



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

VÝVOJ POLOAUTOMATICKÉHO ZAŘÍZENÍ PRO NANÁŠENÍ PRÁŠKOVÝCH MATERIÁLŮ

DEVELOPMENT OF SEMI-AUTOMATIC EQUIPMENT FOR POWDER COATING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Pavel Janoš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

BRNO 2024

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Pavel Janoš

ID: 240359

Ročník: 3

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Vývoj poloautomatického zařízení pro nanášení práškových materiálů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je návrh a realizace zařízení pro nanášení práškových materiálů. Zadání práce lze shrnout do následujících bodů:

1. Vypracujte přehled postupů vhodných pro nanášení práškových materiálů v konformních povlacích. Zaměřte se na principy nanášení a jejich úskalí.
2. Vyberte vhodnou metodu pro nanášení abrazivního práškového materiálu na bázi Al_2O_3 a SiC s velikostí částic mezi 500 a 1000.
3. V návaznosti na zvolenou metodu navrhnete konstrukci celého zařízení i s odpovídajícím řízením. Cílem je zajištění rovnoměrnosti nanášení vrstvy prášku v ploše (100 x 100) mm.
4. Zařízení realizujte a ověřte jeho vlastnosti.
5. Diskutujte dosažené výsledky, případně navrhnete vylepšení zařízení

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Surface and Coatings Technology. Elsevier journal, Online ISSN: 1879-3347

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 22.5.2024

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

Konzultant: Ing. Alexandr Otáhal, Ph.D.

Ing. Miroslav Jirgl, Ph.D.

předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Tato práce se zaměřuje na návrh a konstrukci poloautomatického zařízení pro nanášení práškových materiálů v konformních povlacích. Práce shrnuje současné metody a zařízení pro nanášení práškových materiálů. Z těchto existujících metod byly vybrány jednotlivé principy, které byly implementovány do návrhu a konstrukce. Těmito principy jsou fluidizace, stříkání a tryskání. Výsledkem je dokončená konstrukce zařízení, které je robustní a efektivní pro různé typy práškových materiálů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Práškové povlakování, Dynamické stříkání/tryskání, Pseudofluidní stav, Návrh a konstrukce zařízení

ABSTRACT

This thesis focuses on the design and construction of a semi-automatic device for powder coating in conformal coatings. The work summarizes current methods and equipment for powder coating. From these existing methods, particular principles have been selected and implemented in the design and construction. These principles are fluidization, spraying and blasting. The result is a completed equipment design that is robust and efficient for various types of powder materials.

KEYWORDS

Powder coating, Dynamic spraying/blasting, Pseudofluid condition, Equipment design and construction

JANOŠ, Pavel. *Vývoj poloautomatického zařízení pro nanášení práškových materiálů*. Semestrální práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2024. Vedoucí práce: Doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Pavel Janoš
VUT ID autora: 240359
Typ práce: Semestrální práce
Akademický rok: 2023/24
Téma závěrečné práce: Vývoj poloautomatického zařízení pro nánášení práškových materiálů

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/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Petru Benešovi, Ph.D. za podnětné návrhy k práci a také panu Ing. Alexandru Otáhalovi, Ph.D. za odborné konzultace a trpělivost.

Obsah

Úvod	12
1 Současné metody pro nanášení práškových materiálů	13
1.1 Přehled metod pro úpravu povrchů za použití konformních povlaků .	13
1.1.1 Fluidní nanášení	13
1.1.2 Tryskání	14
1.1.3 Žárový nástřik	15
1.1.4 Nanášení stříkáním	18
1.1.5 Elektrostatické nanášení	18
1.1.6 Elektrokinetické nanášení/Tribostatické nabíjení	18
2 Kritériová analýza zařízení	20
2.1 Vlastnosti práškových materiálů na bázi Al_2O_3 a SiC	21
2.2 Filtrování/odlučování pevných částic	21
2.2.1 Mokrý odlučovač	22
2.2.2 Elektrostatické odlučovače	22
2.2.3 Textilní filtry	22
2.2.4 Suchý odlučovač	23
2.3 Posuvy a pohony os	24
2.3.1 Posuvy	24
2.3.2 Pohony	25
3 Návrh poloautomatického zařízení pro nanášení práškových materiálů	27
3.1 Návrh mechanické konstrukce	27
3.1.1 Hlavní rám	27
3.1.2 Tryska se zásobníkem	32
3.1.3 Uživatelský panel	39
3.1.4 Filtrace	41
3.1.5 Posuv DUT/Trysky	41
3.2 Návrh elektrických rozvodů	42
3.2.1 Mikrokontrolér	43
3.2.2 HMI	44
3.2.3 Řízení ventilů	47
3.2.4 Ostatní prvky	48
3.2.5 Napájecí zdroj	49
3.3 Návrh pneumatických rozvodů	49

3.4	Návrh user interface(UI)	52
3.4.1	Stavový automat programu	53
3.4.2	Podrobnější analýza implementace	55
3.4.3	Podprogramy	63
4	Konstrukce zařízení	65
4.1	Vizualizace zařízení	65
4.2	Ověření funkčnosti	70
	Závěr	75
	Literatura	76
	Seznam příloh	77
A	Příloha č.1	78
B	Příloha č.2	79
C	Příloha č.3	80

Seznam obrázků

1.1	Teoretický model fluidizačního zařízení	14
1.2	Přenosná tryskáč pistol Educt-O-Matic	15
1.3	Žárový nástřik pomocí kyslíkoacetylenového plamene	16
1.4	Žárový nástřik elektrickým obloukem	16
1.5	Vysokorychlostní nástřik HVOF	17
1.6	Žárový nástřik plazmou (plazmový nástřik)	17
1.7	Teoretický model elektrostatického nanášení	18
1.8	Schéma principu tribostatického nabíjení práškového plastu	19
3.1	Vizuální model celého rámu (a) a rozloženého rámu (b)	28
3.2	Vizuální model návrhu výztuhy rámu - perspektiva z pravé přední strany (a) a z levé přední strany (b)	28
3.3	Vizuální model návrhu celého rámu se segmenty - perspektiva z pravé zadní strany (a) a z levé přední strany (b)	29
3.4	Vizuální model návrhu vnitřního boxu	29
3.5	Vizuální model návrhu šuplíku boxu	30
3.6	Vizuální model návrhu detailu zadní části boxu	30
3.7	Vizuální model návrhu dveří	31
3.8	Krajní polohy zdvihacího mechanismu - uzavřená poloha (a) a otevřená poloha (b)	31
3.9	Původní tryska	32
3.10	Vizuální model návrhu trysky z přední strany (a) a z horní strany (b)	33
3.11	Vizuální model návrhu nádoby v řezu	34
3.12	Vizuální model návrhu ejektoru	35
3.13	Vizuální model návrhu ejektoru v řezu	35
3.14	Vizuální model návrhu celého zásobníku	36
3.15	Princip trysky se zásobníkem	37
3.16	Vizuální model návrhu držení DUT a pohybu trysky pohled v řezu	38
3.17	Vizuální model návrhu stojanu bez (a) a s (b) DUT, perspektiva z přední strany	38
3.18	Vizuální model návrhu uchycení barometrů	39
3.19	Vizuální model HMI	40
3.20	Vizuální model návrhu implementovaného HMI	40
3.21	Vizuální model rozmístění elektronických součástek	42
3.22	Rozvržení výstupních pinů	43
3.23	Návrh elektrického schématu pro Spreader G0-5-10 - enkodér	44
3.24	Návrh elektrického schématu pro Spreader G0-5-10 - aktivní piezo reproduktor	44

3.25	Návrh elektrického schématu pro Spreader G0-5-10 - Shift register . .	45
3.26	Návrh elektrického schématu pro Spreader G0-5-10 - napájení	46
3.27	Návrh elektrického schématu pro Spreader G0-5-10 - Barometry . . .	46
3.28	Návrh elektrického schématu pro Spreader G0-5-10 - Přívodní spojka	47
3.29	Návrh elektrického schématu pro Spreader G0-5-10 - Vibrační motory	48
3.30	Návrh elektrického schématu pro Spreader G0-5-10 - LED pásek . . .	48
3.31	Návrh elektrického schématu pro Spreader G0-5-10 - Elektrický zámek	49
3.32	Vizuální model návrhu regulátoru vzduchu	50
3.33	Vizuální model návrhu rozmístění vzduchového okruhu. Perspektiva ze zadní pravé strany (a) a perspektiva z přední levé strany (b)	51
3.34	Návrh pneumatického schématu pro Spreader G0-5-10	51
3.35	Koncept hlavních sedmi bloků programu	53
3.36	Koncept hlavní smyčky programu	54
3.37	Přehled virtuálních tříd/předpisů	56
3.38	Přehled spojovacích šipek a čar	57
3.39	Přehled třídy C_Pin	57
3.40	Přehled třídy C_ValveDev	58
3.41	Přehled třídy C_VibMotor	58
3.42	Přehled třídy C_PC_Man	59
3.43	Přehled třídy C_HMI	60
3.44	Přehled třídy C_Jet	60
3.45	Přehled třídy C_LCD	61
3.46	Přehled tříd C_Protection, C_ProgMan	61
3.47	Návrh grafického rozhraní LCD displeje	62
4.1	Výsledek sestaveného zařízení - přední strana	65
4.2	Výsledek sestaveného zařízení - strana zadní	66
4.3	Výsledek sestaveného zařízení- pohled zleva	67
4.4	Výsledek sestaveného zařízení - pohled zprava	67
4.5	Výsledek sestaveného zařízení - pohled do boxu	68
4.6	Výsledek sestaveného zařízení - pohled zepředu	68
4.7	Výsledek sestaveného zařízení - pohled zprava	69
4.8	Výsledek sestaveného zařízení - pohled ze zadní strany	69
4.9	Výsledek sestaveného zařízení	-
4.10		
	Výsledek naprašování abrazivního prášku - podklad:jar72figure.caption.187	
4.11	Výsledek naprašování abrazivního prášku - podklad:tekuté mýdlo . .	73
4.12	Rozebraný ejektor zásobníku (a) a pohled ze dna zásobníku do zásob- níku (b)	74
A.1	Tabulka položek	78

B.1	Návrh softwarového řešení programu	79
-----	--	----

Úvod

Povrchové úpravy mohou být obecně provedeny různými způsoby, např. nátěry, povlaky, galvanickým pokovováním, tepelným zpracováním a mnoha dalšími. Cílem těchto úprav je zlepšit vlastnosti materiálu nebo výrobku, jako jsou odolnost proti korozi, tvrdost, odolnost proti opotřebení, či estetický vzhled. V této práci se soustředím pouze na povlaky a jejich principy.

Při výrobě desek plošných spojů (DPS) a jejich osazení je na závěr nutné provést opláchnutí k odstranění nečistot a zabránění zkratům či nežádoucímu chování. K tomu slouží mycí linky, které DPS oplachují. Pro zajištění dostatečné čistoty je nezbytné kontrolovat kvalitu omývacího procesu a rozeznat, kdy je nutné vyměnit omývací tekutinu. K tomu slouží testovací substrát (device under test - DUT) - skleněný substrát s přilepenými dummy SMD rezistory. DUT je umístěn spolu s DPS do mycí linky, kde je následně testován a vyhodnocena kvalita očištění. Pro výrobu tohoto přípravku je nezbytné nanést práškový materiál rovnoměrně na skleněný substrát, který je pokryt pastou, která má motiv plošek pro lepení SMD rezistorů. Tento proces zahrnuje nanášení práškového materiálu, jehož výsledek je společně s pastou vypálen v peci, aby bylo možné na takto vytvořené plošky následně přilepit SMD rezistory.

Tato práce se zabývá návrhem a konstrukcí zařízení pro poloautomatické nanášení práškových materiálů, které bude sloužit pro rovnoměrné nanášení materiálu na bázi Al_2O_3 a SiC s velikostí částic 500 - 1000.

1 Současné metody pro nanášení práškových materiálů

V této kapitole je provedena rešerše současných metod pro nanášení práškových materiálů. Detailně jsou zkoumány různé techniky, včetně fluidního nanášení, tryskání, žárového nástřiku, nanášení stříkáním, elektrostatického a elektrokinetického nanášení. Tato analýza poskytuje základ pro návrh a konstrukci poloautomatického zařízení.

1.1 Přehled metod pro úpravu povrchů za použití konformních povlaků

Úprava povrchů je proces, který se používá k ochraně materiálů před vnějšími vlivy, jako je koroze, opotřebení, či oxidace. Konformní povlaky jsou jedním z typů povrchových úprav, které se používají k ochraně materiálů. Tyto povlaky jsou navrženy tak, aby se přizpůsobily tvaru a poskytly tak ochranu proti vnějším vlivům a zlepšily jeho vlastnosti.

Konformní povlaky se vyrábí pomocí různých technik, jako je s předeheřevem upravovaného materiálu (fluidní způsob, naprašování), dále pak bez předeheřevu upravovaného materiálu (stříkání elektrokinetické a elektrostatické), různé jejich kombinace, či speciální žárový nástřik. Tyto techniky se využívají k vytvoření tenké vrstvy materiálu na povrchu materiálu.

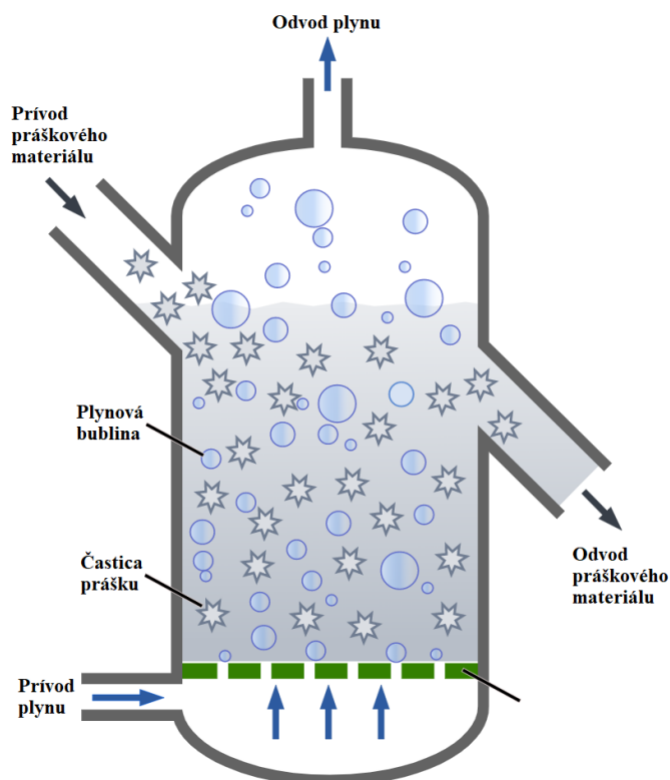
Konformní povlaky se používají v mnoha odvětvích, jako je průmysl, letectví, kosmonautika, automobilový průmysl a elektronika.

1.1.1 Fluidní nanášení

Fluidní nanášení se provádí ponorem předeheřátého předmětu do zfluidizovaného prášku ve fluidní vaně, tj. přeměna pevného skupenství na dynamicky tekutý stav, při tomto stavu se práškové částice chovají velmi podobně jako kapaliny, kde působením předem naakumulovaného tepla dochází k přilnutí prášku na povrch předmětu. Pro tento proces je nezbytná fluidizační nádoba, filtr pevných částic, vzduchový difuzér a zařízení na přívod plynu/vzduchu.

Fluidizační nádoba je základem celého procesu, její rozměry se volí podle dvou faktorů. Prvním faktorem jsou rozměry substrátu a druhým pak objem prášku. Ten se udává jako 2 až 2,5 krát větší pro bublající fluidizaci než pro objem ve statickém stavu.

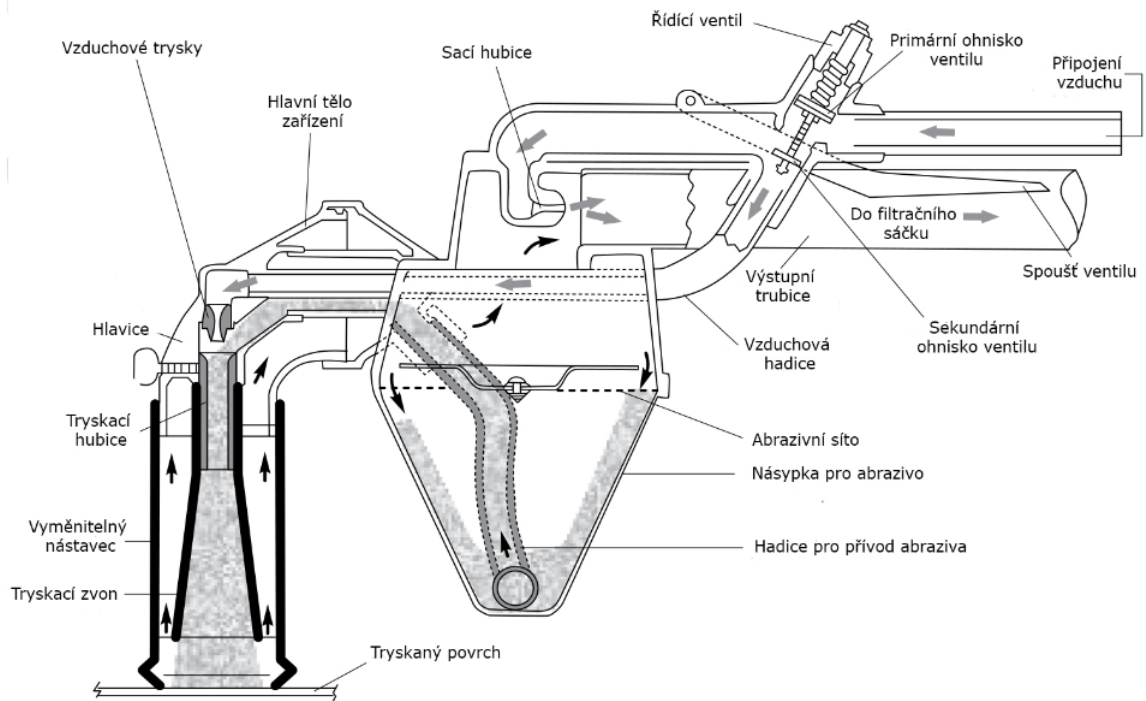
Filtr pevných částic slouží k tomu, aby se do nádoby nedostávaly nežádoucí částice ale i z nádoby pryč. Vzduchový difuzér je spojen s řízeným přívodem plynu. Aby došlo k rovnoměrnému proudění vzduchu práškem, je k nádobě připevněn i vibrační motor, který pomáhá odstranit jev, kdy se prášek chová jako celek a nedochází tak k proudění vzduchu. Teoretický model fluidizačního zařízení je uvedený na obrázku 1.1.



Obr. 1.1: Teoretický model fluidizačního zařízení[1]

1.1.2 Tryskání

Tato metoda se používá k odstranění nečistot, koroze a jiných vad na povrchu materiálu. Mezi nejčastěji používané metody patří tryskání balotinou, pískování a tryskání ocelovou drtí. Tyto metody se liší v použitém materiálu a tlaku vzduchu, který se používá k odstranění nečistot. Povrch po otryskání je sametově lesklý až sametově matný. Teoretický model tryskacího zařízení je uvedený na obrázku 1.2



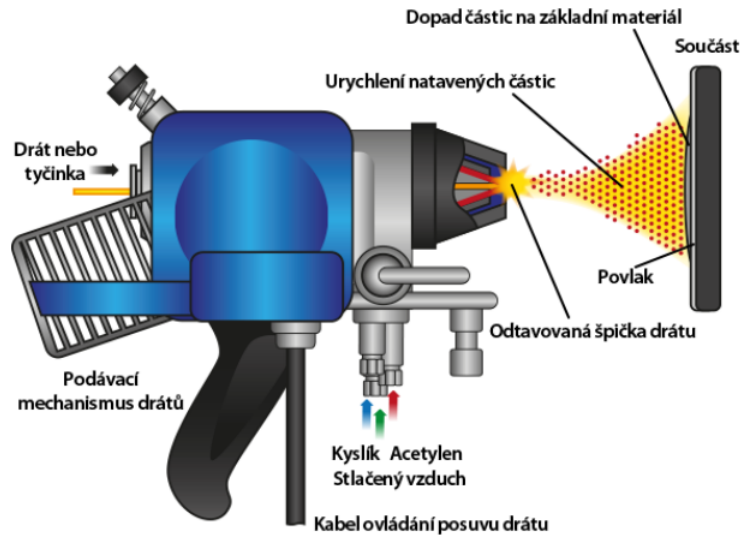
Obr. 1.2: Přenosná tryskáč pistol Educt-O-Matic [6]

1.1.3 Žárový nástřik

Žárový nástřik se provádí plynovými pistolemi. Princip činnosti spočívá v tom, že prášek je ze zásobníku nasáván pomocí podtlaku vytvořeného Venturiho trubicí a dopravován do hořáku. Aby se v zásobníku nevytvářely shluky prášku, je zásobník vybaven generátorem vibrací, který brání shlukování prášku a vytváření hrudek. Speciální hořák má zvláštní přívod pro plyn a stlačený vzduch i pro samotný prášek. Možnosti nástřiku:

- Žárový nástřik pomocí kyslíkoacetylenového plamene

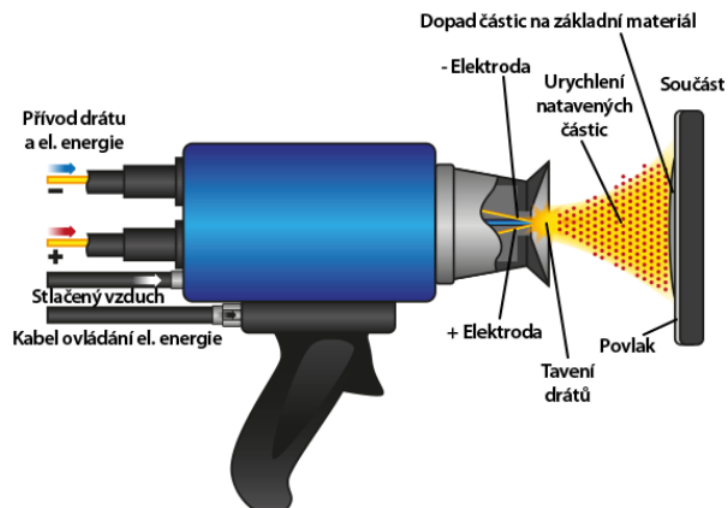
Tato metoda je již vývojově ukončená a používá se pro specifické aplikace. Povlaky z této metody mají nižší hodnoty základních charakteristik a vysokou pórovitost. Kovové povlaky obsahují mnoho oxidů, které zvyšují tvrdost, ale snižují houževnatost a přilnavost. Přídavný materiál může být ve formě prášku, drátu nebo tyčinky. Teoretický model žárového nástřiku pomocí kyslíkoacetylenového plamene je uvedený na obrázku 1.3



Obr. 1.3: Žárový nástřik pomocí kyslíkoacetylenového plamene [7]

- Žárový nástřik elektrickým obloukem

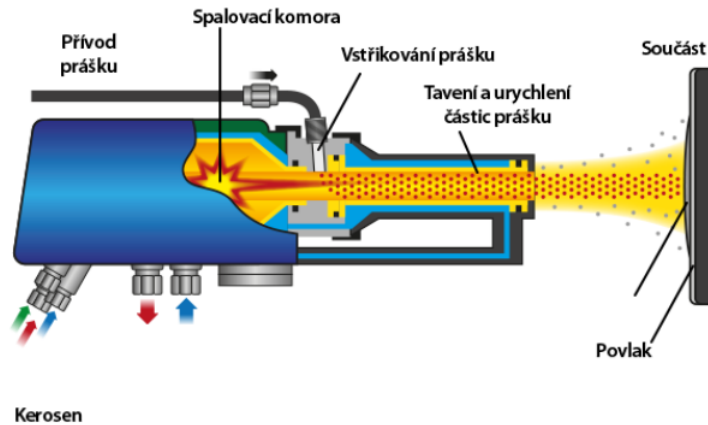
Elektrický oblouk se využívá hlavně při renovacích a opravách, zejména při větším opotřebení pro vytváření vrstvy 1–4 mm. Často slouží jako základ pod keramické a kovokeramické povlaky, kde je potřeba silnější a houževnatější podklad než základní materiál. Teoretický model žárového nástřiku elektrickým obloukem je uvedený na obrázku 1.4



Obr. 1.4: Žárový nástřik elektrickým obloukem [7]

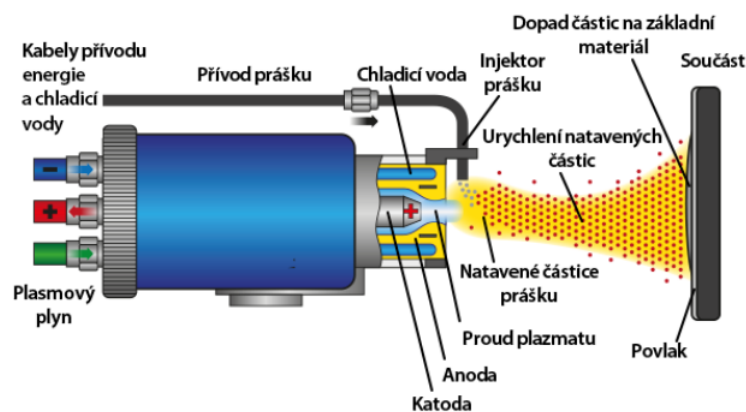
- Vysokorychlostní nástřik HVOF

Plazmové stříkání je flexibilní metoda pro nástřik kvalitních povlaků. Je vhodné pro tvorbu různých povlaků z různých materiálů. Míru pórovitosti povlaků lze upravit nebo eliminovat podle potřeby. Teoretický model vysokorychlostního nástřiku HVOF je uvedený na obrázku 1.5



Obr. 1.5: Vysokorychlostní nástřik HVOF [7]

- Žárový nástřik plazmou (plazmový nástřik)
Povlakování je prováděno při vysokých rychlostech až několik set metrů za sekundu, což vede k povlakům s vysokou přilnavostí a soudržností částic. Teoretický model žárového nástřiku plazmou (plazmový nástřik) je uvedený na obrázku 1.6



Obr. 1.6: Žárový nástřik plazmou (plazmový nástřik) [7]

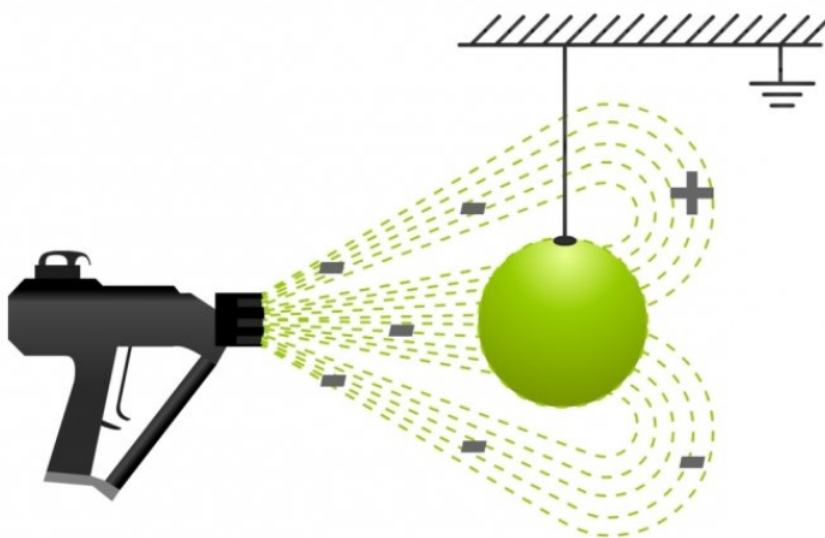
1.1.4 Nanášení stříkáním

Při této metodě se na zavěšený uzemněný předmět stříká prášek, jehož částice jsou přitahovány k předmětu elektrostatickými nebo elektrokinetickými ději. Poté se vytvoří povlak, který se následně v peci roztaví. Tepelné zpracování závisí na tom, zda jde o termoplast či termoset. Tepelné zpracování je obvykle do 200 °C po dobu 10 až 20 minut. Touto metodou lze nanášet povlaky o tloušťce od 40 μm do 100 μm, které jsou rovnoměrné a dekorativní.

K nabití nanášených částic prášků se využívá dvou základních principů vytváření náboje: elektrokinetický a elektrostatický.

