



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

**VYUŽITÍ FLUIDIKOVÝCH SYSTÉMŮ V ROBOTICKÝCH
APLIKACÍCH**

USE OF FLUIDICS SYSTEMS IN ROBOTIC APPLICATIONS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Eim

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav automatizace a informatiky
Student:	Bc. Jakub Eim
Studijní program:	Aplikovaná informatika a řízení
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	prof. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.
Akademický rok:	2023/24

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 diplomové práce:

Využití fluidikových systémů v robotických aplikacích

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Smyslem práce bude návrh robotického systému schopného nahradit vibrační stoly za účelem pozicování a manipulace s orientovatelnými objekty. V ohledu manipulace půjde o pick and place aplikaci. V ohledu náhrady vibračního stolu půjde o revoluční koncept využití fluidikových systémů. Návrh, výroba a validace testovaných fluidikových systémů bude zásadním přínosem této práce. Předpokládá se 3D modelování v systému SolidEdge a 3D tisk. Robotika a počítačové vidění (CV) bude založena na technologii Epson. Pneumatika bude řešena na technologii SMC.

Cíle diplomové práce:

- 1/ Rešerše fluidikových případně dalších systémů využitelných v problematice třídění polohovatelných objektů.
- 2/ Návrh, fyzická realizace a provozní validace několika fluidikových systémů (využití 3D tisku, pneumatika majoritně SMC).
- 3/ Aplikace pick and place v kontextu náhrady vibračního stolu při polohování a třídění objektů (drobné orientovatelné součásti).
- 4/ Praktické experimenty ověřující funkcionální navrhovaného systému.

Seznam doporučené literatury:

- TESAŘ, Václav, 2007. Pressure-driven microfluidics. Boston: Artech House. ISBN 1-59693-134-5.
- LIN, Bingcheng a S. BASURAY, c2011. Microfluidics: technologies and applications. Heidelberg: Springer. Topics in current chemistry, 304. ISBN 9783642230493.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

Ing. Pavel Heriban, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá návrhem, výrobou a otestováním fluidikových prvků pro polohování dílů v robotické buňce. Cílem je nahradit vibrační stoly a podavače užívané v pick and place aplikacích navrhaným fluidikovým řešením. Rešerše je věnovaná momentálně užívaným produktům pro polohování součástí, fluidním oscilačním tryskám a vzduchovým nožům. Praktická část je zaměřena na vývoj fluidikových elementů pomocí CFD simulací. Návrh 3D modelu robotické stanice s implementovaným fluidním řešením proběhl v programu Solid Edge. Robotická buňka byla programována pomocí digitálního dvojčete v simulačním prostředí Epson RC+. Pro odběr polohovaných součástí manipulátorem Epson C8-A1401S bylo implementováno strojové vidění Epson CV2. Navrhnuté fluidikové elementy byly na závěr úspěšně validovány na reálné robotické buňce. Práce je zakončena srovnáním dosažených výsledků s vibračními stoly.

ABSTRACT

The master's thesis deals with the design, production and testing of fluidic elements used for positioning parts in a robotic cell. The aim is to replace vibratory tables and feeders used in pick and place applications with the proposed fluidic solution. The review focuses on currently used products for feeding parts, fluidic oscillating nozzles and air knives. The practical part focuses on the development of fluidics elements using CFD simulations. The design of the 3D model of the robotic station with the implemented fluidic solution was carried out in Solid Edge. The robotic cell was programmed by a digital twin in the Epson RC+ simulation environment. Epson CV2 machine vision was implemented for picking positioned parts with the Epson C8-A1401S manipulator. Finally, the designed fluidics elements were successfully validated on a real robotic cell. The work is concluded by comparing the obtained results with vibration tables.

KLÍČOVÁ SLOVA

Robotická stanice, CFD, Fluidní prvky, Epson, Pick and place, Digitální dvojče, SPEL+, Epson RC+, Oscilační tryska, Vzduchový nůž

KEYWORDS

Robotic station, CFD, Fluidic elements, Epson, Pick and place, Digital twin, SPEL+, Epson RC+, Oscillating nozzle, Air knife



2024

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

EIM, Jakub. *Využití fluidikových systémů v robotických aplikacích*. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157931>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky. Vedoucí práce Radomil Matoušek.

PODĚKOVÁNÍ

Moje poděkování patří především vedoucímu diplomové práce panu prof. Ing. Radomilu Matouškovi, Ph.D. a firmě Opticontrol s.r.o. za ochotu a pomoc při vypracování této práce. Také bych rád poděkoval vedoucímu R&D z laboratoře I4C za cenné rady během zpracování této práce a doc. Ing. Pavlovi Rudolfovi, Ph.D. za pomoc během CFD simulací. Rád bych také poděkoval své rodině a přítelkyni za podporu při studiu.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Využití fluidikových systémů v robotických aplikacích* vytvořil samostatně pod vedením pana prof. Ing. Radomila Matouška, Ph.D. s použitím odborné literatury a materiálů uvedených v seznamu literatury.

Jako autor uvedené práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následku porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestně právních důsledků.

V Brně dne 24. 5. 2024

.....

Bc. Jakub Eim

OBSAH

1	ÚVOD.....	15
2	REŠERŠE SOUČASNÉHO STAVU.....	17
2.1	Polohování dílů.....	17
2.2	Vibrační podavače AIVE.....	18
2.3	Vibrační podavače Asyril	19
2.4	Vibrační stůl Opticontrol	20
2.5	Vibrační bubnový zásobník.....	21
2.6	Open-source vibrační bubnový zásobník	22
2.7	Aditivní výroba.....	22
2.8	Fluidní oscilátor.....	23
2.8.1	Coanda efekt	25
2.8.2	Synchronizace více fluidních trysek.....	25
2.9	Vzduchový nůž	26
3	NÁVRH FLUIDNÍCH PRVKŮ.....	29
3.1	První model oscilační trysky	29
3.2	Simulace proudění	30
3.2.1	Postup řešení úlohy.....	30
3.3	Proudění fluidní tryskou	31
3.4	Synchronizace proudění	35
3.5	Proudění vzduchovým nožem	37
3.6	CAD model fluidních prvků.....	39
4	DIGITÁLNÍ DVOJČE EPSON.....	43
4.1	Seiko Epson	43
4.2	Výběr hardwaru	43
4.2.1	Robotické ramena	43
4.2.2	Řídící jednotky	44
4.2.3	CAD Robotické buňky	45
4.3	Epson RC+7.5.....	46
4.3.1	Epson RC+ Express	46
4.4	Strojové vidění.....	46
4.5	Tvorba digitálního dvojčete.....	48
5	STAVBA A OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI.....	51
5.1	Výroba fluidikových komponent.....	51
5.2	Zapojení robotické buňky	53

5.3	Implementace strojového vidění	54
5.4	Praktické experimenty	55
5.5	Výsledky	57
6	SROVNÁNÍ NAVRHOVANÉHO ŘEŠENÍ	59
6.1	Další vývoj	60
7	ZÁVĚR.....	63
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	65
	SEZNAM SYMBOLŮ.....	67
	SEZNAM ZKRATEK.....	68
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	69
	SEZNAM TABULEK	70
	SEZNAM PŘÍLOH	71
	Elektronické přílohy	71
	FOTODOKUMENTACE	72

1 ÚVOD

Automatizace a robotika je dnes jedno z nejžádanějších odvětví průmyslové výroby. Optimalizace výrobních procesů a neustálý tlak na zlevňování robotických řešení v průmyslu představují klíčovou motivaci pro rozvoj a výzkum tohoto oboru. Pro malé firmy je často největší překážkou při implementaci automatizace právě cena nabízených řešení. Proto je zde významná snaha nabízet i alternativní, cenově dostupnější možnosti.

Robotický manipulátor dokáže uchopený díl rotovat pouze kolem osy svého zápěstního kloubu, nedokáže jej překloupat. Následné zpracování polohovatelných dílů ve výrobní lince však často vyžaduje jejich správnou orientaci. Pro aplikace vyžadující přesné založení dílů robotem podle specifikované orientace je mnoho komerčně nabízených řešení od řady firem. V průmyslu se užívají vibrační stoly nebo vibrační bubnové podavače. Jsou to funkční a spolehlivé produkty schopné polohovat dle požadované orientace širokou škálu výrobků od mikroelektroniky až po kovové odlitky. Všechny tyto produkty mají ale jedno negativum, a to je cena v řádu statisíců korun. Snaha nahradit vibrační zásobníky a podavače, nebo aspoň optimalizovat jejich výrobní náklady, je na trhu patrná již delší dobu.

Tato práce je inovativní ve smyslu využití fluidních prvků pro manipulaci s polohovatelnými díly. Místo dosud užívaných mechanických vibrací bude pro polohování dílů využito vířivé vzduchové proudění. Hlavním cílem této práce je návrh, realizace a experimentální ověření fluidikových prvků pro třídění polohovatelných součástí, které jsou manipulovány robotem. Tento komplexní proces je rozdělen na několik samostatných cílů. Tyto cíle je potřeba postupně řešit.

Navrhovaný způsob řešení

Vypracovat rešerši ohledně problematiky třídění polohovatelných objektů. Porovnat dostupná komerční i open-source řešení a definovat vlastnosti, které by navrhované fluidní prvky měly mít. Dále vypracovat analýzu dostupných fluidikových prvků vhodných pro tuto aplikaci a popsat princip jejich funkce.

Pomocí poznatků z rešerše navrhnout v prostředí Siemens Solid Edge 3D modely fluidikových prvků. Tyto modely následně testovat pomocí CFD simulace v programu Ansys. Poté tisknout navrhované prototypy a kontrolními řezy ověřovat, zda nedochází při výrobě k deformaci povrchů vnitřních struktur. Dle požadavků zadavatele testovat a upravovat navrhované dílce.

V programu Epson RC+ vytvořit digitální dvojče a program pro testování navrhnutých prvků. Implementovat strojové vidění CV2 od firmy Epson.

Dle digitálního dvojčete sestavit robotickou stanici. Aditivně vyrobit navrhnuté fluidní prvky a v robotické buňce ověřit funkčnost navrhnutého řešení ve smyslu pick and place aplikace. Kvantifikovat výsledky této práce a porovnat je s produkty dostupnými na trhu.

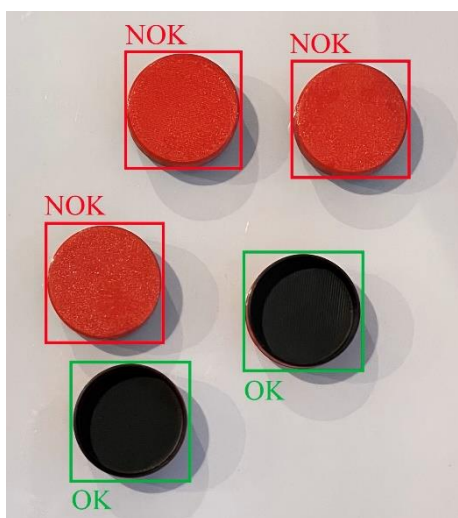
2 REŠERŠE SOUČASNÉHO STAVU

První část diplomové práce se zabývá problematikou třídění polohovatelných objektů. Tato kapitola se věnuje rešerši v oblasti polohování dílů, vibračních stolů a podavačů. Nejdříve je vysvětlena problematika polohování dílů a její význam v průmyslové výrobě. Následně jsou probrána dostupná zařízení pro polohování dílů a zváženy jsou kladné a záporné vlastnosti každého produktu. Na základě průzkumu a konzultace se zadavatelem práce byly stanoveny vlastnosti, jež by mělo navrhované řešení splňovat.

Druhá část se věnuje rozboru fluidické oscilační trysky a vzduchového nože. Tyto dva fluidní prvky jsou základním kamenem celé práce. Je vysvětlen fyzikální princip jejich funkce a upozorněno je i na možné problémy spojené s použitím více fluidních trysek a aditivní výrobou.

2.1 Polohování dílů

Vibrační podavače se používají pro manipulaci se širokou škálou dílů ve výrobních linkách automobilového, potravinářského, farmaceutického nebo elektrotechnického průmyslu. Jejich využití spočívá v polohování orientovatelných dílů, jenž jsou následně odebrány robotickým ramenem či jiným manipulátorem. K polohování dochází před usazením dílu do přípravku. Díl musí být do přípravku založen v přesně definované pozici a orientaci. Zadaná orientace specifikuje, která strana dílu má směřovat vzhůru. Vibrační podavače díly rozkmitají pomocí mechanických vibrací. Po skončení vibrací díly spadnou zpět na odebírací podložku. Následně strojové vidění (CV) vyhodnotí jejich orientaci, viz obr. 1. Díly se tak virtuálně roztřídí na OK a NOK. Pro všechny správně orientované díly pak CV vygeneruje souřadnice pro úchop a zašle je do robotického manipulátoru. Ten odebere všechny správně natočené díly a založí je do požadované pozice. Poté probíhá celý cyklus polohování a třídění dílů znovu. Mezi cykly jsou na odebírací podložku průběžně dosypávány nové náhodně orientované díly.



Obr. 1: OK a NOK díly snímáné kamerou

2.2 Vibrační podavače AIVE

Ve firmě Opticontrol s.r.o. jsou vibrační stoly AIVE [1] od firmy AIM, sídlící v Jižní Koreji, hojně využívány pro zakázky vyžadující polohování volně ložených dílů pro odběr robotem. Tyto vibrační podavače disponují nastavitelnou amplitudou a frekvencí vibrací. Maximální amplituda kmitů je 7 mm a rozsah jejich frekvence je 0-90 Hz. Vibrace mají hladký sinusový průběh, nepoškodí tak během pozicování ani citlivou mikroelektroniku. Při nízkých frekvencích jsou díly náhodně otáčeny a rovnoměrně rozmístěny po odebírací ploše. Při vyšších frekvencích se díly naopak seskupí uprostřed platformy [2]. U rotačně symetrických dílů s těžištěm vychýleným k jednomu konci lze správným nastavením frekvence a amplitudy cíleně dosahovat validní orientace. Vibrace jsou vytvářeny jedním lineárním pohonem, jenž je pomocí kuličkového lineárního vedení propojen s podsvícenou odebírací deskou. Různé nabízené velikosti jsou vyobrazené na obr. 2.

Opálová vibrační deska je zároveň i difuzorem pro vestavěný světelný zdroj, což umožňuje spodní iluminaci odebíraných součástek pro zvýraznění obrysových tvarů. Zadní difúzní podsvícení zjednodušuje kameře správně rozpoznat díly určené k odběru zvýrazněním jejich obrysů. Rozměr odběrové plochy činí 120x150 mm. Tyto vlastnosti by navrhované řešení odběru součástí mělo zachovat. Vibrační deska kromě vibrací disponuje lineárním pohybem ve vertikální ose, jenž usnadní udržování dílů v optimální hladině ostrosti snímací kamery. Lineární posuv desky ve vertikálním směru navíc zajistí neměnnou polohu odebírací roviny pro robotický manipulátor. Výhodou vibračního podavače je jednoduché GUI, ve kterém uživatel rychle nastaví frekvence a amplitudy. AIVE podporuje jednoduchou komunikaci přes digitální I/O či plnohodnotné ovládání přes TCP/IP protokol. Nevýhodou tohoto řešení je vyšší cena (10.000 €) a větší množství elektronických i mechanicky pohyblivých součástek vyžadujících servis.

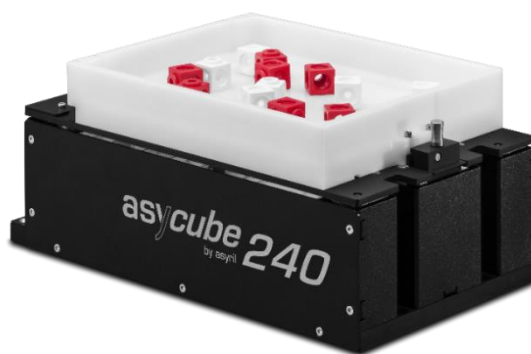
Společnost Opticontrol s.r.o. sídlící v Lelekovicích u Brna je výhradním distributorem vibračních stolů AIVE pro Českou republiku i Slovensko.



Obr. 2: Vibrační stůl AIVE [1]

2.3 Vibrační podavače Asyрил

Vibrační stoly od švýcarské firmy Asyрил SA ilustrované na obr. 3 pracují na podobném principu jako vibrační stoly AIVE. Oproti stolům AIVE ale vytvářejí vibrace ve třech ortogonálních směrech [13]. Vyrábí se velká škála velikostí odebírací platformy a pozicovat lze díly od 0,1 mm do 150 mm, a to včetně těžších kovových odlitků. Další výhodou jsou 4 elektromagnetické generátory vibrací umožňující kromě frekvence a amplitudy nastavit i fázový posuv vibrací. Nicméně neumožňují pohyb desky ve vertikální ose jako lineární pohon u stolu AIVE. Největší výhodou je extrémně snadné propojení s všemi průmyslově rozšířenými roboty i strojovým viděním přes TCP/IP či ModBus. Při použití tohoto stolu je nutné dbát na to, aby robotická ruka při odběru nekolidovala s vibrační deskou. Síla větší než 20 N může způsobit poškození citlivých oscilačních mechanismů. Jedinou nevýhodou je opět cena ve výši 16.000 €.



Obr. 3: Vibrační stůl Asycube 240 [13]

Epson IntelliFlex 240 (IF-240)

Ve spolupráci s firmou Asyрил představil Epson kompletní řešení pro polohování odebíraných dílů, viz obr. 4. Při propojení vibračního stolu Asycube 240 se strojovým viděním Epson CV2 a robotickým manipulátorem Epson SCARA umí IF-240 pracovat s různými materiály a tvary součástek zároveň [26]. Nastavování frekvence, fáze i amplitudy kmitání pro specifické díly probíhá na základě integrované AI. Kamera sleduje, jak díly reagují na vibrace a podle toho upravuje frekvenci, amplitudu i fázový posuv. Chování dílů před a po změně vibračních parametrů je vyhodnoceno neuronovou sítí. Programování robota, kamery i vibračního stolu probíhá jednoduše přes vývojový SW Epson RC+, přičemž komunikace probíhá přes TCP/IP protokol. Největší přínos spočívá v absenci manuálního ladění vibračních parametrů.

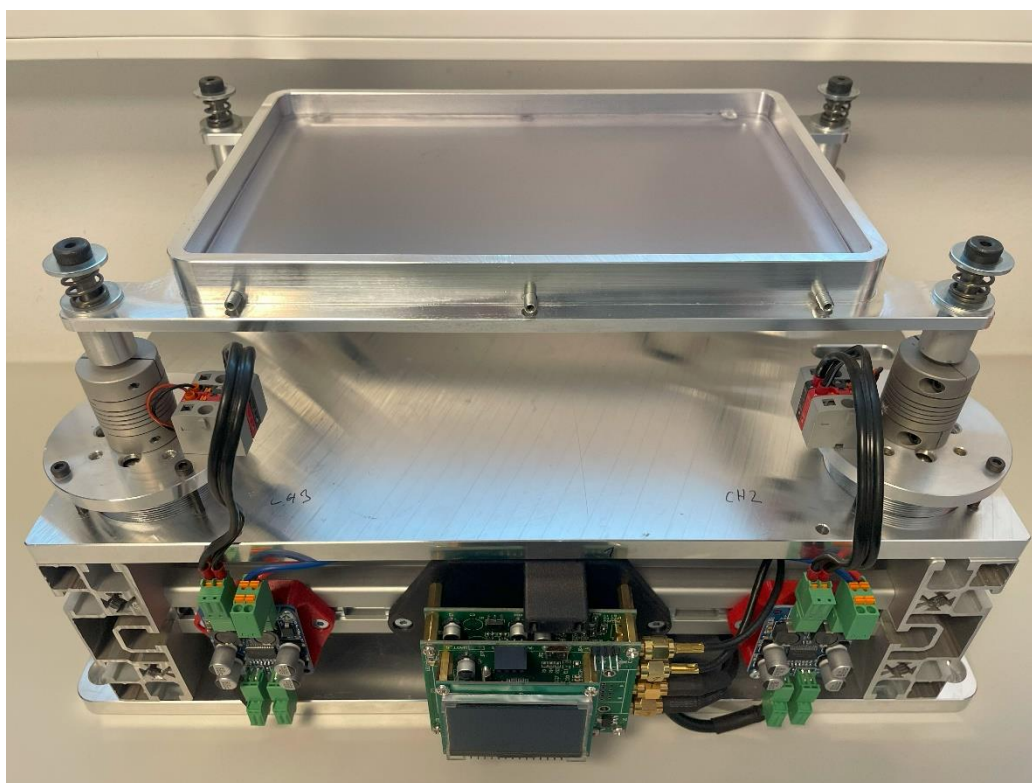


Obr. 4: Epson IntelliFlex [26]

2.4 Vibrační stůl Opticontrol

Prvním prototypem vlastního polohovacího zařízení firmy Opticontrol byl vibrační stůl na bázi reproduktorů. Princip spočíval v generování mechanických vibrací pomocí čtyř rezonančních reproduktorů. Použity byly bez-membránové reproduktory o celkovém výkonu 100 W. Každý reproduktor měl svůj zesilovač i řízení, což umožnilo ovládat amplitudu, frekvenci, ale i fázi kmitání desky. Frekvence mechanických vibrací byla v rozsahu od 20 Hz do 20 KHz. Vibrační deska byla s pohyblivou částí reproduktorů mechanicky spojena pomocí upravených pružných hřídelových spojek. Pod průsvitnou odebírací plochu bylo umístěno i difuzní světlo pro backlight podsvícení.

Celkově se jednalo o úspěšný návrh pozičního zařízení, které obstálo ve zkušebním provozu. V porovnání s konkurencí představilo plně funkční alternativu s výraznou finanční úsporou. Celkové náklady na stavbu zařízení byly do 1000 €. Tyto náklady nezapočítávají osvětlení pro strojové vidění. Jediná nevýhoda tohoto návrhu byla odhalena až při testování v robotické stanici. Po skončení vibrací se deska nevracela přesně do výchozí polohy, což bylo způsobeno právě pružným uložením pomocí hřídelových spojek, které se nachází na obr. 5. Tato jemná vertikální odchylnka měla za následek občasné selhání úchopu při odeírání polohovaných dílů. Robot totiž získává souřadnice X a Y z kamery, nicméně spoléhá na to, že souřadnice v ose Z neboli výška odeírací plochy, se nemění. Toto řešení není momentálně vyvíjeno, nicméně integrací přidavných pružin mezi základovou desku a vibrační plošinu by se dalo do jisté míry zamezit vzniku vertikální odchylny po generaci vibrací.

