

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2022

Ján Lizúch



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

NÁVRH FLUIDIZAČNÍHO ZAŘÍZENÍ PRO POUZDŘENÍ

DESIGN OF A FLUIDIZING DEVICE FOR ENCAPSULATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ján Lizúch

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Alexandr Otáhal, Ph.D.

BRNO 2022

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav mikroelektroniky

Student: Ján Lizúch

ID: 220838

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Návrh fluidizačního zařízení pro pouzdření

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte problematiku pouzdření hybridních integrovaných obvodů a princip technologie fluidizace. Relevantní poznatky popište v teoretické části. Sestrojte zařízení pro pouzdření technologií fluidizace, které bylo navrženo v semestrální práci. Následně ověřte jeho funkci, optimalizujte proces fluidizace a vytvořte návod k použití.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 2.6.2022

Vedoucí práce: Ing. Alexandr Otáhal, Ph.D.

doc. Ing. Jiří Háze, 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

Táto bakalárska práca sa zaoberá návrhom modelu fluidizačného zariadenia pre púzdrenie hybridných integrovaných obvodov. V prvej časti práce je popísaná teória ohľadom hybridných integrovaných obvodov a ich púzdier. V ďalších častiach práca pojednáva o návrhu teoretického modelu zariadenia a o jeho konštrukčnej časti. V práci sú taktiež obsiahnuté informácie o optimalizácii procesu fluidizácie pre konkrétny púzdriaci materiál.

KĽÚČOVÉ SLOVÁ

Fluidizačné zariadenie, púzdrenie, hybridný integrovaný obvod, púzdro

ABSTRACT

The aim of a bachelor's thesis is to design and construct a model of fluidized bed for encapsulating a hybrid integrated circuits. A theory about hybrid integrated circuits, their packages, principles of fluidized bed and about organic materials suitable for fluidization is included in a first part of the thesis. Next parts of the thesis discusses a design of a theoretical model and its practical construction part. Thesis also contains a part about fluidization process optimization for a specific encapsulating material.

KEYWORDS

Fluidized bed, encapsulation, hybrid integrated circuit, package

LIZÚCH, Ján. *Návrh fluidizačního zařízení pro pouzdření*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2022, 124 s. Bakalářská práce. Vedúci práce: Ing. Alexandr Otáhal, PhD.

Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela

Meno a priezvisko autora: Ján Lizúch
VUT ID autora: 220838
Typ práce: Bakalárska práca
Akademický rok: 2021/22
Téma závěrečnéj práce: Návrh fluidizačního zařízení pro pouzdření

Vyhlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúcej/cého záverečnej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

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

Brno
.....
podpis autora*

*Autor podpisuje iba v tlačenej verzii.

POĎAKOVANIE

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce pánovi Ing. Alexandrovi Otáhalovi, Ph.D. za odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť, cenné a podnetné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	14
1 Hybridný integrovaný obvod	15
1.1 Púzdrenie HIO	15
1.1.1 Hermetické púzdra	16
1.1.2 Nehermetické púzdra	17
2 Fluidizácia	19
2.1 Púzdrenie technológiou fluidizácie	19
2.2 Fluidizačné zariadenie a jeho princíp	20
2.2.1 Elektrostatické fluidizačné zariadenie	21
2.2.2 Fluidizačné zariadenie typu Gas-Solid	22
2.3 Príprava HIO na fluidizáciu	23
2.4 Voľba práškoveho materiálu	24
2.4.1 Maximálna teplota substrátu	24
2.4.2 Hrúbka vrstvy	25
2.4.3 Mechanická odolnosť	26
2.4.4 Dielektrická pevnosť	26
2.5 Nastavenie fluidizačného zariadenia	27
2.5.1 Prietok vzduchu a vibrácie	27
2.5.2 Teplota a čas predhrevu	29
2.5.3 Čas fluidizácie	29
2.5.4 Teplota a čas vytvrdnutia	29
2.6 Výsledná kontrola	30
3 Návrh fluidizačného zariadenia	31
3.1 Návrh mechanickej konštrukcie	31
3.1.1 Fluidizačná nádoba	31
3.1.2 Filter pevných častíc	32
3.1.3 Vzduchový difúzor	34
3.1.4 Dopravník substrátov	36
3.1.5 Úchyt substrátu	36
3.1.6 Riadenie prietoku a prívod plynu	37
3.1.7 Podporná konštrukcia	38
3.2 Návrh elektrickej konštrukcie	39
3.2.1 Mikrokontrolér	40
3.2.2 User Interface	41

3.2.3	Krokové motory a riadenie posuvu	42
3.2.4	Výhrevné panely a regulácia teploty	45
3.2.5	Riadenie vibračného motora	48
3.2.6	Napájací zdroj	50
4	Konštrukcia zariadenia	53
4.1	Mechanická konštrukcia	53
4.2	Elektrická konštrukcia	56
4.3	Programová časť	61
4.3.1	LCD Display	61
4.3.2	Krokové motory	64
4.3.3	Senzor teploty	67
4.3.4	Vibračný motor	69
4.3.5	Menu	69
4.3.6	Proces fluidizácie	72
4.4	Návod na použitie	73
4.5	Test zariadenia	74
	Záver	76
	Literatúra	77
	Zoznam symbolov a skratiek	81
	Zoznam príloh	82
A	Prototyp fluidizačného zariadenia	83
B	Bloková schéma elektronickej časti	84
C	Kompletné fluidizačné zariadenie	85
D	Kód knižnice LCD.c	86
E	Kód knižnice Stepper_Control.c	90
F	Kód knižnice Temp_Sensor.c	98
G	Kód knižnice Vibration_Motor.c	100
H	Kód knižnice Menu.c	101
I	Výber z knižnice prerušení stm32l4xx_it	113

J	Kód funkcie Fluidization_PROCESS	117
K	Kompletný program - priložený na CD	124

Zoznam obrázkov

1.1	Prehľad typov používaných púzdiere pre HIO [1]	16
1.2	Nezapečatené hermetické púzdro s HIO [2]	17
1.3	Nehermetické plastové púzdro HIO [3]	18
2.1	Teoretický model fluidizačného zariadenia [4]	19
2.2	HIO pred a po procese fluidizácie [5]	20
2.3	Teoretický model elektrostatického fluidizačného zariadenia [13]	21
2.4	Teoretický model fluidizačného zariadenia [14]	23
2.5	Stav prášku pri rôznych nastaveniach prietoku vzduchu [15]	28
3.1	Koncept fluidizačnej nádoby	32
3.2	Koncept filtra pevných častíc	33
3.3	Koncept vzduchového difúzora	34
3.4	Vzduchový difúzor s komorou a vibračným motorom	35
3.5	Mechanická konštrukcia dopravníku substrátov	36
3.6	Prototyp svorky na uchytenie substrátu	37
3.7	Redukčný ventil s prietokomerom a tlakomerom [16]	38
3.8	Návrh uchytenia a odrušenia vybráčií fluidizačnej nádoby	39
3.9	Vývojová doska STM Nucleo.[17]	40
3.10	LCD Display 20x4 [19]	41
3.11	Modul I2C prevodníka [22]	42
3.12	Modul enkódera [23]	42
3.13	Krokový motor Leadshine 42CM08 [25]	43
3.14	Driver pre krokový motor Leadshine DM542EU [26]	44
3.15	Keramické ohrevné teleso [28]	45
3.16	SSR relé SSR-15A [29]	46
3.17	Modul pre meranie teploty pomocou termočlánku [30]	47
3.18	Termočlánok typu K [32]	48
3.19	Vibračný motor [33]	49
3.20	Modul s mosfetom pre riadenie motora [34]	49
3.21	Spínaný zdroj Meanwell [36]	51
3.22	Modul step-down meniča [38]	52
4.1	Uchytenie posuvu osi	54
4.2	Rozobratá fluidizačná nádoba	55
4.3	Kompletná mechanická konštrukcia zariadenia	56
4.4	Použitá krabička s krytím IP65[39]	57
4.5	Pinout mikrokontroléru STM32L452RE-P	58
4.6	Pinout dosky STM32L452RE-P [40]	59
4.7	Výsledná elektrická konštrukcia zariadenia	61

4.8	Inicializačná sekvencia LCD [20]	63
4.9	Diagram kalibrácie osí X a Z	65
4.10	Diagram funkcie na pohyb osí	66
4.11	Sekvencia dát poslaných z modulu termočlánku [31]	67
4.12	Diagram funkcie <i>Temp_KEEP</i>	68
4.13	Diagram funkcie <i>Encoder_HANDLER</i>	70
4.14	Diagram bloku menu	71
4.15	Diagram funkcie procesu fluidzácie	72
4.16	Zapúzdrený substrát HIO	75
A.1	Prototyp fluidizačného zariadenia	83
B.1	Bloková schéma elektronickej časti zariadenia	84
C.1	Kompletné fluidizačné zariadenie	85

Zoznam tabuliek

2.1	Tabuľka teploty predhrevu a vytvrdzovania práškov 3M Scotchcast [6, 7, 8, 9]	25
2.2	Tabuľka mechanickej odolnosti práškov 3M Scotchcast [6, 7, 8, 9] . . .	26
2.3	Dielektrické parametre práškov 3M Scotchcast [6, 7, 8, 9]	27
4.1	Tabuľka použitých pinov mikrokontroléra a príslušných periférií . . .	60
4.2	Tabuľka položiek menu, premenných a ich rozsahov	71
4.3	Tabľka parametrov pre optimalizovaný proces	74

Úvod

Proces zapúzdrenia hybridných integrovaných obvodov je jedným z posledných technologických procesov pri ich výrobe. V dnešnej dobe sa na púzdrenie využíva množstvo technologických postupov a jedným z nich je práve púzdrenie integrovaných obvodov pomocou fluidizácie. Tento proces je vhodný na zapúzdrenie prototypov hybridných integrovaných obvodov a taktiež pre púzdrenie vo veľkovýrobe, kde nie sú požadované špeciálne vlastnosti púzdra, ako napríklad pri hermeticky uzavretých púzdрах.

Táto práca sa zaoberá návrhom a konštrukciou fluidizačného zariadenia, ktoré bude slúžiť na púzdrenie hybridných integrovaných obvodov. Cieľom je navrhnúť a skonštruovať fluidizačné zariadenie a proces púzdrenia automatizovať, čím sa minimalizuje chybovosť pri púzdrení spôsobená ľudským faktorom. Po skonštruovaní je nutné optimalizovať proces fluidizácie tak, aby zariadenie vytvorilo na substráte konformný povlak púzdriaceho materiálu.

V prvej kapitole práce sú teoreticky popísané hybridné integrované obvody a spôsoby ich púzdrenia. Ďalej sú detailne rozoberané typy púzdier. V tejto kapitole sa práca zaoberá aj rôznymi technológiami púzdrenia obvodov.

V druhej kapitole sa práca venuje typom fluidizačných zariadení, ich princípu funkcie a parametrom, ktoré sú potrebné pri fluidizácii nastaviť. V tejto kapitole sa pojednáva taktiež o materiáloch, ktoré sú vhodné pre fluidizáciu a sú tu podrobne rozobrané jednotlivé parametre, ktoré je potrebné pri výbere práškoveho materiálu zohľadniť.

Tretia kapitola práce je rozdelená na dve časti. V prvej časti sa rieši mechanická konštrukcia celého zariadenia, ktorá je navrhovaná tak, aby boli splnené všetky potrebné parametre pre potreby fluidizácie. Výsledkom tejto časti práce je 3D návrh prototypu fluidizačného zariadenia v softvéri Autodesk Inventor. V druhej časti tretej kapitoly práca pojednáva o návrhu a výbere vhodných elektronických komponentov pre zariadenie.

V štvtej kapitole je popísaná konštrukcia zariadenia a úkony, ktoré bolo pri konštrukcii potrebné vykonať. Je tu taktiež popísaná programová časť, ktorú vykonáva mikrokontrolér.

Piata kapitola obsahuje návod na obsluhu celého zariadenia a všetky kroky, ktoré je potrebné vykonať na zapúzdrenie hybridného integrovaného obvodu.

V poslednej - šiestej kapitole je popísaný test, pri ktorom sa do zariadenia umiestnil substrát, ktorý bolo potrebné zapúzdriť a optimalizovať celý proces púzdrenia. .

1 Hybridný integrovaný obvod

Hybridný integrovaný obvod (HIO) je miniaturizovaný elektrický obvod konštruovaný s použitím elektrických súčiastok na hrubovrstvom keramickom substráte. Výhodou tejto technológie je možnosť vytvorenia veľmi presných pasívnych súčiastok priamo na substráte a integrovanie aktívnych prvkov na úrovni čipu na substrát.

Výrobu HIO je možné technologicky rozdeliť do štyroch základných častí. V prvej časti výroby ide o prípravu keramického substrátu a natlačenie vodivých, odporových a izolačných vrstiev. Po natlačení jednej vrstvy je potrebné prejsť ku druhému kroku výroby, kedy sa natlačená vrstva vysuší a vypáli pri vysokej teplote. Pri potrebe natlačiť na substrát viacero vrstiev je nutné tieto dva kroky opakovať a po natlačení každej vrstvy nechať vrstvu vypáliť. Samozrejmosťou je taktiež korektné dodržanie poradia vrstiev podľa teploty výpalu. Pri nedodržaní tohoto postupu a natlačení všetkých vrstiev naraz by došlo ku nežiadúcim reakciám pri výpale a ku vzniku medzivrstvových zlúčenín, ktoré v značnej miere degradujú funkciu každej vrstvy. Tretím krokom pri výrobe HIO je trimovanie natlačených hrubovrstvých komponentov a osadenie všetkých ostatných súčiastok. Posledným technologickým krokom výroby HIO je zapúzdrenie, pri ktorom sa volí typ púzdra najmä podľa vplyvov prostredia, v ktorom sa bude obvod nachádzať.

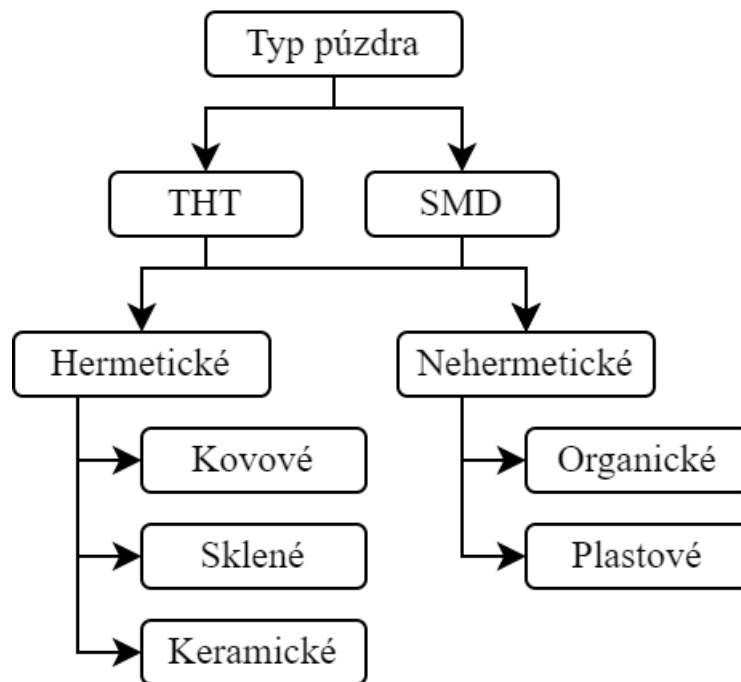
HIO sa vo význačnej miere využívajú v senzorovej technike na rôzne dotykové, kapacitné a odporové senzory. Vďaka vysokej chemickej a mechanickej odolnosti korundového substrátu sú HIO vhodné na senzory do agresívnych prostredí. V takomto type prostredia sú HIO vystavené veľkej variácii teplôt a vysokej oxidácii.

1.1 Púzdenie HIO

Ako bolo uvedené vyššie, púzdenie HIO je jedným z posledných stupňov pri procese výroby, v ktorom sa technologicky dá využiť viacero spôsobov.

Zvolením vhodného typu púzdra sa dá často zamedziť parazitným javom a môže sa tým taktiež predĺžiť životnosť zariadenia. Rozdelenie púzdier, ich typov a využívané materiály na púzdenie sú uvedené na obrázku 1.1.

V bežnej technickej praxi sa využívajú prevažne nehermetické plastové púzdra, ktoré sú vďaka ich nízkej technologickej náročnosti výroby a cene veľmi výhodné. Pri HIO sa využívajú čato hermetické púzdra a to prevažne v zariadeniach, akými sú rôzne moduly pre leteckú, vesmírnu alebo vojenskú techniku. V bežnej elektronike sa HIO v tomto type púzdra nevyskytuje a používa sa nehermetický typ púzdra. Je možné sa s ním stretnúť napríklad v moduloch integrovaných zosilňovačov rady STK od firmy Sanken, kde sa používalo plastové nehermetické púzdro.



Obr. 1.1: Prehľad typov používaných púzdiar pre HIO [1]

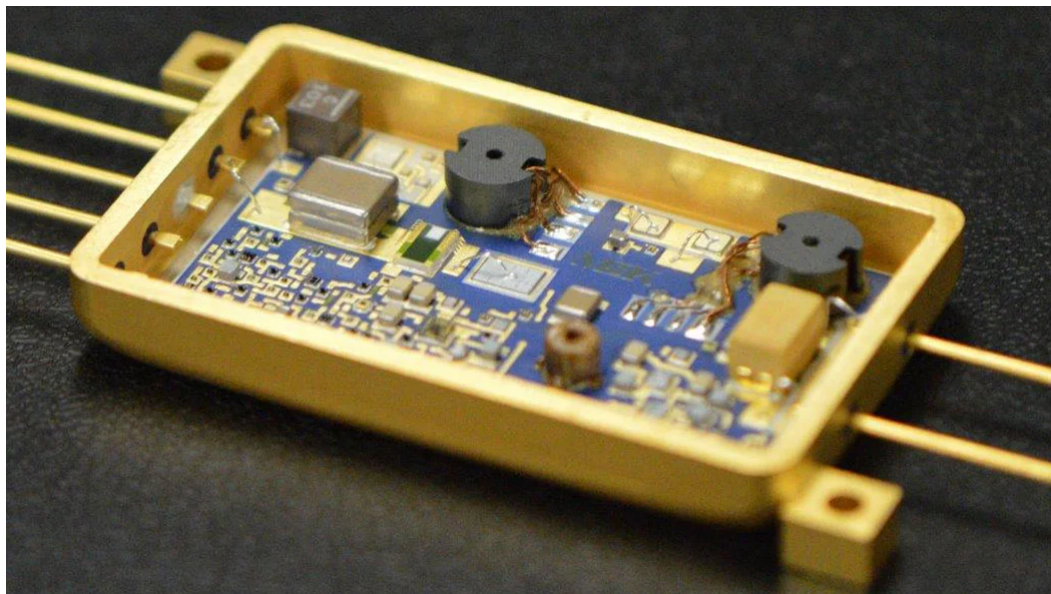
1.1.1 Hermetické púzdra

Pri náročnejších aplikáciách a nepriaznivých podmienkach prostredia sa pre HIO používajú hermetické púzdra. Ich použitím sa zabráňuje vniknutiu nežiadúcich látok z prostredia (pevné častice, kvapaliny, plyny), ktoré by kontaminovali substrát s komponentmi a mohli by ich znehodnotiť. Hermetické púzdra sa vyrábajú iba zo skla, keramiky a kovu. Ostatné typy materiálov, používané na púzdenie obvodov, nie sú dostatočne odolné voči kontamináciám cudzími časticami.

Aj napriek perfektne zapečatenej štruktúre púzdra HIO je v praxi nemožné predísť úplnému zabráneniu vniknutiu cudzích látok. Z dôvodu pôsobenia difúzie menších častíc, akými sú napríklad hélium alebo molekuly vody do materiálu púzdra sa po čase tieto častice dostanú do vnútra púzdra a tým dosiahnu rovnovážny stav koncentrácie medzi vnútrom púzdra a jeho okolitým prostredím. Hermetické púzdro je týmto následkom definované ako také, ktoré má po natlakovaní héliom rýchlosť úniku atómov na centimeter kubický za sekundu pod určitou hodnotou podľa normy.[1]

Tento typ púzdenia je veľmi náročný na čistotu a pri celom procese púzdenia obvodu sa využíva dusíková inertná atmosféra získaná z jeho tekutej formy. Dusík je následne pred zapečatením púzdra napustený aj do vnútra púzdra. Predpoklad pre dusík vhodný pre hermetické zapúzdenie HIO je jeho vlhkosť pod úrovňou 10 ppm. Pri použití kovového typu púzdra je využité aj púzdenie pomocou skla, ktoré sa

využíva na hermeticky uzavreté a elektricky izolované priechodky výstupných pinov HIO. [1] Nezapečatené hermetické púzdro je možné vidieť na obrázku 1.2



Obr. 1.2: Nezapečatené hermetické púzdro s HIO [2]

Hermetické púzdro v značnej miere zvyšuje spoľahlivosť zvlášť pri aktívnych obvodoch, no náklady na výrobu a technologická zložitosť sú značne vyššie oproti nehermetickému typu. V dnešnej dobe majú hermetické púzdra veľké uplatnenie v elektronike pre vesmírne aplikácie. Kovové typy púzdra sa vo väčšej miere používajú aj vo vysokofrekvenčnej technike, kde zaisťujú výhodné tienenie.

1.1.2 Nehermetické púzdra

Bežné aplikácie a implementácie HIO si nevyžadujú zvláštne technologické postupy pri púzdrení a využívajú nehermetické typy púzdier. Ich zloženie zahŕňa množstvo dostupnejších materiálov, ktorými sú najmä plasty a organické materiály. Tieto typy púzdier prepúšťajú a absorbujú vlhkosť, čím nepredstavujú dostatočnú ochranu pre elektrické komponenty HIO. Zapúzdrenie HIO do polyméru sa technologicky realizuje použitím vstrekovacích alebo lisovacích zariadení. [1]

Obidva typy prístrojov používajú termoplastické polyméry, akými sú napríklad akryly alebo styrény. Pri technológii lisovania je základný polymérny materiál nahriaty a vlisovaný pod tlakom do uzavretej formy, v ktorej sa nachádza HIO. Technológia vstrekovania je podobná lisovaniu. Technologický rozdiel je v aplikácii polyméru, ktorý je rozpustený. Do uzavretej formy je určité množstvo aplikované vstreknutím

cez trysku pôsobením piestu. [1] Nehermetické plastové púzdro HIO je možné vidieť na obrázku 1.3

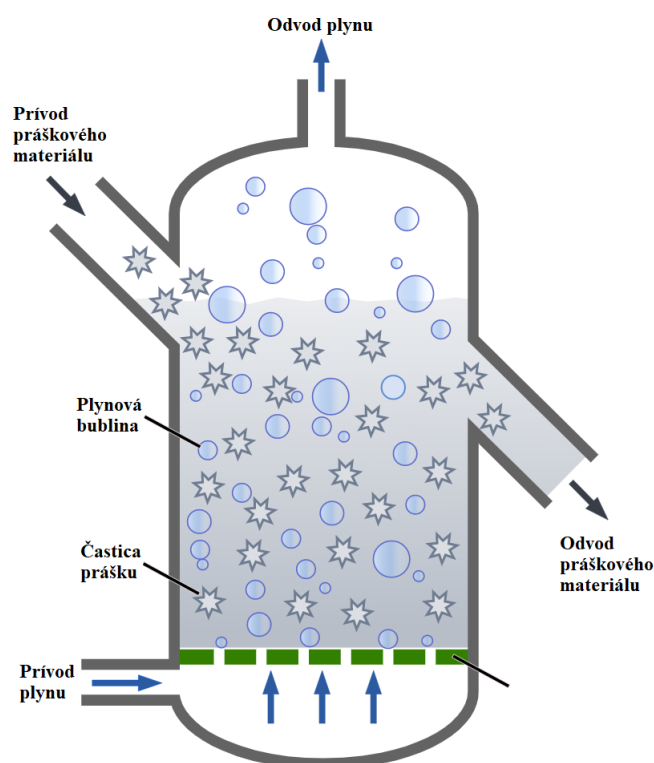


Obr. 1.3: Nehermetické plastové púzdro HIO [3]

Ďalšou využívanou metódou pri nehermetickom púzdrení je nanosenie organických materiálov na HIO pomocou fluidizačných zariadení. Obidve metódy púzdrenia HIO sú používané pri hromadnej výrobe. Tieto procesy púzdrenia sa dajú veľmi dobre optimalizovať, čím sa dá rapídne znížiť cena púzdra. Nehermetické púzdra sú mechanicky aj chemicky značne odolné, no nie sú vhodné do agresívnych prostredí. Na ich tvrdý povrch sa dá dobre aplikovať farba a sú vhodné na potlač.

2 Fluidizácia

Fluidizácia je proces podobný skvapalneniu, kedy je práškový materiál uvedený do stavu vznosu a jeho skupenstvo podobné pevnému sa zmení na dynamický tekutý stav. Tento stav sa nazýva pseudofluidný. Pri tomto stave sa práškové častice chovajú veľmi podobne ako kvapalina. V procese fluidizácie je tento stav podstatou celého procesu, pretože sa využíva pri nanášaní organických materiálov na predom nahriate teleso, ktoré sa vloží do práškového materiálu v pseudofluidnom stave.[4] Teoretický model fluidizačného zariadenia je uvedený na obrázku 2.1.



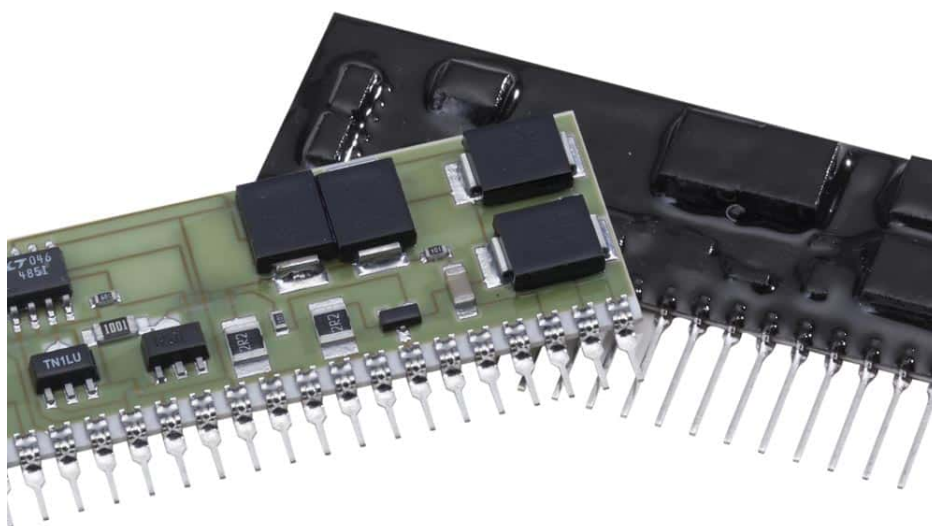
Obr. 2.1: Teoretický model fluidizačného zariadenia [4]

2.1 Púzdrenie technológiou fluidizácie

Pri technológií púzdrenia fluidizáciou sa využívajú organické práškové materiály pre vytvorenie elektricky a mechanicky vhodného povrchu na substráte HIO, ktorý bude slúžiť ako ochranné púzdro obvodu. Výraznou výhodou tohoto procesu púzdrenia je cena a veľmi dobrá reprodukovateľnosť v prípade hromadnej výroby.

Púzdrenie procesom fluidizácie je jednou z možností pri využívaní nehermetických púzdier pre HIO. Pri dosiahnutí pseudofluidného stavu sa nahriaty substrát ponorí do práškového materiálu a následne sa vytiahne. Tak sa na celý substrát naniesie

prášková farba, ktorá sa podľa predom nastavených parametrov nechá pri určitej teplote vytvrdnúť. Cieľom tohoto procesu, ktorý sa niekoľkokrát opakuje, je zapúzdriť kompletný substrát HIO do organického materiálu, ktorý ho bude chrániť pred negatívnymi vonkajšími mechanickými vplyvmi. Tie by mohli spôsobiť poškodenie komponentov a celého HIO. HIO pred a po procese fluidizácie je uvedený na obrázku 2.2.



Obr. 2.2: HIO pred a po procese fluidizácie [5]

Proces púzdrenia má niekoľko častí. Kvôli mnohým vstupným premenným pri technologickom procese je dôležité venovať každej časti dostatočnú pozornosť pre vytvorenie optimálneho reprodukovateľného púzdra vyhovujúcej kvality. Nevyhnutnou súčasťou procesu je okrem vymenovaných častí aj korektné nastavenie fluidizačného zariadenia podľa parametrov prášku a materiálov použitých pri kompletizácii HIO.

2.2 Fluidizačné zariadenie a jeho princíp

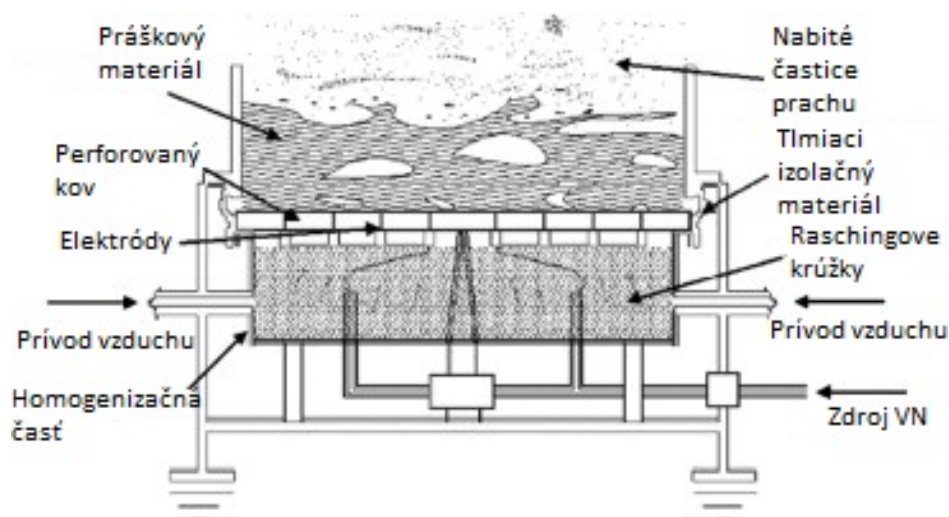
Púzdrenie procesom fluidizácie sa vykonáva pomocou fluidizačných zariadení, ktorých existujú v dnešnej dobe dva základné typy. Jeden typ zariadenia využíva na naniesenie farby elektrostatické pole a druhý typ zariadenia využíva ohrev. Obidva typy zariadení sú vo veľkej miere využívané, no každý typ má vďaka svojim vlastnostiam inú oblasť využitia.