1.1.5 Elektrostatické nanášení

Vysoké napětí (40 - 100kV), soustředěné na trysce stříkací pistole způsobuje ionizaci vzduchu procházejícího pistolí. Při průchodu prášku tímto ionizovaným vzduchem se volné ionty přichytí na určitý počet částic prášku, čímž se na částicích vytvoří záporný náboj. Teoretický model elektrostatického nanášení je uvedený na obrázku 1.7

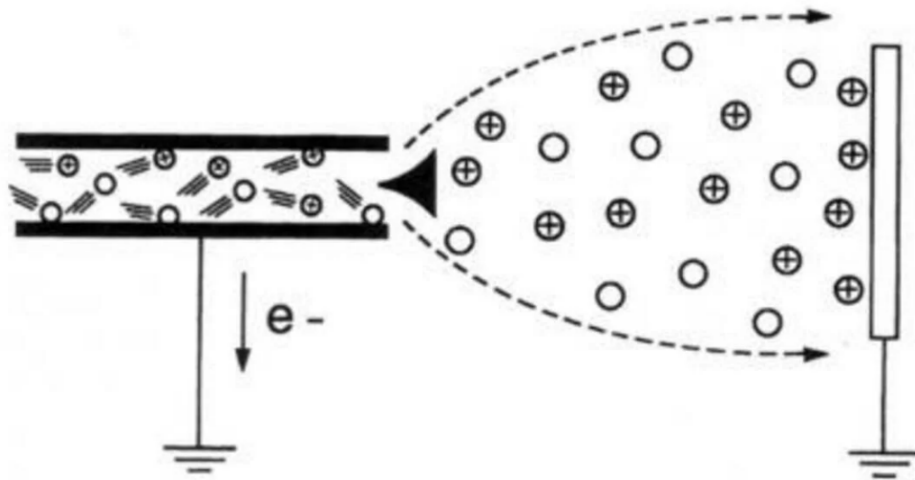


Obr. 1.7: Teoretický model elektrostatického nanášení [9]

1.1.6 Elektrokinetické nanášení/Tribostatické nabíjení

Částice prášku se elektrokineticky nabíjejí díky tomu, že při rychlém pohybu se otírají o speciální druh izolačního materiálu, kterým je vyložen válec stříkací pistole. Mezi elektrokinetickou stříkací pistolí a předmětem jsou přítomny nenabitě a

kladně nabité částice prášku. Teoretický model tribostatického nabíjení je uvedený na obrázku 1.8



Obr. 1.8: Schéma principu tribostatického nabíjení práškového platu [8]

[5]

2 Kritériová analýza zařízení

V předešlé kapitole byly ukázány metody pro nanášení práškových materiálů v různých oblastech využití. Tyto metody nebylo možné využít v jejich stávajícím stavu, tudíž bylo přistoupeno ke spojení dílčích principů daných metod pro zajištění požadované funkce v této práci navrhovaného zařízení. Je také provedena rešerše okruhů spojená s konstrukcí takového zařízení.

Mezi nejdůležitější okruhy, které zde budou rozebrány patří:

- Vlastnosti práškových materiálů na bázi Al_2O_3 a SiC.
- Úprava povrchů za použití konformních povlaků.
- Filtrování/odlučování pevných částic.
- Posuvy a pohony os.

Na základě těchto okruhů následně došlo k vytvoření návrhu samotného zařízení, tedy se zřetelem na:

- Způsob nanášení.
- Způsob filtrace.
- Způsob pohybů trysky/DUT.
- Celková těsnost zařízení.
- Dodržení rozpočtu.
- Rychlost odbavování.
- Záruky opakovatelnosti.
- Dodržení funkcionality včetně uživatelského rozhraní (user interface - UI).

Níže jsou popsány požadavky na konstrukci zařízení, která vycházejí ze zadání práce a rešerše dostupných metod nanášení práškových materiálů. Hlavní požadavky jsou stěžejní jak pro funkcionalitu, tak pro samotnou konstrukci, požadavky vedlejší jsou očekávané nikoli závazné.

Hlavní požadavky

- a) Nároky na metodu.
 - 1) Rovnoměrné rozprašování prášku na plochu 10x10 cm.
 - 2) Rovnoměrné v trysknutí prášku do pasty na ploše 10x10 cm.
 - 3) Velikost zrn 500–1000.
- b) Nároky na vlastnosti zařízení.
 - 1) Řízení vzduchem, připojení na rychlospojku ES7.2.
 - 2) Nastavení vzdálenosti od trysky 15–25 cm NPTP (nearest point to point).
 - 3) Nezávislá regulace rychlosti vzduchu a množství nanášeného prášku.
 - 4) Maximální možný tlak: 6 bar.
 - 5) Maximální schválený rozpočet 35.000,-Kč.

Vedlejší požadavky

1. Menu:jazyk: anglický.
2. Barva zařízení: modro-bílá.
3. Maximální prostorová náročnost (x y z) (400 400 600) [mm].
4. Stop tlačítko.
5. Rychlost odbavení 1ks/20s.

2.1 Vlastnosti práškových materiálů na bázi Al_2O_3 a SiC

Al_2O_3 : Oxid hlinitý má vynikající mechanické vlastnosti jako je vysoká tvrdost, pevnost a odolnost proti opotřebení. Má také vynikající tepelnou stabilitu a chemickou odolnost. Používá se jako abrazivní materiál, kde není žádoucí kontaminace tryskaného povrchu železitými sloučeninami, izolační materiál, materiál pro výrobu keramických desek a jako materiál pro výrobu řezných nástrojů. Cena pro dané velikosti zrn se pohybuje od 117.90 - 163.80 CZK za 1 kg (cena je bez DPH v roce 2021).

SiC: Karbid křemíku se vyskytuje v přírodě jako minerál moissanit, ale většinou se připravuje synteticky. Má velkou tvrdost (9,5 na Mohsově stupnici), vysokou teplotní stabilitu, vynikající tepelnou vodivost, nízkou tepelnou expanzi, vysokou elektrickou vodivost a vysokou průraznost. Tyto vlastnosti umožňují jeho použití v mnoha aplikacích jako jsou brusné materiály, žáruvzdorné cihly, polovodiče a náhrady diamantu. Cena se pohybuje také kolem 117.90 - 163.80 CZK za 1 kg (cena je bez DPH v roce 2021).

Velikost zrn podle normy ANSI B74.12-2001 při označení 500 a 1000 odpovídá 15,3 μm a 8,4 μm . Tato norma definuje velikost zrn abrazivních materiálů na základě číselného označení. Čím vyšší je číslo, tím menší je velikost zrna.

2.2 Filtrování/odlučování pevných částic

Odlučovače tuhých částic jsou zařízení, která se používají k minimalizaci úniku částic do okolního prostředí. Tato zařízení se používají jako poslední možnost, pokud nelze částice omezit úpravou technologie, procesem spalování nebo likvidací přímo u zdroje.

Funkčnost odlučovače se posuzuje podle toho, jak dané zařízení odlučuje částice, tj. celková odlučivost zařízení, dále spotřeba energie, která musí vyrovnat tlakovou ztrátu odlučovače a náklady na pořízení a provoz.

2.2.1 Mokr  odlučovače

Mokr  odlučovače tuhých častic jsou zařizení, kter  se pou z v j  k minimalizaci úniku častic do okolního prostředí. Tyto zařizení pracují na principu styku čištěného plynu s kapalinou, kter  se pod l  na čištění plynu. Při mokr m odlučování dochází ke kontaktu zne i t j c  častice s kapkou vody. Trajektorie častice se v bezprost edn  blízkosti kapky odlišuje od trajektorie proudnic vzduchu, t m pádem častice nestihne zareagovat na prudkou změnu trajektorie a díky setrvačnosti proniká do kapky. Kapka je o hodně v t  i než samotn  častice, takže ty častice, kter  jsou usazen  v kapce, mají společn  s kapkou několikrát v t  i objem než samotn  častice. Díky této velikosti jsou společn  mnohem lépe odlu iteln .

Tento typ čištění se může d t:

- souproudn  – sprchov  v  e
- protiproudn  – proudov  pračky
- k  ov  – p nov  pračky

2.2.2 Elektrostatick  odlučovače

Elektrostatick  odlučovače jsou zařizení, kter  mají vysokou činnost při odlučování častic, dosahují hodnot nad 99,5 %. Rychlost plynu protékajícího odlučovačem by měla být mal , zhruba okolo 1 až 2 m/s. Z toho důvodu musí být tento odlučovač velmi rozm rn . Za izen  také musí být izolováno, aby nekondenzovaly p ry v prostoru. Lze použít i pro čištění plynu s vysokými teplotami do 400  C. Elektrick  proud, kter m je zařizení napájeno, je stejnosm rn  o napětí obvykle 40 až 80 kV.

Základní rozd len  může být na:

- Vertik ln  elektrostatick  odlučovače
- Horizont ln  komorov  elektrostatick  odlučovače

2.2.3 Textilní filtry

Textilní filtry odlučují častice z proudu plynu pomocí por zn  pevn  přepážky, na kter  se zachytí tuh  častice. Nejprve se odd l  častice s větším p r m rem než je p r m r p ru. Vytvo en m kol  e z velkých častic se filtrují i r dov  men  i častice než je p r m r p ru.  innost filtrace závisí na vlastnostech filtrační přepážky, ale také na prachových  astic ch. Filtry dokážou odloučit submikronov  častice, kter  se zachyt v j  na vláknech filtru v důsledku Brownova pohybu. Textilní filtry pat r  k nej  inn    m filtrům, nej valifikovan     dosahují činností odlou en  častic a  99,99 %. Dnes se nejčastěji pou z v j  netkan  textilie, ale také materiály jako papír, keramika a slinut  kovy.  i t n  plyn proud  z vn     strany textilního filtru.

Z prachu, který se filtrem odloučí, vznikají tzv. filtrační koláče. Ty je potřeba z filtru odstranit, což se zpravidla provádí zpětným proplachem, k němuž se nejčastěji využívá stlačený vzduch.

2.2.4 Suché odlučovače

Suché odlučovače jsou zařízení, která odlučují částice z proudu plynu pomocí gravitačního, setrvačného nebo odstředivého principu. Tyto odlučovače jsou všeobecně konstrukčně jednoduché, provozně spolehlivé, nenáročné na obsluhu a údržbu, mají nižší pořizovací i provozní náklady a jsou vhodné i pro vyšší teploty. Existují různé druhy suchých odlučovačů jako např.:

Sedimentační komory jsou zařízení, která odlučují částice z proudu plynu pomocí gravitačního principu. Částice se usazují na dně komory a jsou odváděny pryč.

Žaluziové odlučovače jsou zařízení, která odlučují částice z proudu plynu pomocí setrvačného principu. Plyn je směřován do vhodně profilovaných překážek, kde dochází k odlučování větších částic změnou směru proudu plynu.

Rotační odlučovače jsou zařízení, která odlučují částice z proudu plynu pomocí odstředivého principu. Plyn je směřován do rotačního tělesa, kde se částice oddělují od plynu a jsou odváděny pryč.

Keramické filtry jsou zařízení, která slouží k odlučování částic z proudu plynu. Jsou vybaveny odolnými keramickými filtračními svíčkami a umožňují filtraci při vysokých teplotách. Filtrační médium je proplachováno pomocí tlakového vzduchu. Keramické filtry jsou vhodné zejména pro odprášení horkých spalin s obsahem jisker a žhavých částic.

Cyklonové odlučovače jsou zařízení, která se používají k separaci pevných látek z proudu nosného média. Tyto odlučovače se dělí na dva základní druhy: aerocyklony a hydrocyklony. Tato zařízení se využívají v průmyslu při regeneraci produktu nebo při čištění plynu. Cyklony jsou levná zařízení, snadno se konstruují a nevyžadují nijak složitou údržbu. Rozsah pracovních látek je omezen pouze použitými materiály, tudíž lze pracovat i s vysokými teplotami a tlaky. Cyklony se často využívají jako předčišťovací zařízení např. před filtry nebo elektroodlučovače. Pokud je zařízení dobře navrženo, dokáže s vysokou odlučivostí odlučovat částice 10 μm a větší, u menších částic poměrně rychle klesá účinnost odlučování. Dále se nedoporučuje používat pro lepkavé částice nebo částice s vysokou vlhkostí, jelikož u těchto částic může docházet k nalepování na stěnu cyklonu, což může mít za následek změnu proudění plynu v těle cyklonu, anebo ucpání cyklonu, a tím pádem zhoršení odlučivosti. Rozsah průtoků plynu, s kterými lze v zařízeních pracovat, je

50 až 50 000 m³/h, ale při překročení hranice 20 000 m³/h se doporučuje použít více cyklonů řazených paralelně.

2.3 Posuvy a pohony os

Posuvy odkazují na pohyb či přemístění částí stroje nebo nástroje podél dané osy. Tyto posuvy mohou být buď lineární (pohybující se po přímce) nebo rotační (pohybující se kolem určitého bodu).

Pohony os jsou zařízení, která vytvářejí a řídí tyto posuvy. Mezi tyto pohony mohou patřit servopohony, synchronní nebo asynchronní elektromotory. K pohonu může být někdy přidán také translační mechanismus jako je například řemenový převod, řetězový převod, harmonický převod nebo planetový převod.

2.3.1 Posuvy

Kuličkové šrouby jsou konstrukční prvky pohybových ústrojí, které převádějí rotační pohyb na přímočarý pohyb. Fungují na principu kuličkových ložisek, kde se kuličky z tvrzené oceli pohybují po šikmých tvrzených vnitřních a vnějších oběžných drahách. V drážce mezi hřídelí a maticí se pohybují kuličky, které vyvolávají lineární pohyb. Když se matice spojí se šroubem, tak kuličky ubíhají v závit. Když pak šroub rotuje, tak díky ubíhajícím kuličkám celá matice vykonává přímočarý pohyb ve směru osy šroubu.

Kuličkové šrouby mají v porovnání s běžnými kluznými posuvnými šrouby výrazně vyšší účinnost a nižší potřebný točivý moment, což šetří energii hnacího motoru. Díky své minimálně 90% účinnosti jsou kuličkové šrouby jedním z nejekonomičtějších způsobů přeměny otáčivého pohybu na přesný lineární pohyb.

Lineární vedení je mechanické zařízení, které umožňuje pohyb části zařízení po přímkové dráze/kolejnici. Obecně se skládá z podložky, kolejnic a pouzdra s kuličkami nebo válečky. Systém nese zatížení v pohybu po kolejnicích, které jsou většinou přímé. Délka kolejnic je omezená pouze použitým pohonem.

Pokud se používají kuličky nebo válečky mezi kolejnicí a blokem, lineární vedení může dosáhnout extrémně přesného lineárního pohybu. Trvanlivost lineárního vedení je daná celkovým zatížením a požadovanou rychlostí.

Ozubená kola mohou být v různých provedeních, včetně čelních kol s přímými, šikmými, šípovitými, zakřivenými zuby a kuželových kol s přímými, šikmými, šípovitými a zakřivenými zuby. Ozubená kola mohou být navržena tak, aby odolávala velkým silám díky svým zubům, aniž by sklouzla, jak tomu může být u třecích kol nebo řemenic. Ozubená kola umožňují velmi přesné ovládání pohybu.

Klínový řemen je druh řemenu, který má na průřezu tvar klínu. Slouží k převodům hnacích sil. Přenos momentu je realizován třením šikmých ploch řemene o řemenici. Pokud se řemen začne dotýkat řemenice svým vnitřním průměrem, dochází ke ztrátě přenášeného momentu a k prokluzu, zahřívání součástí převodu a jejich degradaci. Na výrobu řemene se většinou používá pryž a polymery. Řemeny nejsou jednolité, ale obsahují nosné jádro, často jsou to kevlarové provazce, výplň může být technická pryž nebo nějaký polymer, a vnější obalovou část, která má za úkol řemen chránit proti vnějším vlivům. Životnost řemenů je závislá na dodržování rozsahu otáček, pro které jsou určeny, velikostí momentů a rázů, které mají přenášet, prostředí v kterém pracují (prašnost, chemické namáhání řemene), rovnoběžnosti os řemenic (radiální a axiální přesnosti usazení), drsnosti funkčních ploch, teploty při které pracují a také na dodržení napínací síly.

Ozubený klínový řemen je dalším typem klínového řemenu. Evidentní rozdíl je v tom, že ozubené řemeny mají ve spodní části zuby. Na rozdíl od klínových řemenů, které jsou obalené tkaninou, je u ozubených řemenů vnější okraj odkrytý, což zajišťuje lepší přilnavost.

2.3.2 Pohony

Pneumatické pohony mají několik výhod, včetně vysoké přesnosti polohování v krajních polohách, použitelnosti ve velkém rozmezí pracovních teplot a použitelnosti i v nebezpečných prostředích. Na druhou stranu, jsou méně efektivní než jiné typy pohonů kvůli tlakovým ztrátám a stlačitelnosti vzduchu. Přesné ovládání rychlosti válce a síly vyžaduje použití proporcionálních ventilů, které výrazně zvyšují náklady na zařízení a složitost ovládání.

Hydraulické pohony jsou robustní a vhodné pro aplikace s vysokými silami. Mohou držet sílu nebo kroutící moment i bez provozu hydraulického čerpadla. Nevýhodou je, že v případě úniku hydraulického oleje může dojít k nebezpečné situaci nebo poškození znečištěných částí stroje.

Elektrické pohony nabízí nejvyšší přesnost řízení polohy a jsou ideální pro polohování i mimo koncové polohy. Poskytují úplnou kontrolu nad průběhem pohybu a mohou, dle typu řízení, obsahovat ovládání řízení rychlosti, polohy a síly.

- Stejnosměrné motory (DC).

Řízení rychlosti otáčení lze snadno regulovat změnou napětí na rotoru. Závislost otáček na budícím napětí na rotoru je lineární.

- Bezkartáčové stejnosměrné motory (BLDC).

Poskytují větší výkon, točivý moment a rychlost než jejich kartáčované protějšky. Mohou poskytnout vyšší úroveň přesnosti a kontroly. Mají menší hluk a vibrace.

- Krokové motory.

Krokové motory jsou ideální pro přesné aplikace díky své schopnosti provádět složité a přesné pohyby, vysokému krouticímu momentu při nízkých rychlostech a vynikající reakci na start, stop a reverz. Navíc, jejich ovládání je jednoduché, což usnadňuje jejich použití.

- Asynchronní motory.

Asynchronní motory jsou jednoduché na konstrukci, spolehlivé a levné, což je činí vhodnými pro aplikace s vysokým výkonem. Díky vysokému startovacímu krouticímu momentu a schopnosti pracovat v širokém rozsahu rychlostí jsou odolné vůči drsným provozním podmínkám.

- Synchronní motory.

Synchronní motory jsou známé svou vysokou účinností a schopností udržovat konstantní rychlost bez ohledu na zátěž. Díky svému vysokému startovacímu krouticímu momentu a schopnosti ovládat $\cos \phi$ jsou ideální pro optimalizaci účinnosti elektrických sítí.

3 Návrh poloautomatického zařízení pro nanášení práškových materiálů

Při návrhu bylo využito co nejvíce komerčně dostupných hotových dílů, aby se předešlo komplikacím, a to i s ohledem na časovou náročnost samotného návrhu. Zařízení je koncipováno s předností na splnění zadaných požadavků tedy ověření funkčnosti zařízení 2, kdy jsou někdy uvedena i jiná možná řešení, či možná úskalí ve vybraném řešení.

3.1 Návrh mechanické konstrukce

Návrh hlavního rámu, včetně krytu, ale i tryska, nádoba a úchyty byly modelovány v programu Autodesk Inventor Professional 2024. Byl zvolen PLA materiál pro 3D tisk, protože je snadno tisknutelný a také díky jeho nízké ceně, post úpravy byly provedeny v programu Blender 4.0 a následně exportovány do programů Ultimaker Cura 5.6. pro exportování modelů do souboru *.gcode. Nastavení tisku odpovídá pro 3D tiskárnu Original Prusa i3. Byly vymodelovány jednotlivé součásti, z kterých se následně sestavil virtuální model zařízení, díky tomu bylo možné předejít k možným kolizím a také bylo možné přesněji určit výslednou cenu za náklady spojené s konstrukcí zařízení, která činí za materiál 16.294,66 Kč viz příloha. A.1

3.1.1 Hlavní rám

Pro návrh hlavního nosného rámu bylo zapotřebí vymodelovat modely použitých komponentů, pro přesnější představu rozmístění a jejich správné uchycení, tedy i jejich prostorovou náročnost. Bylo pohlíženo na nutnou dostupnost k daným částem a také robustnost. Celková prostorová náročnost rámu, tedy celého zařízení je 320;320;430 mm (x;y;z) 3.1. Vyhověno/Splněno:2 Vedlejší požadavky bod 3.

Na spodní straně konstrukčního rámu jsou instalovány antivibrační a protiskluzové podložky. Tyto podložky zajišťují stabilní umístění zařízení na povrchu během provozu tím, že minimalizují skluz zařízení po plastovém rámu. Kromě toho také fungují jako tlumiče vibrací, čímž se snižuje přenos vibrací do okolního prostředí 3.1.2.

Rám je složen z několika dílčích částí viz obr 3.1b



(a)



(b)

Obr. 3.1: Vizuální model celého rámu (a) a rozloženého rámu (b)

Pro uchycení komponent slouží plot mezi rámem 3.2, zároveň je takto rám vyztužen. K tomuto plotu jsou uchyceny i ochranné segmenty 3.3. Ochranné segmenty/dílce chrání před vniknutím cizího předmětu, ale i k ochraně obsluhy před prachem, či nechtěným úrazem.

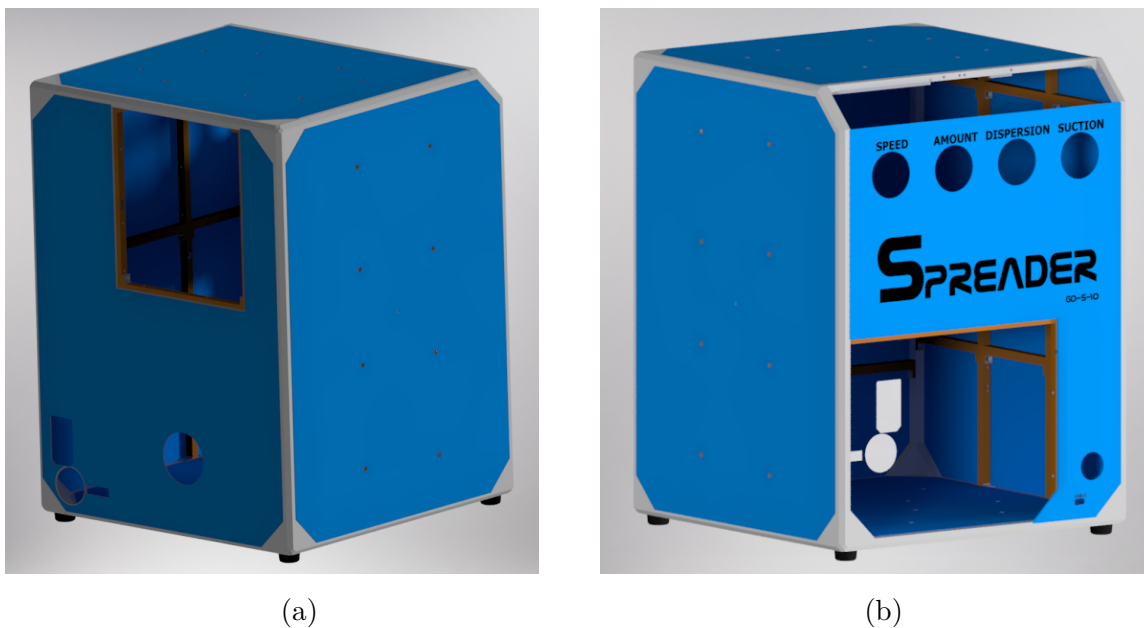


(a)



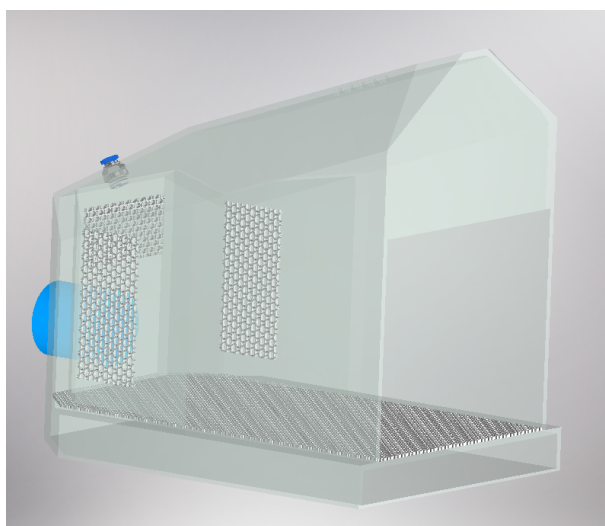
(b)

Obr. 3.2: Vizuální model návrhu výztuhy rámu - perspektiva z pravé přední strany (a) a z levé přední strany (b)

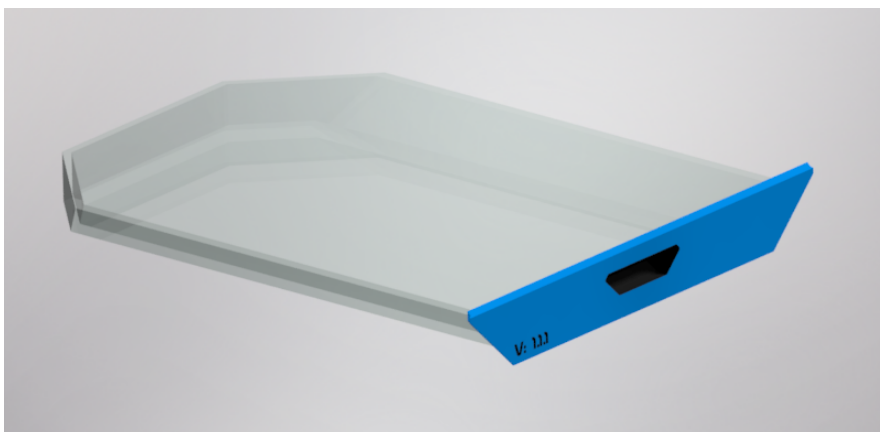


Obr. 3.3: Vizuální model návrhu celého rámu se segmenty - perspektiva z pravé zadní strany (a) a z levé přední strany (b)

Tento box slouží jako kryt pro komponenty a před úrazem elektrickým proudem. Vně tohoto krytu se nachází samostatný box 3.4 pro nanášení prášku. Za materiál bylo zvoleno plexisklo, díky snadné práci s ním a jeho ceně. Dále také proto, neboť je tak možné vidět co se děje za běhu, a je tak možné rychlejší a snadnější ladění celého procesu. Box obsahuje kapsli na zásuvku 3.5, do kterého propadá nezachycený prach odsáváním, a je tak možné tento prach znovu využít, popř. pouze zařízení vyčistit.

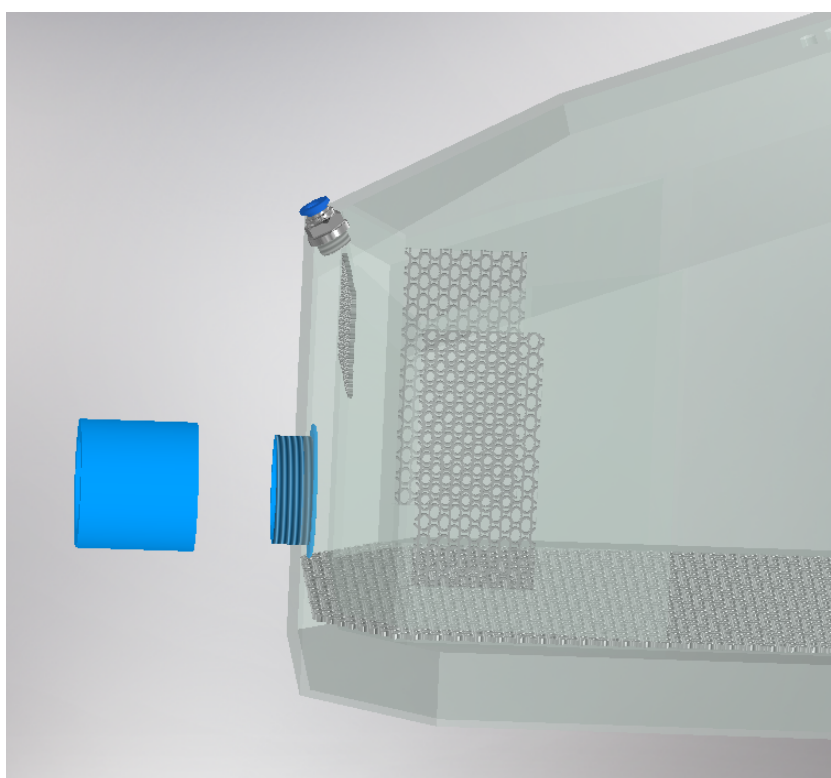


Obr. 3.4: Vizuální model návrhu vnitřního boxu



Obr. 3.5: Vizualní model návrhu zásuvky boxu

Po diskusi se zadavatelem bylo určeno, že odsávání z boxu bude řízeno externím zařízením, proto je v zadní části otvor se závitem na který je možné našroubovat potřebnou spojku 3.6, pro mé účely byl zvolen běžný vysavač. Ačkoli vysavače mají regulátory rychlosti sání, bylo potřeba mít možnost regulovat z části odsávaný vzduch z boxu nezávisle na tomto regulátoru, proto je přidán celý okruh pro toto řízení dále viz 3.1.4, k boxu spojená rychlospojkou v zadní části.3.6

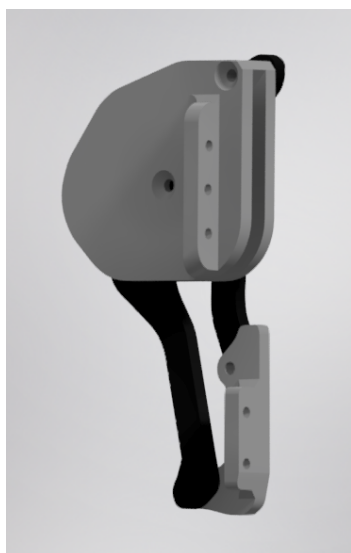


Obr. 3.6: Vizualní model návrhu detailu zadní části boxu

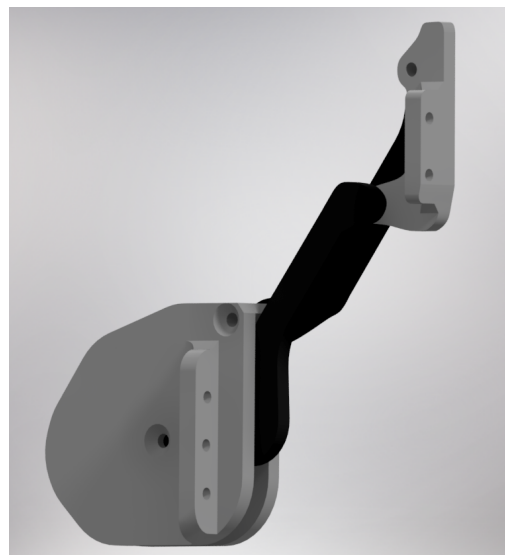
Jako závěrečný prvek konstrukce rámu je nezbytné zahrnout funkci uzavření/o-tevření boxu. Pro tento účel byl implementován zdvihací mechanismus se zdvihem 13 cm, který je optimalizován pro prostorovou efektivitu a nevyžaduje významný prostor před dveřmi. Dveře jsou navíc vybaveny inspekčním okénkem, které umožňuje průběžný vizuální přístup k internímu prostoru boxu. 3.7. Detail na zdvihací mechanismus v krajních polohách obr. 3.8.



