



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

LEVITUJÍCÍ VOZÍTKO POHÁNĚNO STLAČENÝM VZDUCHEM

LEVITAING ROVER POWERED BY COMPRESSED AIR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Simona Petrovská

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Michalec, Ph.D.

BRNO 2025

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Studentka: **Simona Petrovská**
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Michal Michalec, Ph.D.**
Akademický rok: 2025/26

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Levitující vozítko poháněno stlačeným vzduchem

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na návrh, výrobu a testování levitujícího vozítka poháněného stlačeným vzduchem. Vozítko využívá tlak vzduchu k vytvoření vzduchového polštáře, který minimalizuje tření mezi vozidlem a podložkou, a zároveň slouží jako pohon. Cílem je vyvinout funkční prototyp, který bude demonstrovat princip a použitelnost tohoto řešení. Práce umožní získat praktické zkušenosti s návrhem a výrobou netradičního pohonného systému a přispěje k lepšímu pochopení možností využití stlačeného vzduchu v malých dopravních systémech.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem práce je navrhnout, vyrobit a otestovat funkční prototyp levitujícího vozítka poháněného stlačeným vzduchem.

Dílní cíle bakalářské práce:

- zpracovat rešerši zaměřenou na technologie a principy vzduchové levitace a pohonu stlačeným vzduchem,
- návrh koncepčního řešení pohonu a vzduchového polštáře pro levitaci,
- vypracování konstrukčního řešení vozítka na základě navržené koncepce,
- výroba a otestování funkčního prototypu levitujícího vozítka s využitím 3D tisku.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, digitální data.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<https://www.ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

BOOSER, E. Richard a KHONSARI, Michael M. Applied Tribology. In: Applied Tribology. United Kingdom: John Wiley & Sons, Incorporated, 2017. ISBN 1118637240.

KOPÁČEK, Jaroslav. Pneumatické mechanismy. D1, Pneumatické prvky a systémy. 2. vydání. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2010. ISBN 978-80248-0879-6.

REINHART, Gunther; CHATTI, Sami; LAPERRIÈRE, Luc a TOLIO, Tullio. Aerostatic Bearing. In: CIRP Encyclopedia of Production Engineering. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019, s. 53-53. ISBN 3662531194. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-3-662-53120-4_300021.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2025/26

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá vývojem funkčního prototypu levitujícího vozítka poháněného stlačeným vzduchem. Hlavním řešeným problémem je integrace vzduchové levitace a pneumatického pohonu do jednoho funkčního celku. Podstata řešené problematiky spočívá v aplikaci aerostatických ložisek za účelem vytvoření vzduchového filmu. Ten slouží k nadnášení podvozku a minimalizaci tření mezi vozítkem a podložkou. Pohon vozítka zajišťují směrovatelné trysky. Dále je v práci řešena volba parametrů 3D tisku pro maximální těsnost a optimální rovinnost podvozku. Vozítko je řízeno dálkově pomocí běžně dostupného dálkového ovladače. Prototyp vozítka byl sestaven a otestován.

KLÍČOVÁ SLOVA

vzduchová levitace, pohon stlačeným vzduchem, 3D tisk, aerostatická ložiska, dálkové ovládání

SUMMARY

This thesis focuses on the development of a functional prototype of a levitating rover powered by compressed air. The main problem addressed is the integration of air levitation and pneumatic propulsion into a single functional unit. The core of the issue lies in the application of aerostatic bearings to generate an air film. This film serves to lift the chassis and minimize friction between the vehicle and the surface. The vehicle is propelled by steerable nozzles. Furthermore, the thesis addresses the selection of 3D printing parameters to ensure maximum airtightness and optimal flatness of the chassis. The vehicle is controlled remotely using a commercially available remote control. The prototype of the vehicle was constructed and tested.

KEYWORDS

air levitation, compressed air propulsion, 3D printing, aerostatic bearings, remote control

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PETROVSKÁ, Simona. *Levitující vozítko poháněno stlačeným vzduchem*. Online, bakalářská práce. Michal MICHALEC (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2026. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/173474>.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu práce Ing. Michalu Michalcovi, Ph.D., za odborné vedení, cenné rady a čas, který mi věnoval během celého procesu zpracování této práce.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně, pod odborným vedením Ing. Michala Michalce, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpala, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů. Při zpracování této práce byl využit nástroj Gemini jako podpůrný nástroj při programování.

Simona Petrovská

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1	Principy a technologie vzduchové levitace	14
2.1.1	Nadnášení proudem vzduchu	14
2.1.2	Aerodynamický vztlak	15
2.1.3	Aerostatická ložiska	15
2.1.4	Vznášedla	17
2.2	Pohon stlačeným plynem v dopravě	18
2.2.1	Kolejová vozidla	18
2.2.2	Automobily	19
2.2.3	Pneumobil	20
2.2.4	Kosmický průmysl	20
2.3	Pneumatické mechanismy	21
2.3.1	Převodníky	21
2.3.2	Prvky pro řízení velikosti a směru proudu stlačeného vzduchu	21
2.3.3	Prvky pro řízení tlaku	23
2.3.4	Prvky pro automatizaci pracovního cyklu	24
2.3.5	Pomocné prvky	24
2.4	Elektronika a řízení	25
2.4.1	Motory	25
2.5	Materiály pro 3D tisk	26
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	28
3.1	Analýza problému	28
3.2	Cíl práce	28
4	KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ	30
4.1	Pohon vozítka	30
4.1.1	Pohon stlačeným vzduchem 4 tryskami	30
4.1.2	Pohon stlačeným vzduchem 2 otočnými tryskami	31
4.1.3	Pohon stlačeným vzduchem 4 otočnými tryskami	32
4.1.4	Výběr konceptu	33
4.2	Návrh podvozku	34
4.2.1	Nedělené ložisko	34
4.2.2	Dělené ložisko	35
4.2.3	Ložisko s kompenzačními členy	35
4.2.4	Výběr konceptu	36
5	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	37
5.1	Podvozek	38
5.1.1	Dutiny pro přívod stlačeného vzduchu	38
5.1.2	Stanovení rozměrů a výpočet	40
5.1.3	Parametry tisku	43
5.2	Pneumatický obvod	43

5.2.1	Tvar trysek	44
5.2.2	Mechanismus natáčení trysek	44
5.2.3	Měření tlaku	45
5.3	Elektronika a řízení	45
6	DISKUZE	47
6.1	Podvozek	47
6.2	Pneumatický obvod	48
6.3	Elektronika a řízení	50
	ZÁVĚR	52
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	53
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	57
8.1	Použité zkratky	57
8.2	Použité fyzikální veličiny	57

1 ÚVOD

Princip vzduchového polštáře a aerostatických ložisek nachází uplatnění v široké škále aplikací. Od vedení pro přesné obráběcí a měřicí stroje až po vznášedla nebo projekty vysokorychlostní dopravy [1, 2]. Předností těchto systémů je absence přímého kontaktu mezi tělesem a podložkou, což umožňuje dosahovat vysokých rychlostí s minimálními ztrátami způsobenými pasivními odpory.

Motivací pro zpracování této práce je možnost aplikace využitých principů pro přesné polohování při manipulaci s objekty. Přesné polohování je umožněno eliminací mechanického tření mezi vozítkem a podložkou. Mezi další výhody levitujícího vozítka patří eliminace vibrací. Toho lze využít pro manipulaci s křehkými objekty.

Cílem této bakalářské práce je navrhnout, vyrobit a otestovat funkční prototyp levitujícího vozítka poháněného stlačeným vzduchem. Mezi dílčí cíle patří zpracování rešerše zaměřené na technologie a principy vzduchové levitace a pneumatických pohonů, dále návrh koncepčního a konstrukčního řešení vozítka. Dalším cílem je výroba a otestování funkčního prototypu s využitím technologie 3D tisku.

Předpokládaným výsledkem práce je výroba dálkově řízeného vozítka, které bude reálně demonstrovat princip a praktickou použitelnost navrženého řešení. Tento prototyp by měl v praxi ověřit funkčnost spojení netradičního pohonného systému s aditivně vyráběnými díly a přispět k lepšímu pochopení možností využití stlačeného vzduchu v malých dopravních systémech.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Pro úspěšný návrh levitujícího vozítka poháněného stlačeným vzduchem je potřeba seznámit se s technologiemi a principy vzduchové levitace a využití pohonu stlačeným vzduchem. Součástí vozítka je pneumatický a elektrický obvod, jež budou potřeba řídit. Podvozek vozítka bude vyroben 3D tiskem, je tedy vhodné získat přehled o dostupných materiálech.

2.1 Principy a technologie vzduchové levitace

Vzduchová (aerodynamická) levitace je založena na principu nadnášení tělesa vertikálně proudem vzduchu. Toho lze dosáhnout více způsoby. Prvním způsobem je nadnášení tělesa externím proudem vzduchu, jehož zdroj je umístěn pod tělesem. Další způsob je vytvoření vzduchového polštáře pod tělesem po průchodu proudu vzduchu otvory v tělese. Tento princip využívají vznášedla a vzduchová ložiska. [3]

Při nadnášení tělesa externím proudem vzduchu je jeho vertikální poloha ustálena v momentě, kdy dojde k rovnováze mezi gravitační silou a silou způsobenou odporem tělesa vůči proudu vzduchu. [4]

$$F_g = m \cdot g \quad (1)$$

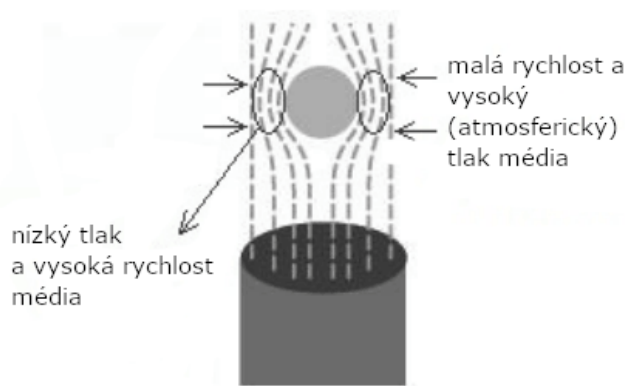
Gravitační síla je přímo úměrná hmotnosti tělesa a gravitačnímu zrychlení. Odporová síla je závislá na následujících parametrech:

$$F_o = \frac{1}{2} \cdot C_x \cdot \rho_v \cdot A \cdot v^2 \quad (2)$$

Kde C_x je odporový koeficient závislý na tvaru a kvalitě povrchu tělesa, ρ_v je hustota proudu vzduchu, A je plocha tělesa odpovídající průmětu do roviny kolmé na směr proudu vzduchu a v je rychlost proudu vzduchu. [4]

2.1.1 Nadnášení proudem vzduchu

Výukový model vzduchové levitace využívá externí zdroj proudu vzduchu umístěný pod kuličkou [3]. Její horizontální poloha je ustálena díky Coandově efektu, znázorněném na obr. 1. Proud o vysoké rychlosti narazí do spodní části míčku a vytvoří zde vysokotlakou oblast. Vzduch proudí okolo povrchu kuličky vysokou rychlostí a vytváří tak oblast o nízkém tlaku. Pokud by došlo k vychýlení míčku ze středu proudu, bude na něj v horizontálním směru působit relativně vysoký (atmosférický) tlak, který jej zatlačí zpět do rovnovážné polohy uprostřed proudu vzduchu. [4]



Obrázek 1: Kulička nadnášená proudem vzduchu, převzato z [4] a upraveno

Změnu tlaku proudu vzduchu v závislosti na jeho rychlosti popisuje Bernoulliho rovnice:

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh_r = \text{konst.} \quad (3)$$

První člen je tlak média, druhý vyjadřuje kinetickou energii média a třetí potenciální energii média. Protože kulička levituje v konstantní výšce, zanedbáme třetí člen rovnice. [4]

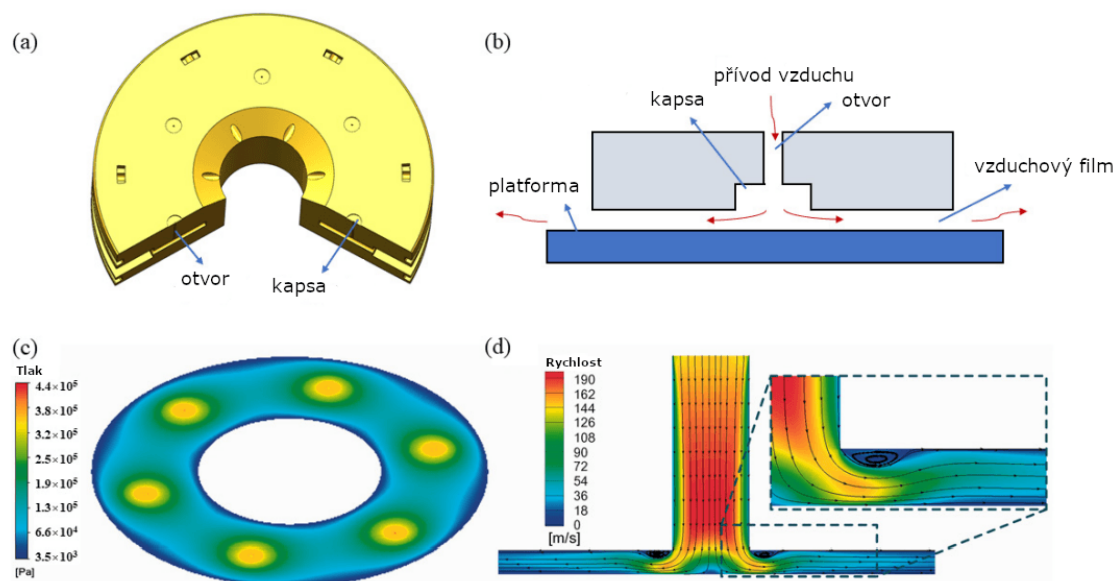
2.1.2 Aerodynamický vztlak

Dalším příkladem nadnášení proudem vzduchu je aerodynamický vztlak. Ten vzniká díky cirkulaci proudění kolem křídla při viskózním proudění nad aerodynamickým profilem. Cirkulace je fyzikálně umožněna viskozitou vzduchu a splněním Kuttovy podmínky. Důsledkem je tlakový rozdíl a nadnášení křídla letadla. [5]

2.1.3 Aerostatická ložiska

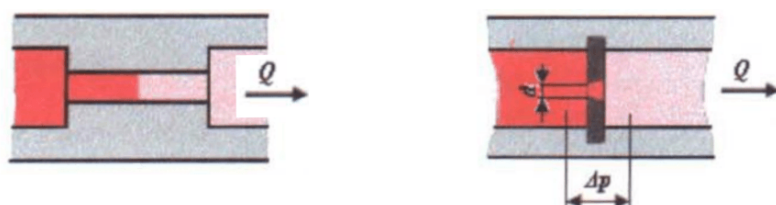
V aerostatických axiálních ložiscích (ATB = aerostatic thrust bearings) se vysokotlaký plynový film s určitou nosností a tuhostí vytváří průchodem vysokotlakého plynu mezi pohyblivým a statickým povrchem. Aerostatická ložiska tak mají tyto výhody: nízké tření, vysoká rychlost, vysoká přesnost a dlouhá životnost. Únosnost aerostatických ložisek je výrazně nižší než u ložisek mazaných olejem, a dále také vibrační stabilita a stlačitelnost plynů představují komplexní analytické problémy. Aerostatická ložiska jsou navržena stejně jako hydrostatická ložiska [6]. [7, 8]

Schéma aerostatických axiálních ložisek je znázorněna na obr. 2a. Tlakový plyn je přiváděn z vnějšího zdroje. Do ložiskové mezery vstupuje přes restriktor a nakonec proudí do atmosféry na vnější hranici ložiska jak je znázorněno na obr. 2b. Redistribuce tlaku a škrticího účinku plynu se dosahuje v tomto procesu. Rozložení tlaku v plyném filmu aerostatického ložiska je znázorněno na obr. 2c. Tlak v blízkosti otvoru je vyšší a tlak plynu postupně klesá s rostoucí vzdáleností od otvoru. Průběh rychlosti v blízkosti kapsy je znázorněn na obr. 2d. Podél radiálního směru rychlost postupně klesá. [8]



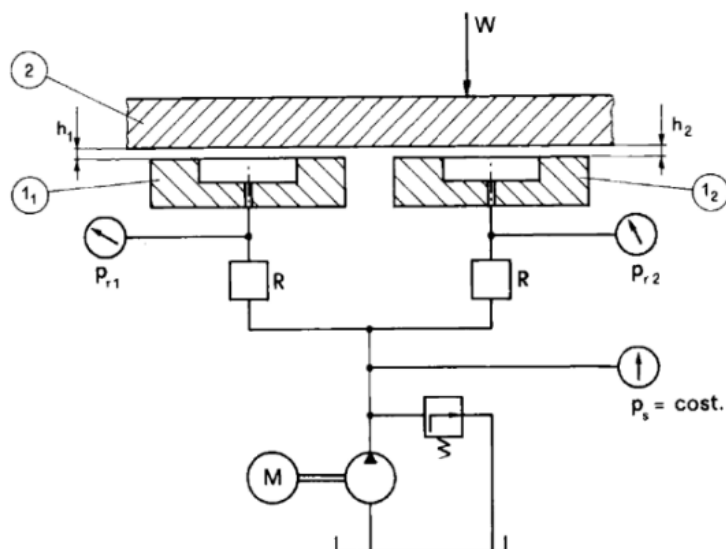
Obrázek 2: Aerostatická ložiska a) schéma, b) princip funkce, c) rozložení tlaku, d) rozložení rychlosti v blízkosti dutin, převzato z [8] a upraveno