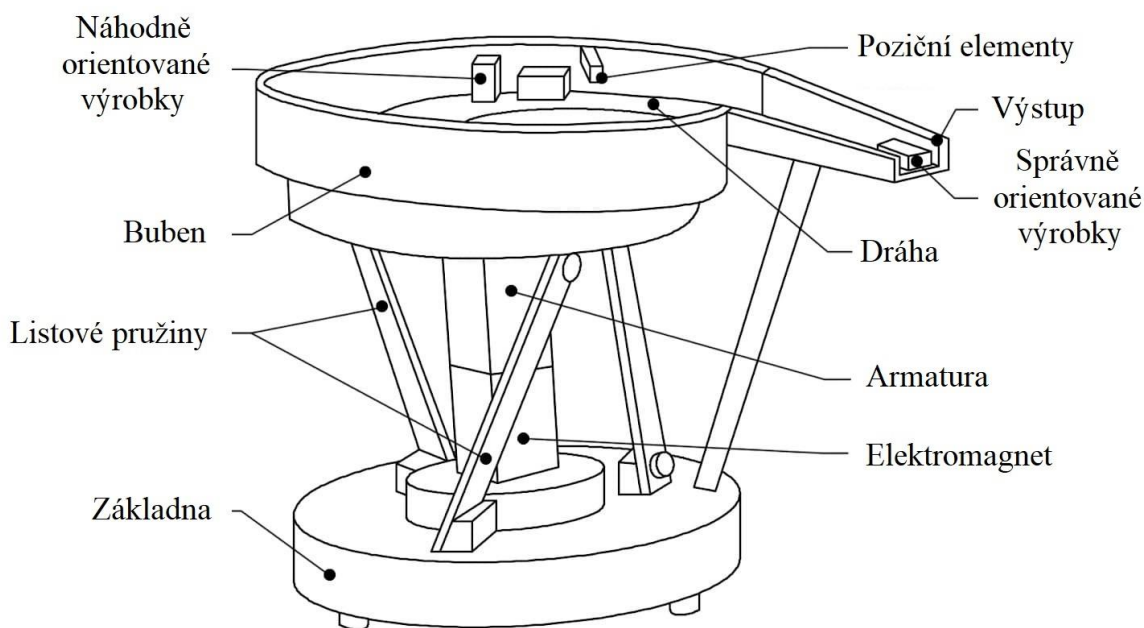


Obr. 5: Prototyp vibračního stolu firmy Opticontrol s.r.o.

2.5 Vibrační bubnový zásobník

Kruhový vibrační zásobník je standartně užívaný stroj v průmyslových výrobních linkách pro podávání a řazení součástek dle požadované orientace. Nejčastěji nacházejí využití při podávání spojovacího materiálu, léků nebo zrnitých potravin. Nejsou tak vhodné pro manipulaci s drobnou a citlivou elektronikou jako vibrační stoly z předchozích podkapitol. Vibrace jsou generované elektromagnetickými impulzy. Elektromagnet je pevně spojen se základnou ukotvenou do země a elektromagnetickými pulzy působí na magnetickou armaturu. Obr. 6 ilustruje upevnění armatury. Buben je uchycen na listových pružinách, umožňujících jeho kmitání na definované frekvenci. Tato frekvence je závislá na frekvenci střídavého proudu procházejícího cívkou. Ovládá se pomocí frekvenčního měniče. Amplituda kmitů je závislá na tuhosti listových pružin. Nelze uživatelem jednoduše měnit. Vibrace posouvají výrobky vzhůru po šroubovitě dráze připevněné k bubnu. Pro každou aplikaci je třeba vibrační bubnový zásobník upravit. Dráha, jež je součástí bubnu, musí přesně odpovídat rozměrům součástek, aby se vibracemi mohly posouvat vzhůru po šroubovitě trajektorii.

Před výstupním kanálem je třeba navrhnout elementy, které způsobí spadnutí nesprávně orientovaných součástí zpět do bubnu. Tyto elementy mohou být aktivní nebo pasivní. Mezi aktivní se řadí vzduchová tryska ovládaná výstupem z kamery s implementovaným strojovým viděním či jiného optického čidla [6]. Příkladem pasivního prvku je čep srážející nesprávně orientované výrobky. Výhodou tohoto řešení je spolehlivost a nižší cena (5000 €) oproti ostatním dostupným řešením. Nevýhodou je zakázková konstrukce přizpůsobená odebíraným součástkám a nemožnost regulovat amplitudu kmitů nezávisle na jejich frekvenci.

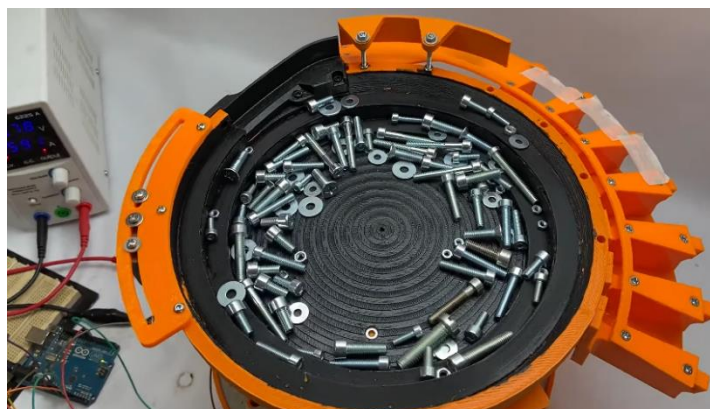


Obr. 6: Stavba vibračního bubnového podavače [6]

2.6 Open-source vibrační bubnový zásobník

Vzniklo také několik vibračních bubnových podavačů vyrobených 3D tiskem. Aditivní výroba nachází čím dál větší uplatnění v průmyslu. Od nejrůznějších držáků na ofukování dílů, úchytů kamer, až po chapadla na robota. Princip funkce zásobníku je identický jako u průmyslových bubnových podavačů. Jednou z nevýhod 3D tisku je nedostatečná pevnost materiálu. Proto základna, v níž je uchycen elektromagnet, byla vylitá betonem, aby se předešlo degradaci materiálu mechanickými vibracemi. Dalším nedostatkem výrobní metody je zanechaná tisková stopa z postupného nanášení materiálu po vrstvách. Z toho důvodu byla šroubovitá trajektorie v bubnu pokryta tenkou gumou, která mimo jiné zvýšila tření a zabránila zpětnému sklouzávání dílů zpět do bubnu [14]. Elektromagnet napájený napětím 24 V byl ovládán přes Arduino. Pouhé zapínání a vypínání elektromagnetu vyústilo v chaotické vibrace bez posunu součástek po šroubové dráze, průběh napětí na cívice musel být sinusový.

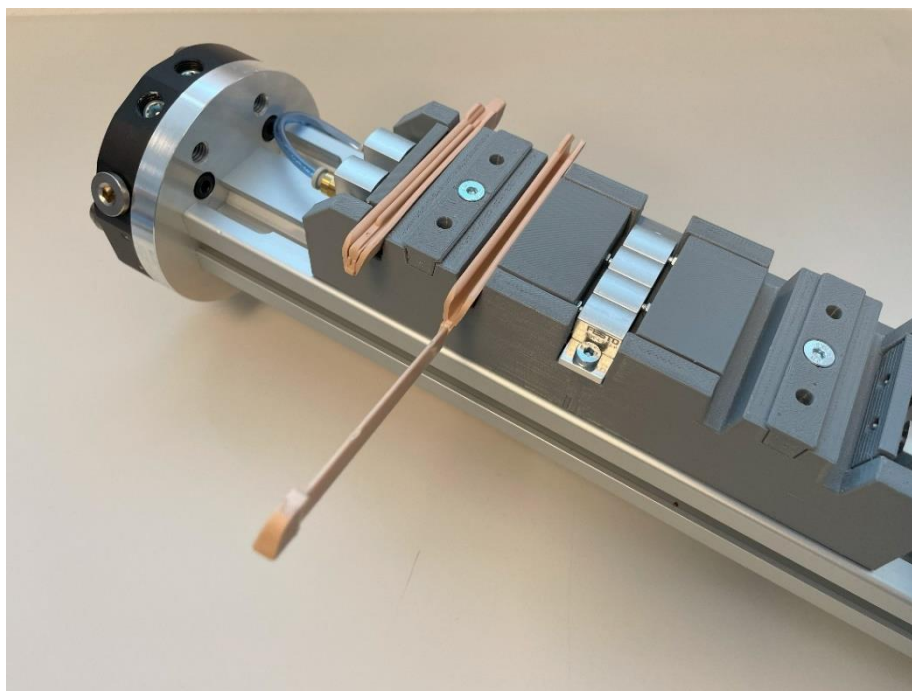
Dokončený prototyp na obr. 7 se prokázal funkčním při úspěšném třídění šroubů, matic i podložek. Díky využití 3D tisku a volné dostupnosti CAD modelů si kdokoli může tento vibrační podavač vyrobit za zlomek ceny komerčně dostupných řešení.



Obr. 7: Vibrační bubnový podavač vyrobený 3D tiskem [14]

2.7 Aditivní výroba

3D tisk se nemusí používat jen pro výrobu open-source modelů. Již roky nachází využití při výrobě dílů do robotických linek. Jedna z iniciačních myšlenek této práce vznikla při úspěšné aplikaci tisknutých rozvodních bloků pro vzduch do robotické linky. Na koncový efektor robota bylo potřeba rozmístit větší množství miniaturních vzduchových pístů. Tyto písty zajistily odběr plastových svorek ze vstřikovacího lisu. Kotevní blok byl jeden celek, uvnitř kterého bylo soustavou kanálků zajištěno propojení všech pístků s centrálním přívodem stlačeného vzduchu. Druhá soustava kanálků sloužila k odfuku stlačeného vzduchu při zasouvání jednočinných pístků. Výroba i aplikace tohoto bloku byla časově i finančně mnohem úspornější, než kdyby se tyto rozvodné kanálky frézovaly do jednotlivých destiček a ty se šroubovaly na sebe. Výsledné chapadlo je na obr. 8 a již několik měsíců úspěšně funguje ve firmě Carclo v Brně.



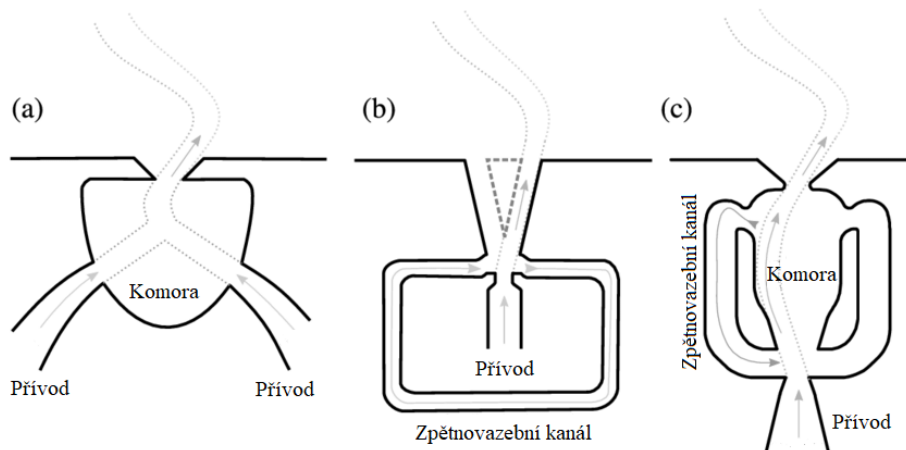
Obr. 8: Robotické chapadlo pro odběr plastových svorek

2.8 Fluidní oscilátor

Pro otáčení dílů v navrhovaném řešení je nejvhodnější prvek fluidní oscilační tryska, protože dokáže generovat tlakové pulzace a víry. Pojmy fluidní tryska, fluidní oscilátor i oscilační tryska jsou synonyma. Dnes jsou fluidní trysky rozšířeným a spolehlivým prvkem. Uplatňují se pro ostříkání čelního skla u automobilů, měření průtoku kapalin i plynů nebo při rozstříkání pesticidů. Mezi hlavní přednosti tohoto řešení se řadí absence mechanicky pohyblivých součástí a jednoduchá konstrukce. Generace kmitů výstupního paprsku probíhá na základě vnitřní geometrie fluidické trysky. V závislosti na velikosti trysky a průtoku lze generovat kmitání o frekvencích 10 Hz až 22 kHz [7]. Další předností je rozvoj FDM aditivní výroby umožňující výrobu navrhovaného fluidního prvku jako celku. CNC stroj totiž nedokáže do jednoho kusu materiálu obrobít všechny potřebné fluidní kanálky. Díky 3D tisku odpadá nutnost vrstvení obroběných destiček na sebe, jako tomu bylo dříve u fluidických prvků či logických obvodů [4]. Tyto fluidní obvody byly náročné a drahé na výrobu, navíc byla jejich životnost omezená gumovým těsněním umístěným mezi jednotlivé destičky.

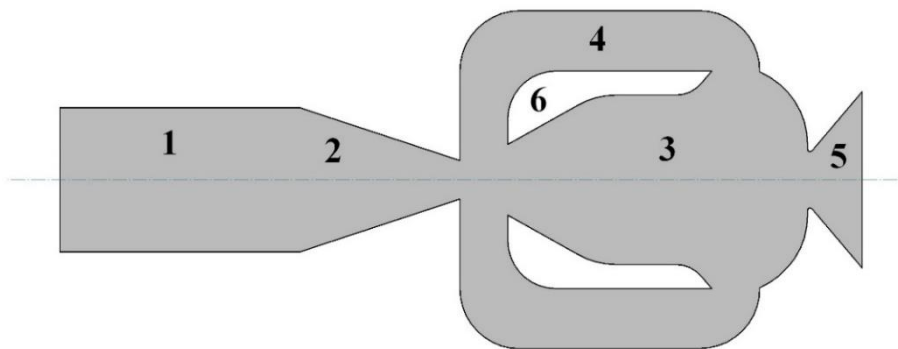
Fluidní oscilátory prochází neustálým vývojem již od roku 1960, kdy byly poprvé uvedeny na trh. Fluidické trysky vykazují podobné chování pro kapaliny i plyny. Momentální trend studuje jejich funkčnost zejména pro ovládání vzduchového proudění. Využití tak nachází v aerodynamice či termodynamice. Použití oscilačních trysek pro polohování objektů v robotických pick and place aplikacích je zcela nový a inovativní způsob jejich uplatnění.

Je několik typů fluidních oscilátorů lišících se svou geometrií i vlastnostmi [16]. Příklady všech typů ilustruje obr. 9. Nezpětnovazební oscilátor (a) se skládá pouze z mixážní komory a dvou samostatných přívodů kapaliny. Dvě separátní vstupní proudění se sráží pod úhlem. Sřetením dvou proudění na jejich hranici vzniká silně nestabilní smyková vrstva. Tato nestabilita způsobí pravidelné kmitání výstupního proudění.



Obr. 9: Typy fluidikových oscilačních trysek [16]

Druhým typem je oscilační tryska se zpětnou vazbou (b). Přilnutí výstupního proudění k jedné ze stěn výstupního otvoru generuje podtlak ve zpětnovazebním kanálku. Vzniklý podtlak vychýlí výstupní paprsek na druhou stranu. Kmitavé vlastnosti jsou tak ovlivněné čistě geometrií zpětné vazby. Vložení děliče do výstupu získáme dva diskrétně přerušované paprsky proudění. Dělič výstupu se dá užít v každém typu oscilátoru. Standartní výstupní otvor pak produkuje spojitě výstupní proudění.



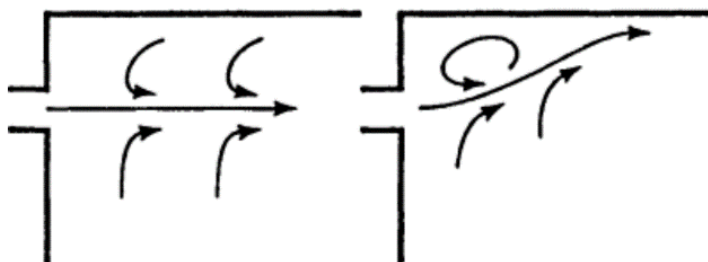
Obr. 10: Tryska se dvěma zpětnovazebními kanálky

Podrobná stavba fluidní oscilační trysky se dvěma zpětnovazebními kanálky (c) je na obr. 10. Tato tryska sice nepředstavuje nejjednodušší možné řešení, nicméně je nejpokročilejší a má také nejlepší vlastnosti pro tuto aplikaci. Kmitavé chování je založeno na vytvoření nestability proudění ve vstupním difuzoru (2). Musí platit, že průřez užšího konce vstupního difuzoru je menší než plocha vstupního otvoru do oscilační komory [3]. Vzniklé nestabilní laminární proudění díky Coanda efektu přilne k jedné ze stěn (6) v oscilační komoře (3). Část tohoto proudění se vrací jedním ze dvou zpětných kanálků (4), což vychýlí hlavní paprsek proudění a ten přilne k protější stěně oscilační

komory. Tento děj se periodicky opakuje a jeho frekvence závisí na průtoku přívodním kanálkem (1) a celkové geometrii trysky. Disperze a dosah výstupního proudění je závislý na úhlu rozevření výstupního otvoru (5).

2.8.1 Coanda efekt

Hlavním principem funkce oscilační trysky je Coanda efekt objevený rumunským průkopníkem aerodynamiky, Henrym Coandou. Říká, že proudění vždy přilne ke konvexním povrchům v blízkosti tohoto proudění. Děje se tak proto, že rychle proudící vzduch kolem sebe vytváří oblast nízkého tlaku a vtahuje tedy okolní vzduch do proudění. Pokud je ale v blízkosti stěna, není zde žádný vzduch, který by mohl kompenzovat vzniklý podtlak, a tento podtlak vtáhne proudění směrem ke stěně, viz obr. 11. [10]. Trajektorie proudění pak následuje konvexní povrch, dokud tento povrch neskončí nebo úhel zakřivení nepřesáhne kritickou mez. U oscilační trysky proudění přilne ke konvexní stěně uvnitř oscilační komory a setrvá přilnuté, dokud není vychýlené prouděním ze zpětnovazebního kanálku k protější konvexní stěně.



Obr. 11: Princip Coanda efektu

2.8.2 Synchronizace více fluidních trysek

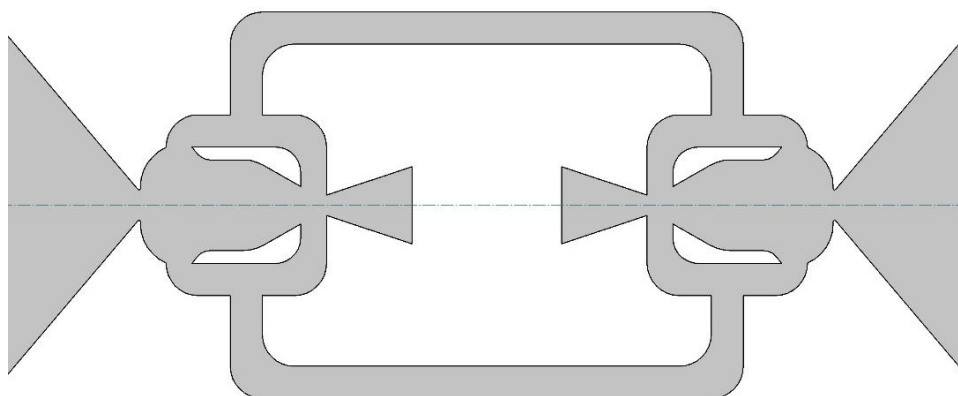
V momentu, kdy do trysky začíná proudit stlačený vzduch, záleží zcela na náhodě, k jaké stěně oscilační komory bude paprsek proudění směřovat jako první. Jelikož v navrhovaném řešení bude užito vícero oscilačních trysek, není zaručeno, že při otevření centrálního přívodu vzduchu dorazí proudění ke všem tryskám ve stejný moment. Trysky tedy mohou začít kmitat v jiný čas, navíc i v jiném směru. Pokud sousední trysky budou vůči sobě fázově posunuté, výsledné proudění a tvořené víry by se vzájemně oslabovaly, nikoliv posilovaly. Pro zamezení tohoto nežádoucího chování je třeba zajistit, aby všechny trysky napojené na centrální přívod vzduchu kmitaly synchronně a nedocházelo mezi nimi k fázovému posunu.

Poprvé na problém synchronizace narazil výzkum firem Boeing a NASA [9]. Ve výzkumu bylo integrováno 32 fluidních oscilátorů do směrového kormidla letounu Boeing 757. Vzduch proudící z těchto trysek po povrchu směrového křídla zamezoval odtržení laminárního proudění od povrchu směrovky a následný vznik turbulentního proudění. Tímto bylo dosaženo lepší účinnosti směrovky, jelikož při zatočení dojde k většímu silovému působení od laminárního proudění a směrové křídlo tak může mít menší rozměry, což redukuje spotřebu paliva. Výsledky měření ve větrném tunelu se ale

diametrálně lišily pokus od pokusu. Tento fenomén byl způsoben právě absencí synchronizačního elementu. To způsobilo, že pokud byly sousední trysky zrovna v protifázi, výsledné proudění se vzájemně tlumilo a nepodporovalo tedy požadované laminární proudění v dostatečné míře.

Frekvence i fáze kmitů jsou závislé na průtoku média ve zpětných kanálcích. Průtok přívodním kanálkem bude ve všech tryskách stejný. Výzkum Ohio State University [8] prokázal, že při propojení zpětných kanálků sousedních trysek dojde k jejich synchronizaci. Proudění v těchto kanálcích funguje jako zpětná vazba a způsobuje vychýlení hlavního výstupního proudění. Propojením zpětných kanálků dle obr. 12 zajistíme synchronizaci proudění ve zpětných kanálcích a tím i v celých tryskách.

