VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

NÁVRH A VÝVOJ ZAŘÍZENÍ PRO DYNAMICKÉ ZKOUŠKY MATERIÁLŮ S VYUŽITÍM RÁZOVÉHO TLAKU VZDUCHU

DESIGN AND DEVELOPMENT OF EQUIPMENT FOR DYNAMIC TESTING OF MATERIALS USING AIR IMPACT PRESSURE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. Jakub Haša

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. Miroslav Jopek, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2025

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	**Bc. Jakub Haša**
Studijní program:	Strojírenská technologie
Studijní obor:	Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce:	**Ing. Miroslav Jopek, Ph.D.**
Akademický rok:	2024/25

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:

Návrh a vývoj zařízení pro dynamické zkoušky materiálů s využitím rázového tlaku vzduchu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce se zaměří na zkoumání dynamických zkoušek materiálů při vysokých rychlostech deformace, což je důležité pro pochopení chování materiálů při nárazech nebo jiných náhlých zatíženích. Cílem práce bude analyzovat aktuální stav zkoušek v této oblasti, identifikovat problémy spojené s jejich realizací a navrhnout nové řešení v podobě pneumatického kanónu využívající rázový tlak vzduchu při dynamických testech.

Pneumatický kanón bude sloužit k simulaci rázového zatížení materiálů a jeho návrh bude podložen výpočtem, případně numerickou simulací. Po dokončení návrhu bude zařízení sestrojeno a prakticky otestováno. Experimentální část práce se zaměří na vyhodnocení výsledků testování pro konkrétní typ materiálu a na posouzení, zda nově navržené zařízení plní své cíle efektivně a přesně.

Výsledky této práce mohou přispět k optimalizaci testovacích zařízení v oblasti dynamických zkoušek materiálů a k lepšímu porozumění chování materiálů za extrémních podmínek.

Cíle diplomové práce:

1. Provedení rozboru současného stavu dynamických zkoušek materiálů při vysokých rychlostech deformace.
2. Návrh zkušebního zařízení pro dynamický rázový test využívající rázový tlak vzduchu.
3. Konstrukce navrženého zařízení na základě dílčích výpočtů případně numerických simulací.
4. Praktické testování zařízení a provedení dynamických zkoušek na vybraném materiálu.
5. Vyhodnocení výsledků experimentu a zhodnocení funkčnosti nově navrženého zkušebního zařízení.

Seznam doporučené literatury:

MEYERS, Marc André. Dynamic Behavior of Materials. Marc. A. Mayers. 1 edice. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1994. 668 s. A Wiley Interscience Publication. ISBN 0-471-58262-X.

GILLIS, Peter a GROSS, Ted. Effect of Strain Rate on Flow Properties. Metals handbook, 9. edice, roč. 8 – Mechanical Testing. American Society for Metals, Ohio, 1985.

NOWACKI, Wojciech a KLEPACZKO, Janusz. New Experimental Methods in Material Dynamics and Impact. In Trends in Mechanics of Materials. Roč. 3, 2003.

JOPEK, Miroslav. Modelování mechanického chování ocelí za vyšších rychlostí deformace, PhD thesis, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Brno, 2003. ISBN 80-214-2437-0.

JOPEK, Miroslav, MULLER, Samuel a ŘIHÁČEK, Jan. Development of a test specimen carrier for the Taylor anvil test using 3D additive printing technology. 2024-10. INTERNATIONAL JOURNAL OF IMPACT ENGINEERING, Vol. 192.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jan Zouhar, Ph.D. ředitel ústavu	doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zaměřuje na vývoj technicky pokročilého experimentálního zařízení pro simulaci dynamického zatížení pomocí řízeného proudění stlačeného vzduchu. Výsledkem je pneumatický systém s vysokou mírou konstrukční propracovanosti, který umožňuje provádět opakovatelné, směrované impulzní zatížení na zkušební vzorky bez použití výbušnin nebo drahých specializovaných aparatur. Zařízení je modulární, stavěné na profilovém rámu s výměnnými kanóny různých průměrů, plynule nastavitelnou polohou ve všech osách a volitelným úhlovým sklonem výstřelu. Řídicí systém založený na PLC platformě Siemens umožňuje přesné nastavení délky impulzu i provozních parametrů. Součástí práce je rovněž návrh a realizace elektrického podpůrného systému, který zahrnuje robustní transformátory, popsanou kabeláž, oddělené napěťové větve a připravené rozhraní pro další modulární rozšíření.. Celý systém je připraven na budoucí rozšíření a integraci měřicích prvků. Funkčnost zařízení byla ověřena analytickým výpočtem, numerickou simulací a praktickým testováním.

Klíčová slova

akustický dělo, dynamická rychlost vzduchu, rázová vlna, dynamické zatížení, PLC řízení

ABSTRACT

This thesis presents the development of a technically advanced experimental device designed to simulate dynamic loading using controlled compressed air flow. The resulting system is a high-precision pneumatic platform capable of delivering repeatable, directional impulse loads to test specimens without the need for explosives or expensive specialized equipment. The apparatus is modular, built on an aluminum profile frame, and equipped with interchangeable barrels of various diameters. It allows for smooth positioning in all axes, as well as adjustable firing angle. The control system, based on a Siemens PLC platform, provides accurate timing and adjustment of operational parameters. The project also includes the design and implementation of a comprehensive electrical support system featuring robust transformers, fully labeled cabling, separated power branches, and pre-configured interfaces for future modular expansion. The functionality of the system was verified through analytical calculations, CFD simulations, and practical testing.

Keywords

Acoustic cannon, dynamic air velocity, shock wave, dynamic load, PLC control

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HAŠA, Jakub. *Návrh a vývoj zařízení pro dynamické zkoušky materiálů s využitím rázového tlaku vzduchu*. Online, diplomová práce. Miroslav JOPEK (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025. Dostupné z: https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/166213. [cit. 2025-05-14].

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou/diplomovou práci na téma Návrh a vývoj zařízení pro dynamické zkoušky materiálů s využitím rázového tlaku vzduchu vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

Brno, 23.5.2025

Jakub Haša

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Miroslavu Jopkovi Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce. Zároveň patří velké díky mým kolegům z pracovní sféry za materiálovou pomoc. V neposlední řadě musím poděkovat své rodině, přítelkyni a přátelům za jejich trpělivost a pochopení.

OBSAH

Zadání práce
Abstrakt
Bibliografická citace
Čestné prohlášení
Poděkování
Obsah

ÚVOD 9
1 Rozbor zadání 10
1.1 Definice deformační zkoušky 10
2 Současné metody dynamických zkoušek 12
2.1 Split-Hopkinsonův test 12
2.2 Taylorova rázová zkouška 13
2.3 Vysokorychlostní tahová zkouška 14
2.4 Balistické a explozivní testy 15
2.5 Nedestruktivní dynamické zkoušky 15
2.6 Zhodnocení stavu 16
3 Vývoj akustického děla 17
3.1 Konstrukce rámu a nosného roštu 18
3.2 Rozvodová soustava a tělo kanónu 20
3.3 Tělo kanónu 21
3.4 Návrh ovládání a řízení soustavy 23
4 Validace návrhu 25
4.1 Analytický přístup 25
4.1.1 Definice charakteru proudění 25
4.1.2 Dynamický tlak uvnitř kanónu 26
4.1.3 Výpočet dynamického rychlosti v dané vzdálenosti 26
4.2 Skript pro vyhodnocení chování kanónu 29
5 Simulace proudění 30
5.1 Geometrie a okrajové podmínky 30
5.2 Síťování 31
5.3 Nastavení simulace 31
5.4 Výsledky simulace 32
6 Popis a konstrukce akustického děla 34
6.1 Rám a nosné desky zařízení 35
6.1.1 Nosný rám a platforma pro uchycení vzorku 36
6.2 Nosník 37
6.3 Rozvod stlačeného vzduchu 38
6.3.1 Jednocestný ventil 38
6.3.2 Redukční ventil 39
6.3.3 Elektromagnetický ventil 39
6.3.4 Těla kanónů 40

6.3.5 Ostatní komponenty a měření tlaku ... 41
6.4 Elektrická výbava zařízení ... 42
6.4.1 Silový rozvaděč ... 43
6.4.2 Řídící rozvaděč ... 43
6.4.3 Operátorský panel ... 45
6.5 Řídící systém ... 46
6.6 Řídící program ... 47
6.6.1 Obsluha HMI ... 48
7 Praktické měření ... 49
7.1 Kalibrační disk ... 49
7.2 Měřící sestava ... 49
7.3 Proces měření ... 50
7.3.1 Upevnění kalibrační desky ... 50
7.4 Testování dynamické rychlosti ... 51
7.5 Měření odezvy materiálu na rázové buzení ... 53
8 Vyhodnocení konstrukce ... 56
8.1 Prandtlova trubice ... 56
8.2 Tlaková nádoba ... 57
8.3 Změna ventilu ... 57
8.4 Rám pro oboustranné zatěžování ... 58
8.5 Vývěva pro řízenou změnu tlaku v okolním prostoru ... 58
ZÁVĚR ... 59

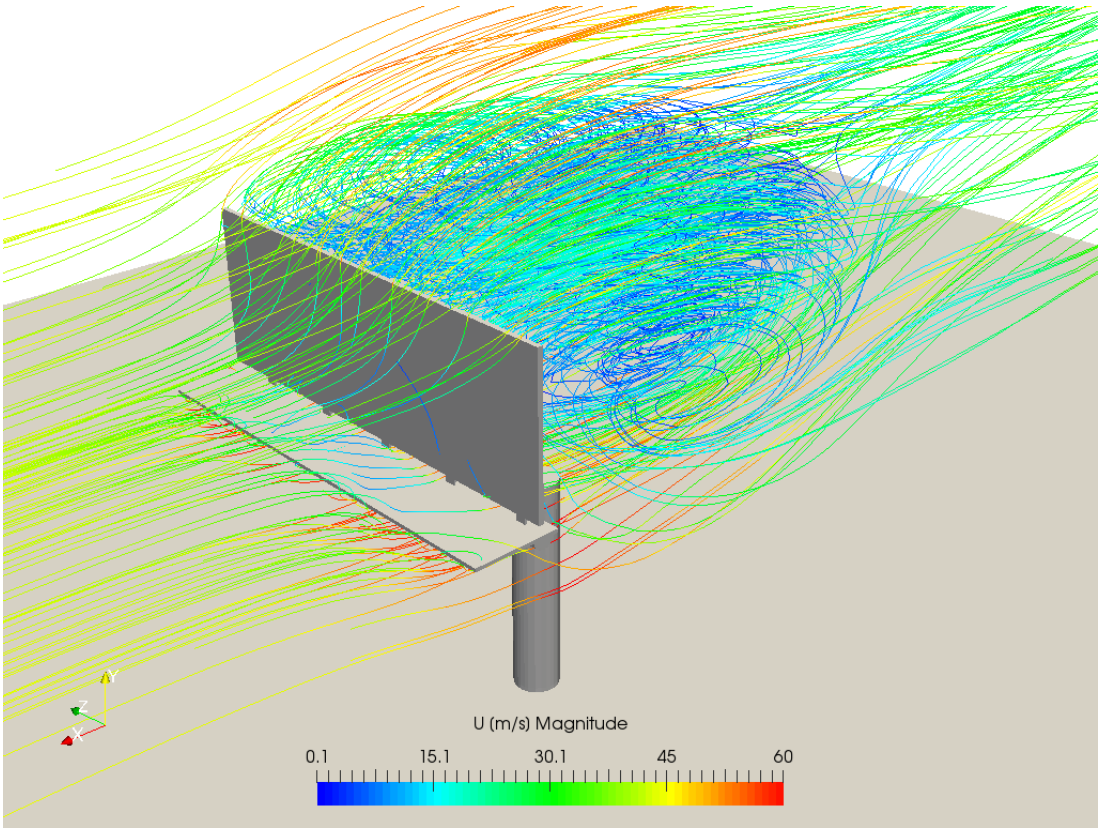
Seznam použitých zdrojů
Seznam použitých symbolů a zkratek
Seznam příloh

ÚVOD

Dynamické zkoušky materiálů představují důležitý nástroj pro pochopení jejich chování při nárazech, explozích nebo jiných rychlých zatíženích. V praxi se tato problematika uplatňuje v celé řadě oborů – od automobilového a leteckého průmyslu až po obranný a stavební sektor. Standardní metody testování jsou však často technologicky i finančně náročné a vyžadují speciální laboratorní zázemí.

