jsou na výstup Q klopných obvodů typu D nastaveny log. úrovně jednotlivých komparátorů a za pomoci dekodéru m z k nastavena binární hodnota na výstup. Paralelní převodníky ze své podstaty dosahují rozlišení 12 bitů, protože prostým zvyšováním počtu komparátorů by neúměrně rostla cena z důvodu obtížného matchingu rezistorů vstupního

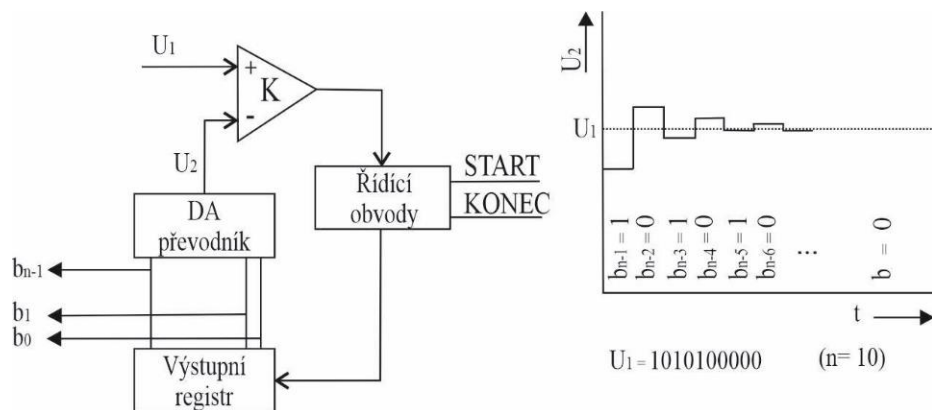
děliče. Proto je v některých ojedinělých případech použit několikanásobný převod – výstupní binární hodnota převodu je DA převodníkem převedena zpět na napětí a v dalším kroku je tato hodnota od vstupního napětí odečtena. [18]

A/D převodník s postupnou aproximací

Pomalejší variantou oproti paralelnímu převodníku je tzv. SAR – Successive Approximation Register. Aproximačním registrem jsou nastavovány bity od MSB po LSB a DA převodníkem následně převedeny na jistou hodnotu napětí, jenž je porovnáváno se vzorkovaným signálem dokud se LSB neshoduje. Doba převodu je závislá na rozlišení převodníku, protože platí, že na jeden bit rozlišení je třeba jeden krok aproximace. Činnost převodníku a blokové schéma je na obr. 3.8. [18]



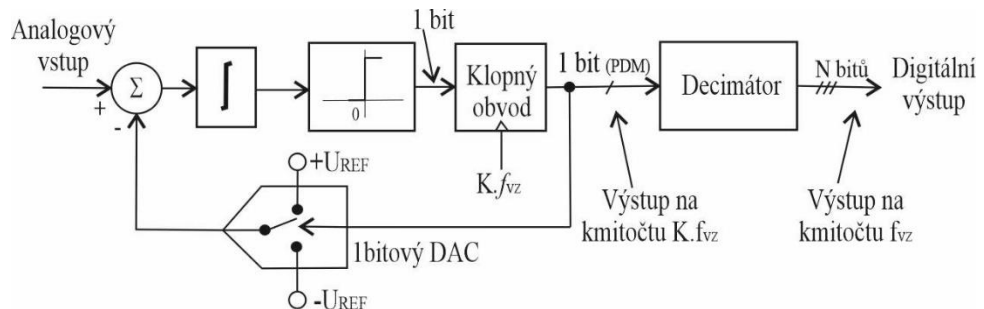
Obr. 3.7: Blokové schéma paralelního A/D převodníku [18].



Obr. 3.8: Blokové schéma a převodníku s postupnou aproximací [19].

A/D převodník $\Sigma - \Delta$

Hojně implementovaný druh převodníku, kterým lze dosáhnout rozlišení až 32 bitů. Využita je modifikovaná sigma modulace. Napěťový signál je porovnáván s referenčním, který může nabývat buď kladné, nebo záporné polarity. Dále je provedena integrace výstupu. Ten je opět porovnán s nulovým napěťovým potenciálem a uložen v paměti. Při dalším kroku je polarita napětí opačná než v kroku prvním. Viz blokové schéma na obr. 3.9. Tento typ převodníku používá tzv. oversampling, z toho plyne, že modulátor má frekvenci řádově vyšší, než je frekvence vzorkovací. Tím je zajištěno dostatečné množství vzorků, které jsou filtrovány digitálními filtry (sinc^3 , sinc^5 , aj.). Pro získání odpovídajícího množství vzorků je provedena decimace, tj. zahození a filtrace zbylých vzorků. [20]



Obr. 3.9: Blokové schéma převodníku $\Sigma - \Delta$ [20].

Uvažované snímače tlaku mají výstupní napětí v rozsahu 0,5 – 4,5 V, což je mimo rozsah (0 – 3,3 V) integrovaného AD převodníku v mikrokontroléru, který je bohužel 12bitový. První problém lze řešit napěťovým děličem a druhý oversamplingem, kdy na každý bit rozlišení převodníku je nutné dle vzorce 3.3 zajistit dalších N vzorků, což snižuje šířku pásma, nicméně odstup signálu od šumu (SNR) je zvýšen $N^{1/2}$ krát.

$$N = 2^{2b}, \quad (3.3)$$

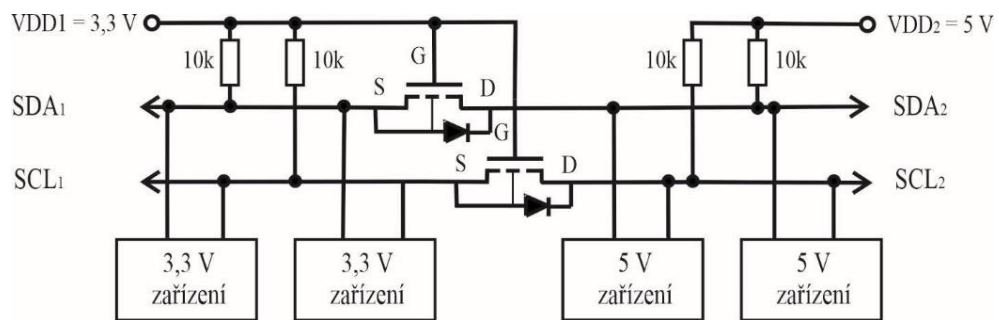
N ... počet vzorků [-],

b ... rozlišení převodníku [bit].

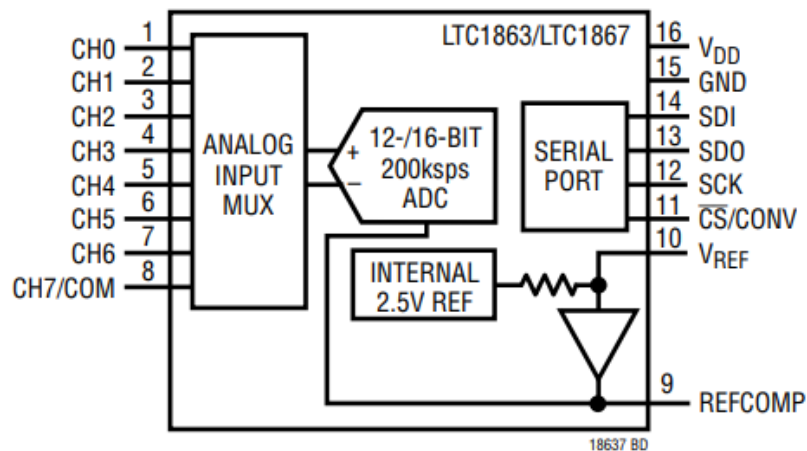
Pokud je uvažováno navýšení rozlišení o 4 bity, je nutné signál převzorkovat 256krát a odstup signálu od šumu je zvýšen 16násobně.

AD převodník LT1867

Byl vybrán 16bitový převodník LT1867 výrobce Analog Devices. Jádrem je založeno na převodníku s postupnou aproximací (SAR) a obsahuje 8 single ended, nebo 4 diferenciální vstupy, které jsou obsluhovány vnitřním multiplexerem (obr. 3.11). Výhodou je možnost použít pouze jedno napájecí napětí. Výrobce doporučuje 5 V, které by mělo být dostatečně filtrováno. Vzorkovací rychlost dosahuje 200 kSa.s^{-1} . V případě poloviční rychlosti klesne spotřeba obvodu na 0,76 mA. Určitou nevýhodou je nutnost přizpůsobení 5 V log. úrovni, které je řešeno jednoduchým obousměrným převodníkem založeným na unipolárních tranzistorech N-MOS. Schéma je na obr. 3.10. Vstup AD převodníku je filtrován RC filtrem typu dolní propust s mezní frekvencí 15,9 Hz. V praxi je na obvod připojen jen jeden snímač tlaku a na přípojných místech zbylo volné místo vhodné do budoucna pro další rozšíření.



Obr. 3.10: Zjednodušené schéma obousměrného převodníku log. úrovní [21].



Obr. 3.11: Blokové schéma AD převodníku LT1867 [22].

3.5 Snímače tlaku

K měření tlaku stlačeného vzduchu v potrubí je nutné převést tlak, jakožto neelektrickou fyzikální veličinu, na napětí, které pak může být dále zpracováno mikrokontrolérem, resp. jeho AD převodníkem. Statický tlak je obecně definován následovně:

$$p = \frac{F}{S} \text{ [Pa]}, \quad (3.2)$$

p ... statický tlak [Pa],

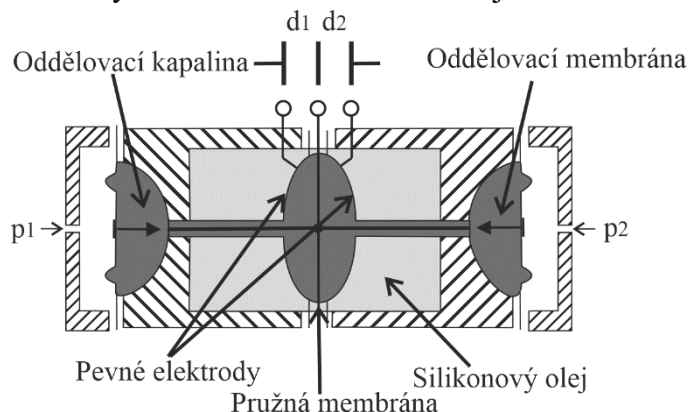
F ... síla [N],

S ... plocha [m²].

Společným jmenovatelem běžně používaných snímačů tlaku je membrána, jejíž průhyb je měrou tlakové deformace. Jednotlivé typy se vzájemně liší snímacím elementem, jehož výstupem je elektrický signál. Ten může být upravován, filtrován a digitalizován.

Kapacitní

Základem kapacitních snímačů jsou dva kondenzátory se společnou střední deskou (obr. 3.12). Na každé straně jsou ke krajním pevným deskám připojeny membrány, na které působí tlak. S vyšším tlakem na jedné straně dochází ke zvyšování kapacity a na druhé opačně. K vyhodnocení změn se využívá střídavý můstek. Jsou proto vhodné pro měření tlakových diferencí. Rozsah měření je od 100 Pa do 40 MPa. [22]



Obr. 3.12: Schématický řez kapacitním snímačem tlaku [23].

Tenzometrické polovodičové

Na rozdíl od tenzometrů odporových je fyzikální podstatou mechanické namáhání krystalové mřížky monokrystalického polovodiče, který bývá záměrně znečištěn difúzí. Deformací je ovlivněna pohyblivost nosičů náboje, tj. je ovlivněn měrný odpor. Poměrná změna odporu polovodičového tenzometru relativním prodloužením je dána rovnicí 3.3:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = k_1 \cdot \varepsilon + k_2 \cdot \varepsilon^2, \quad (3.3) [24]$$

ΔR ... změna odporu [Ω],

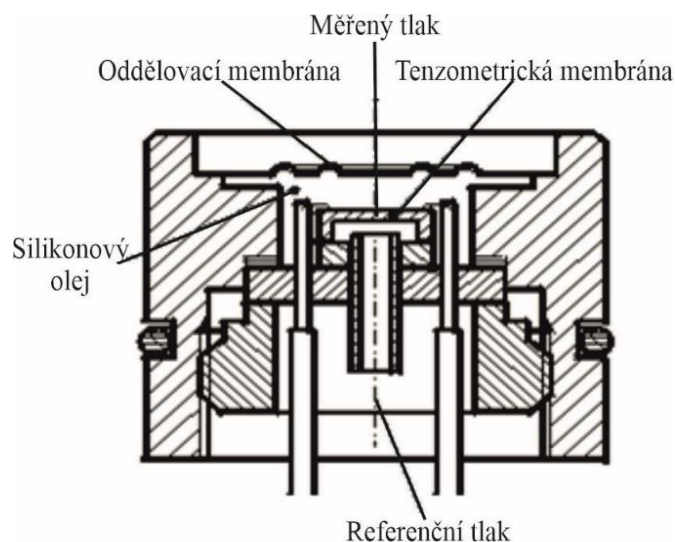
R_0 ... odpor při základní teplotě [Ω],

k_1, k_2 ... technologické konstanty [-],

ε ... relativní prodloužení [-].

Základní odpor se pohybuje v řádu stovek Ω . Příkladem může být tenzometr společnosti VTSZ Zlín, BP130-6-35/BP/Au, kde číslovka 130 udává hodnotu součinitele deformační citlivosti, 6 délku v milimetrech a 35 odpor v desítkách Ω .

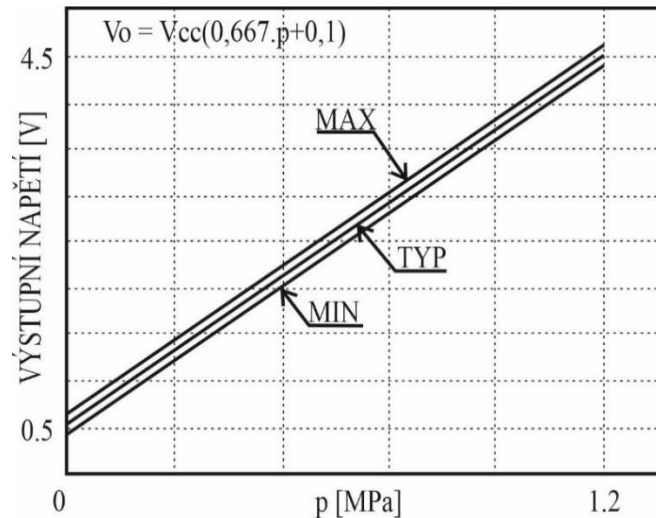
Nezpochybnitelnou výhodou polovodičových tenzometrů oproti klasickým kovovým tenzometrům je 60x vyšší citlivost. Důsledkem je možnost konstrukce snímačů s nízkými rozměry a vysokou pevností a schopností měřit délkovou roztažnost kovů s rozlišením 10-5 μm . Základní měření lze též měřit obyčejným laboratorním vybavením bez použití zesilovačů. V případě průmyslového nasazení se tenzometr vkládá do vyváženého Wheatstoneova můstku. Šířka pásma využitelného pro statické a dynamické měření je v řádu jednotek kHz. [24] Řez tenzometrickým snímačem tlaku je na obr. 3.13.



Obr. 3.13: Řez tenzometrickým snímačem tlaku [25].