Obr. 3.7: Vizuální model návrhu dveří



(a)

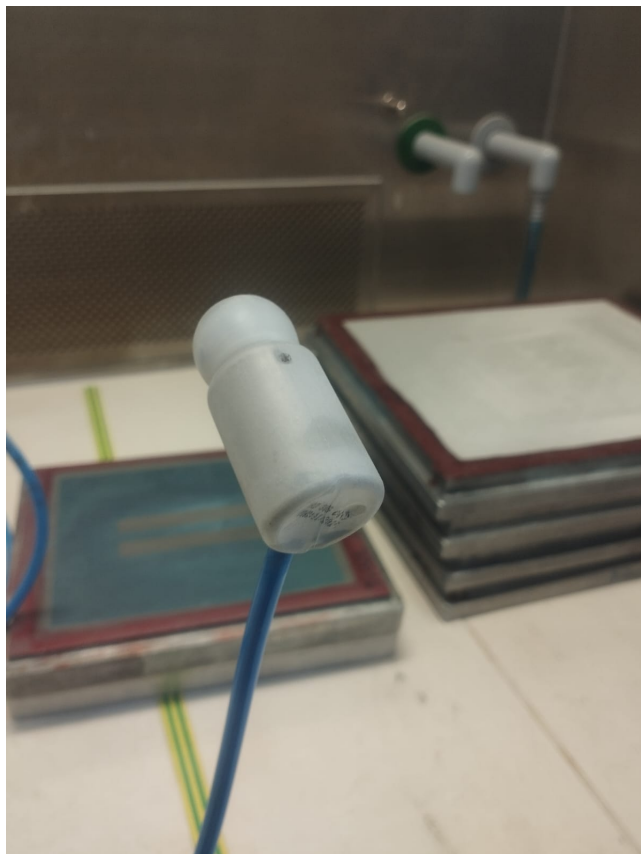


(b)

Obr. 3.8: Krajní polohy zdvihacího mechanismu - uzavřená poloha (a) a otevřená poloha (b)

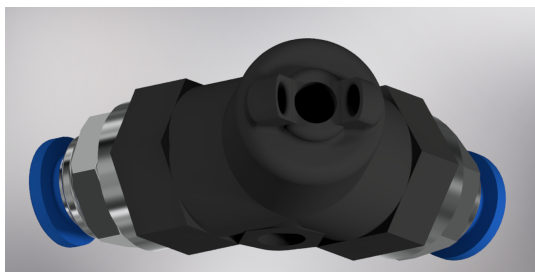
3.1.2 Tryska se zásobníkem

Výběr trysky byl determinován hlavními požadavky 2. Bod 1. písmena b), omezuje využití metod na fluidní, tryskáci, stříkáci bez polarizace, elektrostatické a tribostatické. Bod 3. písmena b), dále omezuje využití metod na tryskáci, stříkáci bez polarizace elektrostatické a tribostatické. Bod 2. písmena a), dále omezuje využití metod na tryskáci a stříkáci bez polarizace. Bod 1. písmena a) tento výběr zúží na metodu stříkáci bez polarizace. Původní trysku využívanou doposud je možné vidět na obr. 3.9.

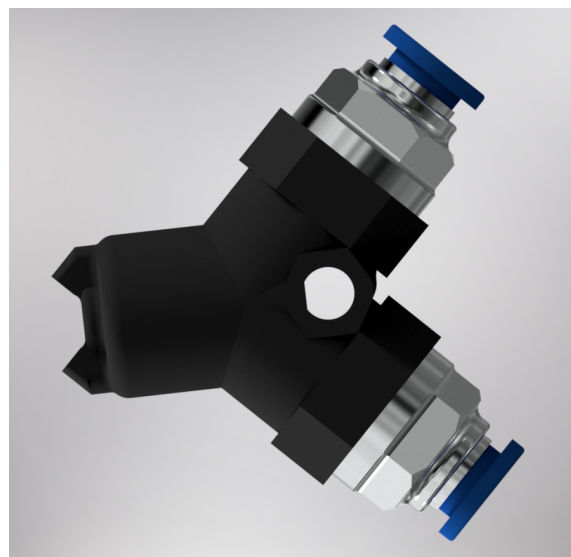


Obr. 3.9: Původní tryska

Pro pouhé ověření správné funkčnosti byla tryska vytisknuta na 3D tiskárně 3.10. Má dva nezávislé přívody a to na řízení rozprachu a rychlosti unášených částic o průměru 4 mm z důvodu stejného průměru přívodu k trysce, pro zachování stejného tlaku.



(a)



(b)

Obr. 3.10: Vizuální model návrhu trysky z přední strany (a) a z horní strany (b)

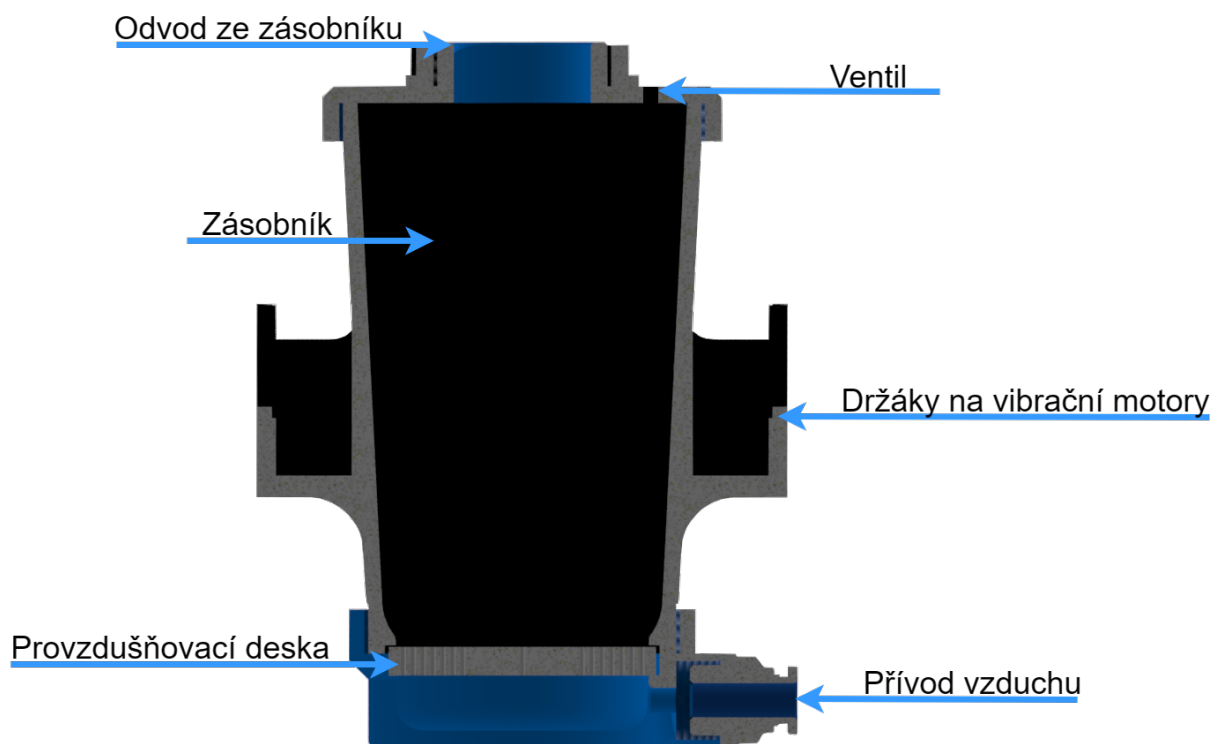
Pro dosažení homogenní aplikace je nezbytné zajistit uniformní transport materiálu. Materiál s označením 1000 vykazuje adhezivní vlastnosti, což znamená, že má sklon se přichytávat jak k sobě samému, tak k povrchům s vyšší drsností. To vede k tomu, že plastová tryska není optimálním řešením pro dlouhodobé použití. Jedním z důvodů, proč je průměr trysky a přívodů k ní 4 mm, je prevence rychlého ucpání. Doporučuje se nahradit plastovou trysku za kovovou. Vzhledem k adhezivní povaze materiálu není možné umístit nádobku nad tryskou a regulovat množství prachu pomocí šneku. Stejný problém nastává i v případě umístění nádobky pod tryskou. Pro eliminaci této vlastnosti je prášek převeden do pseudofluidního stavu pomocí provzdušňovací desky a vibračního motoru. Tento proces umožňuje lepší manipulaci s materiálem a jeho rovnoměrné nanášení.

Pro validaci funkčnosti systému byl opětovně vytištěn prototyp nádobky. Její objem byl stanoven odhadem, vzhledem k neznámé tloušťce vrstvy, která má být aplikována. Bylo předpokládáno, že na desku o rozměrech 10 cm x 10 cm bude aplikována vrstva o tloušťce 100 μm , což by mělo odpovídat 1 ml prášku na desku.

Vzhledem k tomu, že hustota prášku karbidu křemíku se obecně pohybuje kolem 3,16 g/cm^3 , je pro pokrytí jedné desky potřeba 3,16 g prášku. Pro zadání 2, že v jednom cyklu (naplnění nádobky) bude připraveno 100 ks, je třeba 316 g prášku, což odpovídá 100 ml. Vzhledem k tomu, že bude naprašováno pouze na polovinu desky, by měla stačit nádržka o objemu 50 ml a tedy 158 g prášku.

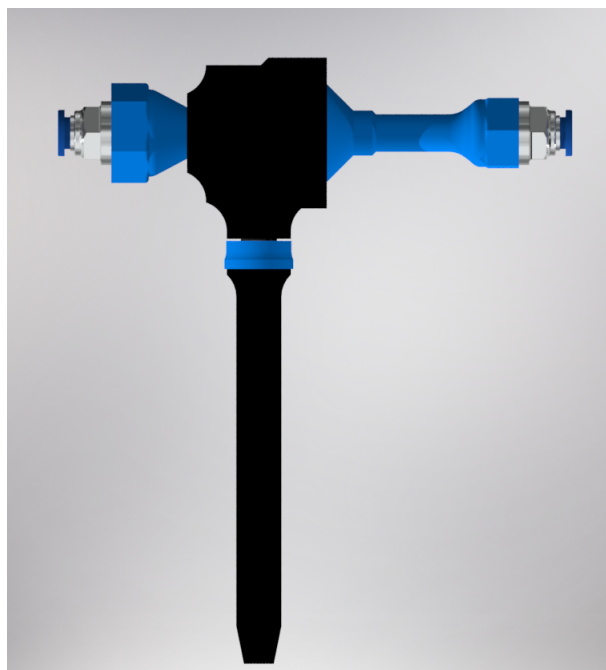
Při fluidizaci však prášek zvýší svůj objem 2-2,5krát, což vyžaduje nádržku o objemu 125 ml. S ohledem na možnost, že by mohlo být třeba aplikovat silnější vrstvu,

byla navržena nádržka o objemu 200 ml. Vizualizace řezu nádoby odhaluje, že její konstrukce je navržena s mírným kónickým profilem. Po stranách je integrováno uchycení pro vibrační motory. Na spodní části je umístěna provzdušňovací deska, která je klíčová pro proces fluidizace. Na vrchní části nádržky je umístěn ventilační ventil, který umožňuje odvádění vzduchu z procesu provzdušňování. Tímto způsobem se zabrání vytváření přetlaku uvnitř nádržky.3.11.

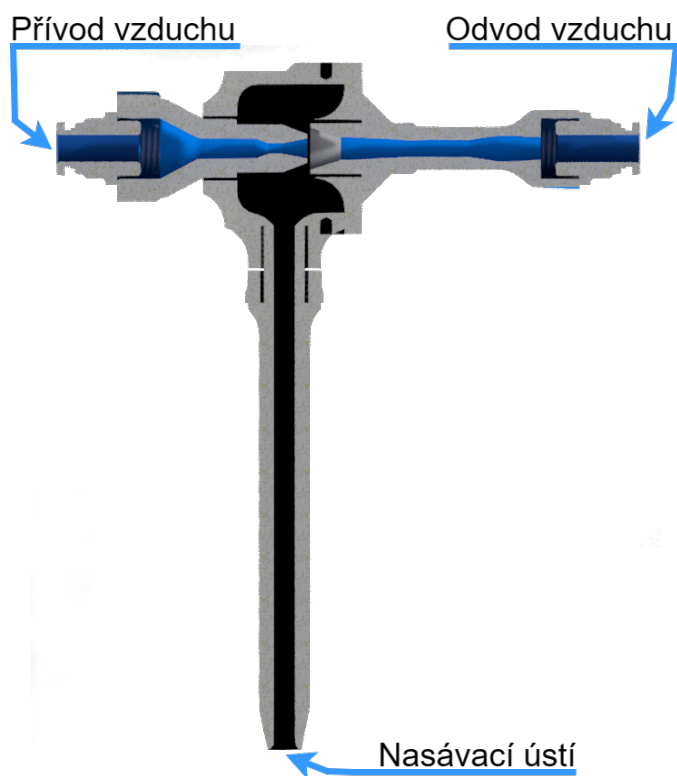


Obr. 3.11: Vizuální model návrhu nádoby v řezu

Pro nasávání z nádoby je zvolen ejektor, možný vidět na obrázku 3.12 a v řezu na obrázku 3.13.

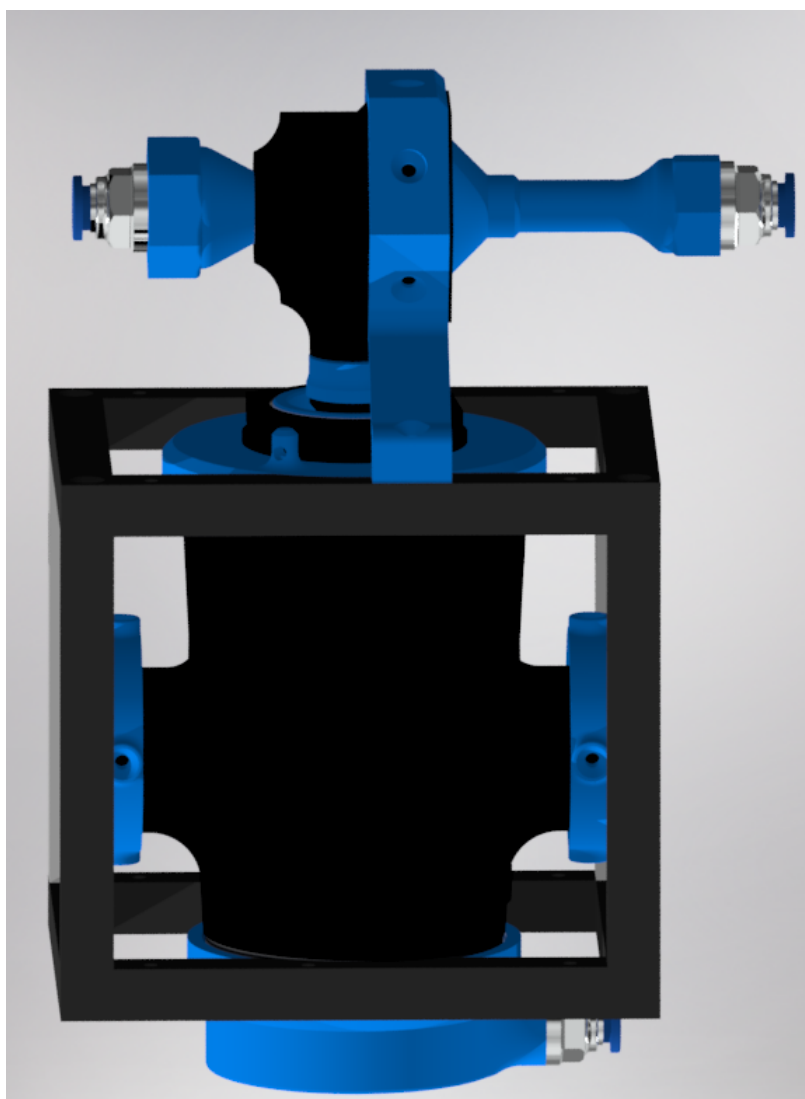


Obr. 3.12: Vizuální model návrhu ejektoru



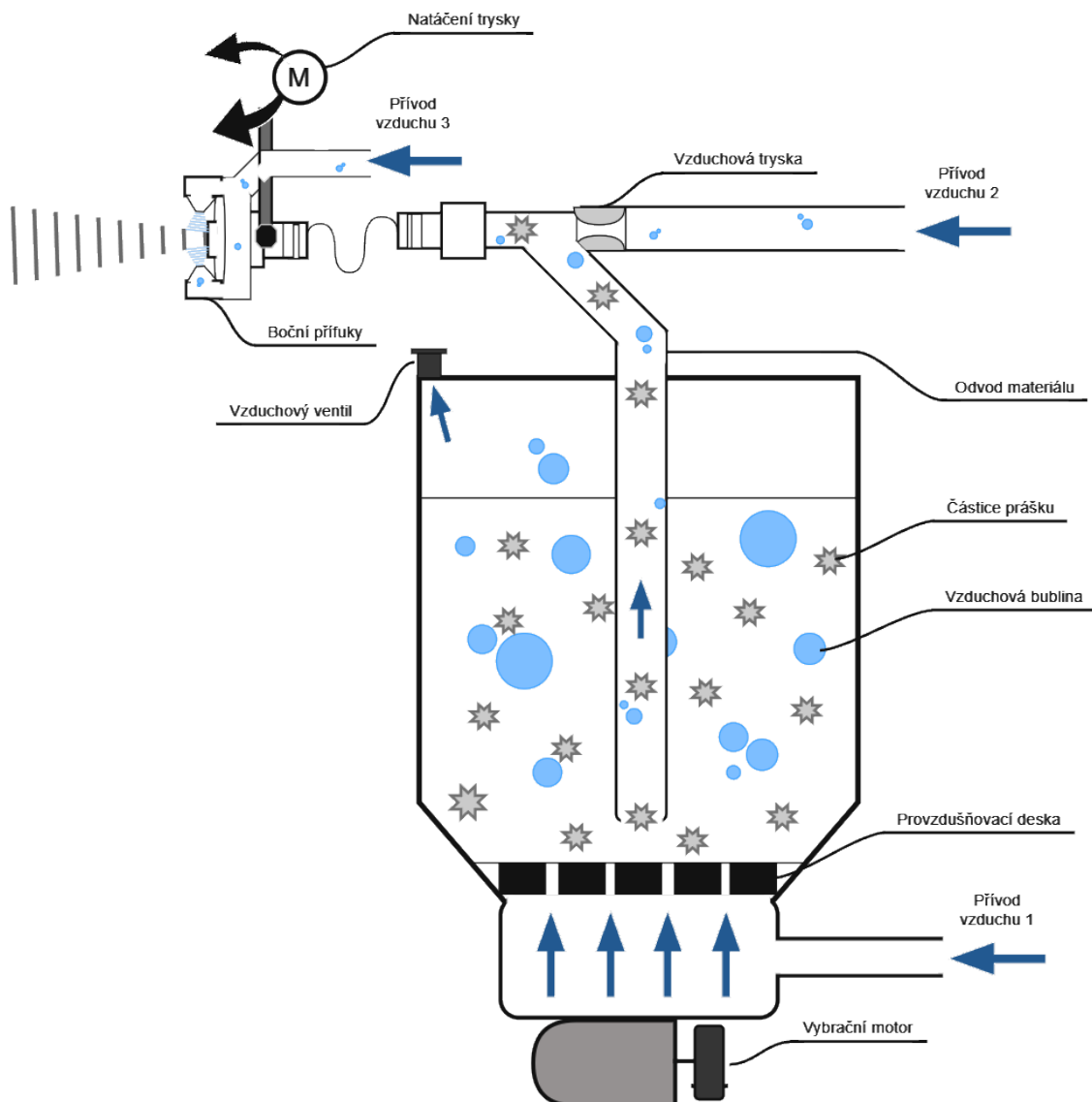
Obr. 3.13: Vizuální model návrhu ejektoru v řezu

Ejektor je rigidně integrován do konstrukce zásobníku. Zásobník je pak pomocí pružinových spojů připojen ke konstrukci a prostřednictvím elastického materiálu je spojen s ejektorem. Ucelený pohled na nádržku je možné vidět na obrázku 3.14.



Obr. 3.14: Vizuální model návrhu celého zásobníku

Tryska je tedy jako celek konstruována tak, že integruje tři nezávislé vzduchové okruhy, které umožňují samostatné řízení rychlosti tryskaného prachu, jeho množství a následného rozptýlu. *Druhý vzduchový* okruh slouží k nasávání částic prachu ze zásobníku, které jsou poté u výstupu trysky usměrněny/rozptýleny *třetím vzduchovým okruhem* pomocí bočních přífuků. *První vzduchový okruh* je navržen tak, aby zajišťoval proces fluidizace. Stálý tlak v nádobě je udržován vzduchovým ventilem. Vizualizace tohoto principu je zobrazena na obrázku 3.15.



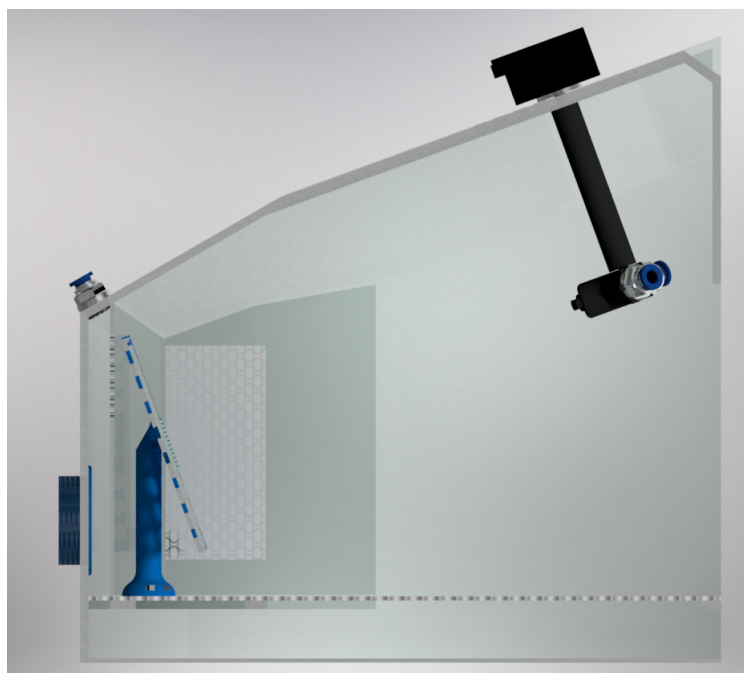
Obr. 3.15: Princip trysky se zásobníkem

V technických specifikacích, uvedených v sekci 2 pod bodem 2. b), je uvedena možnost konfigurace trysky v rozmezí 15-25 cm NPTP. Vzhledem k tomu, že cílový povrch je rovný, optimální konfigurace zahrnuje umístění trysky kolmo k objektu, což odpovídá úhlu 90 stupňů.

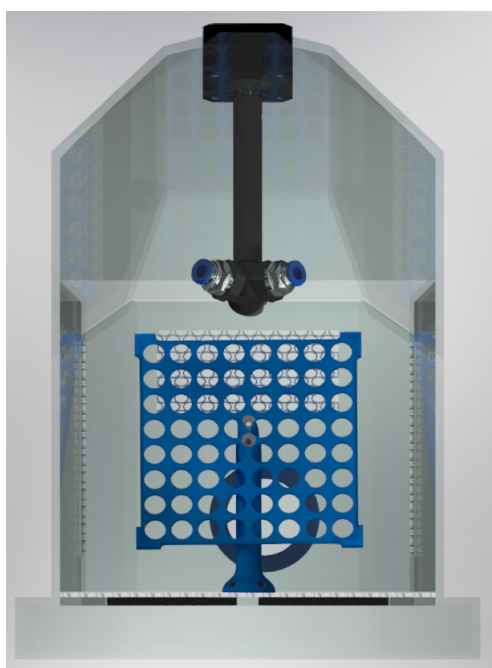
Pro efektivitu procesu eliminaci potřeby upínání DUT, je DUT umístěn pod úhlem 110 stupňů. Aktuální řešení umožňuje nastavit vzdálenost v intervalu 15-25 cm po 1cm a zajišťuje, že tryska je vždy kolmá k DUT. Toho je docíleno konstrukcí boxu, jehož horní strana je nakloněna o 20 stupňů.

Kontinuita pohybu trysky 3.1.5 je zajištěna přímým spojením s krokovým mo-

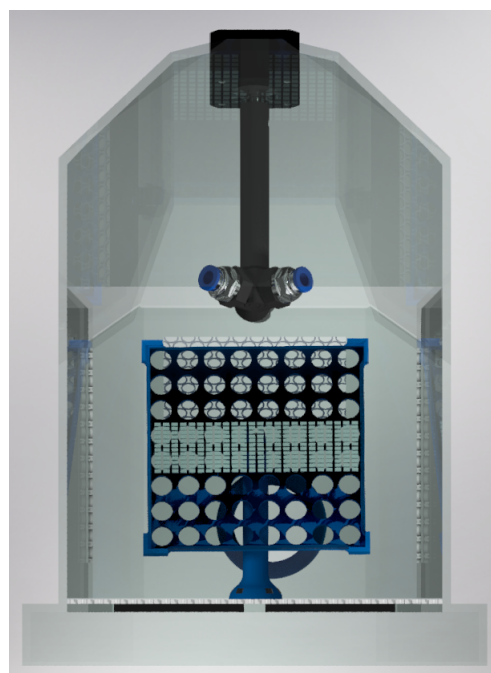
torem, jak je znázorněno na obrázku. 3.16 a 3.17.



Obr. 3.16: Vizuální model návrhu držení DUT a pohybu trysky pohled v řezu



(a)



(b)

Obr. 3.17: Vizuální model návrhu stojanu bez (a) a s (b) DUT, perspektiva z přední strany

3.1.3 Uživatelský panel

Klíčovým prvkem při interakci s jakýmkoli strojem nebo zařízením je rozhraní člověk-stroj (Human machine interface - HMI), které umožňuje jeho konfiguraci a ovládání.

Pro minimalizace zátěže na uživatele HMI splňuje následující požadavky:

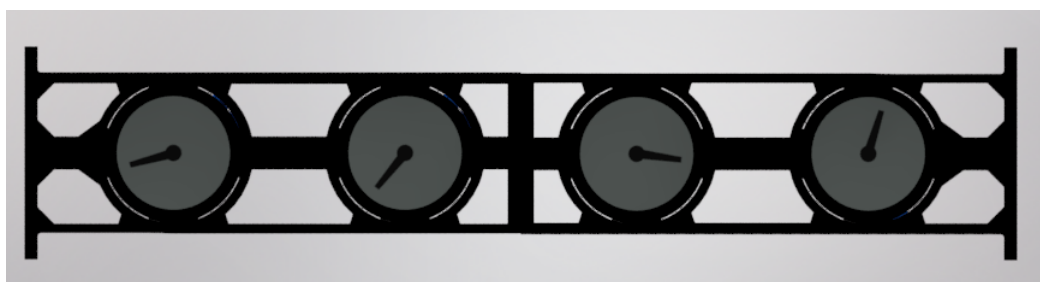
- Jednoznačnost/intuitivnost: bez textových či grafických dvojznačností.
- Stručnost: nezbytný text, jednodušší orientace/hledání.
- Podobnost: co nejvíce podobné jiným aplikacím.
- Responzivnost: zpětná vazba poskytovaná uživateli o provedeném úkonu.