Kompenzační prvky zobrazené na obr. 3 se používají u ložisek pro eliminaci negativních vlivů způsobených excentrickým zatížením ložiska a umožňují zásobování dvou nebo více ložiskových kapes jedním čerpadlem [9]. Jako kompenzační prvky se používají kapilárové nebo clonové restriktory. Restriktory mohou být pevné nebo nastavitelné, přičemž jako nastavitelné clonové restriktory se používají škrtkové ventily [9]. Clonové restriktory vykazují vyšší tuhost než kapilárové. [7]



Obrázek 3: Kapilárový restriktor (vlevo) a clonový restriktor (vpravo), převzato z [9] a upraveno

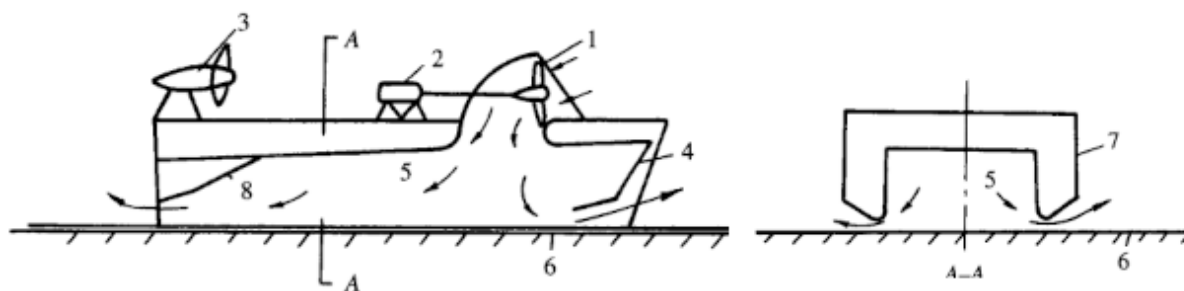
Schéma kompenzačního systému hydrostatických ložisek je zobrazeno na obr. 4. V kapse 1_2 je mazivo o tloušťce h_2 stlačeno a dojde ke zvýšení hydraulického odporu. Následně dojde k poklesu průtoku maziva, jelikož dodávaný tlak maziva p_s je konstantní. Jakmile dojde k vyrovnání tlaku za restriktorem na hodnotu odpovídající silové rovnováze, dojde ke zvýšení průtoku maziva. V kapse 1_1 dochází k opačnému ději. [9]



Obrázek 4: Kompenzační systém dodávání maziva [10]

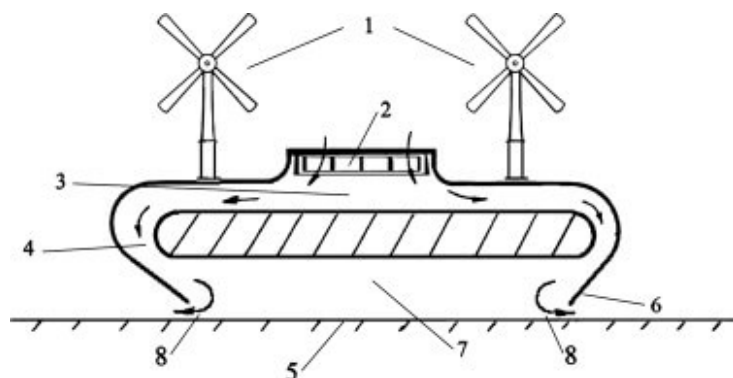
2.1.4 Vznášedla

Vzduchový polštář se pod vznášedlem zobrazeným na obr. 5 nafoukne vzduchem vháněným pod trup vznášedla do pláště. Přetlak vzniklý v tomto plášti zvedne stroj několik centimetrů nad povrch Země. Při levitaci vzduch neustále uniká skulinou vytvořenou pod vzduchovým polštářem a proto je nutné neustále vhánět vzduch pod tělo plavidla. [11]



Obrázek 5: Vznášedlo, 1: vrtule, 2: motor, 3: pohonný motor a vrtule, 4: těsnění na přídi, 5: vzduchový polštář, 6: tvrdý povrch, 7: boční zeď, 8: těsnění na zádi, převzato z [12] a upraveno

Jiný typ konstrukce vznášedla je zobrazen na obr. 6, který využívá periferního proudu vzduchu. Vznášedlo je poháněno vrtulemi. Proud vzduchu procházející štěrbinami tvoří vzduchový polštář a poté prochází periferními stěnovými tryskami skrze vzduchové mezery po stranách vozidla. Odpor způsobený prouděním vzduchu ve vzduchovém polštáři je značný. [13]



Obrázek 6: Vznášedlo, 1: vrtule, 2: nosný ventilátor 3: rozváděcí komora, 4: štěrby, 5: rovný povrch, 6: boční manžeta, 7: vzduchový polštář, 8: periferní stěnové trysky, převzato z [13]

2.2 Pohon stlačeným plynem v dopravě

Využití stlačeného vzduchu se objevilo v dopravě v 70. letech 19. století. Tehdy se konstruktéři zabývali snížením hydrodynamického odporu lodí pomocí nadnášení jejího trupu, aby byly lodě schopné konkurovat v rychlosti automobilům i letadlům. První patent týkající se vozidel na vzduchovém polštáři získal Gustaf de Laval v roce 1882, avšak vzduchový polštář jak jej známe dnes vynalezl v 50. letech 20. století Brit Christopher Cockerell. V roce 1959 pak první vznášedlo přeplulo kanál La Manche. [11]

Současně s vývojem vznášedel se v druhé polovině 19. století v dopravě objevily tramvaje a lokomotivy poháněné stlačeným vzduchem. Lokomotivy na stlačený vzduch našly využití v těžebním průmyslu, jelikož u paliva nehrozí nebezpečí výbuchu. U tramvají pohon stlačeným vzduchem postupně ustoupil účinnějším elektrickým tramvajím [14]. Koncem 20. století se začala vyvíjet auta na stlačený vzduch s cílem snížení emisí [15]. Na VUT se vývojem vozidel poháněných stlačeným vzduchem zabývá studentský tým Pneuracer, který v roce 2011 představil první jednomístné vozítko poháněné pouze vzduchem z tlakových lahví [16]. Pohon stlačeným plynem našel své využití i v kosmickém průmyslu. [17]

2.2.1 Kolejová vozidla

Motory na stlačený vzduch poháněly tramvaje v Berlíně, Švýcarsku a ve francouzském městě Nantes, kde jezdily od roku 1879 [18]. Od roku 1911 se zde začaly postupně nahrazovat modernějšími a efektivnějšími elektrickými tramvajemi. Poslední tramvaj na stlačený vzduch zde jezdila do roku 1917. Jediná doposud zachovalá tramvaj poháněná stlačeným vzduchem zobrazená na obr. 7 je vystavená v muzeu v Paříži. [14]



Obrázek 7: Tramvaj poháněná stlačeným vzduchem [14]

Na začátku 20. století se používaly motory na stlačený vzduch v lokomotivách pro těžbu nerostných surovin ve Spojených státech a Evropě [18].

2.2.2 Automobily

Fosilní paliva používaná v dopravě jsou jednou z příčin globálních problémů jako jsou ozonová díra, skleníkový efekt a znečištění ovzduší. Využívají se proto alternativní zdroje energie. V dopravě jsou to především elektrická energie, vodík a palivové články. Dalším alternativním zdrojem energie pro pohon osobních automobilů je stlačený vzduch. Vývojem automobilů poháněných stlačeným vzduchem se zabývají francouzská firma Motor Development International (MDI) a korejská firma Energine. [19]

Mezi výhody automobilů poháněných stlačeným vzduchem patří [19]:

- nízká hmotnost a cena vozidla
- dosažení velkého točivého momentu při malém objemu motoru
- palivo je nehořlavé
- jednoduchá konstrukce motoru
- nízké náklady na výrobu a provoz
- dostupnost a cena paliva
- rychlé doplnění nádrže

Automobil AirPod 2.0 na stlačený vzduch od společnosti MDI je poháněno motorem na stlačený vzduch. Váží 350 kg a dosahuje rychlosti $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Jeho dojezd je až 120 km, při využití duální energie až 360 km. Má dvě nádrže o obsahu $2 \times 125 \text{ l}$, ve kterých je stlačený vzduch o tlaku 248 b. [20]



Obrázek 8: Airpod 2.0 [20]

Společnost MDI v roce 2019 představila popelářská vozidla Air'Volution poháněná stlačeným vzduchem, které vyrobila pro společnost Veolia [20].

2.2.3 Pneumobil

Pneumobil je závodní vozidlo poháněné stlačeným vzduchem. Tato vozidla jsou vyvíjena univerzitními studentskými týmy, které se s nimi účastní mezinárodních soutěží. Jednou z těchto soutěží je Emerson's International AVENTICS Pneumobile Competition, která je zaměřená na project management, kvalitu návrhu a zpracování podvozku a dynamické disciplíny na trati [16]. Mezi ty patří maximální dojezd, časový závod a akcelerační [16]. Od roku 2012 se této soutěži účastní i studentský tým Pneumobil Racing Team Brno, kterému se nejednou podařilo umístit na medailových pozicích. [21]



Obrázek 9: Pneumobil studentského týmu Pneumobil Racing Team Brno [16]

2.2.4 Kosmický průmysl

Raketové reakční trysky se používají jako alternativní zařízení pro výměnu momentu hybnosti, když rušivé momenty překračují regulační schopnost zařízení pro výměnu momentu hybnosti. Mohou být také použity k zajištění řízení polohy během fáze tahu nebo volného letu, konkrétně k dosažení a udržení určité polohy, nebo řízení rychlosti změny polohy. Jako pracovní médium se využívají inertní plyny, zejména dusík [22]. [23]

2.3 Pneumatické mechanismy

Pneumatické mechanismy jsou využívány pro přenos informace a řízení, i jako silové mechanismy pro malé až střední výkony. Stlačený vzduch je nositelem tlakové, deformační a kinetické energie, potenciální a tepelná energie se zanedbává. Přenos energie v pneumatickém mechanismu a jeho řízení umožňují pneumatické a jiné prvky. Podle funkce lze pneumatické prvky rozdělit do následujících skupin: [24]

- převodníky - prvky určené k převodu energie do stlačeného vzduchu, patří zde generátory (kompresory) a motory
- prvky pro řízení velikosti a směru proudu stlačeného vzduchu - jednosměrné a škrtkové ventily, uzavírací ventily, rozváděče a logické prvky
- prvky pro řízení tlaku - pojistné a redukční ventily a tlakové spínače
- prvky pro automatizaci pracovního cyklu - relé, trysky, zesilovače
- pomocné prvky - úprava stlačeného vzduchu, snižování hluku, atd. [24]

2.3.1 Převodníky

Kompresor transformuje mechanickou energii na potenciální energii stlačeného vzduchu [25]. Mezi jeho hlavní technické parametry patří výkonnost, výtlačný tlak, tlakový poměr a efektivní příkon. Výkonnost kompresoru je množství vzduchu protékající za výtlačným hrdlem kompresoru za jednotku času. Tlakový poměr je poměr absolutního tlaku výtlačného a tlaku sacího. Efektivní příkon kompresoru je příkon potřebný na vstupním hřídeli kompresoru. Kompresory mohou pracovat na objemovém nebo rychlostním principu. Mezi objemové kompresory patří pístové, lamelové a šroubové kompresory. Rychlostní neboli odstředivé kompresory mohou být radiální nebo axiální. [24]

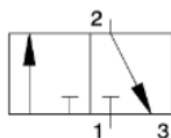
Pneumatické motory využívají k přenosu sil a momentů stlačeného vzduchu jako nositele energie. Dělíme je na pneumostatické a pneumodynamické. Pneumostatické motory využívají tlakovou, popřípadě deformační energii stlačeného vzduchu. Dělíme je na motory s přímočarým, kývavým nebo rotačním pohybem výstupního členu. Pneumodynamické motory (vzduchové turbíny) využívají kinetickou energii stlačeného vzduchu. Používají se zcela výjimečně u pohonu některých strojů, např. ventilátoru nebo dynamu. [24]

2.3.2 Prvky pro řízení velikosti a směru proudu stlačeného vzduchu

Ventily mění směr proudu energie stlačeného vzduchu, rozdělují jej nebo jej uzavírají. Podle funkce je dělíme na ventily pro řízení tlaku, proudu a směru proudu vzduchu. [26]

Ventily pro řízení směru proudu vzduchu mění směr proudu vzduchu, přičemž otevírají, zavírají nebo propojují přívodní a výstupní kanály v tělese [27]. Mezi hlavní parametry těchto ventilů patří způsob jejich ovládání, počet vstupů a výstupů kanálů, počet poloh jejich přestavení a maximální průtok vzduchu, jakého jsou za daných podmínek schopny dosáhnout. Počet vstupních a výstupních kanálů a počet poloh se udává ve tvaru zlomku, kde první číslice udává celkový počet kanálů a druhá číslice počet poloh pro přestavení [27]. Na obr. 10 je zobrazena schematická značka třicestného dvoupolohového ventilu. Ventily se také dělí podle stavu v klidové poloze. Je-li v této poloze proud vzduchu uzavřen, pak jej označujeme jako normálně uzavřený

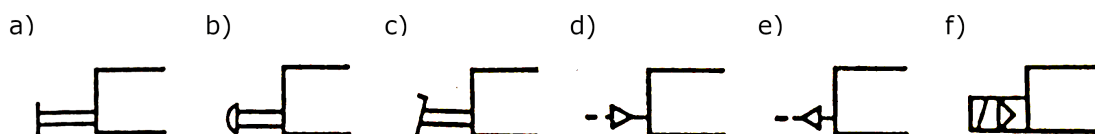
ventil. Prochází-li v klidové poloze ventilem vzduch ze vstupu na výstup, pak jej označujeme jako normálně otevřený ventil. [28]



Obrázek 10: Schematická značka 3/2 ventilu normálně uzavřeného [26]

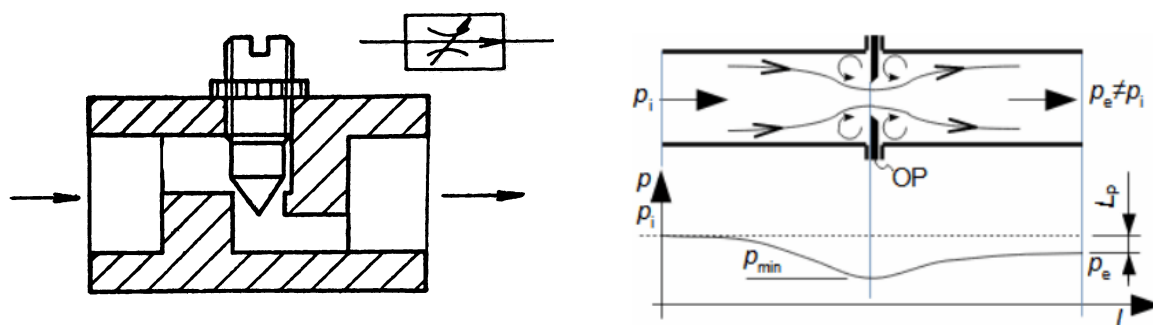
Dle způsobu ovládání můžeme ventily dělit na monostabilní a bistabilní ventily. Monostabilní ventily jsou řízené nepřetržitě, do původní polohy se vrátí pomocí pružiny po odeznění řídicího signálu. Bistabilní ventily mají cívku na obou stranách a impuls řídicího signálu přestaví ventil do opačné polohy. Po přestavení zůstane ventil v poloze, která odpovídá poslednímu impulsu. [26]

Dále dle způsobu ovládání rozlišujeme ventily na ventily ovládané manuálně, pneumaticky a elektromagneticky. Manuálně lze ovládat ventily pomocí ruční páky, tlačítka nebo nožního pedálu. Pro ovládání ventilů elektromagneticky se využívá magnetické síly, kterou působí elektromagnetická cívka pod napětím na šoupátko ventilu a umožňuje tak uzavření či otevření ventilu [28]. Pro pneumatické ovládání je využito stlačeného vzduchu, pomocí něž dojde ke snížení nebo zvýšení řídicího tlaku. Schematické značení pro uvedené způsoby ovládání ventilů je zobrazeno na obr. 11. [24]



Obrázek 11: Schematické značení ovládání ventilů: a) manuálně (obecně), b) tlačítkem, c) nožním pedálem, d) stlačeným vzduchem, e) podtlakem, f) elektromagneticky, převzato z [24] a upraveno

Škrťací ventily se nejčastěji používají u přímočarých motorů pro řízení jejich rychlosti. Vyrábějí se s možností přenastavení jejich škrťacího průřezu, jemuž je přímo úměrný průtok škrťacím ventilem. Při průchodu stlačeného vzduchu zúženým průřezem dochází k poklesu tlaku média, jak je zobrazeno na obr. 12. Při škrcení plynů narůstá entropie, jde tedy o nevratný děj [29]. Často se používají v kombinaci s jednosměrným ventilem, který zabraňuje průtoku média v opačném směru. [24]

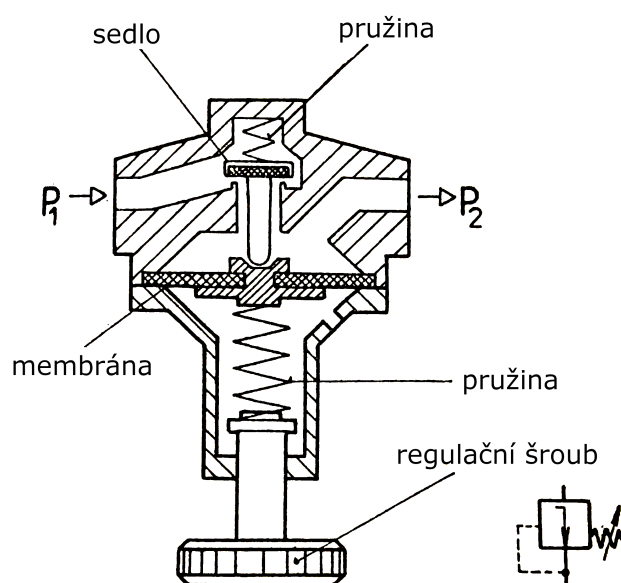


Obrázek 12: Škrťací ventil se schematickou značkou (vlevo), převzato z [24] a upraveno, a tlaková ztráta při škrcení plynů (vpravo) [29]

2.3.3 Prvky pro řízení tlaku

Tlakové ventily se využívají k řízení tlaku, nebo jsou řízeny v závislosti na velikosti tlaku vzduchu [24]. Regulátor tlaku udržuje stálou hodnotu tlaku v pracovním okruhu nezávisle na odebraném množství a kolísání tlaku dodávaného stlačeného vzduchu [25].