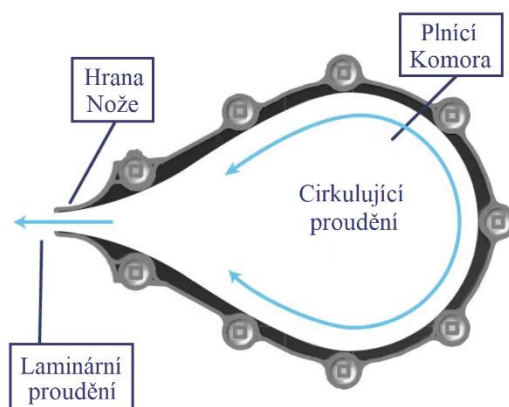
Nicméně je třeba konstatovat, že během výzkumu Ohio State University [8] měly trysky jeden společný přívod stlačeného vzduchu a synchronizační kanálky tak byly poměrně krátké. Trysky v této aplikaci budou mít separátní přívody vzduchu a taky od sebe budou více vzdálené, takže i synchronizační kanálky budou delší. Správná funkce při geometrickém rozložení trysek dle obr. 12 bude ještě před vytvářením 3D modelů validována pomocí CFD simulace.



Obr. 12: Synchronizované fluidní oscilační trysky

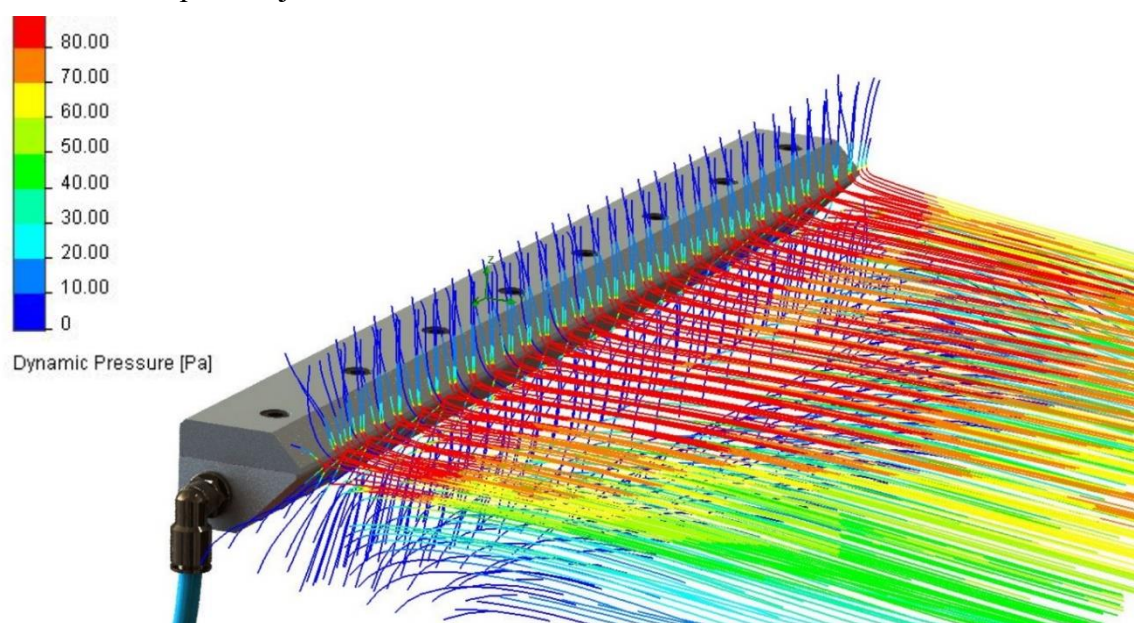
2.9 Vzduchový nůž

Vzduchové nože našly uplatnění v průmyslové výrobě již od roku 1950, zejména v textilním a tiskařském odvětví, a to k ofukování výrobků od nečistot. Odebírané součástky ve výrobních linkách často padají ze skluzů nebo dopravníků náhodně orientované. Bude je tedy potřeba seskupit doprostřed odebírací plochy, aby poté mohlo dojít k jejich rozvíření uvnitř prstence s oscilačními tryskami. Po obvodu odebíracího místa proto bude umístěn vzduchový nůž, jenž bude integrovaný do bočnice. Výstupní otvor bude umístěn co nejbližší podložce, aby laminární proudění z nože dokázalo působit i na ploché, tenké díly. Vzduchové nože se separátními přívody vzduchu zároveň budou umožňovat plynulý přesun odebíraných dílů k jakékoliv hraně odebírací desky, podobně jako to umožňuje vibrační stůl Asyryl Asycube 240. Výhodou vzduchových nožů je absence pohybujících se součástí a nízká cena. Nevýhodou naopak je vysoká spotřeba vzduchu, a to zejména v aplikacích vyžadujících neustálý ofuk.



Obr. 13: Řez vzduchovým nožem [15]

Vzduchový nůž má velmi jednoduchý princip a je hojně využíván k čištění výrobních povrchů a výrobků od prachu, chlazení, nebo sušení výrobků od kapalin. Stlačený vzduch je přiveden do plnicí komory. Komoru poté opustí velmi úzkým a dlouhým otvorem, tak aby došlo k vytvoření silného a stabilního laminárního proudění vzduchu v rovině otvoru. Laminární tok vzduchu má dlouhý dosah a velkou rychlost i sílu. Výstupní proudění se navíc často urychluje tím, že obsah přívodního potrubí je větší než obdélníková plocha, kterou proudí stlačený vzduch ven. Nůž má pak funkci objemového zesilovače. Průmyslové vzduchové nože často mají vyústění ve tvaru kapky, jako na obr. 13. Tento tvar způsobí, že výstupní laminární proudění kolem sebe díky Coanda efektu tvoří oblast nízkého gradientu tlaku. Podtlak v okolí proudění strhne nehybný vzduch v blízkosti výstupního otvoru, a tento vzduch se stane součástí výstupního proudění [15]. Tento jev je ilustrován pomocí CFD na obr. 14. Díky přisávání okolního vzduchu dojde k nárůstu průtoku v laminárním proudění nože až 10x [5] oproti průtoku v přívodním kanálu. U průmyslových nožů se síla proudění reguluje tloušťkou výstupní štěrbiny. Hlavním dodavatelem pro ČR je firma MOS Technik s.r.o.



Obr. 14: Simulace laminárního proudění ze vzduchového nože [15]

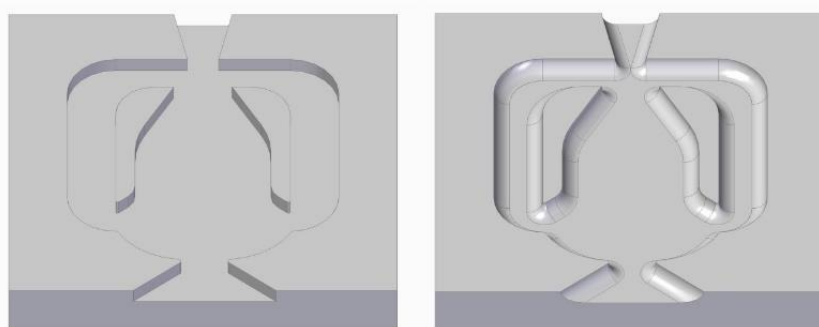
3 NÁVRH FLUIDNÍCH PRVKŮ

Druhá část diplomové práce se věnuje návrhu fluidikových elementů, jež mají nahradit komerční řešení probraná v kapitole 2. Jako první byl při návrhu řešen prvek s fluidními oscilačními tryskami. Na základě vědeckých prací [3,11] o fluidických oscilátorech byl vytvořen 3D model jedné fluidní trysky. Model byl potom upravován podle výsledků CFD simulací a výrobních omezení FDM. Následně byl řešen problém geometrického rozmístění více trysek pro co nejefektivnější víření odebíraných objektů. Navrhnuta a simulována byla i synchronizace trysek, ještě před jejím zakomponováním do 3D modelu prstence. Dále byl stejným postupem navrhnut a otestován vzduchový nůž. Po dokončení modelů těchto klíčových prvků se pokračovalo celkovým návrhem modelu robotické stanice.

3.1 První model oscilační trysky

Pomocí informací získaných z knižních i vědeckých zdrojů byl v prostředí Solid Edge navrhnut první 3D model fluidického oscilátoru. Modelování geometrie trysky proběhlo na základě výzkumu o modifikacích vnitřních rozměrů oscilační trysky se dvěma zpětnými kanálky [17]. Hlavní požadavek byl na co možná největší sílu, tlak a vířivost výstupního proudění z trysky.

Velkou překážkou pro aditivní výrobu jsou plochy, pod kterými není žádný materiál, tzv. mosty. Na těchto plochách dochází k extruzi roztaveného filamentu do volného prostoru, což často vede k tiskovým chybám. Vzhledem k faktu, že tryska i nůž obsahují vnitřní struktury, nelze tam tiskové podpory použít. Tyto podpory by se nedaly z hotového výrobku odstranit. Při tvorbě mostů může dojít k deformaci přidávaného materiálu i jeho okolí. Tyto deviace by negativně ovlivnily proudění vzduchu, u vzduchového nože by došlo i k jeho částečnému ucpání. Proto byla geometrie vnitřních hran upravená zaoblením, jak je vidět na obr. 15. Po výrobě zaobleného prototypu a provedení kontrolního řezu bylo zjištěno, že tato modifikace zamezila vzniku výrobních defektů, aniž by negativně ovlivnila proudění. Zásah této modifikace do proudění byl testován pomocí SW pro simulaci proudění Ansys Fluent. Dynamické chování trysky zůstalo nezměněno.



Obr. 15: Modifikace vnitřních stěn zaoblením hran. Původní stav vlevo

3.2 Simulace proudění

Pro simulaci proudění v oscilační trysce a vzduchovém noži bylo užito CFD programu ANSYS Fluent. Tento program pro výpočty proudění využívá metodu kontrolních objemů. Základem kontrolních objemů jsou numerické výpočetní metody pro řešení Navier – Stokesovy rovnice (3.1) a rovnice kontinuity (3.2) [3].

$$\frac{d\vec{v}}{dt} + \vec{v} \cdot \text{grad } \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \cdot \text{grad } \vec{p} + \nu \cdot \Delta \vec{v} + \vec{a} \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial \vec{v}_x}{\partial x} + \frac{\partial \vec{v}_y}{\partial y} + \frac{\partial \vec{v}_z}{\partial z} = 0 \quad (3.2)$$

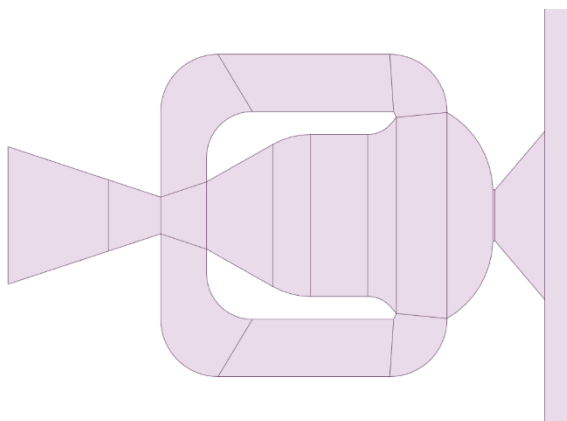
Navier – Stokesova rovnice vyjadřuje proudění viskózní kapaliny a je odvozena z II. Newtonova zákona. První člen rovnice (3.1) vyjadřuje lokální zrychlení, $\vec{v} \cdot \text{grad } \vec{v}$ je konvektivní zrychlení od setrvačných sil, ρ je hustota proudící kapaliny, $\text{grad } \vec{p}$ je zrychlení od tlakových sil, ν vyjadřuje zrychlení od viskózních sil, Δ je Laplaceův operátor, \vec{v} vyjadřuje rychlostní pole proudění a \vec{a} zastává zrychlení od hmotnostních sil v kapalině. V rovnici (3.2) parciální derivace vyjadřuje divergenci rychlostního pole proudění. Pro výpočet laminárního proudění kapaliny slouží rovnice (3.1) a (3.2). Výpočet turbulentního proudění vychází z SST K- ω modelu integrovaného ve Fluentu.

Nejprve bylo ověřeno, že rozdíl mezi dvoudimenzionálním a 3D výpočtem ve frekvenci kmitání je 2 Hz. Chování proudění uvnitř trysky bylo ekvivalentní pro oba modely. Naopak čas potřebný pro 3D simulaci byl 5x delší. Z těchto důvodů byl pro dosažení uspokojivých výsledků v přijatelném výpočtovém čase zvolen výpočet ve 2D.

3.2.1 Postup řešení úlohy

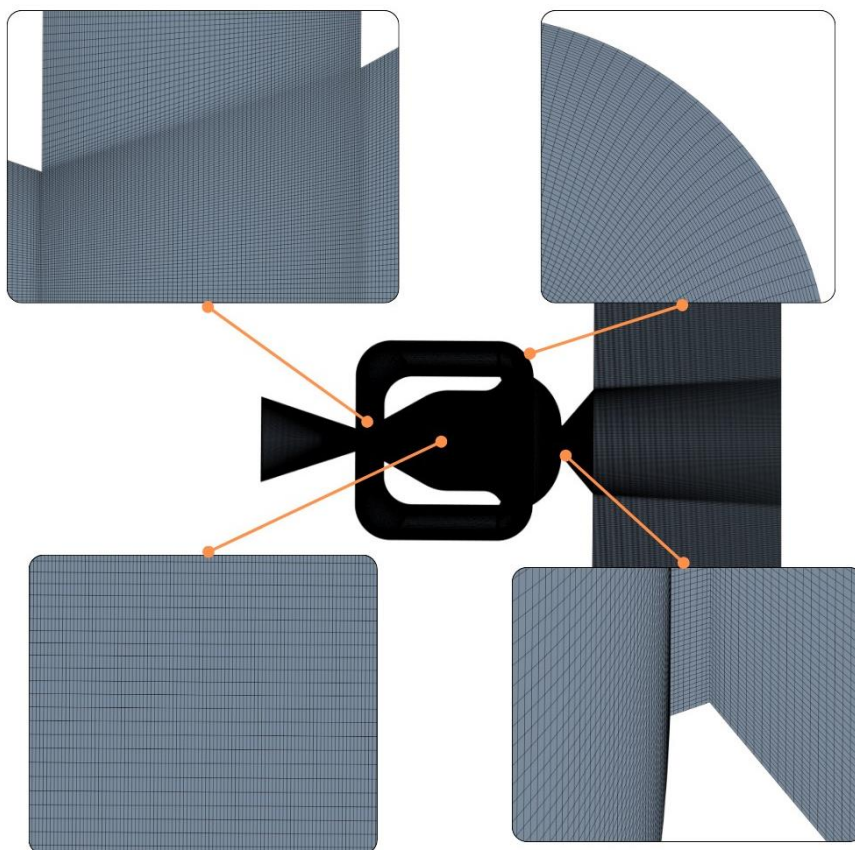
- 1) Rozdělení spojitého prostoru uvnitř trysky na konečný počet kontrolních objemů a výpočetních uzlů. Diskretizace prostoru se provádí tvorbou sítě s výpočetními uzly. Na výběr je mnoho typů sítí, v tomto případě byla zvolena jako nejefektivnější strukturovaná čtyřstěnná síť. Studentská licence umožňuje provádět výpočty na sítích do 1 milionu uzlů.
- 2) V samotném procesoru neboli Fluentu se specifikovaly okrajové a počáteční podmínky numerického výpočtu proudění. Byl zvolen typ proudění a vlastnosti proudícího média a jeho okolí. Dále se určily výpočetní modely proudění, relaxační parametry a časové omezení řešených rovnic. Velikost časového kroku byla pro plynulost animace zvolena 500 μ s. Výpočet proběhl v 5000 diskrétních časových okamžicích, což v reálném čase odpovídá 2,5 s. Průměrná délka jedné simulace na standartním kancelářském PC byla 40 h.
- 3) V post procesoru po skončení výpočtů proběhla extrakce dat i export obrázků a animací. Sledovanými veličinami byly rychlostní pole proudění, tlakové pole a vorticity, neboli vířivost.

3.3 Proudění fluidní tryskou



Obr. 16: Rozdělení komplexního povrchu trysky na plochy

Z fyzikálního hlediska se jedná o problém proudění stlačeného vzduchu tryskou a chování proudění po vyústění z výstupu trysky. Diskretizace prostoru trysky byla provedena vytvořením detailní sítě s 908 602 uzly. Síť vyžaduje pečlivé zpracování, jelikož má velký vliv na přesnost a stabilitu výpočtu. Celkový povrch trysky byl rozdělen na množství menších ploch v programu Ansys SpaceClaim. Každá plocha obsahovala 2 dvojice protilehlých hran, viz obr. 16. Důležitým faktorem pro tvorbu kvalitní sítě je, aby dvě protilehlé hrany měly vždy stejný počet kontrolních objemů. To zaručí bezchybné spojení všech menších ploch v jeden kompaktní celek a stabilní výpočet. Výsledkem je pak strukturovaná čtyřstěnná síť na obr. 17, jež garantuje kvalitní výpočet proudění.

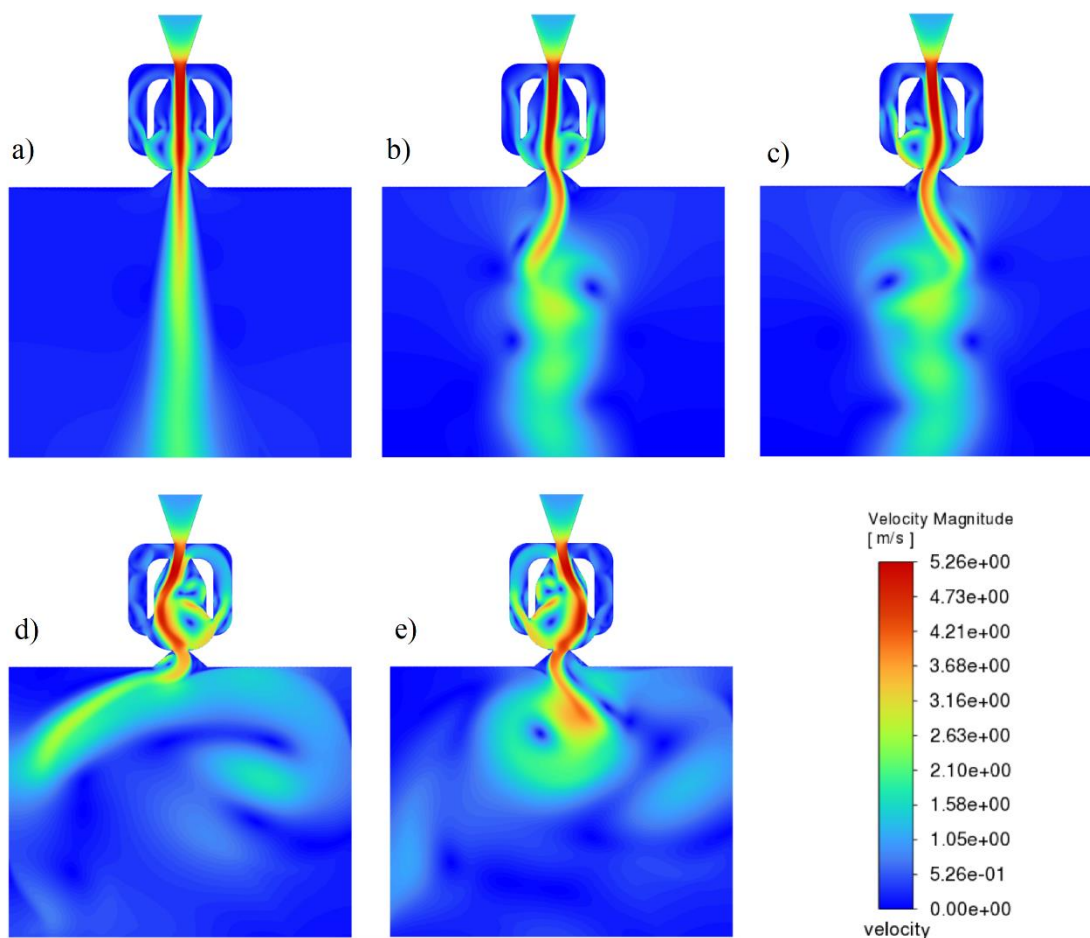


Obr. 17: Strukturovaná výpočetní síť

Fyzikální podmínky výpočtu jsou interpretovány pomocí okrajových podmínek a počátečních podmínek. Hodnota tlaku na vstupu trysky činila 600 kPa. Ve většině průmyslových provozů jsou rozvodní sítě stlačeného vzduchu tlakovány na 6 až 7 bar. Na výstupu trysky byl tlak atmosférický, tedy 101 kPa.