2.2.1 Elektrostatické fluidizačné zariadenie

Prvý typ zariadenia využíva elektrostatické pole, pomocou ktorého sa vytvorí nad fluidizovaným materiálom istý prachový oblak. Cez toto prostredie prechádzajú diely pripojené na jeden pól zdroja vysokého napätia ktoré dosahuje 30 kV až 100 kV. Takto vysoké napájacie napätie je potrebné pre vytvorenie dostatočne silného elektrického pola. Druhý pól zdroja je pripojený ku nádobe v ktorej je umiestnený organický práškový materiál a ku vzduchovým tryskám. Do trysiek je vháňaný stlačený vzduch, ktorý prúdi cez difúzory a zaistuje vytvorenie pseudofluidného stavu. Keďže častice prášku reagujú na elektrické pole, tak sa prichytia na diely prechádzajúce cez prachový oblak. Prášok sa na týchto dieloch pomocou elektrostatiky prichytí a pokryje ich celý povrch. Takýto diel je v ďalšej fáze procesu nahriaty po určitý čas na predpísanú teplotu, aby sa nanosené častice rozpustili a vytvorili spojitý povlak farby.[12]

Toto zariadenie je vhodné pre sériovú výrobu a nanášanie materiálu jedným alebo maximálne dvoma opakovaniami procesu. Jeho výhoda spočíva v tom, že nie je potrebné vstupné diely predhrievať, čím sa ušetrí čas a energia. Podmienkou použitia tejto technológie a zároveň aj jeho nevýhoda je to, že objekt, ktorý vstupuje do procesu elektrostatickej fluidizácie, musí byť z vodivého materiálu, aby sa zaistilo dostatočné elektrostatické pole v jeho okolí. Z rovnakého dôvodu nie je vhodné proces opakovať viackrát, pretože nanášané prášky majú vysokú hodnotu dielektrickej pevnosti a pri viacerých opakovaníach by sa prášok na diel neprichytil.

Najčastejšie sa týmto procesom farebne pokrývajú kovové fittingy, siete, plechy, spružiny a iné menšie kovové diely. Teoretický model elektrostatického fluidizačného zariadenia je uvedený na obrázku 2.3.



Obr. 2.3: Teoretický model elektrostatického fluidizačného zariadenia [13]

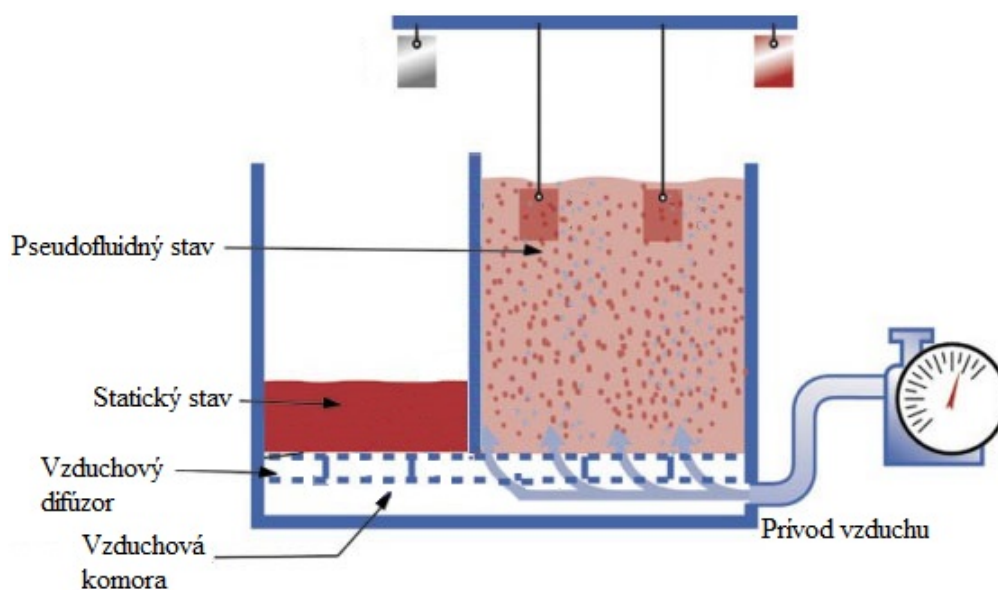
2.2.2 Fluidizačné zariadenie typu Gas-Solid

Druhý typ fluidizačného zariadenia pracuje podobne ako elektrostatické zariadenie, no nie je v ňom využité elektrostatické pole. Toto zariadenie pracuje tak, že do nádoby fluidizačného zariadenia sa nasype práškový materiál, ktorý sa pomocou stlačeného vzduchu privedie do pseudofluidného stavu. Vzduch je vháňaný cez difúzory, ktoré zaisťujú rovnomerné rozloženie prietoku vzduchu celou nádobou. V niektorých prípadoch sa pre rovnomernejšie rozloženie častíc a jednoduchšie nastavenie pseudofluidného stavu využíva vibračné zariadenie prichytené na spodnú časť fluidizačnej nádoby.

Po dosiahnutí pseudofluidného stavu sa do nádoby vloží teleso, ktoré sa má pokryť organickým materiálom. Rozdiel oproti elektrostatickému typu zariadenia je ten, že teleso, ktoré sa vkladá do fluidizačnej nádoby musí byť predohriate na stanovenú teplotu podľa použitého materiálu. Po vložení telesa do nádoby práškové častice obalia jeho povrch a následne sa teleso vytiahne von. Po vytiahnutí sa musí fluidizovaný predmet opäť zahrievať po predpísanú dobu, aby sa práškové častice spojili a vytvorili spojitý povrch.

Výhodou tohoto typu zariadenia je to, že je možné nanášať vrstvy materiálu na telesá, ktoré nie sú iba kovové ako to je pri elektrostatickom zariadení. Veľkou výhodou tejto technológie je aj možnosť mnohonásobného opakovania procesu čo túto metódu predurčuje ku tvorbe hrubších a odolnejších ochranných vrstiev. Tento typ prístroja je vhodný na púzdrenie HIO a na farebné pokrývanie keramických a menších kovových dielov. Nevýhoda tohoto zariadenia spočíva vo vyššej spotrebe elektrickej energie a väčšej časovej náročnosti, keďže je potrebné diely vstupujúce do procesu predom nahriať.

Teoretický model tohoto typu fluidizačného zariadenia je uvedený na obrázku 2.4. Fluidizačná nádoba je na obrázku rozdelená na dve časti. V ľavej časti nádoby je možné vidieť statický stav organického prášku, kedy je zariadenie prakticky vypnuté. Úroveň prášku v statickom stave je o dosť nižšie ako na pravej strane obrázku, kde je zobrazený dynamický tekutý stav. Fluidizačná nádoba musí teda byť dostatočne vysoká, aby nedošlo ku vysýpaniu prášku do okolia. Na pravej strane je zobrazený stav, kedy je zariadenie v prevádzke. Konštrukcia prívodu vzduchu a fluidizačnej nádoby sa skoro úplne zhoduje s elektrostatickým typom zariadenia. Pri elektrostatickom type je konštrukcia doplnená o izolačné podložky a zdroj vysokého napätia. Na obrázku 2.4 nie je zobrazené vibračné zariadenie, ktoré by bolo umiestnené na spodnej strane vzduchovej komory.



Obr. 2.4: Teoretický model fluidizačného zariadenia [14]

2.3 Príprava HIO na fluidizáciu

Na začiatku do procesu fluidizácie vstupuje hotový otestovaný HIO, ktorý už obsahuje osadené všetky aktívne aj pasívne komponenty a prešiel elektrickou kontrolou. HIO v tomto stave je následne podrobený optickej kontrole, kde sa zisťujú prípadné nedostatky, ktoré by mohli nepriaznivo vyplývať na proces fluidizácie. Ide hlavne o nečistoty a mastnotu na substráte, ktorá sa mohla na substrát dostať nevhodnou manipuláciou, prípadne vplyvmi nedostatočnej čistoty prostredia. Tieto faktory môžu pri procese nanášania práškoveho materiálu spôsobovať nedostatočnú adhéziu substrátu a organický povlak sa teda nemusí na určité časti HIO naniesť. V takomto prípade je pri výslednej kontrole takto zapúzdrený HIO označený ako chybný a je vyradený z produkcie.

Ďalším krokom predprípravy HIO je izolácia vývodov. Pri procesnom kroku, kedy je obvod vložený do práškoveho materiálu, je veľmi pravdepodobné, že častice prášku sa dostanú aj ku kovovým vývodom HIO. To môže spôsobovať problémy pri osádzaní a spájkovaní vývodov obvodu, pretože práškový materiál je nevodivý a nie je ho možné spájať. Pri predchádzaní problémom so spoľahlivosťou pri spájkovaní a osádzaní HIO je potrebné zamedziť nanieseniu častíc farby na vývody.

Takto pripravený HIO je vhodný na fluidizáciu a môže sa presunúť ku ďalšiemu procesnému kroku.

2.4 Voľba práškoveho materiálu

Pri procese púzdrenia je najdôležitejším technologickým bodom voľba vhodného materiálu púzdra. Proces fluidizácie vyžaduje vhodný organický práškový materiál. Väčšina bežne používaných práškov je vyrobená na báze epoxidovej živice. Tá poskytuje dobrú príľnavosť práškoveho materiálu ku substrátu a zároveň má vhodné mechanické a elektrické vlastnosti pre použitie pri púzdrení. Pri výbere konkrétneho materiálu je potrebné zobrať do úvahy všetky požiadavky, ktoré sú od výsledného púzdra očakávané. Základné parametre púzdriaceho materiálu, ktoré je nutné stanoviť sú:

1. maximálna teplota substrátu pri fluidizácii,
2. hrúbka vrstvy,
3. mechanická odolnosť,
4. dielektrická pevnosť

2.4.1 Maximálna teplota substrátu

Parameter maximálnej teploty substrátu pri procese fluidizácie je najzákladnejším parametrom pri výbere materiálu na púzdrenie. Táto teplota sa odvíja od mnohých faktorov, ktoré sú veľmi variabilné. Pri vysokej zvolenej teplote, na ktorú sa môže hotový substrát HIO nahriať môže dôjsť ku poškodeniu HIO a prvkov, ktoré sú na ňom osadené. Vyššia teplota je ale zároveň výhodná pri procese fluidizácie, pretože pri vyšších teplotách je možné na HIO vytvoriť hrubšiu vrstvu púzdriaceho materiálu za kratší čas. Pri veľmi nízkej teplote nahriatia HIO nemusí ku fluidizácii vôbec dôjsť alebo bude vytvorenie požadovanej hrúbky púzdra trvať veľmi dlho.

Maximálna teplota, na ktorú sa pred fluidizáciou môže nahriať substrát sa odvíja od materiálov použitých pri výrobe HIO. Keďže pri nahrievaní substrátu pred fluidizáciou a pri vytvrdzovaní je snaha zamedziť poškodeniu obvodu, je potrebné poznať parametre materiálov použitých pri výrobe HIO. Tak je možné bezpečne určiť maximálnu teplotu nahriatia substrátu a predísť poškodeniu obvodu. Najčastejšie sa teplota určuje podľa najnižšej výpalnej teploty natlačenej pasty, podľa teploty tavenia spájky a teploty, ktorú vydržia elektrické komponenty. Pri prekročení týchto teplôt by mohlo dôjsť ku poškodeniu spájkovaných spojov a tým pádom ku oddeleniu súčiastok, taktiež ku poškodeniu niektorej vrstvy HIO alebo ku poškodeniu osadených súčiastok. Okrem maximálnych teplôt je potrebné prihliadať na vlastnosti súčiastok a na maximálne teploty a časové intervaly, ktoré vydržia pri určitej teplote.

Hrubovrstvé pasty majú teplotu výpalu okolo 850 °C, čo nebude pri fluidizácii a vytvrdzovaní predstavovať problém, pretože na takúto vysokú teplotu nie sú organické prášky prispôsobené. Väčšina bezolovnatých spájk má teplotu tavenia v rozmedzí

215 °C – 220 °C, olovnaté pájky sa tavia pri teplote 180 °C – 190 °C. Tento fakt už predstavuje problém a teplota tavenia pájky teda udáva možnú hraničnú teplotu, pod ktorú je možné substrát HIO zahriať tak, aby nedošlo ku poškodeniu. Teplotné parametre niektorých práškov Scotchcast od spoločnosti 3M sú uvedené v tabuľke 2.1.

Tab. 2.1: Tabuľka teploty predhrevu a vytvrdzovania práškov 3M Scotchcast [6, 7, 8, 9]

Typ prášku	260	262	263	265
Teplota predhrevu (min / max)	150 °C/260 °C	150 °C/260 °C	150 °C/263 °C	163 °C/232 °C
Teplota a čas vytvrdzovania	149 °C / 30 m	149 °C / 40 m	149 °C / 30 m	149 °C / 60 m
	177 °C / 10 m	177 °C / 20 m	177 °C / 10 m	177 °C / 20 m
	204 °C / 45 s	204 °C / 60 s	204 °C / 30 s	204 °C / 5 m
	232 °C / 20 s	232 °C / 30 s	232 °C / 20 s	232 °C / 2 m

Z tabuľky 2.1, sa dá vyčítať, že intervaly teploty predhrevu aj vytvrdzovania sú v relatívne veľkom rozmedzí. S rastúcou teplotou sa rapídne zmenšuje čas potrebný na vytvrdzovanie, čo je pri nanášaní viacerých vrstiev materiálu rozhodujúci faktor. Za predpokladu že hraničnú teplotu udáva teplota tavenia spájky, tak v prípade použitia olovnatej spájkovacej zliatiny sa volia nižšie teploty a vytvrdzovanie by trvalo v rádoch desiatok minút. Pri použití bezolovnatých zliatin sa môže ísť s teplotou vyššie a čas vytvrdzovania by sa pohyboval v rádoch desiatok sekúnd. Teplotu je teda potrebné veľmi dôkladne zvoliť a zvážiť všetky negatívne a pozitívne efekty, ktoré môžu nastať.

2.4.2 Hrúbka vrstvy

Ďalším podstatným parametrom pri voľbe vhodného púzdiaceho materiálu je hrúbka vrstvy. Pri bežnej elektronike sa na hrúbku vrstvy neprihliada, keďže nanosená vrstva má obvod iba chrániť. V niektorých oblastiach použitia HIO je požadovaná hrubšia vrstva fluidizovaného materiálu, čo môže byť vyžadované napríklad pre lepšiu odolnosť HIO voči mechanickému poškodeniu alebo pre lepšie dielektrické parametre.

V katalógových listoch materiálov vhodných na fluidizáciu je uvedených mnoho parametrov, ktoré boli merané pri určitej hrúbke nanesej vrstvy. Pri nanášaní hrubších vrstiev môže byť výsledné púzdro integrovaného obvodu veľmi krehké a pri tepelnom namáhaní nad predpísané limity sa na povrchu materiálu môžu objaviť praskliny. Naopak, ak sa nanášajú iba veľmi tenké vrstvy organického materiálu, púzdro nemusí spĺňať všetky požiadavky podľa technickej dokumentácie. S hrúbkou fluidizovanej vrstvy taktiež rastie technologická náročnosť procesu a predlžuje sa

výrobný čas. HIO je počas nanášania hrubších vrstiev materiálu veľmi tepelne zaťažovaný a môžu sa v ňom objaviť chyby. Hlavne v spájkovaných spojoch a pri súčiastkách na ktoré tepelné namáhanie vplýva veľmi negatívne. Z tohoto dôvodu sa na substrátoch HIO často nevyužívajú elektrolytické kondenzátory.

2.4.3 Mechanická odolnosť

Mechanická odolnosť úzko súvisí s hrúbkou vrstvy, no každý organický materiál vhodný pre fluidizáciu má v technickom popise uvedené hodnoty, ktoré mechanickú odolnosť bližšie špecifikujú. Najčastejšie ide o parameter odolnosti voči rázu (Impact Resistance), ktorého jednotka je $[J]$, $[inch - lbs]$ a parameter odolnosti voči oderu (Abrasion Resistance), ktorého jednotka je $[g]$. Tieto údaje sú určené podľa skúšky uvedenej v katalógovom liste. Pre prášok 3M Scotchcast 260 je to norma ASTM na testovanie odolnosti voči oderu. Na odolnosť voči rázu spoločnosť udáva vlastnú meráciu metódou a normu. [9]

Skúška voči oderu sa prevádza pomocou niekoľkých predom definovaných cyklov, kde sa vzorka vložená do prístroja skúša na definovanej ploche odieraním poškodiť. Na konci testu sa odváži množstvo materiálu, ktoré ubudlo zo skúšaného objektu, čím sa určí odolnosť voči oderu. [10]

Skúška voči rázu prebieha pomocou testov Izod a Charpy. V priebehu skúšky sa zdvihne na skúšobnom prístroji rameno do určitej výšky a spustí sa na vzorok, do ktorého narazí. Z nameraných údajov a prednastavených parametrov skúšky sa dá vypočítať maximálna odolnosť materiálu voči rázu. [11]

Parametre mechanickej odolnosti práškov 3M Scotchcast sú uvedené v tabuľke 2.2

Tab. 2.2: Tabuľka mechanickej odolnosti práškov 3M Scotchcast [6, 7, 8, 9]

Typ prášku	260	262	263	265
Odolnosť voči oderu	0,08 g	— — —	0,06 g	0,2 g
Odolnosť voči rázu	100 inch-lbs	100 inch-lbs	100 inch-lbs	160 inch-lbs

2.4.4 Dielektrická pevnosť

Dielektrická pevnosť je veličina, ktorá vyjadruje odolnosť materiálu voči účinkom elektrického pola. Táto veličina je rozhodujúcou pre kvalifikáciu izolantov. Hodnota dielektrickej pevnosti udáva napätie, pri ktorom dôjde k prierazu a materiál sa stane

vodivý. Dielektrická pevnosť sa pri práškových materiáloch udáva v jednotke $[V/mil]$ alebo $[V/mm]$.

V prípade použitia HIO v prostredí, kde sa vyskytuje vysoké napätie, ktoré by mohlo obvod poškodiť, je vhodné integrovaný obvod zápúzdriť do materiálu, ktorý bude mať dostatočnú dielektrickú pevnosť. Tento parameter sa dá zvyšovať vhodnou voľbou prášku, kde sa podľa katalógového listu vyberie materiál. Druhou možnosťou je zväčšenie hrúbky nanesej fluidizovanej vrstvy, čím sa zvýši dielektrická pevnosť púzdra. Samozrejme v prípade zväčšovania hrúbky vrstvy sa musia brať do úvahy ďalšie pozitívne a negatívne faktory, ktoré sa pri zvyšovaní hrúbky vyskytujú.

Väčšina práškových materiálov na púzdrenie obvodov má dostatočne dobrú dielektrickú pevnosť už pri veľmi tenkých vrstvách. Dielektrické parametre práškov 3M Scotchcast sú uvedené v tabuľke 2.3

Tab. 2.3: Dielektrické parametre práškov 3M Scotchcast [6, 7, 8, 9]

Typ prášku	260	262	263	265
Dielektrická pevnosť	1000 V/mil	1000 V/mil	1000 V/mil	1300 V/mil

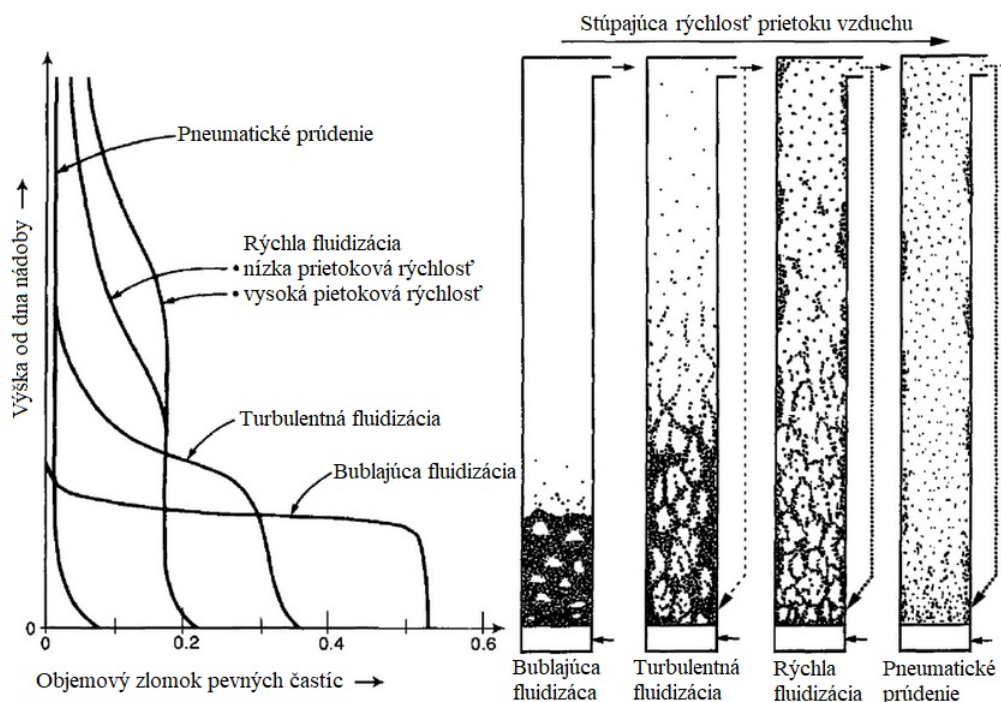
2.5 Nastavenie fluidizačného zariadenia

Pre optimálny výsledok fluidizácie je potrebné fluidizačnému zariadeniu nastaviť niekoľko parametrov, ktorými sú:

1. prietok vzduchu a vibrácie,
2. teplota a čas predhrevu,
3. čas fluidizácie,
4. teplota a čas vytvrdnutia

2.5.1 Prietok vzduchu a vibrácie

Prvým parametrom, ktorý sa na fluidizačnom zariadení musí precízne nastaviť je prietok vzduchu. Vzduch vo fluidizačnom zariadení zabezpečuje proces fluidizácie, keďže jeho správne nastavenie uvádza práškový materiál do pseudofluidného stavu. Stav práškového materiálu pri rôznych nastaveniach prietoku vzduchu je uvedený na obrázku 2.5.



Obr. 2.5: Stav prášku pri rôznych nastaveniach prietoku vzduchu [15]

Z obrázku je vidieť, že práškový materiál sa pri rôznom prietoku vzduchu správa inak. Pri veľmi vysokom prietoku vzduchu dochádza ku pneumatickému prenosu materiálu a prášok je vytláčaný von z nádoby, čo nie je pre Gas-Solid fluidizáciu vhodné. Pri veľmi malom prietoku vzduchu ku pseudofluidnému stavu nemusí vôbec dôjsť. Pre tento typ fluidizácie je najvhodnejší bublajúci stav, kedy sa vzduch pri menších rýchlostiach preháňa cez prášok, ktorý sa ľahko dostane do dynamického tekutého stavu a nedostáva sa von z nádoby. Na nastavenie presného prietoku vzduchu sa využíva redukčný ventil, ktorým sa nastaví požadovaný prietok. Ten sa väčšinou zobrazuje aj na meracích prístrojoch, ktoré sú ku redukčnému ventilu pripevnené. Prietok sa väčšinou nastavuje ručne, keďže s rôznym objemom prášku sa dosiahne pseudofluidný bublajúci stav vždy pri inej hodnote prietoku vzduchu.

Pri veľmi malých prietokoch vzduchu a otváraní vzduchových ventilov môže dôjsť ku javu, kedy sa práškový materiál javí ako jeden celok a pri vpustení vzduchu pod prášok sa všetok materiál nadvihne a vysype z nádoby. Tomuto javu sa dá predísť použitím vibračného zariadenia upevneného ku fluidizačnej nádobe. Pri nastavovaní frekvencie vibrácií je vhodné vibrácie nastaviť tak, že prášok sa pri vibráciách v nádobe viditeľne hýbe. Nie je teda vhodné ísť ku veľmi vysokým frekvenciám, ktoré by prášok nemuseli vôbec rozpochybovať. Vibrácie taktiež pomáhajú počas pseudofluidného stavu. Vďaka nim je prášok v nádobe oveľa rovnomernejšie rozložený a dochádza ku zmenšeniu procesných chýb.

2.5.2 Teplota a čas predhrevu

Teplota a čas predhrevu sa pri fluidizácii musí nastaviť s ohľadom na použitý prášok a materiál pri tvorbe a kompletizácii HIO. Ako je uvedené v kapitole o maximálnej teplote substrátu, faktorov ktoré ovplyvňujú voľbu teploty fluidizácie je mnoho, no obmedzujúci faktor býva väčšinou teplota tavenia spájkovacej zliatiny. Z tohoto dôvodu nie je možné ísť s teplotami veľmi vysoko, čím sa predlžuje čas fluidizácie. Teploty predohrevu sa pohybujú pri HIO väčšinou okolo $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, podľa použitej spájkovacej zliatiny.

Čas predohrevu HIO je obtiažne určiť presne, keďže na substráte sa nachádza množstvo komponentov, z ktorých má každý inú tepelnú kapacitu a každý absorbuje teplo inak. Je preto vhodné čas predohrevu predĺžiť tak, aby bolo zaručené, že substrát sa aj s komponentmi dostatočne nahriala. Dostatočný predohrev je dôležitý na to, aby sa na HIO dobre prichytil púzdiaci materiál a nedošlo tak ku procesnej chybe.

2.5.3 Čas fluidizácie

Po nastavení teploty a času predhrevu nasleduje čas fluidizácie. Tento čas určuje, po akú dlhú dobu bude predhriaty HIO vložený do fluidizačnej nádoby, kde sa nachádza organický materiál už v dynamickom tekutom stave.

Čím dlhší čas sa zvolí, tým viac častíc sa prichytí na substrát. Ak však bude tento čas veľmi dlhý, tak na substrát sa nanesie zbytočne veľké množstvo prášku, ktorý nebude dostatočne dobre prichytený a môžu tak vzniknúť defekty. Netreba zabúdať, že pôsobením vzduchu vo fluidizačnej nádobe objekt, na ktorý sa nanáša práškový materiál chladne a po istom čase sa častice prášku prestanú prichytávať.

Pri príliš krátkom čase fluidizácie sa nemusí organický materiál na HIO dostatočne dobre naniesť a substrát nemusí byť dobre pokrytý. V katalógových listoch nie je uvedený údaj o dĺžke fluidizácie, pretože pre každý objekt je tento čas rozdielny. Technický list pre prášky 3M Scotchcast uvádza že čas fluidizácie je najlepšie vyskúšať a optimalizovať pomocou experimentu. [8]

2.5.4 Teplota a čas vytvrdnutia

Po vytiahnutí HIO z fluidizačnej nádoby je potrebné nanesený práškový materiál nechať vytvrdnúť. Hodnoty a časy pre vytvrdnutie práškov 3M Scotchcast sú uvedené v tabuľke 2.1.

Ohrievanie pri vytvrdzovaní je často realizované pomocou elektrických ohrevných panelov alebo taktiež pomocou klasických odporových telies. Kvôli zamedzeniu chyby, pri vytvrdzovaní naneseného materiálu, sa používa ohrev objektu z viacerých

strán. Pri menších (2D) objektoch, akými môže byť aj HIO, je postačujúci ohrev z dvoch strán. Pri väčších objektoch sa používa ohrev z viacerých strán. Pri takomto riešení ohrevu vzniká problém s rovnomerným rozložením tepla. V takomto prípade sa používa viacero teplotných senzorov, ktoré sú usporiadané tak, aby bolo možné vytvoriť si predstavu o rovnomernosti ohrievania telesa. Pre rovnomernejšie rozloženie teploty by sa dal použiť ventilátor, ktorý by zabezpečoval prúdenie vzduchu čím by sa teplota ohrevu vyrovnala, no to pri vytvrdzovaní nie je možné a mohlo by dôjsť ku vzniku vzduchových bublín alebo iných chýb na fluidizovanom povrchu.

2.6 Výsledná kontrola

Po procese fluidizácie nasleduje posledný technologický krok, ktorým je výsledná kontrola vytvorenej vrstvy. Pri tejto kontrole sa dbá najmä na správne pokrytie telesa nanášanou farbou. Problémy môžu nastať v ostrých miestach a zlomoch, akými sú napríklad okraje substrátu HIO. Ďalším problémom, ktorý môže nastať, sú vzduchové bubliny. Tie sa pri procese fluidizácie môžu dostať pod fluidizovanú vrstvu. Pri masťnom povrchu sa na niektoré časti substrátu nemusí materiál prichytiť, čo spôsobuje odkryté miesta na substráte. Taktiež treba dbať na správny estetický vzhľad nanesej vrstvy po vytvrdnutí organického materiálu. Pri práškoch 3M Scotchcast by mal byť výsledný povrch hladký a práškové častice by sa nemali na povrchu vyskytovať. Samozrejme všetko závisí od použitého prášku a použitia správnych technologických krokov pri fluidizácii. Na zamedzenie rôznych technologických chýb sa používajú prášky, ktoré majú dobrú priľnavosť ku materiálu a dobré krytie.

Pri HIO sa po zapúzdrení musí previesť opäť elektrická skúška celého obvodu. Pri procese fluidizácie sú totiž všetky komponenty a substrát tepelne namáhané. Môžu sa teda vyskytnúť praskliny na vodivom alebo odporovom motíve, studené spoje spôsobené odtečením alebo popraskaním spájky a taktiež nefunkčné komponenty, u ktorých sa tepelným namáhaním prejavili výrobné vady alebo sa inak tepelne poškodili.

Aby sa predišlo elektrickým vadám, je vhodné voliť čo najnižšiu teplotu pri predhrebe a následnom vytvrdzovaní, aby bol HIO čo najmenej tepelne namáhaný.

3 Návrh fluidizačného zariadenia

Praktická časť tejto práce sa zaoberá návrhom mechanickej a elektrickej konštrukcie fluidizačného zariadenia typu gas-solid, ktoré bude slúžiť na púzdrenie HIO konštruovaných na keramickom substráte. Toto zariadenie bude plne automatické a bude možné nastaviť parametre tak, aby bolo vhodné pre rôzne typy organických púzdriacich materiálov a pre HIO o veľkosti 2 a 4 palce.

3.1 Návrh mechanickej konštrukcie

Keďže sa pri fluidizácii uplatňuje celý rad fyzikálnych zákonov a princípov, je pri návrhu mechanickej konštrukcie potrebné dbať na všetky detaily. Vhodným návrhom jednotlivých mechanických dielov sa musí zabezpečiť pri správnom nastavení prietoku vzduchu dosiahnutie pseudofluidného stavu organického materiálu.

Fluidizačné zariadenie typu gas-solid pozostáva z pohľadu mechanickej konštrukcie z nasledujúcich častí:

1. fluidizačná nádoba,
2. filter pevných častíc,
3. vzduchový difúzor,
4. dopravník substrátov,
5. úchyt substrátu,
6. riadenie a prívod plynu,
7. podporná konštrukcia

Z dôvodu mechanického namáhania určitých častí zariadenia gas-solid bola zvolená konštrukcia mechanických častí z kovových materiálov, ktoré sú pevné, veľmi dobre strojovo obrábatelné a cenovo sú taktiež dostupné.

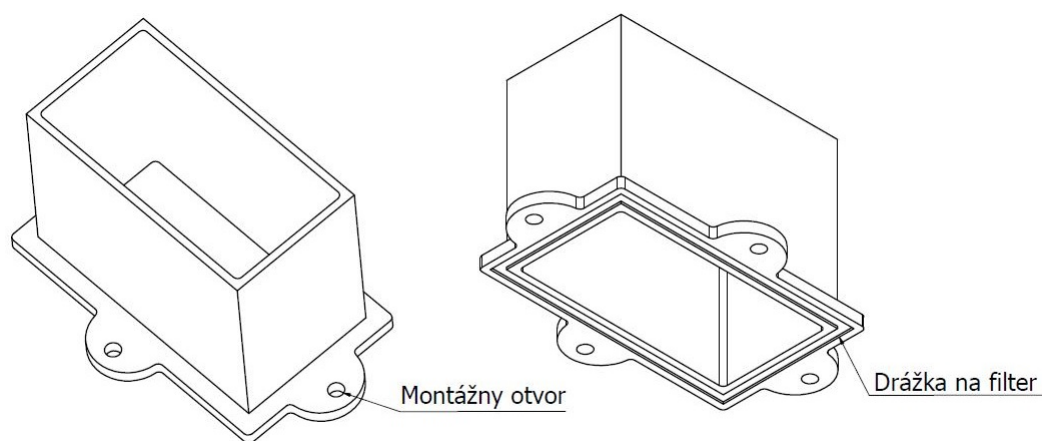
3.1.1 Fluidizačná nádoba

Fluidizačná nádoba je najvrchnejšia časť celého zariadenia, v ktorej prebieha celý proces fluidizácie. Pri návrhu konštrukcie fluidizačnej nádoby je nutné brať do úvahy základný faktor a tým je maximálny rozmer objektu, ktorý bude podrobený fluidizácii. Keďže sa v práci zameriavame na púzdrenie HIO, z dostupných zdrojov sa zistilo že najväčší bežne používaný keramický substrát na výrobu HIO má rozmery $2'' \times 2''$ čo zodpovedá metrickému rozmeru $5,08 \text{ cm} \times 5,08 \text{ cm}$. Dĺžka nádoby v tomto prípade nebude predom daná a nebude na nej veľmi záležať.