Motivací k řešení bylo najít způsob, jak realizovat opakovatelné a směrované rázové zatížení bez nutnosti pracovat s výbušninami, hydraulickými lisy nebo nákladnou měřicí technikou. Zvolen byl princip využití stlačeného vzduchu jako pohonné energie – tedy řešení v podobě pneumatického (akustického) kanónu. Ten umožní vystřelit proud vzduchu proti zkušebnímu tělesu, nebo jiným způsobem přenést impuls, přičemž celý systém je navržen s důrazem na dostupnost, nízké náklady a snadnou konstrukci. Vývoj probíhá s ohledem na běžně dostupné komponenty a možnost sestavení i v méně vybavených podmínkách.

Cílem práce je navrhnout, sestavit a ověřit funkční zařízení, které umožní realizovat základní dynamické zkoušky materiálů při vysokých rychlostech deformace. Systém bude sloužit nejen pro praktická měření, ale i jako otevřená platforma pro další vývoj a experimentování. Výsledky této práce by mohly přispět k širšímu zpřístupnění dynamických testů i mimo vysoce specializovaná pracoviště.



Obr. 1: Simulace billboardu zatíženého povětrnostními vlivy [29]

1 ROZBOR ZADÁNÍ

Zadání práce směřuje k návrhu a praktickému ověření zařízení, které umožní provádět dynamické zkoušky materiálů při vysokých rychlostech zatížení. Cílem není konkurovat specializovaným aparaturám jako jsou Split-Hopkinsonovy tyče nebo balistické laboratoře, ale nabídnout dostupnou alternativu, která bude technicky jednodušší, finančně méně náročná a přitom dostatečně funkční pro základní experimenty.

Zadání je rozděleno do několika částí, které na sebe logicky navazují. Prvním krokem je analýza stávajících metod a principů, které se v oblasti dynamického zatěžování běžně používají. Tato část slouží jako východisko pro návrh vlastního řešení a zároveň jako srovnávací základ pro pozdější vyhodnocení výsledků.

Následuje návrh samotného zařízení využívajícího energii stlačeného vzduchu k vytvoření krátkodobého impulzu. Důraz je kladen na jednoduchost konstrukce, opakovatelnost testů, možnost regulace a přizpůsobitelnost pro různé typy vzorků. Návrh bude; podložen výpočty a numerickou simulací, která pomůže ověřit základní funkčnost.

Další část zadání se týká praktické realizace. Zkonstruované zařízení bude otestováno na srovnávacím vzorku a výsledky měření budou vyhodnoceny s ohledem na stabilitu, opakovatelnost a celkovou funkčnost systému. V závěru práce je očekáváno zhodnocení dosažených výsledků a návrhy na další možné úpravy nebo rozšíření.

Práce je svým charakterem technicky orientovaná a klade důraz na spojení jednoduché konstrukce s praktickou použitelností. Výsledkem by měl být nejen samotný funkční prototyp, ale i metodika, jak s tímto typem zařízení provádět základní dynamické zkoušky materiálů.

Obr. 2: Procesní graf návrhu akustického děla

1.1 Definice deformační zkoušky

Deformační zkouška představuje základní experimentální metodu pro zjištění mechanického chování materiálu při působení vnějších sil, které vedou ke změně jeho tvaru, rozměrů nebo vnitřní mikrostruktury. Tyto zkoušky umožňují stanovit klíčové vlastnosti materiálů, jako jsou pevnost, pružnost, plasticita, houževnatost nebo viskozita, a sledovat jejich vývoj v závislosti na charakteru zatížení. Podle rychlosti deformace se zkoušky dělí na statické, kvazistatické a dynamické.

Statické zkoušky probíhají při velmi nízkých rychlostech zatěžování, obvykle v rozmezí 10^{-5} až 10^{-3} s^{-1}, kdy je materiál zatěžován pomalu rostoucí silou. Tento typ testu je vhodný pro detailní sledování přechodu mezi elastickým a plastickým chováním. Kvazistatické zkoušky probíhají při mírně vyšších rychlostech deformace, ale stále bez setrvačných efektů; často se využívají například při testování viskoelastických materiálů nebo při zvýšených teplotách. [2]

Dynamické zkoušky pak představují zatěžování při vysokých rychlostech deformace, obvykle v rozsahu 10^2 až 10^4 s^{-1}, a slouží k simulaci extrémních podmínek jako jsou nárazy, výbuchy nebo jiné rázové jevy. Při těchto zkouškách dochází často ke změně meze pevnosti, modulu pružnosti i schopnosti materiálu absorbovat energii, což činí tyto testy klíčovými pro oblasti jako je automobilový nebo obranný průmysl. [23]

Během deformační zkoušky se měří odezva materiálu na aplikované zatížení a sledují se veličiny jako napětí, deformace, rychlost deformace, případně i doprovodné jevy jako vývin tepla nebo akustické emise. Výsledkem je obvykle napěťově-deformační křivka, ze které lze vyčíst moduly pružnosti, mez kluzu, mez pevnosti, poměrné prodloužení a další důležité parametry.

Tab. 1: Přehled dynamických zkoušek [1][5]

Rozdělení typu zkoušek dle rychlosti	Časový rozsah [s^{-1}]	Metoda testu	Sledované parametry	Účinek setrvačných sil	Druh testu
Nízká rychlost	0,1 - 1	Kvazistatický test	Rychlost deformace	Nepodstatný	Tahová zkouška
Střední rychlost	1 - 10^2	Rychlejší zatěžování	Mechanická odezva vzorku	Malý vliv	Padostroj
Vysoká rychlost	10^2 - 0^5	Dynamické zatěžování	Šíření napěťových vln	Ovlivňuje výpočet napětí	Hopkinson, Taylor
Velmi vysoká rychlost	> 10^5	Impulsní zatěžování	Šíření rázových vln	Rozhodující vliv	Výbuch

2 SOUČASNÉ METODY DYNAMICKÝCH ZKOUŠEK

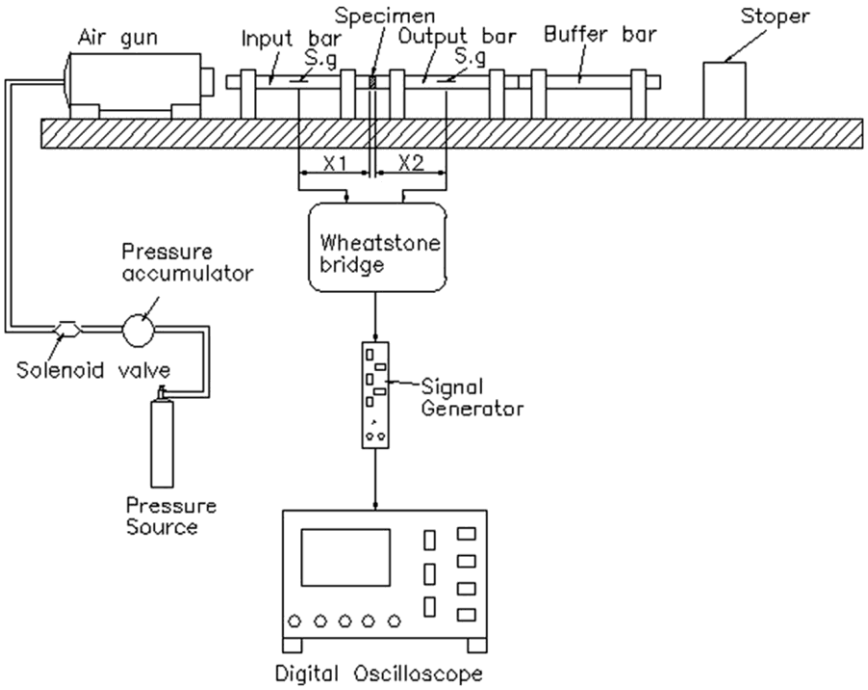
Dynamické zkoušky materiálů slouží k charakterizaci jejich chování při rychle se měnícím zatížení, typicky při nárazových nebo explozivních událostech. V těchto podmínkách se výrazně mění mechanické vlastnosti, jako jsou pevnost, pružnost či schopnost absorbovat energii. Existuje několik hlavních metod, které se liší způsobem zatížení, dosaženými rychlostmi deformace a oblastí použití.[1]

2.1 Split-Hopkinsonův test

Split-Hopkinsonův test je experimentální metoda používaná pro měření mechanických vlastností materiálů při velmi vysokých rychlostech deformace (typicky v rozmezí 10^2–10^4 s^{-1}). Princip testu spočívá ve využití dvou pružných tyčí, vstupní a výstupní, mezi které je umístěn zkušební vzorek . Na jednom konci vstupní tyče je pomocí úderového zařízení (např. rázové tyče nebo pneumatického pístu) generována mechanická vlna, která se šíří skrze vstupní tyč, interaguje se vzorkem a část energie se přenese do výstupní tyče.

Během testu jsou na obou tyčích umístěny tenzometry, které snímají průběh napětí a deformací ve formě napěťových vln. Z těchto údajů lze zpětně vypočítat napětí, deformaci a rychlost deformace vzorku v čase. Výhodou SHPB je relativní jednoduchost měření a vysoká opakovatelnost, stejně jako možnost testovat různé materiály (kovy, polymery, kompozity) při extrémních rychlostech deformace.

Metoda SHPB je široce používaná ve vědeckém výzkumu i průmyslu a slouží jako etalon pro dynamické testování materiálů. Nevýhodou může být složitost přípravy experimentu, omezená velikost vzorku a obtížné testování materiálů s velmi nízkou pevností nebo křehkých struktur.[4][5][3][8]



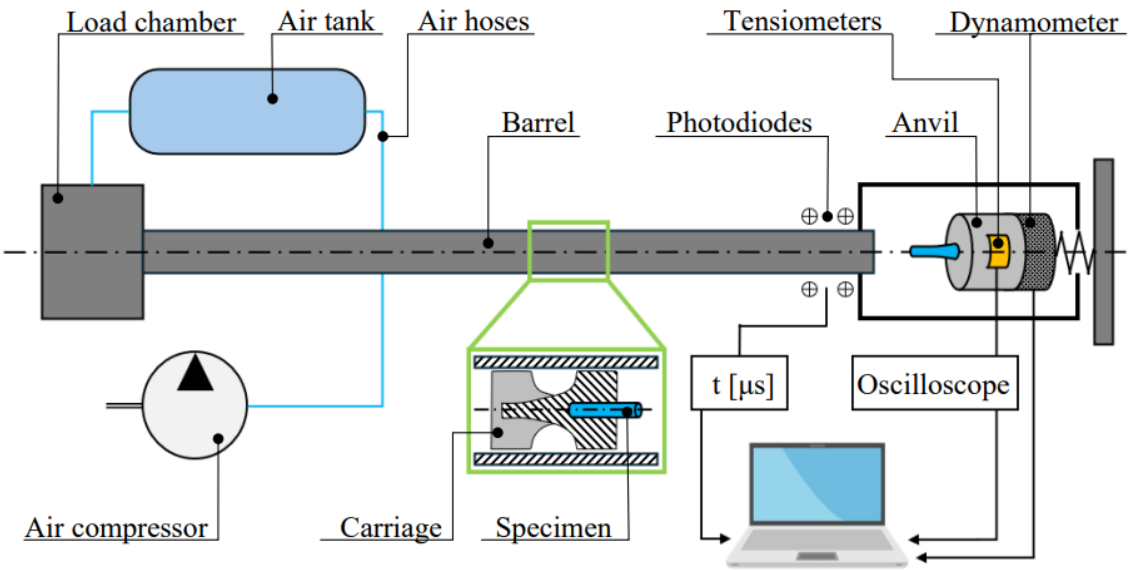
Obr. 3: Experimentální sestava pro Split-Hopkinsonův test [19]

2.2 Taylorova rázová zkouška

Vysokorychlostní tahová zkouška je experimentální metoda určená k analýze mechanického chování materiálů při velmi rychlých deformacích v tahu. Oproti klasické statické tahové zkoušce, kde se vzorek natahuje konstantní rychlostí, se zde uplatňuje zatížení při rychlostech deformace obvykle v rozmezí 10^2–10^4 s^{-1}. Tyto podmínky odpovídají extrémním situacím, jako jsou srážky, výbuchy či balistické nárazy.