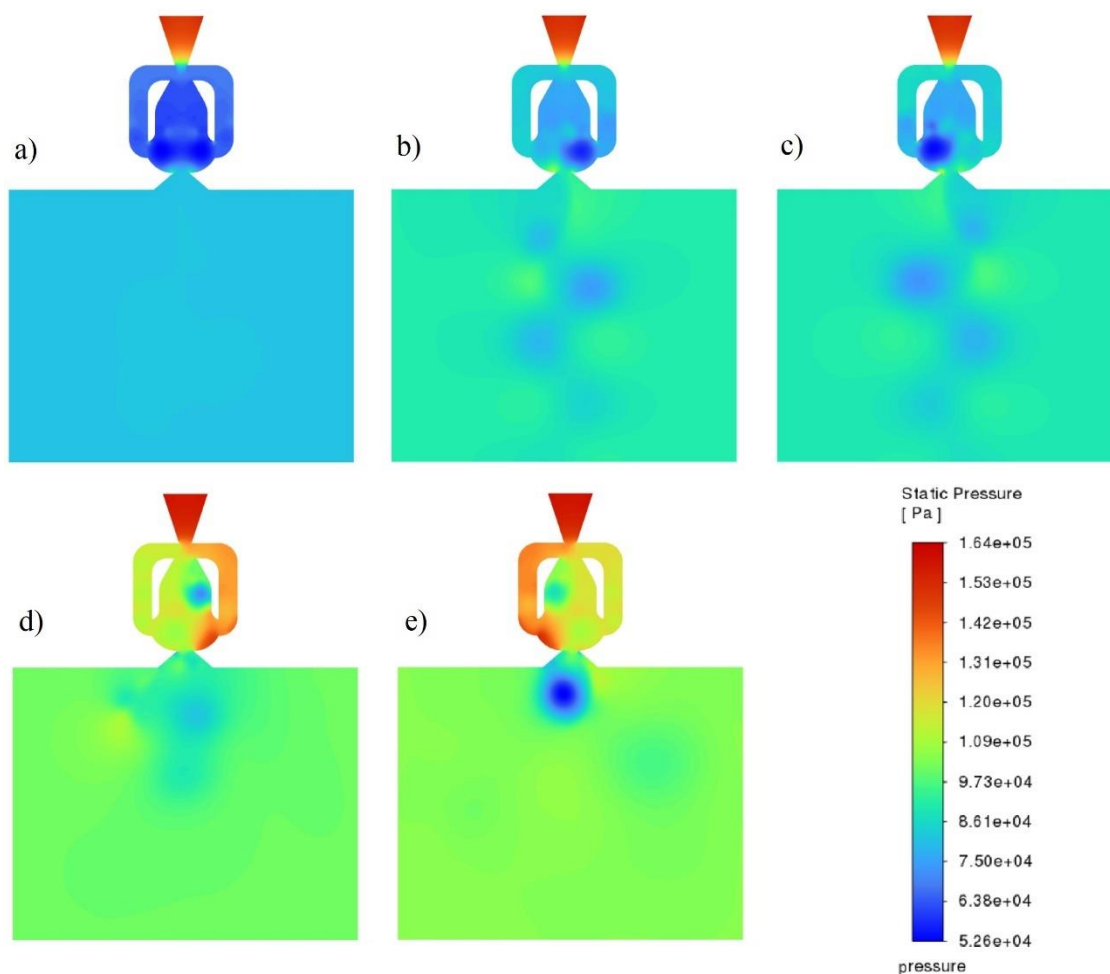
$$Q = \vec{v} \cdot S \quad (3.3)$$

Vstupní rychlost proudění do trysky byla stanovena výpočtem na 2 ms^{-1} . Výpočet vycházel z jednoduchého tvaru rovnice kontinuity (3.3), kde Q je průtok, \vec{v} je rychlost proudění a S vyjadřuje průřez přívodní hadice. Průtok přívodní hadicí byl změřen digitálním snímačem průtoku SMC PF2MC7 a rychlost proudění dopočítána. Průtok nicméně nehraje pro výpočet nijak zásadní roli. S narůstajícím průtokem se zvyšuje síla výstupního proudění i frekvence jeho kmitání. Oscilační charakter trysky je dán její geometrií a rozsah frekvencí při kterých navrhnutá tryska správně vykonává funkci je od 30 Hz až do řádu kHz. Pomocí škrtících ventilů bude probíhat regulace síly proudění uvnitř prstence. Proto se i vstupní rychlost u jednotlivých simulací mohla lišit. Pro víření objemnějších plastových výlisků bude potřeba nastavit jinou sílu proudění než pro drobné mikročipy. Proto se přívodní průtok musí nastavit jinak pro každou aplikaci. Zejména při víření drobných dílů by pak mohlo při vysokém průtoku dojít k jejich poškození.



Obr. 18: CFD simulace rychlostního pole proudění

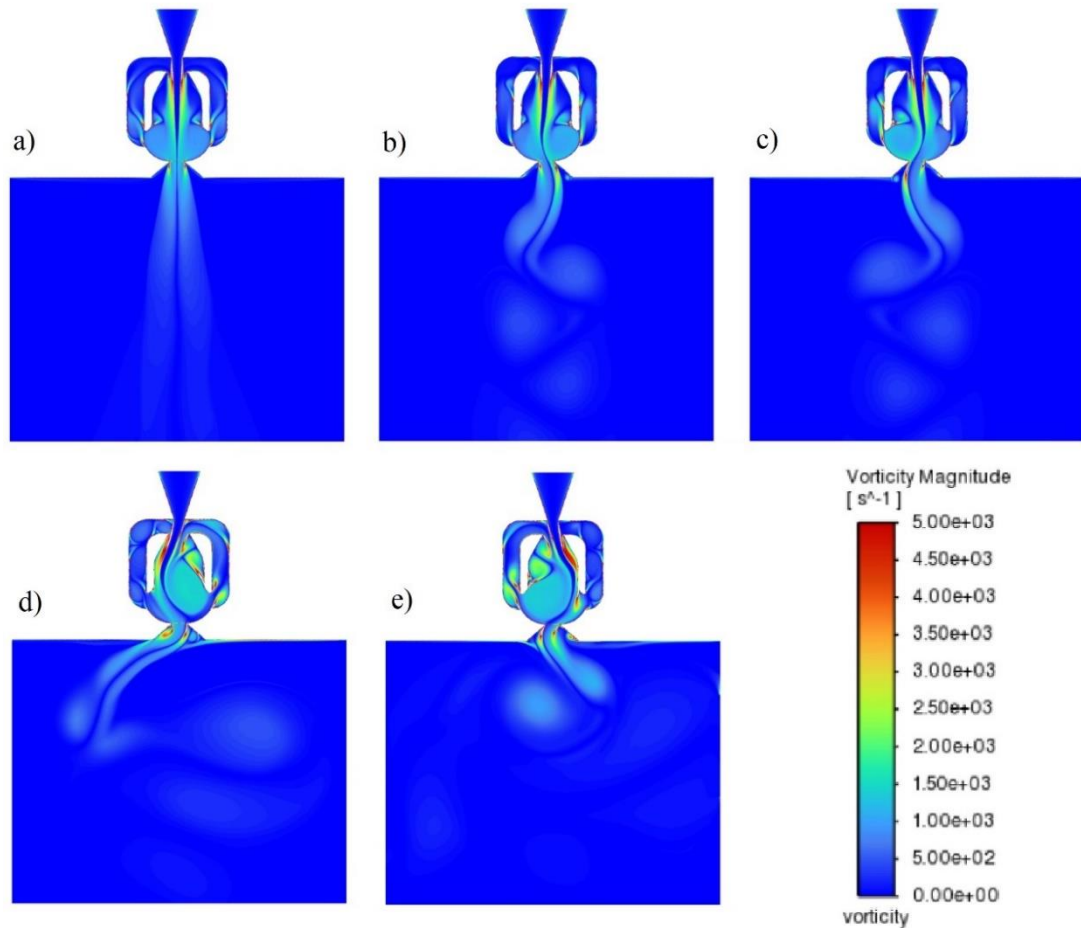
Výsledky simulace rychlostního proudění tryskou lze vidět na obrázku 18. Tryska s navrhovanou geometrií tak vykazuje očekávanou funkci. Fáze a) nastává 30 ms po iniciaci proudění do trysky. V proudění zatím nevznikla žádná nestabilita, jež by ho vychýlila. 100 ms od začátku proudění pak nastává situace b) a c), kde lze pozorovat postupné rozkmitávání proudění vznikem nestability ve vstupním difuzoru. Po 180 ms ve fázi d) a e) došlo k ustálení kmitání hlavního paprsku mezi pravou a levou stěnou oscilační komory. Frekvence kmitání zde byla 76 Hz. Doba rozběhu trysky činí zhruba 0,2 sekundy. Při dostatečném omezení vstupního průtoku do trysky lze docílit, že k ustálení kmitání dojde už ve fázi b) a c). Výstupní proudění pak ale bude mít mnohem menší rozptyl a nebude tvořit silné víry.



Obr. 19: Tlakové pole proudění

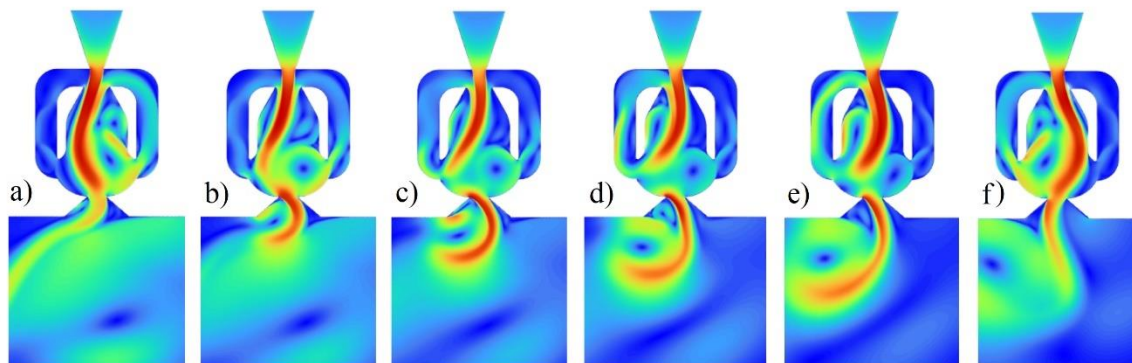
Obrázek 19 ilustruje tlakové pole proudění. Je zde vidět korelace s rychlostním polem i vorticitou. Ve výstupní oblasti se nachází body nízkého tlaku, kde je vždy i střed vířivého proudění. V situaci e) je oblast nízkého tlaku natolik silná, že do víru vtahuje i výstupní proudění z trysky. Lze si však povšimnout, že oblast nízkého tlaku v situaci e) je blíže otvoru trysky, než je tomu u rychlostního pole. Je to způsobeno drobným fázovým posuvem mezi snímky tlakového a rychlostního pole proudění. Důvodem tohoto posuvu je, že tlaková špička ve zpětném kanálku nenastává v ten samý moment, kdy je v něm nejvyšší rychlost proudění. Ilustrovány jsou tedy vždy krajní meze dané veličiny v momentálně probíhajícímu cyklu.

Poslední simulovaná veličina na obr. 20 je vorticitata, neboli vířivost. Vířivost vyjadřuje míru lokální rotace v proudícím médiu. Obecně známým prouděním s vysokou vorticitou je například tornádo. Nejsilnější víry vznikají právě uvnitř trysky, kde proudění naráží do jejích stěn a rotuje v recirkulačních bublinách. Zájmové jsou však až víry za výstupem z oscilační trysky. Pro navrhovanou aplikaci je chtěná co největší vorticitata ve výstupním proudění. Polohování dílů bude zajišťováno jejich vířením uvnitř prstence.



Obr. 20: Vorticitata proudění

Pro lepší porozumění chování oscilačních trysek a jejich synchronizace je důležité porozumět jednotlivým fázím tohoto periodického děje [11]. Na obr. 21 je pomocí simulace rychlostního proudění ilustrována fáze kmitání $\Phi = 0^\circ$ až $\Phi = 180^\circ$.



Obr. 21: Ilustrace 1/2 periody oscilačního proudění v trysce

a) Proudění je díky Coanda efektu maximálně přilnuté k levé straně oscilační komory. K levé stěně bylo proudění vychýleno stále přítomnou recirkulační bublinou v pravé části oscilační komory. Majorita proudění míří výstupním otvorem ven z trysky, ale část se stále vrací pravým zpětným kanálkem zpět ke vstupnímu difuzoru. Zde se vtlačí pod hlavní paprsek a proudí zpět do recirkulační bubliny. Lze pozorovat rozptylující se výtrysk výstupního proudění levým směrem.

b) Pravá recirkulační bublina začíná zanikat a disipuje do pravého zpětného kanálku. Zároveň dochází k iniciaci proudění do levého zpětného kanálku. Začíná se tvořit levá recirkulační bublina a je zde vidět první náznak vychýlení u vstupního difuzoru. Výstupní paprsek se nyní orientuje vpravo.

c) Dochází k odtrhnutí hlavního proudění od levé stěny oscilační komory. Proudění levým zpětným kanálkem posiluje, díky čemuž levá recirkulační bublina začíná nabývat na velikosti.

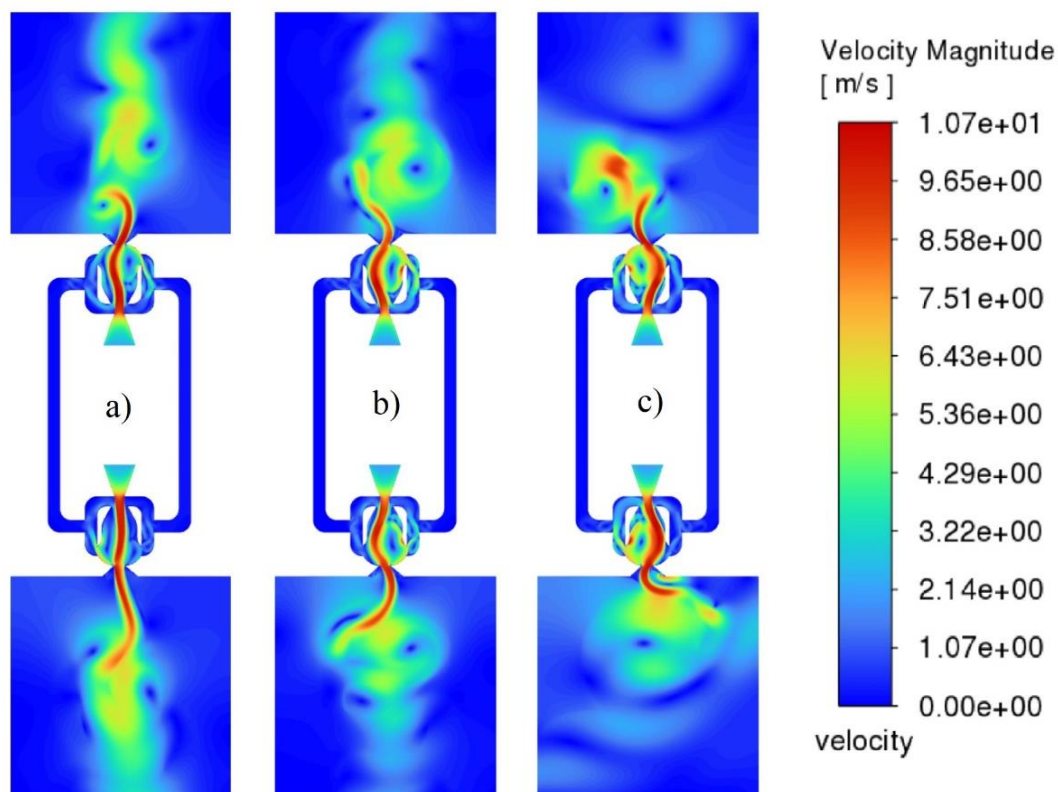
d) Paprsek hlavního proudění přechází do středu oscilační komory. Coanda efekt iniciuje vznik podtlakové oblasti u pravé stěny oscilační komory. Vzhledem k tvoření chtěných vírů je vidět, že ačkoliv výstupní paprsek má tendenci vytrysknout vpravo, je přítomným vírem vtahován do jeho středu.

e) Proudění zpětným kanálkem má nyní největší intenzitu. Levá recirkulační bublina rapidně roste a tlačí paprsek proudění do pravé části komory. Podtlak vznikající u pravé stěny paprsek také přitahuje.

f) Proudění vychýlené do pravé části oscilační komory díky Coanda efektu velmi rychle přilnulo k pravé stěně oscilační komory. Výstupní proudění se odtrhává od slábnoucího víru a začíná mířit vpravo. Chování mezi fázemi $\Phi = 180^\circ$ až $\Phi = 360^\circ$ je již symetrické.

3.4 Synchronizace proudění

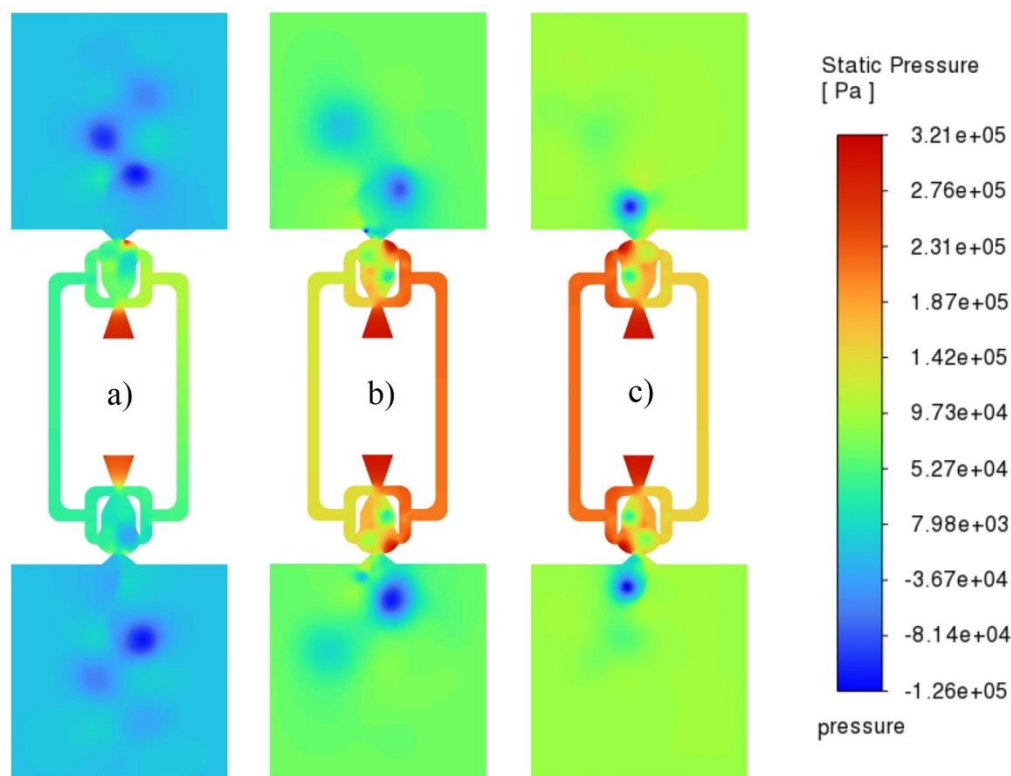
Pomocí 2D simulace byla ověřena funkčnost prvku implementovaného pro synchronizaci proudění probíraného v kapitole 2.6.2. Geometrické rozložení trysek v prstenci bude rovnoměrně po kružnici, přičemž vyústění všech trysek bude směřovat do jejího středu. 3D model dvou sousedních trysek byl zjednodušen, aby mohla proběhnout simulace proudění ve 2D. Funkční princip propojení však zůstal zachován. Pro výpočet byla vytvořena síť s 835 894 uzly. Jelikož tento počet uzlů nyní musel pokrýt plochu dvou trysek a synchronizačních kanálků, rozlišení sítě bylo menší než při simulaci proudění v jedné trysce. Výsledná síť však byla stále dostatečně detailní. Situace a) nastala 20 ms po startu proudění, b) 160 ms po startu a c) proběhlo v čase 164 ms. Perioda oscilací v trysce tedy byla 8 ms, z čehož vyplývá frekvence kmitání 125 Hz. Frekvence oscilací se tak správně zvyšuje s rostoucí rychlostí vstupního proudění, jak lze pozorovat oproti simulaci proudění jednou tryskou, kde byla zvolena nižší rychlost vstupního proudění. Rychlost vstupního proudění pro případ dvou synchronních trysek byla 3 ms^{-1} .



Obr. 22: Rychlostní pole synchronizovaných trysek

Na obrázku 22 je simulována rychlost proudění ve dvou synchronizovaných fluidních tryškách. Ihned po startu proudění v době a) lze pozorovat, že paprsek v oscilační komoře horní trysky je vychýlen vlevo, zatímco u spodní trysky je vychýlen vpravo. Trysky jsou tedy v protifázi, jelikož každá začala kmitat jiným směrem. Toto chování je nežádoucí a pro jeho eliminaci slouží implementované synchronizační kanálky. Po cca 200 ms v případě b) je již hlavní paprsek v proudění uvnitř oscilační komory u obou trysek vychýlen maximálně vlevo, v naprosto identické pozici. Lze tak konstatovat že trysky se po uplynutí doby rozběhu synchronizovaly a jejich fáze kmitů je identická. O půl periody později ve fázi c) se již proudění nachází u pravé stěny oscilačních komor. Ačkoliv chování uvnitř trysky se povedlo synchronizovat a jeví se stejně, mimo trysku lze pozorovat vznikající turbulentní proudění generující víry. Tyto víry pak ovlivňují proudění vycházející z trysky, proto se rychlostní pole mimo trysku může někdy mírně lišit. Právě kvůli těmto vírům byla u simulace proudění jednou tryskou pozorována vorticitata.

Ačkoliv mají obě trysky separátní přívod vzduchu a jejich synchronizační kanálky jsou delší, dojde po uplynutí doby náběhu k úplné synchronizaci proudění. Modifikovaný model je tedy naprosto validní a vykazuje stejné chování jako model navržený při výzkumu synchronizace fluidních oscilátorů [8].



Obr. 23: Tlakové pole synchronizovaných trysek

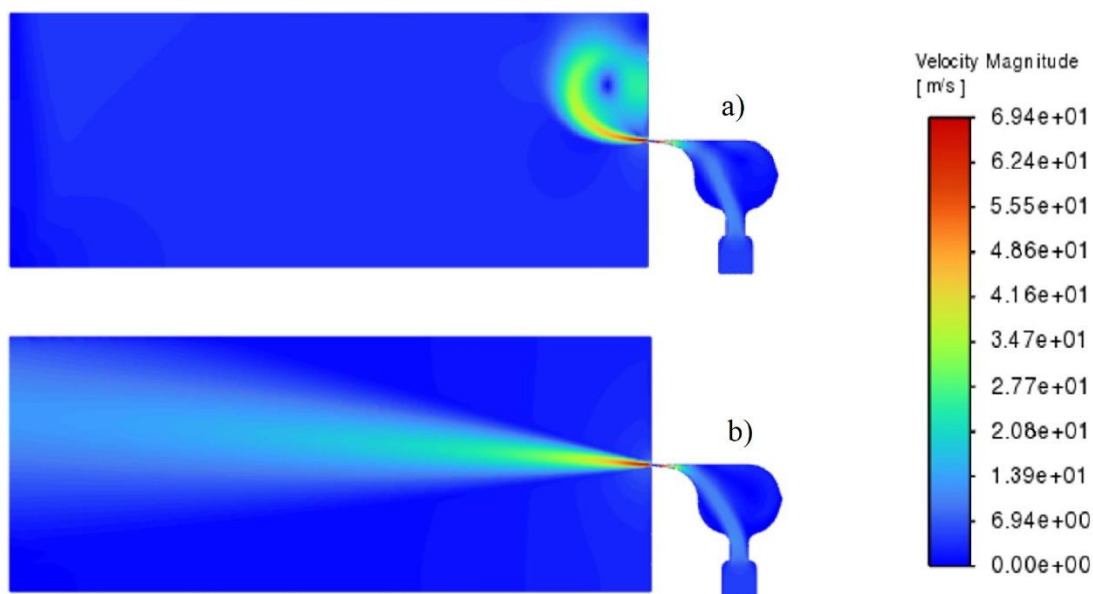
Z obrázku 23 lze lépe vidět, čím je asynchronní náběh trysek je způsoben, pozorujeme zde totiž tlakové pole v obou tryskách. Na počátku a) dochází k inicializaci oscilací na základě nestability proudění vyvolané vstupním difuzorem. Do zpětných kanálků zatím neproudí tolik vzduchu, aby se dostatečně zvýšil tlak v kanálku synchronizačním, a ten tak neplní svou funkci. Naopak po ustálení jsou již zpětnovazební kanálky dostatečně zásobovány vzduchem a dojde tak k synchronizaci proudění zpětnými kanálky. Zpětné kanálky ovlivňují proudění v oscilační komoře, takže zároveň nastane i synchronizace celých trysek.