Snímač tlaku typ 1206

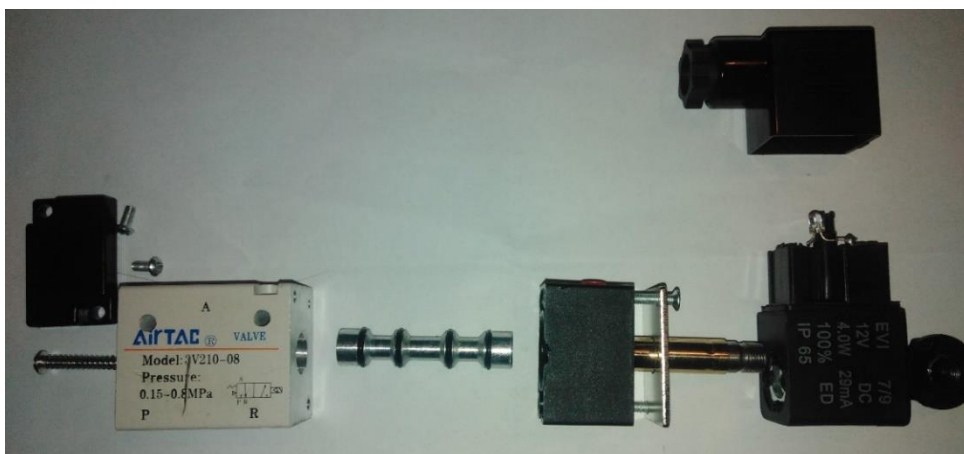
Pro svou nízkou cenu (100 Kč), velký rozsah tlaku od 0,1 MPa do 1,2 MPa a linearitu výstupního napětí byl vybrán snímač Asijské proveniencí typu 1206. Výstupní napětí, jak již bylo zmíněno, je v rozsahu 0,5 – 4,5 V. Chyba linearit je maximálně 1,5 %. Závislost výstupního napětí na tlaku je na obr. 3.14. Výrobce však neudává žádné podrobnější informace o provedení měřicí elektroniky. Do budoucna je vhodné provést destrukční rozbor vnitřních částí. Připojovací závit je typu G 1/4“.



Obr. 3.14: Závislost výstupního napětí na tlaku, snímač typu 1206 [26].

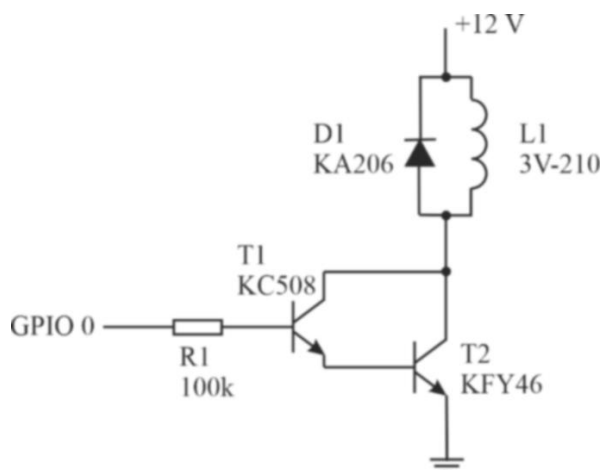
3.6 Pneumatické ventily

Pískovací zařízení se neobejde bez možnosti dávkovat stlačený vzduch. Nejdostupnější variantou jsou elektromagnetické ventily. Návrhový maximální vstupní tlak je 0,6 MPa, při kterém musí být ventil schopný funkce. Pro svou nízkou cenu (120 Kč) a rychlost sepnutí (50 ms) byl vybrán elektromagnetický ventil fy AirTAC 3V-210-08, jehož rozpad je na obr. 3.15. Bez napětí na cívce je vstup A spojen s výstupem R. Při přiložení napětí je předsuvník přesunut a vstup A spojen s výstupem P. Výstupy a vstupy jsou opatřeny závitem G 1/4“ stejně jako snímače tlaku a závitové redukce na plastové potrubí. Spínací tranzistory v Darlingtonově zapojení a antiparalelní dioda jsou integrovány uvnitř konektoru ovládací cívky. Schéma je na obr. 3.16.



Obr. 3.15: Rozebraný pneumatický ventil AirTAC 3V-210-08.

Součástky byly použity z přístroje Tesla BS575. Všechny spoje uvnitř konektoru byly izolovány smršťovací bužírkou. Ventil s cívkou byl namontován ze spodní strany obdélníkového profilu, aby byla délka spojovací hadičky mezi ventilem a nádobkou s abrazivem co možná nejkratší.

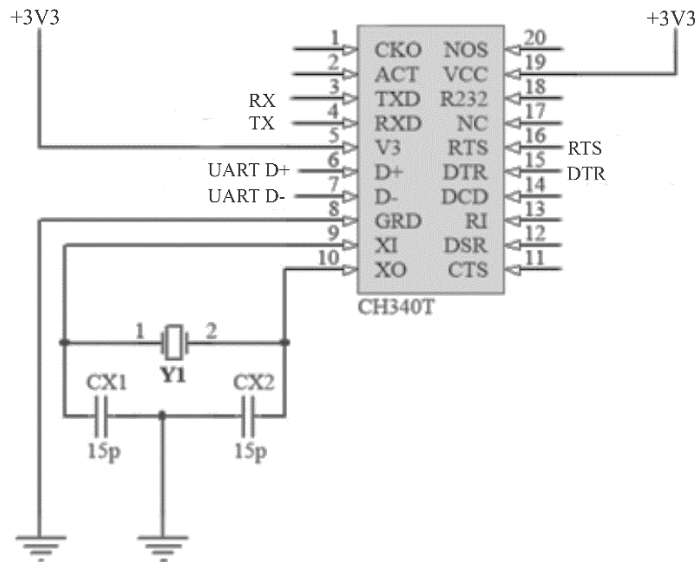


Obr. 3.16: Schéma zapojení ovládání ventilu.

3.7 USB – UART převodník

Zamýšlená funkce odesílání souboru v jazyce HPGL vyžaduje rozhraní pro komunikaci s počítačem typu PC. Bylo rozhodnuto o výběru USB-UART převodníku CH340. Z pohledu PC jde o jednoduchou implementaci, protože zařízení se ve správci zařízení systému jakékoli běžného operačního systému hlásí jako virtuální sériový port. [27] Katalogové zapojení na obr. 3.17 bylo v návrhu doplněno o signály RTS a DTR nezbytné pro správnou funkčnost programování mikrokontroléru. V rámci realizace bylo spojení linky DTR mezi CH340 a ESP32 přerušeno. Stiskem přepínače ISOSTAT je

uzemněn pin GPIO0 ESP32, mikrokontrolér je nastaven do „bootloader“ módu a je možno změnit programové vybavení. Přitom jsou odpojeny drivery krokových motorů od napájení.

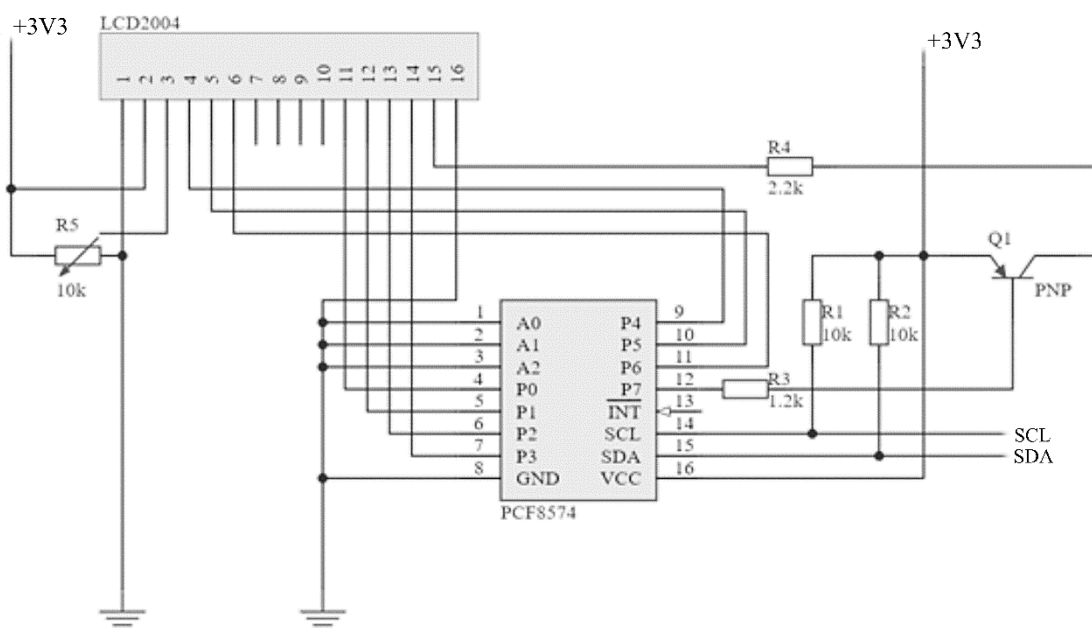


Obr. 3.17: Základní zapojení USB-UART převodníku CH340 [27].

3.8 Tlačítka a displej

K ovládání zařízení byla upravena DPS s tlačítky, jenž umožňuje uživateli upravit rychlost posuvu a manuálně ovládat pohyb v osách X a Y. Obsahuje 5 tlačítek, z toho jsou 4 nastavovací a 1 stavové. Dále jsou jako tlačítka považovány koncové spínače. Všechna jsou připojena k obvodům 74LVC14. Pomocí pull-up rezistorů o nom. hodnotě odporu 10 kΩ je na vstupech udržovaná log. „1“ v klidovém stavu. Sepnutím tlačítek/spínačů dojde k uzemnění vstupu a tím vnucení log. „0“. Obvod 74LVC14, krom jiného, zajišťuje inverzi log. stavu a jeho výstup je přiveden k expandéru PCF8574AT. Ze softwarového hlediska je změna vstupu detekována sestupnou hranou signálu /INT0 a /INT1.

Nastavované a provozní údaje jsou zobrazovány na modře podsvíceném displeji z tekutých krystalů typu 2004. Ten obsahuje 5 řadičů typu HD44780. Pro snížení počtu kabelů a obsazených v/v pinů ESP32 bylo přistoupeno k použití dalšího expandéru PCF8574, jenž je součástí modulu. Ten byl k DPS displeje připájen.



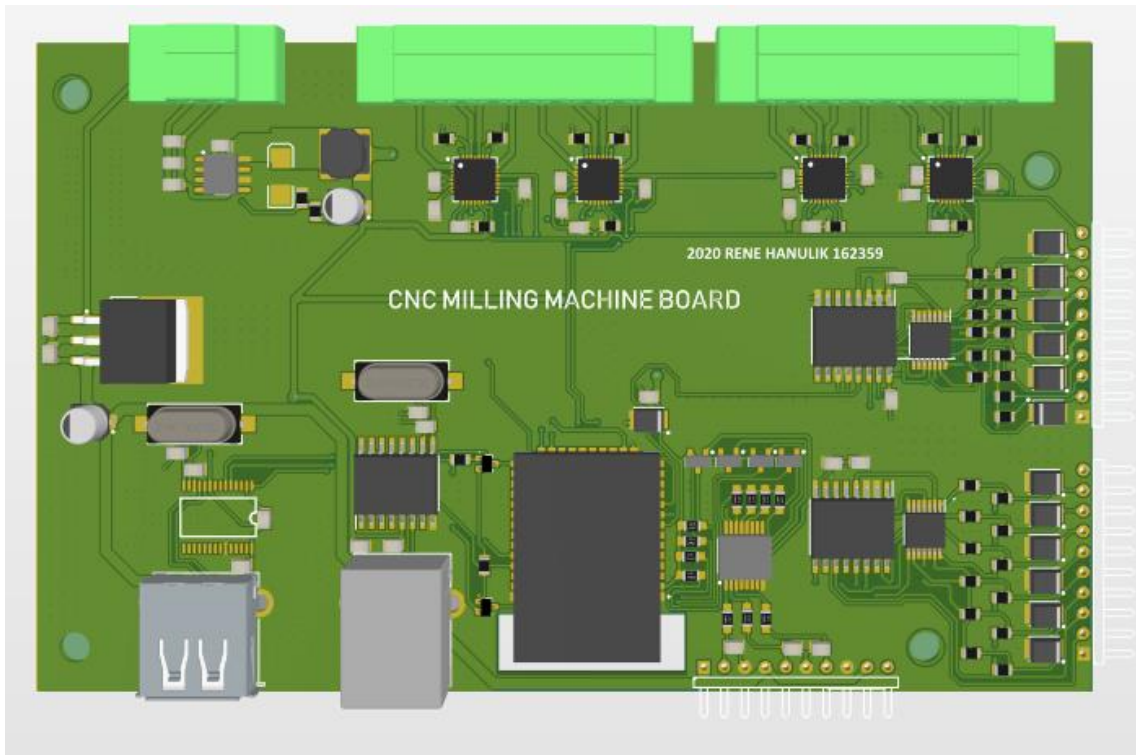
Obr. 3.18: Zapojení expandéru PCF8574 a modulu displeje 2004.

3.9 Návrh a realizace DPS

Základní rozměry desky plošných spojů jsou cca 150x100 mm. DPS byla navržena jako dvouvrstvá standardní tloušťky 1,6 mm. Konektory pro připojení krokových motorů a napájení jsou vyvedeny na delší stranu desky. Nadproudová ochrana je zamýšlena jako externí s tím, že pojistkové pouzdro bude součástí zadní strany ovládacího panelu. Montážní otvory desky mají průměr 150 mills, tj. cca 4 mm. Při návrhu byl brán zřetel na oddělení jednotlivých částí obvodu tak, aby nedocházelo k ovlivnění rušením. Pro tlačítka, dorazové spínače a tlakové snímače jsou vyhrazeny lišty na kratší straně desky. Zbývá část s USB konektorem typu A je navrhována jako jediná viditelná z vnějšku zařízení. Původně navrhované obvodové zapojení se zařízením USB host CH375 zůstalo nepoužito, avšak do budoucna jej bude moci po osazení využít k připojení flash disku. Výstřižek z návrhového CAD programu Altium Designer je na obr. 3.19.

Při osazování desky byla použita horkovzdušná pistole s regulací teploty, pájedlo ERS-50, trubičková pájka Sn63Pb37 a bezoplachové tavidlo Amtech NC-559-V2. Bezprostředně po osazení došlo k očištění tavidla z celé DPS pomocí IPA. Po oživení celé desky a chvilkového provozu se objevily problémy s napájením, které se projevily pronikáním napájecího napětí (12 V) skrz step-down měnič, přičemž došlo ke zničení expandéru PCF8574A, schmittových klopných obvodů 7414 a ESP32. V tomto případě

mohlo dojít k poruše vlivem studeného spoje (spojů) u některých součástek, případně vlivem ESD při měření na desce pod napětím. Výměnou součástek měniče byl problém vyřešen. Předcházet této poruše je možné osazením zenerových diod na patřičné napětí hned za výstupem z měniče, případně vratnými pojistkami (polyswitche). Při neopatrné manipulaci s konektory krokových motorů došlo k fyzickému poškození 3/4 driverů A4988 i s cestami na DPS. Deska byla následně osazena znovu.