Výška fluidizačnej nádoby sa zvolí podľa dvoch faktorov, a to podľa rozmeru substrátu a podľa štandardného objemu prášku, ktorý bude v nádobe. Z týchto vstupných premenných je možné približne vypočítať maximálnu výšku hladiny

materiálu pri pseudofluidnom stave. Tá sa udáva pre bubľajúcu fluidizáciu ako 2 až 2,5 násobok výšky hladiny organického práškoveho materiálu v statickom stave. Samozrejmosťou je, že pri vyššom prietoku vzduchu sa bude zvyšovať aj výška hladiny, preto z bezpečnostných dôvodov a kvôli možnému úniku materiálu je vhodné zvoliť väčší rozmer nádoby.

Pre navrhované zariadenie boli zvolené rozmery fluidizačnej nádoby na $10 \times 8 \times 5 \text{ cm}$. Nádoba nemá dno, ale je z obidvoch strán otvorená. Na jej bokoch sú umiestnené úchyty s dierami na šróby. Navrhnutý prototyp fluidizačnej nádoby je uvedený na obrázku 3.1. Tento aj všetky nasledujúce obrázky návrhu zariadenia boli vytvorené v programe Autodesk Inventor.



Obr. 3.1: Koncept fluidizačnej nádoby

Prototyp vychádza z požiadaviek a praktických aspektov konštrukcie, kde zo spodnej strany bude pomocou šróby cez úchyty nádoba upevnená na ďalšiu časť konštrukcie. Tento koncept je praktický aj z pohľadu prípadnej výmeny dielov alebo čistenia zariadenia, kedy je možné samostatný diel odobrať a vyčistiť alebo v prípade poškodenia vymeniť za náhradný. Z dôvodu možného tepelného namáhania alebo poškodenia fluidizačnej vane horúcim substrátom, je nádobu vhodné vyrobiť z hliníku alebo iného kovového materiálu, ktorý odoláva vyšším teplotám.

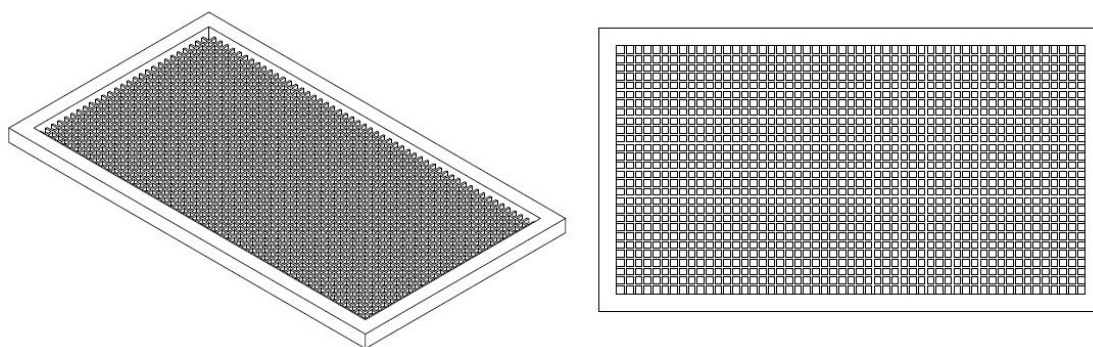
3.1.2 Filter pevných častíc

Filter pevných častíc má vo fluidizačnom zariadení úlohu filtrovať a neprepustiť do organického materiálu objekty z prívodu stlačeného vzduchu. Tie by sa mohli dostať do fluidizovanej vrstvy alebo pod ňu a spôsobiť defekty, čo by mohlo viesť k znefunkčneniu integrovaného obvodu.

V koncepcii zariadenia bol filter pevných častíc umiestnený priamo na spodnú plochu fluidizačnej vane. Filter, ktorý bolo spočiatku navrhnuté v zariadení použiť, bol vytvorený z kovovej sieťky obdĺžnikového tvaru s veľkosťou oka približne 1 mm. Tá sa mala umiestniť medzi difúzor a prívod vzduchu do zariadenia.

Pri návrhu fluidizačnej nádoby bolo riešené niekoľko konštrukčných problémov, pričom jedným z nich spočíval v prepadávaní prášku z fluidizačnej vane do ďalších častí zariadenia. Prepádávanie prášku by mohlo spôsobiť kompletne znečistenie vnútorných častí fluidizačného zariadenia, čo by mohlo viesť k jeho nefunkčnosti. Pri niektorých fluidizačných zariadeniach vo veľkovýrobe sa tento problém rieši rozobraním a vyčistením vnútorných častí po vypnutí prístroja. Tento postup je veľmi nepraktický a nevhodný. Pri častom rozoberaní a čistení zariadenia by dochádzalo ku degradácii mechanických dielov a spojov, čím by sa značne znížila životnosť celej mechanickej konštrukcie.

Riešením problému s prepádajúcimi časticami práškoveho materiálu sa prišlo ku výsledku, kedy sa prvotný filter pevných častíc prerobil tak, aby slúžil obojstranne. Jednak bude slúžiť ako filter proti znečisteniu organického práškoveho materiálu časticami z prívodu vzduchu, ale taktiež bude slúžiť ako filter proti prepádnutiu prášku dovnútra mechanickej konštrukcie. Koncept filtra pevných častíc je uvedený na obrázku 3.2. Prototyp filtra nie je nakreslený v reálnej mierke.



Obr. 3.2: Koncept filtra pevných častíc

Úprava prvotného návrhu filtra spočívala v použití ocelevej sieťky s diametrálne odlišným priemerom oka, ktoré bude menšie ako častica práškoveho materiálu. Tým sa zabezpečí filtrácia vzduchu do práškoveho materiálu ale taktiež sa zamedzí prepádnutiu práškoveho materiálu do vnútra zariadenia. Ďalej bolo na sieťku pridané po obvode gumené tesnenie, ktoré zamedzí úniku vzduchu a prášku zo zariadenia. Filter bol v zariadení premiestnený presne pod fluidizačnú vaňu. Tá má zo spodnej strany na sebe vytvorenú drážku, do ktorej sa filter umiestni. Pomocou šrób sa fluidizačná vaňa priskrutkuje ku ďalšiemu mechanickému dielu a tým zafixuje tesnenie.

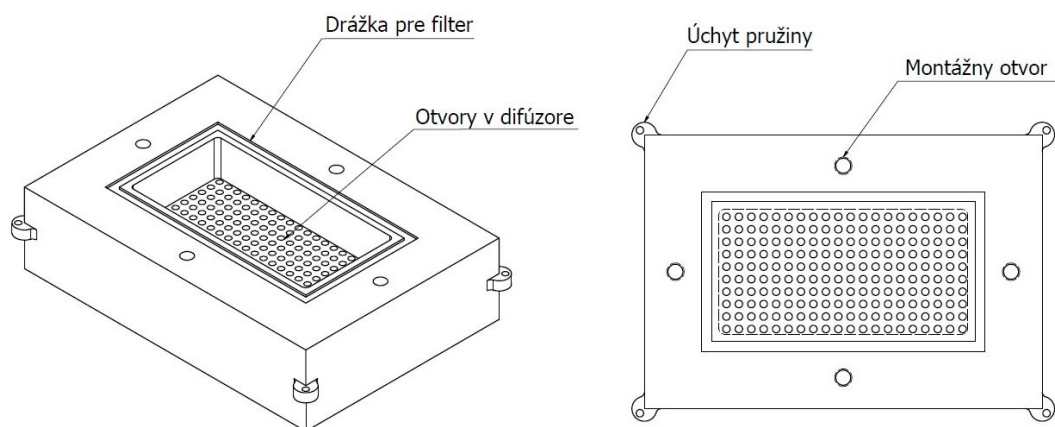
3.1.3 Vzduchový difúzor

Po uvedení organického práškoveho materiálu do pseudofluidného stavu, ktorý bude vhodný na púzdrenie HIO, sa objavuje problém, kedy je nutné dosiahnuť rovnomerný dynamický tekutý stav v celej nádobe. Pre dosiahnutie rovnomerného pseudofluidného stavu je potrebné mať v celej fluidizačnej vani rovnomerne rozložený prietok vzduchu.

V prvotnom návrhu sa uvažovalo o jednoduchom prívode vzduchu pomocou hadice, ktorá by bola pripojená ku komore pod vzduchovým filtrom. Ten by zabezpečil rovnomerné rozloženie prietoku vzduchu cez celú fluidizačnú vaň. Toto riešenie však nie je najlepšie, pretože pri vytvorení vzduchového kanálu v práškovom materiáli, by začal všetok vzduch unikať cez tento kanál. Problémom je taktiež iba jeden prívod vzduchu, ktorý na zabezpečenie rovnomerného prietoku vzduchu nestačí.

V druhej verzii sa uvažovalo o dvoch prívodoch vzduchu pomocou hadíc, čo by zabezpečovalo rovnomernejšie rozloženie tlaku. Toto riešenie taktiež nebolo vhodné a problém s únikom vzduchu cez jeden vzduchový kanál sa môže objaviť aj pri tomto riešení.

Výsledné riešenie pozostáva z dvoch častí. Prvou časťou riešenia je pridanie vzduchového difúzoru pod fluidizačnú vaň, kde sa nachádza vzduchový filter. Difúzor je vyrobený z hliníku, v ktorom sú v pravidelnej vzdialenosti navŕtané otvory. Z vrchnej aj spodnej časti sú do difúzora vytvorené drážky. Vrchná drážka je pre spodnú stranu vzduchového filtra a spodná drážka je pre tesnenie, cez ktoré je s difúzorom spojená vzduchová komora. Na nej sú vyvŕtané dva otvory, do ktorých sa priskrutkuje spojka na pripojenie hadíc s prívodom vzduchu. Difúzor má v sebe otvory, cez ktoré sa s ním spojí z vrchnej strany fluidizačná nádoba a zo spodnej strany vzduchová komora. Tá má na sebe rovnako ako fluidizačná vaň drážku na tesnenie a úchyty na šróby. Difúzor je uvedený na obrázku 3.3.

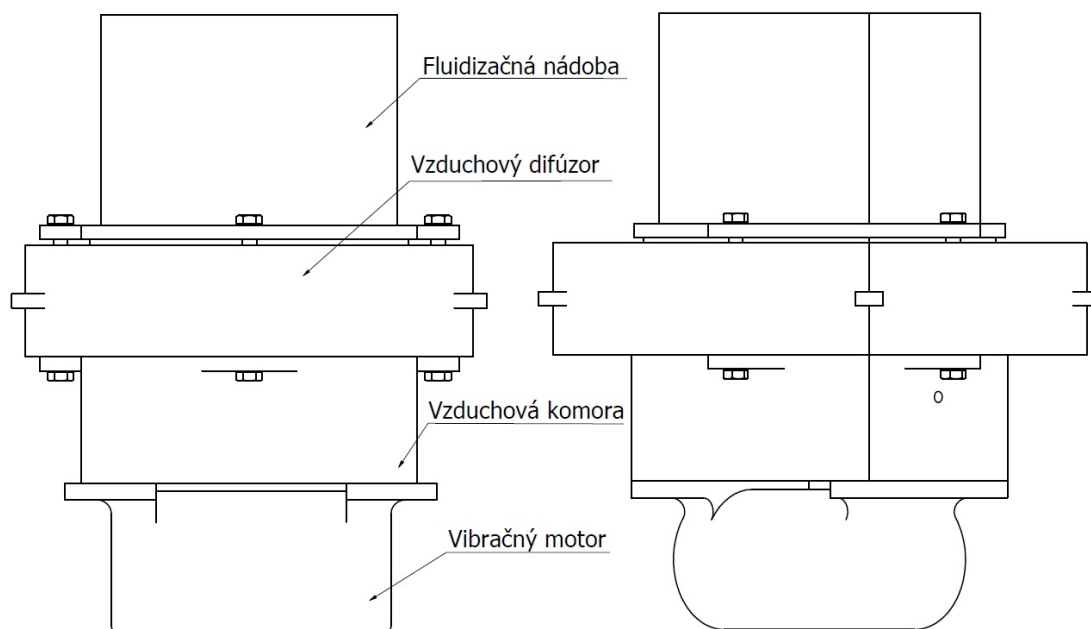


Obr. 3.3: Koncept vzduchového difúzora

Druhú časť riešenia tvorí idea, vďaka ktorej bolo vyriešených viacero problémov naraz. Prvým z problémov bola opäť rovnomernosť fluidizácie v nádobe. Po použití difúzora sa rovnomernosť diametrálne zvýšila, no stále bolo možné pozorovať občasné výchylky z rovnomerného stavu bublajúcej fluidizácie. Druhý problém je jav, ktorý je popísaný v teoretickej časti a nastáva pri spúšťaní fluidizačného zariadenia, kedy práškové častice neprepustia vzduch a chovajú sa ako jeden celok. Tento jav je pri štarte fluidizačného zariadenia nežiadúci, pretože spôsobuje nárazové nadvihnutie práškového materiálu, ktorý sa následne vysype z fluidizačnej nádoby.

Riešením druhého problému je použitie vibrácií, čím sa práškový materiál neustále pohybuje a preto nedochádza ku vysýpaniu prášku pri vpustení vzduchu do fluidizačnej vane. Zároveň sú vibrácie veľmi prospešné pre rovnomerné rozloženie vzduchu, ktorý cez organický materiál pri fluidizácii prúdi.

Vibrácie generuje vibračný motor upevnený na spodnej strane vzduchovej komory. Motor má na hriadeľ excentrickú záťaž, čím sa generujú vibrácie do celej mechanickej konštrukcie vane a difúzora. Tým však vzniká ďalší problém s uchytением celej konštrukcie tak, aby mohla nezávisle od ostatných častí zariadenia vibrovať. To sa vyriešilo pridaním úchytoz z bočných hrán difúzora, za ktoré bude držať na odpruženom mechanizme celá konštrukcia fluidizačnej vane. Vibračný motor je umiestnený v celoplastovom púzdre, aby nedošlo ku jeho znečisteniu a poškodeniu časticami organického materiálu. Celá konštrukcia difúzora, vzduchovej komory a vibračného motora je zobrazená na obrázku 3.4.

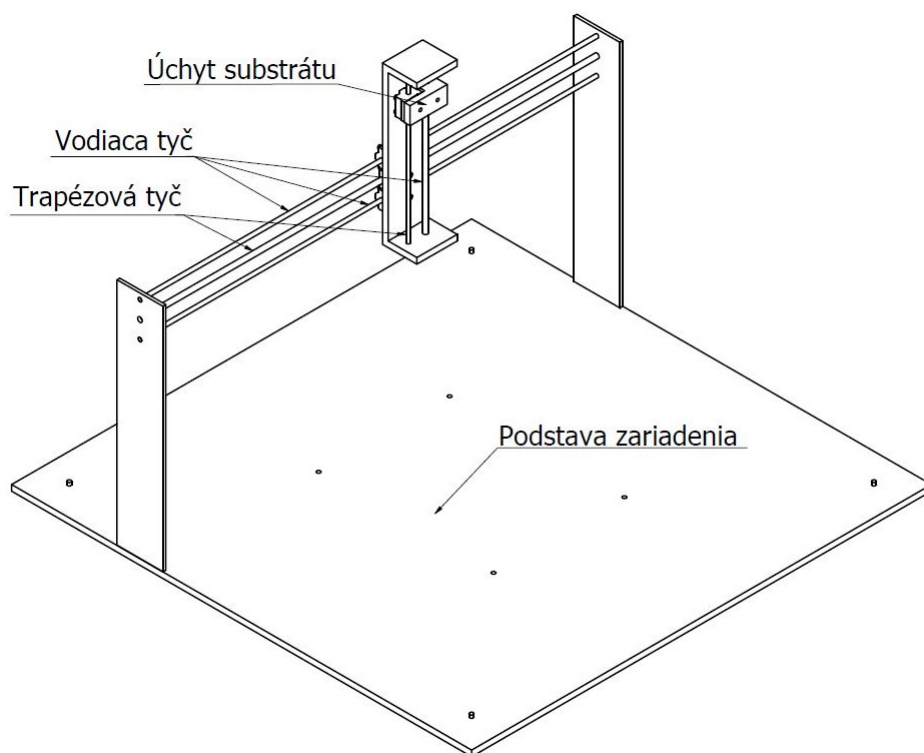


Obr. 3.4: Vzduchový difúzor s komorou a vibračným motorom

3.1.4 Dopravník substrátov

Z dôvodu, že celé zariadenie má byť automatické, v ďalšej fáze návrhu bolo potrebné navrhnuť dopravník substrátov, ktorý zabezpečí premiestnenie substrátu od miesta upevnenia na miesto predhrevu, do fluidizačnej vane a nakoniec na miesto, kde sa bude nanosená vrstva vytvrdzovať.

Ako vhodné riešenie sa vybrala doprava pomocou systému trapézových tyčí, ktoré budú poháňané motorom. Na dopravu boli zvolené dva systémy, keďže je potrebné zabezpečiť posun v dvoch osiach. Jedna os bude zabezpečovať posun od miesta upevnenia na miesto predhrevu a fluidizácie. Druhá os bude zabezpečovať posun substrátu po vertikálnej ose, čiže bude s ňou možné umiestňovať substrát do vnútra fluidizačnej nádoby. Pozdĺžne s trapézovou tyčou budú symetricky umiestnené podporné tyče, po ktorých sa bude pohybovať konštrukcia na linearsetoch. Navrhnutú konštrukciu je možné vidieť na obrázku 3.5.



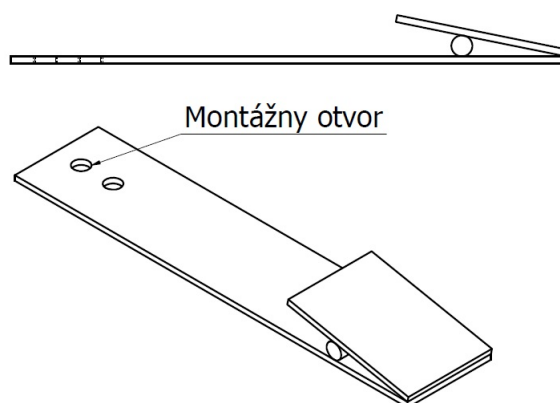
Obr. 3.5: Mechanická konštrukcia dopravníku substrátov

3.1.5 Úchyt substrátu

Pri príjazde dopravníka je nutné substrát vhodne upevniť, aby sa mohol dostať bez problémov ku ohrevu a fluidizačnej nádobe. Tento mechanizmus je potrebné realizovať tak, aby pri fluidizácii nedochádzalo ku tvorbe plôch, na ktorých nebude púzdiaci

materiál. Z toho vyplýva, že úchyt musí byť realizovaný tak, aby sa nedotýkal žiadnej časti keramického substrátu.

V návrhu bolo usilované o vyhľadanie spôsobu, ktorý bude vyhovovať tejto podmienke. Svorka musí zároveň mať vhodné mechanické vlastnosti, aby vydržala vyššiu teplotu, ktorej bude vystavená pri umiestnení substrátu do miesta predhrevu a do miesta následného vytvrdzovania púzdra. Výsledný prototyp svorky je zobrazený na obrázku 3.6.



Obr. 3.6: Prototyp svorky na uchytenie substrátu

V procese návrhu bol zohľadnený fakt, že všetky HIO, ktoré sa budú púzdriť procesom fluidizácie, budú mať pred procesom púzdrenia vytvorené kontaktné vývody. Z teoretickej časti je zrejmé, že tieto vývody musia byť kvôli čistote a spoľahlivosti izolované. Tieto dva vstupné údaje značne uľahčujú návrh a prototyp môže mať dizajn ako pružná mechanická svorka. Táto svorka bude prichytená ku konštrukcii dopravníku a HIO do nej bude pred púzdrením upevnený pomocou vývodov.

3.1.6 Riadenie prietoku a prívod plynu

Pre fluidizáciu a uvedenie práškoveho materiálu do dynamického tekutého stavu je neoddeliteľnou súčasťou celého zariadenia prívod a regulácia plynu. Pri predbežnom návrhu sa uvažovalo o plne automatickom riadení spúšťania a prietoku plynu. Tento návrh je však veľmi obtiažne realizovateľný. Problém pri elektronickej regulácii prietoku plynu spočíva v spätnej väzbe, ktorá by poskytovala informáciu o stave púzdriaceho práškoveho materiálu, pretože pri rôznom objeme prášku vo fluidizačnej nádobe dochádza ku bublajúcej fluidizácii pri rozdielnom prietoku vzduchu. Preto je najlepším riešením vždy skontrolovať stav prášku opticky a podľa toho nastaviť prietok plynu.

Ako vhodné riešenie sa preto zvolilo použitie manuálneho redukčného ventilu, ktorý bude pripojený ku prívodu vzduchu a z neho pôjde vzduch priamo hadicami do

vzduchovej komory. Na redukčnom ventile sa nachádza mechanický merací prístroj, ktorý poskytuje informáciu o aktuálnom tlaku vzduchu na prívide redukčného ventilu a o aktuálnom prietoku vzduchu cez ventil. Redukčný ventil je zobrazený na obrázku 3.7.



Obr. 3.7: Redukčný ventil s prietokomerom a tlakomerom [16]

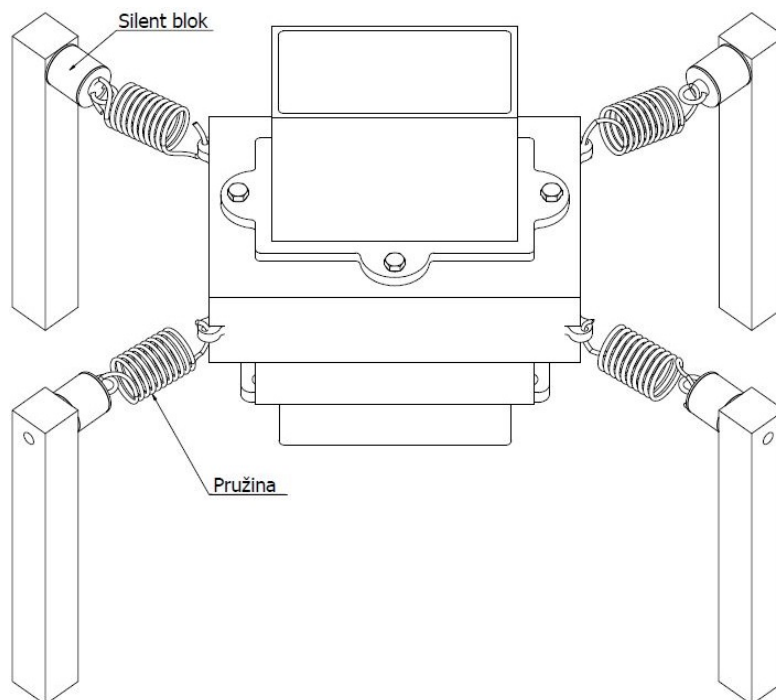
3.1.7 Podporná konštrukcia

Celková konštrukcia fluidizačného zariadenia je realizovaná z hliníkových dielov, ktoré budú spolu držať všetky časti fluidizačného zariadenia. Pri konštrukcii sa muselo myslieť na dostatočnú pevnosť konštrukcie a aj na jej praktickosť. Vďaka dobrej dostupnosti sa zvolila konštrukcia podpernej časti z Bosch profilov, ku ktorým budú pripojené ostatné súčasti. Tieto profily budú spojené so základňou celého zariadenia, ktorú tvorí hrubšia hliníková platňa.

Pri návrhu celkovej mechanickej konštrukcie zariadenia sa vyskytlo rušivé vibrovanie. Problém spôsobil vibračný motor pripojený ku celej fluidizačnej nádobe. Vibrácie by mohli v zariadení spôsobovať uvoľňovanie mechanických spojov a taktiež by mohlo dôjsť ku posúvaniu zariadenia po podložke, na ktorej by bolo položené. To znemožňuje ukotviť celú fluidizačnú vaňu s difúzorom a vibračným motorom pomocou pevného spoja ku základni zariadenia.

Riešenie uchytenia fluidizačnej nádoby a všetkých komponentov, ktoré sú s ňou spojené je zobrazené na obrázku 3.8. Ako je možné vidieť, riešenie spočíva vo vytvorení štyroch úchytoch na hranách vzduchového difúzora, pomocou ktorých bude cez spružiny uchytená fluidizačná vaňa a jej komponenty. Tie budú zabezpečovať

odpruženie celého zariadenia, a tým budú tlmiť vibrácie vychádzajúce z motora. Spružiny budú ukotvené na Bosch profile cez silent bloky, ktoré ešte zvyšujú efektivitu tlmenia vibrácií. Kvôli posadeniu celej konštrukcie fluidizačnej vane a jej komponentov na pružiny, bolo potrebné vybrať vhodné hadice na prívod vzduchu do komory pod fluidizačnou vaňou. Tie boli vybrané z veľmi pružného materiálu tak, ktorý bude prenášať a tlmiť periodické namáhanie vznikajúce pri pohybe. Nakoniec na odrušenie vibrácií celého zariadenia od podložky, na ktorej bude stáť, sú ako podpery na hliníkovej základni použité silenbloky.



Obr. 3.8: Návrh uchytenia a odrušenia vibrácií fluidizačnej nádoby

3.2 Návrh elektrickej konštrukcie

Pri návrhu elektronickej konštrukcie sa riešila primárne koncepcia funkčného prototypu. Z tohoto dôvodu bol zamietnutý výber samostatných integrovaných obvodov, návrh schémy a realizácia celej riadiacej elektroniky na jednom plošnom spoji. Preto bola zvolená realizácia pomocou samostatných hotových modulov, ktoré budú spolu prepojené. Keďže sa jedná o prototyp, je možné týmto spôsobom zaručiť funkčnosť a zamedziť možným vývojovým chybám, ktorých riešenie môže byť veľmi zdĺhavé. Jednotlivé časti elektronickej konštrukcie budú popísané v nasledujúcich kapitolách.

Zoznam častí elektronickej konštrukcie:

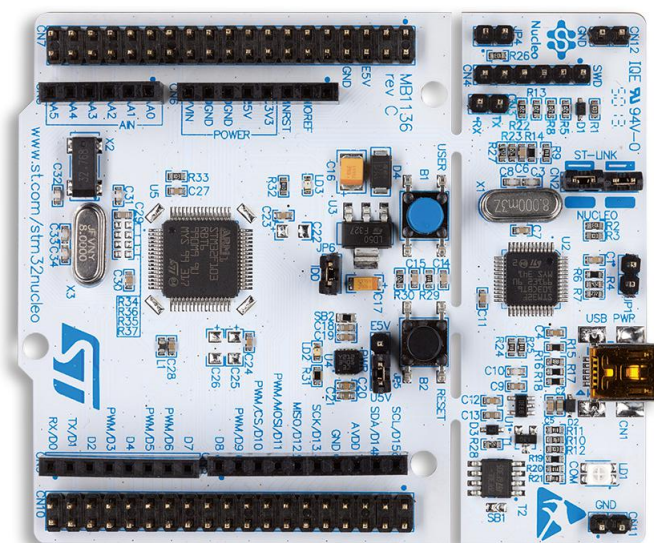
1. mikrokontrolér,

2. user interface,
3. krokové motory a riadenie posuvu,
4. výhrevné panely a regulácia teploty,
5. riadenie vibračného motora,
6. napájací zdroj

3.2.1 Mikrokontrolér

Pri výbere vhodného mikrokontroléru na riadenie celého fluidizačného zariadenia bol požadovaný moderný mikrokontrolér, ktorý umožní ovládanie celého zariadenia a bude dobre konfigurovateľný.

Po zvážení všetkých požiadavok sa zvolil mikrokontrolér STM32 od firmy STMicroelectronics. Konkrétna voľba je vývojová doska STM NUCLEO L452RE-P, ktorá obsahuje okrem samotného mikrokontroléru aj programátor, kryštál a obvody pre stabilizáciu napätia pri napájaní z externého zdroja. Celá vývojová doska je zobrazená na obrázku 3.9.



Obr. 3.9: Vývojová doska STM Nucleo.[17]

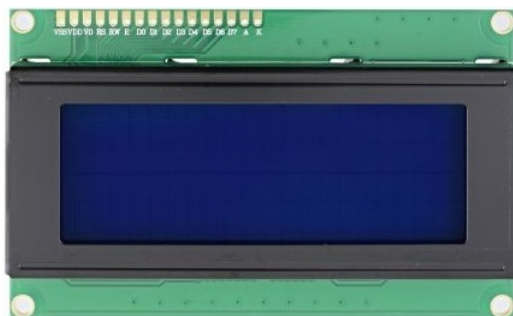
Z obrázku je patrné že, STM NUCLEO má po krajoch cez Harwin konektory vyvedené všetky I/O piny. To dovoľuje plné využitie mikrokontroléru a prístup ku všetkým jeho pinom a perifériám. Táto vývojová doska má širokú škálu rôznych rozšírení a umožňuje priame prepojenie s vývojovými doskami ARDUINO UNO.

Parametre mikrokontroléru boli zvolené tak, aby mal dostatočnú RAM a Flash pamäť a taktiež, aby takt jadra nebol príliš pomalý. Mikrokontrolér STM32L452RE

má 512 *kB* Flash pamäte a 160 *kB* RAM pamäte. Jeho jadro tvorí Arm Cortex-M4 32-bit a môže pracovať na maximálnej taktovacej frekvencii 80 *MHz*. Kvôli aktuálnemu nedostatku polovodičových čipov bol zo všetkých dostupných mikrokontrolérov tento mikrokontrolér dostatočne výkonný a dostupný. Mikrokontrolér v sebe ďalej obsahuje 83 I/O pinov, 12x časovač, ADC prevodník, DAC prevodník, komparátory, 2,5 *V* a 2,048 *V* referenciu, USB 2.0 pripojenie, SAI, I2C, USART, UART, LPUART, SPI, 14 kanálový DMA kontrolér, CRC a ďalšie periférie. Zdroj hodinového signálu je v mikrokontroléri možný cez využitie interných osilátorov s presnosťou $\pm 0,25\%$ a taktom od 100 *kHz* do 48 *MHz* alebo použitím externého krystalu s frekvenciou až do 80 *MHz*. Výstupné napätie na všetkých I/O pinoch dosahuje hodnotu maximálne 3,3 *V* a vstupy majú toleranciu pre logickú úroveň 1 až do 5 *V*. Doporučené napájacie napätie celej vývojovej dosky je 1,71 *V* až 3,6 *V*. [18]

3.2.2 User Interface

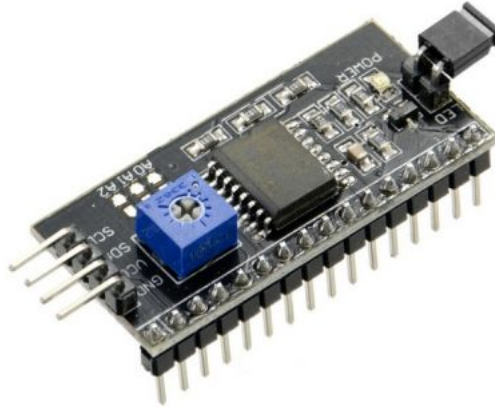
Vo fáze riešenia elektronickej konštrukcie používateľského rozhrania zariadenia sa celé rozhranie riešilo tak, aby sa na zariadení dali rýchlo a efektívne nastaviť všetky požadované parametre. Z tohoto dôvodu sa vybral displej a rotačný enkóder. Kvôli jednoduchosti konštrukcie sa ako display zvolil klasický Liquid crystal display (LCD), ktorý má 4 riadky a 20 znakov v každom riadku. Aby sa minimalizovala potreba použitia mnohých spojovacích vodičov na prepojenie s mikrokontrolérom, display bol doplnený o modul s prevodníkom, ktorý umožňuje celý display riadiť cez I2C zbernicu. Použitý display je možné vidieť na obrázku 3.10.