Pro úplnou přehlednost jsou na přední straně zařízení integrovány barometry pro jednotlivé okruhy, jak je uvedeno v 3.18. Tyto barometry zahrnují měření rychlosti vzduchu tryskou (*SPEED*), objemu vzduchu pro provzdušnění zásobníku (*AMOUNT*), velikosti rozptylu (*DISPERSION*) a množství odsávaného vzduchu (*SUCTION*).

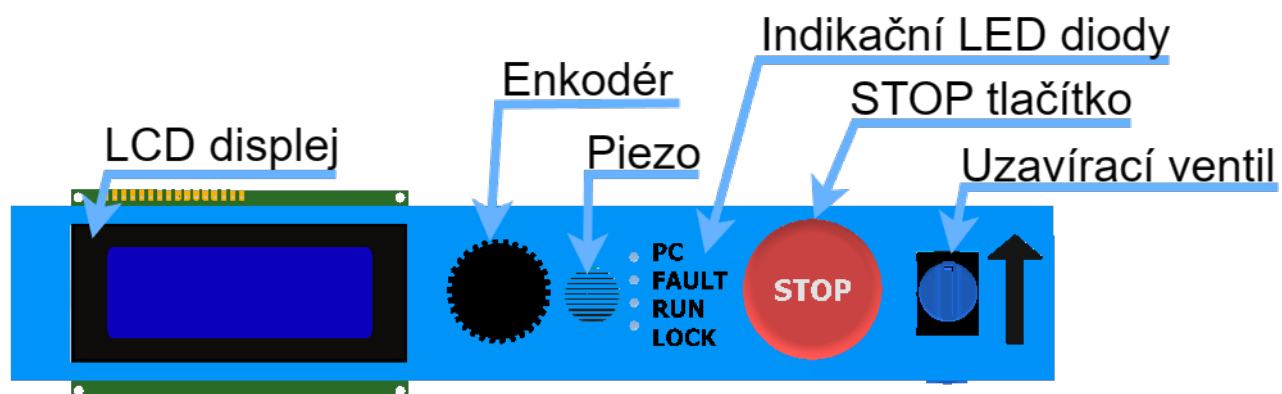
Všechny tyto veličiny jsou vyjádřeny v barech a poskytují pouze informace o změnách, nikoli o skutečných hodnotách rychlosti, množství atd.

Tyto hodnoty, spolu s dalšími parametry a nastaveními, jsou zobrazeny na Liquid crystal display (LCD - 4X20). Pro navigaci v nastaveních je k dispozici enkodér s tlačítkem. Pro lepší přehlednost jsou integrovány stavové LED indikátory, jako jsou *PC*, *FAULT*, *RUN*, *LOCK*, včetně zvukového indikátoru.

Rozhraní HMI také obsahuje bezpečnostní STOP tlačítko, jak je uvedeno v 2 (bod 4. Vedlejší požadavky), a umožňuje manuální uzavření pneumatického přívodu vzduchu do celého rozvodu, což je zobrazeno na obrázku 3.19, nebo ve schématu 3.34. Toto uspořádání zajišťuje, že operátor má k dispozici všechny potřebné informace pro efektivní ovládání a nastavení zařízení. Komplexní přehled integrace rozhraní HMI je zobrazen na obrázku 3.20.



Obr. 3.18: Vizuální model návrhu uchycení barometrů



Obr. 3.19: Vizuální model HMI



Obr. 3.20: Vizuální model návrhu implementovaného HMI

3.1.4 Filtrace

V kontextu bezpečnosti a ochrany zdraví pracovníků je nezbytné zabránit nechtěnému úniku nadbytečných částic do ovzduší. Tím se omezuje možnost inhalace těchto částic a předchází se tak riziku vzniku nemocí, jako je silikóza. Toto onemocnění může vést k vážným respiračním potížím, včetně bronchitidy, emfyzému a tuberkulózy. Implementace efektivních bezpečnostních opatření a kontrolních mechanismů je tedy klíčová pro udržení zdravého pracovního prostředí.

Současné řešení je založeno na připojení externího odsávacího zařízení, které je v současnosti zajištěno externím vysavačem.

Na základě provedené rešerše se nabízí možnost sériové integrace multicyklónů pro předfiltraci znečištěného vzduchu.

Výzvou je, že prášek má lepivý charakter, což by pravděpodobně vyžadovalo čištění těchto multicyklónů po každém cyklu pro správnou funkci. Pozitivním aspektem by bylo možné opětovné využití zachyceného prášku.

Nicméně, na základě hrubého odhadu s ohledem na uvedenou cenu za kg a náklady spojené s rekonstrukcí a údržbou implementace těchto multicyklónů, se nezdá být tato strategie zisková. Pro přesnější určení je nutné provést testy, například kolik procent prášku multicyklóny zachytí, jaká je cena jednoho multicyklónu, jak dlouho trvá vyčištění multicyklónu atp.

Hermetičnost naprašovací komory je zajištěna pomocí těsnících gum na vstupech do komory. Tyto těsnící prvky zajišťují, že žádné částice neuniknou z komory během procesu naprašování, což přispívá k efektivitě a bezpečnosti celého procesu.

3.1.5 Posuv DUT/Trysky

Synchronizovaný pohyb mechanismu a konzistentní rozprašování zajišťují homogenitu a integritu naprašované vrstvy na i do povrchu. Vzhledem k prašnému prostředí, v němž se DUT musí pohybovat, jsou kladeny vysoké požadavky na mechanickou bezpečnost, aby se předešlo zadrhnutí, zanesení nebo předčasnému opotřebení.

Je tedy nezbytné celý mechanismus zakrýt nebo obalit. Avšak u žádného typu posuvu nelze zcela dosáhnout tohoto požadavku. Jedním z jiných možných řešení je použití robotického ramene zavěšeného na kostru, obaleného v neprodyšné látce, nebo udržováním přetlaku, jak je to běžné u průmyslových stříkacích robotů.

Doposud byla vrstva nanášena pouze ručně, lze předpokládat, že pouhé natočení trysky by mělo pokrýt požadovanou kvalitu naprašování. Pokud ne, může se zvolit jedno z výše zmíněných řešení.

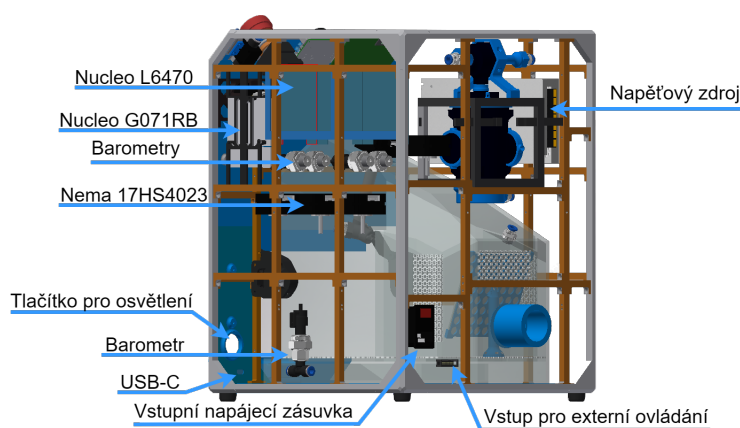
3.2 Návrh elektrických rozvodů

Návrh schématu zapojení, tak i DPS pro HMI a senzory byly provedeny v programu Autodesk Eagle 9.6.2. Při návrhu elektronické konstrukce byla primárně řešena koncepce funkčního prototypu. Z tohoto důvodu byl zamítnut výběr některých samostatných integrovaných obvodů, návrh schématu a realizace celé řídicí elektroniky na jednom plošném spoji. Je tedy zvolena realizace pomocí samostatných hotových modulů a navrhnuté DPS které budou spolu propojeny. Jelikož se jedná o prototyp, je možné tímto způsobem zaručit funkčnost a zabránit možným vývojovým chybám, jejichž řešení může být velmi zdlouhavé.

Optimalizace rozmístění elektronických komponent je klíčová. Napájecí jednotka, která je primárním zdrojem rušení v digitální technologii, byla strategicky umístěna co nejdále od ostatních elektronických prvků, konkrétně na opačnou stranu od zbylých prvků. Krokové motory byly umístěny v blízkosti k jejich driveru, přičemž bylo zajištěno, že nezasahují do jednotlivých DPS. Mikrokontrolér, který řídí celý systém, je umístěn v maximálním stínění od napájecí jednotky a co nejdále od krokových motorů, jak je patrné na obrázku 3.21.

Jednotlivé části elektronické konstrukce budou popsány v následujících kapitolách. Seznam částí elektronické konstrukce:

1. Mikrokontrolér.
2. HMI.
3. Řízení ventilů.
4. Vibrační motor.
5. Ostatní(osvětlení, barometr).
6. Napájecí zdroj.



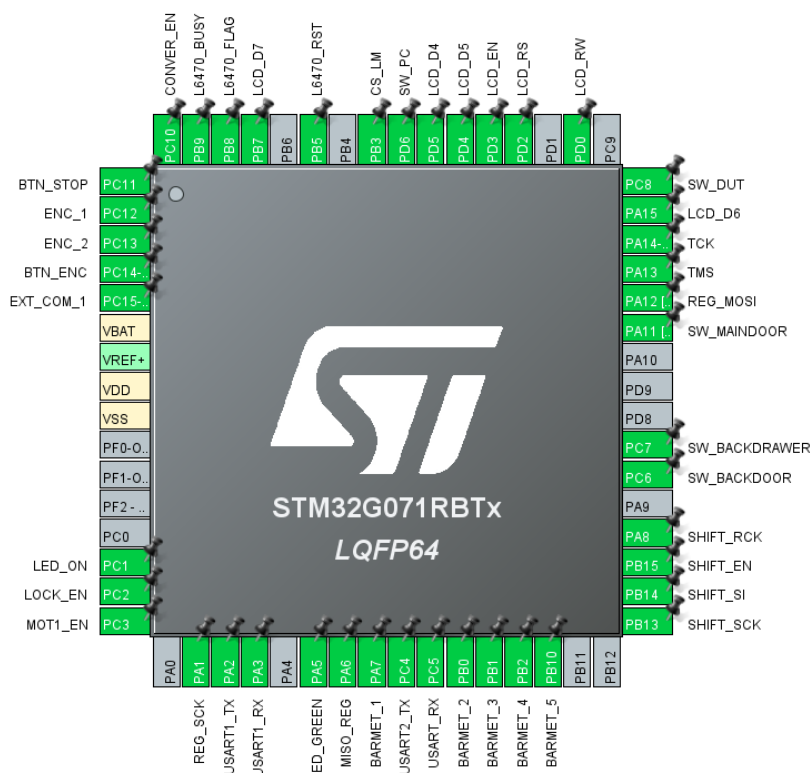
Obr. 3.21: Vizuální model rozmístění elektronických součástek

3.2.1 Mikrokontrolér

Výběr mikrokontroléru byl proveden na základě několika kritérií, včetně výpočetního výkonu, kapacity paměti, ceny, doby dodání, potřebných periférií, počtu pinů, integrovaný debugger na desce. Po zhodnocení byl vybrán mikrokontrolér STM32 - NUCLEO STM32G071RB MCU. Tento mikrokontrolér je založen na MCU Arm Cortex-M0+ a disponuje 128 kB Flash pamětí, 36 kB RAM, 64 MHz CPU, 4x USART, časovači, ADC, DAC a napájením 1,7-3,6 V, GPIO 5 V tolerantní a mnoho dalšího. Výčtem jsou využívány následující periferie a vlastnosti.

- DMA
- ADC
- USART
- SPI
- TIM
- SYSTICK
- GPIO
- ST-LINK USB

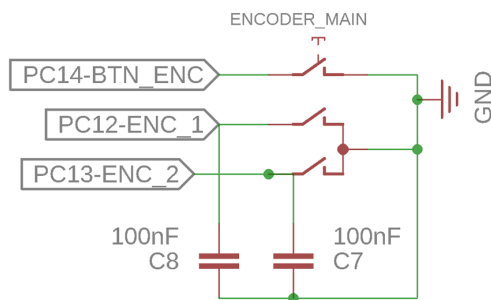
Rozvržení výstupních pinů je možné vidět na obrázku 3.22



Obr. 3.22: Rozvržení výstupních pinů

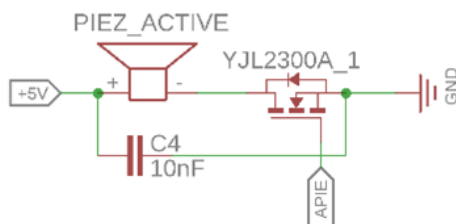
3.2.2 HMI

Pro optimalizaci uživatelské interakce byl implementován LCD displej s čtyřmi řádky a dvaceti znaky. Tento displej umožňuje zobrazení všech potřebných informací během provozu systému. Displej je řízen paralelní sběrnici, která je po startu přepnuta do módu z 8 datových na 4 datové piny. Navigace v uživatelském rozhraní je realizována pomocí rotačního enkodéru s integrovaným tlačítkem 3.23.



Obr. 3.23: Návrh elektrického schématu pro Spreader G0-5-10 - enkodér

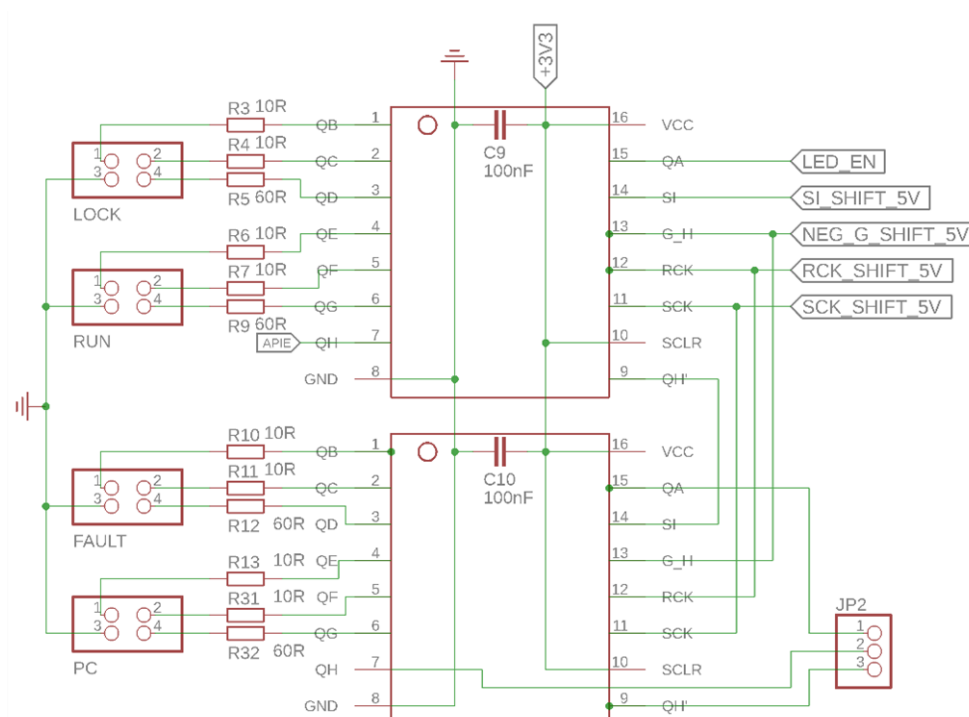
Jako zdroj zvukové signalizace byl vybrán aktivní piezo reproduktor CMI-1210-5-95T34, který pracuje na napětí 5V a má zvukový tlak 98 dB 3.24. Kromě toho, rozhraní HMI obsahuje čtyři RGB diody, které slouží jako samostatné indikátory. Součástí systému je také tlačítko STOP pro okamžité ukončení operací.



Obr. 3.24: Návrh elektrického schématu pro Spreader G0-5-10 - aktivní piezo reproduktor

Pro řízení RGB diod byly použity shift registry 74HC595D5678 s maximální frekvencí 59 MHz a pracovním napětím 2-6V 3.25. Tato volba byla provedena s ohledem na úsporu pinů pro další důležité operace. Jako zdroj napájení slouží deska Nucleo G071RB91011 se stabilizátorem na 5V D1117S50TR s maximálním

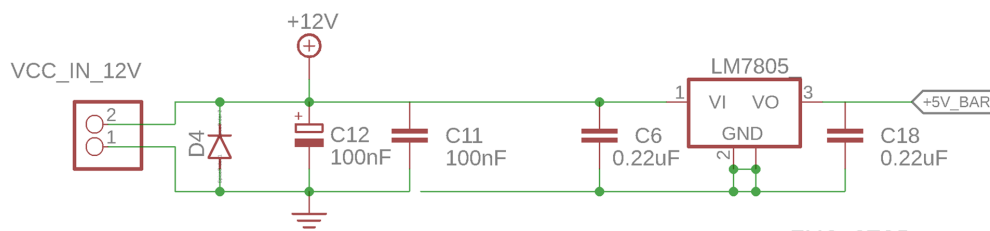
odběrem proudu 1.2A. Z tohoto zdroje je poté napájen stabilizátor napětí na 3V3 LDL112PV33R, který také má maximální odběr 1.2A.



Obr. 3.25: Návrh elektrického schématu pro Spreeder G0-5-10 - Shift register

Celkový odběr proudu systému v nejhorším případě je následující: 4x3 LED diody po 20 mA, výrobcem udávané hodnoty R LED : 2-2V2, G a B LED : 3-3V2, tj. 60R pro volbu 2V1 a 10R pro 3V1, to je celkem 240mA, plus jednotky mA pro mikrokontrolér STM32G071RB z 3V3 větve. Dále LCD displej s odběrem do 100mA (typicky 40-60 mA, závisí na nastavení podsvícení), piezo reproduktor s odběrem 35mA z 5V větve a jednotky mA pro zmíněné stabilizátory a jednotky mA na zbylé, jako ztráta na odporech, indikační LED na desce atp. Tento odběr, který je možný z desky Nucleo G071RB odebírat je dostatečný pro bezproblémový provoz systému. Celkový odběr HMI a hlavního mikrokontroléru je odhadován na 400mA.

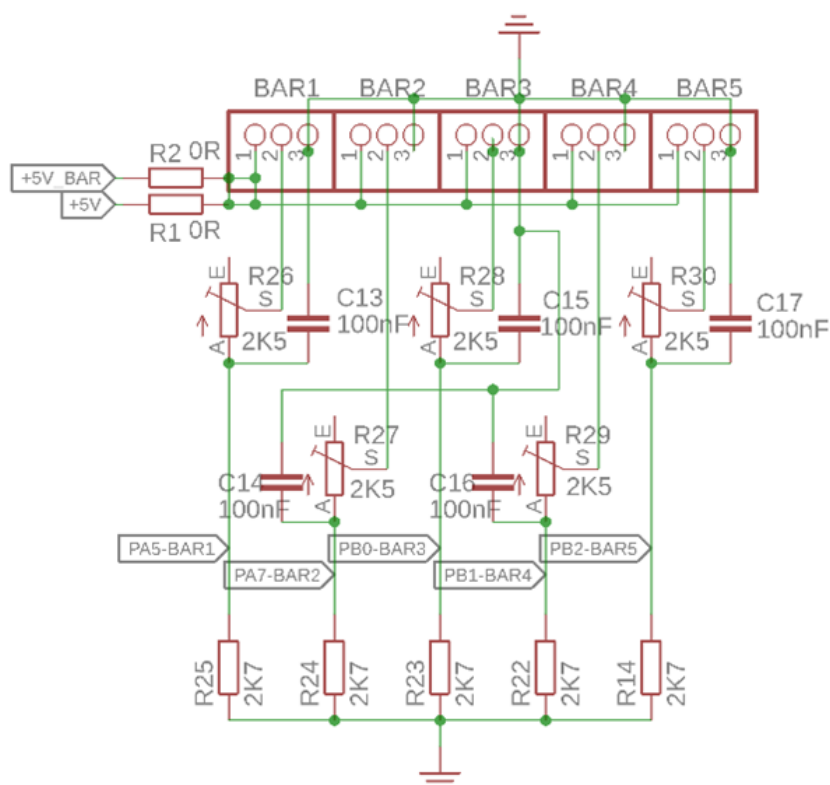
Na DPS jsou integrovány čtyři tlakové senzory modelu M553B s měřicím rozsahem 0-0,5MPa a jeden tlakový senzor modelu M553C s měřicím rozsahem 0-1,0MPa 3.27. Tyto senzory disponují přesností $\pm 1\%$. Předpokládanou spotřebu, výrobce neuvádí, pro každý z těchto snímačů je odhadována na 100mA, nicméně v případě vyšších spotřeb je možné na DPS přemostit VCC a přidat stabilizátor LM7805 3.26, který bude zajišťovat napájení těchto senzorů.



Obr. 3.26: Návrh elektrického schématu pro Spreader G0-5-10 - napájení

Výstupem těchto senzorů je napětí v rozmezí 0.5 - 5V. Přestože vstupní piny jsou tolerantní k 5V, analogově-digitální převodník (ADC) má vstup pouze do VDDA, což je VDD, protože jsou vzájemně propojené, tzn 3.3V.

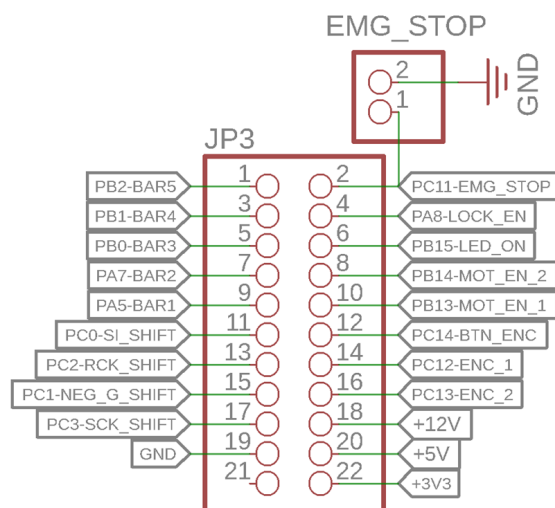
Byl implementován napěťový dělič 3V3/5V s proudem 100uA v nejhorším případě. Byl zvolen odpor 2K7 a potenciometr 2K5 R pro doladění poměrů. Možný poměr je 0-0.93, požadovaný je 0.66, s předpokladem, že nikdy nebude nastavena vyšší hodnota, tedy na výstupu senzoru nebude více jak 4V je požadovaný poměr 0.82. Tento předpoklad vychází z předběžných zkoušek, kdy je takto zvýšená citlivost snímače.



Obr. 3.27: Návrh elektrického schématu pro Spreader G0-5-10 - Barometry

Vzhledem k tomu, že je využíván 10bit ADC s vnitřní referencí, po započtení offsetu (0.33V) a s využitím do 4V je využito 87% rozsahu. Na přesnosti měření se podílí nejvíce teoreticky samotná přesnost tlakového senzoru, tedy $\pm 1\%$.

Pro řízení LED diod, vibračních motorů, piezo reproduktoru, shift registrů a enkodéru byla navržena dedikovaná DPS. Schéma přívodního konektoru pro pomocnou propojovací DPS je vidět na 3.28.



Obr. 3.28: Návrh elektrického schématu pro Spreadshirt G0-5-10 - Přívodní spojka

3.2.3 Řízení ventilů

Aby bylo možné regulovat ventily, byly vybrány krokové motory Nema 17 42 s parametry 23mm 0.42N.m 1.5A, společně s 1/4" vzduchovým filtrem a regulátorem REDUKTO. Toto rozhodnutí bylo motivováno cenovou dostupností těchto komponent, v porovnání s proporcionálními ventily, jejichž cena se obvykle pohybuje kolem osmi tisíc korun.

Ventily budou regulovány pomocí zpětnovazebního systému s využitím výše zmíněných tlakových senzorů. Tento přístup je nezbytný, protože tyto ventily mají hysterezi, což znamená, že dochází k nesrovnalosti mezi bodem otevření a bodem uzavření při přímém řízení.

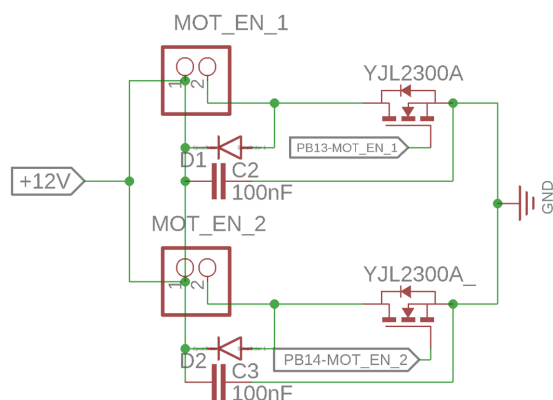
Krokové motory jsou řízeny prostřednictvím SPI v konfiguraci daisy chain pomocí vývojové desky X-NUCLEO-IHM02A1, která obsahuje dva integrované drivery. Tato deska podporuje vstupní napětí v rozmezí 8-45V a poskytuje 3A rms pro každý motor, s maximálním špičkovým proudem až 7A. V klidovém režimu odebírá 25mA plus nastavený klidový proud do motorů.

Je třeba vzít v úvahu, že výkon krokových motorů nemusí být dostačující. V takovém případě bude nutné zvolit jiný převodový poměr nebo použít silnější krokové motory.

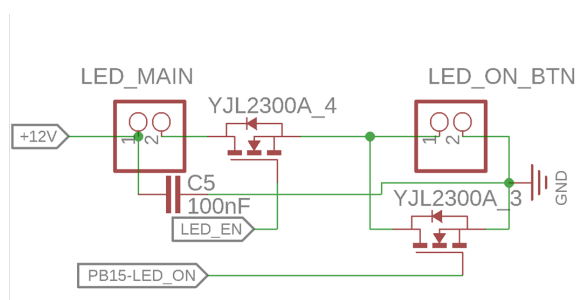
3.2.4 Ostatní prvky

Konfigurace systému zahrnuje zapojení dvou vibračních motorů s napájením 12V a odběrem 1.2A pro každý motor 3.29. Dále je integrován ovládací obvod pro osvětlení pomocí LED pásku s výkonem 12W/m, který je určen pro naprašovací box s napětím 12V a délkou 20cm 3.30, které odpovídá odběru 200mA.

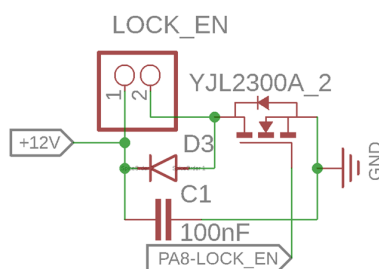
Systém také zahrnuje připravený obvod pro elektrický zámek u dveří z důvodu bezpečnosti 3.31, který však nebude osazen. Výrobce udává odběr 300mA pro napětí 12V. Pohyb trysky je zajišťován krokovým motorem Nema 17 s odběrem 1.5A, který byl zmíněn výše. Stejný motor je plánován i pro otevírání dveří.



Obr. 3.29: Návrh elektrického schématu pro Spreader G0-5-10 - Vibrační motory



Obr. 3.30: Návrh elektrického schématu pro Spreader G0-5-10 - LED páska



Obr. 3.31: Návrh elektrického schématu pro Spreader G0-5-10 - Elektrický zámek

3.2.5 Napájecí zdroj

Konfigurace systému zahrnuje následující komponenty s příslušnými odběry:

- HMI: Odběr 400mA.
- Tlakové senzory: Odběr 500mA.
- Řízení ventilů: Odběr 6.1A.
- Ostatní prvky: Odběr 5.9A.

Celkový odběr těchto komponent je 12.9A. Aby bylo zajištěno, že napájecí zdroj nebude poddimenzován, bylo rozhodnuto zvolit kapacitu o 20% vyšší než je celkový odběr, což zohledňuje i možné budoucí úpravy systému.

V důsledku toho byl zvolen jako napájecí zdroj model s parametry 12V a 180W.

3.3 Návrh pneumatických rozvodů

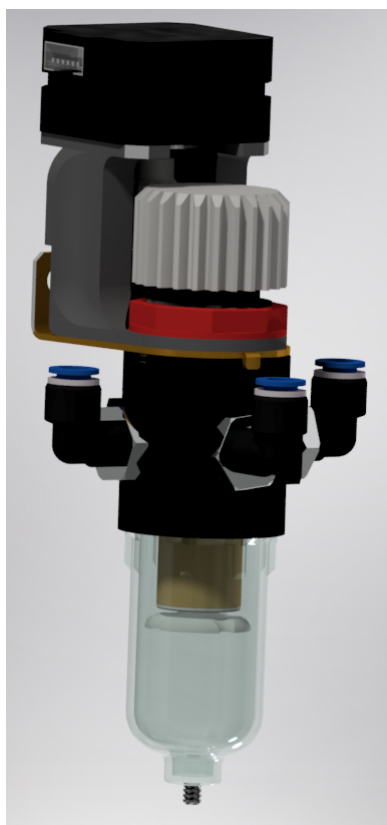
Při konstrukci pneumatických rozvodů je nutné zohlednit několik klíčových aspektů, z nichž jedním z nejvýznamnějších je kvalita vzduchu. Vzduch využívaný v pneumatických systémech musí být suchý a bez přítomnosti nečistot a olejů. Toto je zvláště důležité v situacích, kdy se manipuluje s jemnými prášky, jako je tomu v tomto případě. Tyto prášky, pokud zvlhnou, mohou rychle zanést rozvody. Navíc, nečistoty a oleje v systému mohou způsobit poškození komponent a snížit celkovou efektivitu a životnost systému.