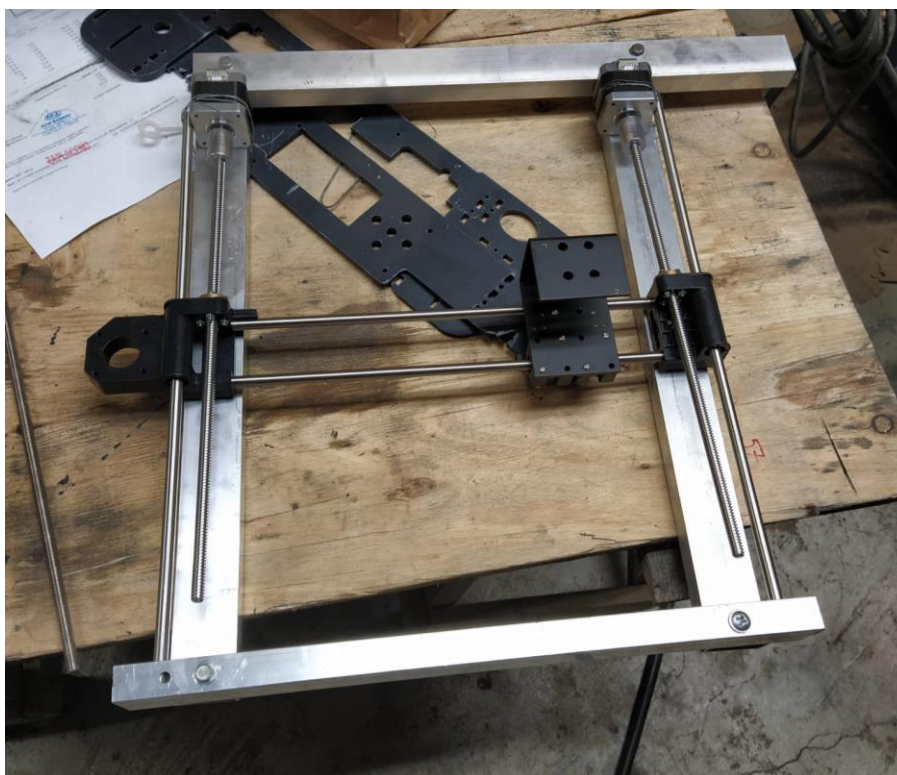
Obr. 3.19: Navržená DPS v prostředí Altium Designer.

4 KONSTRUKCE ZAŘÍZENÍ

Zařízení se skládá ze dvou hlavních skupin: samotné pískovačky a přístrojové krabice, která obsahuje DPS, kabeláž a ovládací prvky.

4.1 Pískovačka

Hliníkové ječky základního rozměru 40x20 mm byly zkráceny na délku 300 a 400 mm. Po zaměření kolmosti vůči sobě došlo k provrtání otvorů skrz a do ječků délky 400 mm byly vytvořeny závity M6. Otvory v kratších profilech mají vůli vůči šroubu cca 1 mm pro dorovnání případných nepřesností. Protější strana od motorů je tvořena obdélníkovým profilem „nastojato“ z důvodu uložení vodících tyčí průměru 8 mm. Motory jsou uloženy v „L“ profilu 40x40 mm s výřezem mimo osu krokových motorů, ty jsou přišroubovány 2 ks šroubů M3x10. Vodící tyče délky 400 mm jsou uloženy 25 mm od osy otáčení.



Obr. 4.1: Stavba rámu pískovačky

K převodu otáčivého pohybu motorů na pohyb posuvný v ose X bylo použito tyčí s trapézovým závitem délky 345 mm a závitových uložení s plastovými odlitky. Jedná se

o díly použité ze stavebnice 3D tiskárny typu A8 i3. Stoupání závitu tyče je 8 mm/ot. Pro výpočet kroků motoru nutných k posunu o 1 mm platí rovnice 4.1:

$$n_x = \frac{k}{p} = \frac{3200}{8} = 400 [mm^{-1}] \quad (4.1)$$

n_x ... počet kroků nutných k posuvu osy X o 1 mm [mm^{-1}]

k ... počet kroků na 1 otáčku hřídele [-]

p ... stoupání závitu [mm]

Převrácená hodnota pak udává nejmenší možné rozlišení:

$$r = \frac{1}{n} = \frac{1}{400} = 2,5 \cdot 10^{-3} [mm]$$

Vrchní část osy Z tvoří opět hliníkový čtvercový profil 40x20 mm. Ze strany motoru jsou vyvrtány průchozí díry pro ložiskové vodítko (15 mm), vložku pískovací trysky (14 mm) a hřídel s přírubou (15 mm). Pro připevnění držáků vodítek bylo vyvrtáno 8 průchozích děr průměru 4 mm. Ze strany motoru byly posléze zvětšeny na 7 mm pro snadnější montáž. Zbylé dva otvory se závitem M3 tvoří uchycení plechu s krokovým motorem. Pohyb osy Y je tvořen ozubeným řemenem GT2 s roztečí zubů 2 mm a řemenicí o 16 zubech. Volné konce řemenu jsou připevněny šroubem na spodní stranu vedení „vozíku“ přes děrovaný složený pásek, který zajišťuje dostatečnou pevnost spoje a zaručuje napnutí řemenu, aby nedocházelo k mechanickému přeskokování kroků v zátěži. Osu protínají dvě vodící tyče průměru 8 mm, které jednotlivě procházejí držáky „vozíku“ a mají v sobě integrována ložisková vodítka. Fixace tyčí je zajištěna stavěcím šroubem M2 uloženým v závitové vložce v plastových odlitcích.

Ze znalostí výše uvedených parametrů lze odvodit počet kroků nutných k posuvu vozíku poháněného ozubeným řemenem o 1 mm dle rovnice 4.2:

$$n_y = \frac{k}{z \cdot p_y} = \frac{3200}{16 \cdot 2} = 100 [mm^{-1}], \quad (4.2)$$

n_y ... počet kroků nutných k posuvu osy Y o 1 mm [mm^{-1}],

k ... počet kroků na 1 otáčku hřídele [-],

z ... počet zubů řemenice [-],

p_y ... rozteč zubů řemene [mm].

Stejným způsobem jako v předchozím případě lze zjistit rozlišení:

$$r = \frac{1}{n} = \frac{1}{100} = 10^{-2} [mm]$$

Rozlišení pro osu X je 2,5 μm a osu Y 10 μm , což vyhovuje rozlišení požadované jazykem HPGL (25 μm). Souřadnice je nutno v tomto případě softwarově upravit násobením.

Osa Z má v porovnání s osami X a Y „diskrétní“ polohy. Ovládána je příkazem *SelectPen* a je uvažováno 8 poloh v rozestupu 5 mm dle grafu v kapitole 2.3. Za nulovou polohu, která odpovídá **SP 1**, je zvolena souřadnice, při které dojde ke stisku koncového spínače osy Z. Jak je ukázáno v dalších kapitolách, z praktického hlediska nemá větší průměr stopy kýžený efekt na výplň plochy. Posun je tvořen přírubou krokového motoru se závitem M8, závitové tyče M8 a hliníkového plechu tloušťky 4 mm, do nějž je vytvořen závit M8 a nalisována vodící tyč. Pro posun osy Z o 5 mm je třeba 5n kroků dle vzorce 3.1.



Obr. 4.2: Mechanické uspořádání vozíku

$$n_z = \frac{k}{p_z} = \frac{3200}{1,25} = 2560 [mm^{-1}]$$

Pětinásobkem je 12800 kroků. Rozlišení není v tomto případě rozhodující veličinou, protože dle vzorce níže činí 0,39 μm , což dělá osu Z nejpřesnější z celého zařízení.

$$r = \frac{1}{n} = \frac{1}{2560} = 3,9 \cdot 10^{-4} [\text{mm}]$$

Veškerá kabeláž přítomná na pískovače byla spojena do svazků, následně opatřena izolací z černé pásky či ochranné kabelové vložky a nakonec připevněna na vhodných místech, aby bylo zabráněno nechtěnému zaklínění jednotlivých kabelů při posuvu os. Pro vedení svazků od jednotlivých funkčních bloků byly vyvrtány v rámu díry o průměru 10-12 mm. Pro realizaci propojení kabelových svazků a přístrojové krabice slouží montážní krabička. Z bočních stran jsou připojeny svazky pískovačky a z vrchní strany vyvedeny 3 osmi žilové kabely o délce cca 1 m. Vstupy do vnitřku krabičky jsou opatřeny kabelovými průchodkami 5-12 mm M16.

4.2 Přístrojová krabice

Jako ochrana DPS, vnitřních konektorů, displeje a tlačítek byla zvolena plechová krabice původem z radiostanice Tesla VO 32, která byla zbavena všech vnitřních součástí a demontovatelného čelního panelu, který byl z větší části odstraněn, resp. zůstala zachována jen obvodová část. Spodní dno bylo provrtáno 4 dírami průměru 4 mm pro připevnění DPS (distančními sloupky) a ty byly upraveny záhlubníkem, aby šrouby se zápusnou hlavou splývaly s povrchem krabice. Na pravé části se nachází kolébkový vypínač a šroubovatelné pojistkové pouzdro. Levá strana je osazena 3 ks kabelových průchodek 5/12 mm M16 pro osmižilové kabely vedoucí k samotné pískovače. Tím je dosažena dostatečná ochrana proti vniknutí prachu. Zadní část krabice je kryta pozinkovaným plechem z přístroje Tesla BS575 opatřeným základním nátěrem. Je přichycen 4 ks šroubů M6 s podložkami. Do plechu byla vyvrtána díra průměru 14 mm pro připojení USB A konektoru a 12 mm pro upevnění přepínače ISOSTAT, jenž slouží k přepínání provozního modu zařízení. Zadní panel obsahuje barevně odlišené přípojné svorky pro napájecí zdroj stejnosměrného proudu.

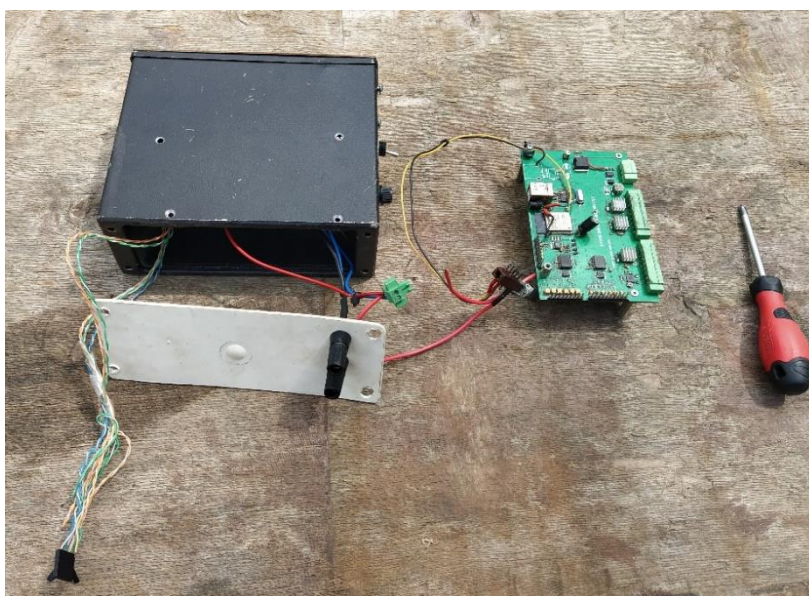
Čelní panel je tvořen deskou z jednostranně plátované FR-4 a je přichycen do demontovatelné obvodové části 4 ks šroubů M3 s válcovou hlavou. Panel obsahuje 5 děr pro ovládací mikropřepínače a otvor pro vložení displeje typu 2004. Displej a DPS s tlačítky jsou přichyceny k panelu šrouby přes distanční sloupky M3x15, které byly připájeny ze strany plátované mědi, viz obr. 4.3. Kvůli kuželovému tvaru tlačítek a s tím související

nutností vytvořit pro ně větší otvory je čelní část nejvíce náchylná k pronikání prachových částic. Při provozu je nutno mít tuto skutečnost na zřeteli.



Obr. 4.3: Připájené distanční sloupky ze zadní strany čelního panelu

Oproti návrhu přístrojová krabice postrádá stop tlačítko s aretací, jenž by duplikovalo činnost hlavního vypínače. Proto není u prototypového výrobku použit. Z praktického hlediska pro ovládání postačí 5 tlačítek, protože všechny ovládací povely jsou zasílány počítačem pomocí ovládacího softwaru. Na obr. 4.4 je zachycen stav před montáží DPS a kabeláže do přístrojové krabice. Zadní čelo z měkkého plastu bylo v tomto případě provizorním řešením a bylo ve finální podobě změněno.



Obr. 4.4: Stav před montáží DPS do přístrojové krabice

4.3 Pneumatický systém

Oproti teoretickým poznatkům nebylo přistoupeno k systému přísávání abraziva, které je popsáno výše z důvodu nerealizovatelnosti v domácích podmínkách. Pokusy s tímto typem nebyly úspěšné, jelikož docházelo k rychlému zaplnění prostoru před tryskou a vyvržení abraziva zpět do zásobníkového prostoru. Řešením se proto stal tzv. tlakový systém, kdy je do nádoby s abrazivem jedním otvorem vpouštěn stlačený vzduch a druhým vypouštěn přímo do trysky. První verze se skládala ze zavařovací sklenice a jejího víka opatřeného dvěma rychlospojkami. Vzhledem k tloušťce plechu víka a jeho prohýbání při tlacích nad 1,5 bar bylo přistoupeno k vytvoření protikusu z hliníkové pásoviny síly 4 mm, do kterého byly zhotoveny dva závity G ¼“. Tento typ tlakového systému fungoval spolehlivě do tlaku zhruba 2,5 bar. S vyšším tlakem docházelo k úniku vzduchu a s ním i abraziva přes závit víka. Jednotlivé části jsou na obr. 4.5.



Obr. 4.5: První řešení nádoby abraziva

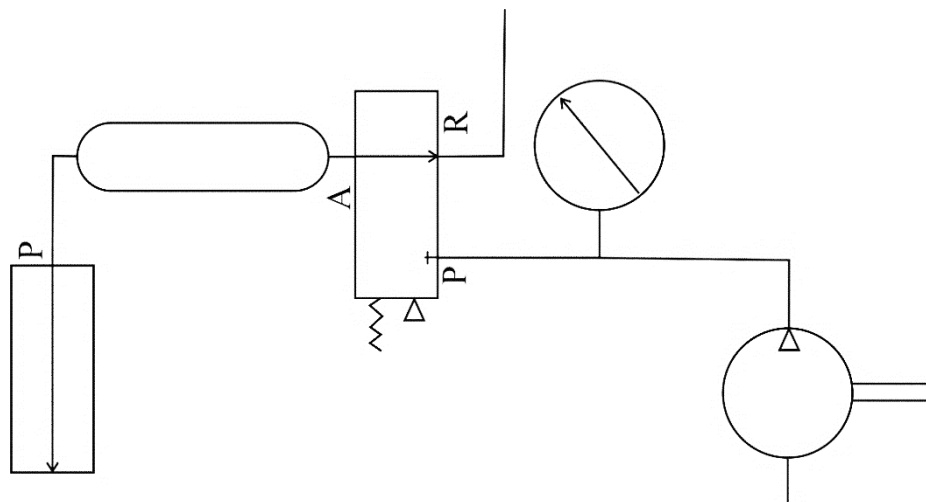
Jako podstatně spolehlivější způsob realizace se ukázala úprava nádoby z pneumatické stříkací pistole. Po odstranění ručního ovládání a trysky došlo k vyvrtání přípojného závitu pro rychlospojku a otvoru do dna nádoby. Ačkoli při vyšších tlacích nad 3 bar dochází k průhybu dna, dostatečné utěsnění kolem rychlospojek nedovolí unikat vzduchu, ani abrazivu. Nejvyšší dosažený provozní tlak v nádobce činí cca 6,5 bar. Nádobka pojme cca 0,5 kg abraziva a je možné ji plnit po odšroubování závitu na spodní části nádoby. Nádobka je umístěna v lůžku poblíž pneumatického ventilu. Vzhledem ke spotřebě, která je objasněna níže, vystačí plná nádobka na vypískování plochy 200 cm² při tlaku 4 bar.

Podmínkou nutnou, nikoliv však postačující, je přítomnost regulátoru tlaku na výstupu z kompresoru. S ohledem na provozní podmínky jednotlivých částí je doporučeno použití maximálního tlaku 6 bar. Na vstupu stlačeného vzduchu do zařízení je přes T spojku připojen snímač tlaku typ 1206, který zabráňuje vykonání instrukce poslané prostřednictvím ovládacího programu za podmínek, kdy je tlak menší než 1,2 bar a větší než 6 bar. Následuje pneumatický ventil, jenž krom své primární funkce, tj. pouštění stlačeného vzduchu do nádoby s abrazivem, plní funkci „ofuku“, kdy je po uzavření ventilu reziduální tlak vpuštěn do hadičky sloužící k očištění pískovaného místa od abraziva. Zjednodušené pneumatické schéma je na obr. 4.7.