Obr. 3.10: LCD Display 20x4 [19]

Modul prevodníku, ktorý je možné vidieť na obrázku 3.11. je koncipovaný na báze čipu PCF8574. Tento čip je jednoduchý I2C expander, ktorý konvertuje serializované dáta na 8 bitovú paralelnú zbernicu, cez ktorú komunikuje s displayom. Na module prevodníku je vstavaný trimer, pomocou ktorého sa nastavuje kontrast celého LCD displaya. Celý display s modulom prevodníku majú napájacie napätie od 2,5 *V* do

6 V a vstupná logická úroveň 1 je definovaná ako 0,7 násobok napájacieho napätia, čo je vhodné pre použitie s mikrokotrolérom STM32, ktorého výstupné napätie pri logickej úrovni 1 je 3,3 V. [18, 20, 21]



Obr. 3.11: Modul I2C prevodníka [22]

Pre nastavovanie všetkých parametrov a pohyb v menu na displayi bude slúžiť rotačný enkóder. Pre jednoduchšie ovládanie je enkóder vybavený tlačítkom, ktoré sa aktivuje zatlačením osky enkódera. Vybraný modul s enkóderom umožňuje otáčanie enkódera do oboch strán, pričom na každé otočenie o 360° je na enkóderi 20 polôh, ktoré majú jemnú aretáciu pri každom kroku. Modul enkódera je uvedený na obrázku 3.12.



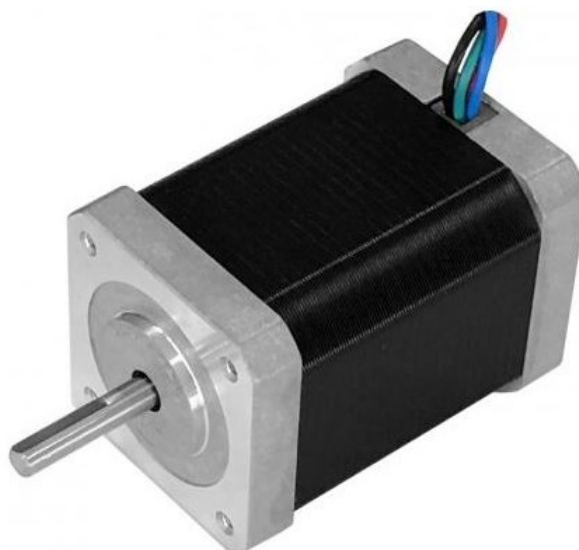
Obr. 3.12: Modul enkódera [23]

3.2.3 Krokové motory a riadenie posuvu

Pri posuve dopravníku substrátov do fluidizačnej nádoby a na miesto ohrevu sa požadovalo riešenie, ktoré bude umožňovať presné nastavenie polohy. To je dôležité

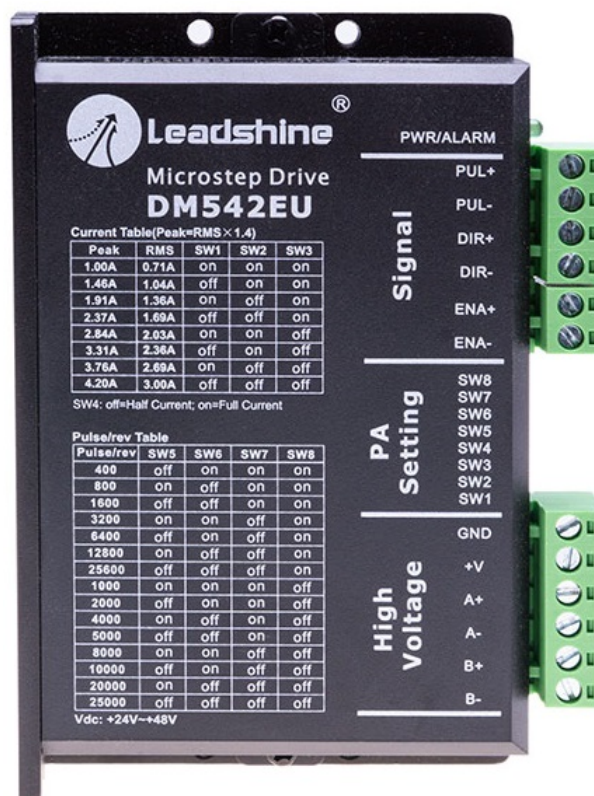
kvôli nastavovaniu miesta prevzatia HIO, hĺbky ponoru pri fluidizácii a presného miesta predhrevu a vytvrdzovania. Preto boli na pohon trapézových tyčí vybrané krokové motory, ktoré spĺňajú požiadavku presného nastavenia posuvu.

Pri výbere konkrétneho modelu krokových motorov sa kládol dôraz na veľkosť motoru v závislosti na vyvinutom točivom momente. Po získaní dostatočného množstva informácií sa dospelo ku tomu, že na posuv celého mechanizmu dostatočnou rýchlosťou cez trapézové tyče budú vhodné motory od firmy Leadshine, konkrétne model 42CM08, ktorý je zobrazený na obrázku 3.13. Ide o dvojfázový motor, ktorý má rozmery $42 \times 42 \times 60 \text{ mm}$, maximálny moment sily je $0,8 \text{ NM}$, napájacie napätie na jednu fázu je $2,5 \text{ V}$ a prúd na jednu fázu je $2,5 \text{ A}$. Motory sú použité dva, pričom jeden je určený na posuv v horizontálnej osi a druhý na posuv vo vertikálnej osi. [24]



Obr. 3.13: Krokový motor Leadshine 42CM08 [25]

Na ovládanie obidvoch motorov pomocou mikrokontroléru bolo potrebné vybrať vhodný driver. Pre zaistenie kompatibility driveru s motorom bol vybraný driver taktiež od firmy Leadshine. Z parametrov uvedených v technickom liste motora sa vybral driver Leadshine DM542EU, ktorý je možné vidieť na obrázku 3.14.



Obr. 3.14: Driver pre krokový motor Leadshine DM542EU [26]

Tento driver je určený pre dvojfázové krokové motory, dodáva maximálny prúd 4,2 A a jeho napájacie napätie je od 24 V do 48 V, čo je pre motor 42CM08 ideálne. Driver má na sebe taktiež DIP spínač, ktorým sa dajú nastaviť parametre celého driveru tak, aby čo najlepšie sedeli pre použitý motor. Mikrospínač má na sebe 8 spínačov, z ktorých prvé 3 nastavujú obmedzenie prúdu do motora, štvrtý slúži na nastavenie prúdu pri zastavení motora a posledné 4 spínače nastavujú počet mikrokrokov. Na driver sú taktiež dve LED diódy, ktoré indikujú zapnutie a poruchový stav.

Prúdové obmedzenie sa dá regulovať od 1 A (Peak) do 4,2 A (Peak) a prúd pri zastavení motora sa dá nastaviť buď rovnaký ako je aktuálne nastavené prúdové obmedzenie alebo ako jeho polovičná hodnota. Microstepping je nastaviteľný od 2 do 125 mikrokrokov medzi každým krokom motora.

Na driveri sú na pripojenie vstupné a výstupné svorky pre pripojenie riadenia z mikrokontroléra a pre pripojenie motora. Vstupné svorky driveru sú navrhnuté pre pripojenie diferenciálnych párov ale aj single-ended vodičov. Na vstup sa privádzajú signály $\pm PUL$, $\pm DIR$ a $\pm ENA$.

Signál PUL (Pulse) slúži na pohon motora o jeden krok. Na vstupe tohoto pinu je driver schopný pracovať s frekvenciou maximálne 200 kHz. Signál DIR (Direction)

slúži na zmenu smeru otáčania motora. Posledným signálom je ENA (Enable), ktorý slúži na zapnutie alebo vypnutie pohonu motora. Všetky signály sú kompatibilné s napätím 3,3 V

Posledným prvkom v oblasti riadenia posuvu bolo riešenie kalibrácie motorov celého zariadenia. Kalibrácia bola vyriešená pri zapnutí alebo reštartovaní zariadenia pomocou mikropínačov. Toto riešenie spočíva v zapnutí krokových motorov a posuvu mechanických dielov upevnených na trapézových tyčiach až dokým svojou polohou nezapnú spínač. Pri zopnutí spínača príde do mikrokontroléra riadiaci signál, ktorý sa vyhodnotí ako krajná poloha za ktorú už nie je možné zájsť. Program následne vypne riadiaci signál ENA a zmení polaritu motoru DIR. Takýmto spôsobom je mikrokontrolér schopný z akejkoľvek polohy skalibrovať zariadenie tak, aby ho dostal do východzej polohy, z ktorej bude ovládaný.

3.2.4 Výhrevné panely a regulácia teploty

Po upevnení HIO do úchyty sa substrát po začatí procesu podľa prednastavenej teploty a času premiestni do polohy kde prebieha predhrev. Pri návrhu predhrevu bolo potrebné zaistiť rovnomerné ohrievanie substrátu po nastavený čas, čiže bolo potrebné vyriešiť akým spôsobom sa bude substrát ohrievať, ako sa bude ohrev riadiť a taktiež bolo potrebné zaistiť spätnú väzbu pre mikrokontrolér, ktorý bude teplotu regulovať.

Výsledné riešenie ohrevu spočíva v použití dvoch keramických výhrevných telies, ktoré sú uvedené na obrázku 3.15.



Obr. 3.15: Keramické ohrevné teleso [28]

Tieto ohrevné telesá budú umiestnené priamo nad fluidizačnou nádobou kvôli čo najmenším tepelným stratám pri prechode z procesu predhrevu ku procesu fluidizácie. Následne budú tieto telesá využité aj pre vytvrzovanie nanesej vrstvy.

Pre čo najrovnomernejší ohrev bolo zvolené umiestnenie týchto panelov oproti sebe, čo zaručí dostatočnú rovnomernosť ohrevu z obidvoch strán. Výkon jedného panelu je 250 W , čiže pri použití dvoch panelov bude výhrevný výkon 500 W , čo pre predhrev a vytvrzovanie postačuje.

Riadenie teploty panelov bolo prvotne zamýšľané pomocou triakovej regulácie, ale kvôli viacerým nevýhodám, ako napríklad rušenie a problémy s chladením bolo od tohoto návrhu upustené. Regulácia sa nakoniec vyriešila pomocou SSR relé (Solid state relay) od firmy IBEST ElectricalAutomation. Konkrétny model je SSR-15A a je možné vidieť ho na obrázku 3.16.



Obr. 3.16: SSR relé SSR-15A [29]

Ide o SSR relé ktoré zvládne maximálny zatažovací prúd 15 A a rozsah jeho pracovného napätia je 24 V až 660 V AC . Z katalógového listu bolo zistené, že rozsah doporučeného spínacieho DC napätia je 3 V až 32 V a v relé nastane zopnutý stav pri napätí vyššom ako $1,3\text{ V}$. Prúd potrebný na zopnutie relé rastie so spínacím napätím a jeho veľkosť je v intervale 6 mA až 25 mA . Z technického listu mikrokontroléru STM32L452xx bolo zistené, že maximálny prúd, ktorý je obvod schopný dodať na I/O pine je 20 mA , čo je pre toto použitie dostačujúce a SSR relé sa dá teda riadiť priamo výstupným pinom mikrokontroléru. Maximálna spínacia frekvencia tohoto SSR relé sa dá vypočítať podľa parametrov z katalógového listu cez parameter On/Off time, ktorý má hodnotu 100 ms .

$$f_{sw} = \frac{1}{2t_{On/Off}} [Hz, s] \quad (3.1)$$

$$f_{sw} = \frac{1}{2 \cdot 0,1s} = 5 Hz \quad (3.2)$$

Toto relé teda nie je vhodné pre spínanie vysokými frekvenciami alebo PWM reguláciu, ktorá by bola síce možná, ale pri frekvencií 5 Hz by nemala veľký zmysel.

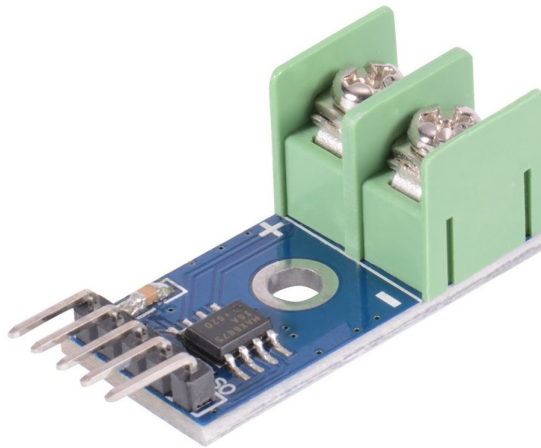
Výhrevné panely sú napájané zo sieťového napätia 230 V AC / 50 Hz, pri ktorom budú odoberať celkový prúd, ktorý sa vypočíta nasledovne:

$$I = \frac{P}{U} [A, W, V] \quad (3.3)$$

$$I = \frac{2 \cdot 250W}{230V} = 2,174 A \quad (3.4)$$

Tento prúd relé bez problémov zvládne a vďaka jeho dostatočnému dimenzovaniu nebude dochádzať ku veľkým tepelným stratám. Relé je dimenzované na frekvenciu zaťažovacieho prúdu 47 Hz až 63 Hz, čo vyhovuje použitiu v sieti. Na relé sa nachádza taktiež červená LED dióda, ktorá indikuje zapnutý stav. [18, 28, 29]

Ako spätnú väzbu na meranie teploty pre mikrokontrolér sa zvolilo riešenie použitím modulu, ktorý merá teplotu pomocou pripojeného termočlánku. Modul je zobrazený na obrázku 3.17.



Obr. 3.17: Modul pre meranie teploty pomocou termočlánku [30]

Modul využíva čip MAX6675, ktorý slúži na meranie teploty termočlánkom typu K. Integrovaný obvod obsahuje 12bit AD prevodník, ktorý umožňuje čítať teplotu do 1024 °C, s presnosťou na 0,25 °C. Pri pripojených kontaktoch termočlánku obvod kompenzuje spoj medzi kovom vodičov termočlánku a pripájanými svorkami.

Namerané dáta sa posielajú do mikrokontroléru cez SPI protokol. Napájacie napätie tohoto obvodu je 0,5 V až 6 V. [31]

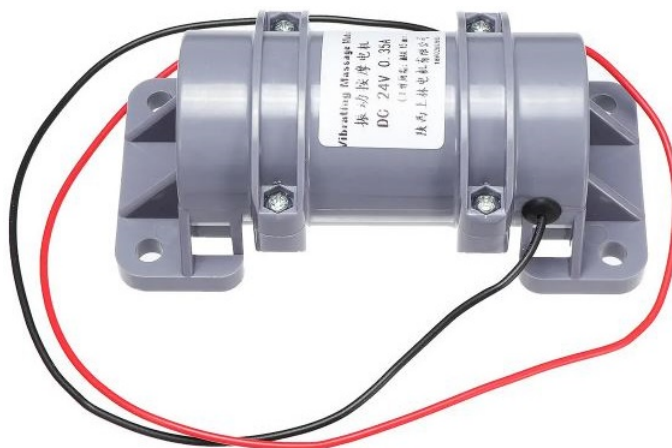
K modulu bol vybraný termočlánok typu K, ktorý je schopný merať teplotu do 800 °C. Je robustnejšej konštrukcie, aby sa dal pri výhrevných paneloch prichytiť. Je uvedený na obrázku 3.18.



Obr. 3.18: Termočlánok typu K [32]

3.2.5 Riadenie vibračného motora

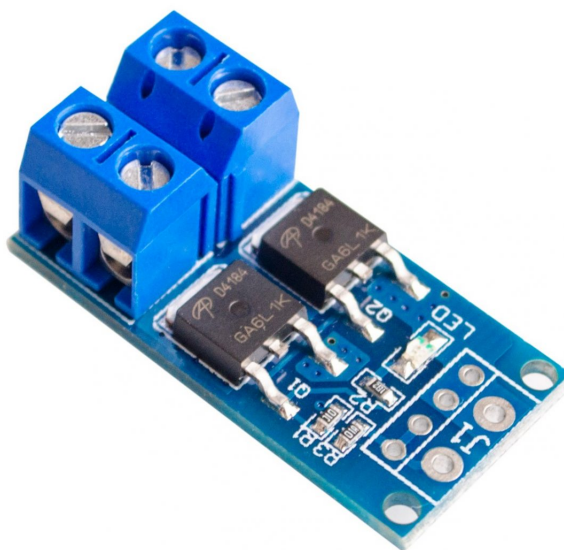
Ako bolo uvedené v teoretickom úvode, pre správne nastavenie pseudofluidného stavu je vhodné mať pod fluidizačnou nádobou vibračný motor. Pri výbere vhodného motora boli kladené požiadavky na jeho veľkosť, výkon, napájacie napätie a hmotnosť. Keďže veľká časť vibračných motorov, ktoré sú dostupné boli veľmi ťažké a ich napájacie napätie bolo 230 V AC, neboli pre konštrukciu vhodné. Požadované bolo napájacie napätie 12 V až 24 V, ideálne plastová konštrukcia, nižšia hmotnosť a dostatočný výkon. Vhodný vibračný motor bol nájdený na portáli Banggood a je uvedený na obrázku 3.19.



Obr. 3.19: Vibračný motor [33]

Vybraný motor má napájacie napätie 24 V a nominálny odoberaný prúd je $0,35\text{ A}$. Otáčky tohoto motora dosahujú maximálne 3000 rpm . Celý motor je v plastovom púzdre na ktorom sú 4 otvory na prichytenie.

Aby bolo možné nastaviť presné vibrácie motora, je riadenie doplnené o PWM reguláciu. Pre tento účel bol vybraný modul so spínacím mosfetom AOD4184A. Modul je uvedený na obrázku 3.20.



Obr. 3.20: Modul s mosfetom pre riadenie motora [34]

Z technickej dokumentácie k N-MOS tranzistorov na module boli zistené nasledu-

júce parametre:

$$I_D = 50 \text{ A}, V_{GS} = \pm 20 \text{ V}, V_{DS} = 40 \text{ V}, P_D(T_C = 100^\circ\text{C}) = 25 \text{ W}, R_{\theta JA} = 55^\circ\text{C/W}, \\ R_{DSon}(max) = 9.5 \text{ m}\Omega, Q_G(Total) = 17 \text{ nC}(max).$$

Zo schémy priloženej ku modulu sa zistilo, že do hradla tranzistoru je zaraďený 100Ω rezistor, ktorý obmedzuje prúd do hradla. Ten sa dá vypočítať pri predpokladanom napájacom napätí $3,3 \text{ V}$ nasledovne: [34, 35]

$$I_G = \frac{U_{GS}}{R_G} [A, V, \Omega] \quad (3.5)$$

$$I_G = \frac{3,3}{100} = 3,3 \text{ mA} \quad (3.6)$$

Z parametrov mosfetu je možné zistiť maximálnu spínaciu frekvenciu a výkonové zaťaženie mosfet tranzistoru pri frekvencii PWM 40 kHz nasledujúcim výpočtom:

$$P = I_D^2 \cdot R_{DSon} + U_{DD} \cdot I_D \cdot t_{on,off} \cdot f_{PWM} [W, A, \Omega, V, A, s, Hz] \quad (3.7)$$

$$P = 0,35^2 \cdot 9,5 \cdot 10^{-3} + 24 \cdot 0,35 \cdot 5,15 \cdot 10^{-6} \cdot 40 \cdot 10^3 = 1,73 \text{ W} \quad (3.8)$$

Oteplenie mosfet tranzistora pri výkonovej strate $1,73 \text{ W}$ a teplote okolia 30°C sa overí nasledujúcim výpočtom:

$$\vartheta_J = R_{\theta JA} \cdot P + \vartheta_A [^\circ\text{C}, ^\circ\text{C/W}, W, ^\circ\text{C}] \quad (3.9)$$

$$\vartheta_J = 55 \cdot 1,73 + 30 = 125,15^\circ\text{C} \quad (3.10)$$

Z výsledku výpočtu bolo zistené, že tento unipolárny tranzistor je vhodný pre použitie na PWM reguláciu vibračného motora s teplotnou rezervou pri plnom zaťažení približne 50°C . Keďže na module sú umiestnené 2 tranzistory paralelne, tak výkonové zaťaženie bude rozdelené na polovice. Mosfet tranzistory sú na module taktiež prispájané o plošný spoj, ktorý slúži ako chladič, takže ich teplota bude o niečo nižšia.

3.2.6 Napájací zdroj

Pri návrhu napájania celého zariadenia sa vychádzalo z toho, že je potrebné zistiť všetky potrebné napätia, z ktorých sa vypočíta pomocou odoberaného prúdu potrebný výkon a navrhne sa potrebný zdroj.

Potrebné napájacie napätia sú 24 V pre driver, krokové motory a vibračný motor, 7 – 12 V pre mikrokontrolér a 5 V pre display. Najvyšší prúdový odber budú predstavovať krokové motory. Ich odber na jednu fázu je 2,5 A a budú napájané pomocou driveru na 24 V. Pre jeden motor je teda potrebný výkon zdroja:

$$P = U \cdot I \text{ [W, V, A]} \quad (3.11)$$

$$P = 24 \cdot 2,5 = 60 \text{ W} \quad (3.12)$$

Keďže budú motory použité dva, tak sa výkon zdroja zdvojnásobí. K tomuto výkonu musíme pripočítať ešte príkon potrebný pre ostatné súčasti ako mikrokontrolér, vibračný motor, LCD a ostatné moduly. Výpočet výkonu odoberaného ostatnými súčastami by bol zbytočný a pri výbere zdrojov sa môže vychádzať z nasledujúcej úvahy. Pri chode dvoch motorov naraz sa bude zo zdroja odoberať špičkový výkon 120 W a k tomu je dobré nechať nejakú rezervu pre napájanie ostatných obvodov. Prúd pre napájanie ostatných obvodov nepresiahne 0,6 A z čoho vyplýva, že maximálny odoberaný prúd celého zariadenia môže byť 5,6 A. Z toho vyplýva, že zdroj, ktorý bude mať výstupné napätie 24 V a prúd vyšší ako 5,6 A, bude postačujúci.

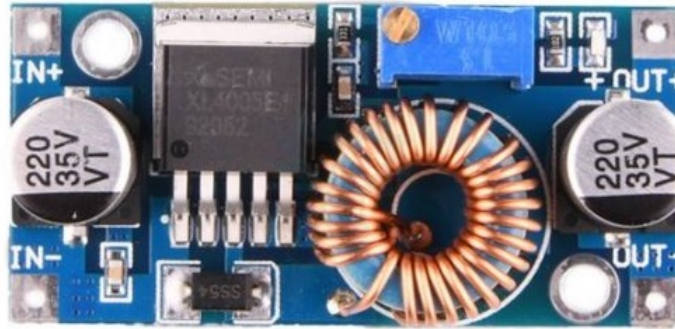
Pre dobrú účinnosť a rozmery bolo rozhodnuté pre použitie spínaného zdroja Meanwell LRS-150-24, ktorý je uvedený na obrázku 3.21.



Obr. 3.21: Spínaný zdroj Meanwell [36]

Kvôli rezerve sa zvolil zdroj s napätím 24 V a maximálnym prúdom $6,5\text{ A}$. Prúd pri klasickom chode motorov nebude nepretržite maximálny a zdroj bude bez problémov požiadavkam dostačovať. Zdroj, ktorý sa vybral pre zariadenie, má na sebe svorky pre vstup sieťového napätia, svorky pre výstupné napätie, led diódu na indikáciu zapnutia a trimer, ktorým je možné nastaviť výstupné napätie v rozsahu $21,6\text{ V}$ až $28,8\text{ V}$. [37]

Aby sa z napätia 24 V získali ďalšie potrebné napätia 5 V a $3,3\text{ V}$, boli použitý modul step-down meniča, ktoré sú uvedené na obrázku 3.22.



Obr. 3.22: Modul step-down meniča [38]

Tento step down menič je postavený na báze integrovaného obvodu XL4005, ktorý umožňuje reguláciu vstupného napätia 5 V až 32 V , na výstupné napätie $0,8\text{ V}$ až 24 V . Maximálny výstupný prúd pri chladení, ktoré zabezpečuje plošný spoj môže byť až do $2,5\text{ A}$. to je možné vďaka vysokej účinnosti tohoto obvodu, ktorá dosahuje až 90% . Na module regulátora sa nachádza viacotáčkový trimer zapojený v spätnej väzbe obvodu, ktorým sa dá presne nastaviť hodnota požadovaného výstupného napätia.

Menič sa nastaví na napätie $7 - 12\text{ V}$, ktoré bude napájať Nucleo. Na ňom sú umiestnené stabilizátory na 5 V a $3,3\text{ V}$, ktorými sa budú napájať moduly.

4 Konštrukcia zariadenia

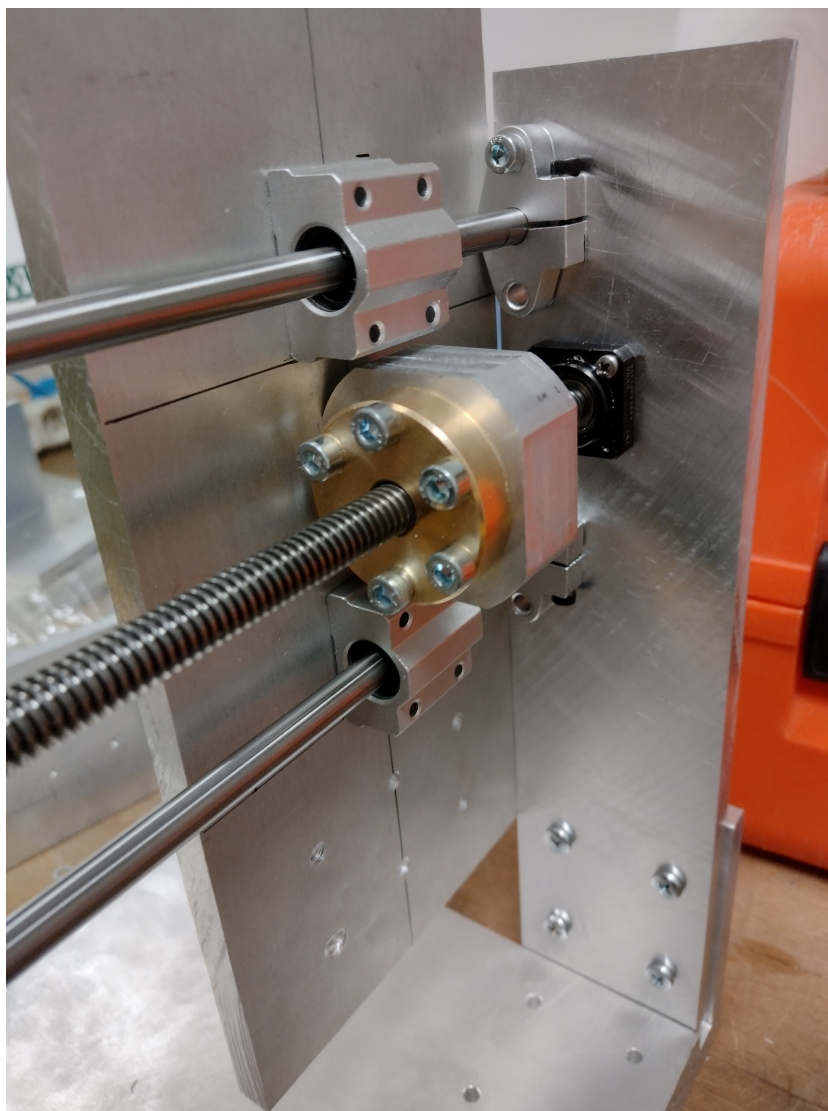
4.1 Mechanická konštrukcia

Na konštrukciu mechanickej časti zariadenia bol kvôli dobrej dostupnosti materiálu zvolený hliník. Zariadenie je konštruované pomocou plátov hliníku, jaklov a bosch profilov. Pri konštrukcii bolo postupované podľa 3D predlohy A.1, avšak rozmery jednotlivých vyrábaných častí boli priebežne upravované podľa potreby, keďže dostupné diely, ktoré bolo nutné zakúpiť, mali oproti 3D modelu rozdielne rozmery. Jednotlivé vyrábané diely boli obrábané na dielenskom sústruhu a frézke.

Celé zariadenie je zostavené na hliníkovom pláte s rozmermi $50\text{ cm} \times 50\text{ cm}$. V zadnej časti sú umiestnené posuvy osí X a Z. Na nich je umiestnený profil, ktorý slúži ako držiak substrátu HIO. Substrát bude upínaný pomocou kovového klipu.

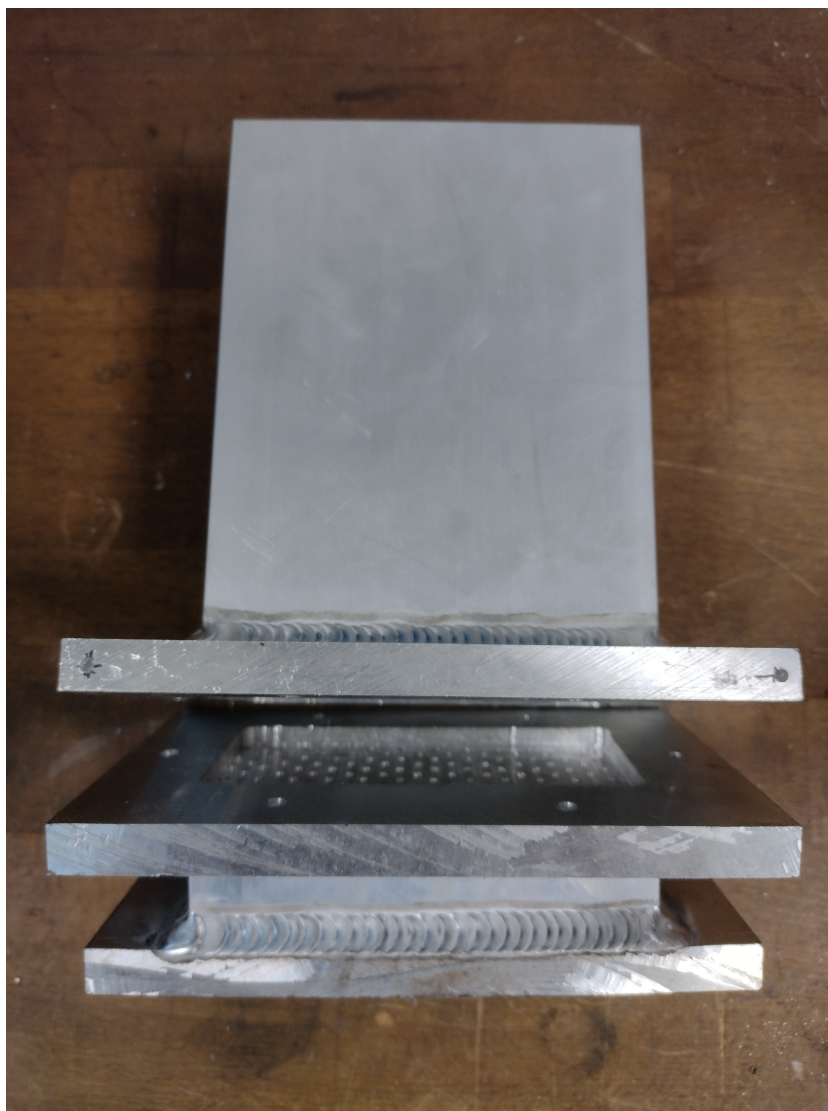
Posuvy osí zaisťujú krokové motory [24] pripevnené na konštrukčných profiloch. Hriadele motorov sú cez mechanickú spojku spojené s trapézovou tyčou. Pre toto použitie museli byť tyče zúžené sústružením z oboch strán, keďže druhá strana tyče je upevnená v ložisku. Súbežne s trapézovou tyčou sú umiestnené vodiace tyče, ktoré zaisťujú stabilitu pri posuve. Pre osu X sú kvôli vyššiemu zaťaženiu použité 2 vodiace tyče a pre osu Z je použitá jedna tyč.