Schematicky zobrazená konstrukce standardního regulátoru tlaku pro zobrazení principu jeho funkce je na obr. 13. Regulátor tlaku pracuje na principu vzájemného silového působení tlaku vzduchu a pružin na membránu ventilu. Síla od předepnuté pružiny vyvozená nastavovacím šroubem prohne membránu a stlačený vzduch proudí do výstupního kanálu. Tlakem vzduchu ve výstupním kanálu na plochu membrány se vyrovnává síla předepnuté pružiny, která na membránu působí [24]. Jakmile tlak vzduchu vyrovná sílu pružiny, dojde k uzavření ventilu [24]. Odběrem vzduchu na výstupním kanále dojde k poklesu tlaku ve výstupním kanále a otevření ventilu. Ventil se zavírá a otevírá tak, aby při kolísání odběru stlačeného vzduchu byla vždy zachována rovnováha sil působících na membránu. [25]

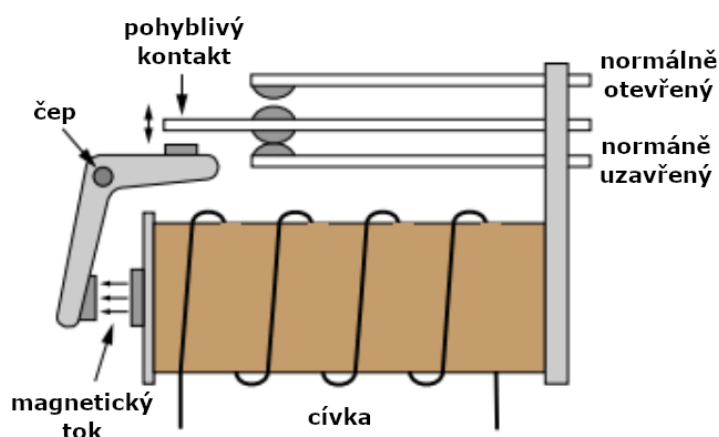


Obrázek 13: Regulátor tlaku, převzato z [24] a upraveno

Tlakový spínač je konstruován jako převodník mezi pneumatickým a elektrickým řídicím obvodem. Je konstruován jako elektrický koncový spínač ovládaný pneumatickým přímočarým motorem. [24]

2.3.4 Prvky pro automatizaci pracovního cyklu

Relé mají v obvodu kromě spínací funkce a zpracování signálu význam i jako zesilovače. Konstrukce elektromechanického relé je zobrazena na obr. 14. Zesílení signálu se dosahuje tím, že pro ovládací cívky stačí poměrně malé napětí U_1 a proud I_1 , zatím co kontakty relé jsou schopné spínat v obvodu spotřebiče mnohem větší napětí U_2 a proud I_2 . Relé jsou jednoduché prvky s krátkým spínacím časem a minimálními nároky na údržbu. Jejich nevýhodou jsou spínací kontakty, které jsou citlivé na znečištění a opotřebení. [30]



Obrázek 14: Relé, převzato z [31] a upraveno

2.3.5 Pomocné prvky

Znečištění stlačeného vzduchu je nejčastější příčinou poruchy funkce pneumatických prvků [25]. Ke znečištění mechanickými nečistotami, částicemi rzi a zbytky maziv dochází při výrobě a rozvodu stlačeného vzduchu. K základní úpravě stlačeného vzduchu dochází již v kompresorové stanici, ale k jemnému odlučování vlhkosti a další filtraci dochází v prvcích k tomu určených. [24]

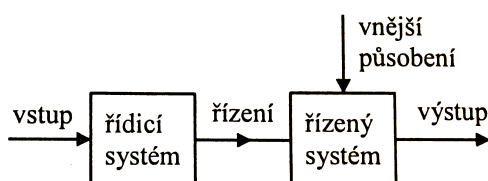
Pro odvlhčení stlačeného vzduchu se používá odlučovač kondenzátu s automatickým odpouštěním, molekulární vysoušeč vzduchu a kondenzační, absorpční a adsorpční vysoušení [25]. Další úpravou stlačeného vzduchu je jeho čištění. K čištění se využívají průtočné filtry na zachycení nečistot, nebo jemné filtry pracující na odstředivém principu často v kombinaci s odlučovačem vody. Pro zmenšení pasivních odporů a opotřebení kluzných ploch, případně pro zabezpečení ochrany částí prvků proti korozi se vzduch přimazává olejovou mlhou. [24]

Prvky pro úpravu stlačeného vzduchu se nejčastěji vyrábějí ve stavebnicovém provedení a navzájem se propojují. Kombinují se také s redukčním ventilem opatřeným manometrem a některými řídicími prvky. [24]

Nevýhodou pneumatických mechanismů je jejich hlučnost vznikající při výfuku vzduchu do atmosféry. Čím je větší množství vzduchu a tlakový spád při výfuku, tím větší je hlučnost mechanismu. Hlučnost se omezuje tlumičem hluku, který se vestavuje do rozvaděčů, přímočarých i rotačních motorů, rychloodvětrávacích ventilů a dalších prvků mechanismů. V tlumiči se vyfukovaný vzduch částečně rozpíná a potom přes póry materiálu vstupuje s podstatně menší rychlostí do atmosféry. [24]

2.4 Elektronika a řízení

Mechanismus sloužící k přenosu informace se nazývá přenosový systém a představuje spojení vysílače s přijímačem přenosovým kanálem [30]. Složitější přenosové systémy vznikají sériovým či paralelním řazením jednotlivých přenosových systémů [30]. Každý systém je buď regulován nebo řízen (ovládán). Regulační technika zajišťuje přivedení určené veličiny, např. tlaku na zadanou hodnotu a udržení této hodnoty. Ovládání je způsob řízení bez využití zpětné vazby, výstupní veličina tedy není odměřována a kontrolována. Na obr. 15 je zobrazeno blokové schéma ovládání. Řízení rozlišujeme na přímé, kdy řídicí proces probíhá bez přívodu energie a nepřímé řízení s přívodem energie [32]. [25]



Obrázek 15: Ovládání, převzato z [32] a upraveno

Vstup zajišťuje ručně či mechanicky ovládaný signální člen. Jako signální členy pneumatických mechanismů se používají rozvaděče či spínače. Řídící členy pneumatických mechanismů mohou být ventily, logické prvky či relé. Řízený systém bývá pracovní člen, nejčastěji přímé, kyvné či rotační pneumotory. [30]

Pro ovládání robotů se využívá jednoduchých modulů a spínačů, případně ovládání elektroniky přes sběrnice. Pro dosažení přesného časování elektronických komponent řízených pomocí logických signálů se využívá hardware časovačů, mikrokontrolérů nebo dedikovaných obvodů. Instrukce a zpětná odezva vozidla mohou být přenášeny drátově či bezdrátově. [33]

2.4.1 Motory

Elektromotory jsou elektrické stroje, jejichž hlavní funkce je přeměna elektrické energie na mechanickou práci. Dělíme je na točivé a lineární. Mezi točivé elektromotory řadíme například krokové motory, motory s permanentními magnety a synchronní motory s permanentními magnety. Synchronní motory s permanentními magnety se využívají v servomechanismech a robotech. [25]

Krokové motory patří mezi synchronní točivé stroje. Magnetické pole je vytvořeno postupnou aktivací jednotlivých pólových dvojic a dochází k otáčení rotoru v tzv. krocích. Krok je po-

točení rotoru z klidové polohy v závislosti na smyslu magnetického pole o úhel odpovídající jednomu impulzu na vinutí statorového vinutí. Pro rozběh a pohyb motoru je vždy potřeba driver, tedy řídicí elektronika s výkonovým měničem. Výhodou krokových motorů je jejich jednoduchost, nízká cena a absence nutnosti zpětné vazby. Mezi nevýhody patří hlučnost a špatný poměr výkonu vůči velikosti motoru. Motory s permanentními magnety patří mezi krokové motory. Mají rotor s integrovaným permanentním magnetem. Jejich krokový úhel je vhodnější pro pomalejší rychlosti otáčení a vyšší krouticí moment. [25]

Servomotory jsou přesné aktuátory pro řízení pohybu v průmyslové automatizaci. Servomotor spolu se zpětnovazebním řízením a řídicí elektronikou tvoří servomechanismus. Vyznačují se přesnou regulací polohy, rychlosti a točivého momentu, přičemž mají stabilní výkon a rychlou odezvu [34]. Jsou tedy vhodné pro operace s velkými nároky na přesnost [34]. Servomotor je součástí systémů s uzavřenou smyčkou. Točivý moment a rychlost jsou upravovány pomocí zpětnovazebního řízení a povelů z nadřazené řídicí jednotky. [35]

Na trhu je dostupných několik druhů servomotorů. AC servomotory jsou bezkartáčové synchronní motory s permanentními magnety poháněné střídavým proudem. Jsou konstruované pro provoz s nízkým napětím a určeny pro velké zatížení a nepřetržitý provoz. DC servomotory jsou synchronní bezkartáčové motory s permanentními magnety poháněné stejnosměrným proudem. Jsou určeny pro provoz s nízkým napětím a vyznačují se rychlou odezvou s dobrým řízením polohy a rychlosti. Jejich uplatnění je v aplikacích s malou spotřebou energie. Lineární servomotor velmi přesně generuje lineární pohyb. Jeho využití je v lékařských aplikacích, inspekčních zařízeních a průmyslových procesech. [34]

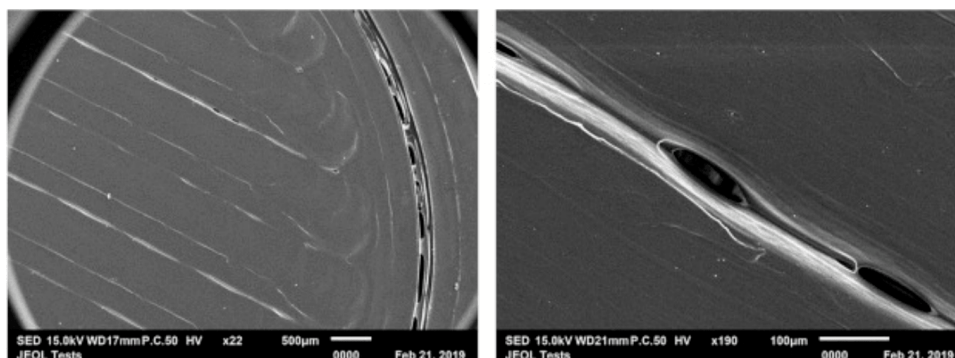
2.5 Materiály pro 3D tisk

3D tisk je dnes hojně využívaná technologie aditivní výroby. Výhodou této metody je možnost výroby součástí složitých tvarů rychleji než konvenčními metodami. Používá se především při návrhu prototypů, zakázkové či kusové výrobě, pro výrobu v menších sériích nebo pro domácí použití. 3D tisku se využívá ve zdravotnictví, automobilovém a leteckém průmyslu. Mezi nejpoužívanější materiály pro 3D tisk plastových dílů patří PLA, ABS a PETG. [36, 37]

Studie [38] se zabývá vlivem parametrů tisku na rozměrové a geometrické tolerance. Největší vliv na rovinnost plochy přiléhající k podložce tiskárny má rychlost tisku, poté má významný vliv velikost trysky a minimální vliv má výška tištěné vrstvy.

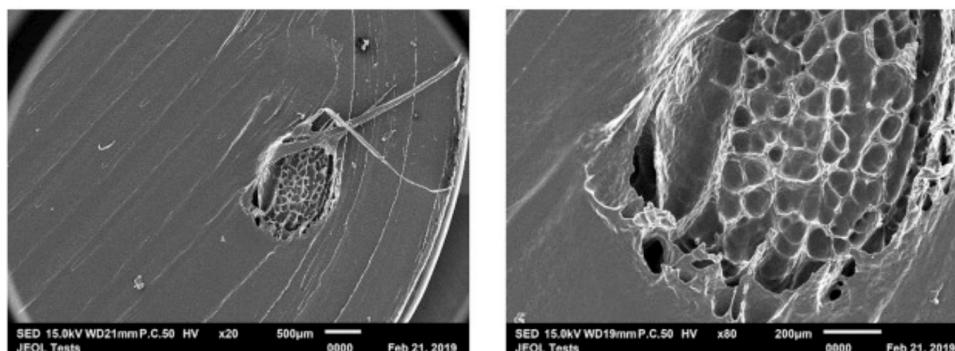
Nětěsnost vytištěného dílu závisí především na jeho pórovitosti, která je ovlivněna výrobním procesem. Z tohoto hlediska je důležitá volba správných parametrů tisku. K hodnocení kvality spojení vrstev a vizualizaci případné poréznosti vzorků vytištěných technologií FDM se používá skenovací elektronová mikroskopie (SEM). [39]

PLA je snadno tisknutelný biologicky odbouratelný materiál. Jedná se o univerzální materiál, jež patří mezi nejpopulárnější při technologii tisku metodou extruze. PLA je tvrdý, odolný a pružný materiál, který vykazuje nízké rozpínání při tavení. Nevýhodou tohoto materiálu je jeho nízká odolnost vůči vyšším teplotám, dochází k jeho měknutí již kolem 60 °C. Obr. 16 ukazuje SEM snímky vzorků PLA a zdůrazňuje slabé propojení mezi vrstvami. Proces tavení zanechává ve struktuře nadbytečné vzduchové kapsy, a to i při 100% výplni a doporučené rychlosti tisku 60 mm·s⁻¹ pro PLA filamenty. [40, 39]



Obrázek 16: SEM snímky vzorku z PLA [39]

ABS je houževnatý materiál odolný vůči vysokým i nízkým teplotám, kyselinám a mechanickému poškození. Je také zdravotně nezávadný a málo nasákavý. Je vhodný pro výrobu funkčních dílů a nástrojů. Je obtížně tisknutelný a při jeho zahřívání uniká škodlivý zápach. ABS vykazuje pórovitost a vzorky vláken na povrchu navzdory vynikající adhezi vrstev, jak je zobrazeno na obr. 17. Doporučená rychlost tisku pro tento materiál je $30 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. [41, 39]



Obrázek 17: SEM snímky vzorku z ABS [39]

PETG je termoplastický polyester, který se vyznačuje chemickou odolností, pevností a trvanlivostí. Je také odolný vůči nárazům a dobře odolává vyšším teplotám. Využití nachází tento materiál při výrobě ochranných dílů a v potravinářství. Nevýhodou tohoto materiálu je náročnost skladování, jelikož dobře absorbuje vlhkost. [42]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Mezi hlavní problémy patří návrh pneumatického obvodu pro vytvoření vzduchového polštáře a pohonu vozítka, návržení podvozku a návrh a realizace elektrického obvodu pro řízení vozítka.

Levitaci vozítka je možné řešit nadnášením proudem vzduchu, vytvořením vzduchového polštáře nebo vzduchového filmu. Princip nadnášení externím proudem vzduchu není pro tento případ vhodný, jelikož vozítko se má pohybovat po podložce a jeho pohyb by byl výrazně omezen. Princip nadnášení aerodynamickým vztlakem nebude využit vzhledem k nízké rychlosti pohybu vozítka a absenci aerodynamického profilu. Z důvodu nižší spotřeby stlačeného vzduchu oproti vznášedlům bude zvolen princip vytvoření vzduchového filmu aerostatických ložisek.

Pneumatický obvod se bude rozdělovat na dvě části: pohon vozítka a vytvoření vzduchového filmu. Zdrojem stlačeného vzduchu pro pneumatický obvod bude rozvod stlačeného vzduchu v laboratoři. K základní úpravě stlačeného vzduchu dojde v kompresorové stanici, pneumatický obvod tedy nebude obsahovat žádné pomocné prvky pro jeho úpravu. V obvodu budou zařazeny prvky pro řízení velikosti a směru proudu stlačeného vzduchu. Budou zvoleny elektromagneticky ovládané ventily, pro možnost dálkového ovládání. Dále bude využit redukční ventil pro zajištění konstantního tlaku pro vytvoření vzduchového filmu.

Dálkové ovládání bude řešeno pomocí dvoukanálového dálkového ovladače. Jako vstup bude využit signál z ovladače přenesený na přijímač. Řídícím systémem bude mikrokontroler Arduino a řízeným systémem budou relé. Výstupem bude natočení servomotoru a poloha ventilů.

Zajištění natáčení trysek pro pohon vozítka bude řešeno elektromotory. Je možné využít krokové motory či servomotory. Hlavními požadavky na motor je jeho nízká hmotnost, přesná regulace polohy, rychlá odezva, jednoduché řízení a možnost napájení z baterie. Těmto požadavkům odpovídají servomotory. V elektrickém obvodu budou pro natáčení trysek zvoleny DC servomotory, které jsou vhodné pro napájení z baterie a vyznačují se rychlou odezvou s dobrým řízením polohy a rychlosti.