Při zkoušce je vzorek obvykle urychlován pomocí speciálního zařízení – například plynového urychlovače, elektromagnetického pohonu nebo pneumatického systému. Urychlený konec vzorku je pevně spojen s pohyblivým členem, zatímco druhý konec je uchycen do pevné části zařízení, čímž dochází k vysokorychlostnímu natahování. Klíčové je přesné měření rychlosti deformace, síly a prodloužení – typicky pomocí optických metod, tenzometrů nebo vysokorychlostních kamer.

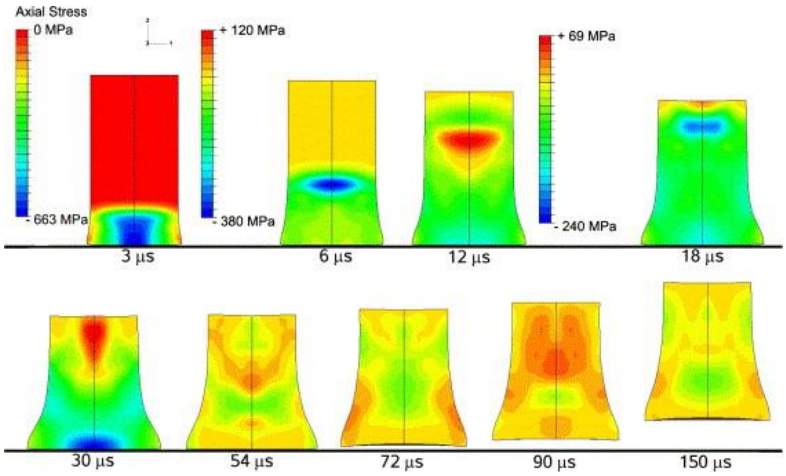
Tato metoda umožňuje sledovat změny v deformačním chování materiálů, jako je například zvýšená pevnost (strain-rate hardening), snížení tažnosti nebo lokalizace plastické deformace. Vysokorychlostní tahové zkoušky se hojně využívají v automobilovém a obranném průmyslu, kde je důležité znát chování konstrukčních prvků při nárazu. [6][7][18]



Obr. 4: Experimentlní sestava pro Taylorův test[20]

Princip testu spočívá v tom, že válec (typicky z kovu) definovaných rozměrů (délka, průměr) je vystřelen vysokou rychlostí proti rigidní a nehybné desce. Po nárazu dochází k silnému zkrácení vzorku, přičemž čelní strana se zploští a zadní část si zachovává původní tvar. Míra zkrácení, tvar čela a deformace po délce vzorku se používají k nepřímému určení mechanických vlastností materiálu, jako je například tokové napětí za vysokých rychlostí deformace.

Tato metoda je jednodušší než SHPB a nevyžaduje složité měřicí vybavení – k analýze postačí změření konečného tvaru vzorku, případně jeho digitální snímkování. Taylorova zkouška je užitečná pro kalibraci konstitutivních modelů materiálů používaných v numerických simulacích, zejména v oblasti balistiky, výbuchů a jiných extrémních zatížení.[7][18]



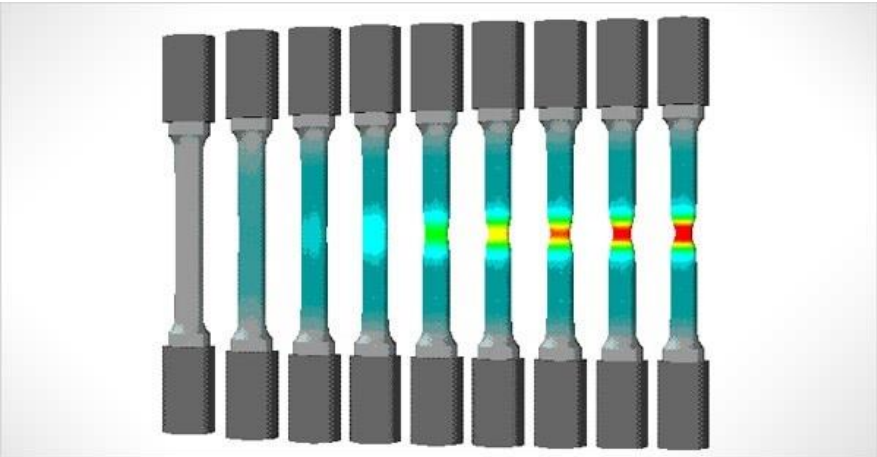
Obr. 5: Průběh tvorby rázové vlny uvnitř materiálu při Taylorově testu [22]

2.3 Vysokorychlostní tahová zkouška

Vysokorychlostní tahová zkouška je experimentální metoda určená k analýze mechanického chování materiálů při velmi rychlých deformacích v tahu. Oproti klasické statické tahové zkoušce, kde se vzorek natahuje konstantní rychlostí, se zde uplatňuje zatížení při rychlostech deformace obvykle v rozmezí 10^2–10^4 s^{-1}. Tyto podmínky odpovídají extrémním situacím, jako jsou srážky, výbuchy či balistické nárazy.

Při zkoušce je vzorek obvykle urychlován pomocí speciálního zařízení – například plynového urychlovače, elektromagnetického pohonu nebo pneumatického systému. Urychlený konec vzorku je pevně spojen s pohyblivým členem, zatímco druhý konec je uchycen do pevné části zařízení, čímž dochází k vysokorychlostnímu natahování. Klíčové je přesné měření rychlosti deformace, síly a prodloužení – typicky pomocí optických metod, tenzometrů nebo vysokorychlostních kamer.

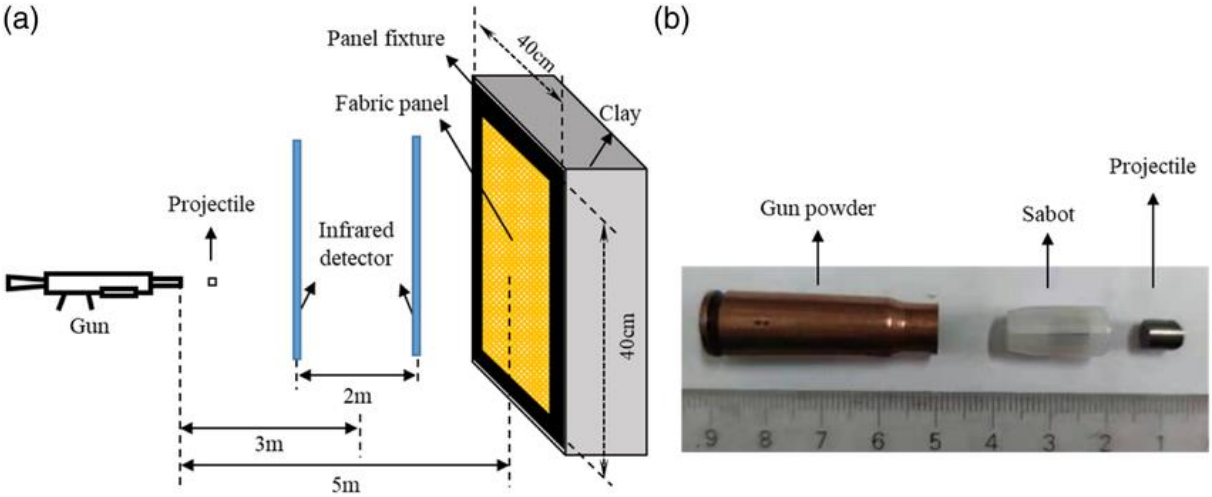
Tato metoda umožňuje sledovat změny v deformačním chování materiálů, jako je například zvýšená pevnost (strain-rate hardening), snížení tažnosti nebo lokalizace plastické deformace. Vysokorychlostní tahové zkoušky se hojně využívají v automobilovém a obranném průmyslu, kde je důležité znát chování konstrukčních prvků při nárazu. [7][9][10][11]



Obr. 6: Proces tvorby krčku při tahové zkoušce [11]

2.4 Balistické a explozivní testy

Balistické a výbušné zkoušky představují specifické formy impulsního zatížení, které se využívají k hodnocení odolnosti materiálů a konstrukcí vůči náhlému působení vysoké energie. Balistická zkouška spočívá ve vystřelení projektilu na zkušební vzorek s cílem simulovat dopad střely a analyzovat průběh deformace, průstřelu, fragmentace a absorpce energie. Měření rychlosti projektilu před a po nárazu umožňuje kvantifikovat úroveň disipované energie v materiálu. Výbušné zkoušky pak využívají detonaci výbušniny ke generování rázové vlny, která působí na vzorek s extrémně krátkým, ale intenzivním tlakem. Tyto zkoušky poskytují důležité informace o dynamické pevnosti, plasticitě nebo lomovém chování materiálu pod extrémním zatížením. Obě metody nacházejí využití zejména v obranném, leteckém nebo civilním inženýrství a slouží jako validační nástroje pro numerické simulace extrémních jevů.[12][16]



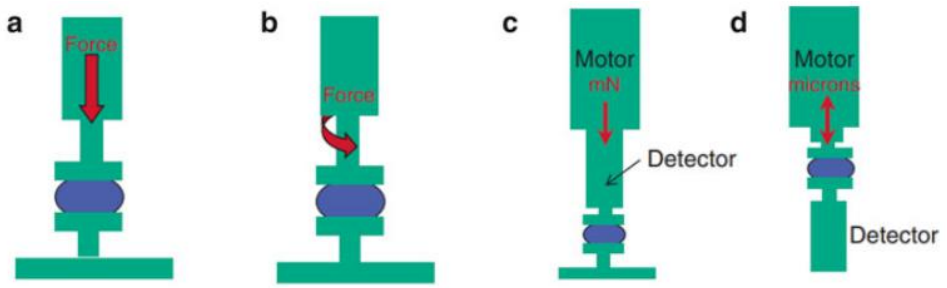
Obr. 7: Balistický test [30]

2.5 Nedestruktivní dynamické zkoušky

Vedle destruktivních metod existují i nedestruktivní nebo kvazi-nedestruktivní techniky, které umožňují sledovat dynamické chování materiálů bez trvalého poškození vzorku. Tyto metody se často využívají tam, kde je požadováno opakované testování nebo zachování vzorku v neporušeném stavu. Mezi klíčové výhody těchto přístupů patří možnost kontinuálního měření a vysoké časové rozlišení.

Jednou z nejčastěji používaných nedestruktivních metod je ultrazvuková pulzní technika, která sleduje změny v šíření akustických vln během dynamického zatížení. Dále se využívají optické metody, například laserová interferometrie (VISAR, PDV), které umožňují detailní měření rychlosti deformace povrchu materiálu. Tyto techniky se uplatňují zejména v kombinaci s jinými metodami při validaci výpočtových modelů.

Další zajímavou možností je elektromagnetické pulzní zatěžování, které bezkontaktně generuje krátké a intenzivní síly pomocí vysokých proudových impulzů. Pro polymerní a kompozitní materiály je vhodná dynamická mechanická analýza (DMA) s vysokofrekvenčním buzením. V neposlední řadě lze zmínit vibrační a modální zkoušky, které umožňují sledovat strukturální odezvu materiálů na krátké impulsy a identifikovat případné změny jejich mechanických vlastností. [13][14][15][17]



Obr. 8: Schéma různých zatěžovacích funkcí zkušebního stroje DMA: (a) axiální zatížení, (b) torzní zatížení, (c) podmínky řízení zatížení a (d) podmínky řízení posunutí [21]

2.6 Zhodnocení stavu

Vzhledem k faktu, že princip rázového tlaku vzduchu v akustickém děle je nejbližší Taylorově rázové zkoušce, nabízí se jako ideální nástroj pro simulaci dynamických nárazových zatížení. Pneumatický kanón umožňuje generovat kontrolované impulzy a nárazy, přičemž je možné sledovat a vyhodnocovat materiálové vlastnosti při těchto vysokorychlostních deformacích bez nutnosti zničení vzorku. Tento přístup je relativně jednoduchý na realizaci, bezpečný a ekonomický, čímž má potencionál se stát efektivním nástrojem pro testování materiálů při dynamických podmínkách.