Z tohoto důvodu je v každém okruhu instalován samostatný filtr a ty zajišťují, že vzduch vstupující do systému je co nejčistší. Tímto způsobem se minimalizuje riziko zanesení potrubí a také hladký a efektivní provoz pneumatického systému.

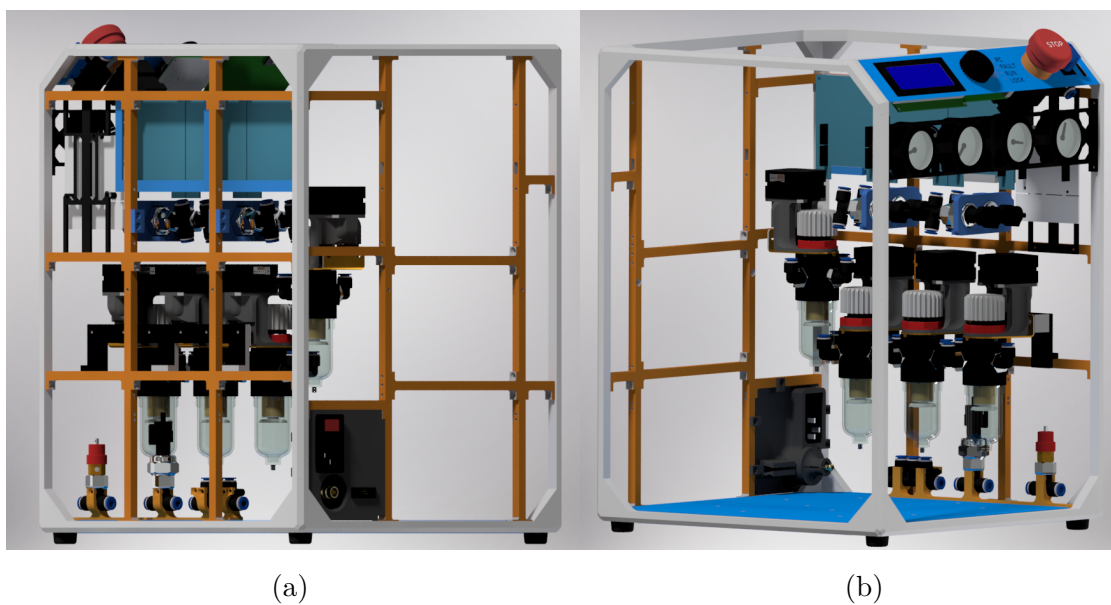
Do systému vstupuje stlačený vzduch přes rychlospojku podle bodu 1. písmena b) 2, dále systém obsahuje hlavní ruční uzavírací ventil na vstupu soustavy, následuje pojistný ventil nastavený na 6 barů společně s M553C barometrem, bod 4 písmena b) 2, který tak monitoruje celý systém. Při překročení povoleného tlaku, tj. 6 bar $\pm 1\%$, zařízení zobrazí na LCD chybovou hlášku a start zařízení není povolen.

Za pojistným ventilem je rozbočka pro čtyři proporcionální regulátory. Pro proporcionální regulaci průtoku vzduchu byly vybrány komponenty 1/4 odkapávač a vzduchový filtr značky REDUKTO. Tyto komponenty byly modifikovány tak, aby umožňovaly regulaci pomocí krokových motorů, jak je znázorněno na obrázku 3.32. Jak bylo uvedeno výše, nebyly zakoupeny průmyslově vyráběné regulátory, protože cena těchto ventilů se pohybuje kolem osmi tisíc korun. Vzhledem k tomu, že návrh počítá s použitím čtyř takových ventilů, nebylo by možné dodržet maximální rozpočet, tedy bod 5 písmena b) z 2.

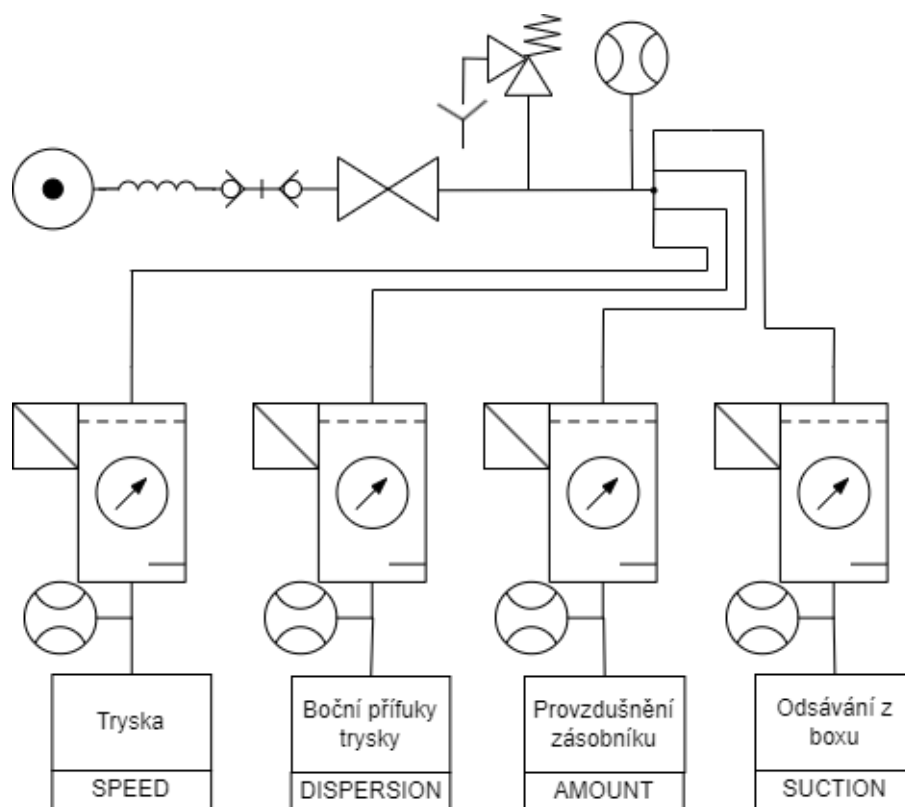
Pro ověření funkčnosti této metody by měl být tento systém dostačující, jelikož je řízen ve zpětné vazbě pomocí analogových barometrů. Každý z těchto okruhů má z čela tohoto zařízení napojený ukazatel tlaku viz 3.18, a další informace pro tyto ukazatele zmíněné v kapitole 3.1.3. Uchycení pneumatického okruhu je možné vidět na obr. 3.33 a schéma celého systému je možné vidět na obr. 3.34.



Obr. 3.32: Vizuální model návrhu regulátoru vzduchu



Obr. 3.33: Vizuální model návrhu rozmístění vzduchového okruhu. Perspektiva ze zadní pravé strany (a) a perspektiva z přední levé strany (b)



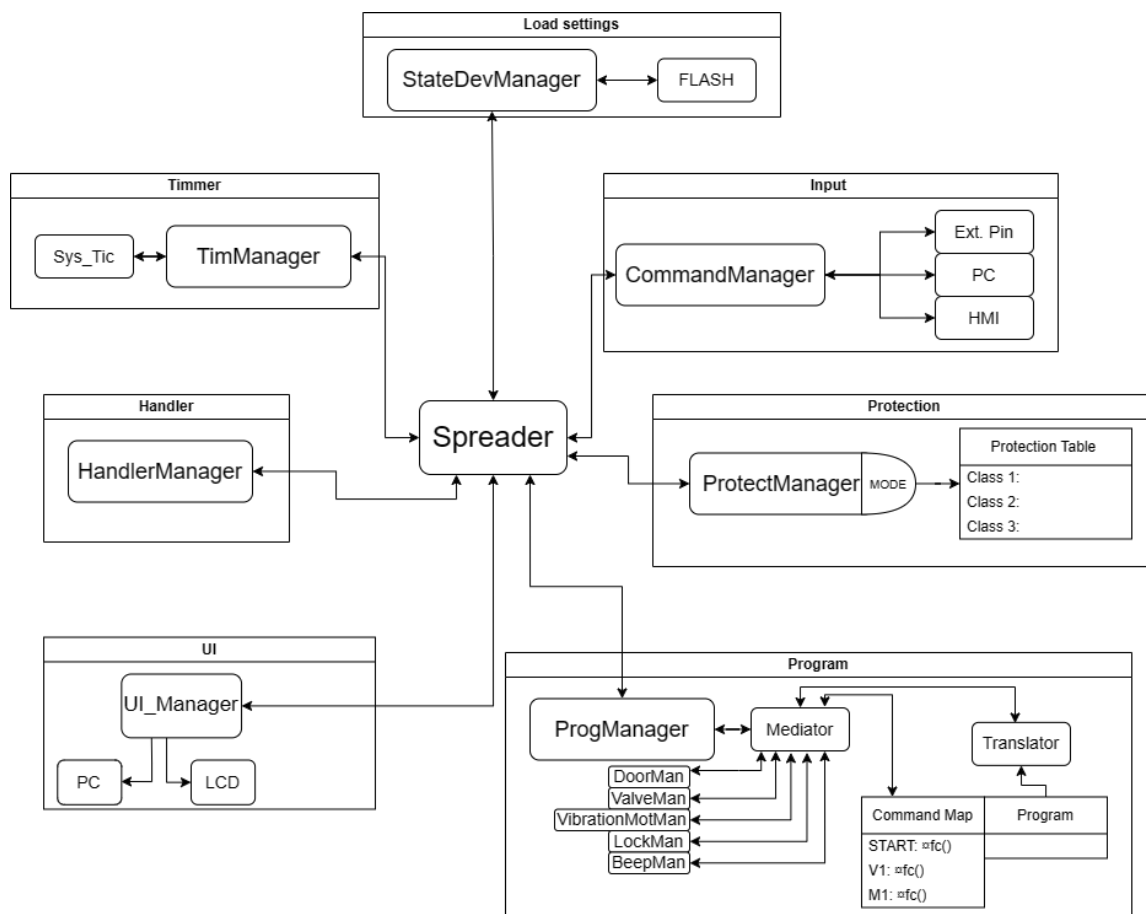
Obr. 3.34: Návrh pneumatického schématu pro Spreader G0-5-10

3.4 Návrh user interface(UI)

Uživatelské rozhraní je souhrn způsobů, jakými lidé ovlivňují chování strojů, zařízení či komplexních systémů. Jeho cílem je umožnit efektivní provoz a řízení stroje z lidské strany.

V této kapitole bude rozebrán návrh softwarového řešení, konstrukce včetně hardwaru byla již popsána v kapitolách 3.1.3 a 3.2.2.

Softwarová aplikace je navržena z hlediska architektury na sedmi základních modulech. Modul *Load settings* je primárně odpovědný za inicializační procedury. Modul *Timer* synchronizuje všechny časově závislé operace. Modul *Handler* je specificky navržen pro manipulaci se STOP tlačítkem resp. pro práci v nouzovém režimu. Modul *UI* poskytuje grafické uživatelské rozhraní pro interakci s uživatelem. Modul *Program* spravuje provoz spuštěného podprogramu a všechny související procesy. Modul *Protection* monitoruje a zabraňuje provádění operací, ke kterým není přístup nebo které nejsou z bezpečnostních důvodů povoleny. Poslední modul, *Input*, je zdrojem všech vstupních podnětů. Celkový koncept aplikace je vizualizován na obrázku 3.35.



Obr. 3.35: Koncept hlavních sedmi bloků programu

3.4.1 Stavový automat programu

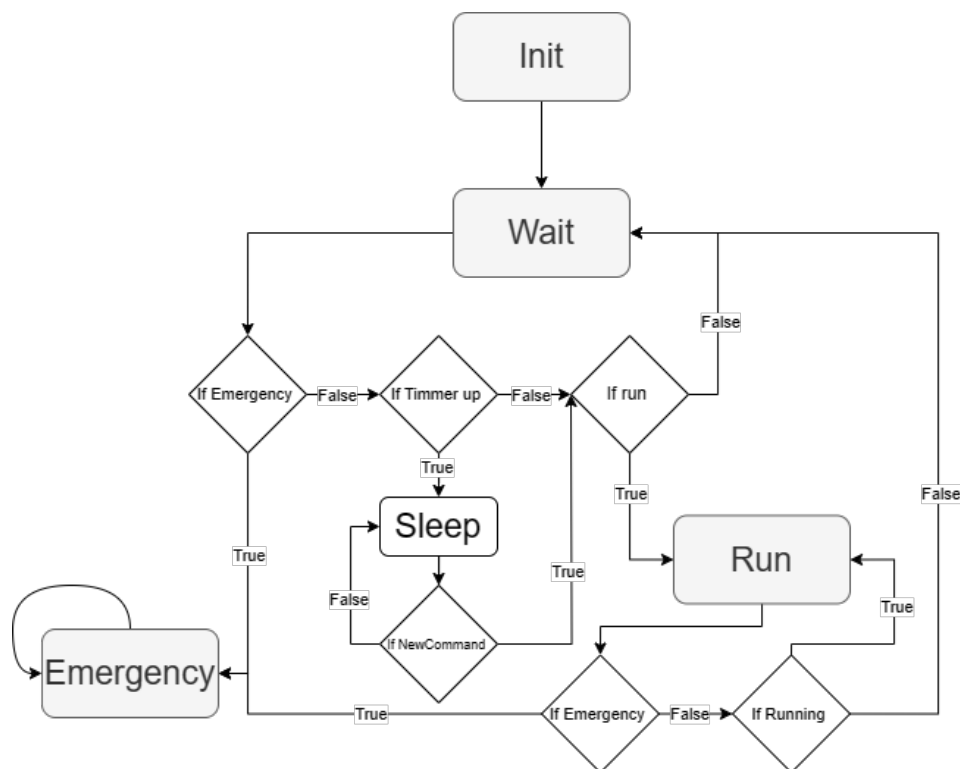
Dříve než budou rozebrány jednotlivé moduly, je uveden obecný přehled o fungování programu.

Po zapnutí zařízení tj. stav *Init* se inicializují hodnoty z flash paměti . Následně probíhá kontrola ventilů a tlaku v pneumatickém okruhu. Na základě zvoleného módu se pak zobrazuje buď varovná, chybová nebo pouze informativní hláška.

Zařízení může být ve čtyřech stavech. První stav je již zmíněný *Init*, druhý je *Wait*, kdy zařízení čeká na pokyn od uživatele. Pokud do určité doby nepřijde žádný pokyn, zařízení zvukovým signálem upozorní na svou dlouhodobou nečinnost. Do přijetí jakéhokoli příkazu zkontroluje a uvolní motory, jako jsou ventily a tryska.

Třetí stav se nazývá *Run*. Při přechodu mezi stavy *Wait* a *Run* proběhne kontrola oprávnění a funkčnosti, například zda existuje tlak v pneumatickém okruhu. Poté zařízení začne vykonávat uložený podprogram 3.4.3.

Čtvrtý stav, *Emergency*, může být aktivován kdykoli, ať už ve stavu *Wait* nebo *Run*. To může být buď stiskem tlačítka STOP nebo přijetím příslušného příkazu z modulu *Input*. V tomto stavu zařízení okamžitě ukončí veškeré úlohy, tj. ukončí podprogram, uzavře všechny ventily, a poté uvolní všechny motory ventilů. Následně je vyžadován tvrdý restart. Viz obr. 3.36.



Obr. 3.36: Koncept hlavní smyčky programu

V kontextu stavu *Init*, je klíčovým prvkem modul *Load settings*. Tento modul je konkrétně využit pro inicializaci manažerů jednotlivých modulů, které jsou implementovány jako singleton.

Následuje stav *Wait*, je využíván modul *Input*. Jeho úkolem je přijetí příkazů, které jsou poté zkontrolovány modulem *Protection* a v případě, že je to možné, jsou také provedeny.

Ve stavu *Run* je klíčovým modulem *Program*. Ten společně s modulem *Protection* vykonává uložený podprogram.

V případě nouzového stavu, označovaného jako *Emergency*, je využit modul *Handler*. Tento modul je speciálně určen pro řešení nouzových situací zařízení.

Moduly *Timmer* a *UI* fungují na pozadí aplikace, což znamená, že jsou aktivní bez ohledu na aktuální stav systému.

3.4.2 Podrobnější analýza implementace

Na začátku jsou stanoveny virtuální třídy, které lze identifikovat podle koncového velkého písmene V. Každá třída začíná velkým písmenem C_.

C_PinV, C_TimmerV, C_MemberOfMediatorV, C_HandlerV, C_ExtInterruptV, C_CommandV, C_LCD_V, C_IndicatorV a C_MemoryFlashV jsou třídy, které určují vlastnosti třídám, které je dědí, a umožňují tak práci na vyšší úrovni abstrakce.

C_PinV definuje základní vlastnosti pinu, jako jsou funkce setPin(), clrPin(), tglPin(), isPinSet() a isPinChanged(). Tato třída navíc dědí třídu C_TimmerV, která obsahuje funkci timLoopControl(), která umožňuje nastavit přerušování od časovače.

C_MemberOfMediatorV je předpisem pro objekty, které mají být ovladatelné přes podprogram. Tato třída obsahuje funkce jako setValue(), getValue(), setSetting(), getSetting(), isSetUp(), init(), update(), getStatus(), reset() a shutdown().

C_HandlerV obsahuje metodu inEmergencyDo(), která umožňuje všem objektům dědicům tuto třídu rozhodnout, co se stane, pokud se zařízení dostane do nouzového režimu.

C_ExtInterruptV je rozšířením pro hardwarové/fyzické piny, které mohou nastavit hardwarové přerušování na vzestupnou, sestupnou nebo obě hrany. Tato třída obsahuje metodu extInterrupt(en_ExtInt_WatchOn), která při vstupu do metody nese informaci o tom, která hrana ji vyvolala. Toto je užitečné v případě, že je zvoleno přerušování od obou hran, jinak lze tuto informaci ignorovat.

C_CommandV je předpisem pro třídy, které chtějí ovládat zařízení. Objekty dědící tuto třídu mají funkce isNewMessage() a en_Protect_Command_List readMessage(), které umožňují nastavit, že mají novou zprávu/command a v readMessage vrátí požadovanou instrukci z listu instrukcí.

C_LCD_V je předpisem pro volání dané instrukce/akce, která se má provést, pokud je provedena akce stisknutí na definovaném místě v menu (pozice LCD).

*funcCallAfterClick(param,*returnValue).

C_IndicatorV je předpisem pro indikátory, ať už světelné, zvukové nebo jiného typu. Mezi jeho funkce patří off(), on(value[0-100%]=100) a toggle().

Pro práci s FLASH pamětí je třída C_MemoryFlashV, ta má funkce

readMem(param,*adrToLoad,lenght) a writeMem(param,*adrFromLoad,lenght).

Vše viz obrázek 3.37 pro přehlednost.

C_TimmerV	C_HandlerV	C_CommandV	C_ExtInterruptV	C_IndicatorV
timLoopControl()	inEmergencyDo()	isNewMessageCom() en_Protect_Command_List readMessage()	extInterrupt(en_ExtInt_WatchOn)	off() on(value[0-100%]=100) toggle()

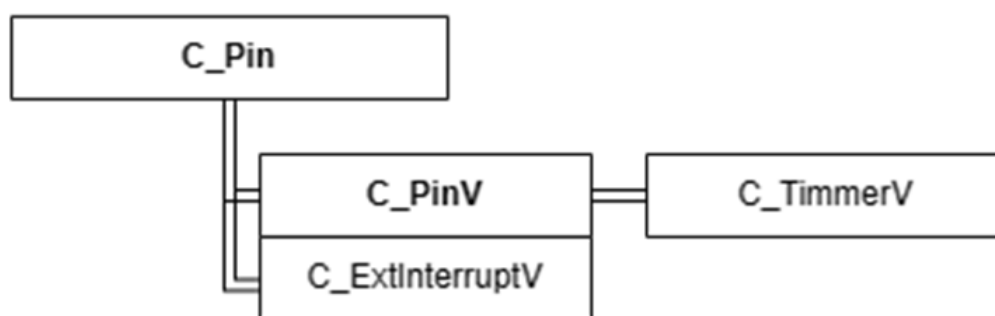
C_PinV	C_MemberOfMediatorV	C_MemoryFlashV	C_LCD_V
setPin() clrPin() tglPin() isPinSet() isPinChanged()	setValue(param, data) getValue(param, *data) setSetting(param, data) getSetting(param, *data) isSetUp() init() update(param) getStatus(*data) reset() shutDown()	readMem(param,*adrToLoad,lenght) writeMem(param,*adrFromLoad,lenght)	*funcCallAfterClick(param, *returnValue)

Obr. 3.37: Přehled virtuálních tříd/předpisů

Následují třídy určené pro řízení různých periférií a GPIO. Třída C_Timmer je použita pro časování úloh. C_SPI je třída určená pro ovládání driverů krokových motorů. C_USART je třída, která umožňuje spojení s PC. C_ADC_DMA je třída pro měření výstupu z barometrů. A nakonec, C_Pin je třída pro ovládání jednotlivých pinů. Tuto třídu využívají třídy C_SPI, C_USART a C_ADC_DMA pro své funkce. Pro více informací pro třídu C_Pin viz obrázek 3.39. Pro úplnost pak jednoduchá plná šipka znamená, že je třída členem dané třídy na kterou šipka ukazuje, čerchovaná šipka představuje jaký datový typ je třeba vložit do konstruktoru třídy na kterou šipka ukazuje. Rovnoběžné čáry spojující dvě třídy znamenají dědění, a to vždy pouze ve směru vzhůru doprava a doleva viz 3.38.

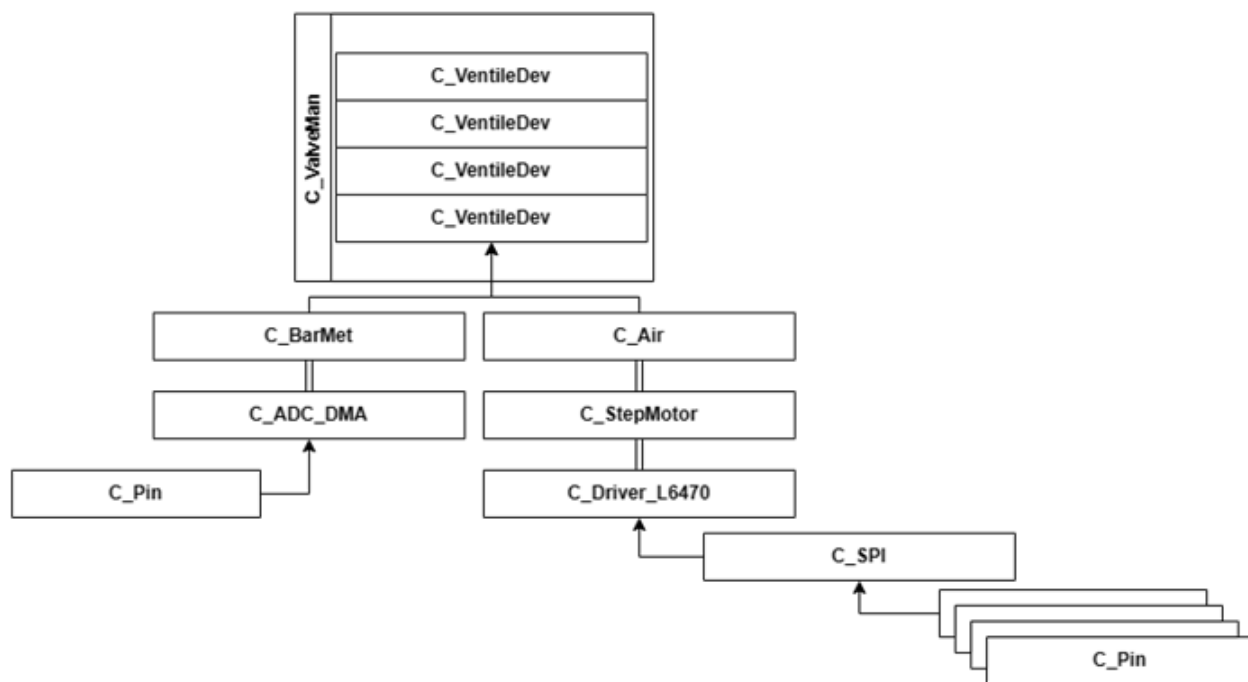


Obr. 3.38: Přehled spojovacích šipek a čar



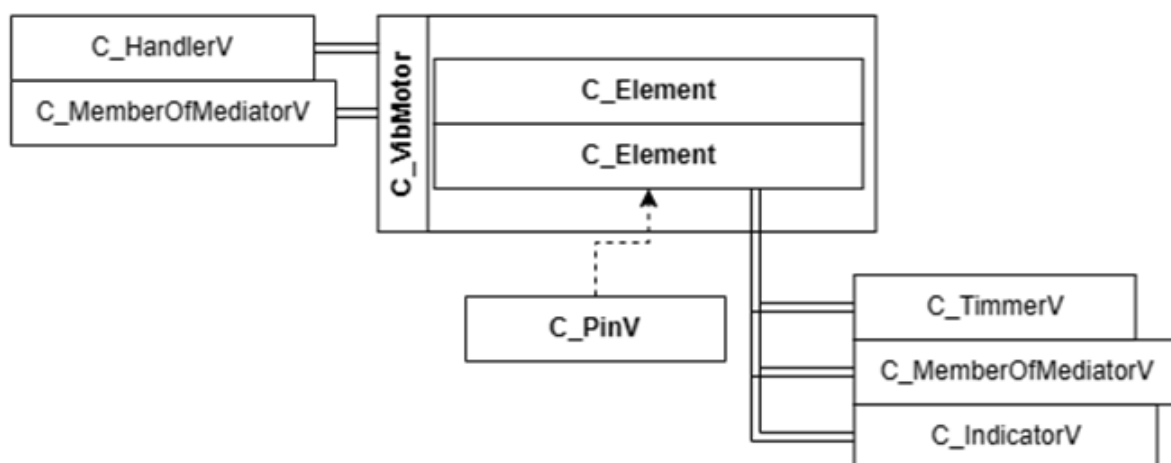
Obr. 3.39: Přehled třídy `C_Pin`

Z tohoto základu pak vznikají složitější celky, tedy jednotlivé komponenty. Těmi jsou třída pro ovládání driverů L6470 `C_Driver_L6470`, která v sobě využívá `C_SPI`, z této třídy poté vznikají objekty `C_StepMotor`, další nadstavbou této třídy je `C_Air`, pro řízení vzduchu. Dále vznikla `C_BarMeter` která využívá třídy `C_ADC_DMA`. Spojením těchto dvou tříd (vytvoření třídy s těmito instancemi) tedy `C_BarMeter` a `C_Air` vzniká `C_VentileDev`. Aby byl možný hromadný přístup, vzniká manažer ventilů `C_ValveMan`, ve kterém jsou vytvořené všechny čtyři ventily třídy `C_VentileDev` 3.40.



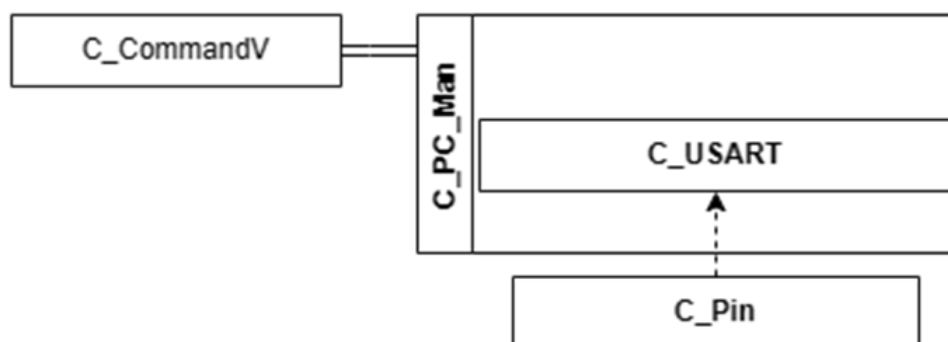
Obr. 3.40: Přehled třídy C_ValveDev

V rámci implementace je vytvořen objekt pro řízení vibračních motorů, který je označen jako C_VibMotor. Tento objekt dědí třídy C_HandlerV a C_MemberOfMediatorV. Řídicí mechanismus je vytvořen pomocí třídy C_Element, která dědí z tříd C_TimmerV, C_MemberOfMediatorV a C_IndicatorV. Třída C_Element v konstruktoru vyžaduje třídu C_PinV 3.41.