Podvozek bude vyroben technologií 3D tisku. Hlavní požadavky na tištěný díl jsou jeho těsnost a snadný tisk, jelikož tištěný díl nebude nijak výrazně namáhán. Materiál pro 3D tisk bude zvolen PLA, jelikož je velmi snadno tisknutelný a vykazuje i přijatelnou těsnost. Parametry tisku budou zvoleny s ohledem na dosažení rovinnosti plochy dosedající na hladký povrch.

3.2 Cíl práce

Cílem této práce je vyvinout, vyrobit a otestovat funkční prototyp levitujícího vozítka, který bude demonstrovat princip a použitelnost navrženého řešení.

Dílčí cíle:

- zpracovat rešerši zaměřenou na technologie a principy vzduchové levitace a pohonu stlačeným vzduchem
- návrh koncepčního řešení pohonu a vzduchového polštáře pro levitaci
- vypracování konstrukčního řešení vozítka na základě navržené koncepce
- výroba a otestování funkčního prototypu levitujícího vozítka s využitím 3D tisku

4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

V rámci koncepčního řešení bude řešen návrh pohonu vozítka a návrh podvozku.

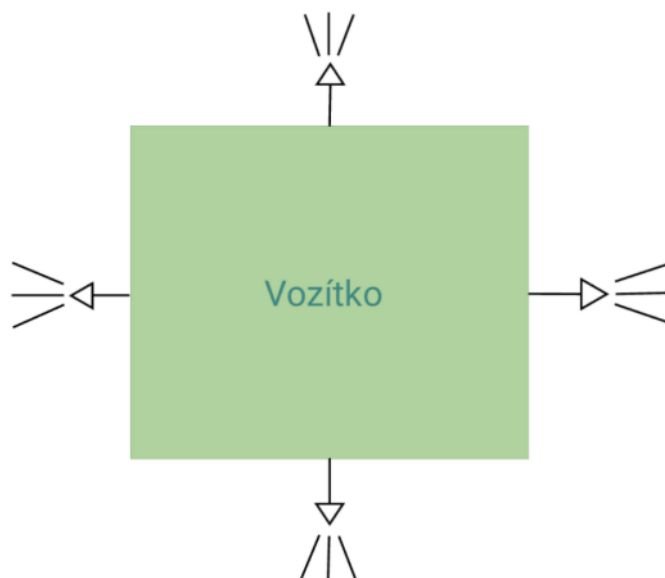
4.1 Pohon vozítka

Pohon je realizován stlačeným vzduchem pomocí trysek. Na pneumatických schématech je znázorněn pouze pohon stlačeným vzduchem, nezahrnují přívod vzduchu do vzduchového polštáře. Kompletní pneumatické schéma vybraného konceptu je uvedeno v podkapitole 5.2.

4.1.1 Pohon stlačeným vzduchem 4 tryskami

Pohon bude realizován tryskami ve 4 směrech, jak je znázorněno na obr. 18. Využitím kombinace těchto trysek se bude umožněn pohyb vozítka do všech 4 stran a také po úhlopříčkách. Nelze zvolit jakýkoli směr, jelikož pneumatický obvod neobsahuje prvek pro plynulou regulaci průtoku jednotlivými tryskami.

Podmínkou dobré manévrovatelnosti tohoto konceptu je umístění trysek na úroveň těžiště, což v praxi není jednoduché přesně dosáhnout. Tento koncept je hodnocen velmi dobře v jednoduchosti řešení, jelikož zde nejsou servomotory, které natáčejí trysky.

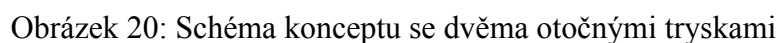


Obrázek 18: Schéma konceptu se čtyřmi tryskami

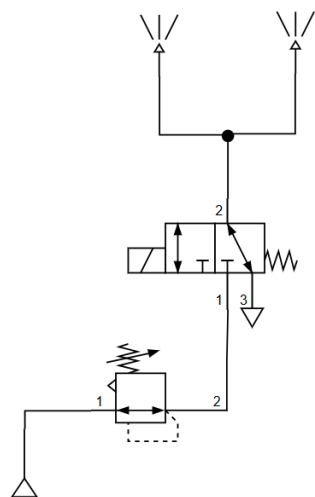
Návrh pneumatického obvodu pro tento koncept řešení je na obr. 19. Pneumatický obvod obsahuje regulátor tlaku umístěný přímo za zdrojem stlačeného vzduchu. Před každou tryskou je elektromagneticky ovládaný 3/2 ventil neprůtočný v klidové poloze. Tyto ventily zajišťují uživateli pohyb vozítka ve zvoleném směru.



Pohon bude realizován dvěma tryskami, které budou umístěny v zadní části vozítka, jak je uvedeno na obr. 20. Obě trysky budou mechanicky spojeny s jedním servomotorem, který bude realizovat jejich natáčení.



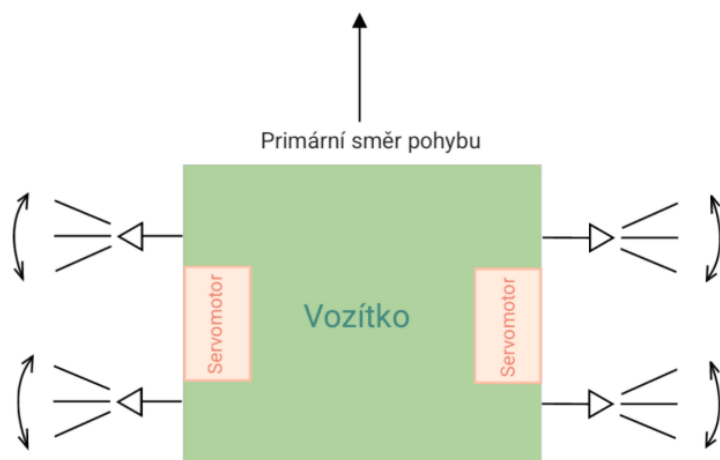
Návrh pneumatického obvodu pro tento koncept řešení je na obr. 21. Schéma obsahuje regulátor tlaku a také jeden elektromagneticky ovládaný 3/2 ventil neprůtočný v klidové poloze. Ten zajišťuje možnost zapnout a vypnout pohon vozítka. Obě otočné trysky budou mít vždy stejný průtok vzduchu a stejné natočení. Zvoleny jsou dvě trysky z důvodu eliminace problému s umístěním jedné trysky do roviny s těžištěm vozítka.



Obrázek 21: Schéma pneumatického obvodu se dvěma otočnými tryskami

4.1.3 Pohon stlačeným vzduchem 4 otočnými tryskami

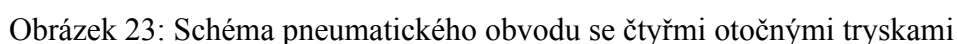
Pohon bude realizován 4 otočnými tryskami, které budou natáčeny servomotory. Trysky budou umístěny na bočních stranách vozítka, jak je znázorněno na obr. 22.



Obrázek 22: Schéma konceptu se čtyřmi otočnými tryskami

Mezi výhody tohoto konceptu patří snadná manévrovatelnost. Pro dosažení pohybu vpřed je nutno využít obou dvojic trysek a adekvátně je natočit. Pro pohyb do boku lze využít dvojici trysek na opačné straně vozítka. Díky natáčení trysek lze tedy snadno dosáhnout neomezeného pohybu v rovině.

Návrh pneumatického obvodu pro tento koncept řešení je na obr. 23. Pneumatický obvod je podobný jako u konceptu se dvěma otočnými tryskami, avšak jsou zde dvě dvojice otočných trysek. Před každou dvojicí trysek je umístěn elektromagneticky ovládaný 3/2 ventil neprůtočný v klidové poloze, zajišťující možnost pohybu do stran.



Koncepty byly porovnány na základě těchto kritérií:

- Do hmotnosti byla zahrnuta hmotnost servomotorů a ventilů. Hmotnost jednotlivých součástí je zvážena pro konkrétní součásti, které by byly použity při realizaci konceptu. Elektromagneticky ovládaný 3/2 ventil neprůtokový v klidové poloze váží 28 g a servomotor mikro SG90 váží 9 g. Hmotnosti jednotlivých konceptů jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 1: Hmotnosti jednotlivých konceptů

Koncept	Hmotnost (g)
4 trysky	112
2 otočné trysky	37
4 otočné trysky	74

Do jednoduchosti řešení je zahrnuta jednoduchost z hlediska realizace konceptu, tedy náročnost z hlediska návrhu, programování a sestavení. Zde je jednotlivé hodnocení subjektivním názorem autorky.

Do hodnocení pohybu bez omezení v rovině bylo zahrnuto, zda je možné přívodem stlačeného vzduchu do vhodné kombinace trysek dosáhnout v jakémkoli okamžiku libovolného rovinného pohybu.

Manévrovatelnost je hodnocena z hlediska uživatele.

Do ceny uvedené v tabulce 2 nebyly zahrnuty ceny konkrétních součástí, nýbrž přibližná cenová kategorie součástí.

Tabulka 2: Odhad ceny součástí

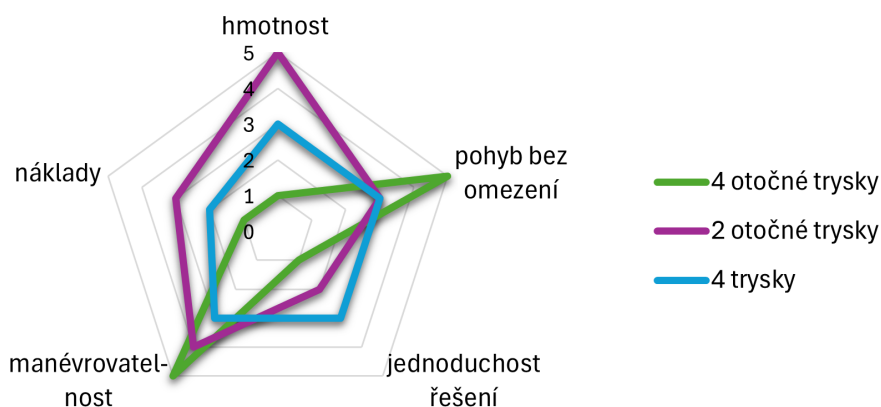
Součást	Cena (Kč)
mikro servomotor	58 [43]
3/2 elektromagnetický ventil	450–2500 [44]

Cena elektromagnetického ventilu byla volena 500 Kč, z důvodu snahy o nejnižší náklady. Náklady na jednotlivé koncepty jsou uvedeny v tabulce 3.

Tabulka 3: Ceny jednotlivých konceptů

Koncept	Cena (Kč)
4 trysky	2000
2 otočné trysky	558
4 otočné trysky	1116

Koncepty byly v kategoriích hmotnost, pohyb bez omezení v rovině a manévrovatelnost ohodnoceny číslem 1–5, kdy 5 je uvažováno jako nejlepší hodnocení. Kategorie jednoduchost řešení a cena mají menší váhu oproti ostatním kritériím, jsou tedy hodnoceny čísly 1–3, kdy opět 3 je považováno jako nejlepší. Z obr. 24 je patrné, že nejvhodnější koncept je koncept se dvěma otočnými tryskami.



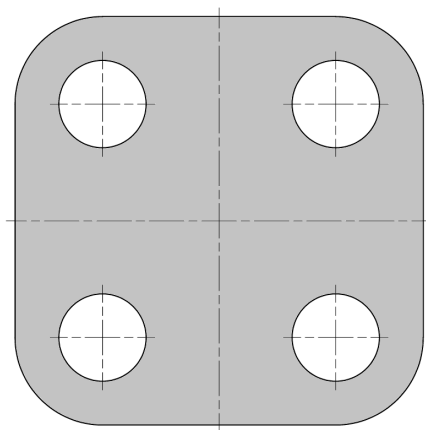
Obrázek 24: Porovnání konceptů pohonu

4.2 Návrh podvozku

Podvozek bude navržen jako aerostatické ložisko. Následná výroba bude realizována pomocí 3D tisku. Rovinnost dosedací plochy ložiska je omezena rovinností tiskové podložky.

4.2.1 Nedělené ložisko

Dosedací plocha ložiska bude celistvá a její přesnost určuje přesnost tisku. Výhodou tohoto konceptu je jednoduchost jeho návrhu, spolehlivost analytického výpočtu a jednoduchost tisku. Schéma konceptu je uvedeno na obr. 25.

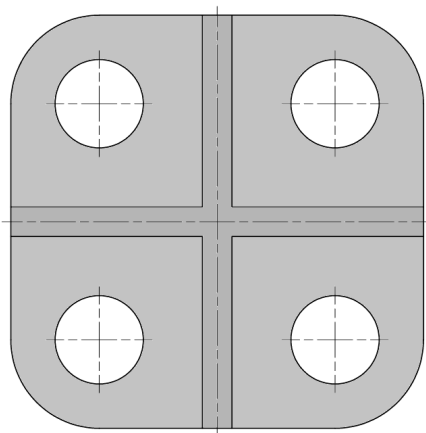


Obrázek 25: Schéma konceptu neděleného ložiska

4.2.2 Dělené ložisko

Ložisko obsahuje odtokové drážky oddělující jednotlivé buňky od sebe. K úplnému tlakovému oddělení jednotlivých sektorů dojde při velikosti čtvercové drážky o straně $\geq 2\%$ šířky ložiska. Důsledkem je nárůst tlaku v buňkách přibližně 1,4–1,5krát a pokles tloušťky filmu o 25 %. Výhodou této koncepce je rovnoměrný tok média všemi kvadranty. [45]

Nevýhodou tohoto konceptu je obtížnější tisk odtokových drážek a tím způsobení větších netěsností dílu. Schéma tohoto konceptu je zobrazeno na obr. 26.



Obrázek 26: Schéma konceptu děleného ložiska

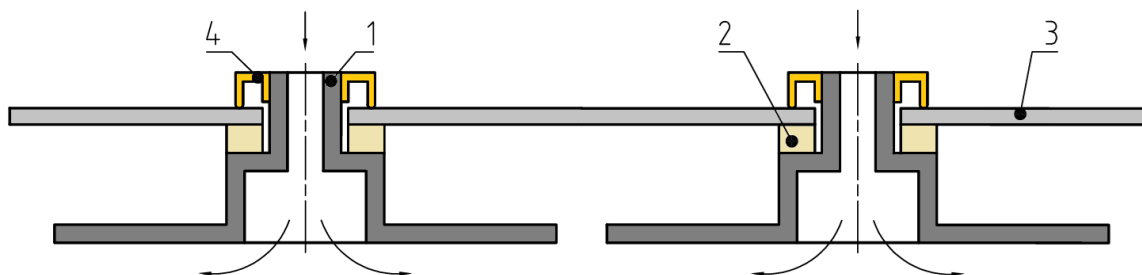
4.2.3 Ložisko s kompenzačními členy

Rozdělení ložiska na více součástí umožňuje zvolení různých parametrů tisku a tím zkracuje celkovou dobu tisku. Nevýhodou separátního tisku je možnost nedosažení stejných přesností rozměrů tisknutých součástí.

Nevýhodou tohoto konceptu je nutnost montáže, při které mohou vznikat nepřesnosti. Tyto nepřesnosti eliminují kompenzační členy, jež jsou tvořené elastickou podporou a zajišťují rovnoběžnost kluzných ploch [45]. Vyrovnávají sklony a nestejně výšky kapes způsobené nepřes-

nostmi výroby a vytvářejí rovnoměrněji rozložený tlak a výšku vzduchového filmu. Pro správnou kompenzaci nepřesností je nutné je změřit a poté navrhnout odpovídající tuhost elastické podpory. Dosedací plocha je v porovnání s ostatními koncepty menší, což způsobuje vyšší průtok stlačeného vzduchu. [46]

Na obr. 27 je zobrazeno schéma dvou buňek konceptu ložiska (3) s kompenzačním členem (2). Axiální poloha buňek je zajištěna závitovým spojem realizovaným mezi buňkou (1) a pojistným členem (4). Buňky budou 4 a rozmístěny stejně jako v ostatních konceptech.