Uchytenie osi Z o os X je realizované pomocou linearsetov pripevnených na vodiacich tyčiach a pomocou prírubovej matice, ktorá je zasadená vo vyrobenom hliníkovom držiaku. Rovnakým spôsobom je realizované uchytenie a posuv držiaku substrátu na ose Z. Celé usporiadanie posuvov osí X a Z je uchytené na nosný hliníkový plát pomocou dvoch hliníkových L profilov.



Obr. 4.1: Uchytenie posuvu osi

Druhú časť mechanickej konštrukcie tvorí fluidizačná vaňa so vzduchovým filtrom a difúzorom. Konštrukcia bola vyrobená z niekoľkých dielov, ktoré boli spojené zvaraním. Keďže materiál všetkých dielov je hliník, bolo potrebné použiť špeciálnu zvaraciu metódu AC TIG. Nádoba je zobrazená na obrázku 4.2.



Obr. 4.2: Rozobratá fluidizačná nádoba

Fluidizačná nádoba je konštruovaná formou dvoch samostatne rozoberateľných blokov ktoré tvorí vrchná časť - fluidizačná nádoba a spodná časť - difúzor. Nádoba je rozoberateľná z dôvodu čistenia a výmeny filtra pevných častíc. Horná časť fluidizačnej nádoby je vyrobená z jaklu $12\text{ cm} \times 6\text{ cm}$, ktorý je privarený ku základni. Difúzor, ktorý tvorí spodnú časť bol vyrobený vyfrézovaním rovnomernej siete otvorov do hliníkovej platne a zvarením s jaklom a ďalším plátom. Na difúzore sú pripevnené dve rýchlospojky, ktoré slúžia na pripojenie hadíc s prívodom vzduchu a na spodnej časti difúzoru sú úchyty pre uchytenie vibračného motoru. Na okrajoch difúzoru sú vyvrtané otvory, za ktoré je celá nádoba uchytená štyrmi spružinami. Tie sú druhým koncom pripevnené ku silentblokom a ku bosch profilom, ktoré sú pomocou skrutiek pripevnené ku základovej platni. Silentbloky spolu s pružinami zaistujú

tlmenie vibrácií smerom od motora ku konštrukcii.

Poslednú časť mechanickej konštrukcie tvorí držiak na ohrevné panely, ktorý pozostáva z dvoch bosch profilov. Jeden z nich je priskrutkovaný k základni a druhý je vodorovne otočený a priskrutkovaný ku prvému tak, aby sa na jeho boky mohli umiestniť ohrevné panely.

Kompletná mechanická konštrukcia zariadenia je uvedená na obrázku 4.3.



Obr. 4.3: Kompletná mechanická konštrukcia zariadenia

4.2 Elektrická konštrukcia

Pri konštrukcii elektrickej časti zariadenia bolo potrebné všetky moduly prepojiť a osadiť do krabičky. Keďže je pri používaní zariadenia pravdepodobnosť, že organický púzdiaci materiál by sa mohol dostať mimo fluidizačnej vane, bola zvolená

prachotesná krabička s krytím triedy IP65 4.4. Z osadených modulov bolo potrebné priviesť káble ku motorom, kalibračným spínačom, teplomeru a napájaniu, čo bolo realizované pomocou prachotesných káblových priechodiek.

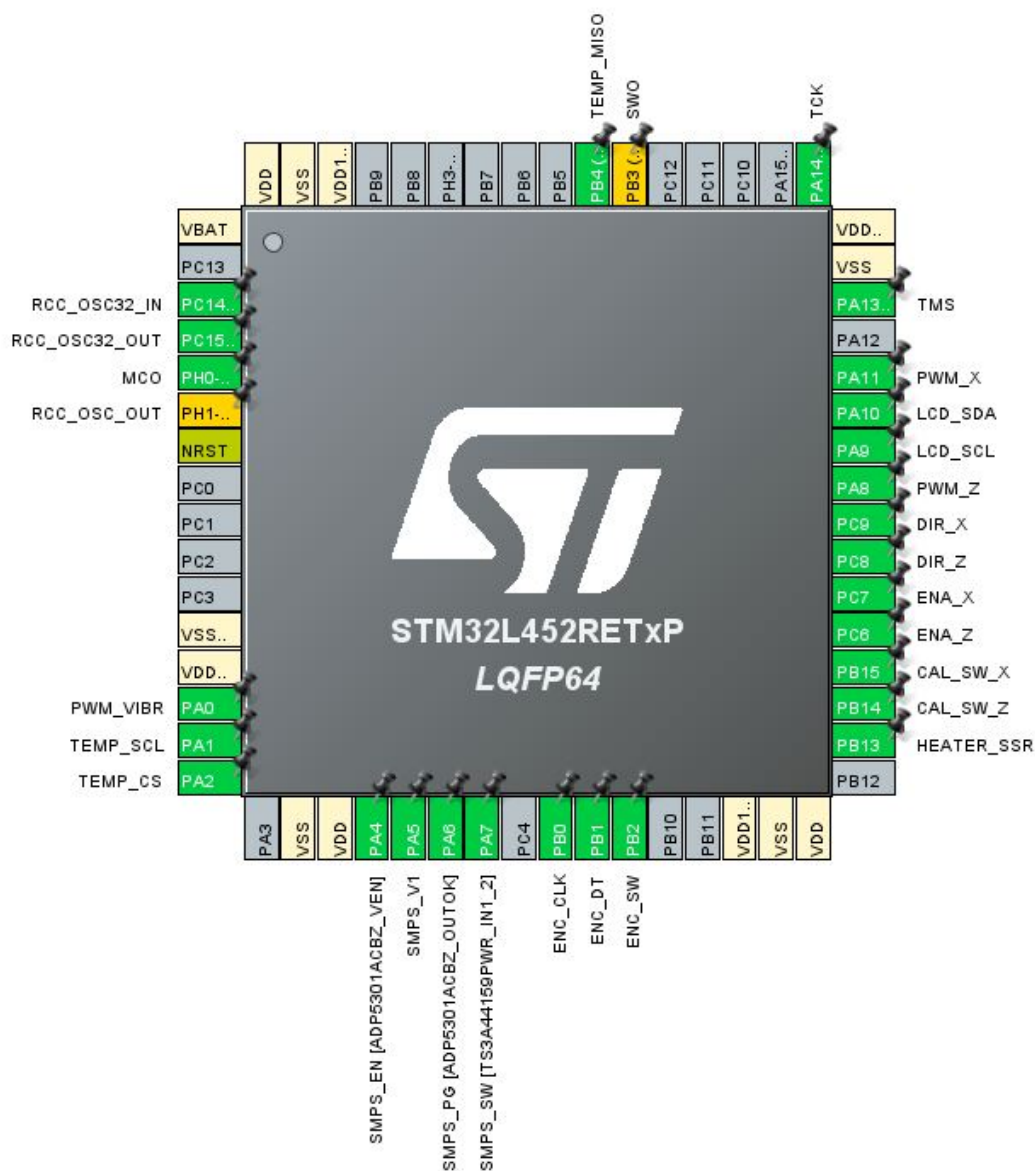


Obr. 4.4: Použitá krabička s krytím IP65[39]

Na prednú stranu krabičky boli umiestnené riadiace prvky a LCD display. Riadiace prvky pozostávajú z rotačného enkódera, ktorým sa cez display ovláda celé zariadenie a kolískového vypínača, ktorý vypína sieťové napätie do napájacieho zdroja. Enkóder je na prednom paneli pripevnený pomocou šróby M6, hlavný vypínač je do panela zacvaknutý pomocou klipov a LCD display je na prednom paneli upevnený pomocou dištančných stĺpikov a štyroch šrób typu M3.

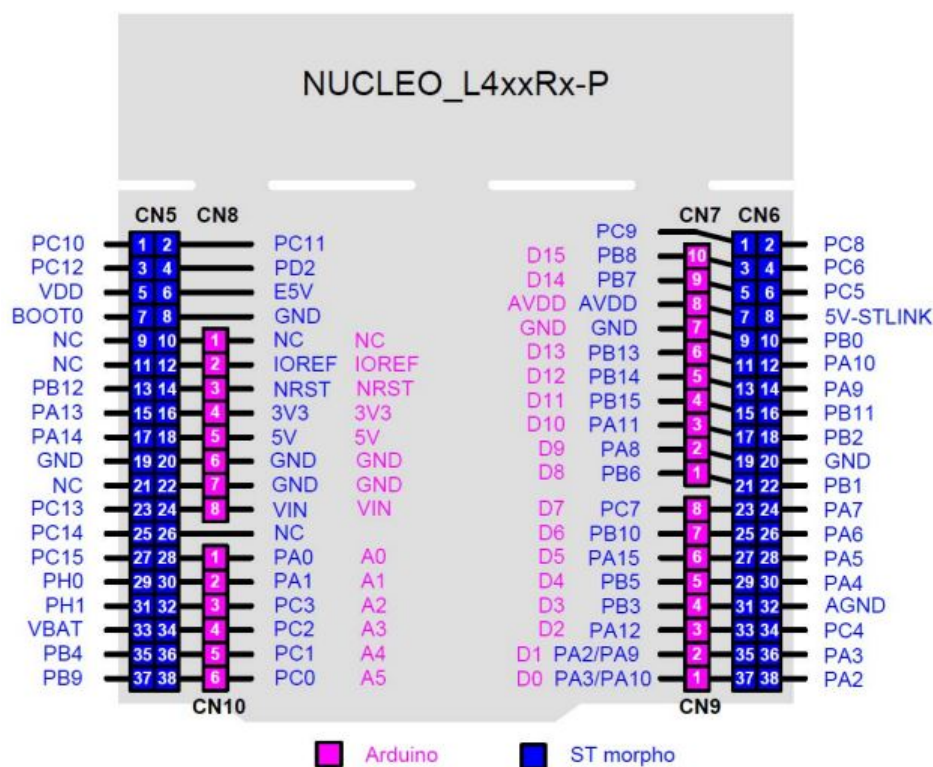
Vo vnútri krabičky sa nachádza napájací zdroj, step-down menič, SSR relé, drivery krokových motorov, PWM modul pre vibračný motor a riadiaca doska STM Nucleo. Všetky moduly boli medzi sebou prepojené podľa blokovej schémy zobrazenej na B.1.

Zapojenie periférie s mikrokontrolérom boli prepojené podľa nasledujúceho obrázku 4.5, ktorý zobrazuje jednotlivé vývody čipu mikrokontroléru a názvy signálov. Obrázok bol vytvorený v softvéri STM CUBE MX.



Obr. 4.5: Pinout mikrokontroléru STM32L452RE-P

Periférie boli následne prepojené s vývojovou doskou NUCLEO podľa diagramu na obrázku 4.6.



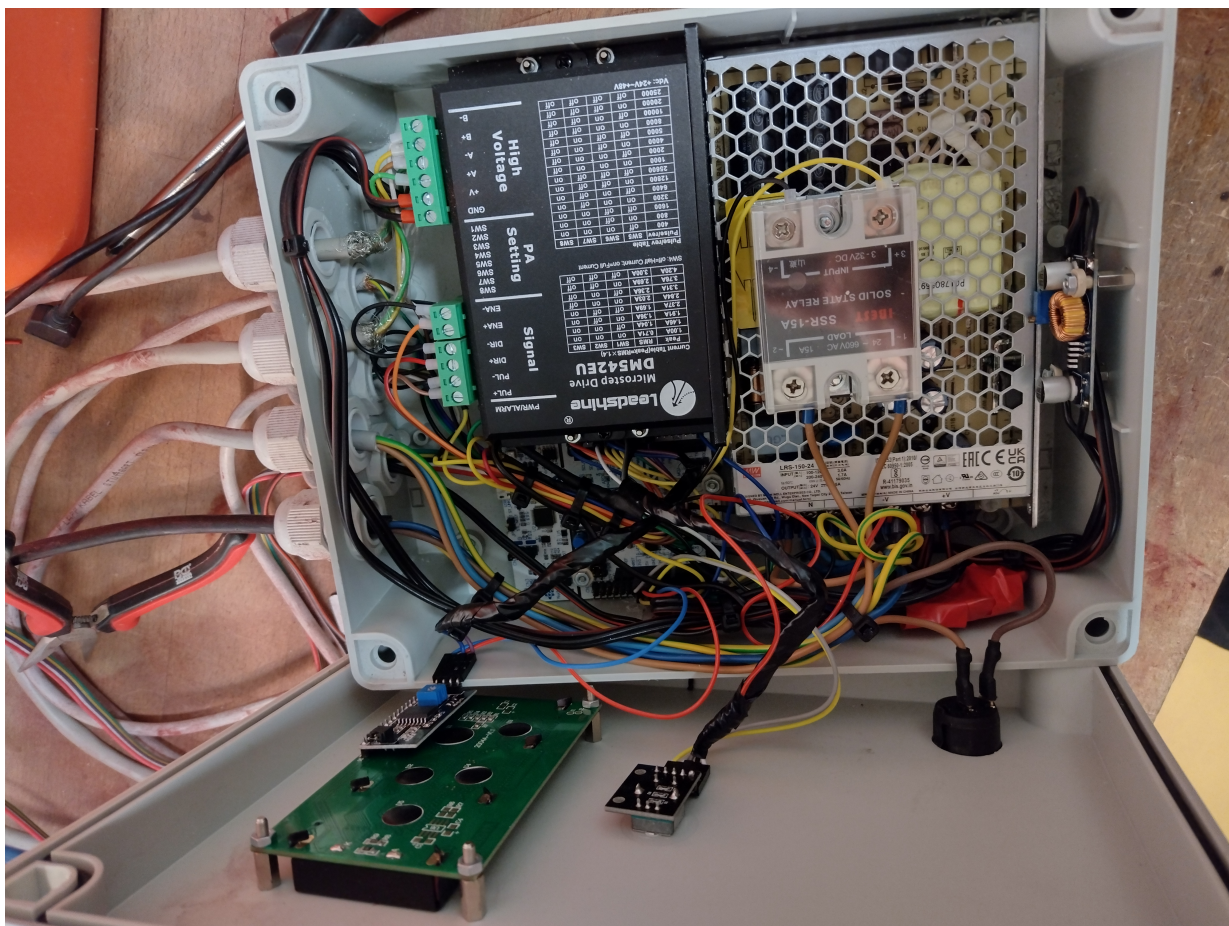
Obr. 4.6: Pinout dosky STM32L452RE-P [40]

Na nasledujúcej tabuľke 4.1 sú vypísané všetky použité piny mikrokontroléru spolu s perifériami ku ktorým sú pripojené. Prepoje boli realizované pomocou krátkych signálových káblov s konektormi typu Dupont. Keďže ide o netienené vodiče, bude potrebné zamedziť možnému rušeniu oddialením dátových vodičov od silových vodičov alebo prípadným tienením. Kritické sú hlavne vodiče do LCD displaya, teplotného čidla a enkóderu.

Tab. 4.1: Tabuľka použitých pinov mikrokontroléra a príslušných periférií

Pin	Názov	Periféria
PA0	PWM_VIBR	Driver vibračného motora
PA1	TEMP_SCL	Teplotné čidlo
PA2	TEMP_CS	Teplotné čidlo
PA8	PWM_Z	Driver krokového motora osi Z
PA9	LCD_SCL	LCD Display
PA10	LCD_SDA	LCD Display
PA11	PWM_X	Driver krokového motora osi X
PB0	ENC_CLK	Enkóder
PB1	ENC_DT	Enkóder
PB2	ENC_SW	Enkóder
PB4	TEMP_MISO	Teplotné čidlo
PB13	HEATER_SSR	SSR Relé
PB14	CAL_SW_Z	Kalibračný spínač osi Z
PB15	CAL_SW_X	Kalibračný spínač osi X
PC6	ENA_Z	Driver krokového motora osi Z
PC7	ENA_X	Driver krokového motora osi X
PC8	DIR_Z	Driver krokového motora osi Z
PC9	DIR_X	Driver krokového motora osi X

Mimo krabičky sa nachádzajú koncové spínače, krokové motory, výhrevné panely a modul so senzorom teploty. Senzor je umiestnený mimo krabičky z dôvodu dĺžky vodičov termočlánku, ktoré sa kvôli minimalizovaniu chyby merania nepredlžovali. Modul je vložený v izolačnej bužírke, ktorá ho chráni proti vniknutiu práškoveho materiálu. Káble použité na privod od krabičky ku motorom a koncovým spínačom sú tienené, z dôvodu zamedzenia rušenia. Výsledná elektrická konštrukcia je zobrazená na obrázku 4.7.



Obr. 4.7: Výsledná elektrická konštrukcia zariadenia

4.3 Programová časť

V nasledujúcich častiach bude popísaný celý kód vrátane knižníc a funkcií, ktoré sú použité. Kód programu bol napísaný v jazyku C a vývojovom prostredí STM32CubeIDE. Pri písaní kódu bola používaná knižnica HAL ktorá umožňuje jednoduché ovládanie a prístup ku perifériám mikrokontroléru.

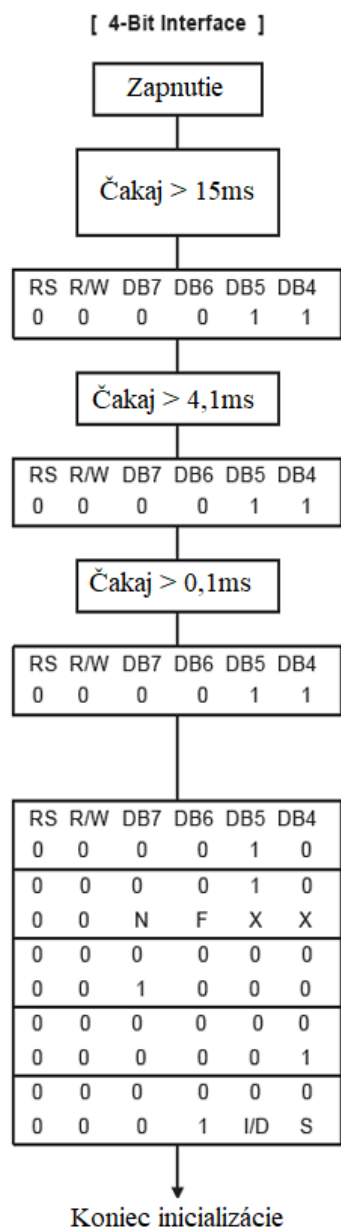
4.3.1 LCD Display

LCD display je ovládaný pomocou vytvorenej knižnice LCD.c, v ktorej sú obsiahnuté všetky potrebné funkcie na ovládanie displaya a výpis znakov. Použitý display 2004A má 4 riadky po 20 znakov a ovláda sa cez 4 alebo 8 bitovú paralelnú dátovú linku. Pre zjednodušenie zapojenia je priamo na displayi použitý modul konverteru sériovej I2C zbernice na paralelnú. Celý display sa tak ovláda pomocou I2C komunikácie.

Pri programovaní knižnice bol použitý datasheet [20], v ktorom sú popísané všetky príkazy a cykly pre ovládanie displaya. Pri komunikácii s displayom je v mikrokontroléri použitá periféria I2C1, ktorá pracuje rýchlosťou 100 *KHz*, čo je limit prevodníku PCF8574 [21]. Ide teda o standard mode I2C komunikáciu.

Kód knižnice je v prílohe D.1 a pozostáva z nasledujúcich funkcií.

Funkcia *lcd_set_address* sa používa na nastavenie 7 bitovej adresy I2C prevodníku PCF8574. V tomto projekte je adresa nastavená na 0x40 pomocou prepojkky na module. Funkcia *lcd_send_cmd* sa používa na odoslanie príkazov do LCD displaya. Funkcia *lcd_send_data* sa používa na odoslanie dátového reťazca, ktorý sa na LCD displazi zobrazí. Je podobná ako funkcia *lcd_send_cmd* s rozdielom, že pri posielaní dát je potrebné mať pin RS v logickej jednotke. Funkcia *lcd_send_string* využíva funkciu *lcd_send_data* a je schopná posielat na display textové reťazce. Funkcia *lcd_init* je vytvorená podľa presného návodu, v ktorom je zobrazená sekvencia, ktorú je potrebné odoslať do displaya, aby sa inicializoval. Táto sekvencia pre 4 bitový mód je zobrazená na obrázku 4.8.



Obr. 4.8: Inicializačná sekvencia LCD [20]

Funkcia *lcd_set_line_col* sa používa na nastavenie riadku a stĺpca od ktorých sa začú vypisovať na displayi odoslané dáta.

Poslednou funkciou v knižnici je *lcd_clear* ktorá slúži na vymazanie vypísaného textu z celého displaya.

4.3.2 Krokové motory

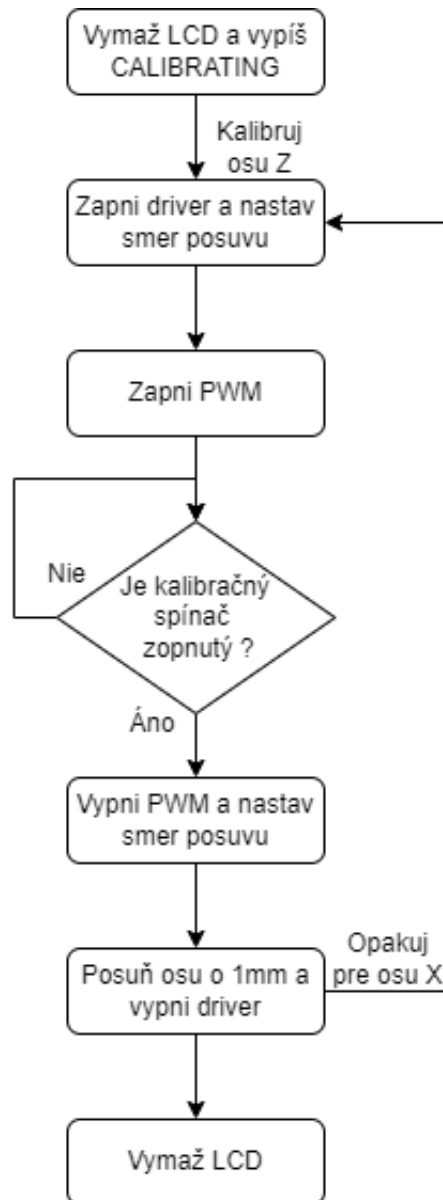
Krokové motory sú ovládané drivermi Leadshine DM542EU [27], ktoré sú priamo pripojené ku doske mikrokontroléru. Na ovládanie driveru sú využívané signály ENA_Z, ENA_X, DIR_Z, DIR_X, PWM_Z a PWM_X. Signály ENA a DIR sú pripojené ku GPIO portom. Signály ENA majú invertovanú logiku a zapínajú driver pre kontrolu motora. Ak je ENA signál v log. 1, tak motor sa nepohne, drží pozíciu a nereaguje na iné signály. Na pohon motora je využitý výstup PWM, ku ktorému je pripojená periféria časovača TIMER1. Časovač je nastavený na frekvenciu približne 2800 Hz a generuje PWM signál, ktorý točí motorom. Každý pulz pootočí motorom o 1 krok. Frekvencia bola volená ako kompromis medzi rýchlosťou a momentom sily. Keďže v tejto aplikácii nie je potrebná vysoká presnosť, tak spínačom na prednom paneli je nastavená presnosť na 2 mikrokroky. Na jednu otočku hriadele je teda potrebné 400 pulzov PWM signálu, čo posunie os o 1 mm. Na driveri krokového motora bol taktiež nastavený maximálny prúd na 2,37 A čo je najbližšia hodnota ktorá je vhodná pre motor Leadshine 42CM08 [24] a prúd ktorý tečie do motora pri držaní polohy je nastavený na 50 % maximálneho prúdu.

Knižnica pre ovládanie krokových motorov využíva okrem pinov pre ovládanie driverov aj vstupné GPIO piny CAL_SW_X a CAL_SW_Z, ktoré sú pripojené ku výstupom modulov s kalibračnými spínačmi. Spínače majú invertovanú logiku a pri zopnutí spínača je na výstupe log. 0.

Kód knižnice je v prílohe E.1 a pozostáva z nasledujúcich funkcií.

Funkcia *Motor_INIT* sa používa na inicializovanie driverov pre krokové motory. V tejto funkcii sa piny ENA_X a ENA_Z nastaví do log. 1, zapne sa prerušenie časovača 1, ktoré nastane ak je PWM signál na výstupe rovný log.1 a zapíše sa hodnota CCR registru, ktorá nastaví striedu PWM signálu na 50%.

Funkcia *Motor_CALIBRATE* sa používa na počiatočnú kalibráciu osí a funguje podľa nasledujúceho diagramu na obrázku 4.9.

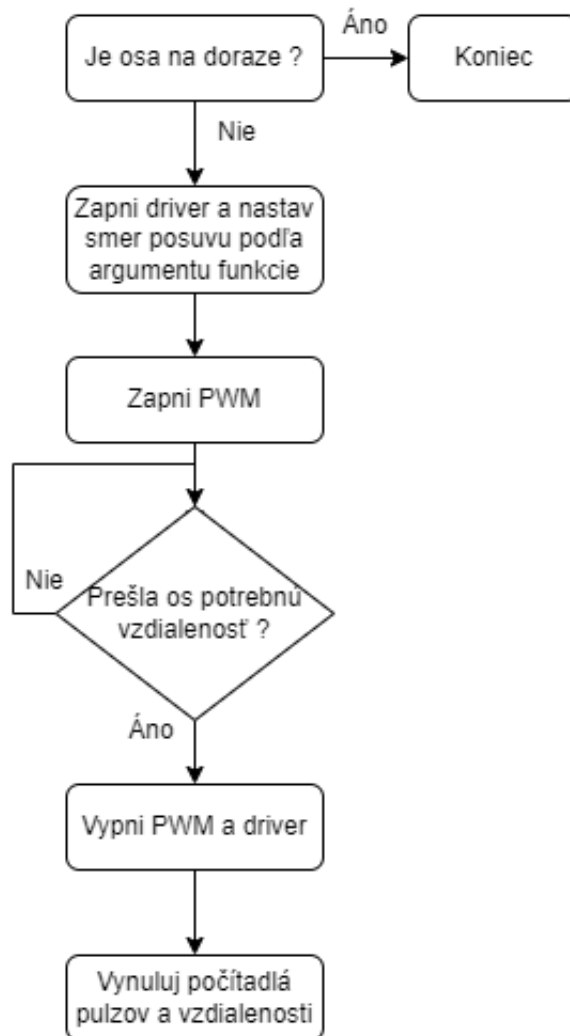


Obr. 4.9: Diagram kalibrácie osí X a Z

Pri vymazaní a výpise na display sa využijú funkcie z knižnice LCD.c. Na zapnutie drivera a nastavenie smeru posuvu sa na pinoch ENA a DIR zmenia logické úrovne. Následne sa zapne prvý kanál časovača 1 v PWM režime a osa Z sa začne pohybovať až dokým nenarazí na kalibračný spínač a nezopne ho. V tom momente sa vypne driver, časovač 1 a teda aj PWM signál. Následne sa zmení logická úroveň na pine DIR, zapne sa driver a následne sa zapne aj časovač 1 v režime prerušenia. V programe prerušenia sa inkrementuje počítadlo, ktoré je nastavené tak, že premenná *len_meas* sa inkrementuje každých 200 pulzov o 1. Tento pomer korešponduje posunu osi o 1 mm. Kód prerušenia je zobrazený v prílohe I.1. Následne sa teda os Z posunie o

1 mm od spínača a tým je kalibrácia tejto osi dokončená. Kanál 1 časovača 1 sa následne vypne a vypne sa aj driver. Rovnaká slučka sa zopakuje osu X, s tým, že ju riadi kanál 4 časovača 1.

Funkcia *Motor_MOVE_X* slúži na presné posunutie osi X a funguje podľa diagramu na obrázku 4.10.



Obr. 4.10: Diagram funkcie na pohyb osí

V jej argumente sú očakávané 2 premenné. Prvá premenná je typu char a očakávaný vstup je písmeno L a písmeno R. Týmto argumentom sa volí smer, do ktorého sa os pohybuje. Druhý argument je typu uint16_t a očakáva sa teda číselný vstup, ktorým sa nastavuje posun osi v milimetroch. Funkcia na začiatku skontroluje, či nie je osa v doraze a nie je stlačený kalibračný spínač. Ak spínač nie je stlačený, tak sa prepne logická úroveň na pine ENA_X a podľa typu argumentu char sa prepne logická úroveň DIR_X a zapne sa časovač 1 kanál 1 v móde prerušenia. Následne

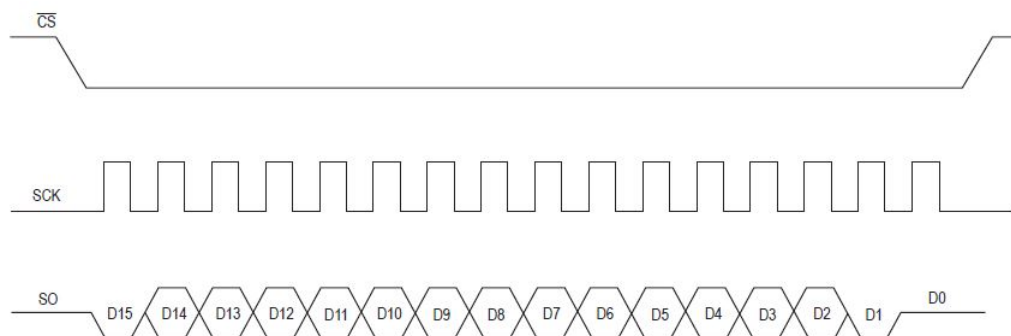
sa čaká, kým os neprejde nastavenú vzdialenosť. Po jej prejdení sa časovač vypne a prepne sa logická úroveň signálu ENA_X čím sa vypne driver. V poslednom kroku funkcie sa vynulujú počítadlá pulzov a vzdialenosti, aby boli pripravené pri ďalšom volaní funkcie.

Funkcia *Motor_MOVE_Z* funguje analogicky ako funkcia *Motor_MOVE_X*, ale slúži na posuv osi Z.

Funkcia *Motor_POSITION_INIT* funguje rovnako ako funkcia *Motor_CALIBRATE* a bola vytvorená kvôli lepšej prehľadnosti programu.