Obr. 4.6: Finální řešení nádoby s abrazivem

Všechny spoje od ventilu k nádobce jsou opatřeny rychlospojkami a rozvod vzduchu je po celé délce realizován PP hadicí průměru 6 mm. Délka hadice od nádoby s abrazivem je volena tak, aby za žádných okolností nemohlo dojít ke „zlomení“ či „příškrcení“ hadice.



Obr. 4.7: Zjednodušené pneumatické schéma pískovačky

5 POPIS SOFTWARE

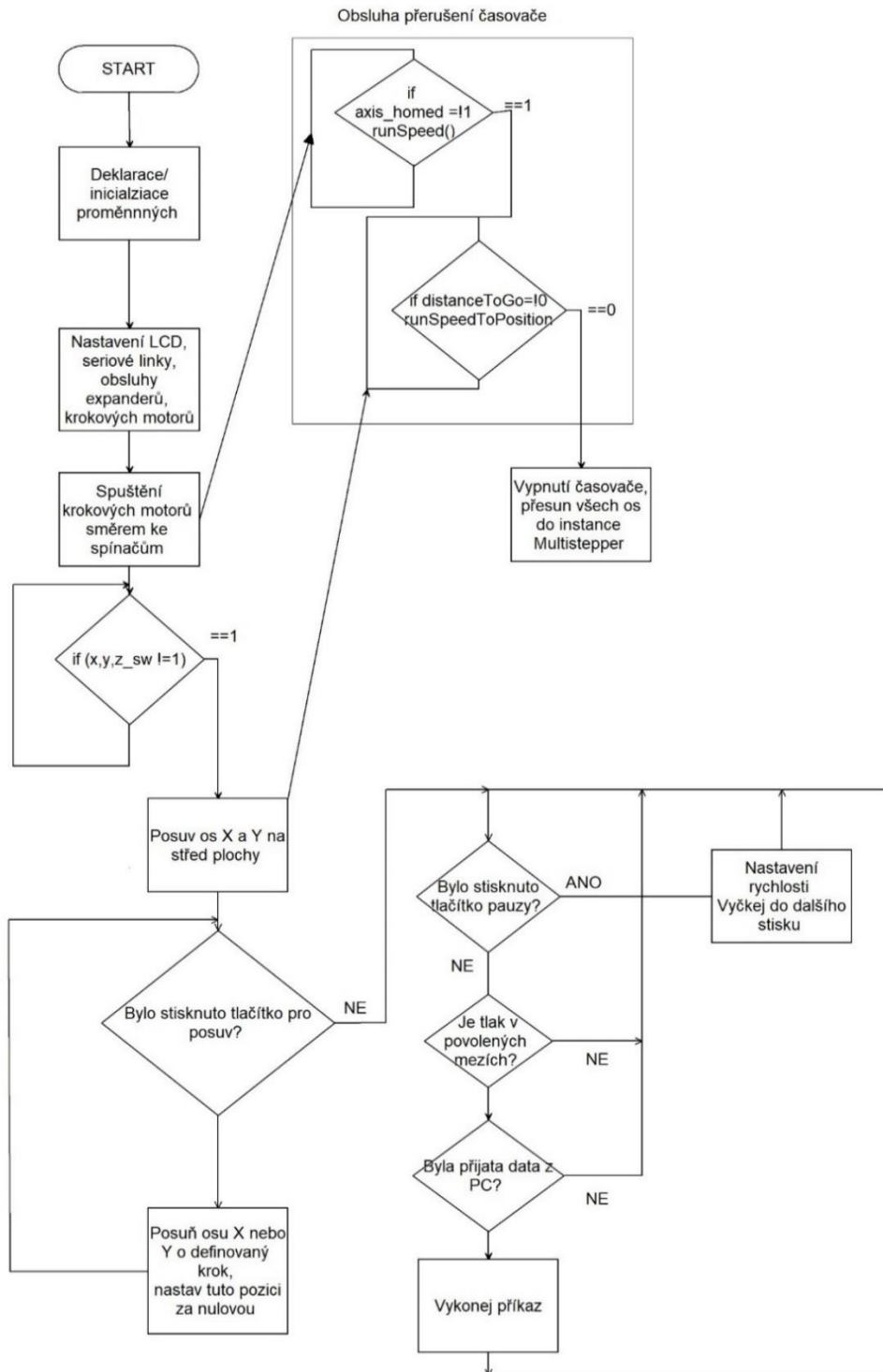
5.1 Firmware pro ESP32

Firmware pro mikrokontrolér ESP32 byl vytvořen v prostředí Arduino IDE, do kterého bylo přidáno rozšíření pro kompilátor a nástroj `esptool.py` pro nahrávání firmwaru přes USB. Po prvotní deklaraci a inicializaci proměnných a knihoven dochází k inicializaci expandérů PCF8574 a nastavení obsluhy přerušení od čítače a časovače. Následně jsou nastaveny všechny používané vstupy a výstupy, například piny MS1-MS3 všech driverů A4988 do log. „1“. Program ve velké míře využívá knihovny pro řízení krokových motorů *AccelStepper.h* a *MultiStepper.h* [28] a pro obsluhu displeje knihovnu *LiquidCrystalI2C* [29]. Při každém startu zařízení dojde k nastavení nulové polohy všech os, což je provedeno voláním funkce *runSpeed()* v obsluze přerušení časovače T1. Při tom dochází ke spojitému krokování motorů směrem ke koncovým spínačům. Pokud je vlivem posuvu daný spínač sepnut, je nastaven flag, který zabraňuje dalšímu pohybu osy. Po tzv. „homingu“ všech os jsou volány funkce *runSpeedToPosition()*, jejíž argumentem je počet kroků, který má driver „vykonat“. Dokud není posuv vykonán, což je určeno návratovou hodnotou funkce *distanceToGo()*. Osy X a Y jsou krokovány v opačném směru na střed zařízení. Následně jsou všechny 3 osy spřaženy do skupiny osy s využitím deklarace z knihovny *MultiStepper.h*. Tím je zaručeno, že při posuvu os do různých pozic dojde k „příjezdu“ ve stejný časový okamžik. Jedná se o implementaci lineárního interpolátoru. Po dokončení této operace je z hlediska uživatele zařízení připraveno k použití. Firmware v tuto chvíli běží v nekonečné smyčce. V ní je neustále volána funkce *osy.runSpeed()*.

V případě, že nejsou z PC přijímány příkazy, je možné uživatelsky měnit nulovou polohu v přírůstcích po 2 mm posuvu pro osu X a Y zvlášť 4 krajními tlačítky. Na základě stisknutí tlačítka dojde k volání funkce *PenFree()*, jejímž argumentem je datový typ `int` v rozmezí 1-4. Souřadnice X a Y jsou neustále zobrazovány na displeji voláním funkcí z knihovny *LiquidCrystalI2C*. Stiskem prostředního tlačítka je vyvolána pauza, při níž je možno nastavit rychlost posuvu všech os v rozmezí 100-4000 kroků.s⁻¹. Dokud nedojde k opětovnému stisku tlačítka, zařízení nereaguje na příkazy z PC.

Příkazy z PC třídí a spravuje instance z knihovny *Serial_command.h* [30]. Volání funkce *SCmd.readSerial()* je podmíněno splněním podmínky na určený tlak vzduchu na přívodu. Vzhledem k absenci oddělovače za označením instrukce v jazyce HPGL musí být programem v PC separátor vložen. Po rozdělení zprávy na instrukci, první argument a případně druhý argument je volána konkrétní funkce určená mnemotechnickou zkratkou. Kromě funkce *SelectPen()* jsou argumenty zbylých používaných funkcí převedeny na datový typ `long`. Příkladem dalšího chování programu

budiž funkce *PenDown()*. Oba argumenty jsou vloženy do pole *positions[]*. Dále je volána funkce *osy.moveTo(positions)* jenž určuje koncové body.



Obr. 5.1 Vývojový diagram firmwaru pro ESP32

Pro výpočet rychlosti os je použita funkce *osy.setSpeed()*. Následně je výstup, tj. pin P7 expandéru PCF8574, uveden do stavu log. „1“. Tím je sepnut pneumatický ventil. Ve smyčce *while(!isDone)* je zjišťováno, zdali byl posuv dokončen na základě

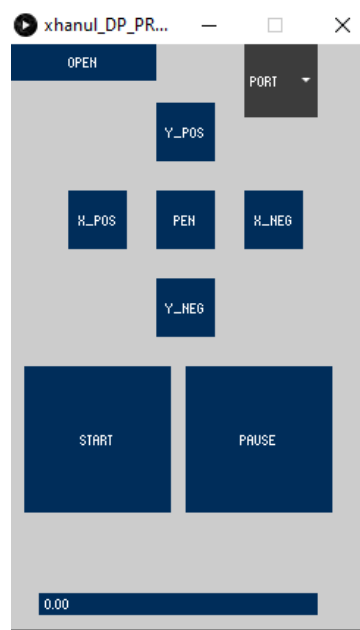
návratové hodnoty funkce *osy.run()*. Tou je též nastavována hodnota proměnné *isDone*. V případě dokončení posuvu dojde ke změně na pinu P7 na log. „0“ a zaslání zprávy „AH“, kterou je signalizováno dokončení instrukce obslužnému programu v PC a možnost vykonání další. Vývojový diagram je na obr. 5.1.

Tab. 2: Implementované příkazy.

Příkaz	Argumenty	Funkce
IN	žádné	inicializace
VS	speed[long], pen [int]	nastavení rychlosti posuvu pera, nepoužito
PU	x [long], y [long]	přesun na pozici; ventil vypnutý
PD	x [long], y [long]	přesun na pozici; zapnutý
SP	pen [int]	volba vzdálenosti od poč. polohy v ose Z

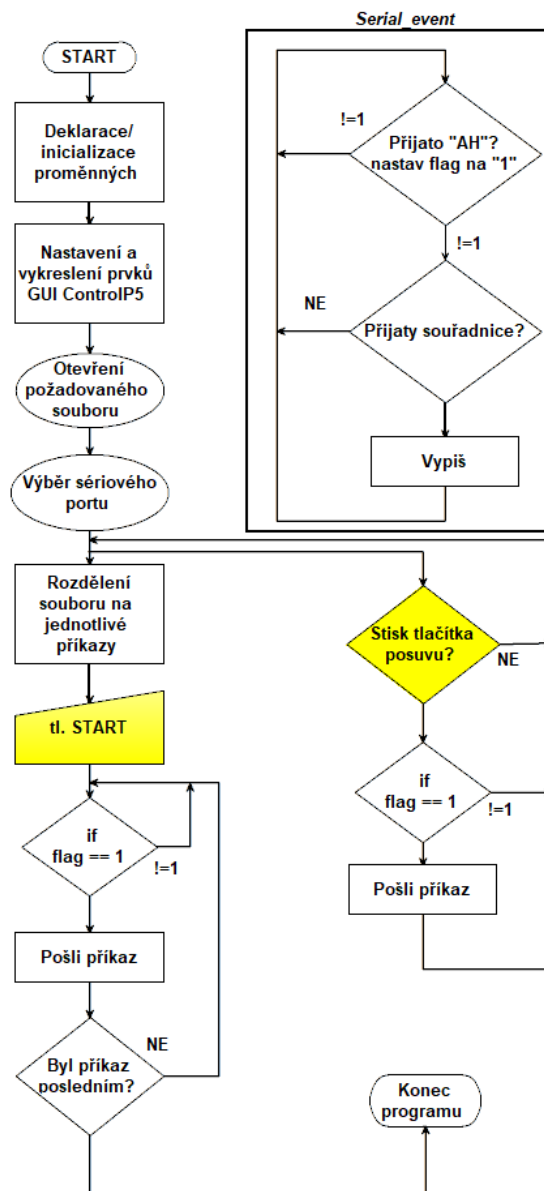
5.2 Obslužný program pro PC

Obslužný program byl vytvořen v prostředí Processing verze 3.5.4 a odzkoušen na dvou různých PC s odlišnými komponenty. Operačním systémem Windows 10 v1809 a v1903. Pro vykreslení tlačítek a stavového řádku byla použita knihovna ControlP5. Po spuštění programu dojde k vykreslení okna ve výchozím rozlišení 800x300 px. Uživatel má možnost po stisku tlačítka „open“ vybrat vytvořený soubor s příponou .plt.



Obr. 5.2: Prostředí obslužného programu.

Po jeho otevření dojde k úpravě jednotlivých řádků s instrukcemi vložením mezery mezi mnemotechnickou zkratku a první argument. Původní soubor však zůstává nedotčen pro další použití. Dalším důležitým krokem je nutnost vybrání správného COM portu. Tím dojde k navázání komunikace mezi PC a pískovačkou. Stiskem tlačítka „START“ dojde k odesílání jednotlivých instrukcí a děje se tak, dokud nedojde k odeslání všech instrukcí. Je možné pozastavit odesílání instrukcí tlačítkem „PAUSE“. Instrukce jsou odesílány na základě „potvrzení“ druhé strany kódem „AH“. Na „progress baru“ je znázorněn postup v %. Program umožňuje též „simulaci“ tlačítek hlavního panelu, tj. posuv v obou osách. Programově lze navíc samostatně ovládat sepnutí ventilu (instrukcí PD). Prostředí obslužného programu je na obr. 5.2, vývojový diagram na obr. 5.3.



Obr. 5.3 Vývojový diagram obslužného programu pro PC.

6 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI

6.1 Spotřeba a provozní vlastnosti

Napájecím zdrojem byl zvolen spínaný síťový zdroj JCPower 12 V/20 A. Maximální zvlnění na výstupu dosahuje 20 mV. Pomocí odporového trimru bylo nastaveno výstupní napětí na 12,2 V při připojeném a zapnutém zařízení s přihlédnutím k minimálnímu napájecímu napětí driverů A4988. Zařízení je proti nadměrnému proudovému odběru chráněno skleněnou pojistkou T 1,5 A 5x20 mm. Zapnutí přístroje při delší odstávce, tj. při vybitých kondenzátorech, provází zvýšený proudový odběr cca 1,2 A. Všechny napěťové větve měly stálou, neměnnou hodnotu napětí, tj. 3,31 V a 5,08 V. Zařízení bylo testováno v exteriéru, přičemž zhruba 10 dní byla nalakovaná a připojená DPS vystavována vlivu usedání abraziva na jejím povrchu, vzdušné vlhkosti a teplot do 10 °C. Během tohoto období nedošlo k žádné poruše na zařízení. Následně byla DPS očištěna a uložena do přístrojové krabice. Maximální spotřeba zařízení při pohybu všech os a sepnutého ventilu činí 11,86 W. Spotřebu ve vybraných provozních módech pokrývá tab. 3. Poměrně vysoký proudový odběr v klidovém stavu je způsoben trvalým buzením krokových motorů. V průběhu vývoje zařízení došlo k mechanickému poškození snímače vzdálenosti na ose Z a ten byl nahrazen koncovým spínačem stejného provedení jako na zbylých osách.

Tab. 3: Naměřené hodnoty spotřeby zařízení.