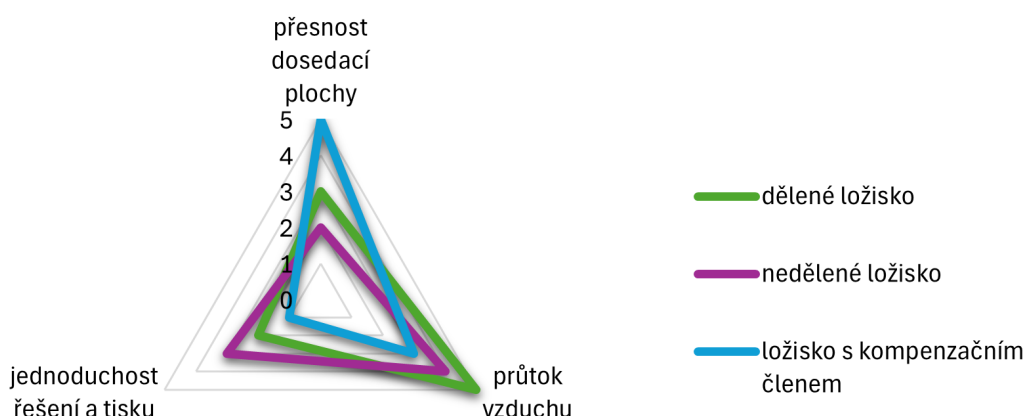
Obrázek 27: Schéma konceptu ložiska s kompenzačním členem

4.2.4 Výběr konceptu

Koncepty byly porovnány na základě těchto kritérií:

- průtok vzduchu
- přesnost dosedací plochy a její vliv na rovnoměrnost rozložení tlaku a vzduchového filmu
- jednoduchost řešení a tisku

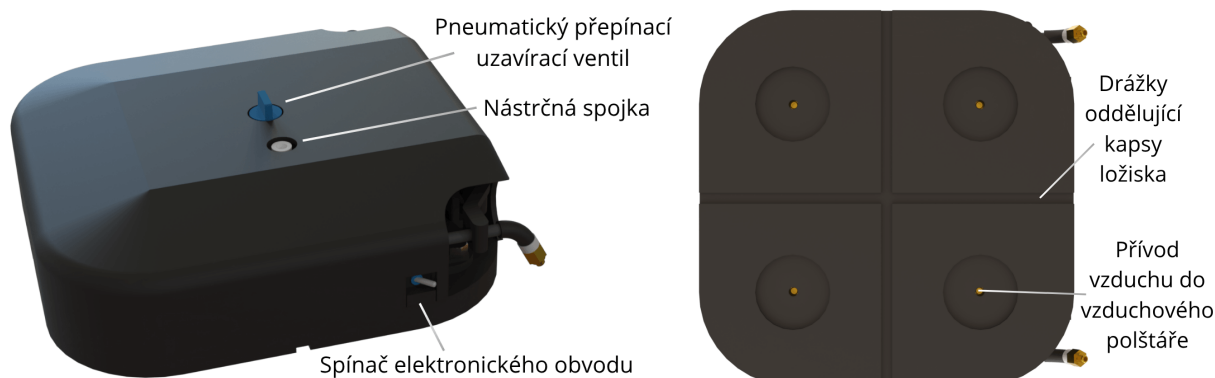
Kategorie průtok vzduchu je hodnocena z hlediska potřebného průtoku pro zajištění stejné únosnosti ložiska. Koncepty byly v každé kategorii ohodnoceny číslem 1–5, kdy 5 je uvažováno jako nejlepší hodnocení. Kategorie jednoduchost řešení a tisku má z hlediska výběru konceptu menší významnost, proto je hodnocena v rozsahu 1–3. Z obr. 28 vyplývá, že nejvhodnější koncept řešení je dělené ložisko.



Obrázek 28: Porovnání konceptů ložiska

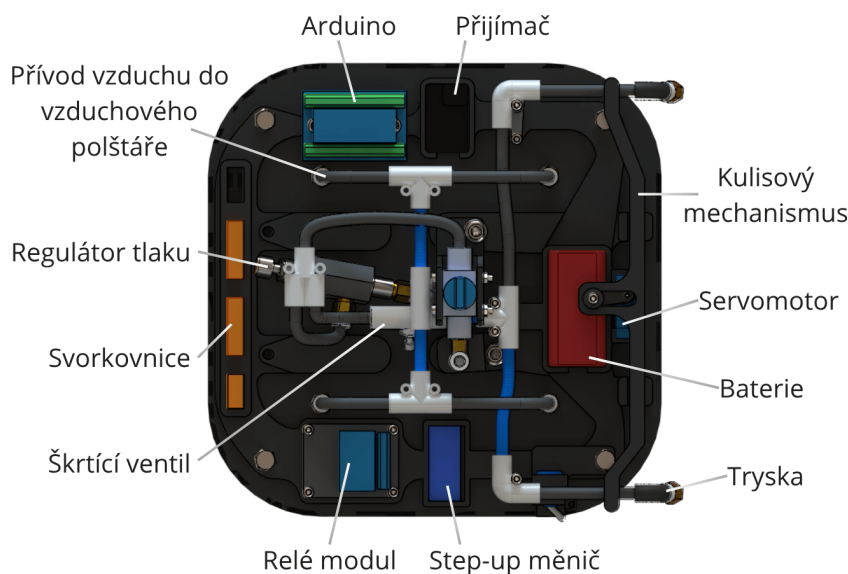
5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Tato kapitola popisuje výsledné konstrukční řešení navrženého levitujícího vozítka. Na obr. 29 vlevo jsou zobrazeny ovládací prvky vozítka. Spínač elektronického obvodu i pneumatický přepínací uzavírací ventil jsou zobrazeny v poloze on. Vpravo je pohled na spodní stranu vozítka zobrazující konstrukční řešení aerostatického ložiska.



Obrázek 29: Model vozítka s krytem

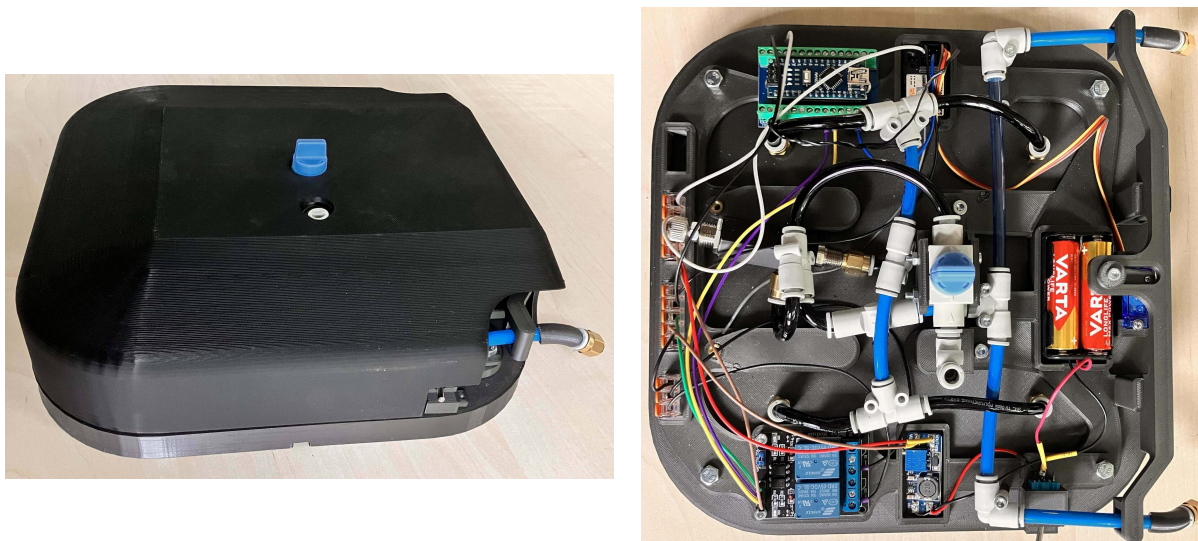
Vozítko se skládá z podvozku, pneumatického obvodu a elektroniky pro řízení. Hlavní mechanickou částí vozítka je podvozek, který plní dvě základní funkce. Je zkonstruován jako dělené aerostatické ložisko, čímž zajišťuje levitaci vozítka a zároveň je využit pro uchycení součástí. Na obr. 30 jsou popsány součásti těchto funkčních celků uchycené na podvozku.



Obrázek 30: Model vozítka bez krytu

K podvozku je připevněn pneumatický obvod. Připojení ke zdroji stlačeného vzduchu je realizováno pomocí nástrčné spojky zobrazené na obr. 29. Obvod zajišťuje rozvod stlačeného vzduchu do dutin aerostatického ložiska a trysek pohonu. Samotný pohyb vozítka je realizován dvojicí směřovatelných trysek. Natáčení trysek je konstrukčně řešeno pomocí kulisového mechanismu, jehož polohování zajišťuje mikro servomotor uchycený na podvozku.

Řízení vozítka zajišťuje elektronický obvod a dálkové ovládání. Jako hlavní řídicí jednotka je použit mikrokontroler Arduino Nano, který je napájen z baterií přes step-up měnič napětí. Mikrokontroler zpracovává signály z bezdrátového přijímače dvoukanálového dálkového ovladače a na jejich základě ovládá reléový modul pro přepínání elektromagneticky ovládaných 3/2 ventilů. Natáčení servomotoru je realizováno pomocí dálkového ovladače. Na obr. 31 jsou fotografie realizovaného prototypu levitujícího vozítka.



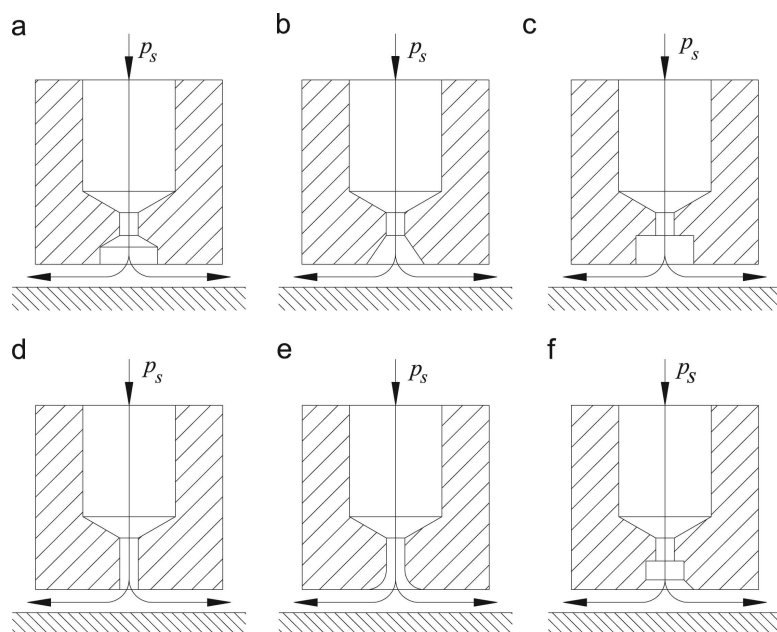
Obrázek 31: Fotografie prototypu

5.1 Podvozek

Tato kapitola se věnuje konstrukčnímu řešení podvozku, konkrétně návrhu geometrie. Ta je zaměřena na dutiny pro přívod stlačeného vzduchu a jejich rozložení. Dále jsou určeny rozměry ložiska a je proveden výpočet předpokládané tloušťky vzduchového filmu.

5.1.1 Dutiny pro přívod stlačeného vzduchu

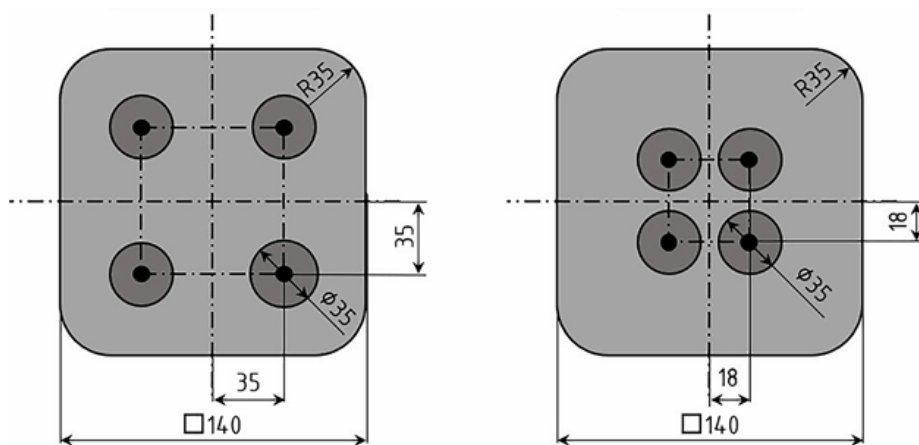
Návrh tvaru dutin pro přívod stlačeného vzduchu vychází ze studie [47] porovnávající vlastnosti různých tvarů dutin pro aerostatická ložiska. Tyto vlastnosti byly porovnávány CFD (Computational Fluid Dynamics) simulací při stejných geometrických rozměrech s výjimkou tvaru komory a jejích rozměrů. Všechny hloubky komor jsou stejné, jak je patrné z obr. 32, a předpokládaná plocha dna komor je navržena stejná pro všechny typy komor s výjimkou typu D.



Obrázek 32: Tvar dutin [47]

Při porovnání výsledků se ukázalo, že tvar dutiny C je výhodný pro dosažení vyšších tlaků při nižším průtoku, zároveň je dosažena vysoká tuhost a únosnost [47].

Vlivem nerovnoměrného rozložení hmotnosti vozítka dojde k nerovnoměrnému zatížení dutin pro přívod stlačeného vzduchu. Volba rozložení dutin ovlivňuje důsledky nerovnoměrného zatížení. Ve studii [48] se autoři věnují porovnání vlivu geometrie dvou různých ložiskových kapes zobrazených na obr. 33. První geometrie je analytickou optimalizací tvaru a druhá je optimalizací pomocí numerických metod CFD. V rámci studie byla kapsa zatížena ve všech rozích, přičemž jedna síla byla dvojnásobná oproti ostatním, z důvodu analýzy důsledků lokálního přetížení.



Obrázek 33: Analyticky optimalizovaná kapsa (vlevo) a kapsa optimalizovaná pomocí CFD simulace (vpravo) [48]

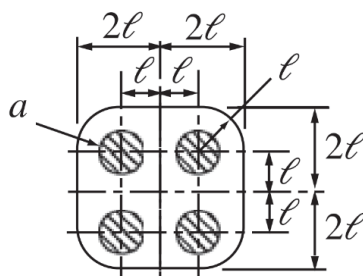
V případě analyticky optimalizované kapsy byl tlak v přetížené části téměř dvojnásobný než tlak při rovnoměrném zatížení. Naopak v méně zatížených částech tlak mírně klesl. Průměrný tlak byl mírně vyšší než u rovnoměrně zatížené kapsy. Po odtížení se tlak vrátil na téměř původní hodnotu. Naopak pro numericky optimalizovanou kapsu došlo při zatížení vyšším než 70 %

zamýšlené hodnoty lokálního přetížení ke ztrátě stability a poklesu tlaku, avšak po odtížení tlak vzrostl na původní hodnotu. [48]

Experiment potvrdil velkou citlivost CFD optimalizovaných kapes na nerovnoměrnost zatížení oproti analyticky optimalizovaným kapsám, což je spojeno s větší vzdáleností mezi dutinami. Ta přispívá k vyšší stabilitě. [48]

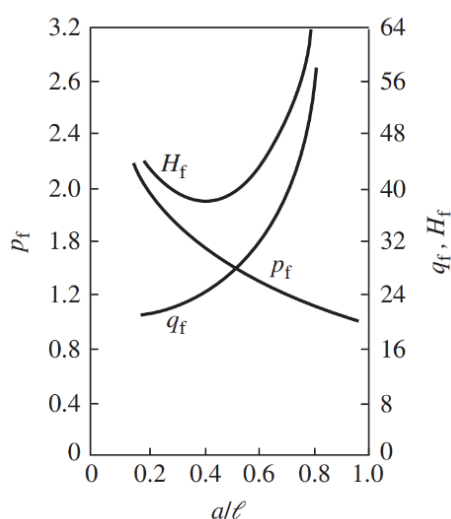
5.1.2 Stanovení rozměrů a výpočet

V rámci studie [49] se autoři věnují optimalizaci geometrie pro hydrostatické ložiskové kapsy s více vybráními pracující za statických podmínek a při nízkých rychlostech. V rámci této studie bylo porovnáno analytické řešení a řešení pomocí CFD simulace s experimentálním řešením. Rozdíly mezi požadovanými hodnotami byly v řádu jednotek procent. Výsledky CFD simulace a analytické řešení tedy lze považovat za dostatečně přesné. Obecné rozměry analyticky optimalizované kapsy jsou na obr. 34. Rozměr a je zde poloměr otvoru buňky ložiska.



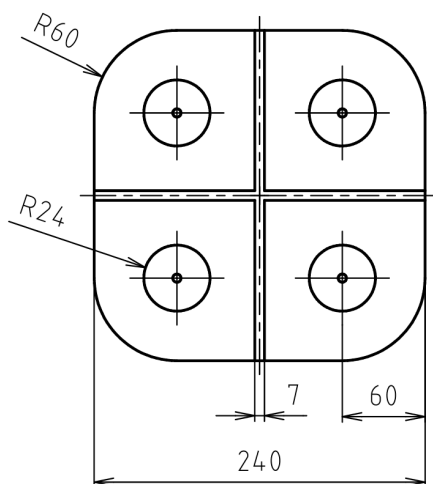
Obrázek 34: Obecné rozměry ložiska, převzato z [7] a upraveno

Mezi faktory výkonu zobrazené na obr. 35 patří tlakový součinitel p_f , průtokový součinitel q_f a součinitel výkonové ztráty H_f . Tyto součinitele slouží k přepočtu veličin pro konkrétní konfiguraci ložiskové kapsy. Rozměry kapsy jsou voleny s ohledem na minimalizaci součinitele výkonové ztráty. [7]



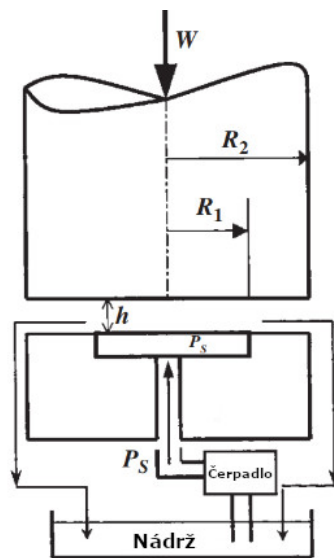
Obrázek 35: Vliv rozměrů ložiska na faktory výkonu, převzato z [7]

Šířka ložiska je zvolena 240 mm s ohledem na uložení veškerých komponent a na velikost tisknutelné oblasti 3D tiskárny. Tisk bude realizován na 3D tiskárně Original Prusa XL. Poměr a/l je volen s ohledem na ovlivnění faktorů výkonu 0,4. Rozměr l je tedy 60 mm a rozměr a odpovídá 24 mm. Rozměr R_1 na obr. 37 odpovídá rozměru a . Šířka odtokové drážky bude mírně vyšší než 2 % šířky kapsy, tedy 7 mm. Tím bude dosaženo spolehlivé oddělení jednotlivých buňek kapsy. Uvedené rozměry jsou zobrazeny na obr. 36. Pro vzduch je dynamická viskozita $\mu = 18.179 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ [7].