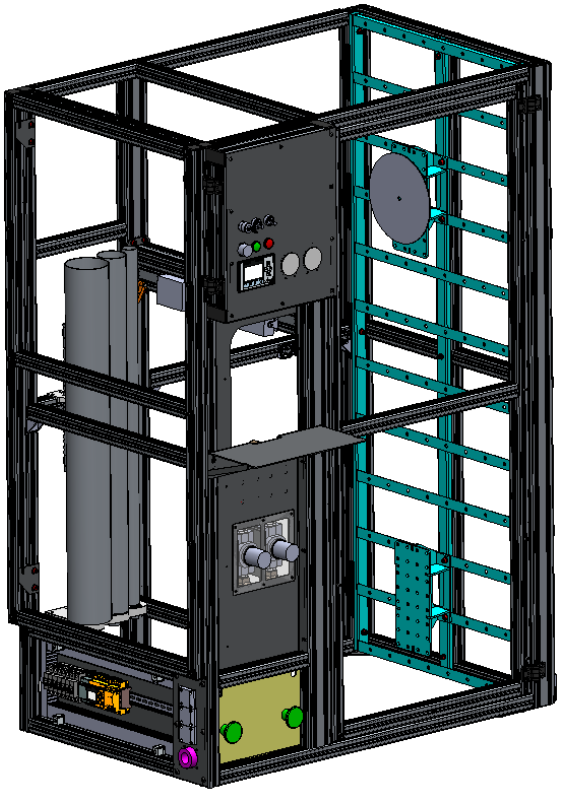
Na rozdíl od metod, jako je Taylorův test nebo Split-Hopkinsonova tlaková tyč, kde dochází k urychlení hmotného tělesa a přímému mechanickému rázu, bude u navrhovaného zařízení generován impulz výhradně proudem stlačeného vzduchu. Lze proto očekávat, že výsledná síla působící na zkušební vzorek bude výrazně nižší v řádu desítek až maximálně stovek newtonů. Z tohoto důvodu je předpoklad, že zařízení bude vhodné především pro testování měkčích nebo plošných materiálů, u nichž lze očekávat dostatečnou odezvu i při nižších úrovních zatížení. Z hlediska geometrie se počítá především s tenkými deskami, fóliemi nebo vrstvenými strukturami, které umožní pozorovat deformaci bez nutnosti extrémní rázové energie.

3 VÝVOJ AKUSTICKÉHO DĚLA

Při vývoji akustického děla pro dynamické zkoušky materiálů je zásadní zohlednit nejen parametry související s generováním tlakových vln, ale i konstrukční, rozvodové a řídicí aspekty celého systému. Hlavním faktorem je tlak vzduchu, který určuje intenzitu generovaného impulzu. Regulace tlaku a kontrola doby otevření ventilu umožňují simulovat specifické rázové zatížení materiálu v požadovaném rozsahu. Na průběh zatížení má významný vliv i objemová geometrie soustavy – zejména profil kanónu, ventilový uzel a délka potrubí, které spolu určují rychlost a charakter proudění.

Při návrhu zařízení je kladen důraz na dosažení opakovatelnosti testů, mechanickou stabilitu konstrukce a možnost rychlých přestaveb. K tomu slouží modulární rám z hliníkových profilů doplněný o pevnou ocelovou základnu, systém nastavitelných uchycení a výměnné kanóny různých průměrů. Dimenzování pneumatické soustavy vychází z požadavku na dosažení kritické rychlosti proudění, přičemž rozvod je navržen jako dvouvětvý okruh zakončený elektromagnetickými ventily a kanóny s přímým výstupem. Celý systém je navržen s ohledem na minimalizaci tlakových ztrát v rámci zařízení a možnost nezávislého řízení obou větví.

Řízení je řešeno pomocí kompaktního PLC systému, které umožňuje jednoduché a intuitivní ovládání i při zachování možnosti rozšíření. Zohledněna je také budoucí elektrická revize – systém využívá běžně dostupné a správně značené komponenty, které odpovídají praxi v oblasti rozvaděčové techniky. Využití vnitřního prostoru rámu pro uložení elektrické výbavy přináší úsporu nákladů i zjednodušení výroby. V celém návrhu je kladen důraz na dostupnost komponent, přehlednost systému, mechanickou robustnost a připravenost na další vývoj.



Obr. 9: Izometrický pohled na CAD model akustického děla

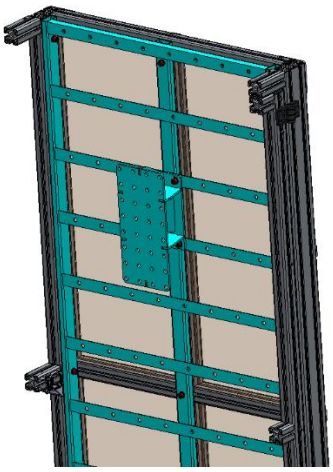
3.1 Konstrukce rámu a nosného roštu

Základ rámu je navržen z hliníkových profilů systému ITEM, které tvoří modulární kostru celého zařízení. Tento rám slouží jako hlavní nosná struktura pro uchycení všech funkčních celků, včetně pneumatického kanónu, vedení rozvodů, elektrických komponent a testovací části. Použití hliníkových profilů umožňuje snadnou montáž, modifikace a případné doplnění dalších prvků, například v oblasti senzoriky nebo měřicích zařízení. [32]

Obr. 10: Přehled profilů a spojovacího materiálu Haberkorn [32]

V rámci ocelové části konstrukce se počítá s pevnou deskou s polem závitových otvorů uspořádaných do pravidelné mříže. Tato deska nahrazuje tradiční rošt a umožňuje variabilní uchycení různých komponent podle potřeby konkrétního testu. Primárně slouží pro montáž dvou výměnných platforem, které budou určeny k uchycení konkrétních zkušebních těles nebo validačních dílů. Obě platformy budou navrženy jako zvýšené, čímž se vytvoří prostor pod vzorkem, který umožní volný průhyb během zatížení a minimalizuje vliv podpěrné geometrie na deformaci materiálu. Toto uspořádání zároveň poskytuje základ pro další rozšíření systému, například doplnění snímačů, jiných platforem nebo alternativních typů upevnění.

Zásadní vlastností uchycení je také schopnost propouštět tlakový impulz vznikající při výstřelu, aniž by došlo k jeho nežádoucímu odrazu nebo deformaci proudění. Pokud by byl vzorek umístěn před kompaktním a těsným podkladem, mohlo by dojít k zpětnému působení rázové vlny a zkreslení výsledků. Z tohoto důvodu je navržen nosný rám s otevřenou strukturou, která umožňuje vzduchu po dopadu volně unikat z oblasti za vzorkem. Tím se minimalizuje ovlivnění samotného procesu deformace a současně se vytváří prostor pro následné pohlcení zbytkové energie.



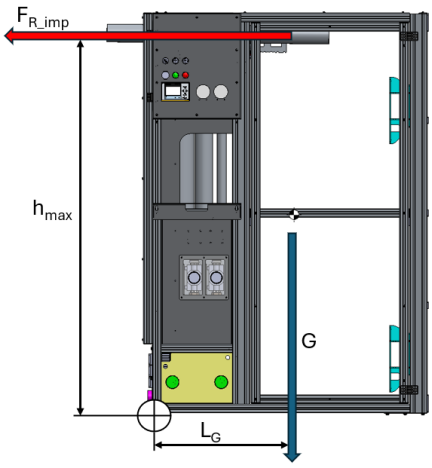
Obr. 11: Pohled na dopadovou stěnu s roštem a platformou

Na různých místech rámu zařízení jsou navrženy ocelové plechy z materiálu S235, které plní konstrukční, montážní i krycí funkce. Plechy jsou uvažovány v tloušťkovém rozsahu 1–5 mm, přičemž volba konkrétní tloušťky závisí na očekávaném mechanickém zatížení a požadavcích na tuhost daného dílu. Tloušťky do 2 mm jsou určeny převážně pro nenosné a krycí aplikace, zatímco plechy o síle 3–5 mm slouží jako výztuhy, montážní základny nebo nosiče komponent. V návrhu byla zohledněna nejen pevnost, ale i výsledné těžiště celého zařízení, aby nedocházelo ke statickému přetěžování rámu v jednotlivých směrech. Všechny plechové díly jsou navrženy jako rovinné nebo s jednoduchým ohybem; technologicky jsou zpracovány pomocí pálení a ohýbání a následně ošetřeny práškovou povrchovou úpravou v béžové barvě (komaxit), která zajišťuje dostatečnou ochranu proti mechanickému poškození i oxidaci. [38][39]

Při konstrukci rámu a rozmístění hmotností je nutné ověřit, zda nedojde k převrácení celého zařízení vlivem zpětné reakce na výstřel (Obr. 12). Tato reakce vzniká v důsledku zákona zachování hybnosti. Tedy stavu, kdy proudící vzduch působí na konstrukci opačně orientovanou silou, která může vyvolat moment překlopení.

$$F_{R_{Imp}} * H_{max} = M_{imp} < M_T = G * L_G \tag{3.1}$$

kde:
M_{imp} – impulsní moment [Nm],
M_T – tíhový moment [Nm],
F_{Rimp} – reakční síla od impulzu [F],
H_{max} – maximální výška středu kanónu [m],
G – tíhová síla zařízení [F]
L_G – vzdálenost těžiště ke klopnému bodu [m].

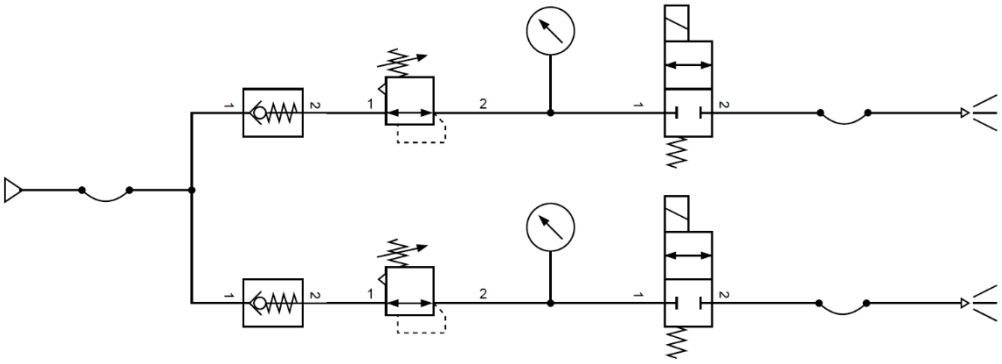


Obr. 12: Momentová rovnováha zařízení při zatížení impulsní silou

Aby nedošlo k převrácení zařízení při výstřelu, musí být moment vyvolaný zpětnou silou menší než stabilizační moment daný vlastní tíhou stanice. Při známé hmotnosti zařízení 240 kg (dle CAD) a těžišti, které se nachází ve vzdálenosti 637 mm od klopné hrany je maximální přípustná reakční síla rovna **F_{Rimp} = 823,4 N**. Při překročení této hodnoty hrozí riziko převrácení zařízení.

3.2 Rozvodová soustava a tělo kanónu

Rozvodová soustava zařízení je navržena jako dvouvětvý pneumatický okruh ve tvaru Y, přičemž každá větev tvoří samostatný funkční celek schopný nezávislého provozu. Každá z těchto větví obsahuje zpětný ventil, regulátor tlaku a elektromagnetický ventil, které umožňují separátní nastavení pracovního tlaku i řízení výstřelu. Tento návrh umožňuje paralelní připojení dvou kanónů, jejich střídání nebo porovnávání výstupních parametrů bez nutnosti demontáže potrubních rozvodů. Celý systém je navržen jako otevřený a snadno rozšiřitelný, s důrazem na jednoduchou obsluhu i možnost budoucího doplnění o další regulační nebo měřicí prvky.