4.3.3 Senzor teploty

Teplota vytvrdzovania alebo predhrevu substrátov je snímaná pomocou termočlánku typu K. Termočlánok je privedený na svorkovnicu modulu s integrovaným obvodom MAX6675, ktorý obsahuje A/D prevodník, a informáciu o zmeranej teplote odošle pomocou sériovej zbernice SPI do mikrokontroléru. Komunikácia s mikrokontrolérom je jednoduchá a pozostáva z jednej sekvencie, ktorú po zmene logickej úrovne signálu TEMP_CS odošle modul do mikrokontroléra. Sekvencia je zobrazená na obrázku 4.11.



Obr. 4.11: Sekvencia dát poslaných z modulu termočlánku [31]

Z obrázku je možné vidieť, že komunikácia prebieha v 16 bitovom režime SPI. Rýchlosť ktorou zbernica komunikuje je nastavená v mikrokontroléri na $312,5 \text{ KBit/s}$. Limitujúcim faktorom v rýchlosti meraní teploty je konverzný čas, ktorý je pre MAX6675 $0,17 - 0,22 \text{ s}$. Z 16 bitov ktoré sa prijímú nesie 12 bitov informáciu o teplote, preto je prijatý reťazec potrebné upraviť.

Spolu s termočlánkom je využívané aj SSR relé, ktoré riadi ohrevné panely. Je k nemu pripojený pin HEATER_SSR. Toto polovodičové relé vie pracovať s maximálnou frekvenciou spínania 10 Hz , znesie maximálny prúd 15A a maximálne napätie 660V . Relé sa zopne pri riadiacom napätí od 3 V čo ho robí ideálnym pre spínanie napätím $3,3 \text{ V}$ priamo z pinu mikrokontroléru.

Teplotu medzi ohrevnými panelmi a jej meranie riadi knžnica `Temp_Sensor.c`, ktorej kód je uvedený v prílohe F.1 a pozostáva z nasledujúcich funkcií.

Funkcia `Temp_INIT` slúži na inicializáciu merania teploty. V tejto funkcii sa nastaví pin `HEATER_SSR` do log. 0 a pin `TEMP_CS` do log. 1.

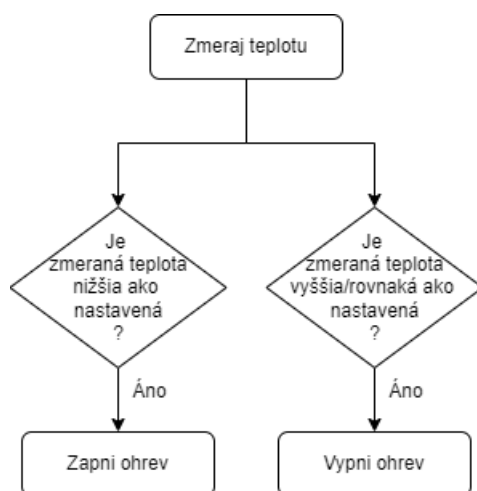
Funkcia `Temp_START` zapína časovač 3 v móde prerušenia, kde je nastavený časový interval 4 Hz kedy sa zapne funkcia `Temp_KEEP`, ktorá slúži na udržiavanie nastavenej teploty. Jej podrobný popis je nižšie.

Funkcia `Temp_STOP` vypína časovač 3 čím vypne celú slučku na meranie a udržiavanie teploty.

Funkcia `Temp_SET` slúži na nastavenie teploty, ktorá sa má udržiavať medzi výhrevnými telesami.

Funkcia `Temp_GET` sa používa na získanie teploty z termočlánku. V tejto funkcii prebieha komunikácia medzi obvodom MAX6675 a mikrokontrolérom pomocou funkcie z knižnice HAL. Tá zapíše prijaté dáta do vopred pripraveného pola po 8 bitoch. Následne sú tieto dáta vhodne bitovo posunuté a sčítané, aby z nich vyšla decimálna hodnota ktorá sa zapíše do premennej `OutTempBit`. Keže hodnota nepredstavuje teplotu ale počet zmeraných LSB, je potrebné túto hodnotu vynásobiť hodnotou jedného LSB čo predstavuje pre 12 bitové rozlíšenie 0,25 °C. Hodnota teploty je následne z funkcie navrátená cez príkaz `return`. [31]

Funkcia `Temp_KEEP` slúži na meranie a udržiavanie konštantnej teploty, ktorá sa vopred nastaví cez funkciu `Temp_SET`. Táto funkcia využíva časovač 3 v móde prerušenia, ktorý má periódu nastavenú na vyšší čas ako je maximálny konverzný čas obvodu MAX6675. Funkcia pracuje podľa diagramu na obrázku 4.12.



Obr. 4.12: Diagram funkcie `Temp_KEEP`

Funkcia `Temp_STOP` slúži na vypnutie časovača 3, čím sa vypne prerušenie a

udržovanie nastavenej teploty medzi ohrevnými panelmi.

4.3.4 Vibračný motor

Vibračný motor a intenzitu vibrácií je potrebné riadiť pomocou striedy PWM signálu. Ten je pre vibračný motor generovaný pomocou časovača 2, ktorý vyžíva kanál 1. Frekvencia PWM je nastavená na 40 *kHz*. Na riadenie motora a jeho intenzity slúži knižnica *Vibration_Motor.c*, ktorej kód je zobrazený v prílohe G.1. Knižnica je zložená z nasledujúcich funkcií.

Funkcia *Vibration_SET* sa využíva na nastavenie striedy PWM signálu. Funkcia má argument typu *int*, do ktorého sa zapíše hodnota striedy PWM signálu 0 až 99. Funkcia v prvom kroku skontroluje, či je zadaný argument v rozsahu 0 až 99. Ak je táto podmienka splnená, tak sa hodnota zapíše do CCR registru časovača 2, čím sa nastaví strieda PWM.

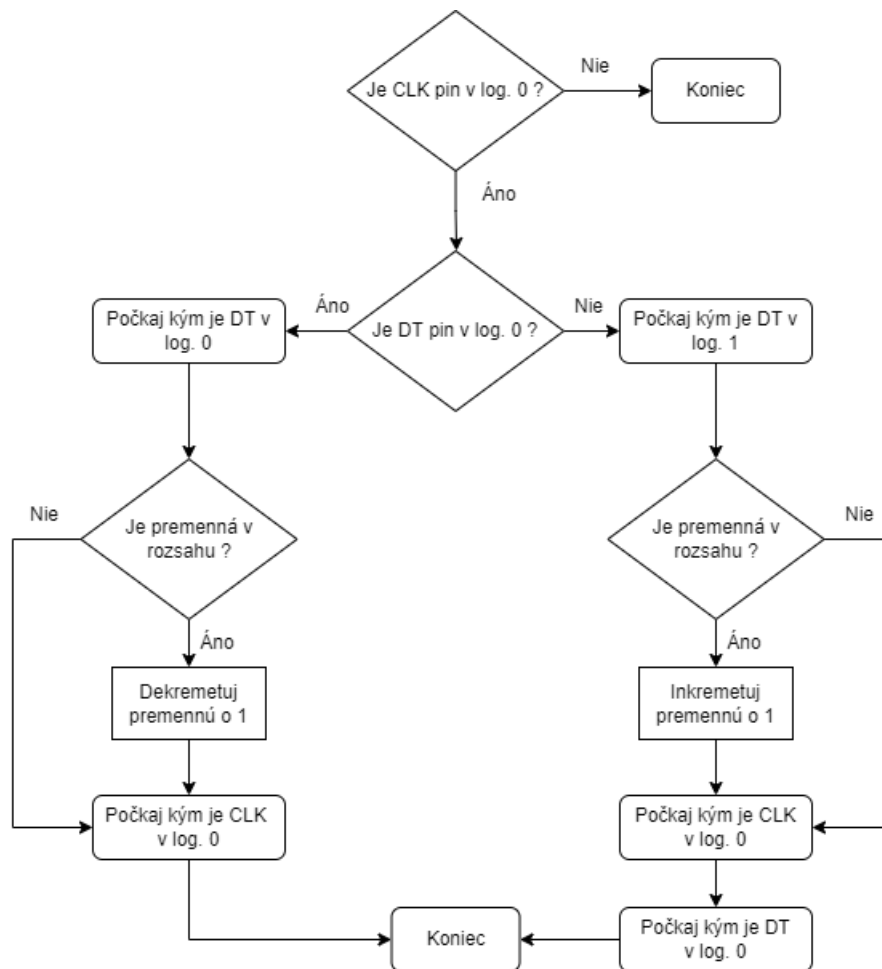
Funkcia *Vibration_START* slúži na zapnutie časovača 2, čím sa spustí generácia PWM signálu s vopred nastavenou striedou.

Funkcia *Vibration_STOP* slúži na zastavenie časovača 2, čo spôsobí zastavenie generácie PWM signálu a vypnutie vibračného motora.

4.3.5 Menu

V knižnici *Menu.c* sa nachádzajú funkcie ktoré slúžia na výpis menu a zmenu parametrov pomocou ktorých sa ovláda celé zariadenie. Kód je zobrazený v prílohe H.1 a knižnica pozostáva z nasledujúcich funkcií.

Funkcia *Encoder_HANDLER* slúži na obsluh enkóderu. Jej koncepcia spočíva v sledovaní poradia pulzov enkóderu. Keďže enkóder vysiela pri otáčaní dva výstupné signály ktoré sú snímané na pinoch *ENC_DT* a *ENC_CLK*, je potrebné porovnávať, ktorý pulz prichádzajúci z enkódera je prvý a ktorý je druhý. Takýmto spôsobom sa dá zistiť či sa enkóderom otáča vpravo alebo vľavo. Program následne inkrementuje a dekrementuje premennú ktorá je zadaná ako argument funkcie. Okrem tejto premennej je v argumente udaný ešte maximálny a minimálny limit, ktorý môže premenná nadobudnúť. Pri inkrementácií a dekrementácií je vždy tento limit kontrolovaný, aby nedošlo k jeho prekročeniu. Diagram funkcie je zobrazený na obrázku 4.13.

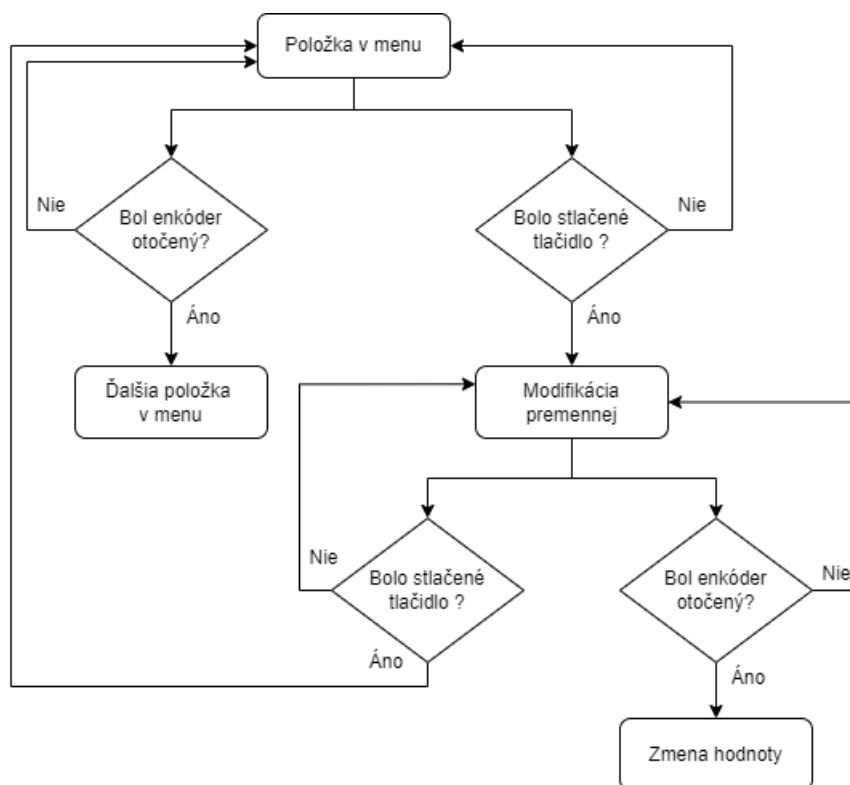


Obr. 4.13: Diagram funkcie *Encoder_HANDLER*

Vrámci obsluhy enkódera sa ešte spracováva signál kliknutia z pinu ENC_SW, ktorý je ale riešený samostatne pomocou externého prerušenia a časovača, ktorý zaistí debounce tlačítka. Kód obsluhy je zobrazený v prílohe I.1.

Funkcia *Menu_INIT* inicializuje počiatkové hodnoty všetkých premenných, ktoré sú využité v menu na nastavenie jeho parametrov a parametrov zariadenia. V tejto funkcii sa taktiež vypíše počiatkový text a následne po stlačení tlačítka, sa zobrazí menu.

Funkcia *Menu_LOOP* je jedinou funkciou, ktorá sa vykonáva v hlavnej slučke programu. Táto funkcia pozostáva z niekoľkých rovnakých blokov, ktoré tvoria menu. Menu sa ovláda pomocou enkódera a je v ňom možné jednotlivým premenným meniť hodnoty podľa potreby. Základný diagram, podľa ktorého funguje menu je zobrazený na obrázku 4.14.



Obr. 4.14: Diagram bloku menu

Keďže na správny chod fluidizačného zariadenia je potrebné nastaviť viacero parametrov, menu je poskladané celkovo z 9 takýchto blokov. V naľudujúcej tabuľke 4.2 je zobrazené celé menu a premenné s rozsahom, v ktorom sa dajú ovládať.

Tab. 4.2: Tabuľka položiek menu, premenných a ich rozsahov

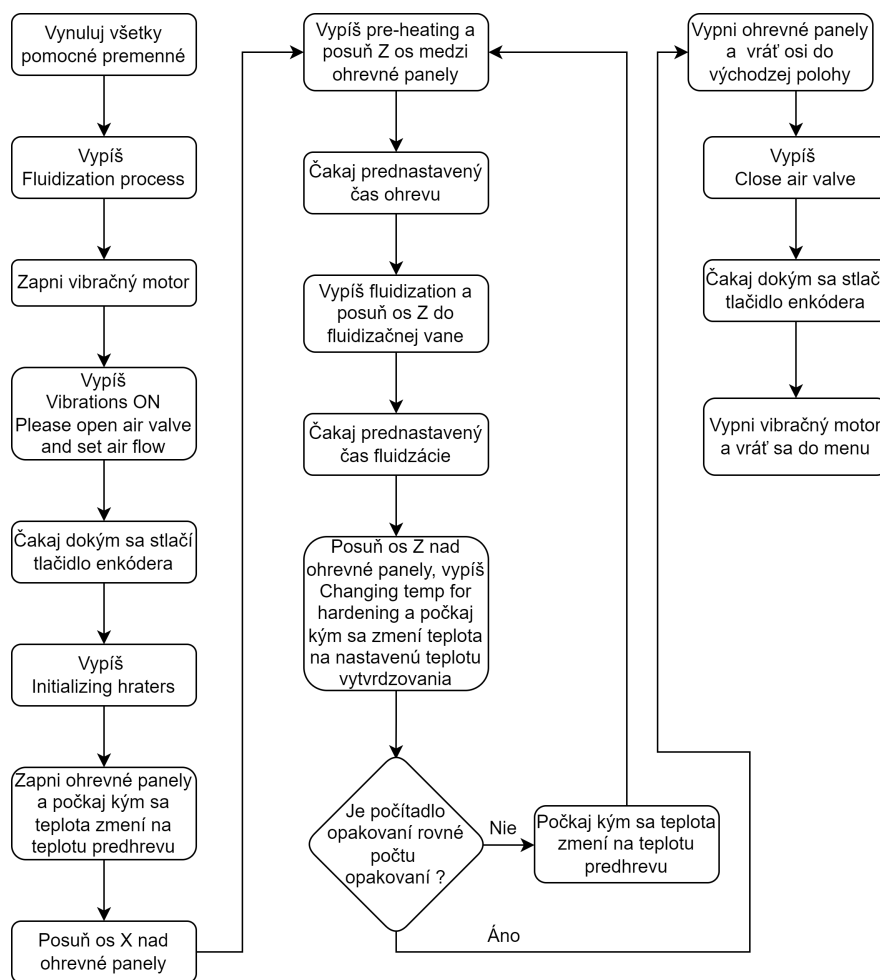
Názov položky	Premenná	Rozsah
Veľkosť substrátu	subs_size	2inch, 4inch
Vibrácie	vibration_pwm	0-99 %
Teplota predhrevu	pre_heat_temp	50-250 °C
Čas predhrevu	pre_heat_time	10-999 s
Čas fluidzácie	in_fluid_time	10-999 s
Teplota vytvrdzovania	hardening_temp	50-250 °C
Čas vytvrdzovania	hardening_time	10-999 min
Počet opakovaní	iterations	1-50
Začať proces	start	0-1

Pri položke vibrácie sa po kliknutí tlačidla enkódera spustí vibračný motor a jeho otáčky korešpondujú práve nastavenej hodnote triedy PWM na displayi. Táto

funkcia bola do menu zabudová z dôvodu jednoduchšieho nastavenia vibrácií.

4.3.6 Proces fluidizácie

Na proces fluidizácie je vytvorená funkcia, v ktorej sú obsiahnuté všetky premenné z menu. Funkcia s týmito premennými aktívne pracuje a dynamicky sa mení v závislosti na nastavených parametroch. Jej kód je zobrazený v prílohe J.1 a pracuje podľa nasledujúceho diagramu 4.15.



Obr. 4.15: Diagram funkcie procesu fluidizácie

Celá funkcia je poskladaná z funkcií, ktoré obsahujú predchádzajúce knižnice. Pri každej zmene teploty je teplota kontrolovaná 10 krát. Ak sa teplota nameria 10 krát a spĺňa podmienku, tak sa postúpi ku ďalšiemu kroku. V opačnom prípade sa počítadlo vynuluje a meranie prebieha znova. Týmto spôsobom sú ošetrené prípady, kedy z teplomera môžu prísť poškodené dáta a program by pokračoval nesprávne.

4.4 Návod na použitie

1. Pri používaní tohoto zariadenia na púzdrenie HIO je potrebné v prvom kroku zistiť parametre prášku a maximálne teploty, pri ktorých nedôjde ku poškodeniu HIO. Ako bolo uvedené v teoretickej časti, tieto parametre sú dôležité, kvôli nastaveniu teploty predhrevu a teploty vytvrdzovania, čím sa optimalizuje celý proces púzdrenia.

2. V ďalšom kroku je potrebné poznať hrúbku vrstvy, ktorá má byť na HIO nanesená. Tento parameter určí počet opakovaní procesu púzdrenia, čím sa zaistí potrebná hrúbka púzdra.

3. Ak sú všetky tieto parametre známe, prejde sa ku ďalšej fáze, ktorou je odmastenie a očistenie substrátu HIO. Po tejto fáze sa substrát upne do držiaku na zariadení a je možné prejsť ku nastaveniu procesu púzdrenia.

4. Fluidizačné zariadenie je potrebné zapnúť hlavným vypínačom, ktorý je umiestnený na prednom paneli. Počas používania zariadenia je potrebné postupovať podľa pokynov na obrazovke. Po zapnutí si zariadenie automaticky skalibruje osi posuvu a následne po výpise úvodného textu na obrazovku je potrebné stlačiť tlačidlo enkódera.

5. Tak sa používateľ dostane do menu, ktoré sa prechádza otočením enkódera. Pri stlačení enkódera užívateľ vyberie položku, ktorú chce editovať. Následným otáčaním enkódera je možné meniť jej hodnotu. Do menu sa užívateľ vráti opäť stlačením tlačidla enkódera. V menu je potrebné nastaviť všetky parametre podľa parametrov prášku a HIO istených v prvom a druhom kroku návodu.

6. Po nastavení všetkých parametrov zariadenia užívateľ prejde na poslednú položku menu ktorá sa nazýva start process. Po kliknutí tlačila enkóderu dostane používateľ výzvu, či si naozaj praje spustiť proces púzdrenia. V tomto momente je potrebné spraviť poslednú kontrolu či je substrát správne upevnený a parametre správne nastavené.

7. Ak si je užívateľ istý že všetko je nastavené správne, spustí proces zvolením odpovede áno a stlačením enkódera. Následne sa spustí proces fluidizácie.

8. Pred začatím procesu púzdrenia sa spustí vibračný motor na požadované otáčky a užívateľ dostane výzvu na otvorenie vzduchového ventilu a nastavenie prietoku vzduchu. Prietok vzduchu je potrebné nastaviť tak, aby bol práškový materiál v stave bublajúcej fluidizácie. Po správnom nastavení prietoku je potrebné opäť kliknúť tlačidlo enkódera a následne automaticky prebehne proces púzdrenia.

9. Po skončení všetkých iterácií sa zapúzdrený HIO dopraví do východzej polohy a užívateľ na displayi dostane výzvu ku zastaveniu prietoku vzduchu. Po zatvorení vzduchového ventilu je potrebné kliknúť tlačidlo enkódera. Následne sa odstaví vibračný motor a na displayi sa zobrazí užívateľské menu.

10. Ak sa prístroj nebude ďalej používať, je potrebné ho vypnúť. Zapúzdrený HIO je nutné nechať schladnúť a následne odobrať z držiaku.

4.5 Test zariadenia

Pri teste zariadenia bolo cieľom overiť funkčnosť zariadenia a odladiť proces púzdrenia tak, aby na substráte HIO vzniklo celistvé púzdro z organického práškoveho materiálu. Na test bol použitý keramický substrát veľkosti 2 palce a červený epoxidový práškový materiál od firmy TESLA, ku ktorému bohužiaľ nebol nájdený katalógový list. Kompletne zariadenie je zobrazené v prílohe C.1

Po zapnutí zariadenia boli niekoľkými pokusmi otestované rôzne parametre fluidizačného zariadenia. Na tento materiál bol odladený proces s nasledujúcimi parametrami, ktoré sú zobrazené v tabuľke 4.3.

Tab. 4.3: Tabľka parametrov pre optimalizovaný proces

Parameter	Hodnota
Vibrácie	79 %
Teplota predhrevu	110 °C
Čas predhrevu	120 s
Čas fluidizácie	20 s
Teplota vytvrdzovania	120 °C
Čas vytvrdzovania	120 s
Počet opakovaní	3

Vďaka optimalizovanému procesu zariadenie dokázalo vytvoriť na keramickom substráte konformný povlak púzdriaceho materiálu. Výsledok je zobrazený na obrázku 4.16.



Obr. 4.16: Zapúzdrený substrát HIO

Na obrázku je patrné, že výsledné púzdro nie je úplne rovnomerné. Tieto ne-zrovnalosti na povrchu sa však opravia tým, že sa zapúzdrený substrát vloží na vytvrdnutie do pece pri teplote $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ približne na 30 min . Za tento čas sa celý povrch púzdra vyrovná a materiál úplne vytvrdne.

Záver

Hlavným cieľom bakalárskej práce bolo naštudovať problematiku púzdrenia HIO a princíp technológie fluidizácie. Praktická časť práce bola zameraná na návrh fluidizačného zariadenia, jeho konštrukciu a optimalizáciu procesu púzdrenia pre konkrétny púzdriaci materiál.

V teoretickej časti boli popísané a naštudované typy používaných púzdier pre HIO, ich výhody a nevýhody. Ďalej nasledoval podrobný popis princípu fluidizácie a princípu funkcie rôznych typov fluidizačných zariadení. V teoretickom rozbere bola opísaná funkcia zariadenia, parametre najčastejšie používaných typov práškových materiálov a vhodnosť ich použitia pre púzdrenie HIO. Z poznatkov získaných v teoretickej časti bolo možné prejsť ku praktickej časti práce, v ktorej sa zvolil vhodný typ fluidizačného zariadenia pre púzdrenie HIO a nasledoval jeho dizajn a konštrukcia.

V časti o dizajne bol podrobne rozobratý celý návrh a boli uvedené obrázky všetkých navrhnutých dielov zariadenia. Mechanická časť je rozdelená na 2 časti. Prvú časť tvorí dopravník substrátov s osami posuvu a druhú časť tvorí fluidizačná nádoba so vzduchovým difúzorom. Výsledný dizajn zariadenia je uvedený v prílohe A.1. Návrh zariadenia bol vytvorený pomocou softvéru Autodesk Inventor.

V kapitole o návrhu elektronickej časti sa pojednávalo o výbere vhodných modulov a ich parametrov pre danú aplikáciu. Vybraté moduly sú podrobne popísané a výstupom z tejto časti je bloková schéma celého zariadenia B.1.

V konštrukčnej časti zariadenia, bolo potrebné vyrobiť posuvy v osi X a Z, aby bolo možné substrát ponoriť do fluidizačnej nádoby a zároveň ho upevniť alebo odobrať mimo ohrevné panely. Ďalej bola vyrobená fluidizačná vaňa so vzduchovým difúzorom, ktorá je vybavená vibračným motorom, aby sa dal jednoducho dosiahnuť požadovaný pseudofluidný stav.

Elektronická konštrukčná časť pozostávala z výroby riadiacej jednotky, do ktorej boli umiestnené a prepojené moduly vrátane mikrokontroléru a ovládacích prvkov. Riadiaca jednotka je prepojená s motormi a ohrevnými panelmi vrátane snímača teploty.

V programovej časti boli pre jednotlivé funkčné bloky vytvorené knižnice, ktoré sú v práci popísané pomocou diagramov.

Na záver bolo zariadenie skalibrované a bola otestovaná jeho funkčnosť. Po dosiahnutí pseudofluidného stavu a kalibrácií zariadenia bol pre dvojpalcový substrát s daným organickým materiálom optimalizovaný púzdriaci proces, kde sa podarilo vytvoriť na substráte HIO rovnomerné púzdro.

Súčasťou práce je aj podrobný užívateľský návod, keďže zariadenie bude využívané pre laboratórnu výuku.

Literatúra

- [1] HARPER, A. CH. *Electronic packaging and interconnection handbook*. 3. vyd. United States of America: McGraw-Hill, 2000. 912s. ISBN 0-07-134745-3
- [2] Fernández J.A.: *Hermetic Packages In Space Environment* [online]. 2020, posledná aktualizácia 27.2.2020 [cit. 19.10.2021]. Dostupné z URL: <<https://www.doeet.com/content/eee-components/actives/hermetic-packages-in-space-environment/>>
- [3] Bifelectronic: *STK4913* [online]. 2021, [cit. 1.11.2021]. Dostupné z URL: <<https://www.bifelectronic.com/hybrid/1979-stk4913-bif.html>>
- [4] Microsoft Academy: *Fluidization* [online]. 2021, [cit. 1.10.2021]. Dostupné z URL: <[https://academic.microsoft.com/topic/194832619/publication/search?q=Fluidization&qe=And\(Composite\(F.FId%253D194832619\)%252CTy%253D%270%27\)&f=&orderBy=0](https://academic.microsoft.com/topic/194832619/publication/search?q=Fluidization&qe=And(Composite(F.FId%253D194832619)%252CTy%253D%270%27)&f=&orderBy=0)>
- [5] International Sensor Sytem Inc.: *HYBRID CIRCUITS – THICK FILM ASSEMBLY* [online]. 2021, [cit. 3.11.2021]. Dostupné z URL: <<https://www.internationalsensor.com/manufacturing/hybrid-thick-film-assembly/>>
- [6] 3M: *3M Scotchcast Electrical Resin 260* [online]. 2 strany. Austin, USA: Corrosion Protection Department, 2005. [cit. 20.11.2021]. Dostupné z URL: <<https://multimedia.3m.com/mws/media/383650/3mtm-scotchcasttm-electrical-resin-260.pdf>>
- [7] 3M: *3M Scotchcast Electrical Resin 262* [online]. 2 strany. Austin, USA: Corrosion Protection Department, 2010. [cit. 20.11.2021]. Dostupné z URL: <<https://multimedia.3m.com/mws/media/225950/3mtm-scotchcasttm-electrical-resin-262.pdf>>
- [8] 3M: *3M Scotchcast Electrical Resin 263* [online]. 2 strany. Austin, USA: Corrosion Protection Department, 1998. [cit. 20.11.2021]. Dostupné z URL: <<https://multimedia.3m.com/mws/media/225960/3mtm-scotchcasttm-electrical-resin-263.pdf>>
- [9] 3M: *3M Scotchcast Electrical Resin 265* [online]. 4 strany. Austin, USA: Corrosion Protection Department, 2007. [cit. 20.11.2021]. Dostupné z URL: <<https://multimedia.3m.com/mws/media/225910/3mtm-scotchcasttm-electrical-resin-265.pdf>>

- [10] Micom Labs: *ASTM D4060* [online]. 2021, [cit. 23. 11. 2021]. Dostupné z URL: <<https://www.micomlab.com/micom-testing/astm-d4060/>>
- [11] EUROLAB: *Rázový test* [online]. 2020, [cit. 23. 11. 2021]. Dostupné z URL: <<https://www.labaratuar.com/cs/testler/malzeme/etki-testi/>>
- [12] MiSUMi: *Powder Painting (Air Electrostatic Fluidized-bed Coating Method)* [online]. 2014, [cit. 29. 11. 2021]. Dostupné z URL: <<https://www.misumi-techcentral.com/tt/en/surface/2014/06/187-powder-painting-air-electrostatic-fluidized-bed-coating-method.html>>
- [13] BARLETTAA, M., GISARIOB, A., PALAGIC, L., SILVESTRI L.: *Modelling the Electrostatic Fluidised Bed (EFB) coating process using Support Vector Machines (SVMs)* [online]. 2014, [cit. 29. 11. 2021]. Dostupné z URL: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032591014002174>>
- [14] TCI: *Powder Coating Troubleshooting Guide* [online]. 2016, [cit. 30. 11. 2021]. Dostupné z URL: <<https://www.tcipowder.com/resources/troubleshooting-guide/chapter-seven-powder-application-methods-and-equipment/>>
- [15] SCHMID, J. CH., PFEIFER CH., KITZLER H., PROLL T., HOFBAUER H.: *A new dual fluidized bed gasifier design for improved in situ conversion of hydrocarbons* [online]. 2011, [cit. 30. 11. 2021]. Dostupné z URL: <https://www.researchgate.net/publication/268304622_A_new_dual_fluidized_bed_gasifier_design_for_improved_in_situ_conversion_of_hydrocarbons>
- [16] Arctech: *Redukčný ventil Ar 200 BAR* [online]. 2021, [cit. 5. 12. 2021]. Dostupné z URL: <<https://e-zvaracky.sk/obchod/redukny-ventil-ar-200-bar/>>
- [17] Farnell: *NUCLEO-F401RE* [online]. 2021, [cit. 7. 12. 2021]. Dostupné z URL: <<https://cz.farnell.com/stmicroelectronics/nucleo-f401re/nucleo-board-mcu/dp/2394223>>
- [18] STMicroelectronics: *STM32L452RE* [online]. 221 strán. DS11912 Rev 7, 2020. [cit. 7. 12. 2021]. Dostupné z URL: <<https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32l452re.pdf>>
- [19] GM Electronic: *LCD alfanumerický displej 4x20 znaků, modrý, SPLC780 DM2004AB* [online]. 2021, [cit. 8. 12. 2021]. Dostupné z URL: <<https://www.gme.cz/alfanumericky-lcd-displej-20x4-modry-splc780>>