3.5 Proudění vzduchovým nožem

Průmyslové nože jsou obráběné z kovu na CNC strojích. Musí generovat laminární proudění o velké síle a čím dál více se při jejich designu dbá na spotřebu vzduchu. Vytvořené laminární proudění musí být schopno efektivně dosáhnout na velké vzdálenosti. Jelikož čtvercová odebírací podložka navrhovaného řešení má stanovený rozměr hrany na 250 mm, bude pro seskupení dílu doprostřed stačit o mnoho menší výkon. Nože firmy MOS Pneumatics mají stejnou sílu proudění po celé délce nože, což je žádoucí například pro ofukování dílů na páse. U navrhované čtvercové odebírací podložky budou celkem 4 vzduchové nože, každý u jedné hrany odebírací desky. Z tohoto důvodu bude žádoucí, aby laminární paprsek měl největší dosah uprostřed a nejmenší u krajů, kde se bude jeho proudění okamžitě setkávat s prouděním od sousedního nože. Rychlostní pole vzduchového proudění by mělo připomínat tvar trojúhelníku. Takové

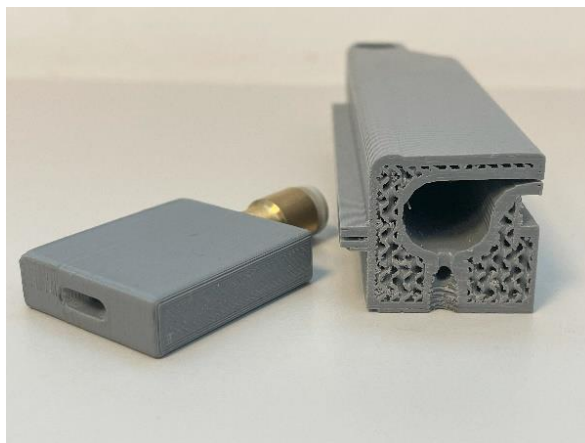
rychlostní pole bylo zajištěno pomocí více přívodních kanálků do plnicí komory. Největší průřez má kanálek ústící doprostřed komory. I samotná plnicí komora má maximální průřez uprostřed nože. Průřez se pak plynule zmenšuje směrem ke koncům plnicí komory.

Hlavním cílem CFD simulací bylo zjistit dosah laminárního proudění v závislosti na výšce výstupního otvoru. Požadovaný dosah byl 120 mm. Čím menší byla výška výstupního otvoru, tím větší dosah mělo generované proudění. S ohledem na výrobní omezení však bylo třeba zvolit největší možnou výšku otvoru splňující zadanou podmínku. Simulace proudění v průřezu finálního návrhu je na obr. 24. Lze si všimnout, že při iniciaci proudění a) se díky tvaru plnicí komory a pozici přívodního kanálku proudění stáčí nahoru, než se ustálí. Toto chování je chtěné, jelikož nebude docházet k podebrání polohovaných dílů z podložky, pouze budou posunuty do jejího středu. Situace b) je po ustálení proudění. Při výšce otvoru 0,15 mm má laminární paprsek dosah více než 120 mm a během výroby nože nedochází k žádným tiskovým problémům.



Obr. 24: Rychlostní pole vzduchového nože

Při průběžné výrobě modelovaných prototypů bylo zjištěno, že vzduchový nůž je nejvíce náchylný na výrobní vady. Pokud byl z výroby někde uvolněný drobný plastový náliček ve fluidní trysce, jednoduše pod tlakem přívodního proudění opustil trysku jejím vyústěním. Výška výstupního otvoru vzduchového nože je však 0,15 mm. Nálitky vznikající při vytváření mostů bez tiskových podpor mají mnohokrát větší rozměry než je tloušťka výstupního otvoru a zůstanou tedy v plnicí komoře. Tam při plnění stlačeným vzduchem blokují výstupní otvor a výrazně tak omezují funkci nože. Proto každý model simulován pomocí CFD byl i vyroben a uprostřed rozřezán. Největší problém byl zakulacený průřez plnicí komory, viz obr. 25, který se nepodařilo vytisknout bez vad ani při maximálním zmenšení výšky tiskové vrstvy. Proto horní část byla přemodelována do tvaru trojúhelníku a připomínala v průřezu plnicí komory střechu. Tato geometrická modifikace zajistila bezproblémový a spolehlivý tisk vzduchových nožů.

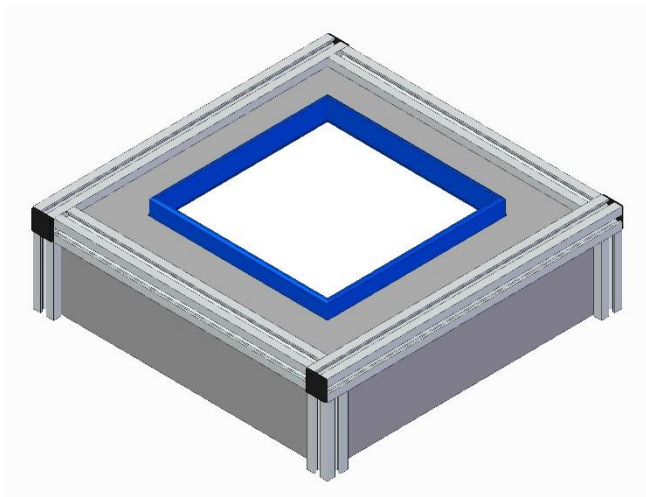


Obr. 25: Prototypy sloužící pro kontrolu kvality výroby

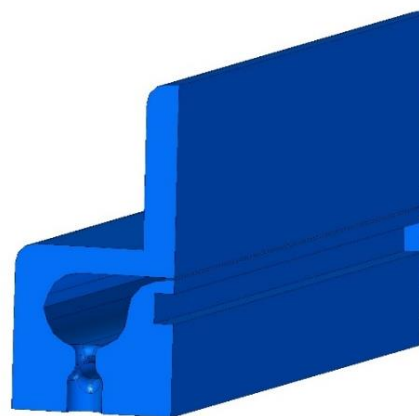
3.6 CAD model fluidních prvků

Po validaci geometrie vzduchového nože a synchronizovaných oscilačních trysek pomocí CFD simulace se přešlo k tvorbě finálních 3D modelů fluidikových prvků v programu Siemens Solid Edge 2022.

Jako první bylo modelováno odběrové místo, kde bylo potřeba zajistit možnost podsvícení odebírané plochy a implementovat podél celého jejího obvodu vzduchový nůž. Deska byla vyrobena z čírého plexiskla o tloušťce 4 mm. Dle potřeby podsvícení nebo kamery se dá použít plexisklo číré nebo bílé. Plexisklo zároveň slouží jako vymežovací prvek při montáži čtyřech bočnic. Bočnice jsou po usazení na plexisklo zajištěny čtyřmi šroubovými spoji. Bočnice mají vývod vzduchového nože modelovaný ihned nad drážkou pro plexisklo, čímž se zamezí uváznutí nízkých předmětů v rozích odebírací plochy, k čemuž docházelo u prvních prototypů. Pro zamezení vylétnutí lehkých předmětů z odebírací desky při aplikaci stlačeného vzduchu zde byl zakomponován i vysoký mantinel. V řezu bočnice na obr. 27 si lze povšimnout technologického zkosení v levé části plnicí komory.



Obr. 26: Kompletní konstrukce odebírací platformy



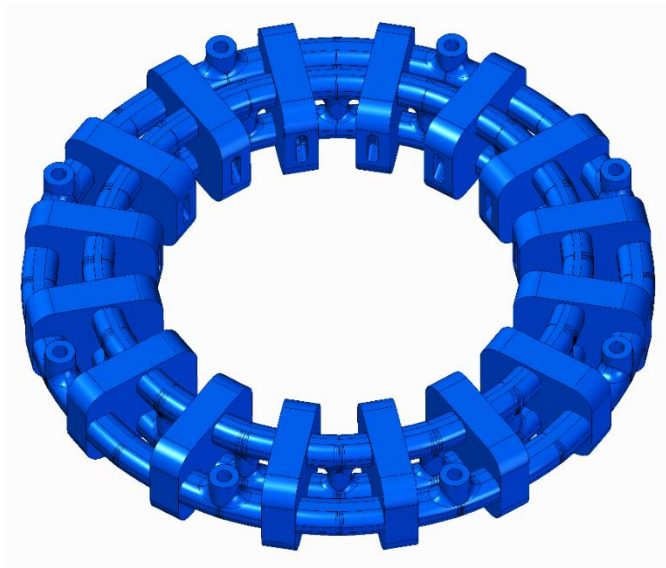
Obr. 27: Řez finálním návrhem bočnice

Sestava odebírací plochy byla následně zakomponována do jednoduché konstrukce z hliníkových profilů německé společnosti Minitec, jejichž výhradním distributorem je společnost Opticontrol. Ve spodní části bočnic byly instalovány nástrčné spojky KQ2 pro připojení vzduchových hadic. Bočnice tak nemohly ležet přímo na stole. Uvnitř tohoto boxu bylo dostatek místa pro situování pneumatických rozvodů od společnosti SMC i osvětlení od české společnosti SmartView. Celkový model pak lze vidět na obr. 26.

Modelování chapadla pro robotický manipulátor bylo komplexnější. Bylo třeba určit vhodný počet fluidních trysek v prstenci. Robotické manipulátory disponují dvěma přívody stlačeného vzduchu umístěné u zápěstního kloubu. Celkový přívod vzduchu je tak limitován tlakem rozvodní sítě a výsledným průtokem dvěma vzduchovými hadicemi uvnitř robota. Čím více trysek bylo do prstence umístěno, tím menší byly mrtvé zóny, v nichž mohly náhodně uvíznout vířené dílky. Mrtvá zóna je oblast mezi vývody sousedních trysek, těsně u vnitřního obvodu prstence, kde není dostatečná síla proudění pro pohyb polohovaných dílků. Naopak čím méně trysek obsahoval prstenec, tím silnější bylo výstupní proudění z jejich jednotlivých výstupů a uprostřed prstence docházelo k efektivnějšímu víření dílků.

CFD analýza modelu obsahujícího více jak 10 trysek by byla výpočetně extrémně náročná. Proto bylo přistoupeno k experimentálnímu testování. Vyrobito se několik prstenců s různým počtem trysek i vnitřních průměrů. Bylo pozorováno, že pro objemnější díly bylo efektivnější použít méně trysek, jelikož nehrozilo jejich uvážnutí v mrtvé zóně. Naopak u drobnějších součástí byly mrtvé zóny zásadní problém, jenž značně narušoval výslednou polohovací funkci prstence. Pro další práci byl zvolen prstenec o vnitřním průměru 165 mm obsahující 12 oscilačních trysek. Počet trysek se však dá parametricky změnit v modelu prstence dle potřeb dané aplikace.

Vnitřní struktura přívodních a synchronizačních kanálků v prstenci lze dobře chápat na jednom z prvních prototypů prstence zobrazeného na obr. 28. Pro zvýšení spolehlivosti a jednoduchosti výrobního procesu však bylo od tohoto obnaženého modelu upuštěno. Mezerami mezi tryskami se navíc ztrácelo turbulentní proudění vznikající uvnitř prstence.



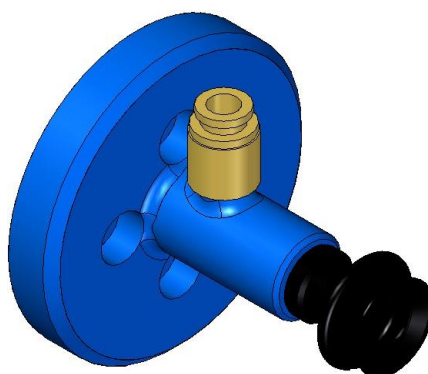
Obr. 28: Jeden z prvotních prototypů prstence

Z testování také vyplynulo, že prstavec ve zvolené konfiguraci dokáže vzniklým prouděním vymrstit víčko PET láhve i 80 cm vysoko. Proto byl z perforovaného plexiskla vytvořen horní kryt vířivé komory uvnitř prstence. Aby bylo zabráněno úniku vířivého proudění mezi spodní plochou prstence a odebírací deskou, vytvořil se do spodní plochy prstence výřez pro kruhové gumové těsnění. Nakonec bylo navrženo a modelováno uchycení celého prstence na robotické rameno Epson C8. Tímto uchycením byla zajištěna snadná montáž i demontáž prstence na robotické rameno pomocí čtyřech šroubů M5. Pohled na finální model chapadla poskytuje obr. 29.



Obr. 29: Finální model prstence s uchycením na manipulátor

Jako poslední byl modelován jednoduchý koncový efektor se vzduchovým vedením pro vakuovou přísavku. Tento efektor nahradil po skončení cyklu víření odebíraných dílů prstavec s oscilačními tryskami. Pomocí vakuové přísavky byly správně orientované díly odebrány a založeny do požadované pozice. Model je zobrazen na obr. 30.



Obr. 30: Gripper s vakuovou přísavkou

4 DIGITÁLNÍ DVOJČE EPSON

V této kapitole bude popsána tvorba digitálního dvojčete, jenž proběhla v programu Epson RC+7. Digitální dvojče je přesný počítačový model reálného zařízení, v tomto případě robotické stanice. Pomocí digitálního dvojčete lze simulovat funkci zařízení v reálném čase. Přínos digitálního dvojčete je testování a validace správnosti návrhu zařízení bez nutnosti výroby prototypů, což šetří peníze i čas.

Při testování se mohou odhalit hardwarové nebo softwarové chyby, aniž by hrozilo poškození robota nebo okolních prvků. Program Epson RC+ má oproti konkurenci velice pokročilou kontrolu kolize objektů, jelikož při veškerém pohybu robota automaticky vyhodnocuje srážky všech objektů nacházejících se v simulované scéně. Zamezí se tak případným kolizím reálných součástí a robota ve zhotovené stanici.

4.1 Seiko Epson

Tato práce využívá robota, kontrolér, kameru, i vývojové prostředí od firmy Epson. Seiko Epson je mezinárodní společnost původem z Japonska. Je jednou ze tří hlavních společností Seiko Group. Veřejnost tuto společnost zná zejména jako výrobce tiskáren, skenerů, projektorů a hodinek. Právě výroba hodinek Seiko stála za vznikem čtyřosých robotů Epson SCARA a celé robotické divize. Nyní je Epson největším dodavatelem SCARA robotů na světě. Tyto manipulátory mají 4 stupně volnosti a nejvíce jsou využívány pro pick and place aplikace. Kromě Scara robotů nabízí Epson i robotické manipulátory se 6 stupni volnosti. Epson Robotická řešení se oproti dostupné konkurenci vyznačují zejména kompaktními rozměry, vysokou rychlostí i přesností pohybu a konkurenceschopnou cenou. Jelikož se robotická ramena již od jejich počátků při výrobě hodinek specializují na manipulaci s drobnějšími předměty, tak je maximální nosnost nejvýkonnějších modelů pouze 20 kg. Společnost Opticontrol s.r.o. je výhradním distributorem robotických řešení Epson pro Českou republiku i Slovensko.

4.2 Výběr hardwaru

Po dokončení návrhu fluidikových komponent se přešlo k tvorbě celkového CAD modelu robotické stanice. Pro tvorbu modelu robotické buňky bylo nutné určit typ robotického manipulátoru a definovat řídicí jednotky pomocí kterých bude probíhat komunikace s robotem a kamerovým systémem. Na základě této specifikace mohlo proběhnout modelování celé robotické buňky.

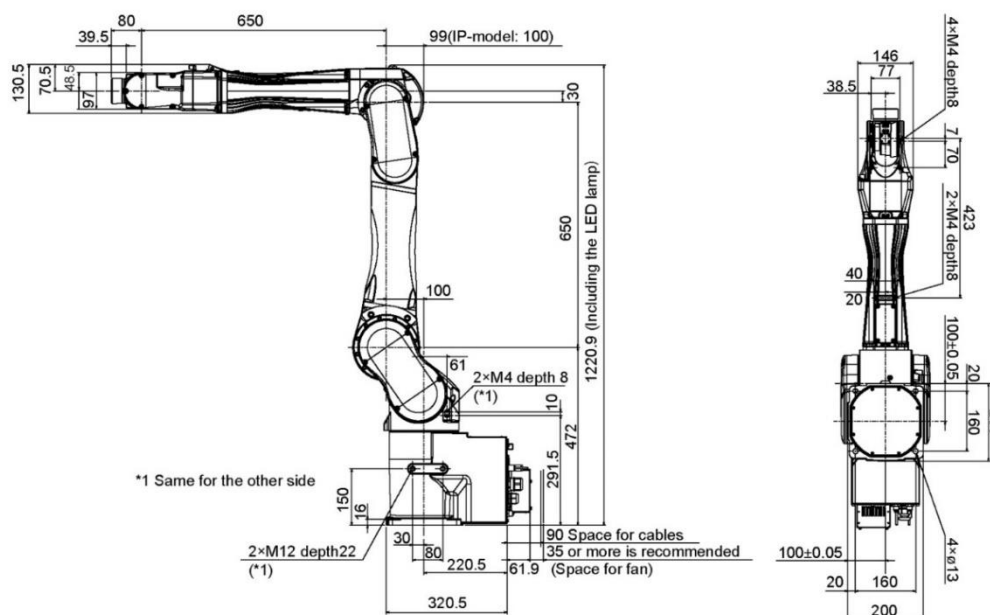
4.2.1 Robotické ramena

Jako první bylo potřeba rozmyslet volbu robotického ramene. Jelikož prstenec s oscilačními tryskami bude umístěn na robotu, a je potřeba zajistit dokonalé přilnutí prstence k podsvícené desce, bude vybíráno z robotů umožňujících pohyb v 6 osách.

SCARA by totiž nedokázala kompenzovat odchylku podsvícené desky od vodorovné roviny robota. Robot a odebírací plocha se nachází na odlišných stolech.

Průmyslová ramena Epson s 6 stupni volnosti disponují technologií QMEMS, jež výrazně snižuje vibrace v robotickém rameni během pohybu. Jedná se o vylepšené křemíkové gyroskopické senzory s výbornou citlivostí a vysokou tepelnou stabilitou. Data o zrychlení a rotaci jsou tak zatížena menší chybou a robot se může pohybovat efektivněji. Minimalizace vibrací umožní manipulátoru navýšení provozních rychlostí a snížení stabilizačního času i překmitu při najíždění na polohu. Díky tomu nová ramena Epson dosahují o 15 % rychlejšího času cyklu oproti verzím bez technologie QMEMS.

Na základě skladových zásob společnosti Opticontrol s.r.o. byl vybrán robot Epson C8-A1401S. Tento robot disponuje dosahem v rádiu 1400 mm od své základny a maximální zatížení konce ramene činí 8 kg [12]. Váha manipulátoru samotného je v této konfiguraci 62 kg. Rozměry robota jsou ilustrovány na obr. 31. Náleží do skupiny středně velkých robotických ramen v sortimentu firmy Epson.



Obr. 31: Rozměrová zástavba manipulátoru Epson C8-A1401S [12]

4.2.2 Řídící jednotky

Epson nabízí dva typy řídicích jednotek. Jednotka RC-90B slouží pro řízení automatizačního procesu jednoho robotického manipulátoru. Je schopná v reálném čase vykonávat 32 paralelních procesů. Zvládne tedy ovládat nejen samotného robota, ale i externí periferie. Pro jednodušší aplikace tak odpadá nutnost použití PLC, což významně zjednodušuje a urychluje celý vývojový proces.

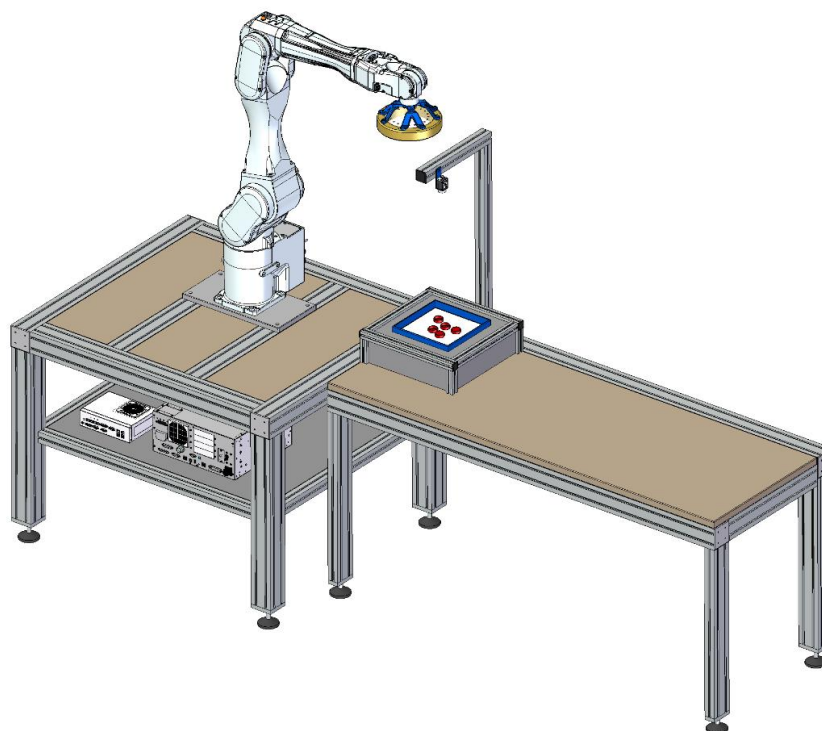
Multirobotický systém RC700 pak zvládne ovládat najednou 4 robotická ramena. Jedná se o cenově výhodné řešení, protože přídatné roboty lze zakoupit bez řídicí jednotky. Obě jednotky mají 24 digitálních vstupů, 16 digitálních výstupů a komunikují přes USB, Ethernet, MODbus či RS232-C. Obě jednotky lze pak rozšířit o přídatné digitální I/O karty, popřípadě do nich napojit tablet Epson TP3.

Pro tuto aplikaci by stačila jednotka RC-90B. Společnost Opticontrol s.r.o. se však zabývá i servisem robotů Epson, kterých se v servisním a testovacím centru většinou nachází více najednou. Pro jejich pohodlné ovládání jsou použity právě multirobotické systémy. V této práci navrhovaná robotická buňka bude tedy řízená jednou z dostupných jednotek RC700.