Mód provozu	Napětí zdroje [V]	Odebíraný proud [A]	Spotřeba [W]
Klidový stav	12,2	0,7	8,54
Pohyb osy x,y	12,2	0,76	9,27
Pohyb všech os	12,2	0,8	9,76
Pískování	12,1	0,98	11,86
Režim nahrávání	12,2	0,37	4,51

Bylo provedeno měření závislosti teploty vybraných součástí na čase od zapnutí přístroje. Z důvodu nemožnosti měřit teplotu jednotlivých částí uvnitř přístrojové krabice, byla DPS přemístěna mimo ni. Teplota okolí byla 23 °C. Měřicím přístrojem byl multimetr UNI-T UT107 s termočlánkem typu K. Přístroj byl uveden do chodu a s pomocí obslužného programu byl „pískován“ obrazec z kapitoly 6.3. Přívod vzduchu nebyl připojen. Výsledky jsou shrnuty v tab. 4. Teplota tří chladičů driverů A4988 osazených na DPS byla zprůměrována. Po opětovném zkompletování a testování nepřesáhla teplota uvnitř přístrojové krabice 45 °C při provozu zařízení po dobu 60 minut.

Tab. 4: Naměřené hodnoty teploty vybraných částí zařízení.

Čas od zapnutí [min]	Teplota [°C]		
	Chladiče A4988	Kryt ESP32	Chladič nap. Zdroje
1	24	24	24
5	30	28	30
30	34	29	35
60	41	29	43

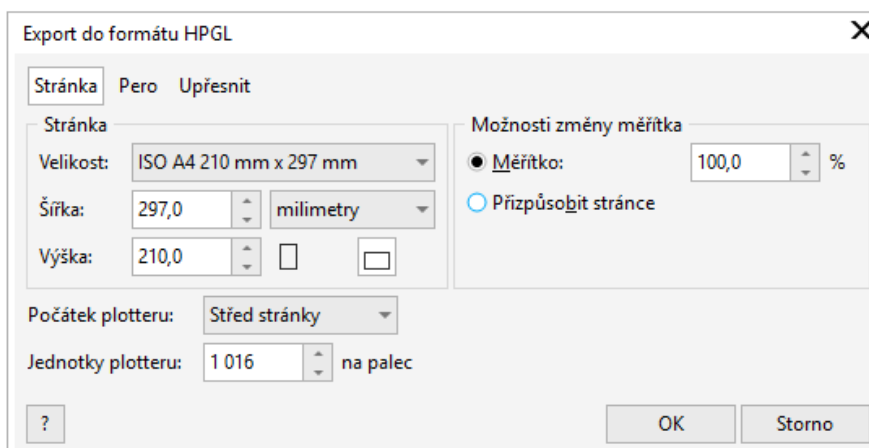
Zařízení je rovněž možno napájet olověným akumulátorem či palubní sítí mot. vozidla. To je zejména vhodné pro pískování na místech bez přístupu k el. síti, např. hřbitovy. Podmínkou nutnou je však použití kompresoru s pohonem na spalovací motor, případně použití elektrocentrály. Motorové kompresory, zejména pokud je kompresor řešen jako šroubový, dosahují vysokého výkonu (10 kW) a tím i velkého průtoku vzduchu.

6.2 Nastavení exportu v prostředí CorelDraw

Při návrhu ornamentu (nejen) v programu CorelDraw je nutno vzít v úvahu následující specifika a omezení:

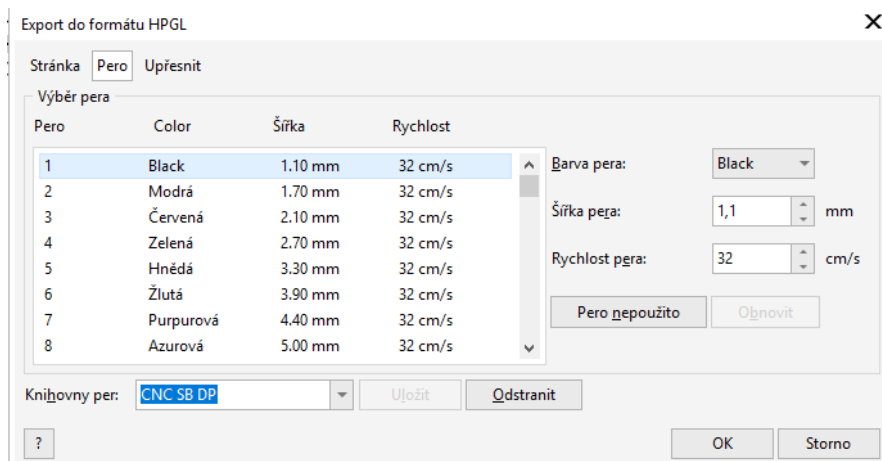
- Maximální plocha A4, tj. 210x297 mm
- Orientace na šířku
- Počátek „plotteru“ je ve výchozím stavu ve středu plochy
- Firmware počítá s jednotkami 1016 bodů na palec

Tyto základní body shrnuje obr. 6.1. Dialogová okna exportu jsou téměř stejná, jak ve verzi 11 (rok 2002), tak ve verzi 2019. Prostředí návrhového grafického programu CorelDraw 2019 umožňuje nastavit pro export do jazyka HPGL maximálně 255 per individuální šířky. Vzhledem k naměřeným hodnotám průměru stopy a fyzickým omezením posuvu osy Z je vhodné použít maximálně 8 „per“. Na obr. 6.2 je doporučené nastavení šířky per, které reprezentuje teoretický průměr stopy na pískovaném podkladu.

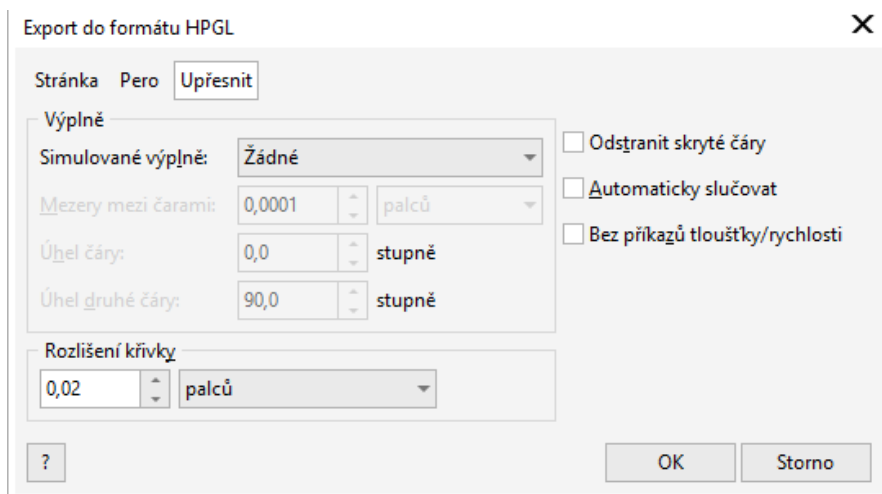


Obr. 6.1: 1. dialogové okno exportu programu CorelDraw.

Rychlost posuvu pera je pro všechna pera stejná z důvodu nepoužití implementované instrukce VS vzhledem k tomu, že pro hloubkové pískování je vhodné použití velmi nízkých rychlostí posuvu nezávisle na průměru stopy. Navíc je pro každý druh materiálu různá, což vyžaduje alespoň minimální přehled obsluhy o možnostech zařízení. Poslední dialogové okno na obr. 6.3. umožňuje vytvořit simulovanou výplň, nicméně vhodnější postup je tvořit výplň pro každý objekt zvlášť ještě před exportem.



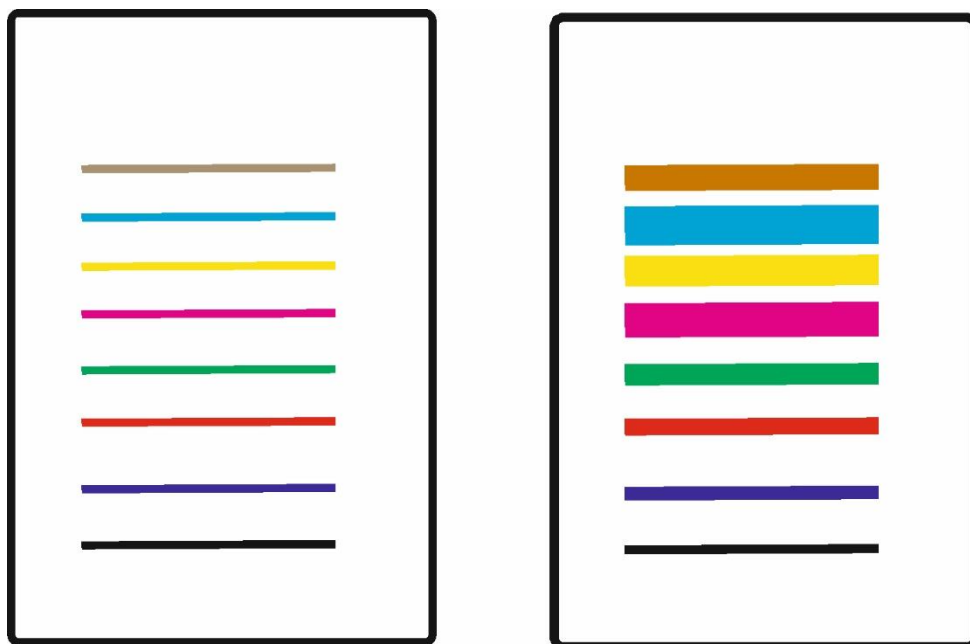
Obr. 6.2: 2. dialogové okno, nastavení per.



Obr. 6.3: 3. dialogové okno, nastavení výplně a rozlišení křivky.

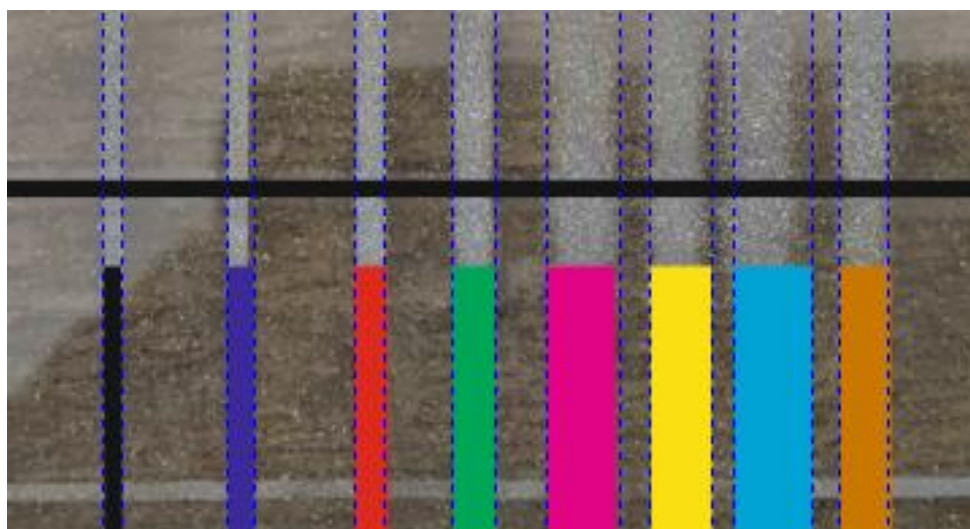
6.3 Test jednotlivých „per“

V rámci první ukázky byly do obdélníka uzavřeny čáry, jejichž barva vyjadřuje budoucí šířku, jak bylo provedeno v předchozí kapitole. Pískovaným povrchem bylo kouřové sklo tl. 3 mm. Abrazivem byl sklářský písek filtrovaný sítím o délce strany oka 0,1 mm. Tlak byl udržován na hodnotě 4 bar a rychlost posuvu činila 1000 kroků.s⁻¹. Na obr. 6.4 vlevo lze vidět původní návrh, vpravo pak reimportovaný soubor v jazyce HPGL. Lze si všimnout, že osa jednotlivých čar je po importu posunuta vlevo od osy původní. Proto je vhodné před samotným pískováním zkontrolovat vytvořený soubor a provést případné úpravy. Pozorováním bylo taktéž zjištěno, že překladem grafiky do formátu HPGL dojde k určité nelogičnosti při volbě „per“. Tím je myšlen začátek pískování s perem č. 5, dále č. 8, následuje č. 6, č. 7 a potom dále „logicky“ k peru č.1. Tento stav však nebrání vykonávání řádné funkce pískovačky a je tak pouze podnětem k zamyšlení.



Obr. 6.4: Původní čáry a import zpět s použitím knihovny per.

Po vypískování obrazce pískovačkou došlo k pořízení snímku výtvaru a k původní předloze byl dodán výřez, jenž byl zmenšen na stejné měřítko (obr. 6.5). Lze si všimnout, že předposlední čára, kterou reprezentuje azurová barva, má nižší šířku, než bylo předpokládáno. To může být dáno velkým rozptylem zrn abraziva při dopadu na pískovanou plochu. Proto je vhodné použití stopy trysky, tj. šířky pera do 4,4 mm.



Obr. 6.5: Srovnání teorie a praxe.

6.4 Vyplnění obrazce

Před testováním výplně obrazce bylo nutné vzít do úvahy, že stopa trysky je kruhového průřezu a standardními metodami výplně v grafickém editoru není možné snadno docílit vypískování stopy v nepravidelném obrazci tak, aby nedošlo k přesahu přes obrys. Proto bylo přistoupeno k následujícímu:

- Stopa trysky musí být co nejmenší
- Použít mřížkovou (čtvercovou) výplň
- Obrys musí být nepravidelný
- Lze očekávat velkou časovou náročnost

Obrysem byla v tomto případě silueta kočky domácí. Pro názornost byla použita dvakrát. V prvním případě byl pískován pouze obrys na obr. 6.6, ve druhém byla použita čtvercová výplň na obr. 6.7. Nastavení PostScriptové výplně bylo následující:

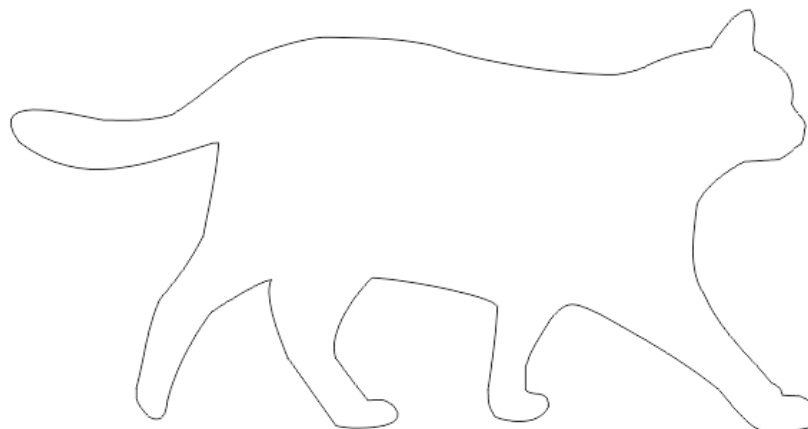
Frekvence: 20

Šířka čáry: 3 (nemá vliv)

Šedá na popředí: 100

Šedá na pozadí: 0

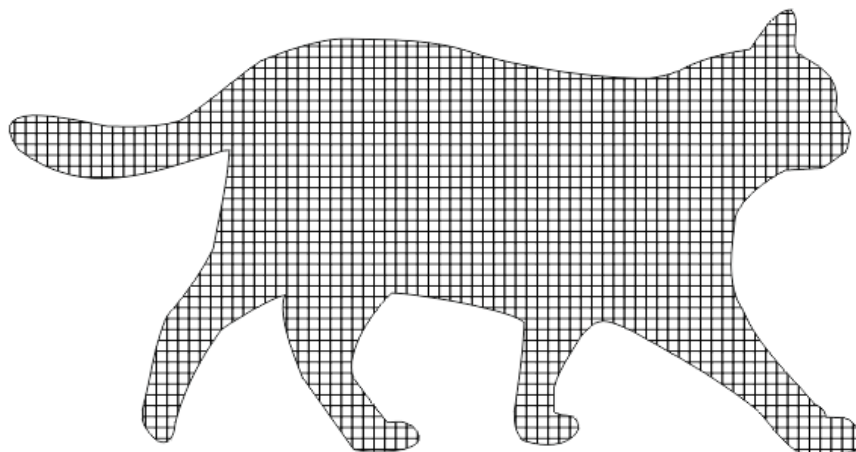
Vinutí výplně: vypnuto



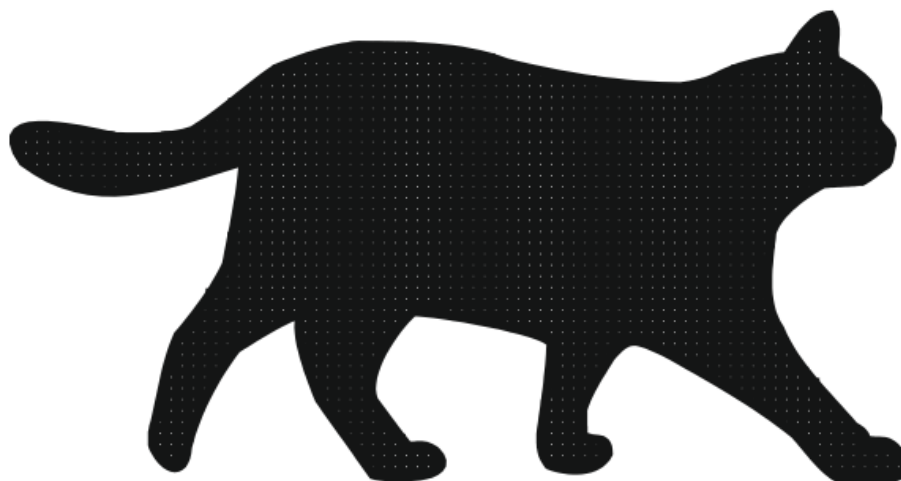
Obr. 6.6: Obrys bez úprav.