- [20] Shenzhen Eone Electronics CO.: *Specification For LCD Module 2004A* [online]. 16 strán. Rev 1.1, 2007. [cit. 7.12.2021]. Dostupné z URL: <https://www.laskarduino.cz/user/related_files/rk-10290_410_datasheet.pdf>
- [21] Texas Instruments: *PCF8574* [online]. 44 strán. SCPS068J Rev 03/2015, 2001. [cit. 7.12.2021]. Dostupné z URL: <<https://www.ti.com/lit/gpn/pcf8574>>
- [22] GM Electronic: *Převodník I2C - displej* [online]. 2021, [cit. 8.12.2021]. Dostupné z URL: <<https://www.gme.cz/prevodnik-i2c-display-product-38324>>
- [23] GM Electronic: *Modul s rotačním enkodérem* [online]. 2021, [cit. 8.12.2021]. Dostupné z URL: <<https://www.gme.cz/modul-s-rotacnim-enkodérem>>
- [24] Leadshine: *Leadshine Hybrid Stepper Motor CM Series - 42CM08 NEMA 17* [online]. 2021, [cit. 8.12.2021]. Dostupné z URL: <<https://leadshineindia.com/products/leadshine-hybrid-stepper-motor-42cm08>>
- [25] CNC Shop: *42CM08 - krokový 2-fázový motor 0,8Nm* [online]. 2021, [cit. 8.12.2021]. Dostupné z URL: <<http://cncshop.cz/42cm08-krokovy-2-fazovy-motor-0-8nm>>
- [26] SOROTEC: *Leadshine DM542EU Digital 20-50VDC 1,0 - 4,2A* [online]. 2021, [cit. 8.12.2021]. Dostupné z URL: <<https://www.sorotec.de/shop/Digital-Driver-DM542EU-Digital.html>>
- [27] SOROTEC: *DM542E User Manual* [online]. 15 strán. Rev 1.0, 2016. [cit. 8.12.2021]. Dostupné z URL: <https://www.upload.sorotec.de/doku/manuals/DM542E_Manual.pdf>
- [28] RS: *Keramické ohřívací těleso* [online]. 2021, [cit. 8.12.2021]. Dostupné z URL: <<https://cz.rs-online.com/web/p/topna-telesa/3489002/>>
- [29] IBEST Electrical: *Features of IBEST Single Phase DC Control AC Voltage Solid State Relay* [online]. 2021, [cit. 8.12.2021]. Dostupné z URL: <<http://www.ibestchina.com/ProDetail.aspx?Proid=70>>
- [30] NEVEN: *MAX6675 modul převodníku pro termočlánek typu "K"* [online]. 2021, [cit. 8.12.2021]. Dostupné z URL: <<https://www.neven.cz/kategorie/elektronicke-soucastky/elektronicky-vyvoj/prevodniky-redukce/max6675-modul-prevodniku-pro-termoclanek-typu-k/>>
- [31] Maxim Integrated: *MAX6675* [online]. 37 strán. 19-2235, Rev 3 - 06/2020, 2021. [cit. 8.12.2021]. Dostupné z URL: <<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX6675.pdf>>

- [32] Filotronix: *K type Thermocouple* [online]. 2021, [cit. 8. 12. 2021]. Dostupné z URL: <https://www.filotronix.com/thermal/167-k-type-thermocouple.html>
- [33] Banggood: *24V DC Vibrating Motor* [online]. 2021, [cit. 8. 12. 2021]. Dostupné z URL: <http://bgd.onl/9U>
- [34] Dratek.cz: *PWM 15A 400W MOSFET* [online]. 2021, [cit. 8. 12. 2021]. Dostupné z URL: <https://dratek.cz/arduino/1754-pwm-15a-400w-mosfet.html?hp&mena=2>
- [35] International Rectifier: *AOD4184A* [online]. 6 strán. Rev.0, 9/2009. [cit. 8. 12. 2021]. Dostupné z URL: <http://www.aosmd.com/pdfs/datasheet/AOD4184A.pdf>
- [36] Meanwell: *LRS-150-24 Mean Well Spínaný zdroj uzavřený 150W 24V* [online]. 2021, [cit. 9. 12. 2021]. Dostupné z URL: <https://www.czech-meanwell.cz/meanwell/LRS-150-24-Mean-Well-Spinany-zdroj-uzavreny-150W-24V-d3608.htm#detail-anchor-download>
- [37] Meanwell: *150W Single Output Switching Power Supply LSR-150 Series* [online]. 4 strany. Rev 06/2015, 2015. [cit. 9. 12. 2021]. Dostupné z URL: <https://www.czech-meanwell.cz/fotky10575/fotov/LRS-150-spec.pdf>
- [38] Laskarduino: *Step-down měnič s XL4005* [online]. 2021, [cit. 9. 12. 2021]. Dostupné z URL: <https://www.laskarduino.cz/step-down-menic-s-xl4005/>
- [39] GM Electronic: *Krabička s krytím IP65* [online]. 2021, [cit. 28. 4. 2022]. Dostupné z URL: <https://www.gme.cz/krabice-ip65-s-box-516>
- [40] STMicroelectronics: *STM32L452RE* [online]. 50 strán. UM2206 Rev 5, 12/2020. [cit. 28. 4. 2022]. Dostupné z URL: https://www.st.com/resource/en/user_manual/um2206-stm32-nucleo64p-boards-mb1319-stmicroelectronics.pdf

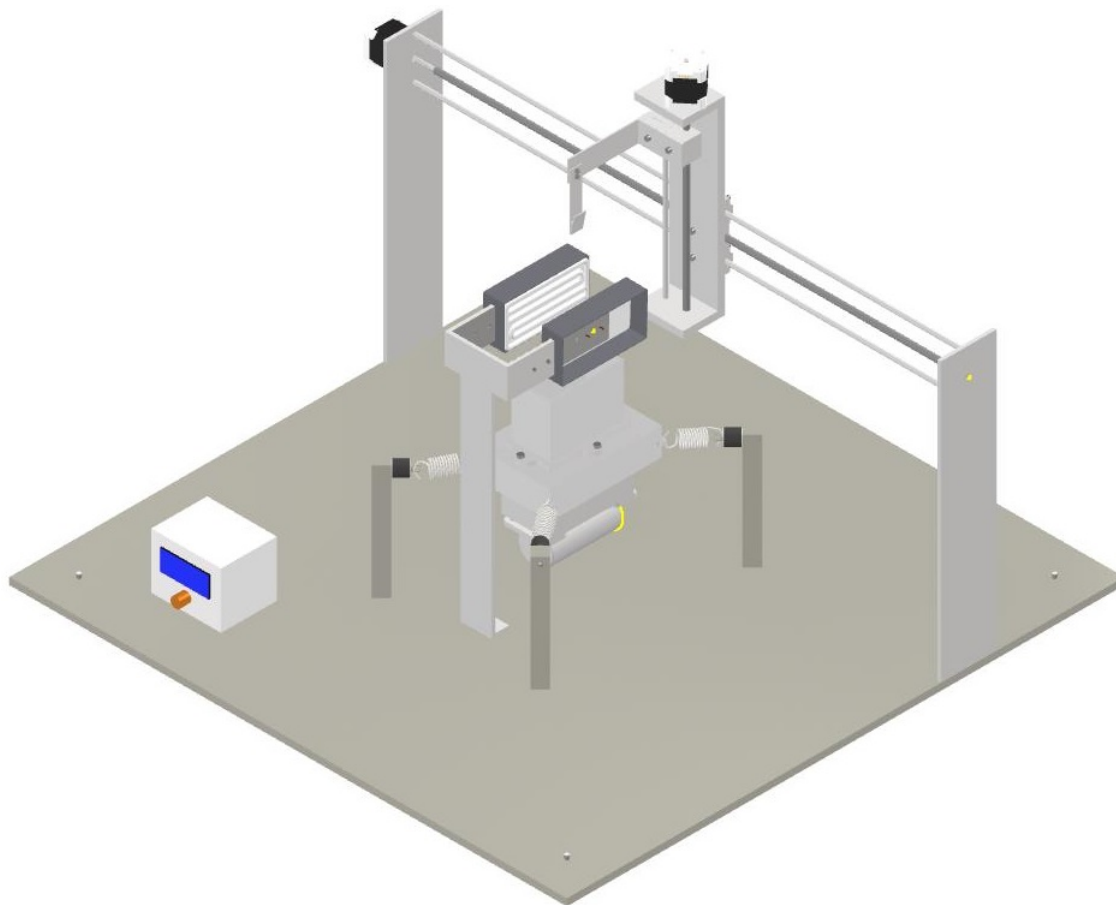
Zoznam symbolov a skratiek

HIO	Hybridný integrovaný obvod
LCD	Liquid crystal display
SSR	Solid state relay

Zoznam príloh

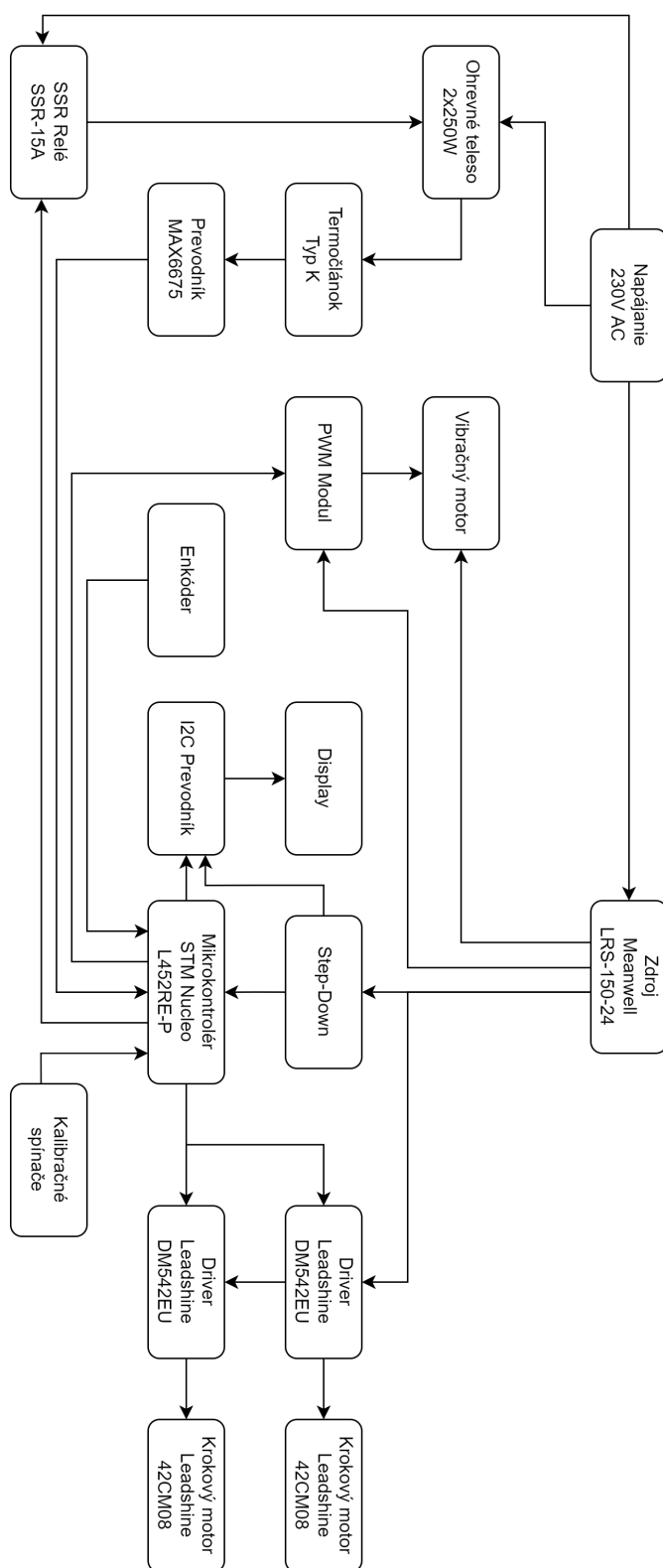
A	Prototyp fluidizačného zariadenia	83
B	Bloková schéma elektronickej časti	84
C	Kompletné fluidizačné zariadenie	85
D	Kód knižnice LCD.c	86
E	Kód knižnice Stepper_Control.c	90
F	Kód knižnice Temp_Sensor.c	98
G	Kód knižnice Vibration_Motor.c	100
H	Kód knižnice Menu.c	101
I	Výber z knižnice prerušení stm32l4xx_it	113
J	Kód funkcie Fluidization_PROCESS	117
K	Kompletný program - priložený na CD	124

A Prototyp fluidizačného zariadenia



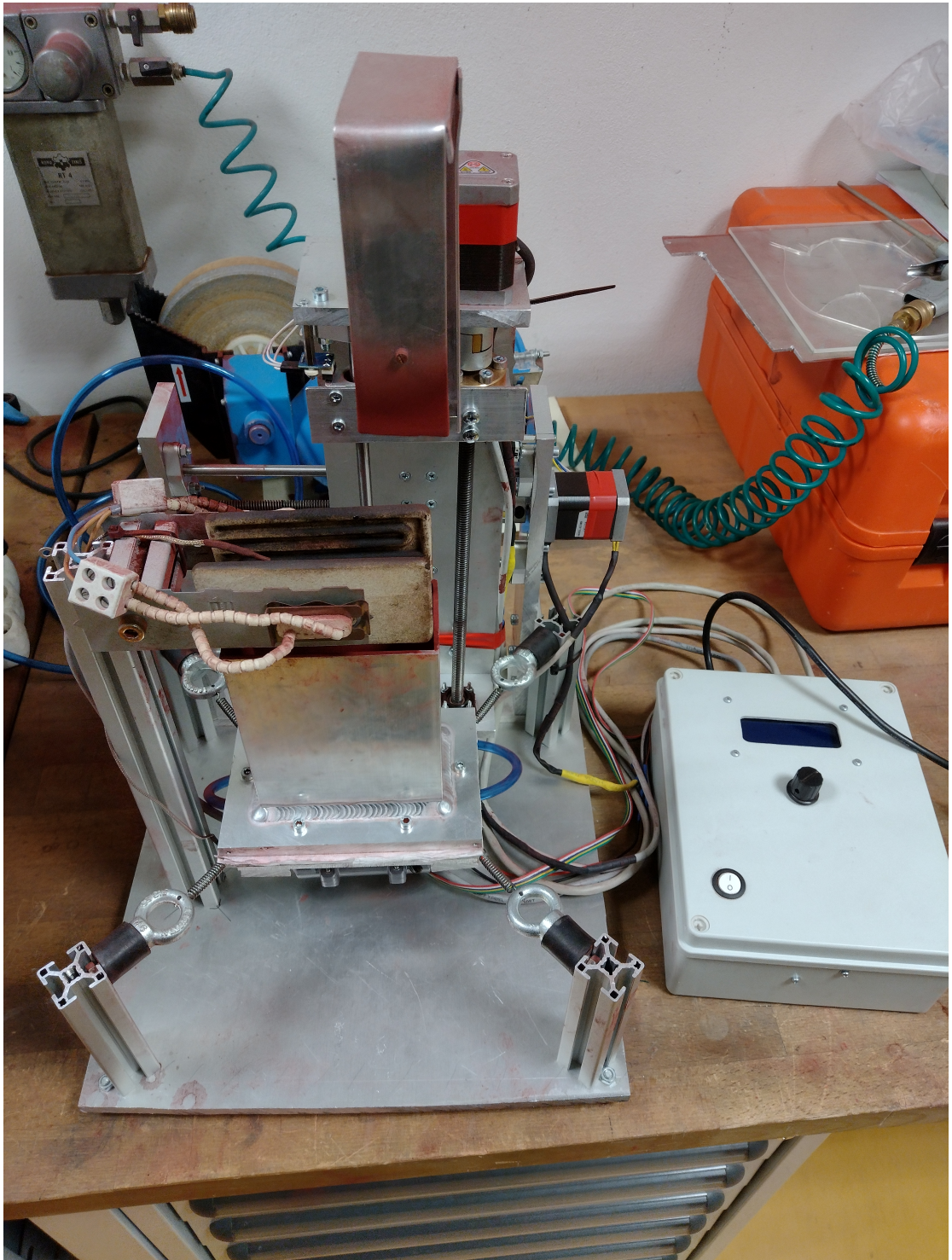
Obr. A.1: Prototyp fluidizačného zariadenia

B Bloková schéma elektronickej časti



Obr. B.1: Bloková schéma elektronickej časti zariadenia

C Kompletné fluidizačné zariadenie



Obr. C.1: Kompletné fluidizačné zariadenie

D Kód knihovny LCD.c

Výpis D.1: Knihovna LCD.c

```
1 //Includes
2 #include <stdio.h>
3 #include "stm32l4xx_hal.h"
4 #include "stm32l4xx_it.h"
5
6 //Variables
7 uint8_t SlaveAddress; //address variable
8
9 //Externs
10 extern I2C_HandleTypeDef hi2c1;
11
12 //Set I2C Adress
13 void lcd_set_address (uint8_t Adress)
14 {
15     SlaveAddress = Adress;
16 }
17
18
19 //Send command
20 void lcd_send_cmd (char cmd)
21 {
22     char data_u, data_l;
23     uint8_t data_t[4];
24     data_u = (cmd & (0xf0));
25     data_l = ((cmd<<4) & (0xf0));
26     data_t[0] = data_u|0x0C; //en=1, rs=0
27     data_t[1] = data_u|0x08; //en=0, rs=0
28     data_t[2] = data_l|0x0C; //en=1, rs=0
29     data_t[3] = data_l|0x08; //en=0, rs=0
30     HAL_I2C_Master_Transmit (&hi2c1, SlaveAddress, data_t, 4, 100);
31     HAL_Delay(1);
32 }
33
34
35 //Send data
36 void lcd_send_data (char data)
37 {
38     char data_u, data_l;
```

```

39     uint8_t data_t[4];
40     data_u = (data & (0xf0));
41     data_l = ((data << 4) & (0xf0));
42     data_t[0] = data_u | 0x0D;    //en=1, rs=1
43     data_t[1] = data_u | 0x09;    //en=0, rs=1
44     data_t[2] = data_l | 0x0D;    //en=1, rs=1
45     data_t[3] = data_l | 0x09;    //en=0, rs=1
46     HAL_I2C_Master_Transmit (&hi2c1, SlaveAddress, data_t, 4, 100);
47     HAL_Delay(1);
48 }
49
50
51 //Send string
52 void lcd_send_string (char *str)
53 {
54     while (*str){
55         lcd_send_data (*str++);
56     }
57 }
58
59
60 //Initialize Display
61 void lcd_init ()
62 {
63     // 4 bit initialization
64     HAL_Delay(50);    // wait for >40ms
65     lcd_send_cmd (0x30);
66     HAL_Delay(5);
67     lcd_send_cmd (0x30);
68     HAL_Delay(5);
69     lcd_send_cmd (0x30);
70     HAL_Delay(10);
71     lcd_send_cmd (0x20);    // 4bit mode
72     HAL_Delay(10);
73
74     //Display initialization
75     lcd_send_cmd (0x28);
76     // Function set --> DL=0 (4 bit mode),
77     // N = 1 (2 line display) F = 0 (5x8 characters)
78     HAL_Delay(5);
79     lcd_send_cmd (0x08);

```

```

80      //Display on/off control --> D=0,C=0, B=0 ---> display off
81      HAL_Delay(5);
82      lcd_send_cmd (0x01); //Clear display
83      HAL_Delay(5);
84      lcd_send_cmd (0x06); //Entry mode set --> I/D = 1
85                          //((increment cursor) & S = 0 (no shift)
86      HAL_Delay(5);
87      lcd_send_cmd (0x0C);
88      //Display on/off control --> D = 1,
89      //C and B = 0. (Cursor and blink, last two bits)
90      HAL_Delay(5);
91  }
92
93
94  //Line set 0-3, Col set 0-19
95  void lcd_set_line_col (uint8_t line, uint8_t col)
96  {
97      if(((line<5) && (line>=0)) && ((col >= 0) && (col < 20))){
98
99          switch (line)
100          {
101              case 0 :
102                  lcd_send_cmd(0x80|(0x00+(col)));
103                  break;
104
105              case 1 :
106                  lcd_send_cmd(0x80|(0x40+(col)));
107                  break;
108
109              case 2 :
110                  lcd_send_cmd(0x80|(0x14+col));
111                  break;
112
113              case 3 :
114                  lcd_send_cmd(0x80|(0x54+col));
115                  break;
116
117              default:
118                  break;
119          }
120      }

```

```
121     }
122
123
124     //clear LCD
125     void lcd_clear()
126     {
127         lcd_send_cmd(0x01);
128         HAL_Delay(2); //command process time > 1.4ms
129     }
```

E Kód knihovny Stepper_Control.c

Výpis E.1: Knihovna Stepper_Control.c

```
1  //Includes
2  #include <stdio.h>
3  #include "main.h"
4  #include "stm32l4xx.h"
5  #include "LCD.h"
6  #include "Stepper_Control.h"
7
8  //Externs
9  extern uint16_t len_meas;
10 extern uint16_t pulse_meas;
11
12 extern TIM_HandleTypeDef htim1;
13
14 //Init motor registers
15 void Motor_INIT(){
16     HAL_GPIO_WritePin(ENA_X_GPIO_Port, ENA_X_Pin, 1);
17     //Disable X motor driver
18     HAL_GPIO_WritePin(ENA_Z_GPIO_Port, ENA_Z_Pin, 1);
19     //Disable Z motor driver
20     HAL_Delay(1);
21
22     //Enable timer update interrupt
23     __HAL_TIM_ENABLE_IT(&htim1, TIM_IT_UPDATE);
24     //Set PWM to 50%
25     TIM1->CCR4 = 4;
26     TIM1->CCR1 = 4;
27
28 }
29
30 //Calibration
31 void Motor_CALIBRATE(){
32     lcd_clear();
33     lcd_set_line_col(1, 3);
34     lcd_send_string("CALIBRATING");
35
36     //Calibrate Z
37     HAL_GPIO_WritePin(ENA_Z_GPIO_Port, ENA_Z_Pin, 0);
38     //Enable Z motor driver
```

```

39     HAL_Delay(1);
40
41     HAL_GPIO_WritePin(DIR_Z_GPIO_Port, DIR_Z_Pin, 0); //Dir = UP
42     HAL_Delay(1);
43
44     HAL_TIM_PWM_Start(&htim1, TIM_CHANNEL_1); //Motor PWM Start
45
46     while(HAL_GPIO_ReadPin(CAL_SW_Z_GPIO_Port, CAL_SW_Z_Pin)){
47         //While switch is off - inverted logic
48
49         if(!HAL_GPIO_ReadPin(CAL_SW_Z_GPIO_Port, CAL_SW_Z_Pin)){
50             //If switch is on
51             HAL_TIM_PWM_Stop(&htim1, TIM_CHANNEL_1);
52             //Stop motor PWM
53             HAL_GPIO_WritePin(ENA_Z_GPIO_Port, ENA_Z_Pin, 1);
54             //Disable Z motor driver
55         }
56     }
57
58     HAL_TIM_PWM_Stop(&htim1, TIM_CHANNEL_1); //Stop motor PWM
59     HAL_GPIO_WritePin(ENA_Z_GPIO_Port, ENA_Z_Pin, 1);
60     //Disable Z motor driver
61
62     len_meas = 0;
63     pulse_meas = 0;
64
65     // Move Z 1mm from switch
66     HAL_GPIO_WritePin(ENA_Z_GPIO_Port, ENA_Z_Pin, 0);
67     HAL_Delay(1);
68
69     HAL_GPIO_WritePin(DIR_Z_GPIO_Port, DIR_Z_Pin, 1);
70     //Dir = D
71     HAL_Delay(1);
72
73     __HAL_TIM_ENABLE_IT(&htim1, TIM_IT_UPDATE);
74     HAL_TIM_PWM_Start_IT(&htim1, TIM_CHANNEL_1);
75
76     while(len_meas < 1){
77
78     }
79

```

```

80     HAL_TIM_PWM_Stop_IT(&htim1, TIM_CHANNEL_1);
81
82     HAL_GPIO_WritePin(ENA_Z_GPIO_Port, ENA_Z_Pin, 1);
83     HAL_Delay(1);
84
85     len_meas = 0;
86     pulse_meas = 0;
87
88
89     //Calibrate X
90     HAL_GPIO_WritePin(ENA_X_GPIO_Port, ENA_X_Pin, 0);
91     //Enable X motor driver
92     HAL_Delay(1);
93
94     HAL_GPIO_WritePin(DIR_X_GPIO_Port, DIR_X_Pin, 0);
95     //Dir = L
96     HAL_Delay(1);
97
98     HAL_TIM_PWM_Start(&htim1, TIM_CHANNEL_4); //Motor PWM Start
99
100    while((HAL_GPIO_ReadPin(CAL_SW_X_GPIO_Port, CAL_SW_X_Pin))){
101    //While switch is off - inverted logic
102
103        if(!HAL_GPIO_ReadPin(CAL_SW_X_GPIO_Port, CAL_SW_X_Pin)){
104        //If switch is on
105            HAL_TIM_PWM_Stop(&htim1, TIM_CHANNEL_4);
106            //Stop motor PWM
107            HAL_GPIO_WritePin(ENA_X_GPIO_Port, ENA_X_Pin, 1);
108            //Disable X motor driver
109
110        }
111    }
112    HAL_TIM_PWM_Stop(&htim1, TIM_CHANNEL_4);
113    //Stop motor PWM
114    HAL_GPIO_WritePin(ENA_X_GPIO_Port, ENA_X_Pin, 1);
115    //Disable X motor driver
116
117    //Zero measurement variables
118    len_meas = 0;
119    pulse_meas = 0;
120

```



```

121 // Move X 1mm from switch
122 HAL_GPIO_WritePin(ENA_X_GPIO_Port, ENA_X_Pin, 0);
123 HAL_Delay(1);
124
125 HAL_GPIO_WritePin(DIR_X_GPIO_Port, DIR_X_Pin, 1); // Dir = L
126
127 HAL_Delay(1);
128
129 HAL_TIM_PWM_Start_IT(&htim1, TIM_CHANNEL_4);
130
131 while(len_meas < 1){
132
133 }
134
135 HAL_TIM_PWM_Stop_IT(&htim1, TIM_CHANNEL_4);
136
137 HAL_GPIO_WritePin(ENA_X_GPIO_Port, ENA_X_Pin, 1);
138 HAL_Delay(1);
139
140 len_meas = 0;
141 pulse_meas = 0;
142
143 lcd_clear();
144 }
145
146
147 //Set direction and length to move in mm
148 void Motor_MOVE_X(char dir_set, uint16_t len_set){
149     if(HAL_GPIO_ReadPin(CAL_SW_X_GPIO_Port, CAL_SW_X_Pin)){
150         HAL_GPIO_WritePin(ENA_X_GPIO_Port, ENA_X_Pin, 0);
151         HAL_Delay(1);
152
153         if(dir_set == 'R'){
154             HAL_GPIO_WritePin(DIR_X_GPIO_Port, DIR_X_Pin, 0);
155         }
156
157         if(dir_set == 'L'){
158             HAL_GPIO_WritePin(DIR_X_GPIO_Port, DIR_X_Pin, 1);
159         }
160         HAL_Delay(1);
161

```

```

162     HAL_TIM_PWM_Start_IT(&htim1, TIM_CHANNEL_4);
163
164     while(len_meas < len_set){
165
166     }
167
168     HAL_TIM_PWM_Stop_IT(&htim1, TIM_CHANNEL_4);
169
170     HAL_GPIO_WritePin(ENA_X_GPIO_Port, ENA_X_Pin, 1);
171     HAL_Delay(1);
172     len_meas = 0;
173     pulse_meas = 0;
174 }
175
176 }
177
178 void Motor_MOVE_Z(char dir_set, uint16_t len_set){
179     if(HAL_GPIO_ReadPin(CAL_SW_Z_GPIO_Port, CAL_SW_Z_Pin)){
180         HAL_GPIO_WritePin(ENA_Z_GPIO_Port, ENA_Z_Pin, 0);
181         HAL_Delay(1);
182
183         if(dir_set == 'U'){
184             HAL_GPIO_WritePin(DIR_Z_GPIO_Port, DIR_Z_Pin, 0);
185         }
186
187         if(dir_set == 'D'){
188             HAL_GPIO_WritePin(DIR_Z_GPIO_Port, DIR_Z_Pin, 1);
189         }
190         HAL_Delay(1);
191
192         HAL_TIM_PWM_Start_IT(&htim1, TIM_CHANNEL_1);
193
194         while(len_meas < len_set){
195
196         }
197
198         HAL_TIM_PWM_Stop_IT(&htim1, TIM_CHANNEL_1);
199
200         HAL_GPIO_WritePin(ENA_Z_GPIO_Port, ENA_Z_Pin, 1);
201         HAL_Delay(1);
202         len_meas = 0;

```

```

203     pulse_meas = 0;
204 }
205 }
206
207 void Motor_POSITION_INIT(){
208     //Calibrate Z
209     HAL_GPIO_WritePin(ENA_Z_GPIO_Port, ENA_Z_Pin, 0);
210     HAL_Delay(1);
211
212     HAL_GPIO_WritePin(DIR_Z_GPIO_Port, DIR_Z_Pin, 0);
213     HAL_Delay(1);
214
215     HAL_TIM_PWM_Start(&htim1, TIM_CHANNEL_1);
216
217     while(HAL_GPIO_ReadPin(CAL_SW_Z_GPIO_Port, CAL_SW_Z_Pin)){
218
219         if(!HAL_GPIO_ReadPin(CAL_SW_Z_GPIO_Port, CAL_SW_Z_Pin)){
220             HAL_TIM_PWM_Stop(&htim1, TIM_CHANNEL_1);
221             HAL_GPIO_WritePin(ENA_Z_GPIO_Port, ENA_Z_Pin, 1);
222         }
223     }
224
225     HAL_TIM_PWM_Stop(&htim1, TIM_CHANNEL_1);
226     HAL_GPIO_WritePin(ENA_Z_GPIO_Port, ENA_Z_Pin, 1);
227
228     len_meas = 0;
229     pulse_meas = 0;
230
231     //Move Z 1mm from switch
232     HAL_GPIO_WritePin(ENA_Z_GPIO_Port, ENA_Z_Pin, 0);
233     HAL_Delay(1);
234
235     HAL_GPIO_WritePin(DIR_Z_GPIO_Port, DIR_Z_Pin, 1); //Dir = D
236     HAL_Delay(1);
237
238
239     HAL_TIM_PWM_Start_IT(&htim1, TIM_CHANNEL_1);
240
241     while(len_meas < 1){
242
243     }

```

```

244
245     HAL_TIM_PWM_Stop_IT(&htim1, TIM_CHANNEL_1);
246
247     HAL_GPIO_WritePin(ENA_Z_GPIO_Port, ENA_Z_Pin, 1);
248     HAL_Delay(1);
249
250     len_meas = 0;
251     pulse_meas = 0;
252
253     //calibrate X
254     HAL_GPIO_WritePin(ENA_X_GPIO_Port, ENA_X_Pin, 0);
255     HAL_Delay(1);
256
257     HAL_GPIO_WritePin(DIR_X_GPIO_Port, DIR_X_Pin, 0);
258     HAL_Delay(1);
259
260     HAL_TIM_PWM_Start(&htim1, TIM_CHANNEL_4);
261
262     while((HAL_GPIO_ReadPin(CAL_SW_X_GPIO_Port, CAL_SW_X_Pin))){
263
264         if(!HAL_GPIO_ReadPin(CAL_SW_X_GPIO_Port, CAL_SW_X_Pin)){
265             HAL_TIM_PWM_Stop(&htim1, TIM_CHANNEL_4);
266             HAL_GPIO_WritePin(ENA_X_GPIO_Port, ENA_X_Pin, 1);
267
268         }
269     }
270     HAL_TIM_PWM_Stop(&htim1, TIM_CHANNEL_4);
271     HAL_GPIO_WritePin(ENA_X_GPIO_Port, ENA_X_Pin, 1);
272
273     // Move X 1mm from switch
274     HAL_GPIO_WritePin(ENA_X_GPIO_Port, ENA_X_Pin, 0);
275     HAL_Delay(1);
276
277     HAL_GPIO_WritePin(DIR_X_GPIO_Port, DIR_X_Pin, 1); // Dir = L
278
279     HAL_Delay(1);
280
281     HAL_TIM_PWM_Start_IT(&htim1, TIM_CHANNEL_4);
282
283     while(len_meas < 1){
284