Pro implementaci strojového vidění je pak třeba instalovat kamerový systém CV2. Tato řídicí jednotka zvládne zpracovat obraz z 6 kamer najednou. Je tedy vhodná i pro aplikace vyžadující více různých pohledů na jeden díl. Kamery lze umístit staticky do prostoru, nebo přímo na robotické rameno. Standartně dodávané kamery pro strojové vidění jsou vyráběny firmou Basler. Jednotka zpracuje obraz z kamery o rozlišení od 0,2 Mpx do 20 Mpx. Jedinou podmínkou je připojení přes Gigabitový Ethernet nebo USB. Kamerový systém CV2 je plně integrovaný do vývojového prostředí RC+ pod názvem *Vision Guide*.

4.2.3 CAD Robotické buňky

Pro digitální dvojče bylo třeba namodelovat již existující testovací stolicí vyrobenou z hliníkových profilů Minitec a dřevěného masivu. Na tuto stolicí byl modelován a pomocí CNC vyroben úchyt robotického ramene Epson C8-A1401S. Pod robotickou stolicí byly umístěny řídicí jednotky RC700 pro řízení robota a CV2 pro strojové vidění. Na vedlejší stůl byl pomocí Minitec rohových spojek ukotven box s podsvícenou odebírací plochou. K tomuto boxu byla pomocí profilů 45x45 připevněna kamera Basler acA2500-14gc. Díky profilovým spojkám Minitec a ukotvení kamery do drážky profilu se dá s kamerou lehce posouvat, což usnadní kalibraci reálné kamery při stavbě a testování. Finální model v prostředí Solid Edge je na obr. 32 a k nalezení je v příloze.



Obr. 32: Finální CAD model robotické buňky

4.3 Epson RC+7.5

Epson má pro programování robotů vyvinuté vlastní vývojové prostředí. Samotné programování robota se provádí pomocí jazyka SPEL+, vyvinutého společností Epson. Tento strukturovaný textový programovací jazyk je podobný například jazyku RAPID, jímž se programují roboty ABB. SW obsahuje také simulační prostředí, kam lze importovat CAD modely a vytvořit tak digitální dvojče navrhované robotické stanice. Vývojové prostředí Epson včetně simulátoru je zdarma dostupné všem uživatelům. Robota si tedy lze otestovat pomocí virtuálního dvojčete na navrhované lince ještě před jeho nákupem.

Pro potřeby této práce je velmi výhodné, že součástí vývojového prostředí je i kompletní program pro strojové vidění. Lze tak pomocí digitálního dvojčete dopředu simulovat, co kamera ve scéně uvidí. Pohled kamery se během simulace zobrazuje v reálném čase a je součástí bezplatného simulátoru. Tím se dá dokonale plánovat její pozice ve výrobní lince při tvorbě CAD modelu. Samotné programování strojového vidění probíhá přes placené rozšíření *Vision Guide*. Při vývoji robotických aplikací v průmyslu se díky tomu urychlí doba dodání, jelikož lze celou linku včetně strojového vidění naprogramovat dříve, než je fyzicky sestavená. Díky tomu, že ovládání robota i vyhodnocování strojového vidění se provádí v jednom SW, je následná synergie těchto prvků naprosto spolehlivá a bezproblémová.

RC+ umožňuje pro navrhované robotické aplikace vytvořit i jednoduché GUI pro koncové operátory. GUI se potom nahraje do tabletu nebo průmyslového PC a lze z něj ovládat celou robotickou linku či kontrolovat data výrobního procesu. Odpadá tak potřeba vytvářet separátní uživatelské rozhraní v PLC.

4.3.1 Epson RC+ Express

Program Express je novým rozšířením standartního vývojového prostředí RC+. Je výhodný pro programování jednoduchých aplikací, jelikož se zde nemusí používat řádkový kód. Činnost robota se programuje pomocí blokových diagramů. Navíc je zde připraveno několik příkladných aplikací. Začínající uživatel se tak nemusí učit syntaxi jazyku SPEL+, nicméně zde nelze realizovat komplexnější úlohy.

4.4 Strojové vidění

Strojové vidění neboli CV umožňuje výpočetní technice chápat svět kolem ní. Tento proces zahrnuje sběr dat pomocí kamer a jejich následné zpracování počítačem pro extrakci užitečných informací. V dnešní době má CV široké pásmo uplatnění a je předmětem neustálého rapidního vývoje. V této aplikaci bude pomocí CV od společnosti Epson kamerou snímána odebírací podložka. Její obraz bude vyhodnocován a robotickému manipulátoru budou zaslány souřadnice pro odběr správně orientovaných dílků.

Strojové vidění Epson nachází využití například pro navádění robota na souřadnice odebíraných dílů, měření rozměrů odebíraných součástí, jejich identifikaci pomocí čárových kódů, a v neposlední řadě ke kontrole kvality.

Aplikace strojového vidění pro zpracování obrazových dat z kamery využije jednotku CV2. Obraz z jedné kamery lze však zpracovávat i pomocí běžného PC, kam se kamera připojí přes Ethernet. Strojové vidění Epson již není zdarma ke stažení jako simulátor. Pro práci s ním je potřeba zakoupit licenci na *Vision Guide*, což je rozšíření programu RC+. Tato licence je však součástí jednotky CV2.

Obraz samotný bude snímán kamerou Basler acA2500-14gc [18]. Tato barevná kamera je vybavena CMOS senzorem o rozlišení 5 Mpx a je schopná zaznamenat 14 snímků za sekundu. Výhodné jsou její kompaktní rozměry a váha pouhých 90 g. Případné umístění kamery na 5 kloub robotického manipulátoru jej nijak nezpomalí při pohybu. Na stránkách výrobce je zdarma ke stažení model úchytu kamery pro 3D tisk. K přenosu obrazových dat do jednotky je použit ethernet. Pro správnou funkci s jednotkou CV2 je pak třeba v kameře mít firmware Epson. Cena kamery Epson je 800 €.

Na kameru lze umístit množství objektivů, kterými lze kompenzovat vzdálenost scény od kamery a velikost snímané scény. Objektivy vhodné pro umístění na kamery Dasler vyrábí japonská firma Computar. Správné zvolení osvětlení scény a objektivu je velká část úspěchu pro aplikace strojového vidění. Pro tuto robotickou buňku byl zvolen objektiv Computar M8014-MP2 [19]. Jeho ohnisková vzdálenost je 8 mm. Ručním ovládním clony lze měnit clonové číslo v rozmezí f/1.4 až f/16 a tím regulovat množství světla procházejícího objektivem. Tento základní objektiv dostačuje běžným aplikacím. Jeho cena je 139 €.

Jelikož scéna nebude krytovaná, bude podléhat vnějším vlivům jako je intenzita vnitřního osvětlení v hale nebo míra venkovního slunečního svitu. Čím více bude samotná scéna nasvícená, tím menší deviace budou vnější vlivy způsobovat na snímaném obrazu. Proto byl objektiv kamery vybaven světlem SmartView RL-65W-M30.5 [20]. Je to bílé kruhové světlo s integrovaným vnitřním závitem pro jednoduchou montáž na objektiv. Pro efektivní přizpůsobení scéně je světlo vybaveno regulací intenzity osvětlení pomocí PWM. Použitá sestava kamery, objektivu a kruhového světla je na obr. 33.



Obr. 33: Sestava kamery, objektivu a kruhového světla

4.5 Tvorba digitálního dvojčete

Ještě před začátkem vytváření samotného digitálního dvojčete je třeba v prostředí Epson RC+ konfigurovat virtuální kontrolér robota, který pro účely simulace nahrazuje jeho řídicí jednotku. Dále se musí do kontroléru přidat simulované robotické rameno z nabídky všech dostupných robotů Epson.

Jakmile je navázáno virtuální spojení, lze spustit samotný simulátor. V něm nalezneme na nulových globálních souřadnicích zvoleného robota. Do prostoru simulace lze nahrát připravené CAD modely robotické buňky ve formátu STEP. Nahrané modely jsou následně převedeny do formátu XV3, jenž výrazně redukuje paměťovou náročnost simulace a její průběh je plynulejší. Robotické rameno C8 se následně usadí na obrobenu kotevní desku a poté se na jeho 6 kloub upevní fluidikové chapadlo modelované v kapitole 3.6. Je dobré si před importem CAD modelů poznamenat pozici kotevní desky robota vůči počátku globálních souřadnic. Simulátor bohužel nenabízí možnost měření vzdáleností. Jako poslední se do scény importuje použitá kamera Epson včetně objektivu, kde je zapotřebí pro správnou funkci specifikovat jeho ohniskovou vzdálenost.

Po úspěšném importu CAD modelů se přešlo na vývoj programu pro ovládání pohybu robota. Reálný robot lze pozicovat celkem třemi způsoby. Nejjednodušším je uvolnit elektromagnetickou brzdou servomotorů a ručně robota navést do požadované polohy. Tento přístup nalézá uplatnění při učení bodů nebo nastavení domovské pozice. U robotů typu Scara lze při polohování odblokovat všechny pohony záraz. U manipulátorů se 6 stupni volnosti by však v určitých případech hrozilo jeho zhroucení a poškození. Proto se vždy musí odblokovat pouze jedna elektromagnetická brzda, což není moc praktické pro normální pohyb. Funkce však najde využití při balení manipulátoru pro přepravu. Odblokování servopohonů tak umožní robota ručně dostat do polohy zabírající co nejméně prostoru.



Obr. 34: Pracovní tablet TP3 během nastavování robotické buňky

Další možnosti pohybu robota již využijí servomotorů. Méně sofistikované řešení je postupný posuv robota v osách X, Y a Z pomocí panelu *Jog and Teach* v programu RC+. Lineární posuv je vhodný pro pohyb robotem během servisních úkonů, školení, nebo pro učení nových bodů. Panel *Jog and Teach* se nejvíce uplatňuje při připojení tabletu Epson TP3 do řídicí jednotky robota [21]. TP3 pak obsluhuje umožní vykonávat základní úkony bez nutnosti připojení PC či PLC. Tablet TP3 má navíc integrované senzory v rukojetích, servopohony robota se tak zapnou pouze pokud je ruka uživatele na úchopu tabletu. Zamezí se tak vzniku možného nebezpečí. Dalším bezpečnostním prvkem je integrované tlačítko pro Total Stop do těla tabletu. V této práci byl tablet využit pro naučení přesných souřadnic odběrového místa, jak lze vidět na obr. 34. Rozměry použité pro potřeby simulace a reálné rozměry se mohou drobně lišit. Při importu bodů použitých pro simulaci by hrozila kolize mezi prstencem a bočnicemi. Jelikož zde není mnoho manipulačního prostoru, musely být body nastavené pro simulaci přeučeny.

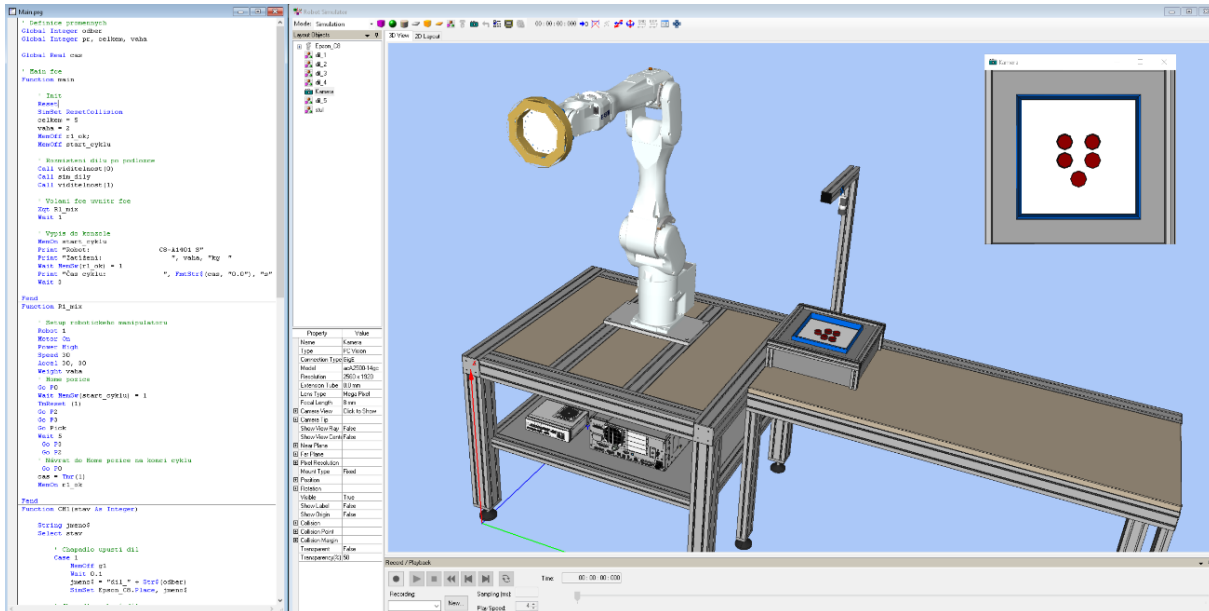
Nejpoužívanější je pak programování pohybů robota pomocí funkcí psaných v jazyku SPEL+. Na začátku programu se definují globální proměnné. V dalším kroku se volá funkce inicializující robota. Zde je třeba definovat, jaký výkon mají servomotory použít, maximální dovolené zrychlení, rychlost a zatížení robota. Na základě zatížení program sám omezí maximální zrychlení robota, aby nedocházelo k nadměrnému opotřebení drahých harmonických převodovek.

Po inicializaci již robot čeká na programové funkce. SPEL+ podobně jako PLC funguje na principu stavového automatu. Mezi těmito stavy se přechází na základě vstupů od senzorů nebo kamer. V těchto stavech jsou definované přesuny mezi jednotlivými body robotické stanice, popřípadě ovládání výstupů na základě stavu vstupů. Zájmové body pohybu včetně domovské pozice je třeba definovat předem do příslušné tabulky daného robota. Pomocí definovaných bodů se vytváří trajektorie pohybu. Snaha je vždy dosáhnout co nejefektivnějšího pohybu celého manipulátoru. Dvě základní vestavěné funkce pohybu jsou *Move* a *Go*. Příkaz *Move* přesune koncový kloub z bodu A do bodu B po přímce, jde tedy o lineární pohyb. Je vhodný při pohybu ve stísněných prostorech, například při odběru dílů ze vstřikovacího lisu, kde musí rameno navigovat do útrob lisu a během pohybu nesmí nic poškodit. Naopak příkaz *Go* generuje mezi dvěma body co nejefektivnější a nejrychlejší trajektorii pohybu, kterou lze pomocnými příkazy dále upravovat. Upravit lze třeba míru překmitu nebo zaoblení trajektorie. Nelze však úplně predikovat generovanou trajektorii, není tak vhodný do malých prostor, kde hrozí kolize. Pro aplikace, kde hrozí kolize je také důležité nepoužívat *Least Joint Motion*. Tento defaultní pohyb generuje trajektorii tak, aby se každá osa robota během jeho pohybu posunula o co nejmenší hodnotu. Výsledná trajektorie není už vůbec predikovatelná.

U robotů se 6 stupni volnosti se musí dbát na trajektorie pohybu. Pro každý definovaný prostorový bod existuje mnoho prostorových konfigurací robota, jak bodu dosáhnout. Loket robota může být vytočen vpravo, vlevo, nahoru nebo dolů. Zápěstí pak může rotovat do více poloh. Je proto dobré všechny body nakonfigurovat v simulátoru a ověřit tak vzniklou trajektorii pohybu, aby nedošlo ke kolizím. Simulátor je schopen

detailně vykreslit a uchovat ve scéně všechny vykonané trajektorie. Na základě vykreslených trajektorií probíhá optimalizace trasy robota.

Nakonfigurované vývojové prostředí užité pro validaci návrhu pomocí digitálního dvojčete se nachází na obr. 35. Do pracovní plochy se pohodlně vejde jak psaný kód SPEL+ ovládající robota, tak jeho pohyb v reálném čase uvnitř simulované scény. Lze tak jednoduše sledovat, na jakém řádku nastane případná kolize nebo error.



Obr. 35: Pracovní prostředí programu Epson RC+

Simulátor se z prostředí SPEL+ ovládá pomocí příkazů *SimSet* a *SimGet*. Lze tak přímo z kódu ovládat koncový efektor robota i animovat odebírané díly. Kompletní projekt digitálního dvojčete vyvinutý pro tuto práci se nachází v příloze.

5 STAVBA A OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI

Poslední část práce se věnuje stavbě navrhovaného řešení a ověření jeho funkcionality pomocí praktických experimentů. První část této kapitoly se zaměřuje na výrobu navrhnutých fluidních produktů. V druhé části se fluidní výrobky vsadí do robotické buňky a zapojí se elektrické i pneumatické rozvody. Ve třetí části se pak do robotické buňky nahraje připravený kód SPEL+ pro robotické rameno a experimentálně se ověří funkčnost navrhovaného řešení. Na konci kapitoly proběhne shrnutí výsledků dosažených během experimentů.

5.1 Výroba fluidikových komponent

Česká firma Prusa Research a.s. založena roku 2012 vývojářem Josefem Průšou dodává tiskárny na technologii FDM a SLA. Celosvětově se jedná o jedny z nejlepších a nejprodávanějších tiskáren ve své kategorii. Jejich tiskárny užívají firmy jako Tesla, SpaceX, Ford, Porsche, nebo skupina VW. Kromě technologického průmyslu se uplatní i v lékařském a farmaceutickém odvětví. U nás SLA tiskárny užívají vědci z Institutu klinické a experimentální medicíny nebo Fakultní nemocnice Brno, celosvětově pak firmy jako AstraZeneca, Johnson & Johnson, nebo Novartis [22, 23].



Obr. 37: Prusa MK4 [25]



Obr. 36: Prusa XL [24]

Bočnice s integrovaným vzduchovým nožem i prstenec s fluidními tryskami byly vyráběny aditivně na velkoformátové 3D tiskárně Prusa XL [24] ilustrované na obr. 36. Výhodou je její robustní konstrukce, vyšší rychlost tisku a zejména rozměr tiskové podložky 360 x 360 mm. První prototypy byly vyrobené na tiskárně Prusa MK4 s rozměry podložky 250 x 210 mm [25], nacházející se na obr. 37. Vnitřní průměr prstence tak byl rozměrem podložky limitován na 100 mm, což bylo po konzultaci se zadavatelem vyhodnoceno jako nedostačující. Ačkoliv MK4 nabízí detailnější tisk, přešlo se kvůli rozměrovým požadavkům na model XL. Při testování bylo ověřeno, že kvalita

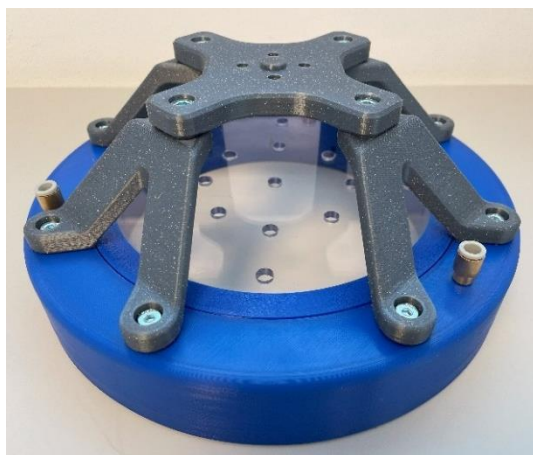
vnitřních struktur zůstala na vysoké úrovni. Prusa XL nedokáže tisknout tak detailně jako MK4, a na dvou rozměrově identických modelech byl rozdíl v detailech znát. Na nejvíce detailní nastavení zvládne MK4 tisknout o 40 % jemnější vrstvy. Znevýhodnění však bylo kompenzováno zvětšením rozměru výtisku o 65 %, čímž se zvětšily i detaily vnitřních struktur. Výsledkem srovnání tak byly dva stejně kvalitní modely lišící se pouze svou velikostí.

3D tisk funguje na principu nanášení materiálu po vrstvách. Pro detailnější výtisky se užívá výška jedné vrstvy 0,1 mm. Tisknutá vrstva se pak skládá z perimetrů, což jsou pevné okrajové linie, a vnitřní výplně. Výplň je v tomto případě tvořena gyroidní strukturou a je nastavena na 50 %. Navýšení procenta výplně nad 50 % by podpořilo pevnost výrobku pouze minimálně, spíše by zbytečně narůstala váha a doba tisku. Při výrobě prvků obsahujících struktury pro transport stlačeného vzduchu je důležité nastavit aspoň 4 tiskové perimetry. Eliminuje se tak riziko vzniku netěsností mezi jednotlivými vrstvami. Jakékoliv netěsnosti ve fluidních výrobcích jsou silně nežádoucí.

Výrobek	Doba tisku [h]	Materiál [g]	Materiál	Kusů [ks]	Cena [€]
Prstenec	67	671	PETG	1	80
Bočnice	52	631	PETG	4	63
Uchycení prstence	23	154	ASA	4	27
Centrální úchyt	6	56	ASA	1	7

Tabulka 1: Výrobní náročnost navrhnutého řešení, cena včetně energií a amortizace

Časová a finanční náročnost výroby navrhovaného řešení je uvedena v tabulce 1. Celková výrobní cena je 177 €, neboli 4.400 Kč. Je potřeba říct, že během celého prototypování i finálních výtisků se tisk vždy perfektně dokončil. Nikdy nedošlo k odlepení výrobku od podložky, horizontálnímu posunu vrstev, či ucpání trysky, což jsou nejčastější problémy postihující FDM výrobu. Obě tiskárny jsou umístěné ve vyhřívaných boxech, kde je konstantní teplota, což kladně ovlivňuje výrobní podmínky. Tiskárny během této práce natiskly celkem 471 hodin, absence jakýchkoliv chyb validuje jejich rozšiřující se působení v průmyslových aplikacích.