Využitý byl nejmenší možný průměr stopy, tj. 1,08 mm. Samotný grafický editor však dovoluje nastavit šířku pera pouze na celé desetiny milimetru, což se odráží v zanedbatelné nepřesnosti v rámci aplikované výplně (obr. 6.7).

Hrubé rozměry obrysu byly vzhledem k očekávané časové náročnosti zvoleny 100x50 mm. Import souboru v jazyce HPGL je vidět na obr. 6.8. Soubor obsahoval 12390 instrukcí, přičemž při pískování bylo vidět, že pískovačkou nebyly tvořeny čáry zleva doprava, případně odshora dolů, nýbrž po vypískování obrysu docházelo postupnému vytváření čar ve tvaru obráceného „L“ po řádcích odspoda nahoru, což není příliš časově efektivní. Spotřeba písku byla 75g při tlaku 3,5 bar.



Obr. 6.7: Aplikovaná výplň na obrys.



Obr. 6.8: Import z .plt souboru.

Výsledek je obr. 6.9 níže. Vypískování obou motivů zabralo při rychlosti 500 kroků.s⁻¹ 74 minut. Při bližším pohledu na vypískovanou plochu je zřejmý rastr čtvercové výplně, který je možno potlačit nabarvením. V podmínkách exteriéru se jedná o nutnost vzhledem k patrným skvrnám na ploše, jež byly způsobeny odkapávající mízou z břízy. Rýha v pravé polovině obrazce byla způsobena chvilkovým přicpáním trysky reziduem v tlakové nádobě, přičemž po uvolnění bylo do trysky vrženo přílišné množství abraziva.



Obr. 6.9: Obrazec a jeho výplň.

6.5 Pískování křivky s velkým množstvím bodů

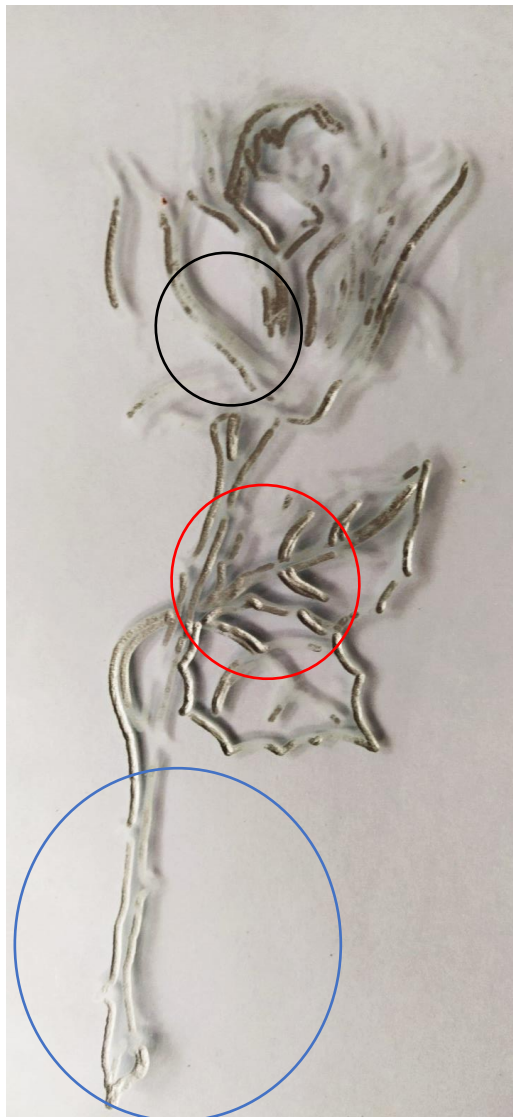
V tomto případě byl zvolen ornament, kdy při exportu do formátu HPGL vznikne enormní množství instrukcí. Jelikož je křivka velice členitého tvaru, celý soubor čítá více než 15000 instrukcí. Cílem je demonstrovat nenulový čas sepnutí ventilu, z toho vyplývající důsledky a jejich řešení. Na obr. 6.10 je vyobrazen ornament růže, který je velice často používán jako doplněk k nápisu na kamenné desky. Nejmenší použitelná výška pro řezací plotter je cca 150 mm při zachování proporcí. Poté dochází ke ztrátě detailů prořezáním a poškozením pískovací folie. V rámci pokusu byla zachována výška 150 mm.



Obr. 6.10: Ornament růže.

Podobně, jako v předchozí podkapitole, i zde byla použita nejmenší možná šířka a nastavena rychlost posuvu na $1000 \text{ kroků} \cdot \text{s}^{-1}$. Výsledek je na obr. 6.11. Obrisy byly zvýrazněny stříbrnou barvou ve spreji. Ve srovnání s předlohou je možné si povšimnout úplného vynechání některých částí obrysu. Jedná se zejména o členité části, oblé vrcholky listů či ostré vrcholky na stonku. To je způsobeno příliš vysokou rychlostí posuvu, kdy je instrukce PD vykonána rychleji, než dojde k úplnému otevření ventilu. Při vykonávání mnoha PD instrukcí za sebou, jejichž rozdíl v souřadnicích byl v řádů jednotek až desítek, bylo slyšet jen slabé cvakání cívky. Tento nepříliš estetický problém je možné řešit ventilem s rychlejší spínací rychlostí, který v době testování nebyl k dispozici, nebo změnou celého konceptu programového vybavení či zpomalením rychlosti posuvu. Na

obr. 6.11 v černém kruhu je označena oblast s rychlostí posuvu 750 kroků.s^{-1} . Modrý kruh označuje ornament pískovaný rychlostí 500 kroků.s^{-1} a červeným kruhem je vybrána oblast s rychlostí 250 kroků.s^{-1} . Pracovní tlak činil 4 bar. Časová náročnost byla 45 minut.



Obr. 6.11: Ornament růže vypískovaný různou rychlostí posuvu.

Je nutné si uvědomit, že vzhledem k širokému průměru trysky s porovnáním vůči noži plotteru jsou jemnější detaily obsažené v původní křivce nenávratně ztraceny a z toho důvodu nemá použití takto složitých ornamentů v tomto případě reálný význam.

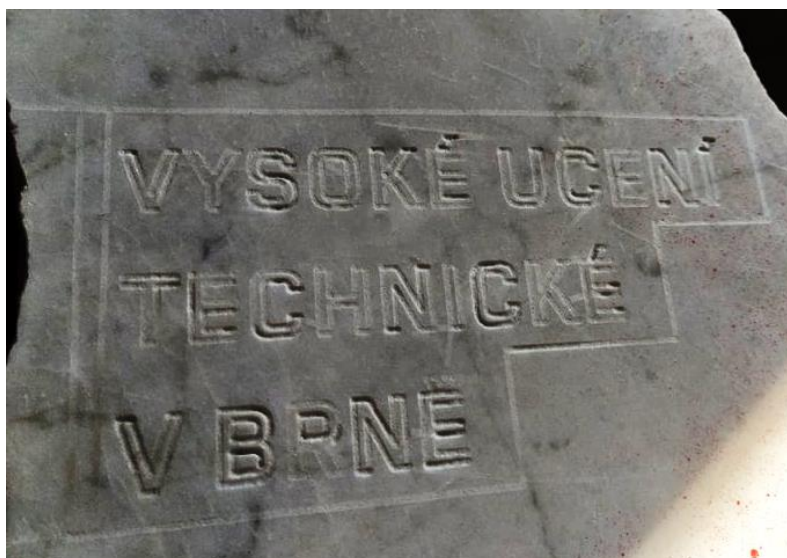
6.6 Pískování textu

Předpokládanou hlavní pracovní náplní realizovaného přístroje je pískování textu. V kamenické praxi jde 95 % ze všech pískovaných ploch na vrub nápisů do kamene nebo opaxitového skla. Z kamene je ponejvíce používána žula (Tarn) a mramor. Vzhledem k použitému abrazivu je nutné použití vyšších tlaků stlačeného vzduchu, což zvyšuje nároky na použitý kompresor při zachování dostatečně velké rychlosti posuvu. Pro názornost byla použita kombinace obrysu a textu použitím logotypu VUT v Brně. Předloha se simulovanou finální tloušťkou čáry je na obr. 6.12.



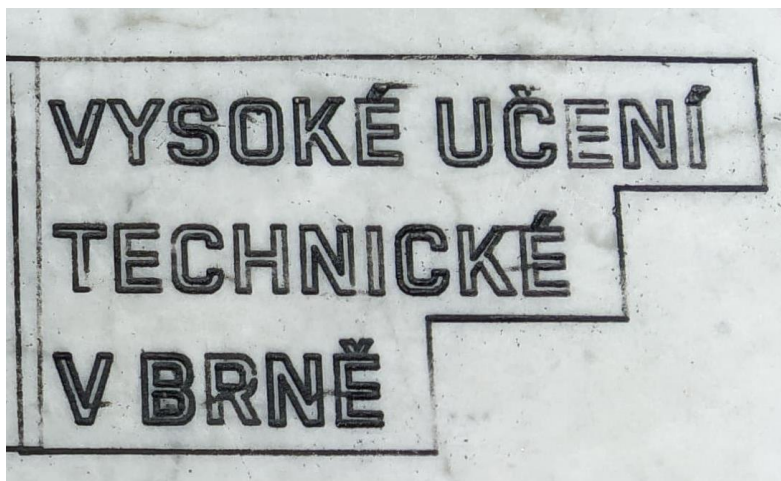
Obr. 6.12: Předloha pro pískování do kamene.

V první části byla použita mramorová deska neurčitého tvaru s leštěnou plochou. S přihlédnutím k tloušťce, která činila 25 mm, bylo nutné seřizovací stojny vyšroubovat na nejvyšší míru, aby nedocházelo ke kolizi závitové tyče osy Z s mramorovou deskou. Na desku se při zachování proporcí však celá předloha nevešla, tudíž bylo přistoupeno k vypískování rámečku s textem bez loga. Rychlost posuvu byla 500 kroků.s⁻¹. Výsledek je na obr. 6.13. Spotřeba abraziva byla cca 50 g.



Obr. 6.13 Pískování textu do mramoru.

Na vypískovaném textu je vidět vliv kompresoru, kdy nebylo s typem Güde 231/10/24 možné dosáhnout stálého tlaku 6 bar. Kompresor s vyšším výkonem, tudíž vyšším průtočným množstvím vzduchu (alespoň $350 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$), nebyl v době testování k dispozici. Po vypískování byl nápis upraven aplikací černé barvy ve spreji na plochu desky a přebytečná barva byla neprodleně odstraněna pomocí ředidla C6000 s využitím hadříku a rovné destičky. Tím bylo dosaženo estetického vylepšení a nápis se stal čitelnějším, viz obr. 6.14. Časová náročnost byla 5 minut.



Obr. 6.14: Text po aplikaci černé barvy.

Stejná předloha, v tomto případě i s logem, byla vypískována do desky z liberecké žuly. Vzhledem ke světelným podmínkám nebylo možné zachytit surový vypískovaný text na desce, a proto byl opět vyčerněn. Opět se na výsledku podepsal nedostatečný výkon kompresoru, jak je zřejmé z obr. 6.15.



Obr. 6.15: Vypískovaný text do liberecké žuly po aplikaci černé barvy.

6.7 Shrnutí a náklady na stavbu zařízení

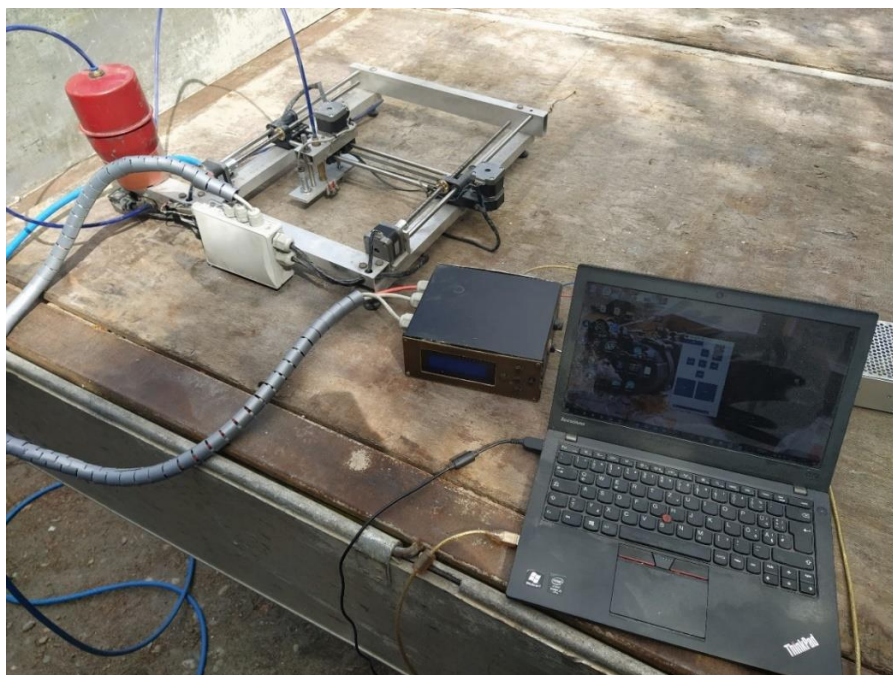
V tab. 5 jsou shrnuty doporučené parametry zjištěné na základě předchozích experimentů. Nelze však vyloučit výraznější změny parametrů v případě použití jiného typu abraziva a je nutno zmínit, že pískovat lze i do jiných materiálů, než je sklo a kámen.

Tab. 5: Doporučené parametry pro pískování různých materiálů.

Materiál	Doporučený tlak [bar]	Obrys – rychlost [kroky.s ⁻¹]	Výplň-rychlost [kroky.s ⁻¹]
Sklo	4	1000	500
Mramor	6	500	250
Žula	6,5	500	250

Porovnáním vytvořeného zařízení se šablonovým pískováním lze konstatovat, že vytvořená CNC pískovačka snižuje počet operací nutných k fyzickému vytvoření motivu na 2: vytvoření motivu na počítači a samotné pískování. Pokud budou sníženy výrobní náklady, tak zařízení může cenově konkurovat řezacím plotterům. Podstatnou nevýhodou oproti šablonovému pískování je časová náročnost samotného pískování, která je dána velikostí trysky.