```

```
285     }
286
287     HAL_TIM_PWM_Stop_IT(&htim1, TIM_CHANNEL_4);
288
289     HAL_GPIO_WritePin(ENA_X_GPIO_Port, ENA_X_Pin, 1);
290     HAL_Delay(1);
291
292     len_meas = 0;
293     pulse_meas = 0;
294 }
```

F Kód knihovny Temp_Sensor.c

Výpis F.1: Knihovna Temp_Sensor.c

```
1  //Includes
2  #include <stdio.h>
3  #include "main.h"
4  #include "stm32l4xx.h"
5  #include "Temp_Sensor.h"
6
7  //Externs
8  extern TIM_HandleTypeDef htim3;
9  extern SPI_HandleTypeDef hspi1;
10
11
12 //Variables
13 uint8_t GetTemp[2];
14 uint8_t temp_compare;
15 float temp_measure;
16
17
18 //Initialize temperature
19 void Temp_INIT(){
20     HAL_GPIO_WritePin(HEATER_SSR_GPIO_Port, HEATER_SSR_Pin, 0);
21     HAL_GPIO_WritePin(TEMP_CS_GPIO_Port, TEMP_CS_Pin, 1);
22
23 }
24
25 //Start temp loop
26 void Temp_START(){
27     HAL_TIM_Base_Start_IT(&htim3);
28 }
29
30 //Set temperature
31 void Temp_SET (uint8_t set_temp){
32
33     temp_compare = set_temp;
34 }
35
36 //Get temperature from sensor
37 float Temp_GET(){
38
```

```

39  HAL_GPIO_WritePin(TEMP_CS_GPIO_Port, TEMP_CS_Pin, 0);
40  HAL_SPI_Receive(&hspi1, GetTemp, 1, 50);
41  HAL_GPIO_WritePin(TEMP_CS_GPIO_Port, TEMP_CS_Pin, 1);
42
43  uint16_t OutTempBit = (((GetTemp[0])+(GetTemp[1] << 8)) >> 3);
44  float OutTemp = (float)OutTempBit*0.25;;
45
46  return OutTemp;
47 }
48
49 //Keep temperature on set level
50 void Temp_KEEP(){
51
52     temp_measure = Temp_GET();
53
54     //temp++
55     if (temp_measure < temp_compare){
56         HAL_GPIO_WritePin(HEATER_SSR_GPIO_Port, HEATER_SSR_Pin, 1);
57     }
58
59     //temp--, temp ok
60     if (temp_measure >= temp_compare){
61         HAL_GPIO_WritePin(HEATER_SSR_GPIO_Port, HEATER_SSR_Pin, 0);
62     }
63 }
64
65 //Stop temperature keeping
66 void Temp_STOP(){
67
68     HAL_GPIO_WritePin(HEATER_SSR_GPIO_Port, HEATER_SSR_Pin, 0);
69     HAL_TIM_Base_Stop_IT(&htim3);
70 }

```

G Kód knihovny Vibration_Motor.c

Výpis G.1: Knihovna Vibration_Motor.c

```
1 //includes
2 #include <stdio.h>
3 #include "main.h"
4 #include "stm32l4xx.h"
5 #include "Vibration_Motor.h"
6
7 //externs
8 extern TIM_HandleTypeDef htim2;
9
10 void Vibration_SET(int set_pwm){
11     if((set_pwm <= 99) && (set_pwm >= 0)){
12         TIM2->CCR1 = set_pwm;
13     }
14 }
15
16 void Vibration_START(){
17
18     HAL_TIM_PWM_Start(&htim2, TIM_CHANNEL_1);
19 }
20
21 void Vibration_STOP(){
22
23     HAL_TIM_PWM_Stop(&htim2, TIM_CHANNEL_1);
24 }
```


H Kód knihovny Menu.c

Výpis H.1: Knihovna Menu.c

```
1
2 //Includes
3 #include <stdio.h>
4 #include <stdbool.h>
5 #include "main.h"
6 #include "stm32l4xx.h"
7 #include "LCD.h"
8 #include "Vibration_Motor.h"
9 #include "Menu.h"
10
11 //Externs
12 extern bool enc_up;
13 extern bool enc_down;
14 extern bool enc_sw;
15
16 extern uint16_t subs_size;
17 extern uint16_t vibration_pwm;
18 extern uint16_t pre_heat_temp;
19 extern uint16_t hardening_temp;
20 extern uint16_t pre_heat_time;
21 extern uint16_t in_fluid_time;
22 extern uint16_t hardening_time;
23 extern uint16_t iterations;
24 extern bool start_process;
25
26 //Variables
27 char disp[20];
28
29 uint16_t menu_state;
30 uint16_t last_menu_state;
31 uint16_t start = 0;
32
33
34
35
36 //Encoder handler function
37 void Encoder_HANDLER(uint16_t *variable, int up_limit, int down_limit){
38
```

```

39  if (!HAL_GPIO_ReadPin(ENC_CLK_GPIO_Port , ENC_CLK_Pin)){
40
41      if (!HAL_GPIO_ReadPin(ENC_DT_GPIO_Port , ENC_DT_Pin))
42      {
43          while (!HAL_GPIO_ReadPin(ENC_DT_GPIO_Port , ENC_DT_Pin)){
44              }
45          if(*variable > down_limit){
46              *variable = *variable-1;
47          }
48          while (!HAL_GPIO_ReadPin(ENC_CLK_GPIO_Port , ENC_CLK_Pin)){
49              }
50          HAL_Delay (5);
51      }
52
53      else if (HAL_GPIO_ReadPin(ENC_DT_GPIO_Port , ENC_DT_Pin)){
54          while (HAL_GPIO_ReadPin(ENC_DT_GPIO_Port , ENC_DT_Pin)){
55              }
56          if(*variable < up_limit){
57              *variable = *variable+1;
58          }
59          while (!HAL_GPIO_ReadPin(ENC_CLK_GPIO_Port , ENC_CLK_Pin)){
60              }
61          while (!HAL_GPIO_ReadPin(ENC_DT_GPIO_Port ,ENC_DT_Pin)){
62              }
63          HAL_Delay (5);
64      }
65  }
66 }
67
68 // Menu initialization
69 void Menu_INIT(){
70
71     subs_size = 1;
72     vibration_pwm = 1;
73     pre_heat_temp = 50;
74     hardening_temp = 50;
75     pre_heat_time = 10;
76     in_fluid_time = 10;
77     hardening_time = 10;
78     iterations = 1;
79     start_process = false;

```

```

80     menu_state = 1;
81
82     lcd_clear();
83     lcd_set_line_col(0, 3);
84     lcd_send_string("Fluidized床");
85     lcd_set_line_col(1, 3);
86     lcd_send_string("for hybrid IC");
87     lcd_set_line_col(2, 5);
88     lcd_send_string("packaging");
89     lcd_set_line_col(3, 2);
90     lcd_send_string("PRESS TO START");
91     while(enc_sw == false){
92     }
93     enc_sw = false;
94     lcd_clear();
95     lcd_set_line_col(0,0);
96     lcd_send_string("Substrate size:2");
97     lcd_set_line_col(0,17);
98     sprintf(displ, "%c", (char)34);
99     lcd_send_string(displ);
100    lcd_set_line_col(1,0);
101    lcd_send_string("Vibrations:1%");
102    lcd_set_line_col(2,0);
103    lcd_send_string("Pre-Heat temp:50");
104    sprintf(displ,"%cC", (char)223);
105    lcd_set_line_col(2,17);
106    lcd_send_string(displ);
107    lcd_set_line_col(3,0);
108    lcd_send_string("Pre-Heat time:10s");
109 }
110
111 //Menu loop function
112 void Menu_LOOP(){
113
114     switch (menu_state){
115
116         case 1:
117             if(menu_state != last_menu_state){
118                 lcd_set_line_col(0,0);
119                 lcd_send_string(">");
120                 lcd_set_line_col(1,0);

```

```

121         lcd_send_string("_");
122         lcd_set_line_col(2,0);
123         lcd_send_string("_");
124         lcd_set_line_col(3,0);
125         lcd_send_string("_");
126
127         last_menu_state = menu_state;
128     }
129     if(enc_sw == true){
130         enc_sw = false;
131
132         while(enc_sw == false){
133             Encoder_HANDLER(&subs_size, 2, 1);
134             if(subs_size == 1){
135                 sprintf(displ,"%d%c", 2, (char)34);
136             }
137             if(subs_size == 2){
138                 sprintf(displ,"%d%c", 4, (char)34);
139             }
140             lcd_set_line_col(0,16);
141             lcd_send_string(displ);
142         }
143         enc_sw = false;
144     }
145     break;
146
147     case 2:
148         if(menu_state != last_menu_state){
149             lcd_set_line_col(0,0);
150             lcd_send_string("_");
151             lcd_set_line_col(1,0);
152             lcd_send_string(">");
153             lcd_set_line_col(2,0);
154             lcd_send_string("_");
155
156             last_menu_state = menu_state;
157         }
158
159         if(enc_sw){
160             enc_sw = false;
161             //Vibration_START();

```

```

162
163     while(enc_sw == false){
164         Encoder_HANDLER(&vibration_pwm, 100, 1);
165         Vibration_SET(vibration_pwm);
166         lcd_set_line_col(1,12);
167         sprintf(displ,"%d%c", vibration_pwm, '%');
168         lcd_send_string(displ);
169     }
170     enc_sw = false;
171     // Vibration_STOP();
172 }
173 break;
174
175 case 3:
176     if(menu_state != last_menu_state){
177         lcd_set_line_col(0,0);
178         lcd_send_string("_");
179         lcd_set_line_col(1,0);
180         lcd_send_string("_");
181         lcd_set_line_col(2,0);
182         lcd_send_string(">");
183         lcd_set_line_col(3,0);
184         lcd_send_string("_");
185
186         last_menu_state = menu_state;
187     }
188
189     if(enc_sw){
190         enc_sw = false;
191
192         while(enc_sw == false){
193             Encoder_HANDLER(&pre_heat_temp, 250, 50);
194             lcd_set_line_col(2,15);
195             sprintf(displ,"%d°C", pre_heat_temp, (char)223);
196             lcd_send_string(displ);
197         }
198         enc_sw = false;
199     }
200     break;
201
202 case 4:

```

```

203     if(menu_state != last_menu_state){
204         if(last_menu_state > 4){
205             lcd_clear();
206             lcd_set_line_col(0,0);
207             lcd_send_string("_Substrate_size:_");
208             lcd_set_line_col(0,16);
209             if(subs_size == 1){
210                 sprintf(displ,"%d%c", 2, (char)34);
211             }
212             if(subs_size == 2){
213                 sprintf(displ,"%d%c", 4, (char)34);
214             }
215             lcd_send_string(displ);
216             lcd_set_line_col(1,0);
217             lcd_send_string("_Vibrations:_");
218             sprintf(displ, "%d%c_", vibration_pwm, '%');
219             lcd_set_line_col(1,12);
220             lcd_send_string(displ);
221             lcd_set_line_col(2,0);
222             lcd_send_string("_Pre-Heat_temp:_");
223             sprintf(displ,"%d°C_", pre_heat_temp, (char)223);
224             lcd_set_line_col(2,15);
225             lcd_send_string(displ);
226             lcd_set_line_col(3,0);
227             lcd_send_string(">Pre-Heat_time:_");
228             sprintf(displ,"%ds", pre_heat_time);
229             lcd_set_line_col(3,15);
230             lcd_send_string(displ);
231         }
232
233         else{
234             lcd_set_line_col(2,0);
235             lcd_send_string("_");
236             lcd_set_line_col(3,0);
237             lcd_send_string(">");
238         }
239
240         last_menu_state = menu_state;
241     }
242
243     if(enc_sw){

```

```

244         enc_sw = false;
245
246         while(enc_sw == false){
247             Encoder_HANDLER(&pre_heat_time, 999, 10);
248             lcd_set_line_col(3,15);
249             sprintf(displ,"%ds", pre_heat_time);
250             lcd_send_string(displ);
251         }
252         enc_sw = false;
253     }
254     break;
255
256     case 5:
257         if(menu_state != last_menu_state){
258             if(last_menu_state < 5){
259                 lcd_clear();
260                 lcd_set_line_col(0,0);
261                 lcd_send_string(">In-Fluid_time:");
262                 sprintf(displ,"%ds", in_fluid_time);
263                 lcd_set_line_col(0,15);
264                 lcd_send_string(displ);
265                 lcd_set_line_col(1,0);
266                 lcd_send_string("Harden_temp:");
267                 sprintf(displ,"%d°C", hardening_temp, (char)223);
268                 lcd_set_line_col(1,13);
269                 lcd_send_string(displ);
270                 lcd_set_line_col(2,0);
271                 lcd_send_string("Harden_time:");
272                 sprintf(displ,"%ds", hardening_time);
273                 lcd_set_line_col(2,13);
274                 lcd_send_string(displ);
275                 lcd_set_line_col(3,0);
276                 lcd_send_string("Iterations:");
277                 lcd_set_line_col(3,12);
278                 sprintf(displ,"%d", iterations);
279                 lcd_send_string(displ);
280
281             }
282             else{
283                 lcd_set_line_col(0,0);
284                 lcd_send_string(">");

```

```

285         lcd_set_line_col(1,0);
286         lcd_send_string("_");
287         lcd_set_line_col(2,0);
288         lcd_send_string("_");
289         lcd_set_line_col(3,0);
290         lcd_send_string("_");
291     }
292
293     last_menu_state = menu_state;
294 }
295
296 if(enc_sw){
297     enc_sw = false;
298
299     while(enc_sw == false){
300         Encoder_HANDLER(&in_fluid_time, 999, 10);
301         lcd_set_line_col(0,15);
302         sprintf(displ,"%ds_", in_fluid_time);
303         lcd_send_string(displ);
304     }
305     enc_sw = false;
306 }
307 break;
308
309 case 6:
310     if(menu_state != last_menu_state){
311         lcd_set_line_col(0,0);
312         lcd_send_string("_");
313         lcd_set_line_col(1,0);
314         lcd_send_string(">");
315         lcd_set_line_col(2,0);
316         lcd_send_string("_");
317
318         last_menu_state = menu_state;
319     }
320
321     if(enc_sw){
322         enc_sw = false;
323
324         while(enc_sw == false){
325             Encoder_HANDLER(&hardening_temp, 255, 50);

```



```

326         lcd_set_line_col(1,13);
327         sprintf(displ,"%d°C", hardening_temp,  (char)223);
328         lcd_send_string(displ);
329     }
330     enc_sw = false;
331 }
332 break;
333
334 case 7:
335     if(menu_state != last_menu_state){
336         lcd_set_line_col(1,0);
337         lcd_send_string("_");
338         lcd_set_line_col(2,0);
339         lcd_send_string(">");
340         lcd_set_line_col(3,0);
341         lcd_send_string("_");
342
343         last_menu_state = menu_state;
344     }
345
346     if(enc_sw){
347         enc_sw = false;
348
349         while(enc_sw == false){
350             Encoder_HANDLER(&hardening_time, 999, 10);
351             lcd_set_line_col(2,13);
352             sprintf(displ,"%ds_", hardening_time);
353             lcd_send_string(displ);
354         }
355         enc_sw = false;
356     }
357     break;
358
359 case 8:
360     if(menu_state != last_menu_state){
361         if(last_menu_state > 8){
362             lcd_clear();
363             lcd_set_line_col(0,0);
364             lcd_send_string("_In-Fluid_time:_");
365             sprintf(displ,"%ds", in_fluid_time);
366             lcd_set_line_col(0,15);

```

```

367         lcd_send_string(displ);
368         lcd_set_line_col(1,0);
369         lcd_send_string("HardenTemp:");
370         sprintf(displ,"%dC", hardening_temp, (char)223);
371         lcd_set_line_col(1,13);
372         lcd_send_string(displ);
373         lcd_set_line_col(2,0);
374         lcd_send_string("HardenTime:");
375         sprintf(displ,"%ds", hardening_time);
376         lcd_set_line_col(2,13);
377         lcd_send_string(displ);
378         lcd_set_line_col(3,0);
379         lcd_send_string(">Iterations:");
380         lcd_set_line_col(3,12);
381         sprintf(displ,"%d", iterations);
382         lcd_send_string(displ);
383     }
384     else{
385         lcd_set_line_col(2,0);
386         lcd_send_string("");
387         lcd_set_line_col(3,0);
388         lcd_send_string(">");
389     }
390
391     last_menu_state = menu_state;
392 }
393
394 if(enc_sw){
395     enc_sw = false;
396
397     while(enc_sw == false){
398         Encoder_HANDLER(&iterations, 50, 1);
399         lcd_set_line_col(3,12);
400         sprintf(displ,"%d", iterations);
401         lcd_send_string(displ);
402     }
403     enc_sw = false;
404 }
405 break;
406
407 case 9:

```

```

408     if(menu_state != last_menu_state){
409         if(last_menu_state < 9){
410             lcd_clear();
411             lcd_set_line_col(0,0);
412             lcd_send_string(">Start□Process");
413         }
414         else{
415             lcd_set_line_col(0,0);
416             lcd_send_string(">");
417             lcd_set_line_col(1,0);
418             lcd_send_string("□");
419             lcd_set_line_col(2,0);
420             lcd_send_string("□");
421             lcd_set_line_col(3,0);
422             lcd_send_string("□");
423
424         }
425         last_menu_state = menu_state;
426     }
427
428     if(enc_sw){
429
430         enc_sw = false;
431         lcd_clear();
432         lcd_set_line_col(0,2);
433         lcd_send_string("Do□You□really");
434         lcd_set_line_col(1,2);
435         lcd_send_string("want□to□start?");
436         start = 1;
437
438         while(enc_sw == false){
439             Encoder_HANDLER(&start, 2, 1);
440             if(start == 1){
441                 lcd_set_line_col(2,9);
442                 lcd_send_string("NO□");
443             }
444             if(start == 2){
445                 lcd_set_line_col(2,9);
446                 lcd_send_string("YES");
447             }
448         }

```

```

449     }
450     enc_sw = false;
451
452     if(start == 1){
453         start = 0;
454         lcd_clear();
455         lcd_set_line_col(0,0);
456         lcd_send_string(">Start□Process");
457     }
458     if(start == 2){
459         start = 0;
460         Fluidization_PROCESS();
461         lcd_clear();
462         lcd_set_line_col(0,0);
463         lcd_send_string(">Start□Process");
464     }
465
466     break;
467
468 }
469 }

```

I Výber z knižnice prerušení stm32l4xx_it

Výpis I.1: Výber z knižnice prerušení stm32l4xx_it

```
1  /* Includes */
2  #include "main.h"
3  #include "stm32l4xx_it.h"
4  /* Private includes */
5  /* USER CODE BEGIN Includes */
6  #include "Temp_Sensor.h"
7
8  #include "stdbool.h"
9  #include "LCD.h"
10 #include "stdio.h"
11 /* USER CODE END Includes */
12
13
14 /* Private variables */
15 /* USER CODE BEGIN PV */
16 uint16_t len_meas = 0;
17 uint16_t pulse_meas = 0;
18
19 uint8_t seconds = 0;
20 uint8_t timer = 0;
21 uint8_t temp_check_cnt;
22
23
24 bool enc_up = 0;
25 bool enc_down = 0;
26 bool enc_sw = 0;
27 bool temp_check = 0;
28
29
30 /* External variables */
31 extern TIM_HandleTypeDef htim1;
32 extern TIM_HandleTypeDef htim3;
33 extern TIM_HandleTypeDef htim6;
34 extern TIM_HandleTypeDef htim15;
35 /* USER CODE BEGIN EV */
36 extern float temp_measure;
37 /* USER CODE END EV */
38
```

```

39
40 /**
41  * @brief This function handles EXTI line2 interrupt.
42  */
43 void EXTI2_IRQHandler(void)
44 {
45     /* USER CODE BEGIN EXTI2_IRQn 0 */
46
47     /* USER CODE END EXTI2_IRQn 0 */
48     HAL_GPIO_EXTI_IRQHandler(ENC_SW_Pin);
49     /* USER CODE BEGIN EXTI2_IRQn 1 */
50
51     __HAL_TIM_SET_COUNTER(&htim6, 0);
52     HAL_TIM_Base_Start_IT(&htim6);
53     /* USER CODE END EXTI2_IRQn 1 */
54 }
55
56 /**
57  * @brief This function handles
58  *        TIM1 break interrupt and TIM15 global interrupt.
59  */
60 void TIM1_BRK_TIM15_IRQHandler(void)
61 {
62     /* USER CODE BEGIN TIM1_BRK_TIM15_IRQn 0 */
63
64     /* USER CODE END TIM1_BRK_TIM15_IRQn 0 */
65     HAL_TIM_IRQHandler(&htim1);
66     HAL_TIM_IRQHandler(&htim15);
67     /* USER CODE BEGIN TIM1_BRK_TIM15_IRQn 1 */
68     timer++;
69     /* USER CODE END TIM1_BRK_TIM15_IRQn 1 */
70 }
71
72 /**
73  * @brief This function handles
74  *        TIM1 update interrupt and TIM16 global interrupt.
75  */
76 void TIM1_UP_TIM16_IRQHandler(void)
77 {
78     /* USER CODE BEGIN TIM1_UP_TIM16_IRQn 0 */
79

```

```

80  /* USER CODE END TIM1_UP_TIM16_IRQn 0 */
81  HAL_TIM_IRQHandler(&htim1);
82  /* USER CODE BEGIN TIM1_UP_TIM16_IRQn 1 */
83  pulse_meas++;
84  if(pulse_meas == 200){
85      //try all switches for 200 steps per one rotation
86      len_meas++;
87      pulse_meas = 0;
88  }
89
90  /* USER CODE END TIM1_UP_TIM16_IRQn 1 */
91  }
92
93  /**
94   * @brief This function handles TIM3 global interrupt.
95   */
96  void TIM3_IRQHandler(void)
97  {
98      /* USER CODE BEGIN TIM3_IRQn 0 */
99
100     /* USER CODE END TIM3_IRQn 0 */
101     HAL_TIM_IRQHandler(&htim3);
102     /* USER CODE BEGIN TIM3_IRQn 1 */
103     Temp_KEEP(); //keep temp cycle when interrupt
104     if(temp_check){
105         temp_check_cnt++;
106     }
107     /* USER CODE END TIM3_IRQn 1 */
108  }
109
110  /**
111   * @brief This function handles
112   *        TIM6 global interrupt,
113   *        DAC channel1 underrun error interrupt.
114   */
115  void TIM6_DAC_IRQHandler(void)
116  {
117      /* USER CODE BEGIN TIM6_DAC_IRQn 0 */
118
119      /* USER CODE END TIM6_DAC_IRQn 0 */
120      HAL_TIM_IRQHandler(&htim6);

```

```
121    /* USER CODE BEGIN TIM6_DAC_IRQn 1 */
122
123    if(HAL_GPIO_ReadPin(ENC_SW_GPIO_Port, ENC_SW_Pin)){
124        enc_sw = true;
125    }
126
127    HAL_TIM_Base_Stop_IT(&htim6);
128
129    /* USER CODE END TIM6_DAC_IRQn 1 */
130 }
131
132 /* USER CODE BEGIN 1 */
133
134 /* USER CODE END 1 */
```


J Kód funkcie Fluidization_PROCESS

Výpis J.1: Funkcia Fluidization_PROCESS

```
1 void Fluidization_PROCESS(){
2
3     iteration_cnt = 0;
4     temp_check = false;
5     temp_check_cnt = 0;
6
7     lcd_clear();
8     lcd_set_line_col(1, 0);
9     lcd_send_string("FLUIDIZATION_PROCESS");
10    HAL_Delay(3000);
11
12    //Open air valve and set air flow
13    Vibration_START();
14    lcd_clear();
15    lcd_set_line_col(0, 3);
16    lcd_send_string("Vibrations_ON");
17    lcd_set_line_col(1, 2);
18    lcd_send_string("Open_air_valve");
19    lcd_set_line_col(2, 2);
20    lcd_send_string("and_set_air_flow");
21    lcd_set_line_col(3, 1);
22    lcd_send_string("Click_to_continue");
23    while(!enc_sw){
24    }
25    enc_sw = false;
26
27    //Initializing heaters
28    lcd_clear();
29    lcd_set_line_col(1, 4);
30    lcd_send_string("Initializing");
31    lcd_set_line_col(2, 6);
32    lcd_send_string("Heaters");
33    Temp_SET(pre_heat_temp);
34    Temp_START();
35    lcd_set_line_col(3, 7);
36    sprintf(str, "%.2f", temp_measure);
37    lcd_send_string(str);
38
```

```

39
40  if(pre_heat_temp < temp_measure){
41      while(temp_check_cnt < 10){
42          if(temp_measure > pre_heat_temp){
43              lcd_set_line_col(3, 7);
44              sprintf(str, "%.2f", temp_measure);
45              lcd_send_string(str);
46              temp_check = false;
47              temp_check_cnt = 0;
48          }
49          if(temp_measure <= pre_heat_temp){
50              temp_check = true;
51          }
52      }
53      temp_check = false;
54      temp_check_cnt = 0;
55  }
56  if(pre_heat_temp > temp_measure){
57      while(temp_check_cnt < 10){
58          if(temp_measure < pre_heat_temp){
59              lcd_set_line_col(3, 7);
60              sprintf(str, "%.2f", temp_measure);
61              lcd_send_string(str);
62              temp_check = false;
63              temp_check_cnt = 0;
64          }
65          if(temp_measure >= pre_heat_temp){
66              temp_check = true;
67          }
68      }
69      temp_check = false;
70      temp_check_cnt = 0;
71  }
72
73
74  while(iteration_cnt < iterations){
75      //Pre-Heating process
76      Motor_MOVE_X('L', 54);
77      HAL_Delay(500);
78      lcd_clear();
79      lcd_set_line_col(1, 4);

```

```

80     lcd_send_string("PRE-HEATING");
81     if(subs_size == 1){
82         Motor_MOVE_Z('D', 75);
83     }
84     if(subs_size == 2){
85         Motor_MOVE_Z('D', 30);
86     }
87     timer = 0;
88     HAL_TIM_Base_Start_IT(&htim15);
89     while(timer != pre_heat_time){
90
91     }
92     HAL_TIM_Base_Stop_IT(&htim15);
93     timer = 0;
94     HAL_Delay(500);
95
96     //Fluidization
97     lcd_clear();
98     lcd_set_line_col(1, 6);
99     lcd_send_string("FLUIDIZATION");
100    if(subs_size == 1){
101        Motor_MOVE_Z('D', 115);
102    }
103    if(subs_size == 2){
104        Motor_MOVE_Z('D', 120);
105    }
106    timer = 0;
107    HAL_TIM_Base_Start_IT(&htim15);
108    while(timer != in_fluid_time){
109
110    }
111    HAL_TIM_Base_Stop_IT(&htim15);
112    timer = 0;
113    HAL_Delay(500);
114
115    //Changing temp for hardening
116    Temp_SET(hardening_temp);
117    lcd_clear();
118    lcd_set_line_col(0, 3);
119    lcd_send_string("CHANGING_TEMP");
120    lcd_set_line_col(1, 7);

```

```

121     lcd_send_string("FOR");
122     lcd_set_line_col(2, 5);
123     lcd_send_string("HARDENING");
124     if(subs_size == 1){
125         Motor_MOVE_Z('U', 180);
126     }
127     if(subs_size == 2){
128         Motor_MOVE_Z('U', 140);
129     }
130
131     if(pre_heat_temp < hardening_temp){
132         while(temp_check_cnt < 10){
133             if(temp_measure < hardening_temp){
134                 lcd_set_line_col(3, 7);
135                 sprintf(str, "%.2f", temp_measure);
136                 lcd_send_string(str);
137                 temp_check = false;
138                 temp_check_cnt = 0;
139
140             }
141             if(temp_measure >= hardening_temp){
142                 temp_check = true;
143             }
144         }
145         temp_check = false;
146         temp_check_cnt = 0;
147     }
148
149     if(pre_heat_temp > hardening_temp){
150         while(temp_check_cnt < 10){
151             if(temp_measure > hardening_temp){
152                 lcd_set_line_col(3, 7);
153                 sprintf(str, "%.2f", temp_measure);
154                 lcd_send_string(str);
155                 temp_check = false;
156                 temp_check = 0;
157             }
158             if(temp_measure <= hardening_temp){
159                 temp_check = true;
160             }
161         }

```

```

162     temp_check = false;
163     temp_check_cnt = 0;
164 }
165 HAL_Delay(500);
166
167 //Hardening
168 lcd_clear();
169 lcd_set_line_col(1, 4);
170 lcd_send_string("HARDENING");
171 if(subs_size == 1){
172     Motor_MOVE_Z('D', 68);
173 }
174 if(subs_size == 2){
175     Motor_MOVE_Z('D', 25);
176 }
177 timer = 0;
178 HAL_TIM_Base_Start_IT(&htim15);
179 while(timer != hardening_time){
180
181 }
182 HAL_TIM_Base_Stop_IT(&htim15);
183 timer = 0;
184 HAL_Delay(500);
185
186 Motor_POSITION_INIT();
187
188 //Repeat process
189 if((iterations > 1) && (pre_heat_temp != hardening_temp)){
190     Temp_SET(pre_heat_temp);
191     lcd_clear();
192     lcd_set_line_col(0, 2);
193     lcd_send_string("CHANGING_TEMP");
194     lcd_set_line_col(1, 7);
195     lcd_send_string("FOR");
196     lcd_set_line_col(2, 5);
197     lcd_send_string("PRE-HEAT");
198
199     if(pre_heat_temp < hardening_temp){
200         while(temp_check_cnt < 10){
201             if(temp_measure > pre_heat_temp){
202                 lcd_set_line_col(3, 7);

```

```

203         sprintf(str, "%.2f", temp_measure);
204         lcd_send_string(str);
205         temp_check = false;
206         temp_check_cnt = 0;
207     }
208     if(temp_measure <= pre_heat_temp){
209         temp_check = true;
210     }
211 }
212 temp_check = false;
213 temp_check_cnt = 0;
214 }
215 if(pre_heat_temp > hardening_temp){
216     while(temp_check_cnt < 10){
217         if(temp_measure < pre_heat_temp){
218             lcd_set_line_col(3, 7);
219             sprintf(str, "%.2f", temp_measure);
220             lcd_send_string(str);
221             temp_check = false;
222             temp_check_cnt = 0;
223         }
224         if(temp_measure >= pre_heat_temp){
225             temp_check = true;
226         }
227     }
228     temp_check = false;
229     temp_check_cnt = 0;
230 }
231
232 }
233     iteration_cnt++;
234     HAL_Delay(500);
235 }
236
237 iteration_cnt = 0;
238 Temp_STOP();
239 Motor_POSITION_INIT();
240 Vibration_STOP();
241
242 lcd_clear();
243 lcd_set_line_col(0, 2);

```

```
244    lcd_send_string("Close□air□valve");
245    lcd_set_line_col(3, 1);
246    lcd_send_string("Click□to□continue");
247    while(!enc_sw){
248    }
249    enc_sw = false;
250 }
```

K Kompletný program - priložený na CD