Obrázek 36: Rozměry ložiska

Výpočet průtoku vzduchu buňkou bude realizován dle výpočtu únosnosti hydrostatického ložiska. Obr. 37 znázorňuje význam použitých symbolů pro výpočet.



Obrázek 37: Schéma pro výpočet, převzato z [7] a upraveno

Cílem výpočtu je předpokládaná tloušťka vzduchového filmu podle naměřených hodnot z tabulky 4. Veličina čas vyjadřuje dobu, za kterou poklesne v tlakové lahvi počáteční tlak p_ℓ na výstupní tlak za regulátorem tlaku tlakové lahve p_r .

Tabulka 4: Naměřené hodnoty

Veličina	hodnota	jednotky
hmotnost m	866	[g]
čas t	4,5	[s]
výstupní tlak tlakové lahve p_r	5,1	[bar]

Do výpočtu je vliv drážek ložiska zahrnut pomocí součinitelů. Drážky způsobí pokles tloušťky vzduchového filmu a nárůst tlaku v jednotlivých buňkách. Hodnoty součinitelů jsou určeny dle kapitoly 4.2.2. Součinitel p_d je zaveden pro korekci hodnoty tlaku a součinitel h_d pro korekci tloušťky vzduchového filmu.

Pro změření průtoku a následné určení tloušťky vzduchového filmu byla využita tlaková lahev s objemem 1 l, maximálním tlakem 11 bar a výstupním tlakem 7 bar. Vyprázdnění lahve je uvažováno jako adiabatický děj, tedy ideální expanze plynů. Vstupními hodnotami jsou objem tlakové lahve, hodnoty počátečního a koncového tlaku, počáteční tedy pokojová teplota a doba vyprázdnění tlakové lahve. Dle rovnice 4 změny stavu byla určena koncová teplota stlačeného vzduchu. Následně je určen rozdíl hmotností stlačeného plynu při počátečním a koncovém stavu dle rovnice 5 a vypočítán hmotnostní průtok dle rovnice 6. Ten je přepočítán dle rovnice 7 na objemový průtok na výstupu z regulátoru, přičemž teplota je uvažována jako aritmetický průměr počáteční a koncové teploty. [50]

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{p_{ra}}{p_{la}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad [\text{K}] \quad (4)$$

$$\Delta m = \frac{V}{r} \cdot \left(\frac{p_{la}}{T_1} - \frac{p_{ra}}{T_2} \right) \quad [\text{kg}] \quad (5)$$

$$Q_m = \frac{\Delta m}{t} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (6)$$

$$Q = \frac{Q_m \cdot r \cdot T_m}{p_r} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (7)$$

Tloušťka vzduchového filmu [7]

$$h = \sqrt[3]{\frac{Q \cdot 12 \cdot \mu}{q_f} \cdot \frac{(12 + \pi) \cdot \ell^2}{W}} \cdot h_d \quad [\text{mm}] \quad (8)$$

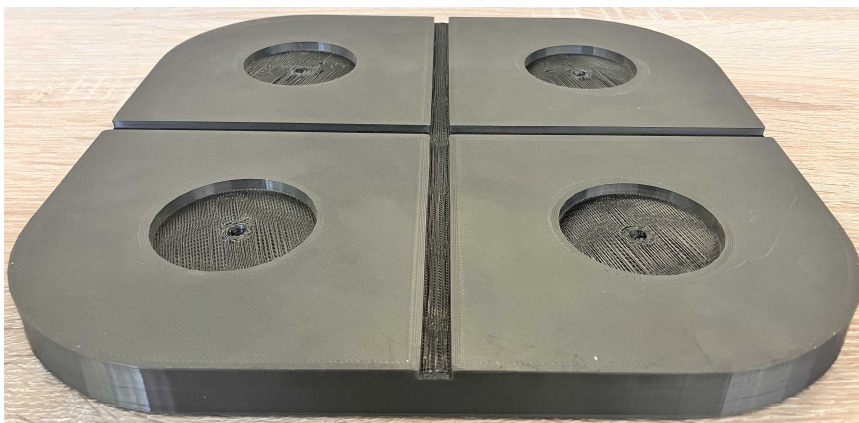
Minimální tlak vzduchu ve vzduchovém filmu pro levitaci [7]

$$p_s = p_f \cdot \frac{W}{(12 + \pi) \cdot \ell^2 \cdot p_d} \quad [\text{Pa}] \quad (9)$$

Vypočítaná tloušťka vzduchového filmu je 0,155 mm a průtok vzduchu $0,151 \cdot \text{s}^{-1}$. Minimální tlak vzduchu p_s je 176,6 Pa. Kompletní výpočet je uveden v příloze.

5.1.3 Parametry tisku

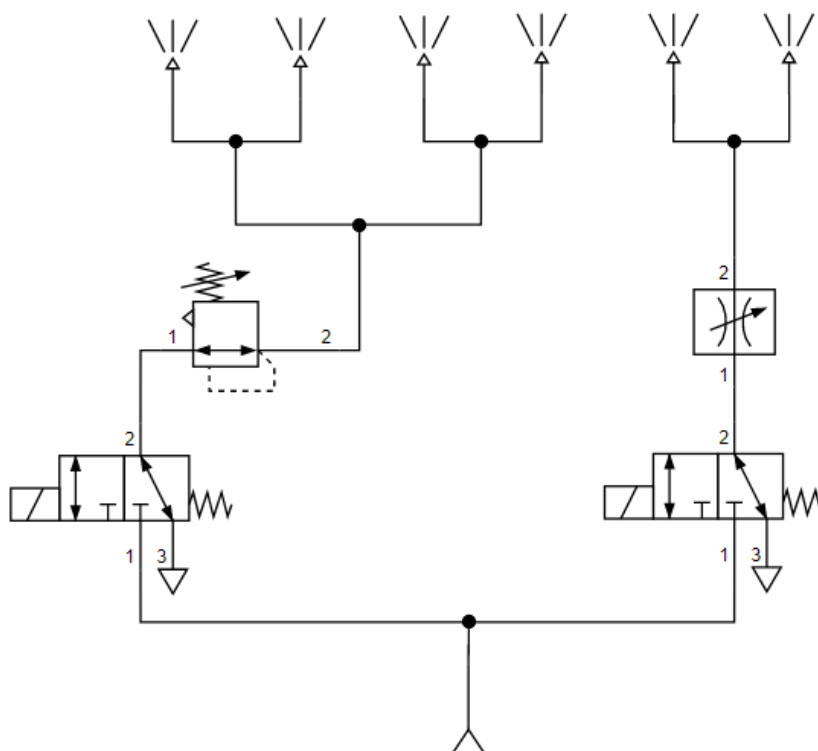
Důležité parametry vytištěného dílu jsou dosažení minimální drsnosti povrchu dosedací plochy, těsnost dutin pro přívod stlačeného vzduchu a dosedací plochy, a také nízká hmotnost. Z důvodu dosažení minimální drsnosti povrchu je dosedací plocha zvolena jako plocha přiléhající k tiskové podložce. Větší šířka extrudované stopy podporuje účinné spojení mezi extruzními stopami a tím výrazně snižuje riziko vzniku dutiny. Studie [51] uvádí jako optimální šířku extruze 0,64 mm. Pro zajištění těsnosti dílu je doporučeno volit počet perimetrů 4–6 a počet plných vrstev 6–8 [52]. Pro tisk jsou zvoleny 4 perimetry a 7 plných spodních vrstev. Nízká hmotnost dílu je zajištěna 5 % výplně vzoru pláštěv. Na obr. 38 je pohled na dosedací plochu vytištěného dílu. Z důvodu využití podpor není dosaženo dobré těsnosti a rovinnosti ploch oddělovacích drážek a kapes dutin.



Obrázek 38: Dosedací plocha ložiska

5.2 Pneumatický obvod

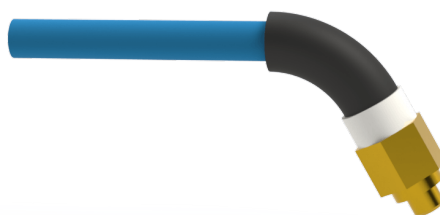
Na obr. 39 je schema pneumatického obvodu vozítka. V jeho levé části je znázorněn přívod vzduchu do vzduchového filmu a v pravé části pohon vozítka. Pro zajištění konstantního tlaku na přívodu do vzduchového polštáře je použit regulátor tlaku. Pro zajištění odporu proudění a nastavení velikosti průtoku trysek pohonu je využit škrtící ventil. Pro eliminaci negativních vlivů způsobených excentrickým zatížením ložiska jsou využity clony. Zúžení je realizováno pomocí nástrčné spojky spojující pneumatický obvod s podvozkem. Spojení nástrčných spojek s podvozkem je realizováno závitovými vložkami. Následné rozšíření je realizováno geometrií podvozku. Jako zdroj stlačeného vzduchu je využit rozvod stlačeného vzduchu v laboratoři s výstupním tlakem 10 bar.



Obrázek 39: Schéma pneumatického obvodu

5.2.1 Tvar trysek

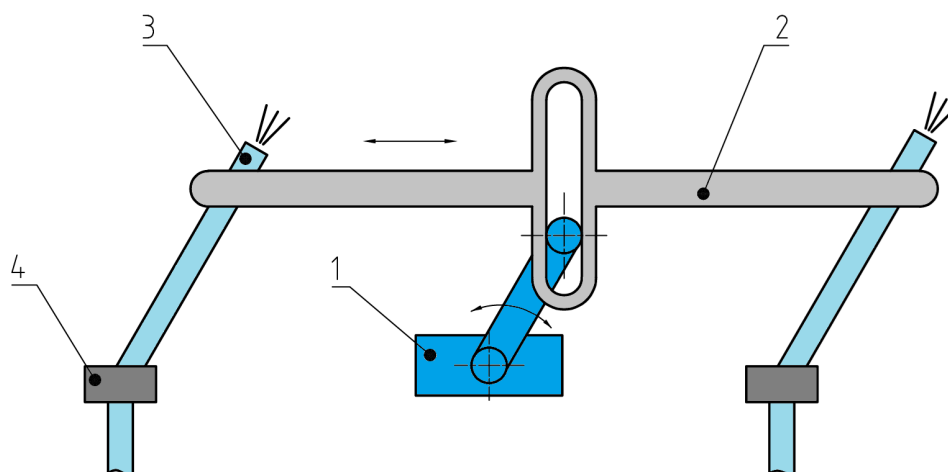
Pro pohon jsou využity nástrčné spojky jako konvergentní trysky. V tryskách dojde k urychlení kinetické energie média [53]. Při interakci média s podložkou dojde ke vzniku silového působení na podložku. Stejně velká síla opačné orientace působí na médium. Vlivem této síly dojde k pohybu vozítka. Pro nasměrování trysek proti podložce je využit tištěný díl. Konstrukční řešení trysek je zobrazeno na obr. 40. [54]



Obrázek 40: Tryska pohonu

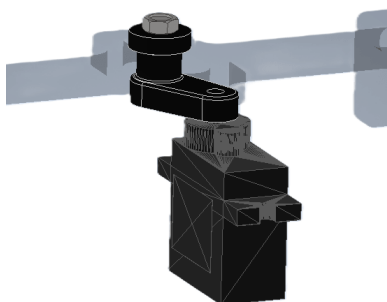
5.2.2 Mechanismus natáčení trysek

Trysky pohonu vozítka (3) jsou natáčeny kulisovým (2) mechanismem zobrazeným na obr. 41. Hadice budou pevně uchyceny k podvozku (4) a natáčet se bude pouze jejich volný konec. Pro pohon je použit servomotor mikro SG90 (1), jehož rozsah natočení je 180° a provozní napětí je v rozsahu 3–7,2 V [43].



Obrázek 41: Schéma mechanismu natáčení trysek

Spojení servomotoru s kulisovým mechanismem je řešeno pomocí 3D tištěného dílu zobrazeného na obr. 42. Zamezení pohybu kulisového mechanismu v axiálním směru je řešeno 3D tištěnou zarážkou pojištěnou šroubem.



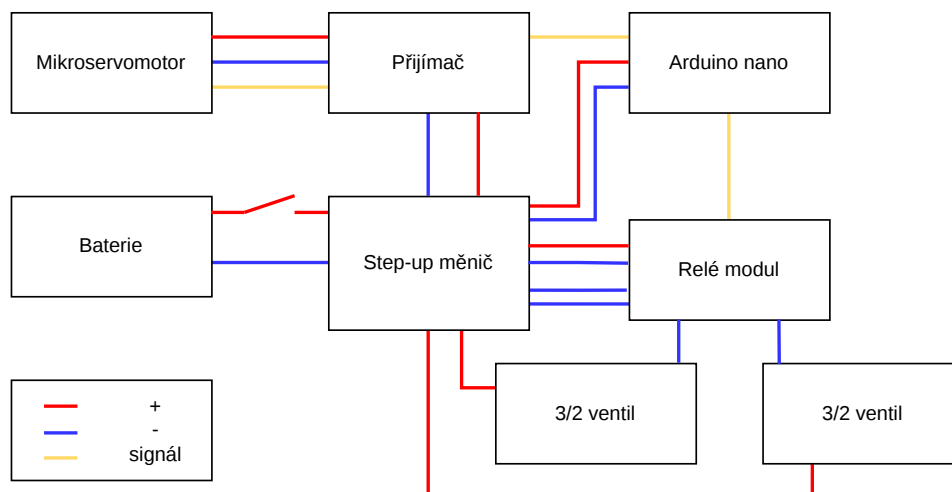
Obrázek 42: Zobrazení tvarového spojení servomotoru s mechanismem

5.2.3 Měření tlaku

Měření tlaku je provedeno pomocí tlakového senzoru s rozsahem měřených hodnot 0–1,2 MPa. Jeho provozní napětí je 5 V a výstup je analogový ve formě hodnoty napětí v rozsahu 0,5–4,5 V. Pro měření byl tlakový senzor připojen do elektronického obvodu a jeho výstup připojen na analogový pin Arduina.

5.3 Elektronika a řízení

K řízení ventilů bude použit modul relé izolovaný optočlenem s napájecím napětím 5 V a spouštěcím signálem Log 0 [55]. Po přijetí řídicího signálu dojde k aktivaci relé ventilu pro přívod vzduchu do vzduchového polštáře. S časovou prodlevou 0,1 s následuje sepnutí relé ventilu ovládajícího přívod vzduchu do trysek. Řízený bude mikrokontrolerem ATmega328 desky Arduino Nano. Deska obsahuje 20 digitálních I/O pinů (z nichž 6 poskytuje PWM výstup) a 8 analogových pinů. Program pro Arduino nano je uveden v příloze. Tento kód byl vytvořen s podporou nástroje Gemini. Doporučené vstupní napětí je 7–12 V, přičemž provozní napětí je 5 V. [56]



Obrázek 43: Blokové schéma zapojení elektroniky

Pro napájení jsou použity tužkové AA baterie poskytující napětí 4,5 V. Provozní napětí 5 V zajišťuje step-up boost měnič stejnosměrného napětí. Jako spínač je využit páčkový přepínač on-on. Vodiče jsou připájeny ke společnému kontaktu a jednomu z krajních kontaktů, čímž je dosaženo rozpojení obvodu v druhé poloze páčky. Umístění spínače elektronického obvodu je na obr. 29. Zde je spínač zobrazen v poloze on.

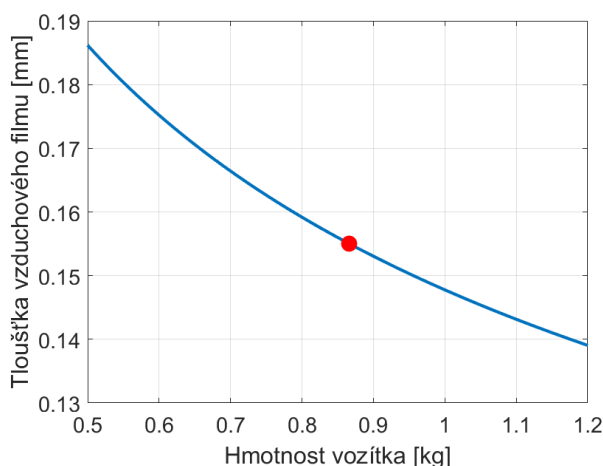
Pro dálkové ovládání vozítka je zvolen běžně dostupný dvoukanálový ovladač FS-GT2E od výrobce FlySky. Vysílač využívá přenosový systém AFHDS 2A. Rozlišení je 1024, natáčení trysek tedy je plynulé. Přijímač FS-A3 je tříkanálový s napájecím napětím 4,5–6,5 V a hmotností 5 g. [57]

6 DISKUZE

Tato kapitola obsahuje zhodnocení konstrukčních celků uvedených v kapitole 5 z hlediska jejich funkčnosti. Součástí této kapitoly jsou návrhy možného rozšíření a vylepšení konstrukčního řešení práce.

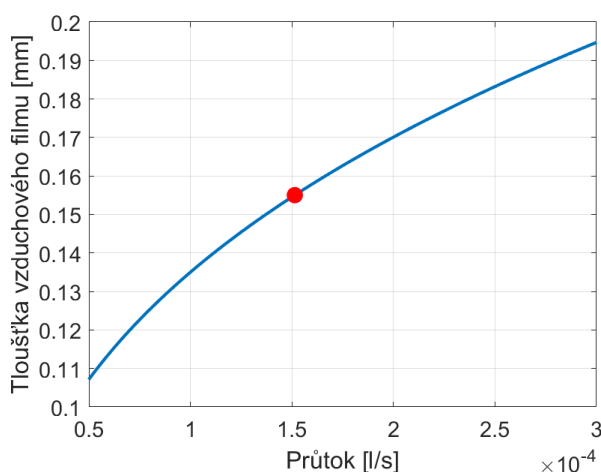
6.1 Podvozek

Pro zvolené rozměry podvozku vozítka jsou zobrazeny červeným bodem naměřené a vypočítané hodnoty na obr. 44 a 45. Z tohoto grafu vyplývá, že při snížení hmotnosti a zachování ostatních parametrů dojde ke zvýšení tloušťky vzduchového filmu. Naopak při zvýšení hmotnosti dojde k poklesu tloušťky vzduchového filmu. Pro potenciální využití v technických aplikacích při přemísťování nákladu je tedy potřebné zařízení navrhnout tak, aby při maximální hmotnosti nákladu byla dosažena dostatečná tloušťka pro pohyb po zvolené podložce.