Na obr. 6.16 je zachycena sestava CNC pískovačky a počítače. Z hlediska bezpečnosti operátora je zřejmé, že odstup mezi pískovačkou a počítačem je velmi malý. V praxi je nutné používat ochranné brýle či krycí sklo. Komunikace bezchybně fungovala s USB kabelem A-B délky 3 m. Nejvhodnějším uložením pískovačky je pískovací box vhodných rozměrů, který však nebyl pro účely testování diplomové práce k dispozici.



Obr. 6.16: Sestava CNC pískovačky s připojeným počítačem.

Přehled v tab. 6 uvádí skutečné materiálové náklady vynaložené v rámci stavby zařízení. V přehledu nejsou zahrnuty náklady na dílenské vybavení, jeho amortizaci, spotřební materiál, práci a součásti, které měl autor k dispozici z dřívějšíka, případně použité z jiných zařízení, jejichž cena by se stanovovala velmi obtížně. Přibližný odhad časové náročnosti na zhotovení celku, včetně programování SW je 400 hodin čistého času.

Tab. 6: Přehled nákladů na stavbu zařízení.

Položka	Cena [Kč]
Krokové motory	1 200
Výroba DPS	200
Hliníkové profily	300
Součástky	1 400
Kabeláž	200
Spojovací materiál	150
Sada trysek 1,1 mm	650
Hadice a spojky	320
Vedení, závitové tyče	1 200
Elektroinstalační materiál	500
Tabule skla A4, tl. 3 mm, 5 ks	350
Celkem	6 470

7 ZÁVĚR

V rámci diplomové práce byla navržena a realizována CNC pískovačka a její obslužný program. Ten slouží zejména k odesílání instrukcí ze souboru ve formátu .plt, tj. v jazyce HPGL. V teoretické části jsou popsány hlavní techniky tvorby písma do kamene. Je stručně popsán jazyk HPGL. Dále je diskutována možnost stavby zařízení s ohledem na specifika a omezení, které byly respektovány při realizaci.

V rámci třetí kapitoly je nastíněna koncepce zařízení z hlediska elektroniky. Je popsán mikrokontrolér ESP32, výčet jeho důležitých parametrů, popis některých sběrnic, možnosti a způsoby programování. Dále jsou popsány důležité komponenty systému a jejich technické parametry. Jmenovitě krokové motory, jejich způsob řízení, druhy snímačů tlaku a některé koncepce A/D převodníků. Závěr kapitoly je věnován ožívování DPS a problémům, které se při ožívování vyskytly, včetně jejich možného řešení.

Čtvrtá kapitola práce se zabývá postupem tvorby mechanické konstrukce samotné pískovačky. Jsou uvedeny použité konstrukční prvky a vypočítána teoretická přesnost posuvu jednotlivých os. Byl pospán pneumatický systém zařízení a řešení vhodné pro trysku malého průměru.

Pátá kapitola popisuje vytvořený firmware pro ESP32 a obslužný program pro PC, který je jednoduchý na obsluhu. Obsahuje vývojové diagramy a výčet použitých knihoven.

Poslední kapitola popisuje provozní vlastnosti společně se spotřebou el. energie. Dále jsou popsána pravidla pro přípravu ornamentů v prostředí CorelDraw a omezení, se kterými je nutné předem počítat. Na názorných příkladech byly předvedeny schopnosti zařízení a tím i jeho funkčnost. Zařízení je schopno pískovat ornament ploše A4 orientované na šířku, v ose Y je však možné překročit tento limit o 20 mm.

Zařízení je vhodné zejména pro pískování ornamentů, jenž jsou složeny hlavně z obrysových částí. Šířka stopy je nejméně 1,1 mm. Oblast použití je limitována použitým kompresorem. Pro kompresory do výkonu 2 kW je zařízení použitelné k pískování do skla, případně měkkých materiálů jako je např. dřevo a plast. Nad výkon 2,5 kW je možné zařízení použít na pískování ornamentů do kamene (žula), případně betonu. Přínosem je snížení počtu operací nutných k vytvoření ornamentů ve srovnání s technikou šablonového pískování. Bylo prověřeno několik variant pískování do různých materiálů, čímž vznikly poznatky nutné pro další vývoj zařízení.

Všechny použité soubory v jazyce HPGL, zdrojové kódy a výrobní podklady pro DPS jsou součástí příloh.

LITERATURA

- [1] Výběr abraziva a pískovačky dle pískovaného materiálu. *Pískovačka.cz* [online]. [cit. 2019-11-19]. Dostupné z: <https://www.piskovacka.cz/jak-vybrat-piskovacku-abrazivo/>
- [2] Weha Optimu Blueline. In: *Laserstore* [online]. [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: <http://www.weha.cz/optimo-blueline-vodici-zarizeni-pro-piskovaci-stroje-ean122184-skup706.php>
- [3] Tyrolit - Frézy. In: *Tyrolit.CZ* [online]. [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: <https://www.tyrolit.cz/oblasti/kamen-keramika-sklo/odvetvi/zpracovatel-kamene/stroje-cnc.html>
- [4] Laserová gravírka LM 6040. In: *Laserstore* [online]. [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: <http://www.laserstore.cz/produkt/laserova-gravirka-lm-6040-novy-model/>
- [5] Obrábění laserem. *ELUC.CZ* [online]. [cit. 2019-11-20]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1423>
- [6] Tipy a triky pro laserové gravírování kamene. In: *MEGABLOG* [online]. [cit. 2019-11-20]. Dostupné z: <https://www.mega-blog.cz/files/2017/12/Gravura-kamene-8.jpg>
- [7] ŠTULPA, Miloslav. CNC: programování obráběcích strojů. Praha: Grada, 2015. ISBN 978-80-247-5269-3.
- [8] Vektorový grafický formát HPGL. In: *ROOT.CZ* [online]. [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/vektorovy-graficky-format-hppl/>
- [9] Pískovací folie – REFO spol. s r.o. In: *REFO.CZ* [online]. [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: <https://material.refo.cz/148-piskovaci-folie>
- [10] 6 pokročilých tipů pro pískování. In: *Pískovačka.cz* [online]. [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: <https://www.piskovacka.cz/wp-content/uploads/2019/02/tabulku-pozadavku-na-velikost-trysky-768x370.jpg>
- [11] TPS5420 datasheet. *Texas Instruments* [online]. [cit. 2020-4-23]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps5420.pdf?ts=1590940714351>
- [12] ESP-IDF Programming Guide. *Espressif* [online]. [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/index.html>
- [13] ESP32-WROOM-32 datasheet. In: *Espressif.com* [online]. [cit. 2018-11-30]. Dostupné z: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf
- [14] SPI rozhraní. In: *Tajned.cz* [online]. [cit. 2019-11-3]. Dostupné z: <http://www.tajned.cz/2016/12/spi-rozhrani/>
- [15] Stručný popis sběrnice I2C a její praktické využití k připojení externí eeprom 24LC256 k mikrokontroléru PIC16F877. In: *Hw.cz* [online]. [cit. 2019-12-3]. Dostupné z:

- <https://vyvoj.hw.cz/navrh-obvodu/strucny-popis-sbernice-i2c-a-jeji-prakticke-vyuziti-k-pripojeni-externi-eprom-24lc256>
- [16] UART (USART) – komunikujte sériově po dvou vodičích. In: *Zavavov* [online]. [cit. 2018-3-11]. Dostupné z: <http://zavavov.vzap.eu/cz/elektrotechnika/komunikacni-sbernice/67-uart-usart-komunikujte-seriove-po-dvou-vodicich/>
- [17] A4988 datasheet. In: *Pololu.com* [online]. [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: https://www.pololu.com/file/0J450/a4988_DMOS_microstepping_driver_with_translator.pdf
- [18] VRBA, Kamil a David KUBÁNEK. *A/D a D/A převodníky pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO* [online]. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2014 [cit. 2019-11-30]. ISBN 978-80-214-5116-2.
- [19] Blokové schéma a zobrazení činnosti A/D převodníku s postupnou aproximací. In: *Virtuální laboratoř - experimentální metody* [online]. [cit. 2019-12-2]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/daq/Ka032071.gif>
- [20] ADÁMEK, Milan. A/D a D/A převodníky. In: *Ústav elektrotechniky a měření - Mikroelektronika* [online]. [cit. 2019-12-2]. Dostupné z: http://www.mikroelektro.utb.cz/e107_files/downloads/pr14.pdf
- [21] AN97055. In: *Sparkfun* [online]. [cit. 2019-12-5]. Dostupné z: <http://cdn.sparkfun.com/tutorialimages/BD-LogicLevelConverter/an97055.pdf>
- [22] LT1867 datasheet. In: *Analog Devices* [online]. [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LTC1863-1867.pdf>
- [23] Kapacitní snímač tlaku. In: *ELUC* [online]. [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: https://eluc.krolomoucky.cz/uploads/images/7926/content_UC2_6390_obr2.jpg
- [24] VTS, Zlín. [Online] 2018 [cit. 2019-11-30], URL: <http://www.vtsz.cz/polovodicove-tenzometry>
- [25] Měření tlaku. *UPRT VŠCHT* [online]. [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/ucebnice/mrt/F4/F4k42-o417.gif>
- [26] 1.2MPa pressure transducer. In: *Dealextrime* [online]. [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: <http://ae01.alicdn.com/kf/HTB1yuw9RVXXXXavXFXXq6xXFXXp.jpg>
- [27] USB to serial chip CH340. In: *WCH.CN* [online]. 2014 [cit. 2019-11-13]. Dostupné z: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Dev/Arduino/Other/CH340DS1.PDF>
- [28] AccelStepper library for Arduino. Airspayce [online]. [cit. 2020-5-9]. Dostupné z: <https://www.airspayce.com/mikem/arduino/AccelStepper/>
- [29] LiquidCrystal_I2C. GitHub [online]. [cit. 2020-5-9]. Dostupné z: https://github.com/johnrickman/LiquidCrystal_I2C
- [30] Arduino-SerialCommand. GitHub [online]. [cit. 2020-5-9]. Dostupné z: <https://github.com/kroimon/Arduino-SerialCommand>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

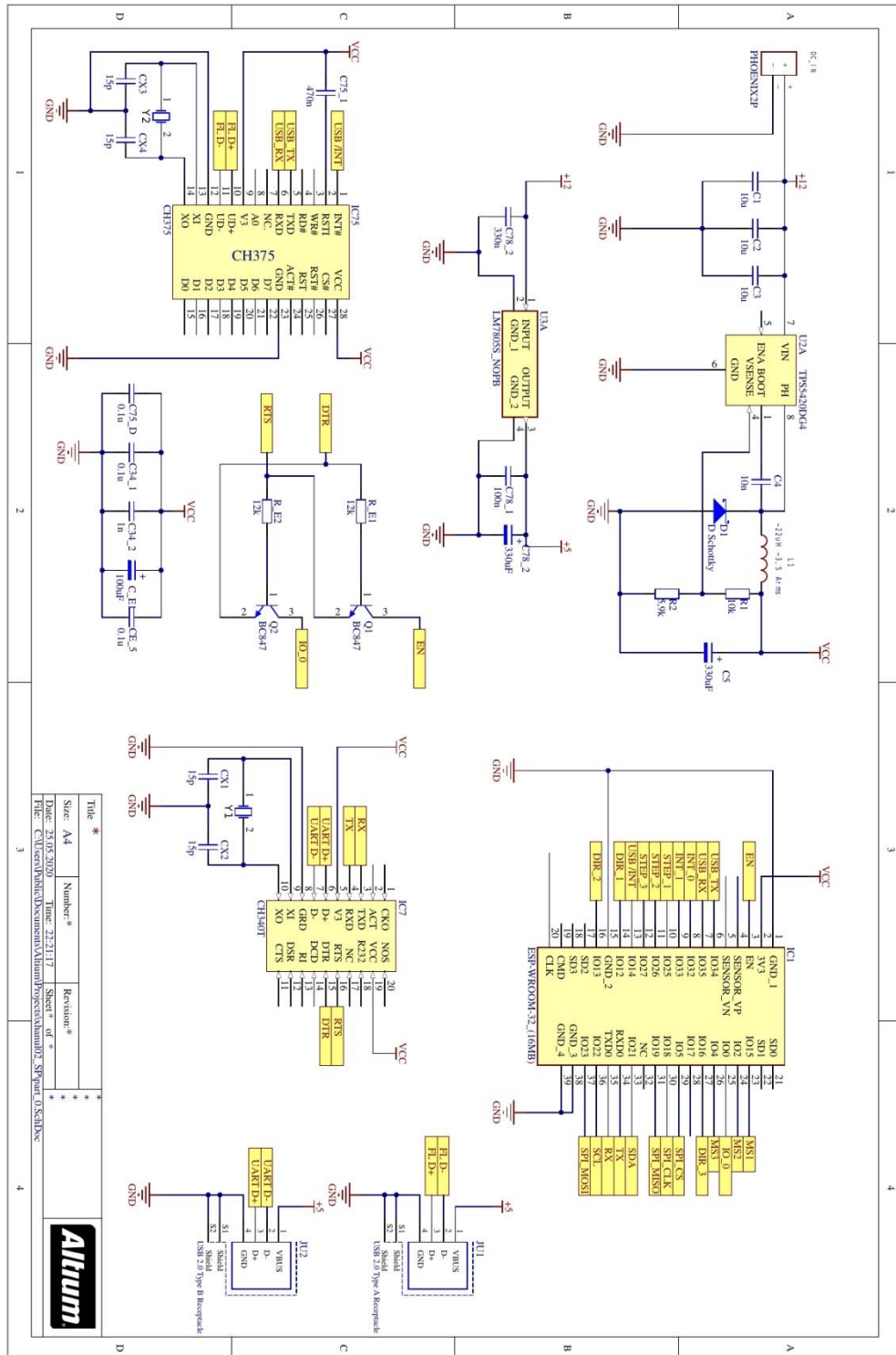
<i>U</i>	<i>el. napětí [V]</i>
<i>I</i>	<i>el. proud [A]</i>
<i>R</i>	<i>el. odpor [Ω]</i>
<i>P</i>	<i>el. výkon [W]</i>
<i>f</i>	<i>frekvence [Hz]</i>
<i>GPIO</i>	<i>General Purpose Interface Bus</i>
<i>MIPS</i>	<i>Million Instructions Per Second</i>
<i>HPGL</i>	<i>Hewlett-Packard Graphics Language</i>
<i>CAD</i>	<i>Computer Aided Design</i>
<i>CNC</i>	<i>Computer Numerical Control</i>
<i>YAG</i>	<i>Yttrium Aluminium Granát</i>
<i>TSMC</i>	<i>Taiwan Semiconductor Manufacturing Company</i>
<i>MIPS</i>	<i>Million Instructions Per Second</i>
<i>RAM</i>	<i>Random Access Memory</i>
<i>ROM</i>	<i>Read Only Memory</i>
<i>MSB</i>	<i>Most Significant Bit</i>
<i>LSB</i>	<i>Least Significant Bit</i>
<i>SRAM</i>	<i>Static RAM</i>
<i>SPI</i>	<i>Serial Peripheral Interface</i>
<i>IC</i>	<i>Inter Integrated Circuit</i>
<i>ICS</i>	<i>Inter IC Sound</i>
<i>UART</i>	<i>Universal Asynchronous Receiver Transmitter</i>
<i>USB</i>	<i>Universal Serial Bus</i>