Obr. 3.41: Přehled třídy C_VibMotor

Deska Nucleo-G071RB je vybavena debuggerem, který slouží jako prostředník pro komunikaci s počítačem. Debugger umožňuje nahrávání a ladění programu prostřednictvím pinů TCK a TMS integrovaného obvodu G071RB. Tento obvod také podporuje zpětnou komunikaci přes USART, což znamená, že USART komunikuje s debuggerem, který následně pomocí USB komunikuje s počítačem. Byla vytvořena třída `C_PC_Man`, která využívá `C_USART` a je odvozena od třídy `C_CommandV` 3.42.

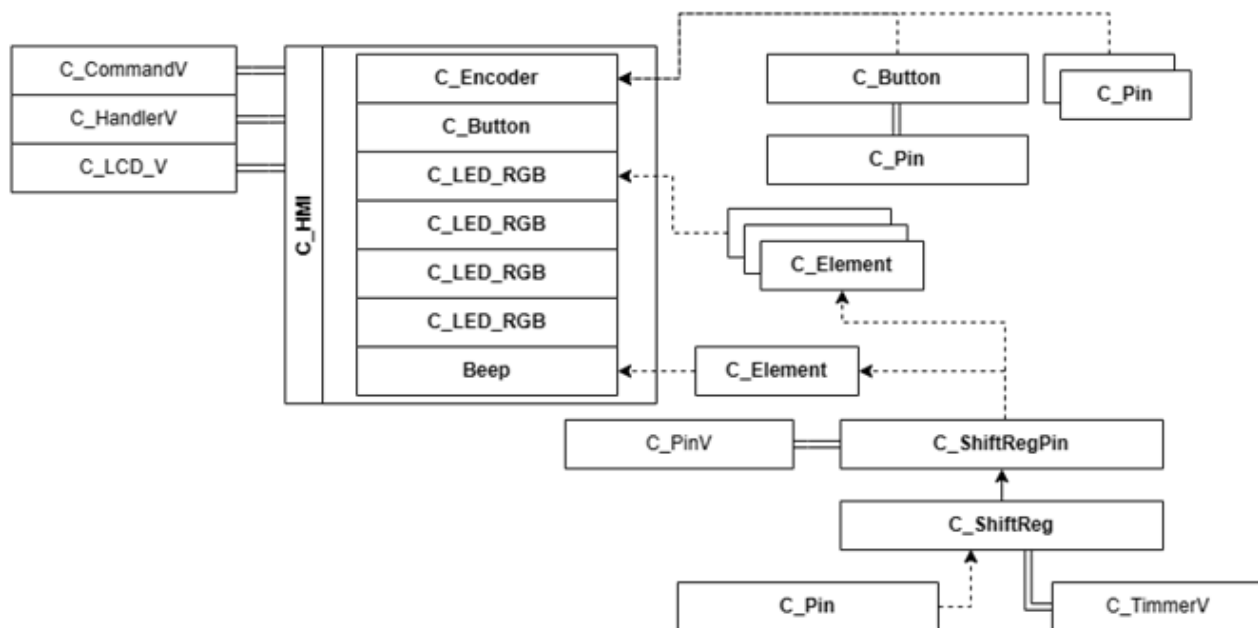


Obr. 3.42: Přehled třídy `C_PC_Man`

Následně je vytvořena třída `C_ShiftReg`, která dědí `C_TimmerV` a v konstruktoru vyžaduje třídu `C_Pin`. Pro možnost považovat registr za běžný pin a pracovat s ním jako s běžným pinem je vytvořena třída `C_ShiftRegPin`, která dědí z `C_PinV`. Práce s takovým pinem bude pomalejší, ale u těchto registrů není potřeba dbát na velké rychlosti, neboť jsou používány pro řízení LED diod, piezo reproduktoru a spínání LED pásů. I když bude potřeba proporcionální nastavení, lze dosáhnout požadovaných výsledků.

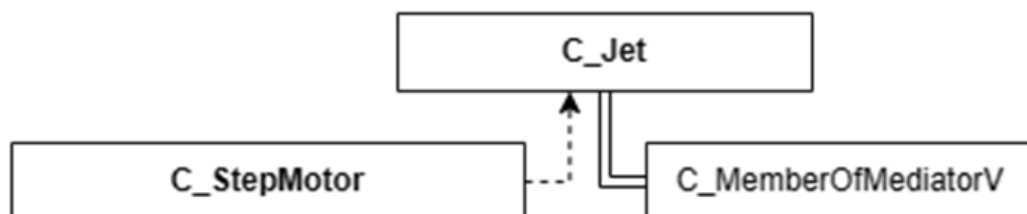
Pro větší abstrakci a snazší přístup je vytvořena třída `C_LED_RGB`, která v konstruktoru vyžaduje tři objekty `C_Element`.

Je vytvořena třída `C_Button`, která dědí `C_Pin`. Tuto třídu následně dědí `C_Encoder`, který v konstruktoru vyžaduje tři instance třídy `C_Pin`. Tyto objekty jsou využity při vytváření manažera třídy `C_HMI`, která dědí `C_CommandV`, `C_HandlerV` a `C_LCD_V` 3.43.



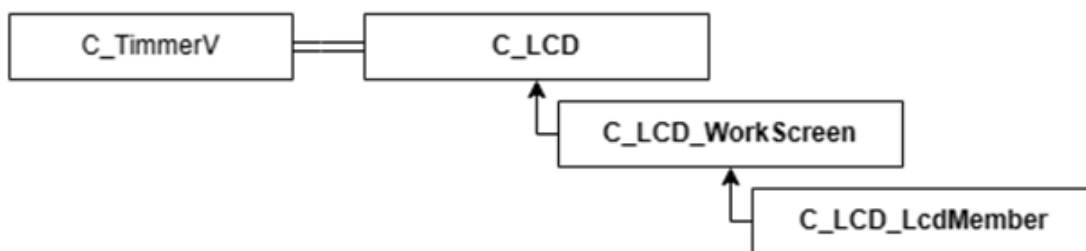
Obr. 3.43: Přehled třídy C_HMI

Dále je vytvořena třída pro trysku C_Jet, která dědí C_MemberOfMediator a v konstruktoru má C_StepMotor 3.44.



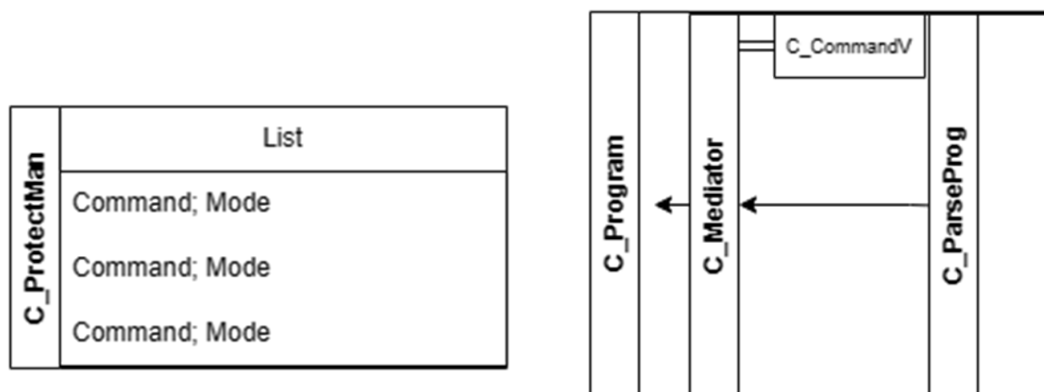
Obr. 3.44: Přehled třídy C_Jet

Je vytvořena třída C_LCD, která dědí C_TimmerV a současně s ní jsou definovány i třídy C_LCD_LcdMember a C_LCD_WorkScreen. Jedna pracovní plocha (WorkScreen) má x členů LcdMember, což znamená, že pracovní plocha je rozdělena na x částí a následně C_LCD může mít x členů pracovních ploch (WorkScreen). V tomto případě to jsou *Loading screen*, *Default*, *Run* a *Menu*, což je možné vidět na obr. 3.45 a 3.47.



Obr. 3.45: Přehled třídy C_LCD

V neposlední řadě jsou vytvořeny třídy nezávislé na HW, a to C_ProtectMan, která má tabulku možných příkazů a jejich podmíněné oprávnění k jejich vykonání. Dále C_ProgMan, který implementuje stavový automat pro řízení běhu programu a jeho editaci/vytvoření. Ve stavu vykonávání podprogramu využívá třídy C_Mediator, který přes třídu C_ParseProg, načítá jednotlivé příkazy a při správném oprávnění (módu) je vykonává 3.46.



Obr. 3.46: Přehled tříd C_Protection, C_ProgMan

Všechny třídy a vazby mezi nimi jsou graficky znázorněné v příloze B.1.

Je navrženo grafické rozhraní pro LCD displej, které je podrobně popsáno v jednotlivých krocích viz 3.47. Různé barvy podbarvení indikují různé módy přístupu: bílá barva označuje Default mód, modrá barva značí Advanced mód a zelená barva je přístupná v User módu. Šedě podbarvené nastavení mohou, ale nemusí být nezbytné, nebo mohou pouze ilustrovat možné rozšíření nastavitelných vlastností, které v současné době nebudou implementovány.

3.4.3 Podprogramy

Zařízení je možné konfigurovat a ovládat pomocí speciálních podprogramů, které jsou uloženy ve formě textových souborů s příponou *.spr. Tyto soubory obsahují instrukce pro ovládání zařízení, které jsou interpretovány prostřednictvím komponenty C_Mediator.

Třída C_Mediator je citlivá na velikost písmen, což znamená, že rozlišuje mezi velkými a malými písmeny. Pokud C_Mediator v tabulce registrovaných příkazů nenajde vyseparovaný příkaz ze souboru, považuje tento příkaz za neplatný a neprovede jej. To platí i v případě, že příkaz nalezne, ale aktuální mód neumožňuje daný příkaz vykonat. Každý příkaz musí být ukončen středníkem.

Struktura souboru .spr, soubor je imaginárně rozdělen na dvě části - inicializační a prováděcí. Inicializační část obsahuje obecná nastavení zařízení, například nastavení módu, nastavení režimu řízení atd. V druhé části tyto obecná nastavení není možné provádět a jsou ignorovány. Druhá část vždy musí začít příkazem "START;" a končit příkazem "STOP;", což umožňuje vytváření pouze inicializačních souborů. Program nepodporuje prohození částí, ani mít více než dvě části. Program však, jak bylo zmíněno, může mít pouze první část.

Každý program musí začínat "PROG:NAME:nameProg.spr;", to slouží k jeho identifikaci. Proto nesmí existovat více souborů se stejným názvem. Dále mohou následovat zmíněné obecné nastavení, například "DEV:SET:MODE:DEFAULT;" atd..

Pokud soubor má konat i úlohy, tedy není pouze inicializační, následuje příkaz "START;". Od této chvíle budou následující příkazy vkládány do fronty do chvíle, dokud se nenarazí na tzv. akční příkaz. Mezi tyto příkazy patří "SEND;" a "SENDandWAIT;".

V této části je také možné vytvářet cykly pomocí příkazu "WHILE:xxElement;" nebo jeho přetíženou verzi "WHILE:xxElement !=xxstateElement;", který je párovým příkazem a potřebuje "ENDWHILE;". Je možné využít až pět proměnných dedikovaných k tomuto účelu, které jsou typu uint16_t a jsou to "VAR1", "VAR2", "VAR3", "VAR4" a "VAR5". Tyto proměnné umí všechny základní operátory, jako například "VAR1-", "VAR1++", "VAR1=xx" atd..

Nastavení elementu, například pípnutí po dobu 100 ms, může vypadat následovně, "BEEP:SV:HOLD_ON:100;", nebo zakázání nastavení a regulace ventilu SPEED, "SPEED:SV:ENABLE:FALSE;".

Poté, co chceme dané příkazy vykonat, je nutné poslat příkaz "SEND;". V takovém případě začne povolovat/provádět jednotlivé příkazy, které jsou uloženy ve frontě, ale nečeká na jejich odpověď/odezvu. Pokud je třeba počkat, než se dané hodnoty nastaví nebo dané elementy uvedou do žádoucího stavu, namísto příkazu "SEND;" se využije příkaz "SENDandWAIT;". Pokud se nic nenastavuje, ale je

nutné počkat na nějaký příkaz, například externí událost, je možné využít příkazu "WAITfor:xx" nebo jeho přetíženou verzi "WAITfor:xx!=xx".

Příkaz "STOP;" ignoruje zda je fronta prázdná či nikoli, proto je nutné poslat příkaz "SEND;" nebo "SENDandWAIT;" před koncem programu.

Návrh podprogramu pro realizaci deseti kusů DUT je na 3.1.

Výpis 3.1: Návrh podprogramu pro realizaci 10 kusů DUT

<i>// Návrh podprogramu</i>	1
const static char testx[500] =	2
<i>// Ohlášení programu a nastavení módu na Advanced</i>	3
"PROG:NAME:Testx.spr;DEV:SET:MODE:ADVANCED;"	4
<i>// Vynulování kontroly ovládání zařízení a nastavení</i>	5
<i>// pouze na řízení ze zařízení</i>	6
"DEV:SET:CONTROL:NONE;DEV:SET:CONTROL:DEVICE;"	7
<i>// Začátek samotného podprogramu</i>	8
"START;"	9
<i>// Přednastavení</i>	10
"BEEP:SV:HOLD_ON:500;LED_STRIP:SV:ON;SEND;"	11
"AMOUNT:SV:12;VIB_MOT:SV:ON;SENDandWAIT;"	12
"AMOUNT:SV:9;BEEP:SV:HOLD_ON:1000;SENDandWAIT;"	13
<i>// Cyklus pro vyřízení 10 kusů DUT</i>	14
"WHILE:VAR1!=9;"	15
"SPEED:SV:800;SENDandWAIT;"	16
"SPEED:SV:600;SENDandWAIT;"	17
"JET:SV:GO_LEFT;SENDandWAIT;"	18
"SPEED:SV:OFF;SENDandWAIT;"	19
"JET:SV:GO_RIGHT;SENDandWAIT;"	20
<i>// Další kus je obsloužen až po stisku tlačítka</i>	21
"WAITfor:ENCODER_BTN!=PRESS;"	22
"VAR1++;"	23
"ENDWHILE;"	24
<i>// Ukončení všech procesů</i>	25
"AMOUNT:SV:OFF;DISPERSION:SV:OFF;SUCTION:SV:OFF;"	26
"VIB_MOT:SV:OFF;LED_STRIP:SV:OFF;SEND;"	27
<i>// Konec podprogramu</i>	28
"STOP;";	29

4 Konstrukce zařízení

Konstrukce se výrazněji neodchýlila od původního návrhu, s výjimkou toho, že vybraný typ vibračních motorů nevydržel v zapnutém stavu tak dlouho, jak bylo požadováno, a proto musely být nahrazeny. Nahrazení proběhlo pomocí silnějšího 12V vibračního motoru s odběrem 1.2A. Během konstrukce došlo také k menším úpravám tisknutých dílů, a to konkrétně v rozměrech (např. úprava závitů).

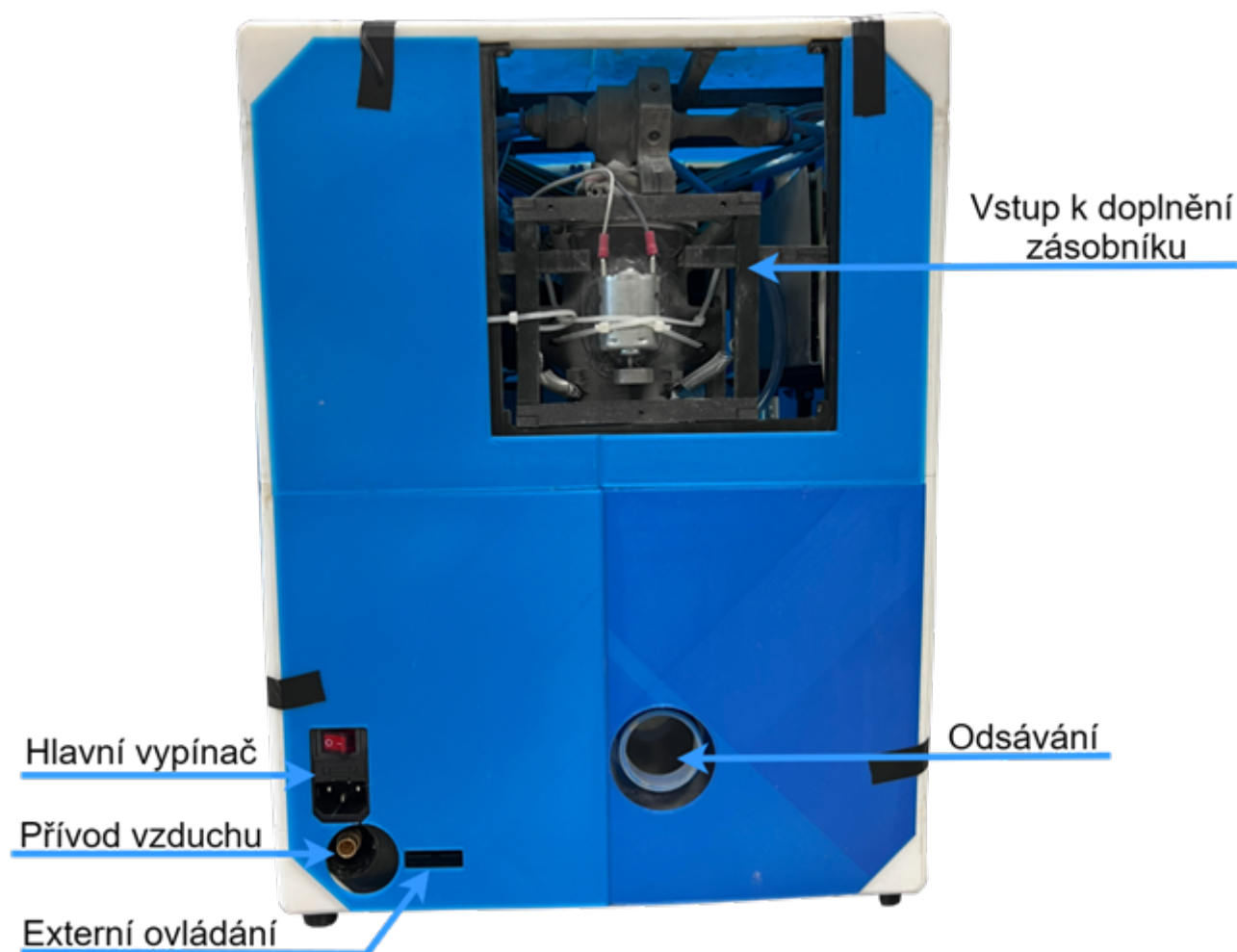
4.1 Vizualizace zařízení

Na přiložených obrázcích je zobrazeno celé zařízení, konkrétně z přední strany 4.1, kde je vidět finální podoba HMI, umístění tlačítka pro osvětlení boxu, umístění USB-C portu, dveře do boxu a zásuvka.



Obr. 4.1: Výsledek sestaveného zařízení - přední strana

Zadní strana zařízení 4.2 umožňuje přístup k zásobníku pro doplnění prášku. Dále se zde nachází vstup pro odsávání, vstupní napájecí zásuvka, vstupní přívod vzduchu a vstup pro externí ovládání.



Obr. 4.2: Výsledek sestaveného zařízení - strana zadní

Zařízení je z bočních stran, tj. z levé 4.3 a pravé 4.4 kompletně zakrytováno. Přiložené obrázky slouží pouze pro komplexní přehled o celém zařízení.



Obr. 4.3: Výsledek sestaveného zařízení - pohled zleva

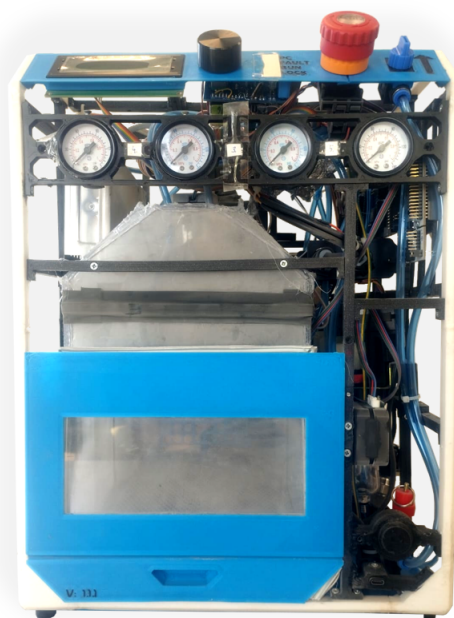


Obr. 4.4: Výsledek sestaveného zařízení - pohled zprava

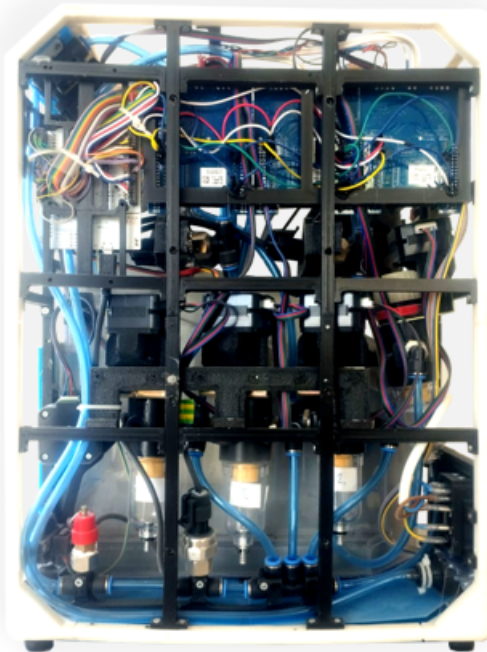
Na obrázcích níže 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 , 4.5 je možné vidět odkrytované zařízení. Umístění komponent odpovídá umístění v návrhu.



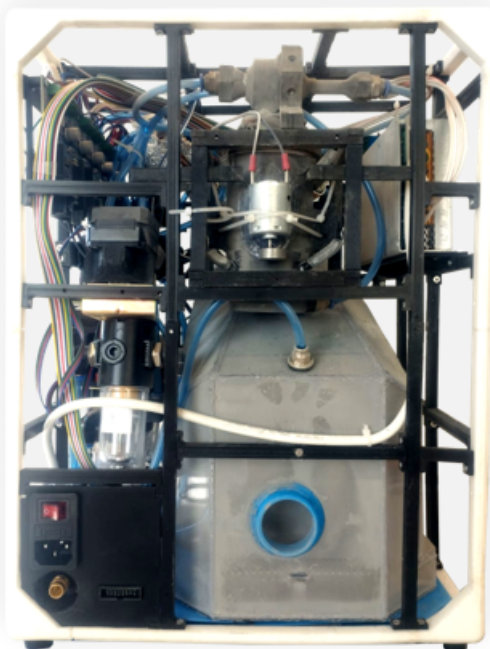
Obr. 4.5: Výsledek sestaveného zařízení - pohled do boxu



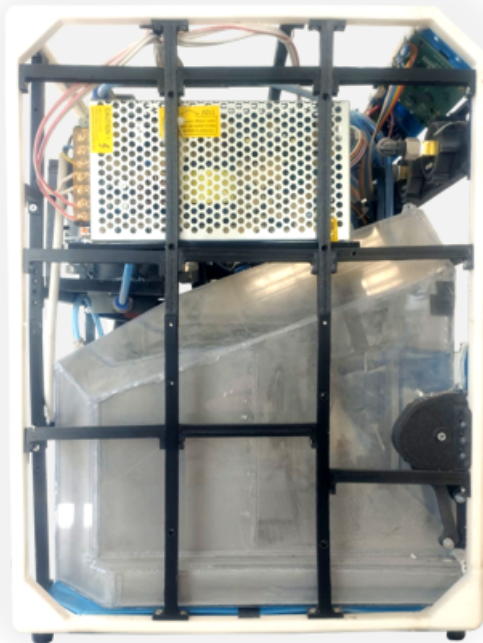
Obr. 4.6: Výsledek sestaveného zařízení - pohled zepředu



Obr. 4.7: Výsledek sestaveného zařízení - pohled zprava



Obr. 4.8: Výsledek sestaveného zařízení - pohled ze zadní strany



Obr. 4.9: Výsledek sestaveného zařízení - pohled zleva

4.2 Ověření funkčnosti

Během ověřovací fáze byl zásobník zařízení naplněn abrazivním práškem s označením 500. Tryska byla od povrchu nastavena na 20 cm. Pro analýzu výsledků byl spuštěn podprogram, jak je uvedeno ve výpisu kódu. 4.1 Hodnoty tohoto nastavení byly určeny experimentálně.

Výpis 4.1: Podprogram pro ověření funkčnosti zařízení

<code>// Podprogram Test1.spr</code>	1
<code>const static char testx[500] =</code>	2
<code> // Ohlášení programu a nastavení módu na Advanced</code>	3
<code>"PROG:NAME:Testx.spr;MODE:ADVANCED;"</code>	4
<code> // Vynulování kontroly ovládání zařízení a nastavení</code>	5
<code> // pouze na řízení ze zařízení</code>	6
<code> "CONTROL:NONE;CONTROL:DEVICE;"</code>	7
<code> // Začátek samotného podprogramu</code>	8
<code>"START;"</code>	9
<code> "BEEP:HOLD_FOR:500;LED_STRIP:ON;"</code>	10
<code> "JET:SPEED:10;SEND;"</code>	11
<code> "AMOUNT:VALUE:12;VIB_MOT:ON;SENDandWAIT;"</code>	12
<code> "AMOUNT:VALUE:9;BEEP:HOLD_FOR:1000;SENDandWAIT;"</code>	13

"SPEED:VALUE:1300;SENDandWAIT;"	14
"SPEED:VALUE:600;SENDandWAIT;"	15
"JET:POS:LEFT;SENDandWAIT;"	16
"SPEED:VALUE:0;SENDandWAIT;"	17
"JET:RIGHT;SENDandWAIT;"	18
<i>// Ukončení všech procesů</i>	19
"AMOUNT:VALUE:0;"	20
"VIB_MOT:OFF;LED_STRIP:OFF;SEND;"	21
<i>// Vrácení zařízení do původního nastavení</i>	22
"MODE:RETURN;"	23
"CONTROL:RETURN;SEND;"	24
<i>//Konec podprogramu</i>	25
"STOP;"	26

Zařízení je nejprve nastaveno do režimu Advanced, což umožňuje přístup k nastavení na nižší úrovni oprávnění. Následně je zařízení konfigurováno tak, aby během procesu bylo ovládáno výhradně tímto zařízením (DEVICE). Po této konfiguraci je spuštěn samotný podprogram.

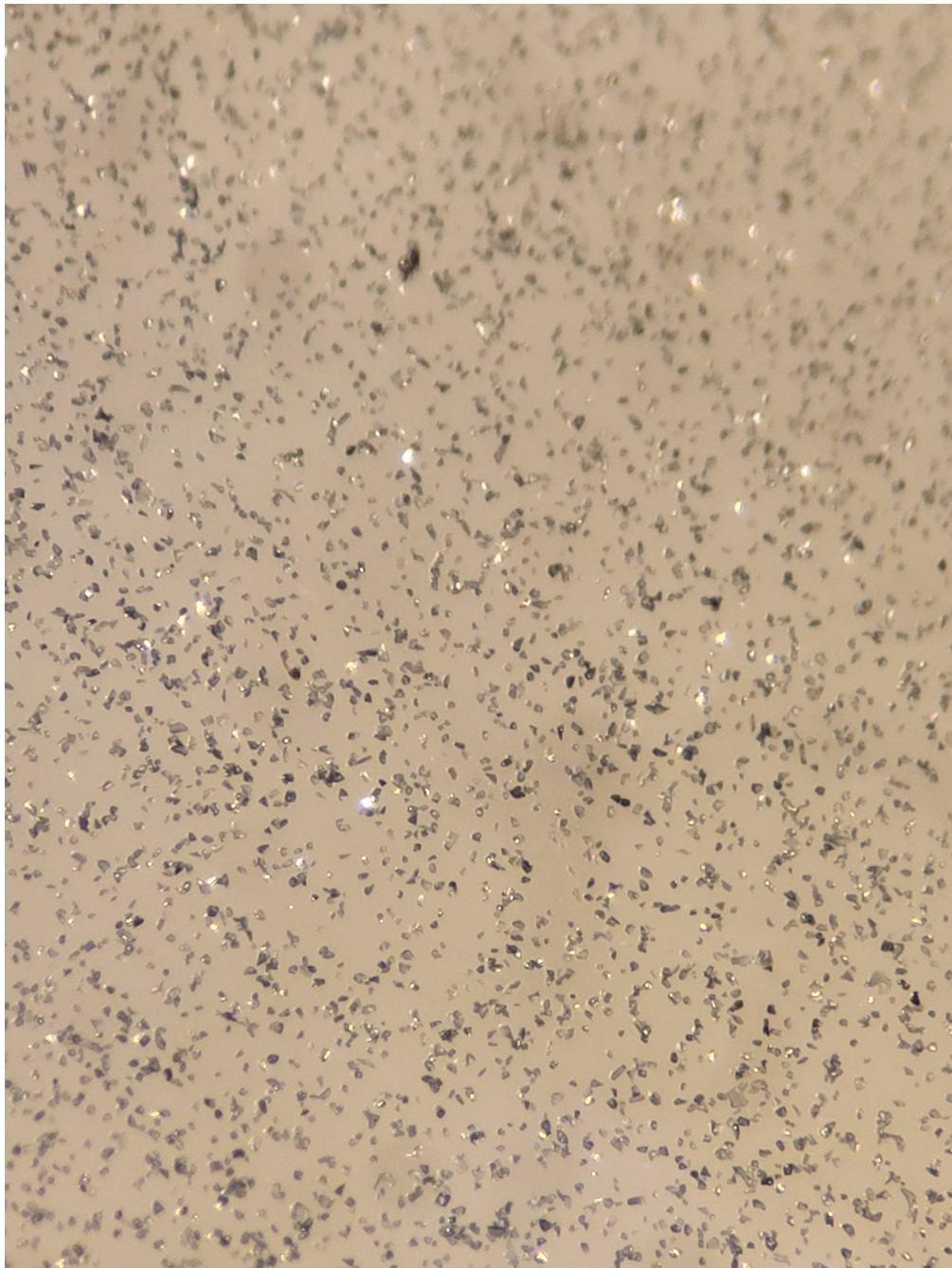
Zařízení poté vydá zvukový signál, rozsvítí LED diody v boxu a nastaví rychlost otáčení trysky. Následuje malý překmit v nastavení množství (AMOUNT), což umožňuje, aby prášek nanesený na provzdušňovací desku mohl být odstraněn z provzdušňovacích otvorů a vzduch tak mohl rovnoměrně proudit do zásobníku. Současně je spuštěn vibrační motor.