Obr. 13: Pneumatické schéma akustického děla pro 2 hlavně
(zleva: Přívod vzduchu, jednocestný ventil, regulátor tlaku, manometr, 2/2 NO ventil, kanón)

Při návrhu potrubního rozvodu bylo cílem zajistit dostatečný průtok stlačeného vzduchu tak, aby byl při výstřelu k dispozici potřebný objem média bez významných tlakových ztrát. Jako orientační referenční rychlost byla uvažována kritická rychlost proudění vzduchu, **v = 343 m/s** při pokojové teplotě. Pro tuto rychlost lze odhadnout maximální hmotnostní průtok pomocí vztahu:

$$\dot{m}_{max} = \rho * A_{pot} * v \tag{3.2}$$

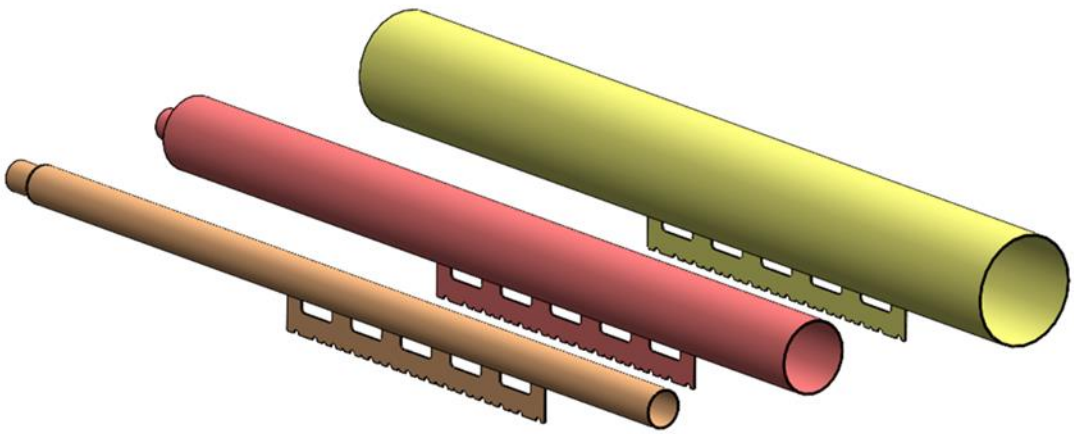
kde: ρ – objem stlačeného vzduchu při tlaku 10b [$kg \cdot m^{-3}$],
A_{pot} – průřez potrubí [m^2],
m_{max} – maximální hmotnostní tok [$kg \cdot s^{-1}$]

Vzhledem k velké rozmanitosti okrajových podmínek a požadavků na trvání impulzu byl finální rozměr volen pragmaticky. Jako cílová světlost potrubí byla zvolena hodnota přibližně 25 mm, odpovídající běžně dostupnému závitovému standardu G1. Tento rozměr tvoří vyvážený kompromis mezi průtočností, kompatibilitou s běžnými pneumatickými komponenty a jednoduchostí montáže.

Výpočtem vychází maximální možný průtok $\mathbf{m_{max}}$ **= 1,97kg/s**, při maximálním tlaku 10 barů.

3.3 Tělo kanónu

Pneumatické kanóny jsou navrženy ve třech variantách z trubky, vyrobého z materiálu AISI 304, odstupňované podle vnitřního průměru. Tím bude umožněno porovnání účinku výstřelu v závislosti na objemu pracovního prostoru a účinné výstupní ploše. Všechny hlavně budou osazeny kompatibilním závitem G1 nebo odpovídající rychlospojkou, což zajistí rychlou výměnu a opakovatelnost měření. Ocelový materiál zároveň zajišťuje dostatečnou pevnost i při vysokém provozním tlaku a je vhodný pro standardní výrobní operace. [40]



Obr. 14: Návrh těla kanónů, odstpňovaných dle velikosti (40; 80; 120mm)

Při proudění vzduchu trubkou dochází k mechanické ztrátě energie v důsledku tření mezi proudící vrstvou a stěnou potrubí. Tato tlaková ztráta je vyjádřena pomocí Darcyho–Weisbachovy rovnice, upravené pro turbulentní proudění s použitím Blasiusova empirického vztahu pro odporový součinitel. Celkový tlakový úbytek ve zvoleném směru proudění je popsán následujícím vztahem. [28][31][41]

$$\Delta p = \lambda * \left(\frac{L}{D_0}\right) * \frac{1}{2}\rho v^2 \tag{3.3}$$

kde: λ – odporový součinitel tření [-],
L – délka trubky [m],
D_0 – vnitřní průměr trubky [m]
ρ – hustota vzduchu [$kg \cdot m^{-3}$]
v – rychlost proudění [$m \cdot s^{-1}$]

Odporový součinitel tření λ byl určen podle Blasiusova vztahu pro turbulentní proudění v hladké trubce [41]

$$\lambda = 0{,}079 * Re^{-0{,}25} \tag{3.4}$$

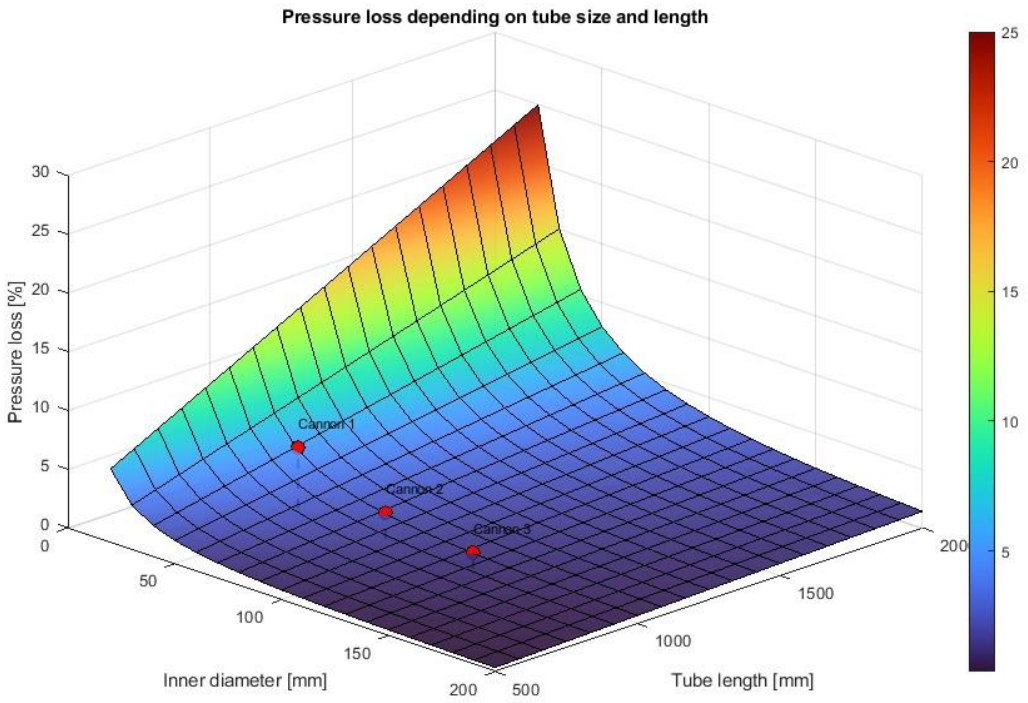
kde: Re –Reynoldsovo číslo [-],

Reynoldsovo číslo je pak dále definováno jako poměr mezi setrvačnými a viskózními silami v proudícím médiu. V tomto případě je očekáváno čistě turbulentní proudění. Pro vnitřní proudění v potrubí je jeho zápis následující. [28][31]

$$Re = \frac{\rho * v * D}{\nu} \tag{3.4}$$

kde: ν –kinematická viskozita média [-],

Výše zmíněné výpočty byly zpracovány v prostředí MATLAB (viz příloha 1), kde byly analytické vztahy implementovány do podoby umožňující výpočet tlakových ztrát v závislosti na vnitřním průměru a délce trubky. Výstupem je prostorová mapa relativních ztrát při sonickém proudění, kde jako normativ byla použita kritická rychlost proudění (343m/s). V grafu jsou navíc vyznačeny všechny tři použité kanóny pro snadné porovnání jejich chování v rámci celé výpočetní oblasti.



Obr. 15: Závislost tlakové ztráty na délce a vnitřním průměru

Z analýzy grafu (Obr. 15) vyplývá, že tlaková ztráta výrazně roste s rostoucím poměrem délky trubky ku jejímu průměru. Jinými slovy, čím je trubka užší a delší, tím vyšší je relativní ztráta energie třením na stěně. Tento efekt je u delších a tenčích kanónů zřetelně dominantní.

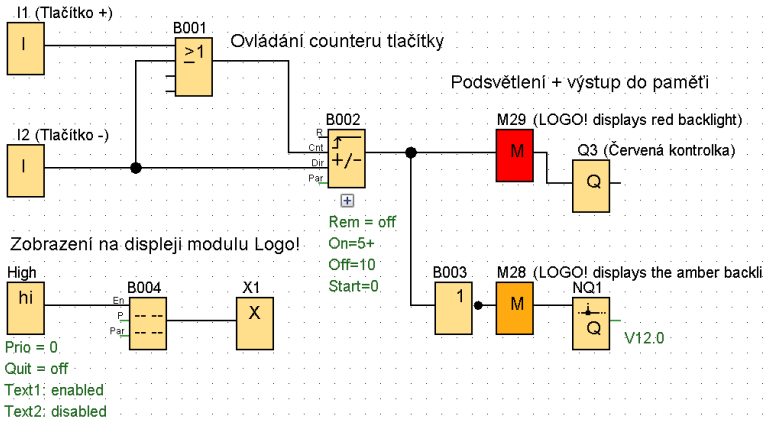
3.4 Návrh ovládání a řízení soustavy

Řízení pneumatického systému je navrženo s důrazem na jednoduchost, spolehlivost a rozšiřitelnost. Cílem je vytvořit systém, který bude cenově dostupný, snadno pochopitelný i pro běžného uživatele, ale zároveň dostatečně flexibilní pro složitější zkoušky. Z tohoto důvodu je zvolena platforma Siemens LOGO!, která představuje ideální kompromis mezi jednoduchostí programování, cenou a technickou funkčností. Na rozdíl od plnohodnotného systému Simatic nevyžaduje hlubokou znalost PLC programování a umožňuje snadné sestavení řídicí logiky pomocí blokového editoru. LOGO! rovněž umožňuje připojení HMI panelu, komunikaci s PC přes Ethernet a případné vzdálené sledování nebo zásah. Tím je otevřena možnost sběru dat, základního záznamu událostí nebo zpřístupnění ovládání přes nadřazený systém. [33] [34]

Obr. 16: Řídící modul Siemens Logo (vpravo), se zdrojem 24VDC (vlevo) [33]

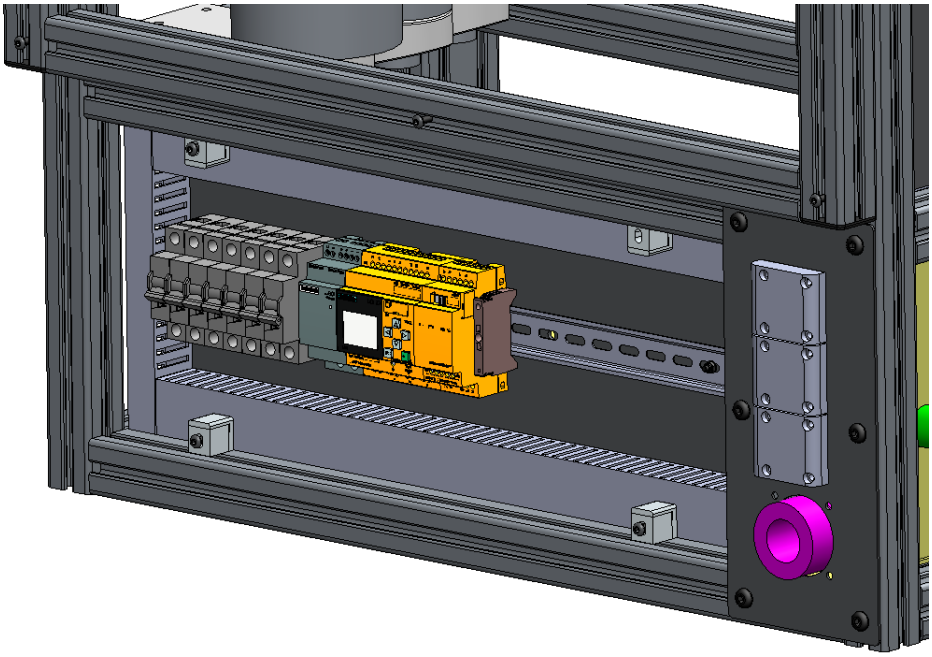
Řídicí logika bude zajišťovat přesné načasování otevření ventilů, možnost definování zpoždění, délky impulzu i sekvenčního řízení více výstupních prvků. To umožňuje provoz jednoho nebo dvou kanónů v různých režimech. Ovládání je navrženo s důrazem na přehlednost a intuitivní obsluhu – uživatel má přímý přístup k parametrům jako je stav ventilů, připravenost systému, počet výstřelů či indikace poruchy. [33] [34]