Obrázek 44: Závislost tloušťky vzduchového filmu na hmotnosti

Z obr. 45 vyplývá, že regulace průtoku ovlivňuje tloušťku vzduchového filmu. Pro využití tohoto technického řešení jako nosné platformy je tedy výhodné regulovat průtok vzduchu dle hmotnosti břemene pro udržení zvolené tloušťky filmu a snížení provozních nákladů.



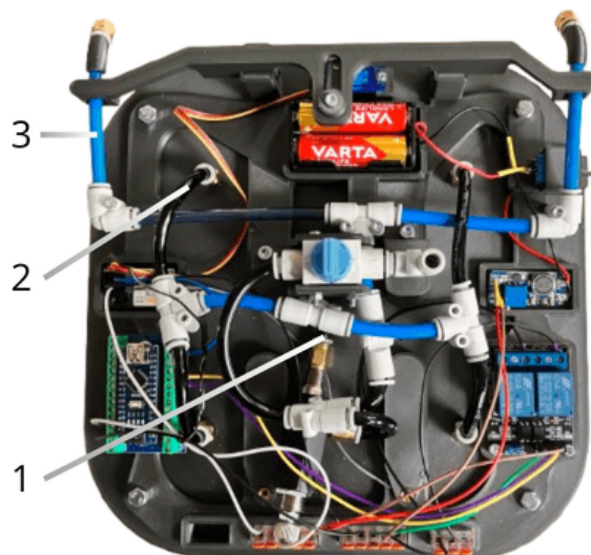
Obrázek 45: Závislost tloušťky vzduchového filmu na průtoku stlačeného vzduchu

Díky rovnoměrnému rozložení hmotnosti vozítka nedochází při levitaci a pohybu po podložce k naklápění podvozku. Tím je zaručena rovnoměrná tloušťka vzduchového filmu pod celým profilem kapsy ložiska. Škrťící ventily nebyly využity jako kompenzační prvky z důvodu poklesu tlaku na přívodu vzduchu do vzduchového polštáře s následkem nevytvoření vzduchového filmu.

Tloušťka filmu pro plynulý pohyb vozítka je závislá na rovinnosti podložky vzhledem k výrazně lepší rovinnosti a drsnosti dosedací plochy ložiska oproti podložce. Tloušťka filmu byla určena experimentálně pro pohyb nad podlahou. Ke snížení potřebné tloušťky vzduchového filmu by bylo výhodné využít koncept ložiska s kompenzačními členy, které přizpůsobí tvar dosedací plochy nerovnostem podložky. Jako kompenzační člen je vhodné využít silentblok navržený dle tuhosti vzduchového filmu.

6.2 Pneumatický obvod

V pneumatickém obvodu dochází ke značným místním tlakovým ztrátám. V tabulce 5 jsou zobrazeny naměřené hodnoty tlaku v pneumatickém obvodu na místech zobrazených na obr. 46.



Obrázek 46: Zobrazení měřených míst

Měřená místa jsou výstup z regulátoru tlaku, přívod stlačeného vzduchu do vzduchového polštáře a přívod stlačeného vzduchu do trysek.

Tabulka 5: Naměřené hodnoty tlaku

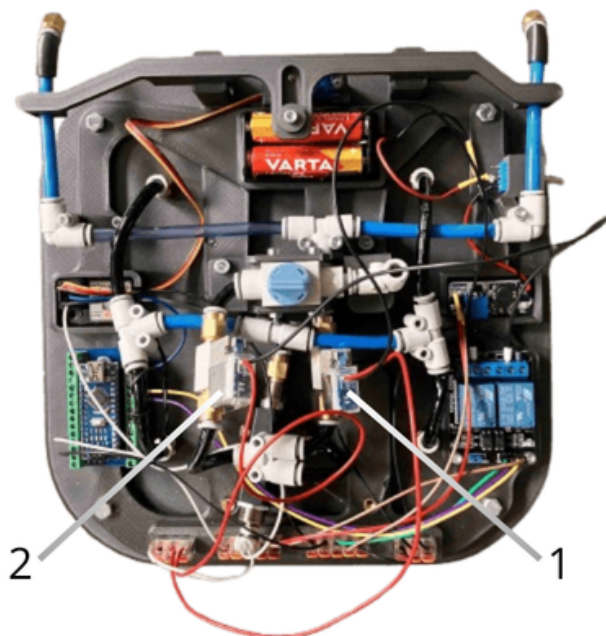
Měřené místo	tlak (bar)
1	5,1
2	0,23
3	0,42

Z důvodu těchto ztrát je potřebné mít vysoký vstupní tlak média. Tlaková lahev využitá pro měření průtoku a určení tloušťky vzduchového filmu byla využita pouze pro tato měření. Jako

zdroj stlačeného vzduchu pro levitaci a pohon vozítka není výhodné ji použít, jelikož má nízký výstupní tlak a malý objem. Pro využití tlakové lahve jako zdroje stlačeného vzduchu je potřeba využít tlakovou lahev s větším objemem nebo vyšším tlakem média. Výhodou využití tlakové lahve je možnost jejího uchycení na vozítko. Důsledkem je absence omezení pohybu jen do určité vzdálenosti od nepohyblivého zdroje stlačeného vzduchu.

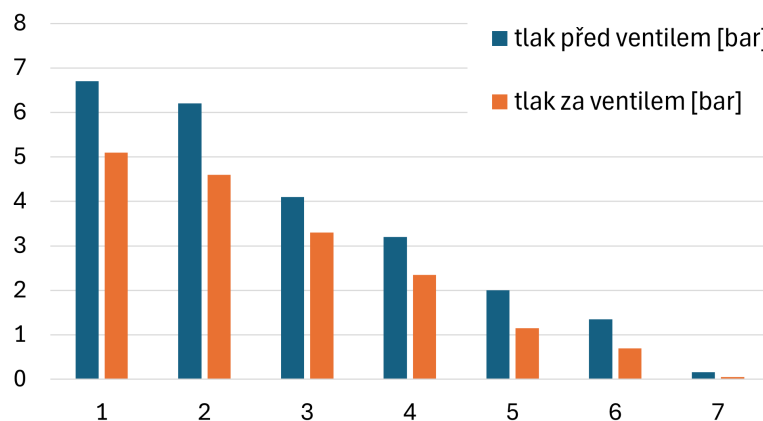
Naměřený tlak na přívodu do vzduchového polštáře je výrazně vyšší než vypočítaný minimální tlak pro únosnost ložiska rovné jeho hmotnosti. Tento rozdíl je způsoben vysokou tloušťkou vzduchového filmu.

Vozítko s elektromagneticky ovládanými 3/2 ventily je zobrazeno na obr. 47. Ventil (1) pro spínání přívodu vzduchu do trysek pohonu je umístěn místo škrťacího ventilu. Ventil (2) pro spínání přívodu vzduchu je umístěn za pneumatický přepínací uzavírací ventil a nahrazuje jeho funkci. Manuálně ovládaný ventil je zde zachován pro uchycení pneumatického obvodu k podvozku a připojení ke zdroji stlačeného vzduchu. Zapojení pneumatického obvodu bez elektromagneticky ovládaných ventilů je zobrazeno na obr. 46.



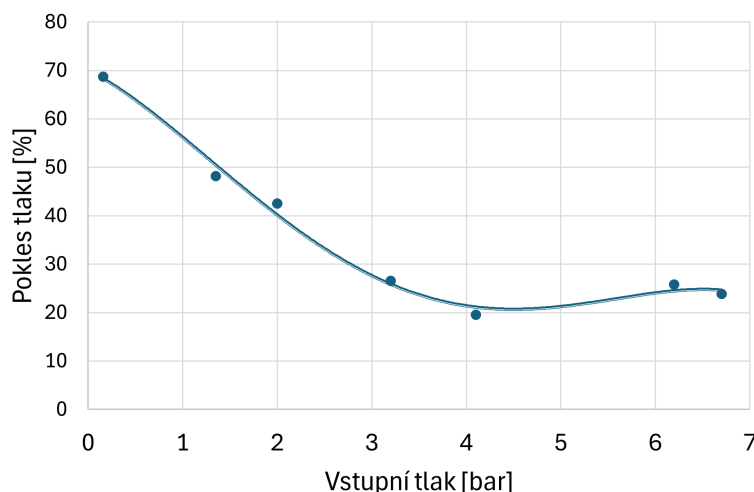
Obrázek 47: Zapojení ventilů na prototypu

Použití těchto ventilů způsobilo značné tlakové ztráty v obvodu. Závislost velikosti tlakové ztráty na vstupním tlaku je zobrazena na obr. 48. Důsledkem těchto ztrát nedošlo k vytvoření vzduchového filmu pod vozítkem. Z tohoto důvodu nejsou využity elektromagneticky ovládané ventily, nýbrž pneumatický přepínací uzavírací ventil on/off. Pro využití elektromagnetických ventilů je nutné mít zdroj stlačeného vzduchu s vyšším vstupním tlakem.



Obrázek 48: Tlakové ztráty ve 3/2 ventilu

S rostoucím vstupním tlakem klesá podíl tlakové ztráty. Při nízkých vstupních tlacích tlaková ztráta představuje více než 50 % vstupní hodnoty. Závislost poklesu tlaku na vstupním tlaku média je zobrazena na obr. 49.



Obrázek 49: Pokles tlaku vlivem místních ztrát ve ventilu

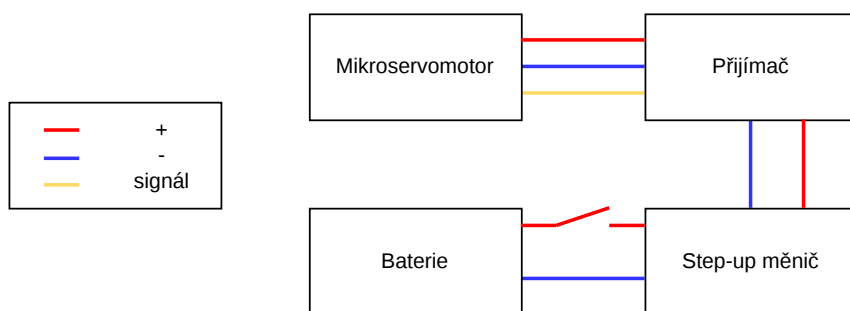
Zvolené umístění trysek pohonu na jedné straně ložiska může při vyšších tlacích a rychlostech média způsobovat naklápění ložiska. Pro eliminaci nesymetrického zatížení je vhodné využít škrtících ventilů pro každou větev pneumatického obvodu pro přívod vzduchu do vzduchového polštáře.

Pro vylepšení manévrovatelnosti vozítka je vhodná integrace regulátoru průtoku stlačeného vzduchu pro regulaci rychlosti pohybu vozítka. Dalším vylepšením pro zvýšení manévrovatelnosti je využití elektromagneticky ovládaného ventilu, a tím zajištění možnosti dálkového ovládání zapnutí/vypnutí pohonu nezávisle na přívodu vzduchu do vzduchového polštáře.

6.3 Elektronika a řízení

Při nevyužití elektromagneticky ovládaných ventilů je dálkové ovládání využito pouze na natáčení trysek. Díky použití ovladače pro RC modely s integrovaným převodem přijímaného signálu na natočení servomotoru není využita deska Arduino nano. Blokové schéma zapojení

je zobrazeno na obr. 50. Elektronický obvod na vozítku zůstal zachován původní bez zapojení elektromagnetických 3/2 ventilů. Důvodem je snadná integrace ventilů a možnost řízení spínání průtoků při zajištění dostatečného zdroje stlačeného vzduchu.



Obrázek 50: Blokové schéma zapojení bez elektromagneticky ovládaných ventilů

ZÁVĚR

Hlavním cílem této bakalářské práce byly návrh, výroba a následné testování funkčního prototypu levitujícího vozítka poháněného stlačeným vzduchem.

Byla provedena rešerše na technologie a principy vzduchové levitace. Jako konstrukční řešení byl zvolen princip vytvoření vzduchového filmu aerostatických ložisek. Dále byla provedena rešerše na využití pohonu stlačeným plynem v dopravě.

V rámci koncepčního řešení jsou uvedeny koncepty pro návrh pohonu a ložiska. Pohon je řešen dvěma otočnými tryskami natáčenými servomotorem. Ten je dálkově řízen komerčním ovladačem pro RC modely. Ložisko je konstruováno jako dělené. Výhodou tohoto konceptu je oddělení jednotlivých buněk pomocí odtokových drážek a dosažení nárůstu tlaku v buňkách.

Pro výrobu prototypu byl využit 3D tisk metodou extruze. Hlavní části tohoto vozítka jsou podvozek konstruovaný jako aerostatické ložisko, pneumatický obvod a elektronický obvod. Pneumatický obvod zajišťuje regulaci a rozvod stlačeného vzduchu do aerostatického ložiska a trysek pohonu. Spínání pneumatického obvodu je na prototypu řešeno jedním pneumatickým přepínacím uzavíracím ventilem manuálně ovládaným. Elektronický obvod zajišťuje dálkové ovládání natáčení trysek vozítka.

Možným vylepšením je využití dálkového ovládání spínání pneumatického obvodu pomocí elektromagneticky ovládaných 3/2 ventilů. Při jejich použití na prototypu v pneumatickém obvodu však způsobovaly vysoké místní ztráty s důsledkem nedostatečného tlaku vzduchu pro levitaci a pohon. Jejich využití je tedy podmíněno zdrojem stlačeného vzduchu s vyšším výstupním tlakem.

Výsledky této práce se dají aplikovat pro návrh platformy pro manipulaci s objekty po rovných podložkách. Tento způsob využívá eliminaci pasivních odporů, je tedy možné pomocí malé hnací síly přemístit platformu s nákladem. Další výhodou eliminace mechanického tření je možnost využití pro přesné polohování. Navržený pohon pomocí trysek přesné polohování neumožňuje, pro tuto aplikaci by bylo vhodné řídit přívod vzduchu do trysek s využitím zpětné vazby o poloze platformy.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ROLINC, Lukáš. *Způsoby náhonu lineární posuvové soustavy a druhy lineárních vedení CNC obráběcích strojů*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2017.
- [2] ONAT EKINCI, T.; MAYER, J.R.R.; CLOUTIER, Guy M. Investigation of accuracy of aerostatic guideways. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2009, roč. 49, č. 6, s. 478–487. ISSN 0890-6955. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.01.001>.
- [3] HORÁK, Petr. *Návrh a realizace výukového modelu „Vzduchová levitace“*. Brno, 2009. bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [4] KUZHANDAIRAJ, Justin Christopher. *Vývoj, řízení a testování systému vzduchové levitace pro vzdělávací účely*. Miláno, 2018. Diplomová práce. Polytechnická univerzita v Miláně.
- [5] LIU, Tianshu. Evolutionary understanding of airfoil lift. *Advances in Aerodynamics*. 2021, roč. 3, č. 1, s. 37. ISSN 2524-6992. Dostupné z DOI: [10.1186/s42774-021-00089-4](https://doi.org/10.1186/s42774-021-00089-4).
- [6] CHATTI, Sami; LAPERRIÈRE, Luc; REINHART, Gunther; TOLIO, Tullio (ed.). Aerostatic Bearing. In: *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019, s. 53–53. ISBN 978-3-662-53120-4. Dostupné z DOI: [10.1007/978-3-662-53120-4_300021](https://doi.org/10.1007/978-3-662-53120-4_300021).
- [7] BOOSER, E. Richard; KHONSARI, Michael M. *Applied Tribology*. In: *Applied Tribology*. United Kingdom: John Wiley & Sons, Incorporated, 2017. ISBN 1118637240.
- [8] ZHAO, Qi; MINGCHEN, Qiang; YU, Hou; SHUANGTAO, Chen; TIANWEI, Lai. Research Developments of Aerostatic Thrust Bearings: A Review. *Applied Sciences* [online]. 2022, roč. 12, č. 23 [cit. 2026-01-19]. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.3390/app122311887>.
- [9] FOLTÝN, Jan. *Konstrukce hydrostatického uložení divadelní točny*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2021.
- [10] BASSANI, R; PICCIGALLO, B. *Hydrostatic lubrication*. První. Amsterdam: Elsevier, 1992. ISBN 044488498.
- [11] LHOTSKÝ, Marek. *Design vznášedla*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2012.
- [12] YUN, Liang; BLIAULT, Alan. *Theory and Design of Air Cushion Craft*. 1. vyd. London: Elsevier, 2000. ISBN 9780340676509.
- [13] KAYA, K.; ÖZCAN, O. A numerical investigation on aerodynamic characteristics of an air-cushion vehicle. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2013, roč. 120, s. 70–80. ISSN 0167-6105. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.06.012>.
- [14] PRENTICE, John. *Compressed Air Trams* [online]. 1998. [cit. 2026-01-21]. Dostupné z: <https://www.tramwayinfo.com/Tramframe.htm?https://www.tramwayinfo.com/tramways/Articles/Compair2.htm>.