Po ustálení zařízení je opět vydán zvukový signál a začne se nastavovat rychlost trysky (SPEED). Opět je zde překmit, který slouží k odstranění usedlého prášku v obvodu. Jakmile je i tato hodnota ustálena, tryska se pootočí zprava doleva. Při dosažení levé strany je tryska (SPEED) vypnuta a pootočena zpět na pravou stranu.

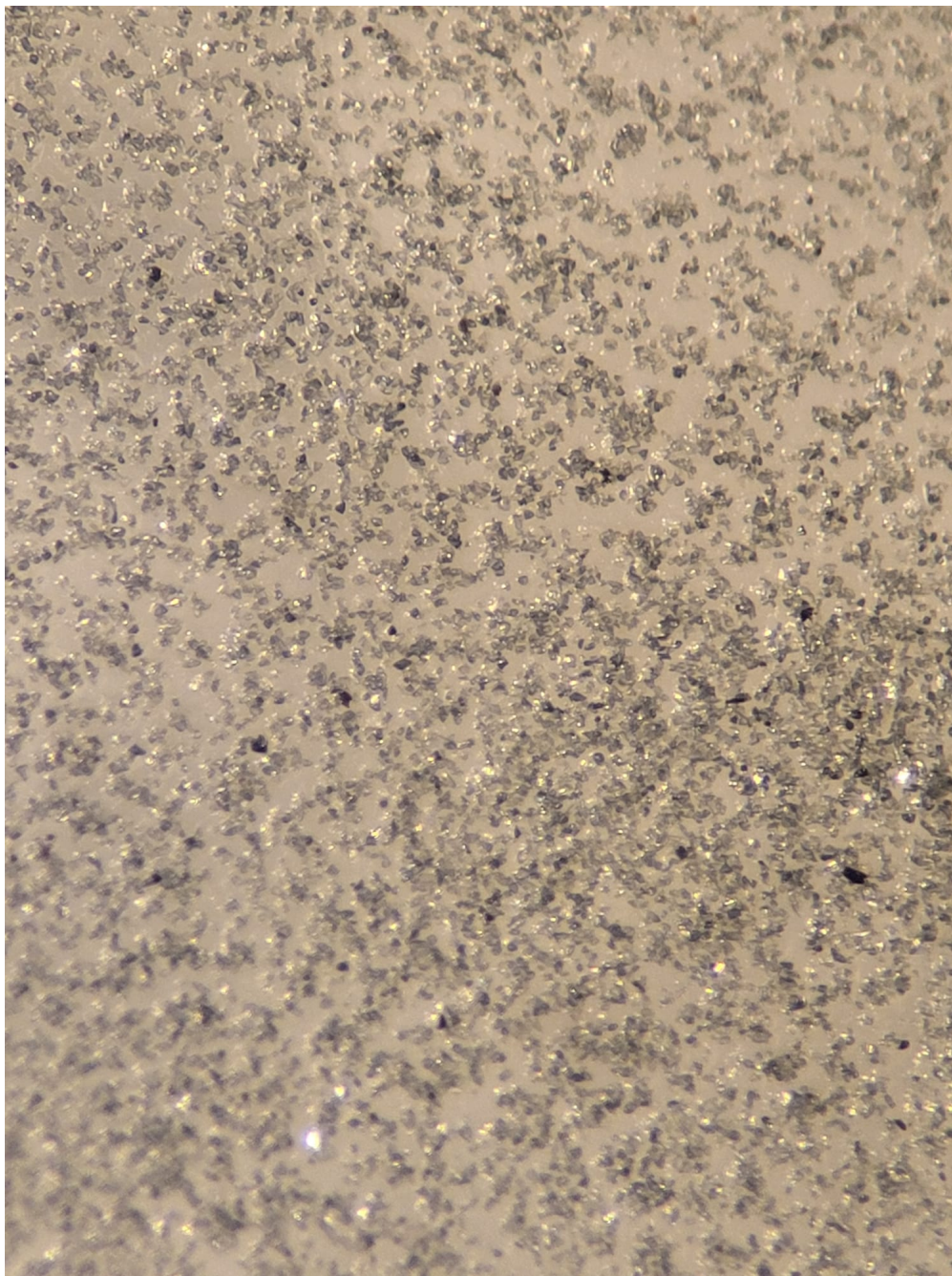
Po tomto úkonu jsou všechny prvky postupně vypínány, tedy AMOUNT, vibrační motor, LED diody v boxu, a zařízení se vrátí do původního nastavení, jako bylo před zahájením tohoto podprogramu.

Poslední příkazy jsou změnou oproti původnímu návrhu a tedy pravidlo, že není možné nastavovat zařízení (obecná nastavení) mezi příkazy "START;" a "STOP;", je změněno tak, že není možné nastavovat zařízení, ale je možné volat příkazy končící "*RETURN;". Toto umožňuje vrátit zařízení do původního nastavení, aniž by bylo nutné si ukládat celé původní nastavení.

Během testování zařízení byly získány následující výsledky. Obr. 4.10 a 4.11.



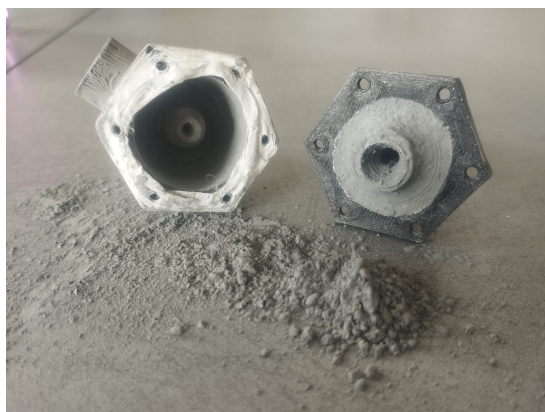
Obr. 4.10: Výsledek naprašování abrazivního prášku - podklad:jar



Obr. 4.11: Výsledek naprašování abrazivního prášku - podklad:tekuté mýdlo

Obrázky 4.10 a 4.11 byly pořízeny s nastavením zvětšení 4,5x. Z analýzy je zřejmé, že při aplikaci na skleněný substrát s pastou (jar) nejsou na DUT oblasti s vyšší koncentrací. Naopak u pasty z tekutého mýdla, kde se nepodařilo substrát rovnoměrně natříť, je patrná vyšší koncentrace prášku v místě většího množství pasty. Toto naznačuje, že rovnoměrnost nanašení je silně ovlivněna vlastnostmi pasty a homogenitou vrstvy na substrátu.

Na základě výsledků testování je možné dosáhnout rovnoměrného nanesení povlaků. Proto je doporučeno upravit zařízení, konkrétně nahradit některé plastové díly, již zmíněné v 3.1.2, za kovové. Po testování byl zásobník demontován, jak je vidět na obrázku 4.12. Prášek na obrázku (a) je zbytkový/usazený a musel být odstraněn mechanicky.



(a)



(b)

Obr. 4.12: Rozebraný ejektor zásobníku (a) a pohled ze dna zásobníku do zásobníku (b)

Během testů byly také identifikovány limity krokových motorů na ventilech. Pro dosavadní experimenty byly dostatečné, avšak při testování správného chodu na celém rozsahu 0-6bar nejsou dostatečně silné, aby plně otevřely ventily. Je tedy možné motory nahradit za silnější, nebo zvolit jiný převod.

Doba odbavení jednoho kusu DUT je přibližně deset sekund, včetně umístění a odebrání DUT. Pro zrychlení procesu je možné přidat do cesty trysky SPEED ventil OFF/ON a v případě většího počtu vyráběných kusů takto spínat pouze tento okruh a zbytek ponechat v běhu.

Více informací o zařízení je možné najít v manuálu, který je součástí přílohy.

Závěr

Hlavním cílem bakalářské práce bylo navrhnout, realizovat a ověřit funkčnost poloautomatického zařízení pro nanášení práškových materiálů. Teoretická část práce poskytla přehled současných metod nanášení prášků a identifikovala klíčové technické a konstrukční požadavky na nové zařízení.

Druhá část, nazvaná "Kritériová analýza", dále specifikovala požadavky na zařízení, včetně technických specifikací a cenových limitů. Detailněji byly prozkoumány požadavky na metodu nanášení prášku, zahrnující rovnoměrné rozprašování a vlastnosti zrn. Také byly stanoveny požadavky na vlastnosti samotného zařízení a regulaci vzduchu/nanášení.

Následně byl proveden návrh konstrukce zařízení, zahrnující detailní plány jak pro mechanické prvky, tak i pro elektrický a pneumatický rozvod. Konstrukce byla pečlivě navržena tak, aby splňovala požadavky na regulaci vzduchu, nastavení trysky a množství nanášeného prášku. Součástí návrhu byl také návrh softwaru pro řízení zařízení, což zahrnovalo implementaci algoritmů pro efektivní a spolehlivé nanášení prášku na povrch. Tento komplexní návrh umožnil přesné a spolehlivé fungování zařízení během experimentů a ověření jeho funkčnosti.

Realizace tohoto návrhu a ověření funkčnosti zařízení tvořila třetí část práce. Zde byly implementovány navržené mechanismy a provedeny experimenty k ověření schopnosti zařízení dosáhnout požadovaného rozložení práškových materiálů na povrchu.

V závěrečné části byly prezentovány výsledky experimentů a jejich zhodnocení. Získané výsledky potvrdily schopnost zařízení dosáhnout požadovaného rozložení prášku na povrchu. Na základě těchto výsledků byla navržena některá vylepšení, jako je například použití pevnějšího materiálu namísto plastu, čímž by došlo ke snížení možnosti zanesení rozvodů vzduchu adhezivním práškem. Dále zvýšení tlaku vzduchu pro lepší kontrolu nanášení prášku a možnost přidání off/on ventilu pro rychlejší odbavování. Tyto úpravy by mohly výrazně zlepšit spolehlivost a výkon zařízení v praxi.

Během experimentů byla také měřena doba potřebná k odbavení jednoho DUT. Průměrná doba odbavení jednoho DUT činila 10 sekund. Náklady spojené s konstrukcí činí 16.294,66 Kč.

Celkově lze tedy konstatovat, že navržené zařízení splnilo klíčové technické požadavky a úspěšně dosáhlo požadovaného rozložení práškových materiálů. Jsou zde však stále oblasti, ve kterých lze provést další vylepšení pro dosažení ještě lepších výsledků.

Literatura

- [1] LIZÚCH, J. *Návrh fluidizačního zařízení pro pouzdření* [online]. [cit. 2023-10-29]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. 2022.
- [2] PAŽOUREK, J. *Cyklonový odlučovač pro velmi malé částice* [online]. [cit. 2023-10-29]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. 2020.
- [3] *Surface and coatings technology*. 1986. ISBN 0257-8972.
- [4] KREIBICH, Viktor. *Povrchové úpravy*. ČVUT, 1981.
- [5] KUCHAR, Jiří; KREIBICH, Viktor; TLÁSKAL, Filip. *VLIV PŘEDÚPRAVY POVRCHU A RIZIKA VZNIKU KOROZE A DELAMINACE POVLAKŮ Z PRÁŠKOVÝCH PLASTŮ THE EFFECT OF PRE-TREATMENT OF THE SURFACE AND THE RISK OF CORROSION AND DELAMINATION OF POWDER PLASTIC COATINGS. ŘÍZENÍ RIZIK PROCESŮ, ZAŘÍZENÍ A SLOŽITÝCH TECHNICKÝCH DĚL ZACÍLENÉ NA BEZPEČNOST*, 97.
- [6] ANONYM. *Detailní diagram pískovací pistole*, 2024. URL = <https://obchod.piskovacka.cz/tryskaci-pistole-educt-o-matic/>
- [7] ANONYM. *Žárové nástríky*, 2024. URL = <https://www.plasmametal.cz/pouzite-technologie>
- [8] KREIBICH, Viktor. *Povrchové úpravy*. ČVUT, 1981. URL = https://www.kreibichpovrchy.cz/?page_id=277
- [9] ANONYM. *Teoretický model elektrostatické nanášení*, 2024. URL = <https://www.bing.com/images/search?q=imgurl%3ahttps%3a%2f%2fwww.kremtech.cz%2fdata>

Seznam příloh

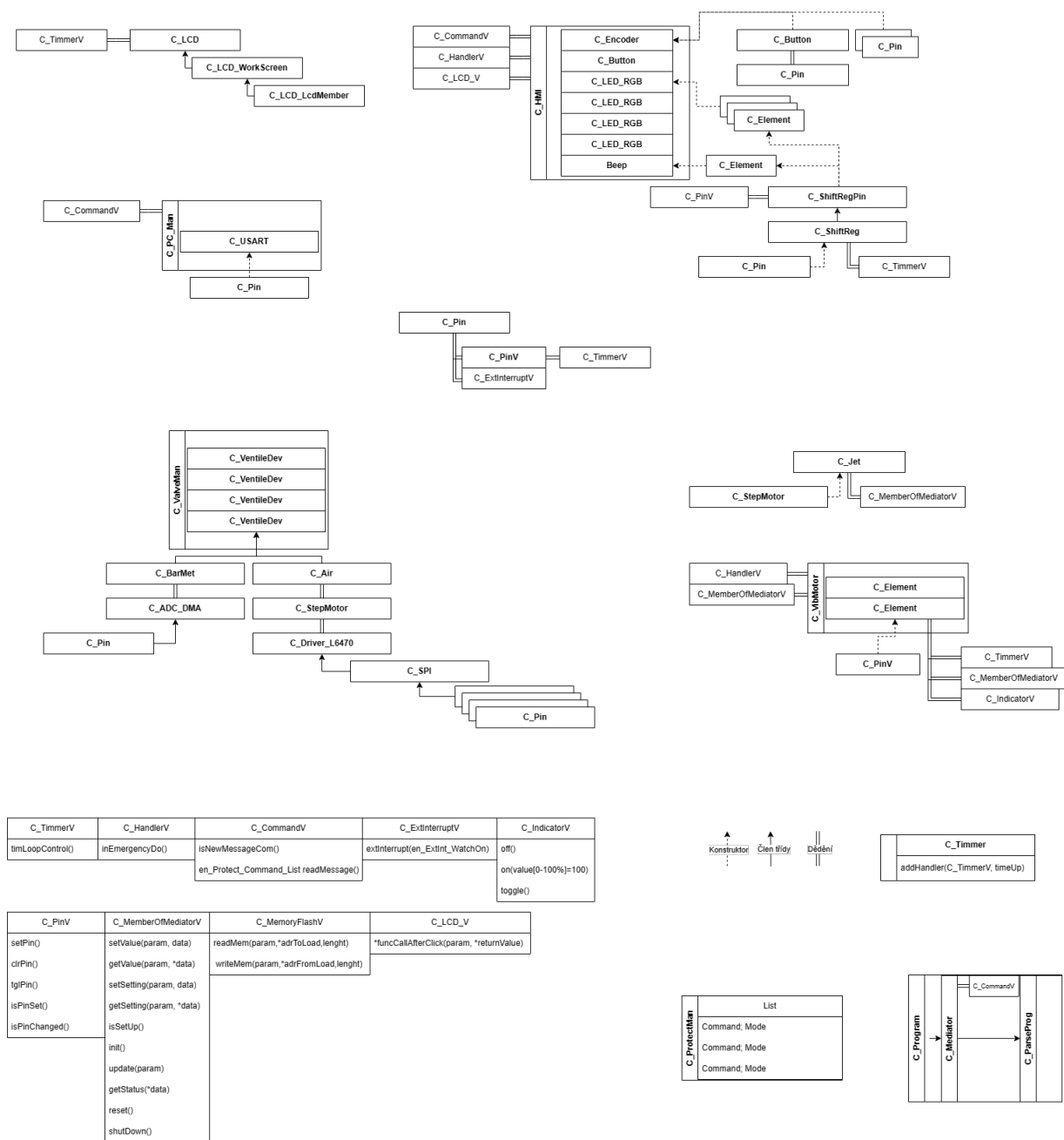
A Příloha č.1	78
B Příloha č.2	79
C Příloha č.3	80

A Příloha č.1

	Položka	Cena za ks bez DPH	Počet ks	Cena bez DPH	Cena s DPH
1	Kabely	169.85	1	169.85	215.00
2	Spojovací materiál	878.00	1	878.00	1062.38
3	Filament 1 kg	552.21	5	2761.05	3340.87
4	Polystyrenové sklo 0,5x0,5 m	196.71	1	196.71	249.00
5	Polystyrenové sklo 1x0,5 m	394.21	1	394.21	499.00
6	Alu tahakov 250x500 mm	519.03	1	519.03	657.00
7	Nema 17 42 stepper motor 23mm 0.42N.m 1.5A for step motor 4023	91.64	6	549.84	696.00
8	1/4 ODKAPÁVAČ VZDUCHOVÝ FILTR REGULÁTOR REDUKTO	195.92	4	783.68	992.00
9	Tlakový senzor 0-1MPa, závit G1/4	387.10	1	387.10	490.00
10	Tlakový senzor 0-0,5MPa, závit G1/4	418.70	4	1674.80	2120.00
11	Uzavírací ventil bez odvětrání 6 mm	191.18	1	191.18	242.00
12	Pojistný přetlakový ventil 1/4" G , nastavitelný 8-12bar , červený	87.00	1	87.00	105.00
13	Hadicová vsuvka DN 7,2 - trn 6 mm	22.31	1	22.31	27.00
14	T-spojka vnitřní závit 6 - G1/4"	98.00	4	392.00	472.00
15	L-spojka 6 - G1/8"	52.93	4	211.72	268.00
16	L-spojka vnitřní 6 - G1/8"	79.00	4	316.00	400.00
17	L-spojka 6 - G1/4"	75.84	8	606.72	768.00
18	Rozdělovací spojka 6	73.47	1	73.47	93.00
19	Přímé šroubení 6 - G1/4"	52.93	4	211.72	268.00
20	USB Type C Female To Micro USB Male Converter Type-C Micro USB	13.98	1	13.98	17.69
21	NUCLEO-G071RB	193.58	1	193.58	245.04
22	X-NUCLEO-IHM02A1	281.18	3	843.53	1067.76
23	Propojovací hadice 5 m	22.91	5	114.55	145.00
24	LM7805MP/NOPB	30.72	1	30.72	38.88
25	Koloreno LED zdroj 12 V 180 W 15A IP20	173.01	1	173.01	219.00
26	Nouzové tlačítko s aretací NYG3-ETR červené	144.57	1	144.57	183.00
27	SD1614T5-B5ME	41.14	1	41.14	52.08
28	LCD2004 IIC/I2C LCD Display Monitor 2004 20X4 5V Character	130.69	1	130.69	165.43
29	TZT 10pcs 5mm RGB LED Common Tri-Color	23.76	1	23.76	30.07
30	Shift register 74HC595D	16.57	2	33.15	41.96
31	With 10A Fuse! Red Rocker Switch Fused IEC320 C14	27.29	1	27.29	34.54
32	Vibrační motor	110.60	2	221.20	280.00
33	10 PCS Micro Switch 2/3Pin NO/NC Mini Limit Switch 5A 250VAC	38.05	1	38.05	48.17
34	10Pcs 20 Position 360 Degree Rotary Encoder EC11 w Push Button	71.10	1	71.10	90.00
35	DC6V DC12V DC24V small electromagnetic lock storage cabinets	179.50	1	179.50	227.22
36	IRLML2402TRPBF	6.53	5	32.63	41.30
37	TXS0108EPWR	26.92	1	26.92	34.08
38	DPS -Spreader V:1.1.1	58.33	5	291.66	369.19
	Celkem			13057.41	CZK 16,294.66

Obr. A.1: Tabulka položek

B Příloha č.2



Obr. B.1: Návrh softwarového řešení programu

C Příloha č.3

User & reference manual

SPREADER GO-5-10

Introduction:

The G0-5-10 spreader was developed as a bachelor thesis. This device is used for semi-automatic deposition of conformal coatings of exceptionally fine powders.

List Update:

1.2. 2024 – Created manual -> Version 1.1.1.

Important:

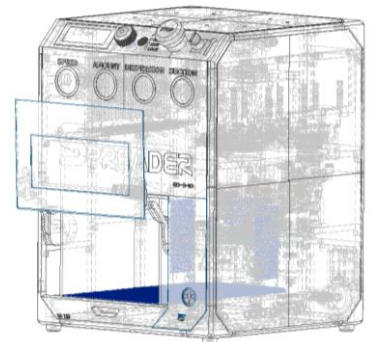
For programming the device, it is necessary to know the operating instructions, for operation it is enough to know the device connection and its control (mode Default).

What's new:

-

Peripheral and function overview

- **Program switching**
- **Automatic valve calibration**
- **Three-mode operation capability**
- **Pressure accuracy setting**
- **Minimum or maximum pressure setting**
- **Minimum or maximum nozzle rotation speed setting**
- **Help function**
- **Multi-control device**



Contents

1	About device	3
2	Connect device	5
3	Device control	5
3.1	Control via HMI:	5
3.1.1	Graphic layout	5
3.2	Control via PC:.....	6
3.3	Control via external signals:.....	13
4	Device mode	13
4.1	Default.....	13
4.2	Advanced	13
4.3	User	13
5	Device programming.....	13
5.1	Upload program to device.....	13
5.2	Create program file	13
5.3	Rules for creating	14
5.3.1	Execution Subroutines	14
5.3.2	Command START & STOP and Action Commands.....	14
5.3.3	Waiting for Events and Conditions	14
5.3.4	Loops and Variables	14
5.3.5	Structure of the sub-programme	14
5.3.6	List of command	15
5.3.7	Examples.....	18

1 About device

The device must be placed on **anti-vibration pads** to ensure a stable position on a **flat surface**. At the same time, an **external extraction system** connected to the device must be provided during the operating cycle. The Spreader is a highly compact component designed for use in **Industry 4.0** environments. Its integration into existing systems is quick and easy, with minimal space requirements.

General information about the device.

Dimensions(x,y,z):	320X320X430 mm
Weight:	12.8 kg
Maximum size of DUT:	100X100 mm
Speed of check-in:	10 s (average)
Number of DUTs per tank filling:	100 pc
Tank volume:	200 ml
Source voltage	230V AC
Operating voltage:	12 V
Maximum pressure:	6 bar
Minimum pressure:	2 bar
Minimum operating temperature:	15 °C
Maximum operating temperature	30 °C
Accuracy of set values:	±1%
Support:	All version this device
Size of powder to be applied:	500-1000 (powder materials based on Al ₂ O ₃ and SiC)

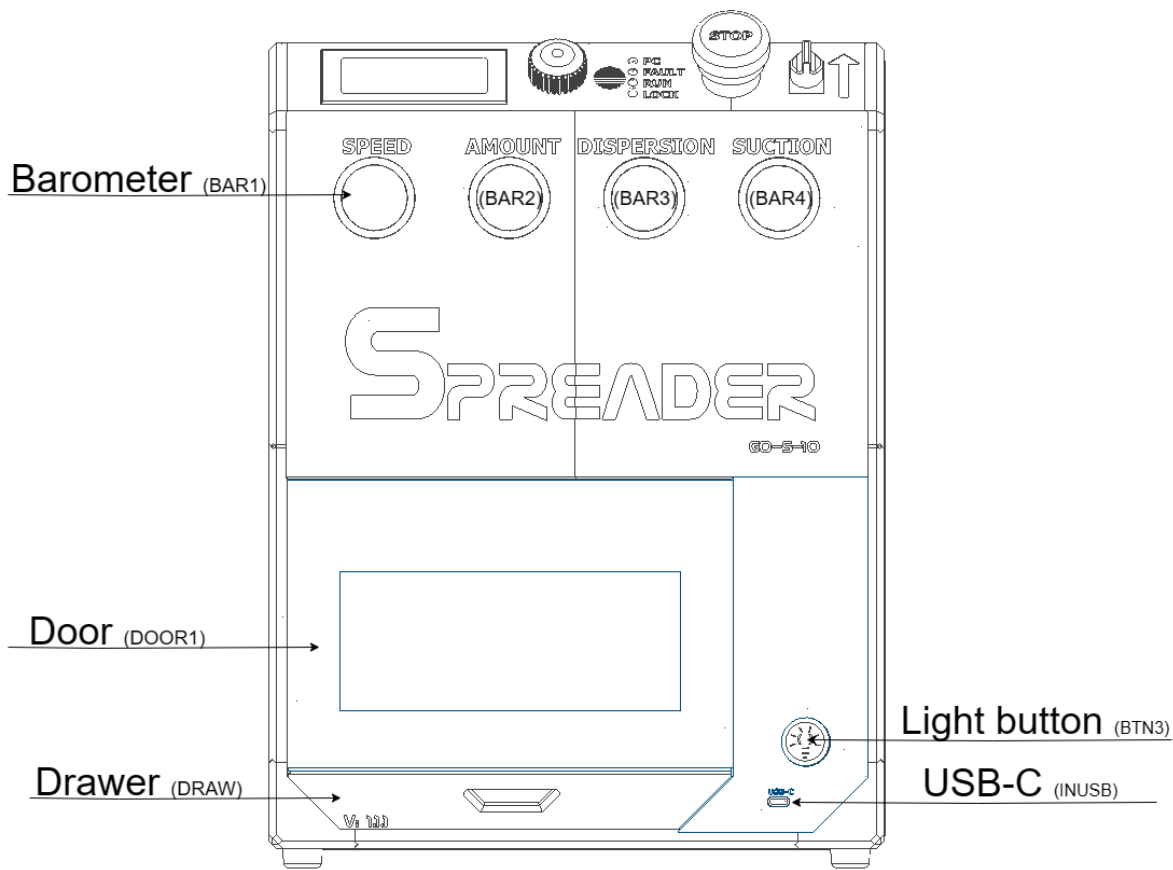


Figure 1. Front view

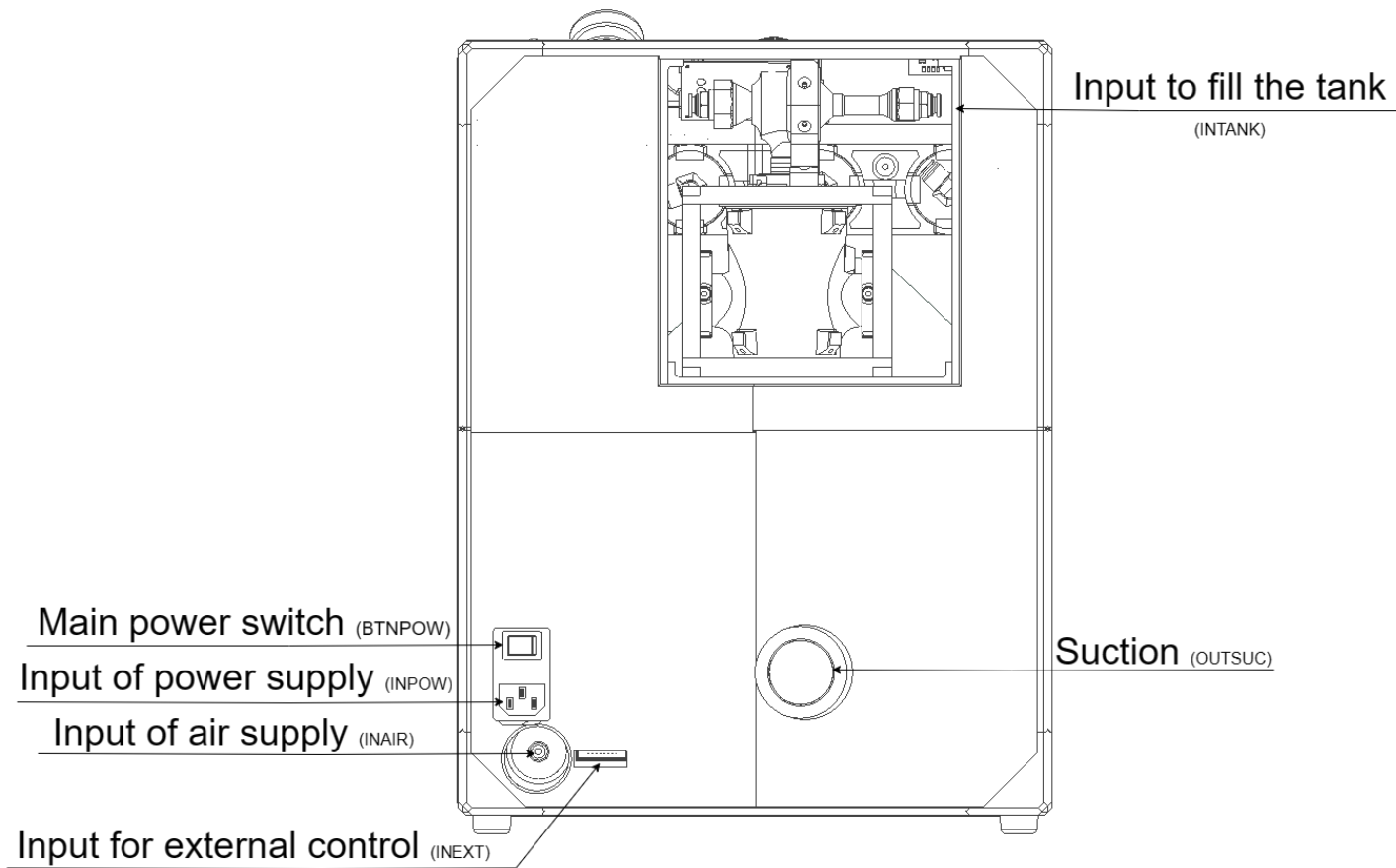


Figure 2. Rear view

2 Connect device

On the back of the device there is an input for connecting external air via a quick coupler type ES7.2 (*INAIR*). There is also a mains input for cable power (*INPOW*), where there is also a power-off button (*BTNPOW*) with integrated fuse. For device control, there is an input allowing control via external signals (*INEXT*), either by direct pin switching or via USART or SPI communication protocols in slave/follower mode. There is also an output for suction (*OUTSUC*) from the box (The device is not capable of extracting itself and requires external extraction) and last but not least, from the rear side it is possible to access the refill tank (*INTAK*).