Celý systém je současně připravován s ohledem na budoucí elektrickou revizi. Vzhledem k ambici zpřístupnit zařízení širšímu okruhu uživatelů je navrženo elektrické řešení, které odpovídá standardní rozvaděčové praxi. V zapojení se počítá s použitím řadových svorek, sběrnicových můstků, standardizovaného značení vodičů i oddělených napěťových větví. Zdroje 24 V AC a 24 V DC jsou dimenzovány s rezervou, aby bylo možné připojit i další zařízení bez zásahu do hlavního rozvodu. [35]



Obr. 17: Ukázka blokového programu pro Siemens Logo! [33]

Tradiční plastové nebo plechové rozvaděče jsou v tomto návrhu nahrazeny hlubokými hliníkovými profily, umožňující dostatečnou instalační hloubku pro většinu elektrických zařízení. Tyto náhrady rozvaděče jsou integrovány přímo do rámu zařízení s ohledem na frekvenci vstupu a ergonomii umístění. Tato volba byla vedena zejména finanční náročností průmyslových rozvaděčů a dobrou dostupností montážního profilů pro tento projekt. Rozvody jsou vedeny na vložených kabelových žlabech. Celý rozvaděč je následně chráněný průhledným krytem, což zachovává přístupnost a umožňuje vizuální kontrolu stavu všech komponent. Navržené řešení tak kombinuje modularitu s nízkou výrobní cenou a technickou čistotou. [42]



Obr. 18: Detailní pohled na hlavní rozvaděč

4 VALIDACE NÁVRHU

Pro ověření funkčnosti navrženého zařízení byla zvolena kombinace tří navzájem nezávislých, ale metodicky provázaných přístupů: analytického výpočtu, numerické simulace proudění a praktického měření. Každý z těchto přístupů poskytuje odlišnou perspektivu a úroveň detailu, přičemž jejich společným cílem je ověřit schopnost zařízení generovat kalkulovaný dynamický impulz a charakterizovat jeho účinek v definovaném bodě.

Numerická simulace byla realizována v prostředí CFD, konkrétně pomocí softwaru Ansys Fluent. Cílem této části je získat podrobný prostorový a časový rozbor proudového pole, přičemž hlavní sledovanou veličinou je opět rychlost proudění vzduchu ve vybraném kontrolním bodě. Simulace zároveň umožňuje identifikovat místa s turbulentním prouděním, zpětnými víry nebo ztrátovými jevy, které mohou ovlivnit funkci zařízení.

Praktická část validace je založena na měření odporové síly, která vzniká při interakci proudícího vzduchu s testovacím tělesem. Tato síla je nepřímo úměrná kvadrátu rychlosti proudění a její přesné změření umožňuje zpětně dopočítat odpovídající hodnoty rychlosti. Měření tak poskytuje praktické ověření výstupních parametrů zařízení a zároveň slouží jako srovnávací základ pro výše uvedené teoretické a numerické přístupy.

Společným jmenovatelem všech tří metod je tedy rychlost proudění vzduchu v definovaném bodě prostoru, respektive její účinek ve formě odporové síly. Tato komplexní validace umožňuje nejen ověřit funkčnost navrženého zařízení, ale i posoudit přesnost použitých výpočtových a simulačních nástrojů a připravit půdu pro budoucí optimalizaci.

4.1 Analytický přístup

Analytická část vychází ze zjednodušených výpočtových modelů proudění stlačeného vzduchu ve válci, přičemž hlavní důraz je kladen na odhad rychlosti výstupního proudu v dané vzdálenosti od ústí kanónu. Tento údaj představuje klíčový parametr pro následné porovnání s numerickou simulací a experimentálním měřením.

4.1.1 Definice charakteru proudění

Rozhodujícím faktorem pro validaci je určení kritické rychlosti proudění, tedy rychlosti zvuku v daných podmínkách. Tento krok je nezbytný pro posouzení, zda dochází ke škrcenému proudění – tedy stavu, kdy výstupní rychlost dosahuje maxima a další pokles výstupního tlaku ji již neovlivní. Tato informace určuje, která směrem se výpočet rychlosti proudění bude ubírat.[28]

$$v_{crit} = \sqrt{k * R * T} \tag{4.1}$$

kde: k – izoentropický exponent [-],
R – měrná plynová konstanta [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$],
T – absolutní teplota [K]
Vcrit – kritická rychlost proudění [$m \cdot s^{-1}$]

Pro běžné laboratorní podmínky s teplotou přibližně 20 °C (tedy 293,15 K) vychází rychlost zvuku ve vzduchu na přibližně 343 $m \cdot s^{-1}$.

Rychlost proudění vzduchu v kanónu závisí na tom, zda v místě zúžení dochází ke škrcení. V takovém případě proudění dosáhne rychlosti zvuku a dále nezrychluje, i když klesá výstupní tlak. Kritérium pro vznik škrceného proudění je vyjádřeno nerovností, která porovnává poměr vstupního tlaku a výstupního tlaku s tzv. kritickým tlakem. Ten je dán pouze fyzikálními vlastnostmi plynu:

$$\left(\frac{p_0}{p_{atm}}\right) > \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k}{k-1}} \tag{4.2}$$

kde: p_0 – absolutní tlak v komoře [MPa],
p_{atm} – atmosférický tlak [MPa],

Aby bylo možné rozhodnout, zda tato nerovnost platí, je zapotřebí znát hustotu vzduchu při výchozích podmínkách v komoře. Ta se stanoví pomocí ideálního stavového zákona, ve tvaru:

$$\rho_0 = \frac{p_0}{R * T} \tag{4.3}$$

kde: ρ_0 – hustota vzduchu v komoře [kg·m^{-3}·],

Pro vzduch, u kterého se běžně uvažuje k=1,4, vychází kritická hodnota přibližně 1,89. Při vyšším poměru tlaků než je tato hodnota vzniká škrcené proudění a výstupní rychlost je rovna rychlosti zvuku. Pokud je poměr nižší, proudění zůstává neškrcené a rychlost závisí na rozdílu tlaků. Tato skutečnost je klíčová pro volbu rovnice určující výstupní rychlost vzduchu, a proto musí být vyhodnocena již v počáteční fázi výpočtu.

4.1.2 Dynamický tlak uvnitř kanónu

Po určení výstupní rychlosti vzduchu lze stanovit i dynamický tlak, který proudící vzduch vyvíjí na překážku umístěnou bezprostředně za ústím trubky. Tento tlak odpovídá kinetické energii proudícího média a je základní veličinou pro posouzení mechanického účinku na testované těleso. V oblasti ústí se předpokládá rovnoměrné, přímočaré proudění s minimálními ztrátami, což umožňuje využít klasický vztah pro dynamický tlak v ustáleném proudění ponížený o ztrátu v těle kanónu.[28]

$$p_{dyn} = \frac{1}{2} * \rho_0 * v^2 - \Delta p \tag{4.4}$$

kde: p_{dyn} – dynamický tlak v komoře [MPa],

4.1.3 Výpočet dynamického rychlosti v dané vzdálenosti

Při praktickém měření není zkušební těleso umístěno přímo na ústí trubky, ale ve vzdálenosti, kde již dochází k rozšíření proudového svazku a tím i k poklesu účinného dynamického tlaku. K tomu dochází vlivem rozptylu vzduchu, který opouští trubku kuželovitě. Při zachování konstantního hmotnostního toku a ideálních podmínek lze předpokládat, že energie proudění se rozprostře na větší plochu. Za předpokladu kuželového rozšíření výstřelu lze pokles dynamického tlaku popsat následujícím vztahem.[28]

$$p_{dyn,z} = p_{dyn} * \left(\frac{D_0}{D_z}\right)^2 \tag{4.5}$$

kde: $p_{dyn,z}$ – dynamický tlak ve vzdálenosti z [MPa],
D_0 – průřez kanónu [m],
D_z – efektivní průměr dopadu [m]

Efektivní průměr dopadu se stanoví podle předpokládaného úhlu rozptylu. Tímto způsobem lze přibližně určit, jak velká část původní energie dopadne na těleso v závislosti na jeho vzdálenosti od výstupu. Model nepočítá s turbulentními ztrátami nebo interakcí s okolím, ale pro potřeby základního odhadu poklesu síly při výstřelu postačuje. Volba úhlu rozptylu závisí na konstrukci trubky a výstupním tlaku, obvykle se pohybuje mezi 5–15°.

$$D_z = D_0 + 2 * z * \tan(\theta) \tag{4.6}$$

kde: θ – úhel rozptylu [°]
z – vzdálenost tělesa od ústí komory [m],

Ve výpočtech dynamické rychlosti v určité vzdálenosti se používá konstantní výstupní hustota vzduchu, odpovídající podmínkám v komoře. Pro přesnější výpočty by bylo nutné zohlednit nejen pokles hustoty, ale i změny teploty a vírové struktury proudění, což je mimo rámec základní analytické úvahy.

$$v_z = \sqrt{\frac{2 * p_{dyn,z}}{\rho_0}} \tag{4.7}$$

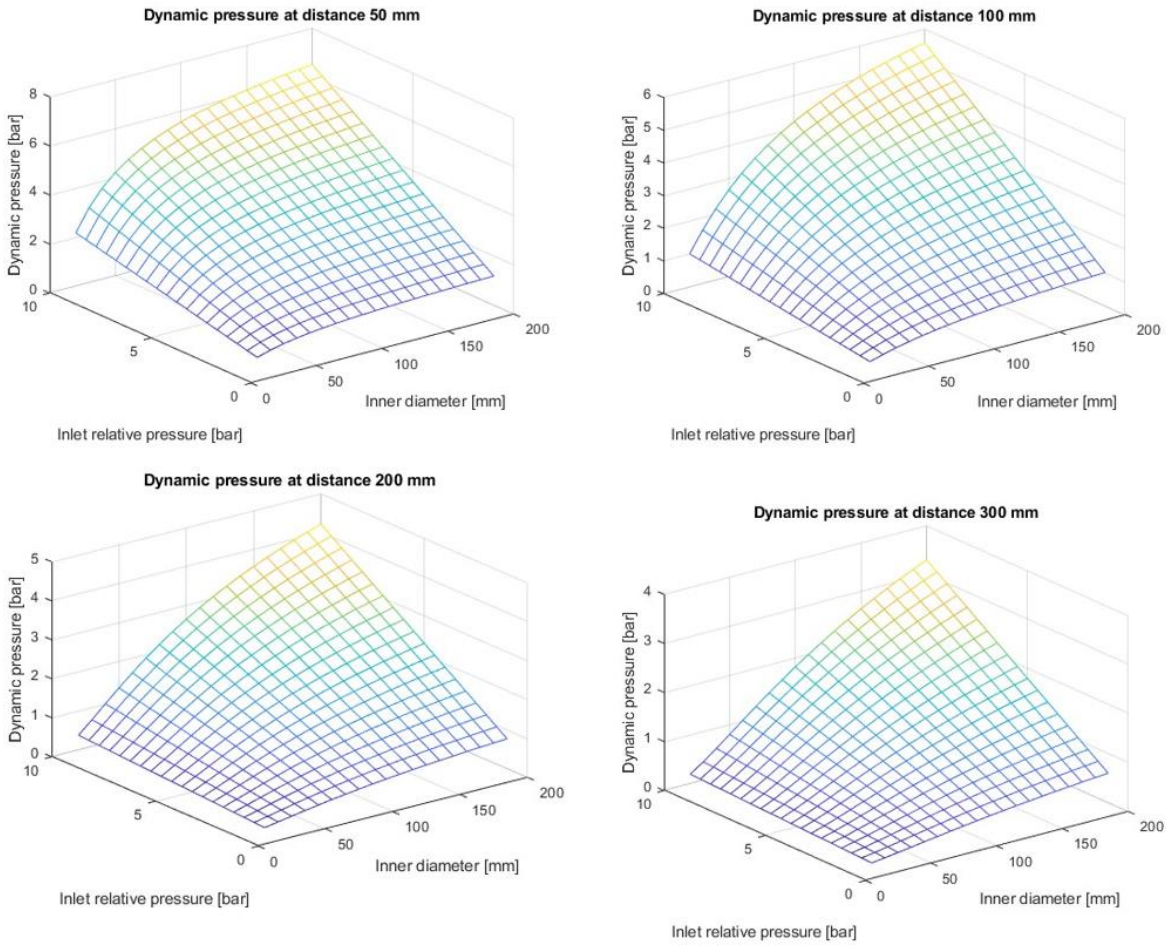
kde: v_z – dynamická rychlost ve vzdálenosti z [m·s⁻¹],