SEZNAM PŘÍLOH

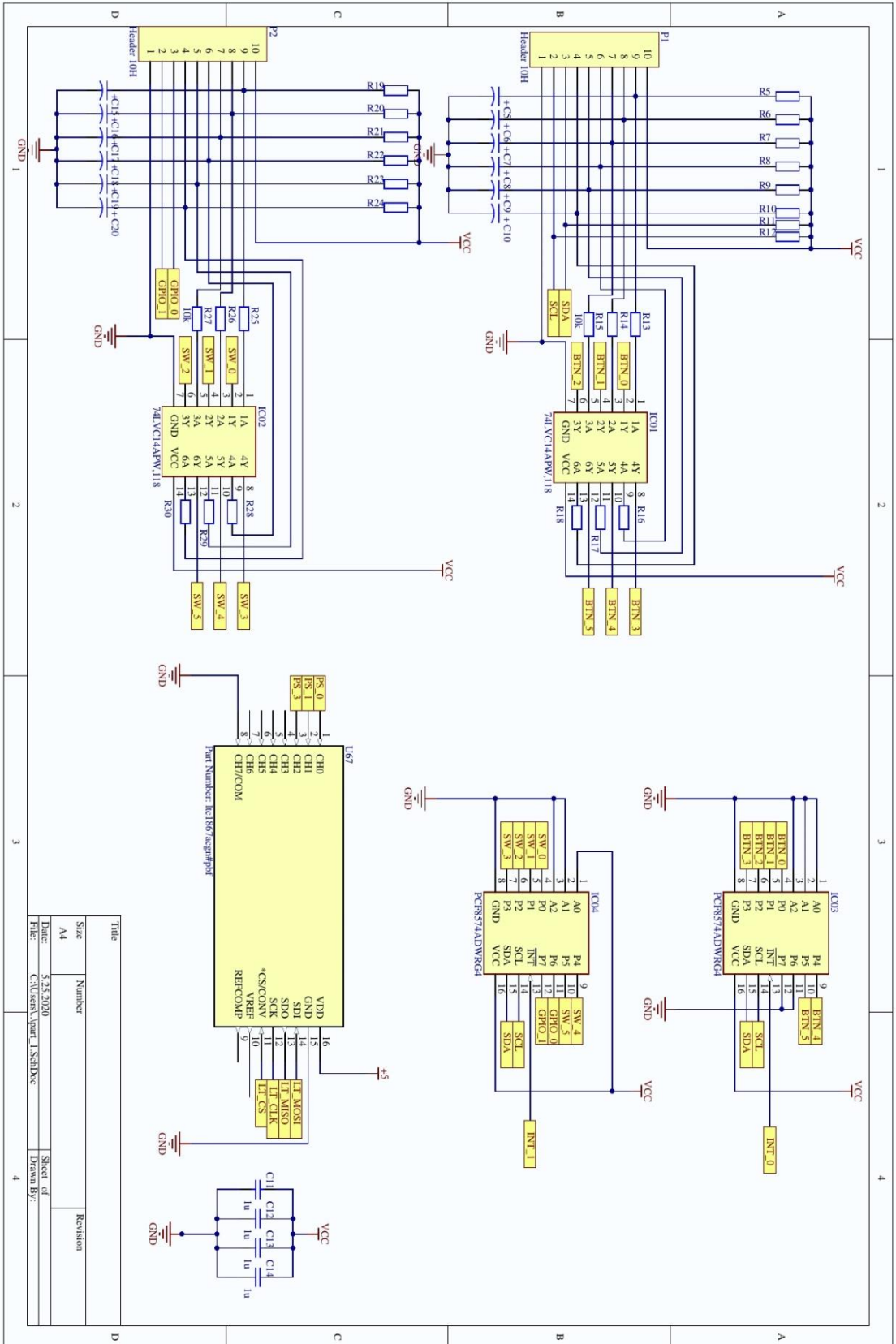
A	Návrh zařízení	63
A.1	Obvodové zapojení, část 1	63
A.2	Obvodové zapojení, část 2.....	64
A.3	Obvodové zapojení, část 3.....	65
A.4	Obvodové zapojení, část 3.....	66
A.5	Osazovací plán, strana součástek	67
B	PŘÍLOHY NA CD	68

A NÁVRH ZAŘÍZENÍ

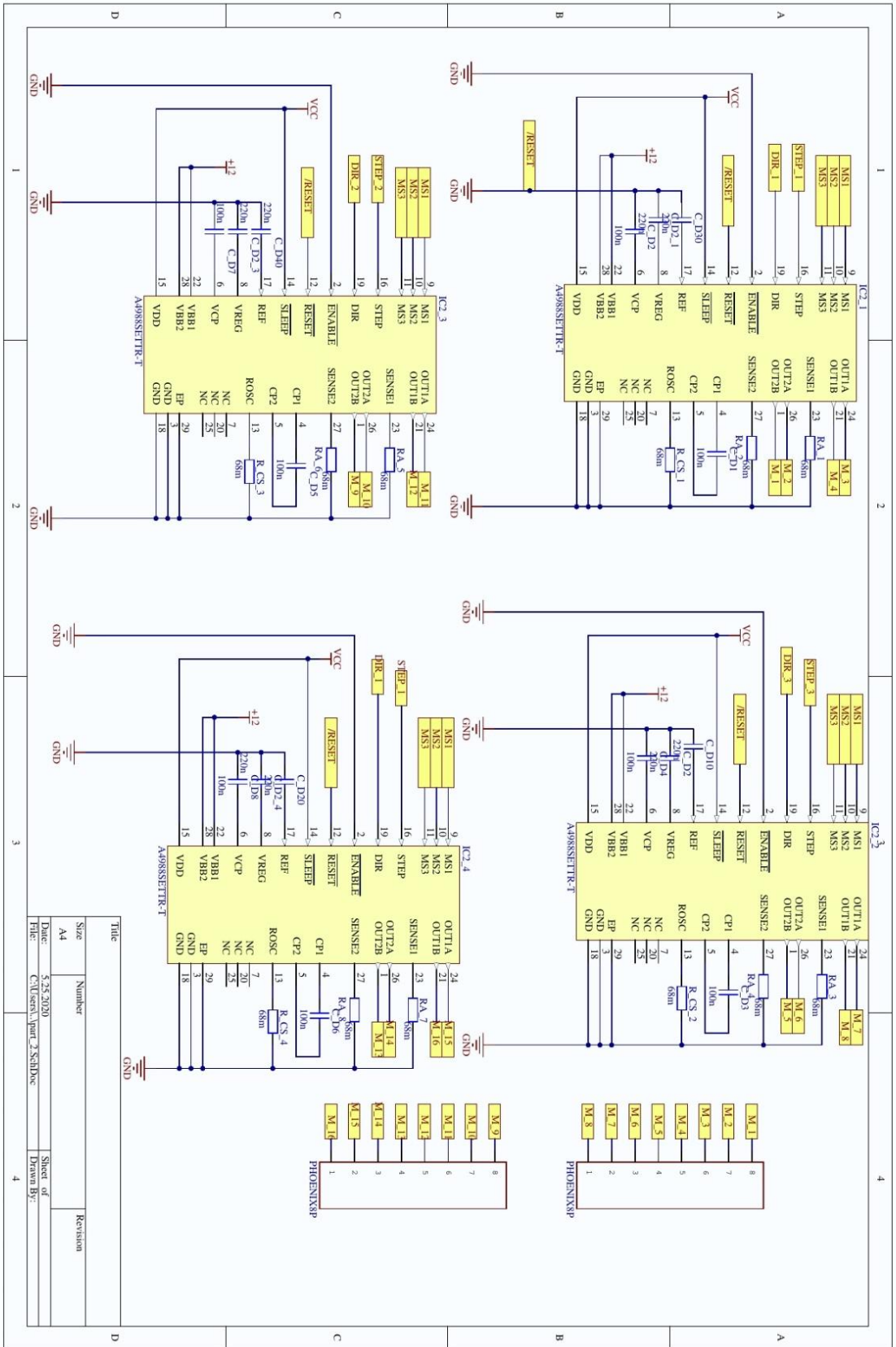
A.1 Obvodové zapojení, část 1



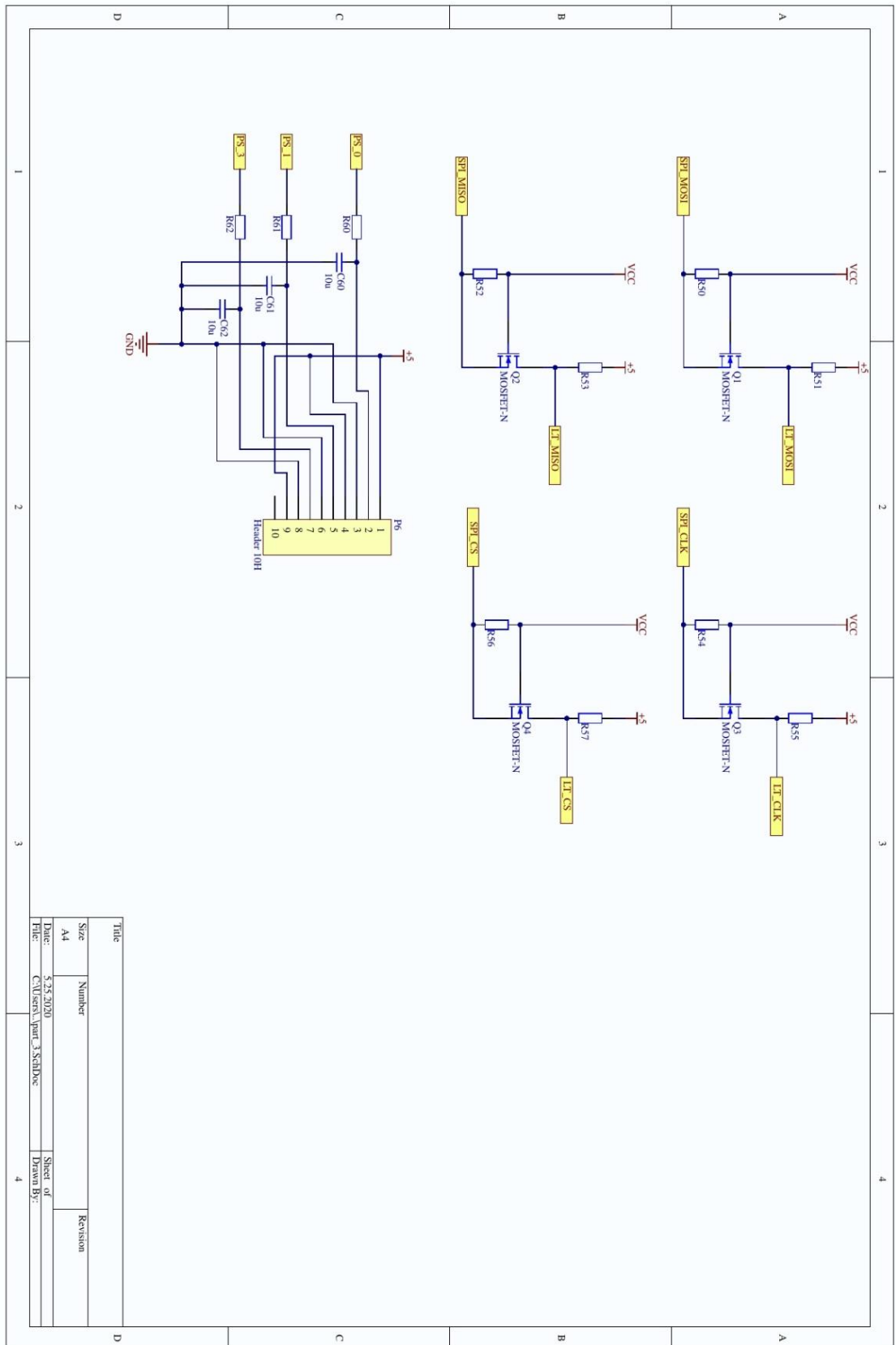
A.2 Obvodové zapojení, část 2



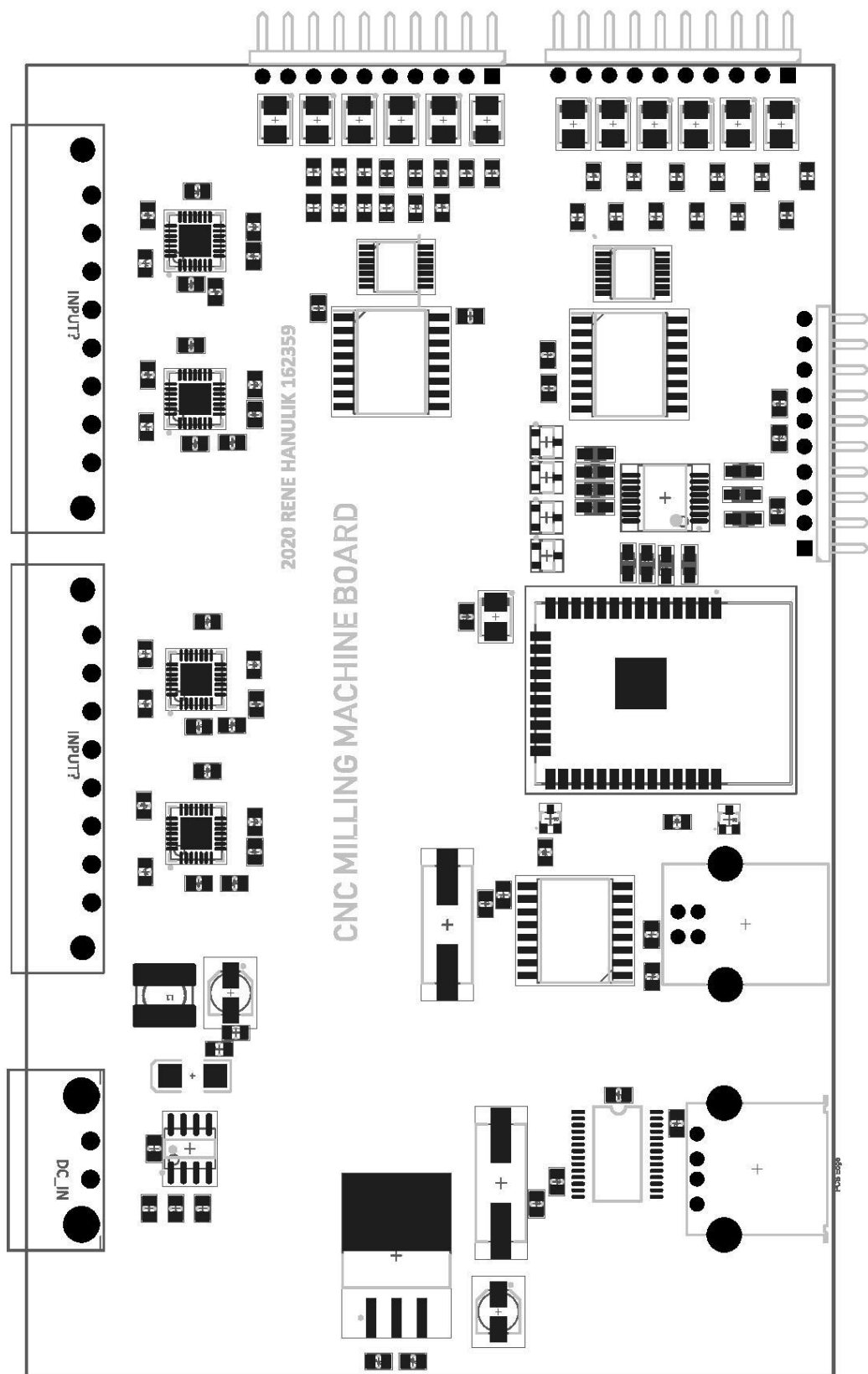
A.3 Obvodové zapojení, část 3



A.4 Obvodové zapojení, část 4



A.5 Osazovací plán, strana součástek



B PŘÍLOHY NA CD

- Elektronická verze práce
- Výrobní podklady DPS v programu Altium Designer v20
- Zdrojový kód softwaru jednotky pískovačky
- Zdrojový kód ovládacího softwaru
- Použitá grafika ve formátu .plt