For operational capability, the device must be connected to the mains and an external air supply must be connected together with the extraction.

3 Device control

This device can be controlled in up to three ways simultaneously.

3.1 Control via HMI:

This type of control allows the user to set all device parameters as depicted in Figure 2 (Graphic layout).

The navigation in the HMI is as follows:

1. **Movement:** Navigation (up, down, plus, minus) is performed via the *EC1* control element.
2. **Change of value/state:** To change the value or state, press the *BTN1* button.
3. **Entering settings:** Entry into the next level of settings is also performed by pressing the *BTN1* button.
4. **Initiating action:** An action can be initiated by holding the *BTN1* button for 1.5 seconds or by selecting from the menu.
5. **Stopping action:** An action can be stopped by holding the *BTN1* button again.

The HMI includes an LCD display (*LCD1*) for displaying data, an encoder for menu navigation and setup, a beeper (*BE1*) for audible indication, LED indicators (*LED_{PC}*, *LED_{FAULT}*, *LED_{RUN}*, *LED_{LOCK}*) for a better overview of the device status, a STOP button (*BTN2*) for emergency stop and an air valve for manual closure of the air circuit (*AV1*).

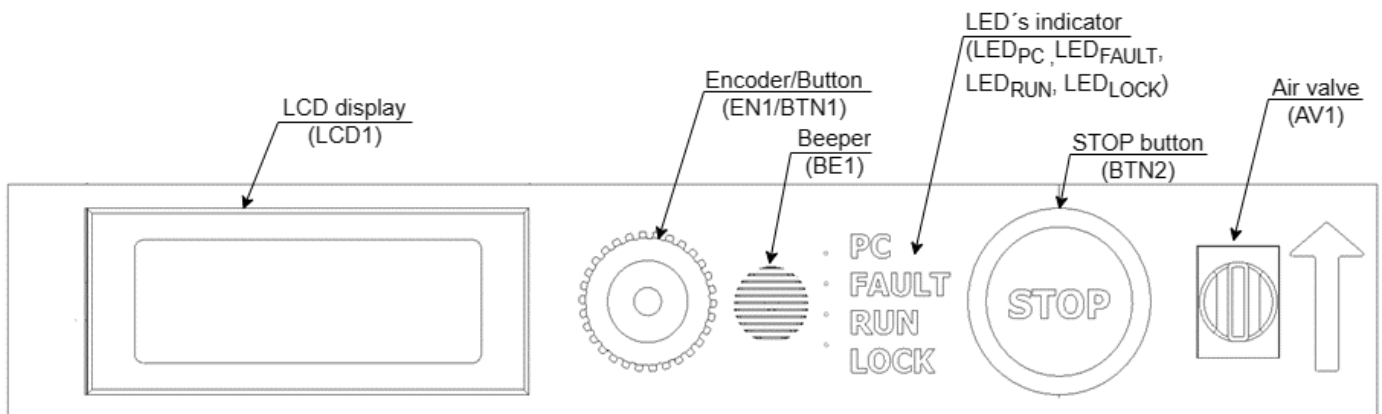


Figure 3. HMI

3.1.1 Graphic layout

1. **Default Mode:** Configuration options available in this mode are highlighted in white.
2. **Advanced Mode:** This mode includes all the options available in Default Mode, plus adds additional options that are highlighted in blue.
3. **User Mode:** The highest level of access that includes all options from Default and Advanced mode and adds additional specific options marked with green underlining.

* Setting in grey is not implemented.

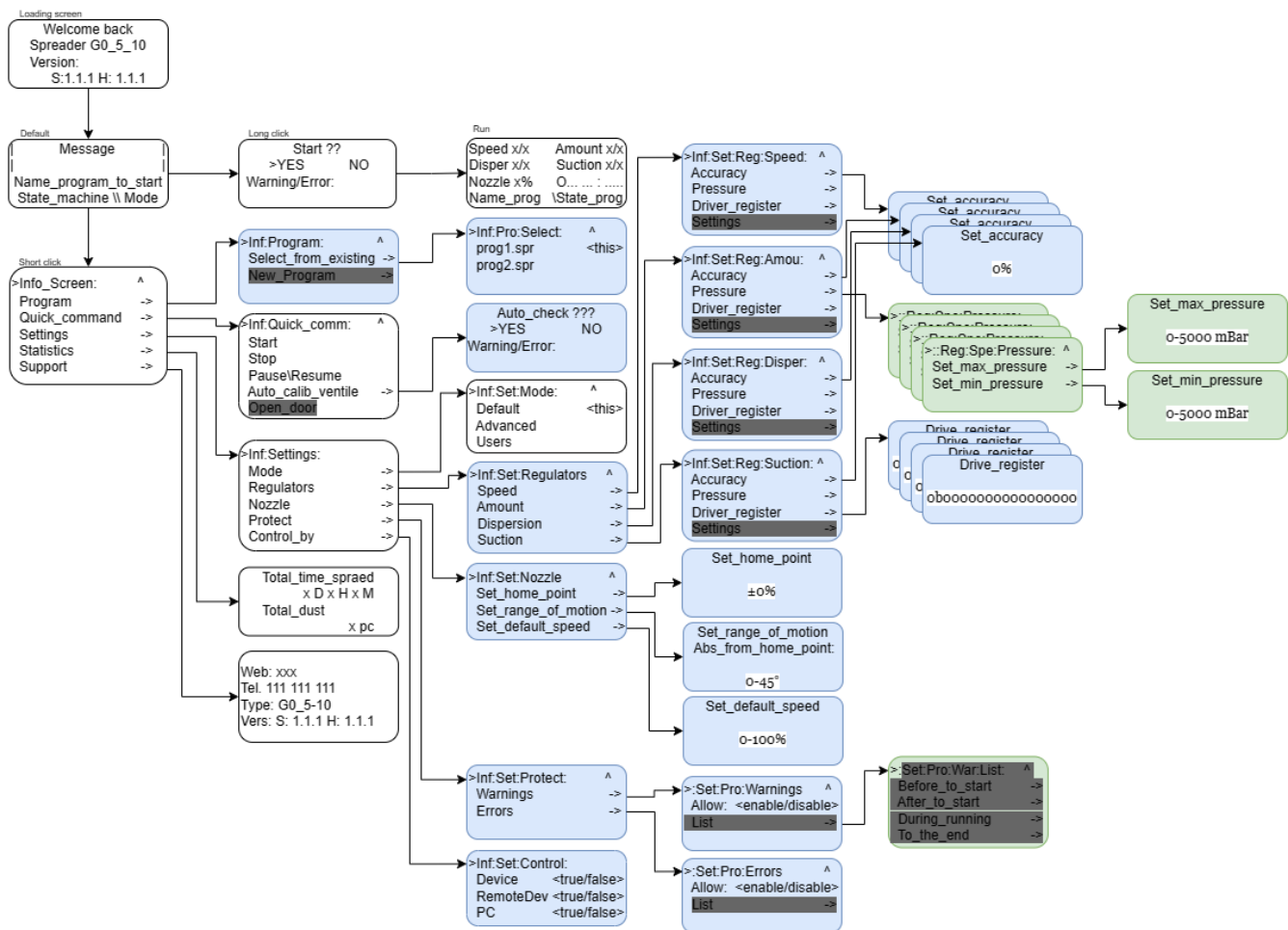


Figure 4. Graphic layout

3.2 Control via PC:

This type of control allows the user to set all parameters available in the HMI and in addition, other specific parameters.

All commands must end with a semicolon. If the command is entered correctly, a message is printed that includes what command is being attempted, whether the command was successful (mode), and if it was and another message is expected, it is also printed.

To control from a computer, you need to connect USB-C to the device from the front. You also need to have PC control enabled, which can be set in advanced mode via HMI *Info_Screen:Settings:Control_by:* and check PC.

Then just open e.g. Realterm or Putty, choose the correct COM, set baud to 115200 and send e.g. "help;", if the table of possible commands is listed, the connection is fine.

The help table is below:

Someone in trouble, maybe I can help you, look:			
SET:			
DEV:			
PROG:	NAME:	[nameProg.spr];[rest_of_the_program];	
MODE:	DEFAULT;		
	ADVANCED;		

					USER;		
					RETURN;		
CONTROL:							
		DEVICE:		[TRUE/FALSE];			
		PC:		[TRUE/FALSE];			
		EXTERNAL:		[TRUE/FALSE];			
		NONE;		// Notice 1)			
		RETURN;					
ELEMENT:							
	JET:						
		EN:		[TRUE/FALSE];			
		SPEED:		[0-100]; // %			
			MIN:		[0-65535];		
			MAX:		[0-65535];		
		POS:					
			MIN:		[0-65535];		
			MAX:		[0-65535];		
			LEFT:		[0-65535];		
			RIGHT:		[0-65535];		
	MIDDLE:			[0-65535];			
	VIB_MOT:						
		EN:		[TRUE/FALSE];			
		SCALABILITY:		[0-100]; // %			
			MIN:		[0-100]; // %		
			MAX:		[0-100]; // %		
		ON;					
		OFF;					
		ON_FOR:		[0-65535];	//milisecond		
	VALVE:						
		SPEED:					
			EN:		[TRUE/FALSE];		
		SPEED:		[0-100]; // %			
			MIN:		[0-100]; // %		
			MAX:		[0-100]; // %		
		ACCURACY:		[0-100]; // %			
			MIN:		[0-100]; // %		
			MAX:		[0-100]; // %		
		HYSTERERIS:		[0-6000];			
			MIN:		[0-6000];		
			MAX:		[0-6000];		
		VALUE:		[0-6000];			
			MIN:		[0-6000];		
			MAX:		[0-6000];		
		MOVE:		[-65535 - +65535];//steps			
		CALIBRATE:					

	AMOUNT:	EN:		[TRUE/FALSE];
		SPEED:	[0-100]; // %	
			MIN:	[0-100]; // %
			MAX:	[0-100]; // %
		ACCURACY:	[0-100]; // %	
			MIN:	[0-100]; // %
			MAX:	[0-100]; // %
		HYSTERERIS:	[0-6000];	
			MIN:	[0-6000];
			MAX:	[0-6000];
		VALUE:	[0-6000];	
			MIN:	[0-6000];
	MAX:		[0-6000];	
	MOVE:	[-65535 – +65535];//steps		
	CALIBRATE;			
	DISPERSION:	EN:		[TRUE/FALSE];
		SPEED:	[0-100]; // %	
			MIN:	[0-100]; // %
			MAX:	[0-100]; // %
		ACCURACY:	[0-100]; // %	
			MIN:	[0-100]; // %
			MAX:	[0-100]; // %
		HYSTERERIS:	[0-6000];	
			MIN:	[0-6000];
MAX:			[0-6000];	
VALUE:		[0-6000];		
		MIN:	[0-6000];	
	MAX:	[0-6000];		
MOVE:	[-65535 – +65535];//steps			
CALIBRATE;				
SUCTION:	EN:		[TRUE/FALSE];	
	SPEED:	[0-100]; // %		
		MIN:	[0-100]; // %	
		MAX:	[0-100]; // %	
	ACCURACY:	[0-100]; // %		
		MIN:	[0-100]; // %	
		MAX:	[0-100]; // %	
	HYSTERERIS:	[0-6000];		
		MIN:	[0-6000];	
		MAX:	[0-6000];	
	VALUE:	[0-6000];		
		MIN:	[0-6000];	
MAX:		[0-6000];		

					MOVE:	[-65535 —+65535];//steps	
					CALIBRATE;		
				LED_STRIP:			
					EN:	[TRUE/FALSE];	
					SCALABILITY:	[0-100]; // %	
					MIN:	[0-100]; // %	
					MAX:	[0-100]; // %	
					ON;		
					OFF;		
					ON_FOR:	[0-65535]; //milisecond	
				HMI:			
					LCD:		
				BEEP:		SLEEP;	
					EN:	[TRUE/FALSE];	
		SCALABILITY:	[0-100]; // %				
		MIN:	[0-100]; // %				
		MAX:	[0-100]; // %				
			ON;				
			OFF;				
			ON_FOR:	[0-65535]; //milisecond			
		STOP_EMERGENCY;					
		PROTECT:		WARNING:	Not_air_in_system:	[TRUE/FALSE];	
					Program_failed:	[TRUE/FALSE];	
					Calibration_failed:	[TRUE/FALSE];	
					Command_not_exist:	[TRUE/FALSE];	
					Set_valve_failed:	[TRUE/FALSE];	
				ERROR:			
					Not_air_in_system:	[TRUE/FALSE];	
					Program_failed:	[TRUE/FALSE];	
					Calibration_failed:	[TRUE/FALSE];	
					Command_not_exist:	[TRUE/FALSE];	
				Set_valve_failed:	[TRUE/FALSE];		
		GET:					
		DEV:	PROG:	NAME:	[nameProg.spr];		
ALL;							
MODE;							
CONTROL;							
ELEMENT:							
	JET:						
		EN;					

	SPEED:	ACTUAL;	
		MIN;	
		MAX;	
	POS:		
		MIN;	
		MAX;	
		LEFT;	
		RIGHT;	
		MIDDLE;	
	VIB_MOT:		
EN;			
SCALABILITY:		ACTUAL;	
		MIN;	
		MAX;	
STATE;			
VALVE:			
	SPEED:	EN;	
		SPEED:	ACTUAL;
			MIN;
			MAX;
		ACCURACY:	ACTUAL;
			MIN;
			MAX;
		HYSTEREZIS:	ACTUAL;
			MIN;
			MAX;
		VALUE:	ACTUAL;
			MIN;
			MAX;
		MOVE:	
	CALIBRATE;		
	AMOUNT:		
		EN;	
		SPEED:	ACTUAL;
			MIN;
			MAX;
		ACCURACY:	ACTUAL;
			MIN;
			MAX;
		HYSTEREZIS:	ACTUAL;
			MIN;
MAX;			
VALUE:		ACTUAL;	
	MIN;		
	MAX;		

					MOVE;
					CALIBRATE;
			DISPERSION:		
				EN;	
				SPEED:	ACTUAL;
					MIN;
					MAX;
				ACCURACY:	ACTUAL;
					MIN;
					MAX;
				HYSTEREZIS:	ACTUAL;
					MIN;
					MAX;
				VALUE:	ACTUAL;
					MIN;
					MAX;
				MOVE:	
				CALIBRATE;	
			SUCTION:		
				EN;	
				SPEED:	ACTUAL;
					MIN;
					MAX;
				ACCURACY:	ACTUAL;
					MIN;
					MAX;
				HYSTEREZIS:	ACTUAL;
					MIN;
					MAX;
				VALUE:	ACTUAL;
					MIN;
					MAX;
				MOVE:	
				CALIBRATE;	
	LED_STRIP:				
		VIB_MOT:			
				EN;	
				SCALABILITY:	ACTUAL;
					MIN;
					MAX;
				STATE;	
	HMI:				
		LCD:			
				SLEEP;	
	BEEP:				
		EN;			

				SCALABILITY:	ACTUAL;
					MIN;
					MAX;
				STATE;	
	DEV:				
		STOP_EMERGENCY;			
		PING;	//return "PONG"		
		START;			
		STOP;			
		PAUSE;			
		ADD:			
			PROG:		
				NAME:	[nameProg.spr];[rest_program];
		DELETE;			
			PROG:		
				NAME:	[nameProg.spr]
		PROTECT:			
					//Notice 2)
			WARNING:		
				Not_air_in_system:	[TRUE/FALSE];
				Program_failed:	[TRUE/FALSE];
				Calibration_failed:	[TRUE/FALSE];
				Command_not_exist:	[TRUE/FALSE];
				Set_valve_failed:	[TRUE/FALSE];
			ERROR:		
				Not_air_in_system:	[TRUE/FALSE];
				Program_failed:	[TRUE/FALSE];
				Calibration_failed:	[TRUE/FALSE];
				Command_not_exist:	[TRUE/FALSE];
				Set_valve_failed:	[TRUE/FALSE];

//Notice 1)

//After this command, the device expects the next command to be a setting
//control, if the next command is not a setting control and or more than one
//second elapses, the device will switch back to the last //configuration.

//Notice 2)

//Only one message can be active, never both at the same time, but both can be
//disabled (FALSE).

All of these commands can be called, but access to them may be denied depending on the mode selected.

3.3 Control via external signals:

This type of control has no software support yet.

4 Device mode

Three adjustable modes are available to control the protection of people and equipment, each with its own priority. Default mode has the lowest priority, followed by Advanced mode and User mode has the highest priority. Each of these modes is designed to provide the appropriate level of protection for the current needs and system settings.

4.1 Default

The default mode is primarily for the operator, not for the control itself. In this mode, the focus is on protecting people and therefore a constant background scan of the situation takes place. If an irregularity is detected, the process stops completely and reports an error. In this mode only a small part of the settings can be edited.

4.2 Advanced

Advanced mode is a hidden User mode, which means that situations that would cause a process to stop in Default mode will not cause a stop in Advanced mode unless explicitly set in User mode. This mode is therefore optimized for specific needs and allows you to modify only those settings that are enabled.

4.3 User

In this mode, the operator must study the manual carefully, as injury to persons and damage to the equipment may occur. In this mode, the operator can change the error to a warning or turn it off completely. It also has the power to modify the settings in Advanced mode, and incorrect settings can destroy the equipment. He can also edit the maximum and minimum values that can be set at runtime (subroutines). User mode offers access to all settings and is primarily for debugging, so it is not recommended to operate the device in this mode.

5 Device programming

The programming of the device is notionally divided into two parts: initialization and execution files. There can be only an initialization file, but there can never be only an execution file. The initialization file sets the necessary values in the device registers, which are so-called general settings that cannot be changed during the execution program/file. For details, refer to the chapter Rules for creating.

5.1 Upload program to device

Subroutines are loaded via the PC interface. The device must be configured for PC control as described in the chapter "Control via PC". The command *DEV:ADD:PROG:NAME:* is then sent, followed by the file/program name and then the subroutine itself.

5.2 Create program file

You can use any text editor to create the program and then save the .spr file. If you need to upload a program and your system is unable to send a .spr file to the device, a .txt file can be sent. In any case, the program must always start with *PROG:NAME:nameProg.spr;* in the file.

Subroutines, unlike Device control, can execute commands in parallel, allowing for more dynamic process control and greater configuration options. This ability to execute commands in parallel increases the flexibility and efficiency of the system, allows faster response to changes, and optimizes overall device performance.

5.3 Rules for creating

1. Each command must end with a semicolon (;).
2. Each subroutine must start with `PROG:NAME:[nameProg.spr];`.
3. There must not be multiple subroutines with the same name.
4. General settings can be made only in the initialization part of the subroutine, except for commands ending with `*.RETURN;`.
5. Commands must be immediately consecutive, without the use of whitespace.

Subroutines can contain only the initialization part, but they can never contain only the execution part. Initialization subroutines set the basic values and configurations necessary for the proper operation of the device. Execution subroutines depend on these initialization settings and cannot be run independently without prior initialization.

The device is case sensitive, so it is crucial to ensure that the commands are correct. If the device does not find the command in the command table, it will not execute the command. Similarly, if it finds the command but does not have the proper permissions, it will also not execute the command.

5.3.1 Execution Subroutines

Start and End: The execution subroutine always starts with the `START;` command, which signals the beginning of the execution of the command sequence. At the end of each execution subroutine, there must always be a `STOP;` command, which indicates the end of the execution of the sequence of commands. The `STOP;` command must be placed as the last command in the execution subroutine to ensure correct and safe termination of the process.

5.3.2 Command START & STOP and Action Commands

START Command: From the `START;` command, all subsequent commands will begin loading into the command queue. This process continues until an action command is reached.

STOP Command: The `STOP;` command ignores whether the queue is empty or not, so the `SEND;` or `SENDandWAIT;` command must be sent before the end of the program. This ensures that all commands loaded in the queue are executed before the program terminates.

Action Commands: Action commands include `SEND;` and `SENDandWAIT;`.

- **SEND;:** When this command is reached, it executes all commands that have been loaded into the queue immediately without waiting for a response. It is used when it is not necessary to wait for a specific device state or value to be reached.
- **SENDandWAIT;:** This command executes all commands in the queue and waits for them to complete. This means that it ensures every command in the queue is executed and a response is received before continuing. It is useful for situations where it is necessary to ensure that a particular device element is set to the desired value before proceeding.

5.3.3 Waiting for Events and Conditions

- **WAITfor:xx Command:** Waits for a specific event or input.
- **WAITfor:xx!=xx Command:** Waits until the condition that the value xx is different from another value is met.

5.3.4 Loops and Variables

Loops: It is possible to create loops using the `WHILE:xxElement;` statement or its overloaded version `WHILE:xxElement!=xxstateElement;`. These commands must be closed with the `ENDWHILE;` command.

Variables: Up to five dedicated variables of type `uint16_t` can be used, which are `VAR1`, `VAR2`, `VAR3`, `VAR4`, and `VAR5`. These variables can perform all basic operations such as `VAR1--`, `VAR1++`, `VAR1=xx`, etc.

5.3.5 Structure of the sub-programme

The sub-program is divided into two main parts: the initialization part and the execution part. Here is the structure:

1. Initialization Part:

- **Start of File:** This part includes general commands necessary for setting up the device.
- **Syntax:**

```
PROG:NAME:[nameTest1.spr];[ General commands];
```

2. Execution Part (optional):

- **Start:** The execution part begins with the START; command, indicating the beginning of command execution.
- **Commands:** This part contains commands for controlling device elements or commands ending with .RETURN;.
- **End:** The execution part ends with the STOP; command, ensuring proper termination of the sequence.
- **Syntax:**

```
START;

[Commands for device element control or commands ending in .RETURN];

STOP;
```

Example Structure:

```
// Start of file -> Initialization part

PROG:NAME:[nameTest1.spr];[ General commands];

// Execution part (not required)

START;

[Commands for device element control or commands ending in .RETURN];

STOP;
```

5.3.6 List of command

PROG:	NAME:	[];
MODE:	DEFAULT:	
	ADVANCED:	
	USER:	
	RETURN;	
CONTROL:	DEVICE;	[];
	PC;	[];
	EXTERNAL;	[];
	NOONE;	
	RETURN;	
JET:	EN:	[];
	SPEED:	MIN: [];
		MAX: [];
	POS:	MIN: [];

		MAX:	[];
		LEFT:	[];
		RIGHT:	[];
		MIDDLE:	[];
VIB_MOT:			
	EN:	[];	
	SCALABILITY:	[];	
		MIN:	[];
		MAX:	[];
	ON;		
	OFF;		
	ON_FOR:	[];	
VALVE:			
	SPEED:		
		EN:	[];
		SPEED:	[];
			MIN: [];
			MAX: [];
		ACCURACY:	[];
			MIN: [];
			MAX: [];
		HYSTERERIS:	[];
			MIN: [];
			MAX: [];
		VALUE:	[];
			MIN: [];
			MAX: [];
		MOVE:	[];
		CALIBRATE;	
	AMOUNT:		
		EN:	[];
		SPEED:	[];
			MIN: [];
			MAX: [];
		ACCURACY:	[];
			MIN: [];
			MAX: [];
		HYSTERERIS:	[];
			MIN: [];
			MAX: [];
		VALUE:	[];
			MIN: [];
			MAX: [];
		MOVE:	[];
		CALIBRATE;	
	DISPERSION:		

		EN:	[];	
		SPEED:	[];	
			MIN:	[];
			MAX:	[];
		ACCURACY:	[];	
			MIN:	[];
			MAX:	[];
		HYSTERERIS:	[];	
			MIN:	[];
			MAX:	[];
		VALUE:	[];	
			MIN:	[];
			MAX:	[];
		MOVE:	[];	
		CALIBRATE;		
SUCTION:				
	EN:	[];		
	SPEED:	[];		
		MIN:	[];	
		MAX:	[];	
	ACCURACY:	[];		
		MIN:	[];	
		MAX:	[];	
	HYSTERERIS:	[];		
		MIN:	[];	
		MAX:	[];	
	VALUE:	[];		
		MIN:	[];	
		MAX:	[];	
	MOVE:	[];		
CALIBRATE;				
LED_STRIP:	EN:	[];		
	SCALABILITY:	[];		
	MIN:	[];		
	MAX:	[];		
	ON;			
	OFF;			
	ON_FOR:	[];		
HMI:	LCD:			
	SLEEP;			
BEEP:	EN:	[];		
	SCALABILITY:	[];		
	MIN:	[];		

		MAX:	[];
	ON;		
	OFF;		
	ON_FOR:	[];	
STOP_EMERGENCY;			
PROTECT:			
	WARNING:		
		Not_air_in_system:	[]
		Program_failed:	[]
		Calibration_failed:	[]
		Command_not_exist:	[]
		Set_valve_failed:	[]
	ERROR:		
		Not_air_in_system:	[]
		Program_failed:	[]
		Calibration_failed:	[]
		Command_not_exist:	[]
		Set_valve_failed:	[]

5.3.7 Examples

- **Initiation and execution sub-programme**

When this code is executed, the system switches to ADVANCED mode. An audible signal will then sound for 40 milliseconds and the LED strip in the box will light up. On the AMOUNT circuit, the pressure is set to 12 millibars, which is then reduced to 9 millibars, and the audible signal sounds again, this time lasting 400 milliseconds.

The DISPERSION and SUCTION circuits are then activated. Once these circuits have been set, the SPEED circuit is also set, and then slightly reduced. A command is then sent to move the nozzle to the left. The SPEED circuit stops and immediately afterwards all other elements are switched off. After all commands have been sent, the subroutine is terminated.

```
const static char test1[500] = "PROG:NAME:Test1.spr;MODE:ADVANCED;"
    "START;"
    "BEEP:HOLD_FOR:40;LED_STRIP:ON;SEND;"
    "AMOUNT:VALUE:12;SENDandWAIT;"
    "AMOUNT:VALUE:9;BEEP:HOLD_FOR:400;SENDandWAIT;"
    "DISPERSION:VALUE:100;SUCTION:VALUE:600;SENDandWAIT;"
    "SPEED:VALUE:800;SENDandWAIT;"
    "SPEED:VALUE:600;SENDandWAIT;"
    "JET:POS:LEFT;SENDandWAIT;"
    "SPEED:VALUE:0;SEND;"
    "DISPERSION:VALUE:0;SUCTION:VALUE:0;AMOUNT:VALUE:"
    "0;JET:POS:GO_RIGHT;VIB_MOT:OFF;LED_STRIP:OFF;"
    "SEND;"
    "STOP;"
```