Pro lepší představu o konkrétních hodnotách dynamického tlaku byla sestavena přehledová tabulka, ve které jsou uvedeny výstupní hodnoty pro vybrané kombinace vstupního tlaku, vnitřního průměru trubky a vzdálenosti měřeného bodu od ústí. Tato numerická forma slouží jako doplněk k prostorovým grafům a umožňuje rychlou orientaci v řádech hodnot, které lze při daných podmínkách očekávat.

Tab. 2: Přehledová tabulka očekávaných rychlostí pro dané vstupy

Vstupní tlak [bar]	4			6			8		
Vzdálenost [mm]	50	100	200	50	100	200	50	100	200
Cannon 1 [m·s⁻¹]	254,7	195,0	132,8	263,6	201,8	137,5	268,4	205,6	140,0
Cannon 2 [m·s⁻¹]	300,7	254,7	195,0	311,2	263,6	201,9	316,9	268,4	205,6
Cannon 3 [m·s⁻¹]	319,9	283,6	231,1	331,1	293,5	239,2	337,2	298,9	243,6

Z grafického výstupu je zřejmé, že s rostoucí vzdáleností od ústí trubky dochází k výraznému poklesu dynamického tlaku. Zatímco ve vzdálenosti 50 mm dosahují hodnoty tlaku až k hranici 8 bar při vysokém vstupním tlaku a větším průměru trubky, ve vzdálenosti 300 mm se již maximální tlak pohybuje pouze kolem 4 bar. Tento trend odpovídá předpokladu rozšiřujícího se proudu, kdy se původní energie rovnoměrně rozkládá na větší plochu. Pokles je nejvýraznější právě v počátečních vzdálenostech, což potvrzuje důležitost precizního ustavení zkušebního tělesa. Zároveň je patrné, že větší vnitřní průměr trubky přináší výrazně vyšší dynamický účinek, a to i při nižších přetlacích. Výsledky tak poskytují důležitou oporu pro návrh testovací geometrie i interpretaci experimentálních dat.



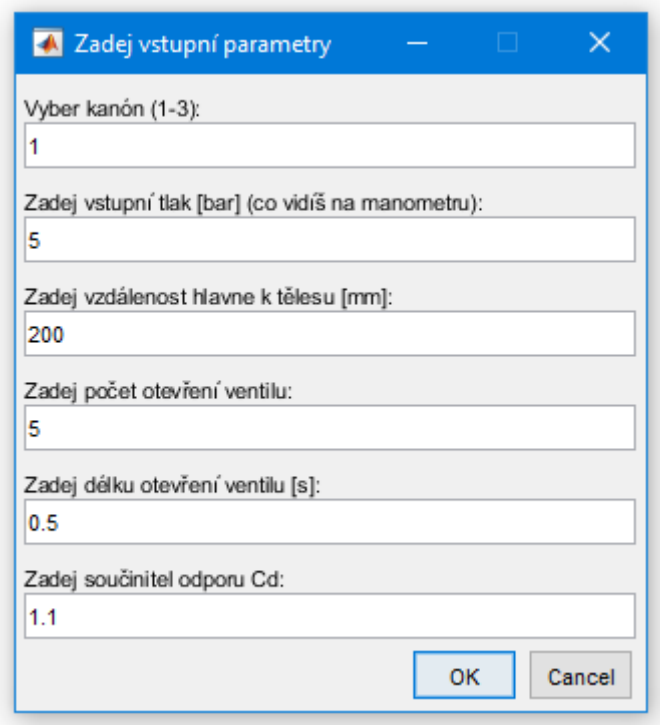
Obr. 19: Zobrazení dynamického tlaku v definovaných vzdálenostech od ústí kanónu

4.2 Skript pro vyhodnocení chování kanónu

Pro analytické vyhodnocení provozních parametrů pneumatického kanónu byl vytvořen skript v prostředí MATLAB, který umožňuje rychlé a opakovatelné zpracování základních vstupních parametrů a výpočet veličin charakterizujících výstřel. Skript pracuje interaktivně – vstupní údaje, jako je typ kanónu, vstupní tlak, vzdálenost terče od ústí, doba otevření ventilu a počet impulsů, jsou zadávány prostřednictvím dialogového okna.

Z výpočtového hlediska skript vychází z teoretických vztahů pro proudění stlačeného vzduchu – uvažuje se kritická i neškrcená rychlost v závislosti na tlakovém poměru, následně se počítá dynamický tlak v místě dopadu proudu se zohledněním úhlu rozptylu a efektivního průměru výtrysku. Skript rovněž uvažuje vliv součinitele odporu, čímž je umožněno zpětně spočítat sílu působící na terč. Dále je vyhodnocena účinnost systému, hmotnostní průtok vzduchu, spotřeba vzduchu na jeden impuls a celkový objem potřebného vzduchu.

Výstupy skriptu jsou automaticky zobrazovány v konzoli a zároveň ukládány do textového souboru pojmenovaného podle časového razítka. Tím je zajištěna archivace jednotlivých simulací a možnost pozdějšího porovnání výsledků. Tento nástroj byl využit pro ověření výsledků CFD simulací a zároveň slouží jako doplněk při parametrickém posouzení různých geometrií kanónu a nastavení experimentu.



Obr. 20: Vyskakovací okno pro nastavení parametrů vypočtu

5 SIMULACE PROUDĚNÍ

Numerická simulace byla realizována v prostředí CFD, konkrétně pomocí softwaru Ansys Fluent. Cílem této části je získat podrobný prostorový a časový rozbor proudového pole, přičemž hlavní sledovanou veličinou je opět rychlost proudění vzduchu ve vybraném kontrolním bodě. Simulace zároveň umožňuje identifikovat místa s turbulentním prouděním, zpětnými víry nebo ztrátovými jevy, které mohou ovlivnit funkci zařízení.

Proudění stlačitelného vzduchu s vysokými rychlostmi a gradienty vyžaduje numerický model schopný zachytit turbulentní jevy a případné rázové vlny. Pro simulaci byl zvolen turbulence model SST k-omega, který kombinuje přesné chování v mezní vrstvě s robustním řešením ve volném poli. Viskozní stlačitelný tok je řešen pomocí standardního solveru v Ansys Fluent. [50]

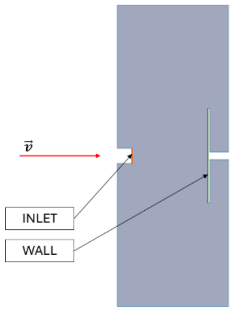
5.1 Geometrie a okrajové podmínky

Geometrie modelu byla sestavena s cílem přesně zachytit oblast zájmu mezi ústím hlavně a referenční deskou, kde dochází k největšímu dynamickému zatížení způsobenému proudem stlačeného vzduchu. Zároveň byla výpočetní doména navržena tak, aby nedocházelo k ovlivnění výsledků okrajovými podmínkami.

Model byl vytvořen jako třírozměrný, s rotačně symetrickou výpočetní doménou. Z důvodu maximální přesnosti byl simulován plný 3D prostor bez využití osové symetrie, i když by teoreticky připadala v úvahu. [51][52]

- **Hlavní válec (Outlet)**: představuje proudící prostor okolo hlavně a za referenční deskou. Má průměr 400 mm a celkovou délku 800 mm, přičemž osa válce odpovídá ose výstřelu. Za referenční deskou je ponechán prostor o šířce alespoň 50 mm, aby nedocházelo k umělému ovlivnění výstupu proudění výstupní hranicí.
- **Ústí hlavně (Inlet)**: modelováno jako kruhový otvor o průměru 40 (mění se dle varianty), umístěný 200 mm před začátkem výpočetní domény. Tento přesah zajišťuje simulaci strhávání okolního vzduchu při výtoku.
- **Referenční deska (Wall)**: kotouč o průměru 250 mm a tloušťce 5 mm, umístěný v ose hlavně. Deska je zarovnána kolmo k ose výpočtové domény a tvoří pevnou neprůchodnou stěnu.

Hraniční plochy byly zvoleny tak, aby proud mohl volně expandovat a zároveň nedocházelo ke zpětným odrazům, které by narušovaly oblast zájmu mezi hlavní a deskou. Všechny stěny výpočetní oblasti (kromě vstupu a výstupu) jsou modelovány jako pevné (wall), s nulovým skluzem.[52]



Obr. 21: Výpočtová oblast

5.2 Síťování

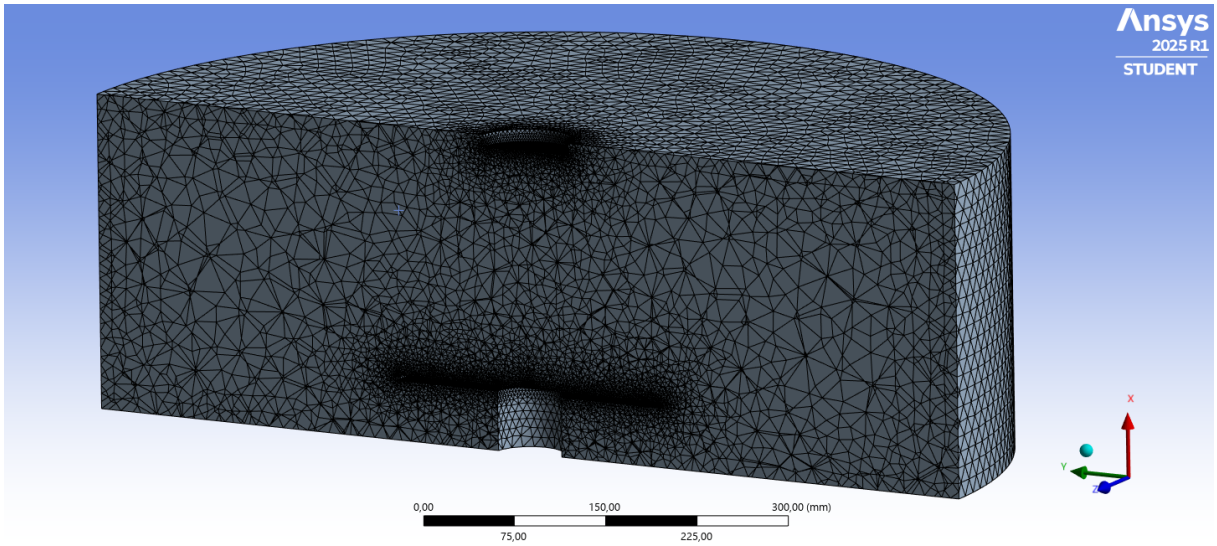
Výpočetní síť představuje klíčový prvek každé CFD simulace. Jejím úkolem je rozdělit objem výpočetní domény na konečný počet elementů, v jejichž středech se numericky řeší rovnice proudění. Kvalita a hustota této sítě mají zásadní vliv na přesnost výpočtu, rychlost konvergence i stabilitu řešení.