Obr. 39: Prstenec s fluidními tryskami

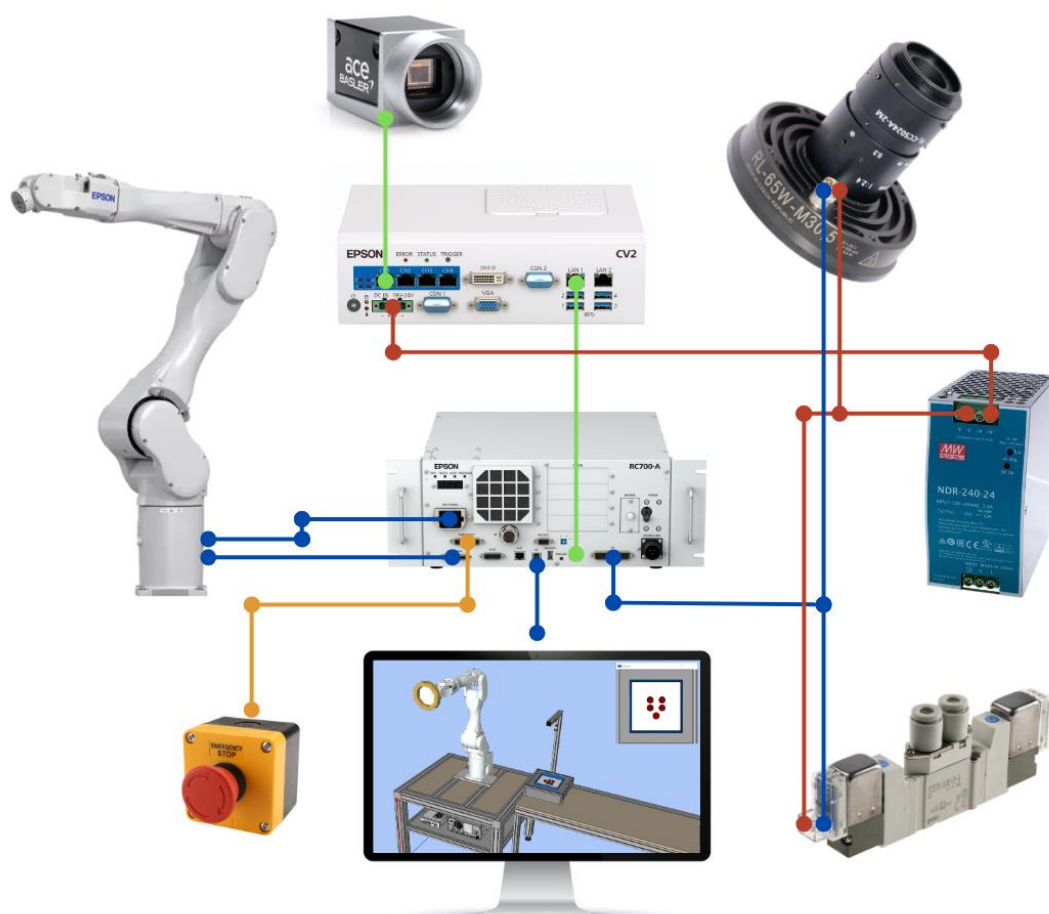


Obr. 38: Odebírací platforma v Minitec konstrukci

Bočnice jako jediný vyráběný prvek využily tiskových podpor v oblasti šroubových spojů. V místech styku tiskových podpor s vyráběným dílem je povrch většinou lehce deformovaný. Bočnice proto byly po sešroubování broušeny a lakovány. Finální verze vyrobeného prstence je na obr. 39, Minitec konstrukce s bočnicemi je pak na obr. 38.

5.2 Zapojení robotické buňky

Před uvedením robota do provozu je potřeba jej správně ukotvit a zapojit. Rameno Epson C8-A1401S se kotví na hliníkovou základnu pomocí čtyřech vysokopevnostních šroubů M12 dotažených momentem 100 Nm. Robotické rameno komunikuje s řídicí jednotkou RC700 pomocí signálního kabelu. Napájení manipulátoru zajišťuje pomocí napájecího kabelu také řídicí jednotka. Aby se robot mohl pohybovat, musí být do řídicí jednotky zapojen Total Stop jakožto bezpečnostní opatření. Ten slouží pro okamžité vypnutí robota při vzniku nebezpečných situací. Kamera Epson byla pomocí ethernet kabelu zapojena do kamerového systému CV2. Pro extrakci souřadnic odběru pro robotický manipulátor musí být jednotka CV2 pomocí LAN spojena s RC700. Kamerový systém je napájen nezávisle na RC700 pomocí průmyslového zdroje o napětí 24 V. Světlo SmartView i elektromagnetické ventily SMC jsou také napájeny z průmyslového zdroje napětí a spínány jsou pomocí digitálních výstupů z jednotky RC700. Schéma zapojení robotické buňky je na obr. 40.



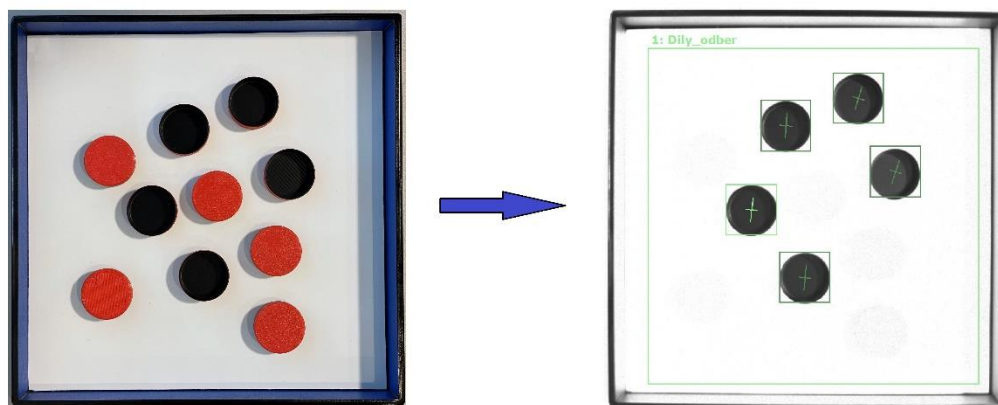
Obr. 40: Schéma zapojení robotické stanice

Pneumatika SMC

Hlavní přínos této práce je návrh fluidikových prvků na stlačený vzduch. Proto kromě zapojení robota, kamery a řídicích jednotek je potřeba zapojit a rozvést i stlačený vzduch. Na centrální přívod vzduchu byl umístěn ručně ovládaný 3/2 ventil SMC VHS-D a filtr s regulátorem tlaku SMC AW20-F02CEH. Po zapojení elektrických přívodů do základny robota bylo na jeho zápěstí umístěno a pneumaticky zapojeno navržené chapadlo. Robot samotný je vybaven vzduchovým vedením uvnitř ramene, kde má dvě separátní cesty. Připojení rozvodných hadic o průměru 6 mm k základně i koncovému efektoru je realizováno pomocí nástrčných spojek SMC-KQ2, jenž jsou integrovány i do navrhovaných fluidních prvků. Rozvody stlačeného vzduchu jsou vedeny polyuretanovými hadicemi SMC řady TU. Proudění do vzduchového nože, fluidních trysek i vakuové přísavky bylo řízeno pomocí elektromagnetických nepřímo ovládaných 5/3 ventilů SY3000-5LOU od společnosti SMC. Elektromagnetické ventily byly spínány pomocí digitálních výstupů z jednotky RC700. Průtok byl pak regulován ručně škrťacími ventily situovanými na přívodních hadicích. Poslední pneumatický prvek byl ejektor SMC ZH10DSA pro tvorbu vakua při odebrání dílu vakuovou přísavkou.

5.3 Implementace strojového vidění

Programování strojového vidění proběhlo na kompletně sestavené robotické buňce. Kvůli efektivnímu rozeznávání správné orientace objektů byla jejich vnitřní strana lakována černou barvou. Pro aplikace CV je žádoucí dosáhnout co největšího kontrastu mezi zájmovou oblastí a okolní scénou. Po propojení PC s jednotkou CV2 se v rozšíření *Vision Guide* zobrazuje aktuální obraz z kamery. Na snímanou scénu se aplikuje sekvence obrazových transformací, jejímž cílem je v tomto případě získat souřadnice všech správně orientovaných dílů. Algoritmus transformační sekvence je tvořen pomocí blokového programování.



Obr. 41: Snímaná scéna. Vlevo pohled kamery. Vpravo zpracovaný obraz

Nejdříve se v sekvenci nastavila horní i dolní prahová hodnota pro binarizaci obrazu. Tímto se snímek rozdělil na černé zájmové oblasti, které představují správně

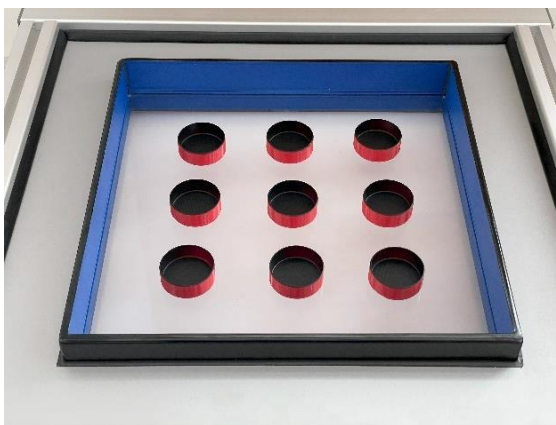
orientované díly a bílé pozadí. Následně se v sekvenci hledal blob, což je jakýkoliv shluk pixelů s podobnou jasovou hodnotou. Příkaz blob ohraničí všechna pole zájmu a do jejich těžiště umístí bod. Tyto objekty lze následně řadit podle mnoha kritérií. Nejčastěji se jako první odebírají díly ležící nejbliže ke koncovému efektoru robotu, čímž se minimalizuje čas cyklu. Obraz zpracovaný touto sekvencí lze porovnat s obrazem reálné kamery na obr. 41. Souřadnice nalezených bodů v ose X a Y jsou na konci sekvence exportovány do jednotky RC700.

Druhá sekvence sloužila jako bezpečnostní opatření. Po binarizaci snímku bylo pomocí prohledávání v polárních souřadnicích kontrolováno, zda se všechny díly na podložce nachází uvnitř kruhu o průměru 165 mm. Pokud tomu tak nebylo, došlo k opětovnému spuštění vzduchových nožů.

Propojení hlavního programu SPEL+ se strojovým viděním je zajištěno pomocí příkazů *VRun* a *VGet*. *VRun* spustí naučenou sekvenci pro zpracování obrazu a *VGet* z této sekvence extrahuje souřadnice polohovaného dílu v globálním systému.

5.4 Praktické experimenty

Po zapojení robotické buňky se nejprve zkalibroval robot i kamera. Kalibrace robota je rychlá a jednoduchá, uživatel je vyzván k najetí na referenční bod z několika stran. Následná kalibrace kamery je zcela automatická. Stačí rozmístit na podložku 9 odebíraných dílů dle obr. 42, a robot si lokální souřadnice kamery během několika minut určí sám. Jelikož statická kamera posílá robotu souřadnice pro odběr dílů, musí její kalibrace být naprosto přesná. Pokud však kamera slouží jen ke kontrole kvality či čtení čárových kódů, kalibrovat se nemusí.



Obr. 42: Rozmístění odebíraných objektů pro kalibraci kamery

Pro nahrání SW do řídicí jednotky se pomocí USB-A konektoru připojil počítač k řídicí jednotce robota. Pomocí SW připraveného v digitálním dvojčeti proběhlo testování navrženého řešení ve smyslu pick and place aplikace. Hlavní důraz byl při experimentech kladen na funkci vzduchového nože a prstence s oscilačními tryskami.

Na odebírací desku bylo na začátku cyklu ručně rozmístěno 5 dílů s náhodnou orientací. Tyto díly ve výrobě na podložku dopadají z dopravníků nebo skluzů, také s náhodnou orientací. Pro testování správné funkce vzduchového nože byly díly rozmístěny po podložce tak, aby ležely blíže k bočnicím než ke středu desky. Sepnutím elektromagnetického ventilu začal proudit vzduch do nožů a odebírané díly se pod působením laminárního proudění seskupily doprostřed podložky. Pokud doba sepnutí nože byla moc krátká a průtok nebyl omezen škrtícím ventilem, lehčí díly se uprostřed desky srazily a odrazily se zpět směrem k bočnicím. Následně bylo kamerou ověřeno, zda se všechny díly nachází uvnitř kruhu o průměru 165 mm, aby nedošlo ke kolizi při dosednutí prstence na odebírací podložku. Jestliže nebyly všechny díly uvnitř kruhu, došlo k opětovnému sepnutí vzduchových nožů.



Obr. 43: Testování na robotické buňce

Prstenec umístěný na robotickém manipulátoru poté dosednul na podložku a spustil se cyklus víření dílů. Po ukončení cyklu víření manipulátor s chapadlem opustil scénu kamery a sejmul se aktuální snímek polohy dílů na odebírací desce. Byla vyhodnocena jejich orientace a u správně natočených dílů proběhl výpočet souřadnic pro odběr. Na závěr pick and place cyklu byly vybrané díly odebrané manipulátorem pomocí jednoduchého chapadla s vakuovou přísavkou. V reálném provozu by byla integrována automatizovaná výměna nástrojů robotického manipulátoru. Pro potřeby testování stačilo chapadla měnit mezi cykly manuálně. Testování navrženého fluidikového řešení na reálné robotické buňce zobrazuje obr. 43.

Sledováno bylo, jak vzduchový nůž a oscilační trysky reagují na různé typy polohovaných dílů. Tvar a materiál odebíraných dílů nebyly voleny náhodně. Vycházelo se z výrobních aplikací úspěšně realizovaných společností Opticontrol s.r.o. Ve všech těchto aplikacích byl k polohování dílů použit vibrační stůl AIVE či Asycube. Ačkoliv zadání specifikuje polohování drobných dílků, pro odhalení možných slabín řešení a stanovení bodů dalšího vývoje byly testovány i rozměrnější a kovové předměty.

5.5 Výsledky

Po testování proběhla evaluace výsledků získaných na robotické buňce. První část je zaměřená na reálnou funkci vzduchového nože integrovaného do bočnic. V druhé části je pak evaluována funkce oscilačních trysek. Jako poslední je vyčíslená celková cena navrženého řešení. Nutno podotknout, že se jedná pouze o výrobní náklady.

Vzduchový nůž po odladění nedostatků vzniklých aditivní výrobou fungoval bezchybně. Díky vývodu umístěnému těsně nad odebírací místo dokázal nůž polohovat všechny testované díly. Bylo potřeba jen pro každý typ odebíraného dílu vyladit dobu působení laminárního proudění a průtok do nožů. Funkčnost navržených vzduchových nožů integrovaných do bočnic tak byla úspěšně experimentálně ověřena.

Během testování prstence s integrovanými oscilačními tryskami bylo objeveno několik úskalí. Pro plastové díly vysoké alespoň 10 mm fungovalo polohování velmi dobře a spolehlivě. Bylo však pozorováno, že některé ploché a tenké plastové díly je problém zvednout z podložky a vířit pomocí trysek. Tento problém byl eliminován při umístění dílů na odebírací desku s jemně zrnitým povrchem. Díky nerovnostem zrnitého povrchu mohlo vířivé proudění jednoduše vniknout i pod tyto díly, a nakonec také došlo k jejich polohování. Byla tedy vyrobena deska se zrnitým povrchem, která se v případě potřeby umístila na hladké plexisklo. I vibrační stoly nabízejí různě tvarované vložky do odebíracích platforem, pro usnadnění polohování určitých typů dílů.

Synchronizace trysek byla také úspěšně experimentálně ověřena. Ve výzkumu [9] se asynchronní chování více trysek projevilo proměnlivými výsledky během testování s konstantními podmínkami. Prstenec během testování vykazoval konstantní chování, což potvrdilo význam proběhlých CFD simulací. Nakonec se tedy podařilo polohovat všechny testované plastové díly a úspěšně validovat funkci navrženého prstence s oscilačními tryskami pro polohování dílů.

Produkt	Množství [ks]	Cena [€]
Fluidikové řešení	1	177
Minitec profily	6	49
Bond	5	9
Plexisklo	2	12
SMC SY3000-5LOU	3	357
SMC ZH10DSA	1	59
SmartViewBL-230-4SA	1	1199

Tabulka 2: Vyčíslení celkové ceny navrhnutého řešení

Je nutné vyčíslit celkovou cenu fluidikového řešení. Cenový rozpis je v tabulce 2. Celková cena je 1862 €, neboli 46.200 Kč. Je zde zahrnuta i cena kupovaných dílů od společnosti SMC a SmartView, kde použité zadní podsvícení je nejdražší položkou. Tyto díly jsou však potřebné pro automatizaci navrhnutého řešení ve stejném smyslu jako nabízí vibrační stoly AIVE a Asyril. Nelze počítat jen s výrobní cenou fluidního řešení, bez přídatných automatizačních prvků by nedosahovalo požadované funkcionality.

6 SROVNÁNÍ NAVRHOVANÉHO ŘEŠENÍ

Po stavbě a experimentální validaci navrženého řešení je důležité výsledky kvantifikovat a porovnat s nyní používanými produkty pro polohování dílů. V následujícím textu proběhlo srovnání klíčových vlastností vibračních stolů a navrženého řešení.



Obr. 44: Srovnání navrženého řešení a vibračního stolu

Pro celou škálu plastových výrobků funguje fluidikové řešení stejně, jako komerčně dostupné vibrační podavače AIVE a Asyрил, což bylo hlavním cílem této práce. Obr. 44 zobrazuje srovnání velikosti nahrnutého řešení a vibračního stolu AIVE. Fluidikové řešení má navíc větší rozměry odebírací platformy.

U navrhovaného řešení uživatel nastavuje průtok přívodními hadicemi do prstence i bočnic. Podobně je však potřeba pro každý díl definovat amplitudu a frekvenci kmitání u vibračních stolů AIVE a Asyрил. V tomto ohledu jsou obě možnosti ekvivalentní.

Nejdůležitější je hned po správné funkci cena. V tomto ohledu je navržené řešení naprosto bezkonkurenční, jelikož je vyráběné aditivně a neobsahuje žádné pohyblivé mechanismy. Jediná elektronika jsou pneumatické ventily ovládající přítok stlačeného vzduchu a externí osvětlení. Tyto přídatné prvky slouží pro automatizaci navrženého řešení. Funkce polohování dílů je na nich nezávislá. Některé aplikace lze navíc vyvinout i s levnějším osvětlením.

Z absence elektromechanického pohonu vyplývá také vynikající spolehlivost navrženého řešení. Vibrační stoly i bubnové podavače obsahují spoustu mechanických i elektronických součástí nezbytných pro funkci polohování dílů. Stejně jako robotické manipulátory tak časem vyžadují servis a náhradní díly, což jsou další náklady.

Jedním z hlavních požadavků při vývoji robotických řešení je co nejkratší čas jednoho cyklu robota. V tomto ohledu navržené řešení zaostává za vibračními stoly. Řešení časového problému integrováním fluidních trysek do bočnic odebíracího prostoru je diskutováno v další kapitole.

Stlačený vzduch je nejdražší forma energie v průmyslových závodech. Během školení AirPraxis od společnosti SMC byla několikrát zdůrazněna snaha o vývoj energeticky úsporných pneumatických řešení. Zařízení pro polohování dílů však operuje

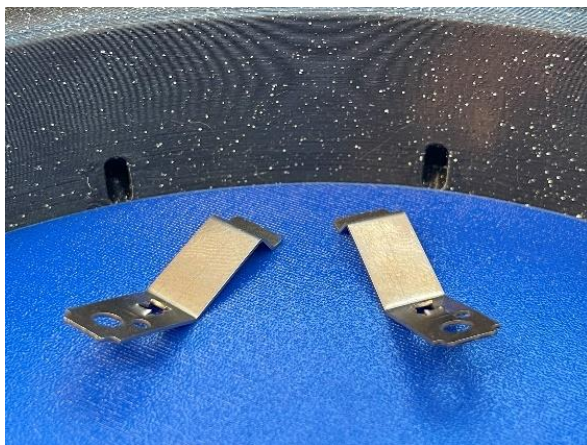
pouze zlomek z celkového času cyklu v pick and place aplikacích. Nicméně je důležité do srovnání zakomponovat i rozdíl ve spotřebě elektrické energie mezi fluidikovým a vibračním řešením. Asyriil Asycube spotřebuje na hodinu provozu robota 20 W elektrické energie a jeho roční provoz stojí 750 Kč. Navrhnuté řešení pak spotřebuje na hodinu provozu robota 140 W elektrické energie spotřebované pro výrobu stlačeného vzduchu. Roční provoz by tak stál 5.250 Kč. Vůči rozdílu pořizovacích cen je nevýhoda fluidikového řešení naprosto zanedbatelná. Trvalo by desítky let nepřetržitého provozu, než by provozní náklady navrhovaného řešení začaly hrát významnější roli.

Při pozicování plastových součástí navrhnuté řešení obsahuje veškerou funkcionalitu pro polohování dílů, jakou nabízejí komerčně dostupná řešení AIVE či Asyriil. Celkový návrh fluidikového řešení je o 81 % méně nákladný.

6.1 Další vývoj

Na základě pozitivních výsledků dosažených při polohování plastových dílů a ceně navrhnutého řešení bylo rozhodnuto o pokračování vývoje fluidních prvků nad rámec této diplomové práce. Během testování bylo objeveno hned několik bodů budoucího vývoje.

Ačkoliv při prvotním zadání této práce šlo o ověření funkcionality na drobnějších plastových dílech, je zde potenciál vřít i drobnější plechové součástky. Vývody oscilačních trysek byly při polohování kovových dílů příliš vysoko od povrchu odebírací desky. Turbulentní proudění z trysek tak nemělo dostatečnou sílu, aby z podložky zvedlo i kovové díly. Výška vývodu trysek byla však dána rozmístěním trysek v prstenci a jeho umístěním na robotické rameno. Nešlo tedy vývody trysek v navrhnutém řešení posunout více dolů. Pokud by se však fluidické trysky podobně jako vzduchový nůž integrovaly do bočnic, bude jejich vyústění těsně nad povrchem odebírací plochy.



Obr. 45: Testované vyvýšení platformy polohovaných předmětů

Výrobou jednoduché desky zvyšující odebírací plochu se prokázalo, že tato úprava by prstenci dodala dostatečnou sílu pro rozvření drobnějších kovových předmětů, jako jsou například menší plechové krytky, kontakty, či úchyty. Detail úpravy je na obr. 45. Nůž by se pak ale musel segmentovat, aby uvolnil místo fluidním tryskám. Integrací

trysek do bočnic by se navíc snížil čas jednoho cyklu robota, jelikož by kamera pořídila snímek ihned po skončení víření součástek. Nemuselo by se tak čekat až manipulátor s prstencem opustí snímanou plochu a kamera uvidí na odebírané díly. V simulačním prostředí tato změna zkrátí dobu cyklu o 6 s. Touto změnou by vibrační stoly i navrhnuté řešení byly časově téměř ekvivalentní.