- [15] *Auto na vzduch* [online]. 2006. [cit. 2026-01-21]. Dostupné z: <https://www.hybrid.cz/auto-na-vzduch/%5C#:~:text=Ano%5C%2C%5C%20motor%5C%20na%5C%20vzduc h%5C%20skute%5C%C4%5C%8Dn%5C%C4%5C%9B%5C%20existuje.%5C%20V,c%5C%C3 %5C%AD1%5C%20vytvo%5C%C5%5C%99it%5C%20motor%5C%20s%5C%20n%5C%C3%5 C%ADzk%5C%C3%5C%BDmi%5C%20emisemi%5C%20%5C%C5%5C%A1kodlivin..>
- [16] *Pneumobily z VUT porazily evropskou elitu. Studentský prototyp na stlačený vzduch má nejlepší akceleraci v Evropě.* c2026. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/vut/f19528/d171035>.
- [17] *Lokomotiva, poháněná stlačeným vzduchem* [online]. 2011. [cit. 2026-01-21]. Dostupné z: <https://www.bejvavalo.cz/clanky.php?detail=114>.
- [18] CREUTZIG, F.; PAPSON, A.; SCHIPPER, L.; KAMMEN, D. M. Economic and environmental evaluation of compressed-air cars. *Bristol* [online]. 2009, roč. 4, č. 4 [cit. 2026-01-21]. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/4/044011>.
- [19] YADAV, J. P. Study and Fabrication of Compressed Air Engine. *SAMRIDDHI: A Journal of Physical Sciences, Engineering and Technology* [online]. 2015 [cit. 2026-01-21]. Dostupné z DOI: doi:10.18090/SAMRIDDHI.V2I1.1590..
- [20] *MDI Compressed Air Engine* [online]. [cit. 2026-01-21]. Dostupné z: <https://www.mdi.lu/>.
- [21] ČERNÁK, M.; MICHALEC, M.; VALENA, M.; RANUŠA, M. Inlet shape optimization of pneumobile engine pneumatic cylinder using CFD analysis. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, roč. 1935, č. 1, s. 012011. Dostupné z DOI: 10.1088/1742-6596/1935/1/012011.
- [22] RANJAN, R.; KARTHIKEYAN, K.; RIAZ, F.; CHOU, S.K. Cold gas propulsion micro-thruster for feed gas utilization in micro satellites. *Applied Energy*. 2018, roč. 220, s. 921–933. ISSN 0306-2619. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.040>.
- [23] HASSANI, Ali; GHORBANI, Mehrdad; PASAND, Milad. A Study of Spacecraft Reaction Thruster Configurations for Attitude Control System. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. 2017, roč. 32. Dostupné z DOI: 10.1109/MAES.2017.160104.
- [24] KOPÁČEK, Jaroslav. *Pneumatické mechanismy. D1, Pneumatické prvky a systémy*. 2. vydání. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2010. ISBN 978-80248-0879-6.
- [25] *Základy průmyslové automatizace : stlačený vzduch a jeho využití*. 6. vydání. Brno: SMC Industrial Automation CZ, 2023. ISBN 978-80-11-02798-8.
- [26] *Pneumatické ventily - obecné informace* [online]. 1993. [cit. 2026-01-19]. Dostupné z: <https://www.tubes-international.cz/wp-content/uploads/katalog-pdf-cz/pneumatika/pneumaticke-ventily-a-prislusenstvi.pdf>.
- [27] NOVOTNÝ, František; HORÁK, Marcel. *Základy pneumatiky*. 2019.
- [28] *Jak elektromagnetický ventil funguje?* [online]. 2018. [cit. 2026-01-19]. Dostupné z: <https://www.smstork.cz/jak-elektromagneticky-ventil-funguje/>.
- [29] *Škrčení plynů a par* [online]. 2023. [cit. 2026-01-20]. Dostupné z: <https://fluid-dynamics.education/skrzeni-plynu-a-par.html%5C#popis-vzniku-tlakove-ztraty-a-zmen-ostatnich-stavovych-velicin-tekutiny-pri-skrzeni>.

- [30] KOPÁČEK, Jaroslav. *Pneumatické mechanizmy. Díl 2, Řízení pneumatických systémů*. 1. vyd., dotisk. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 1999. ISBN 80-7078-498-9.
- [31] *Architecture of an electromechanical relay*. c 2026. Dostupné také z: <https://www.pickerintest.com/en-us/kb/hardware-topics/relay-characteristics/emr-relays>.
- [32] ŠVARC, Ivan. *Automatické řízení*. Vydání druhé. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4398-3.
- [33] DEINGRUBER, Ondřej. *Robotické vozidlo s využitím RC komponentů*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta informačních technologií, 2020.
- [34] *Co je servomotor?* [B.r.]. Dostupné také z: https://www.festo.com/cz/cs/e/o-firme-festo/blog/in-practice/co-je-servomotor-id_1901974/.
- [35] *Jak funguje servomotor a zpětnovazební řízení*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.raveo.cz/aktualita/jak-funguje-servomotor-a-zpetnovazebni-rizeni/>.
- [36] HYHLÍK, Pavel. *Využití technologie 3D tisku v automobilovém průmyslu*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2023.
- [37] VACULKA, Alexander. *Využití aditivních technologií (3D tisk) pro výrobu konstrukčních částí turbín*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2019.
- [38] PETRUSE, Radu; SIMION, Carmen; BONDREA, Ioan. Geometrical and Dimensional Deviations of Fused Deposition Modelling (FDM) Additive-Manufactured Parts. *Metrology*. 2024, roč. 4, s. 411–429. Dostupné z DOI: 10.3390/metrology4030025.
- [39] AL-HASNI, Shihab; SANTORI, Giulio. 3D printing of vacuum and pressure tight polymer vessels for thermally driven chillers and heat pumps. *Vacuum*. 2020, roč. 171, s. 109017. ISSN 0042-207X. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.109017>.
- [40] *PLA*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/pla/>.
- [41] *ABS*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/abs/>.
- [42] *What is PETG? (Everything You Need To Know)*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-petg>.
- [43] *Servomotor SG90 - 360° kontinuální*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://dratek.cz/arduino-platforma/180244-servomotor-sg90-360-kontinualni.html>.
- [44] Google [online]. 2026. [cit. 2026-01-22]. Dostupné z: https://www.google.com/search?sca_esv=06655e5bf07ee195%5C&rlz=1C1KNTJ_csCZ1074CZ1074%5C&sxsrf=ANbL-n67SicDb1RYcI3qNwCEXC-nh9Kk8w:1769077684170%5C&udm=3%5C&fbs=ADc_1-ZseckkBjUFopaGDNYa-HGjo4_b6b_a7pIHTL5Y9QnExq9Rc1h0y7XW95sKHlpHVcd0xtJY888gl4wfZU9xaSTSAoH97Bv4NL_d_SgKVRK93irH7SmxIc6hMYJq6t-F2_foWK_q1ujRHUc19cwHQJXPDCQuX0gzEcYiJ5uU_P33us6U_wPqNu55zg2gtWMinVYGpl_P-7aEpt3heIexYI9CuFLWg%5C&q=elektromagnetick%5C%C3%5C%BD+ventil+3/2%5C&sa=X%5C&ved=2ahUKEwjNr8f3956SAxXxQ_EDHYGJOVcQs6gLegQIDhAB%5C&biw=1536%5C&bih=730%5C&dpr=1.25%5C&aic=0.
- [45] ŠIMARA, Vít. *Modifikace geometrie vícebuňkové kapsy hydrostatického uložení*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2024.

- [46] MICHALEC, Michal; POLNICKÝ, Vojtěch; FOLTÝN, Jan; SVOBODA, Petr; ŠPERKA, Petr; HURNÍK, Jakub. The prediction of large-scale hydrostatic bearing pad misalignment error and its compensation using compliant support. *Precision Engineering*. 2022, roč. 75, s. 67–79. ISSN 0141-6359. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2022.01.011>.
- [47] GAO, Siyu; CHENG, Kai; CHEN, Shijin; DING, Hui; FU, Hongya. CFD based investigation on influence of orifice chamber shapes for the design of aerostatic thrust bearings at ultra-high speed spindles. *Tribology International*. 2015, roč. 92, s. 211–221. ISSN 0301-679X. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.06.020>.
- [48] MICHALEC, Michal; FOLTÝN, Jan; SVOBODA, Petr; KŘUPKA, Ivan; HARTL, Martin. Performance and stability comparison of hydrostatic bearing pad geometry optimization approaches. *Forschung im Ingenieurwesen*. 2025, roč. 89, č. 1, s. 65. ISSN 1434-0860. Dostupné z DOI: [10.1007/s10010-025-00837-8](https://doi.org/10.1007/s10010-025-00837-8).
- [49] MICHALEC, M.; ONDRA, M.; SVOBODA, M. et al. A Novel Geometry Optimization Approach for Multi-Recess Hydrostatic Bearing Pad Operating in Static and low-Speed Conditions Using CFD Simulation. *Tribology Letters*. 2023, roč. 71, č. 52. Dostupné z DOI: [10.1007/s11249-023-01726-3](https://doi.org/10.1007/s11249-023-01726-3).
- [50] *Termodynamické děje: Prezentace - Google Slide*. c2026. Dostupné také z: <https://docs.google.com/presentation/d/1v1zQNoPlthcKZ0neMmUjFiZeN3DW4zg1q7GQCdqKAFQ/edit?usp=sharing>.
- [51] IRIMIA, Alexandru; ERMOLAI, Vasile; NAGIT, Gheorghe. Study on the Tightness of Parts Manufactured by FDM. *Bulletin of the Polytechnic Institute of Iași. Machine constructions Section*. 2025, roč. 71, s. 29–40. Dostupné z DOI: [10.2478/bipcm-2025-0023](https://doi.org/10.2478/bipcm-2025-0023).
- [52] *The Complete Guide to Watertight 3D Printing: Technologies, Materials, and Post-Processing Techniques*. c 2026. Dostupné také z: https://forgelabs.com/blog/watertight-3d-printing-comprehensive-guide?utm_source=chatgpt.com.
- [53] HLOUŠEK, Jiří. *Termomechanika*. 2. vyd. Brno: VUT v Brně, 2000. ISBN 80-214-1720-X.
- [54] *7. cvičení*. c2026. Dostupné také z: https://drive.google.com/file/d/16emf_yyi3zfSzDgkzyaldf1XpGP9r8fx/view?usp=drive_web.
- [55] *Modul relé 4x, napájení 5V, s optoclenem*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.hadex.cz/m457d-modul-rele-4x-napajeni-5v-s-optoclenem/>.
- [56] *User manual Arduino Nano*. c 2026. Dostupné také z: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000005-datasheet.pdf>.
- [57] *FlySky FS-GT2E 2CH (originál) 2.4GHz vysílač + přijímač A3*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://eshop.ramon.cz/flysky-fs-gt2e-2ch--original--2-4ghz-vysilac-prijimac-a3/>.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

8.1 Použité zkratky

3D	třírozměrný
ATB	aerostatiská axiální ložiska
MDI	Motor Development International
AC	střídavý proud
DC	stejnoseměrný proud
PLA	kyselina polylaktická
ABS	akrylonitrilbutadienstyren
PETG	polyethylentereftalát glykol
SEM	skenovací elektronová mikroskopie
CFD	simulace proudění kapalin a plynů
PWM	pulzně šířková modulace
I/O pin	vstupně výstupní pin

8.2 Použité fyzikální veličiny

F_g	[N]	gravitační síla
m	[kg]	hmotnost
g	[m · s ⁻²]	tíhové zrychlení
F_o	[N]	odporová síla
C_x	[-]	odporový koeficient
ρ_v	[kg · m ⁻³]	hustota proudu vzduchu
A	[m ²]	plocha tělesa
v	[m · s ⁻¹]	rychlost proudu vzduchu
p	[Pa]	tlak
h_r	[m]	výška od referenční hladiny
l_1	[-]	kapsa ložiska
l_2	[-]	kapsa ložiska
h_2	[m]	tloušťka filmu maziva
p_s	[bar]	dodávaný tlak média
U_1	[-]	napětí ovládací cívky
I_1	[-]	proud ovládací cívky
U_2	[-]	napětí v obvodu spotřebiče

I_2	[-]	proud v obvodu spotřebiče
a	[mm]	poloměr otvoru buňky ložiska
l	[mm]	rozměr vztažený k šířce ložiska
p_f	[-]	tlakový součinitel
q_f	[-]	průtokový součinitel
H_f	[-]	součinitel výkonové ztráty
R_1	[mm]	poloměr otvoru buňky ložiska
μ	[Pa · s]	dynamická viskozita
p_ℓ	[bar]	počáteční tlak média v tlakové lahvi
p_r	[bar]	výstupní tlak regulátoru tlaku
t	[s]	dobu, za kterou poklesne počáteční tlak v tlakové lahvi na dodávaný tlak média
p_d	[-]	tlakový součinitel zahrnující vliv drážek
h_d	[-]	součinitel zahrnující vliv drážek pro korekci tloušťky vzduchového filmu
V	[l]	objem tlakové lahve
T_2	[K]	teplota média na konci děje
T_1	[K]	počáteční teplota média
p_{ra}	[Pa]	absolutní tlak na výstupu z regulátoru tlaku
$p_{\ell a}$	[Pa]	absolutní tlak v tlakové lahvi
κ	[-]	Poissonova konstanta
Δm	[kg]	rozdíl hmotností stlačeného plynu při počátečním a koncovém stavu
Q_m	[kg · s ⁻¹]	hmotnostní průtok média
Q	[l · s ⁻¹]	objemový průtok média
T_m	[K]	průměrná teplota stlačeného plynu
h	[m]	tloušťka vzduchového filmu
W	[N]	tíha vozítka

SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

1	Kulička nadnášená proudem vzduchu, převzato z [4] a upraveno	15
2	Aerostatická ložiska a) schéma, b) princip funkce, c) rozložení tlaku, d) rozložení rychlosti v blízkosti dutin, převzato z [8] a upraveno	16
3	Kapilárový restriktor (vlevo) a clonový restriktor (vpravo), převzato z [9] a upraveno	16
4	Kompenzační systém dodávání maziva [10]	17
5	Vznášedlo, 1: vrtule, 2: motor, 3: pohonný motor a vrtule, 4: těsnění na přídi, 5: vzduchový polštář, 6: tvrdý povrch, 7: boční zeď, 8: těsnění na zádi, převzato z [12] a upraveno	17
6	Vznášedlo, 1: vrtule, 2: nosný ventilátor 3: rozváděcí komora, 4: štěrby, 5: rovný povrch, 6: boční manžeta, 7: vzduchový polštář, 8: periferní stěnové trysky, převzato z [13]	18
7	Tramvaj poháněná stlačeným vzduchem [14]	19
8	Airpod 2.0 [20]	20
9	Pneumobil studentského týmu Pneumobil Racing Team Brno [16]	20
10	Schematická značka 3/2 ventilu normálně uzavřeného [26]	22
11	Schematické značení ovládání ventilů: a) manuálně (obecně), b) tlačítkem, c) nožním pedálem, d) stlačeným vzduchem, e) podtlakem, f) elektromagneticky, převzato z [24] a upraveno	22
12	Škrťící ventil se schematickou značkou (vlevo), převzato z [24] a upraveno, a tlaková ztráta při škrcení plynů (vpravo) [29]	23
13	Regulátor tlaku, převzato z [24] a upraveno	23
14	Relé, převzato z [31] a upraveno	24
15	Ovládání, převzato z [32] a upraveno	25
16	SEM snímky vzorku z PLA [39]	27
17	SEM snímky vzorku z ABS [39]	27
18	Schéma konceptu se čtyřmi tryskami	30
19	Schéma pneumatického obvodu se čtyřmi tryskami	31
20	Schéma konceptu se dvěma otočnými tryskami	31
21	Schéma pneumatického obvodu se dvěma otočnými tryskami	32
22	Schéma konceptu se čtyřmi otočnými tryskami	32
23	Schéma pneumatického obvodu se čtyřmi otočnými tryskami	33
24	Porovnání konceptů pohonu	34
25	Schéma konceptu neděleného ložiska	35
26	Schéma konceptu děleného ložiska	35
27	Schéma konceptu ložiska s kompenzačním členem	36
28	Porovnání konceptů ložiska	36
29	Model vozítka s krytem	37
30	Model vozítka bez krytu	37
31	Fotografie prototypu	38
32	Tvar dutin [47]	39
33	Analyticky optimalizovaná kapsa (vlevo) a kapsa optimalizovaná pomocí CFD simulace (vpravo) [48]	39
34	Obecné rozměry ložiska, převzato z [7] a upraveno	40
35	Vliv rozměrů ložiska na faktory výkonu, převzato z [7]	40

36	Rozměry ložiska	41
37	Schéma pro výpočet, převzato z [7] a upraveno	41
38	Dosedací plocha ložiska	43
39	Schéma pneumatického obvodu	44
40	Tryska pohonu	44
41	Schéma mechanismu natáčení trysek	45
42	Zobrazení tvarového spojení servomotoru s mechanismem	45
43	Blokové schéma zapojení elektroniky	46
44	Závislost tloušťky vzduchového filmu na hmotnosti	47
45	Závislost tloušťky vzduchového filmu na průtoku stlačeného vzduchu	47
46	Zobrazení měřených míst	48
47	Zapojení ventilů na prototypu	49
48	Tlakové ztráty ve 3/2 ventilu	50
49	Pokles tlaku vlivem místních ztrát ve ventilu	50
50	Blokové schéma zapojení bez elektromagneticky ovládaných ventilů	51

SEZNAM TABULEK

1	Hmotnosti jednotlivých konceptů	33
2	Odhad ceny součástí	34
3	Ceny jednotlivých konceptů	34
4	Naměřené hodnoty	42
5	Naměřené hodnoty tlaku	48