Při integraci trysek do bočnic by nad vířícím prostorem již nemohlo být plexisklo zabraňující nechtěnému úniku polohovaných dílů do okolního prostoru. Nad odebírací místo by se musel umístit pojízdný kryt ovládaný pneumatickým pístem, který by během víření zamezil úniku polohovaných dílů do okolí. Dalším řešením by bylo integrovat druhý vzduchový nůž a jeho vývod situovat těsně pod horní okraj bočnice. Tento nůž by pak tvořil vzduchovou záclonu nad prstencem a zabraňoval uniknutí dílů mimo prstenc.

Zajímavé by také bylo vytvořit program pro použití elektrického regulátoru průtoku stlačeného vzduchu. Například typ IN502-44-6 od SMC nabízí komunikaci skrze I/O link. Pomocí již používaného strojového vidění by pak vyvinutý program s integrovanou neuronovou sítí sledoval, jak na daný průtok reagují polohované díly a upravoval množství dodávaného vzduchu pro co nejlepší výsledek. Odpadla by tak manuální kalibrace.

Jako poslední by úpravou mohl projít vzduchový nůž. Ačkoliv fungoval výborně, bylo u finálních výtisků potřeba v některých místech výstupní otvor upravit skalpelem. Otvor byl cíleně co nejvíce zmenšen, aby se využilo potenciálu objemového zesilovače. Při úzkém vyústění stačí sebemenší nerovnost na tiskové podložce, aby se projevila deformovaným vyústěním nože. Tento problém by se mohl eliminovat rozdělením nože na dva díly šroubované dohromady. Vyústění plnicí komory by tak nebylo zatížené na tiskové chyby. Vznikla by pak ale otázka, jak spolehlivě utěsnit plnicí komoru skládající se ze dvou dílů.

7 ZÁVĚR

Hlavním výstupem této diplomové práce byl návrh, vývoj a realizace fluidních prvků nahrazujících vibrační stoly a podavače ve smyslu polohování orientovatelných dílů. Navrhnuté řešení bylo následně experimentálně testováno pomocí pick and place aplikace v robotické buňce, kde se polohování dílů uplatňuje nejvíce.

Jako první proběhla rešerše momentálního trendu mezi komerčně dostupnými zařízeními pro polohování orientovatelných dílů. Probrány byly i prototypy snažící se optimalizovat výrobní cenu při zachování funkcionality vibračních polohovacích zařízení. Během rešeršní části fluidikových prvků bylo zjištěno, že ačkoliv fluidický oscilátor je dobře známá a rozšířená věc, nikdy nebyl použit pro víření a polohování dílů ve smyslu náhrady vibračních zařízení.

Druhá část byla zaměřena na vývoj navrhovaného fluidikového řešení. Drobné geometrické odlišnosti od modelů diskutovaných v rešerši byly validovány pomocí CFD simulací i experimentů. Na základě poznatků ze simulací proudění proběhl vývoj prstence se synchronizovanými oscilačními tryskami a bočnic s integrovaným vzduchovým nožem. CFD simulace šetřily čas a materiál, kterého by se při čistě experimentálním vývoji spotřebovalo mnohonásobně více. Výrobní prototypy tak sloužily jen pro eliminaci tiskových omezení a ověření simulačních výsledků. Během vývoje byly dosažené výsledky a navrhované úpravy průběžně konzultovány se zadavatelem.

Ve třetí části proběhla tvorba digitálního dvojčete ve vývojovém prostředí Epson RC+. Nejprve bylo potřeba navrhnout CAD model celé robotické buňky v programu Solid Edge. Před samotným modelováním bylo potřeba zvolit robotický manipulátor a jeho řídicí jednotku, konfigurovat strojové vidění Epson CV2 a rozmyslet prostorové rozložení robotické buňky. Hotový model se importoval do simulačního prostředí RC+, kde proběhla validace funkčnosti navrhnuté robotické buňky.

V poslední části proběhla výroba navrhnutých fluidních prvků a stavba robotické stanice přesně podle digitálního dvojčete. Po kalibraci robota proběhlo reálné testování navrhnutého řešení v robotické pick and place aplikaci. Hlavní důraz byl kladen na schopnost navrhnutého fluidikového řešení polohovat různé typy dílů. Na základě výsledků z experimentů bylo fluidikové řešení porovnáno s vibračním polohovacím zařízením.

Navrhnuté fluidní řešení se podařilo úspěšně otestovat na reálné robotické stanici ve smyslu pick and place aplikace. Během práce se potvrdil význam CFD simulace, která významně usnadnila návrh fluidních trysek a vzduchového nože. Stavbu robotické buňky velmi urychlilo digitální dvojče, kde se odladil pohyb robota i strojové vidění. Výsledkem této práce je funkční fluidikové řešení pro polohování drobnějších orientovatelných součástí schopné vykonávat funkcionality vibračních stolů. Toto řešení je naprosto spolehlivé a přináší finanční úsporu 81 %.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *AIM. THE MOST PRECISE CONVENIENT IN THE WORLD*. Online. 2024. Dostupné z: https://aim-fa.com/en_us/parts-feeder/. [cit. 2024-02-03].
- [2] *Mastering Efficiency: AIVE Flexible Feeder System [video]*. Youtube [online]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=W-yTeyyJGCU>. [cit. 2024-02-06].
- [3] ŘÍHA, Zdeněk. *Fluidický ostříkovač: zkrácená verze PhD Thesis*. Vědecké spisy Vysokého učení technického v Brně. Brno: Vysoké učení technické, 2002. ISBN 80-214-2140-1.
- [4] M. SCHAEDEL, Herbert. *Fluidische Bauelemente und Netzwerke*. Německo: Lengericher Handelsdruckerei, 1979. ISBN 3-528-08423-5.
- [5] *Air Knives*. Online. FHT GROUP. PneuParts. 2017. [cit. 2024-03-12]. Dostupné z: <https://www.pneuparts.com/en/article/airknife>.
- [6] I. JAKSIC, Nebojsa a P. MAUL, Gary. *EMPIRICAL STUDY OF AIR-JET FORCES IN ACTIVE VIBRATORY BOWL FEEDER TOOLING*. 1971 Neil Avenue Columbus, OH 43210, USA: The Ohio State University, 2000.
- [7] SUNDSTRÖM, Elias a N. TOMAC, Mehmet. Aeroacoustic Characteristics of a Synchronized Fluidic Oscillator. Online. *Flow, Turbulence and Combustion*. Roč. 2020, s. 61-77. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10494-020-00193-3>. [cit. 2024-03-18].
- [8] N. TOMAC, Mehmet a W. GREGORY, James. Phase-Synchronized Fluidic Oscillator Pair. Online. *AIAA JOURNAL*. Roč. 2019, č. 57, s. 670-681. Dostupné z: <https://doi.org/10.2514/6.2013-2474>. [cit. 2024-03-19].
- [9] C.LIN, John; Y. ANDINO, Marlyn; G. ALEXANDER, Michael; A. WHALEN, Edward; A. SPOOR, Marc et al. An Overview of Active Flow Control Enhanced Vertical Tail Technology Development. Online. 2016. Dostupné z: <https://doi.org/10.2514/6.2016-0056>. [cit. 2024-03-19].
- [10] *Coanda Effect*. Online. ScienceDirect. 2024. [cit. 2024-04-11]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/coanda-effect>.
- [11] CALVINO SANMARTÍN, Pedro. *Numerical Study of Three Dimensional Effects on Fluidic Oscillators*. Report. Terrasse, Spain: Escola Tecnica superior d'Enginyeries Industrial i Aeronautica de Terrassa (ETSEIAT), 2015.
- [12] *Epson C8-A140IS*. Online. Opticontrol.cz. 2024. [cit. 2024-04-19]. Dostupné z: <https://www.opticontrol.cz/produkty-a-sluzby/roboty-epson/6ose-roboty/serie-c/c8>.

- [13] *Asycube Flexible Feeder*. Online. Asyril. 2024. [cit. 2024-04-22]. Dostupné z: <https://asyril.com/en/products-and-plugins/asycube/>.
- [14] *Vibratory bowl feeder*. Online. Fraensengineering. 2023. [cit. 2024-04-22]. Dostupné z: <https://fraensengineering.com/vibration-bowl-feeder-system/>.
- [15] *Vzduchové nože MOS*. Online. MOS pneumatics. 2024. [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: <https://www.mos-pneumatics.cz/produkty/vzduchove-noze-mos/>.
- [16] WOSZIDLO, Rene; OSTERMANN, Florian a SCHMIDT, Hanns-Joachim. Fundamental Properties of Fluidic Oscillators for Flow Control Applications. Online. *AIAA JOURNAL*. January 2019, č. 57:3, s. 978-992. Dostupné z: <https://doi.org/10.2514/1.J056775>. [cit. 2024-04-25].
- [17] BAGHAEI, Masoud a M. BERGADA, Josep. Fluidic Oscillators, the Effect of Some Design Modifications. Online. *Applied Sciences*. Roč. 2020, č. 10, s. 2105. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app10062105>. [cit. 2024-04-25].
- [18] *Basler acA2500-14gc*. Online. 2024. [cit. 2024-04-27]. Dostupné z: <https://www.baslerweb.com/en/shop/aca2500-14gc/>.
- [19] *Computar M0814-MP2*. Online. Basler. 2024. [cit. 2024-04-27]. Dostupné z: <https://www.baslerweb.com/en/shop/computar-lens-m0814-mp2-f1-4-f8mm-2-3/>.
- [20] *Kruhové světlo RL-65W-M30.5*. Online. 2024. [cit. 2024-05-01]. Dostupné z: <https://www.smartview.cz/p-kruhova-svetla>.
- [21] EPSON. *Epson Teach Pendant TP3*. Online. 2024. [cit. 2024-05-02]. Dostupné z: <https://epson.ca/For-Work/Robots/Integrated-Options/Epson-Teach-Pendant--TP3/p/R12NZ900N3>.
- [22] *3D printing for automotive industry*. Online. Prusa3d.com. 2024. Dostupné z: https://www.prusa3d.com/applications/3d-printing-for-automotive-industry_232080/. [cit. 2024-05-11].
- [23] *3D printing for healthcare*. Online. Prusa3d.com. 2024. Dostupné z: https://www.prusa3d.com/en/applications/3d-printing-for-healthcare_232354/. [cit. 2024-05-11].
- [24] *Prusa XL*. Online. Prusa3d.com. 2024. [cit. 2024-05-11]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/castecne-sestavena-3d-tiskarna-original-prusa-xl-s-jednou-nastrojovou-hlavou/>.
- [25] *Prusa MK4*. Online. Prusa3d.com. 2024. [cit. 2024-05-11]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/original-prusa-mk4-2/>.
- [26] *Epson IntelliFlex*. Online. Epson. 2024. Dostupné z: <https://epson.com/robots-intelliflex-parts-feeding>. [cit. 2024-05-15].

SEZNAM SYMBOLŮ

m	[g]	Hmotnost
t	[s]	Čas
U	[V]	Napětí
F	[Hz]	Frekvence
M	[Nm]	Kroutící moment
p	[Pa]	Tlak
P	[W]	Výkon

SEZNAM ZKRATEK

CFD	Computational fluid dynamics
CAD	Computer-aided design
GUI	Graphical user interface
CNC	Computer numerical control
FDM	Fused deposition modeling
CV	Computer Vision
SW	Software
AI	Artificial intelligence
PWM	Pulse width modulation
VUT	Vysoké učení technické
PLC	Programovatelný logický automat
STEP	Standard for the Exchange of Product Data
XLV	Extendable Virtual World Description Language
SLA	Stereolitografie

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: OK a NOK díly snímané kamerou	17
Obr. 2: Vibrační stůl AIVE [1]	18
Obr. 3: Vibrační stůl Asycube 240 [13].....	19
Obr. 4: Epson IntelliFlex [26].....	19
Obr. 5: Prototyp vibračního stolu firmy Opticontrol s.r.o.	20
Obr. 6: Stavba vibračního bubnového podavače [6].....	21
Obr. 7: Vibrační bubnový podavač vyrobený 3D tiskem [14].....	22
Obr. 8: Robotické chapadlo pro odběr plastových svorek	23
Obr. 9: Typy fluidikových oscilačních trysek [16]	24
Obr. 10: Tryska se dvěma zpětnovazebními kanálky	24
Obr. 11: Princip Coanda efektu [10].....	25
Obr. 12: Synchronizované fluidní oscilační trysky.....	26
Obr. 13 Řez vzduchovým nožem [15].....	27
Obr. 14: Simulace laminárního proudění ze vzduchového nože [15]	27
Obr. 15: Modifikace vnitřních stěn zaoblením hran. Původní stav vlevo.....	29
Obr. 16: Rozdělení komplexního povrchu trysky na plochy	31
Obr. 17: Strukturovaná výpočetní síť	31
Obr. 18: CFD simulace rychlostního pole proudění	32
Obr. 19: Tlakové pole proudění.....	33
Obr. 20: Vorticitata proudění	34
Obr. 21: Ilustrace 1/2 periody oscilačního proudění v trysce	34
Obr. 22: Rychlostní pole synchronizovaných trysek	36
Obr. 23: Tlakové pole synchronizovaných trysek	37
Obr. 24: Rychlostní pole vzduchového nože	38
Obr. 25: Prototypy sloužící pro kontrolu kvality výroby	39
Obr. 26: Kompletní konstrukce odebírací platformy	39
Obr. 27: Řez finálním návrhem bočnice	39
Obr. 28: Jeden z prvotních prototypů prstence	40
Obr. 29: Finální model prstence s uchycením na manipulátor	41
Obr. 30: Gripper s vakuovou přísavkou.....	41
Obr. 31: Rozměrová zástavba manipulátoru Epson C8-A1401S [12]	44
Obr. 32: Finální CAD model robotické buňky	45
Obr. 33: Sestava kamery, objektivu a kruhového světla.....	47
Obr. 34: Pracovní tablet TP3 během nastavování robotické buňky.....	48
Obr. 35: Pracovní prostředí programu Epson RC+.....	50
Obr. 36: Prusa XL [24]	51
Obr. 37: Prusa MK4 [25].....	51
Obr. 38: Odebírací platforma v Minitec konstrukci.....	52
Obr. 39: Prstenec s fluidními tryskami	52
Obr. 40: Schéma zapojení robotické stanice.....	53
Obr. 41: Snímaná scéna. Vlevo pohled kamery. Vpravo zpracovaný obraz.....	54
Obr. 42: Rozmístění odebíraných objektů pro kalibraci kamery	55
Obr. 43: Testování na robotické buňce	56
Obr. 44: Srovnání navrženého řešení a vibračního stolu	59
Obr. 45: Testované vyvýšení platformy polohovaných předmětů	60

SEZNAM TABULEK

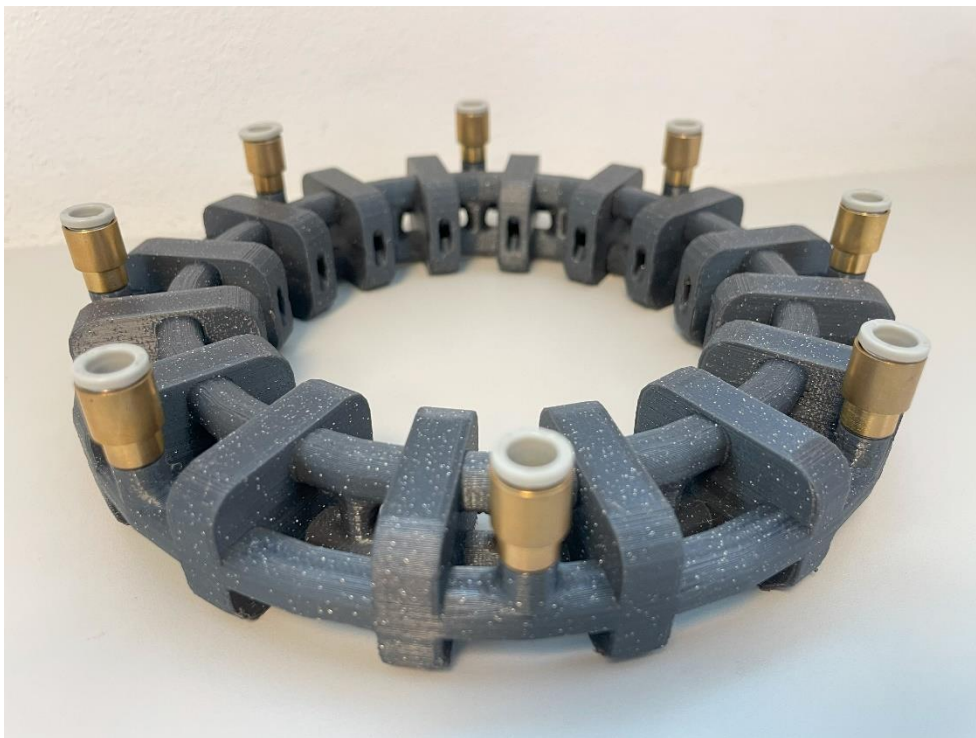
Tabulka 1: Výrobní náročnost navrhnutého řešení + provoz a amortizace.....	52
Tabulka 2: Vyčíslení celkové ceny navrhnutého řešení.....	58

SEZNAM PŘÍLOH

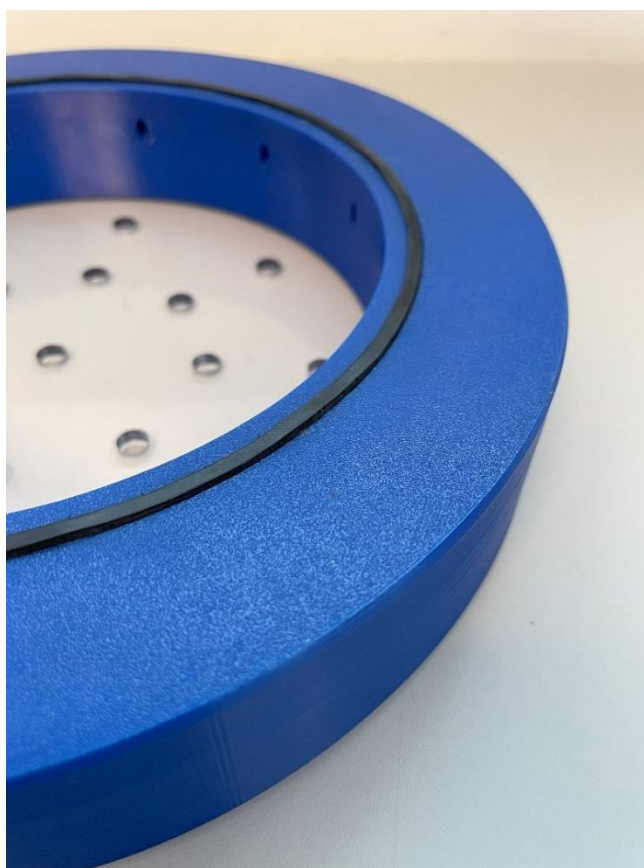
Elektronické přílohy

- Digitální dvojče v prostředí RC+
- CAD modely pro 3D tisk
- Fotodokumentace

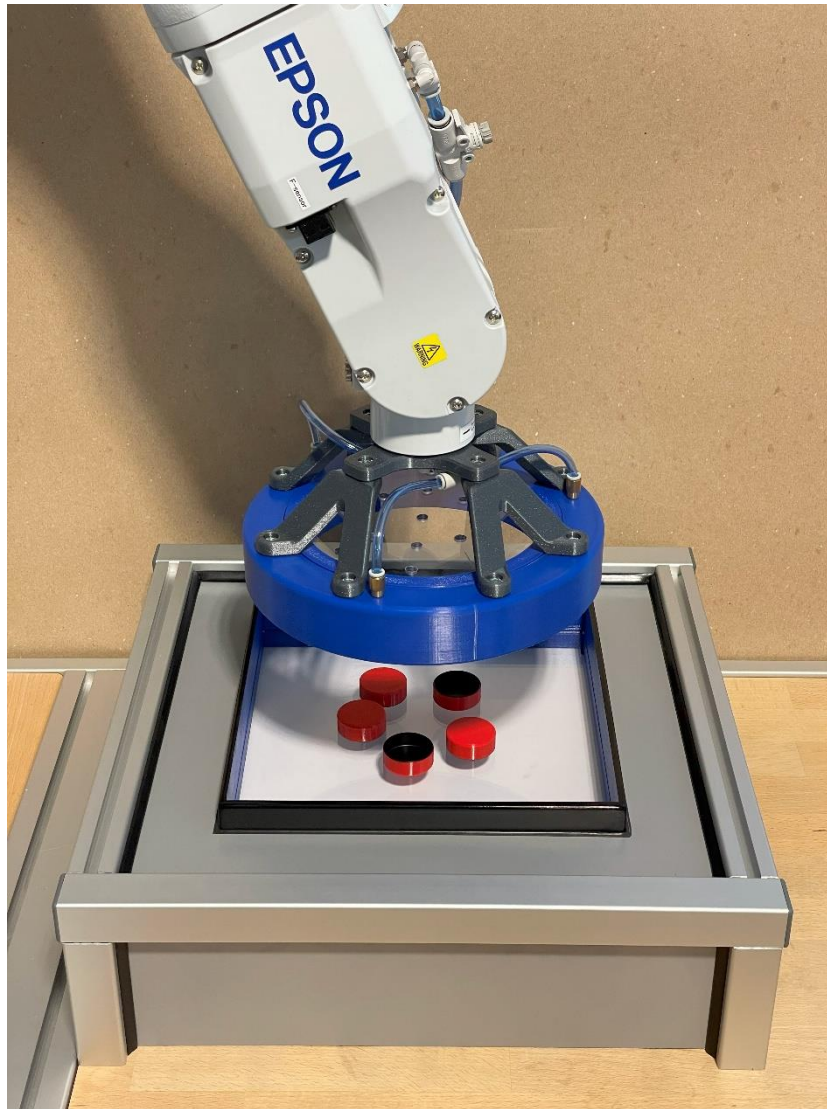
FOTODOKUMENTACE



Obr. 1: První prototyp prstence s oscilačními tryskami



Obr. 2: Gumové těsnění integrované do dosedací plochy prstence



Obr. 3: Detail fluidikového řešení



Obr. 4: Vyrobený koncový efektor robota s vakuovou přísavkou