Síť byla generována v prostředí Ansys Meshing. Z důvodu kombinace jednoduché a rotačně symetrické geometrie byla použita především strukturovaná síť s hexahedrálními prvky, doplněná o nestrukturované tetrahedrální prvky v méně exponovaných částech výpočetní oblasti.

Zvláštní pozornost byla věnována oblastem s očekávaným vysokým gradientem rychlosti a tlaku:

- Výtok z hlavně (oblast zvětšena o D od ústí),
- Povrch a bezprostřední okolí referenční desky,
- Osa symetrie mezi hlavní a deskou.

Pro tyto oblasti byly definovány lokální zóny zjemnění, které zajišťují zvýšenou hustotu prvků bez nadměrného zatížení výpočetních prostředků v méně důležitých zónách.[51]



Obr. 22: Řez sítovaným modelem sledovaného prostoru (otočeno o 90°)

5.3 Nastavení simulace

Simulace byla provedena v prostředí Ansys Fluent jako nestacionární (transientní) úloha s cílem zachytit dynamiku výstřelu stlačeného vzduchu z hlavně a jeho interakci s referenční deskou. Proudění bylo modelováno jako stlačitelné, izotermní a turbulentní, s využitím turbulence modelu SST k-ω, který umožňuje přesné řešení v blízkosti stěn i ve volném prostoru.

Výpočty byly provedeny s tlakem 6 barů na vstupu, zadanou jako *Initial Gauge Pressure*. Výstup byl modelován jako *Pressure Outlet* s atmosférickým tlakem. Všechny stěny včetně referenční desky byly definovány jako adiabatic wall s bezskluzovou podmínkou (no-slip).

Materiál vzduchu byl uvažován jako ideální plyn s teplotou 293,15 K a tlakem 1 atm. Rovnice energie byla vypnuta, protože simulace nepředpokládá přenos tepla. Simulace byla řešena pomocí implicitního pressure-based solveru, s časovým krokem 1×10^{-5} s a celkovou dobou

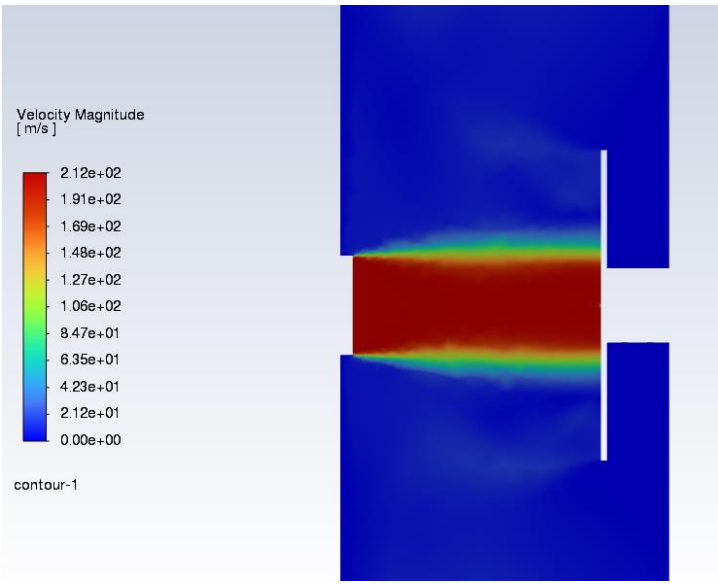
simulace 0,0001s. Časový člen byl řešen schématem First Order Backward pro zajištění numerické stability.

Pro všechny veličiny byly použity schémata druhého řádu (Second Order, resp. Second Order Upwind), zbytková konvergenční kritéria byla nastavena na 1×10^{-4}. Inicializace byla provedena standardní metodou z oblasti vstupu.

5.4 Výsledky simulace

Z výstupních kontur velikosti rychlosti je patrné, že proudění po opuštění kanálu expanduje do okolí pod určitým úhlem. Ve světle modré oblasti vpravo od ústí hlavně (Obr. 23) je zřetelně patrná kuželovitá oblast se sníženou rychlostí, která vymezuje okraj expanzního proudu.

Úhel rozptylu odhadovaný z těchto kontur odpovídá hodnotám přibližně 5–15°, což je v souladu s očekávaným rozptylem výstupního proudu při tomto typu uspořádání a tlakových podmínkách. Tento úhel může být ovlivněn geometrií kanálu, rozhraním s okolní oblastí a případným vznikem rázových struktur na hranici výstupu.



Obr. 23: Kontura dynamické rychlosti při stále otevřeném ventilu (6 bar)

V rámci simulace byla také sledována síla působící na čelní stěnu kotouče umístěnou v ose kanálu. Maximální zaznamenaná síla dosáhla hodnoty 319,2 N. Pro zpětné určení dynamické rychlosti proudění dopadajícího na plochu terče byla využita standardní rovnice pro odporovou sílu. Pro desku kruhového tvaru je odporový součinitel roven 1,12 [49] [31]

$$F_s = \frac{1}{2} * C_x * \rho_{atm} * S_E * v^2 \tag{5.1}$$

kde: F_S – maximální síla v simulaci [MPa],
C_x – odporový součinitel [-]
S_E – plocha efektivního průměru dopadu [m^2]
v – rychlost dle daných parametrů

Po dosazení do upraveného vztahu získáme očekávanou rychlost v místě měření

$$v_{cfd} = \sqrt{\frac{2 * F}{C_x * \rho * \frac{\pi * (D_0 + 2 * z * \tan(\theta))^2}{4}}} \tag{5.2}$$

$$v_{cfd} = \sqrt{\frac{2 * 319{,}2}{1{,}12 * 1{,}18 * \frac{\pi * (0{,}08 + 2 * 0{,}2 * \tan(10))^2}{2}}} = 164{,}7\ ms^{-1}$$

Když porovnáme výslednou sílu s výsledkem uvedeným v přehledové pro dynamické rychlosti (Tab. 2) , zjistíme odchylku od analytického výpočtu přibližně 22%.

$$v_{analytická} = 201{,}9 ms^{-1}$$

Rozdíl mezi těmito hodnotami může vycházet ze zanedbání ztrát při průchodu volným prostorem. Stejně tak zde může figurovat ztráta způsobená turbulentním prouděním případně nehomogení proud.

Vyhodnocená síla je zároveň menší než limitní síla propřeklopení zařízení (rovnice. 3.1). Při praktickém testování je doporučeno provádět zkoušky v nižších polohách.

6 POPIS A KONSTRUKCE AKUSTICKÉHO DĚLA

Praktická část tvorby akustického děla zahrnuje postupnou kompletaci jednotlivých konstrukčních celků zařízení, od rozvodu stlačeného vzduchu přes řídicí systém až po vlastní kanón a testovací rám. S ohledem na cílovou nízkonákladovost byla konstrukce navržena tak, aby bylo možné využít běžně dostupné komponenty z technického, stavebního a pneumatického sortimentu, aniž by to mělo zásadní dopad na funkčnost nebo spolehlivost celého systému.

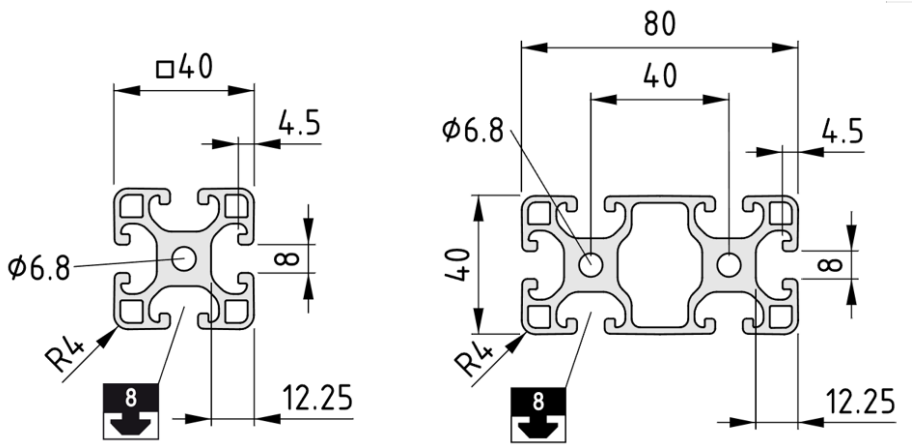
Jednotlivé prvky byly voleny tak, aby umožňovaly snadnou výměnu, rozšíření nebo úpravu podle budoucích požadavků. To se týká například možnosti připojení dalších větví, výměny regulačních prvků, doplnění senzoriky nebo integrace komplexnějšího řídicího systému. Konstrukce je koncipována modulárně, s důrazem na přehlednost a přístupnost jednotlivých částí, čímž se naplňuje princip univerzálnosti a připravenosti pro následný vývoj či modernizaci zařízení.

Obr. 24: Čelní pohled na zařízení

6.1 Rám a nosné desky zařízení

Pro konstrukci rámu byly zvoleny hliníkové profily systému ITEM, konkrétně typ řady 8 o průřezech 40×40 mm a 40×80 mm. Tyto profily poskytují dobrý poměr mezi hmotností, tuhostí a možnostmi uchycení. Drážkovaný systém umožňuje připevnění dalších prvků bez nutnosti vrtání nebo svařování, což značně usnadňuje montáž i pozdější úpravy konstrukce. Profily ITEM jsou navrženy s vysokou výrobní přesností a jsou běžně používány jak v laboratorních, tak v průmyslových aplikacích. [32]

Celkové rozměry konstrukce byly navrženy jako 800 × 1200 × 2000 mm (šířka × délka × výška), a to s ohledem na prostorové možnosti laboratoře, ve které bude zařízení umístěno a provozováno. Zvolená výška umožňuje bezpečnou manipulaci i umístění elektroniky a pneumatických prvků v ergonomické výšce, zatímco půdorys zařízení zajišťuje dostatečnou stabilitu celé konstrukce při zachování prostupnosti v prostoru. Použití profilů 40×80 mm v nosných částech zajišťuje dostatečnou tuhost i při dynamickém zatížení, zatímco profily 40×40 mm jsou využity v méně zatěžovaných místech nebo pro uchycení příslušenství. [32]



Obr. 25: Konstrukční hliníkové profily řady 8. [32]

Celistvosti zařízení je dosaženo za použití dalších prvků tohoto stavebnicového systému. Rám využívá prvky jako jsou úhelníky, panty, krytky, madla a drobný spojovací materiál.

Tab. 3: Přehled základních mechanických vlastností použitých profilů

Profily ITEM	I_x [cm^4]	I_y [cm^4]	$F_{drážka}$ [N]	Hmotnost [kg/m]	Katalogové číslo
Profil 8 40x40	9,0	9,0	2500	1,74	0.0.026.35
Profil 8 80x40	9,94	69,54	2500	3,04	0.0.452.40

Spotřeba materiálu u profilu 40x40 je v délce 30m, respektive pro profil 40x80 v délce 11,5m. Při započtení spojovacího materiálu a dalších produktových řešení je hmotnost samotného rámu odhadnuta na 100kg. Hmotnost ocelových desek je dle CAD dat 38kg.

Z důvodů bezpečnosti je také celé zařízení zakrytováno plexisklem o tloušťce 4mm. To zaručuje primární bezpečnostní opatření v případě nenadálých událostí při testování.

6.1.1 Nosný rám a platforma pro uchycení vzorku

Nosný rám, jenž slouží k uchycení testovaného vzorku je proveden jako svařovaná sestava ze dvou typů ocelových profilů. Stojinu sestavy tvoří dutý obdélníkový profil s průřezem 40x20x2. Příčky jsou zvoleny jako nerovnoramenný L profil 30x20x3. V podélných profilech jsou navrtány průchozí díry o průměru 10mm. Výsledná rozteč příček, respektive děr je zvolena jako rastr s roztečí děr 80x160mm. Váha nosného rámu je v surovém stavu 17,5kg [36] [37]

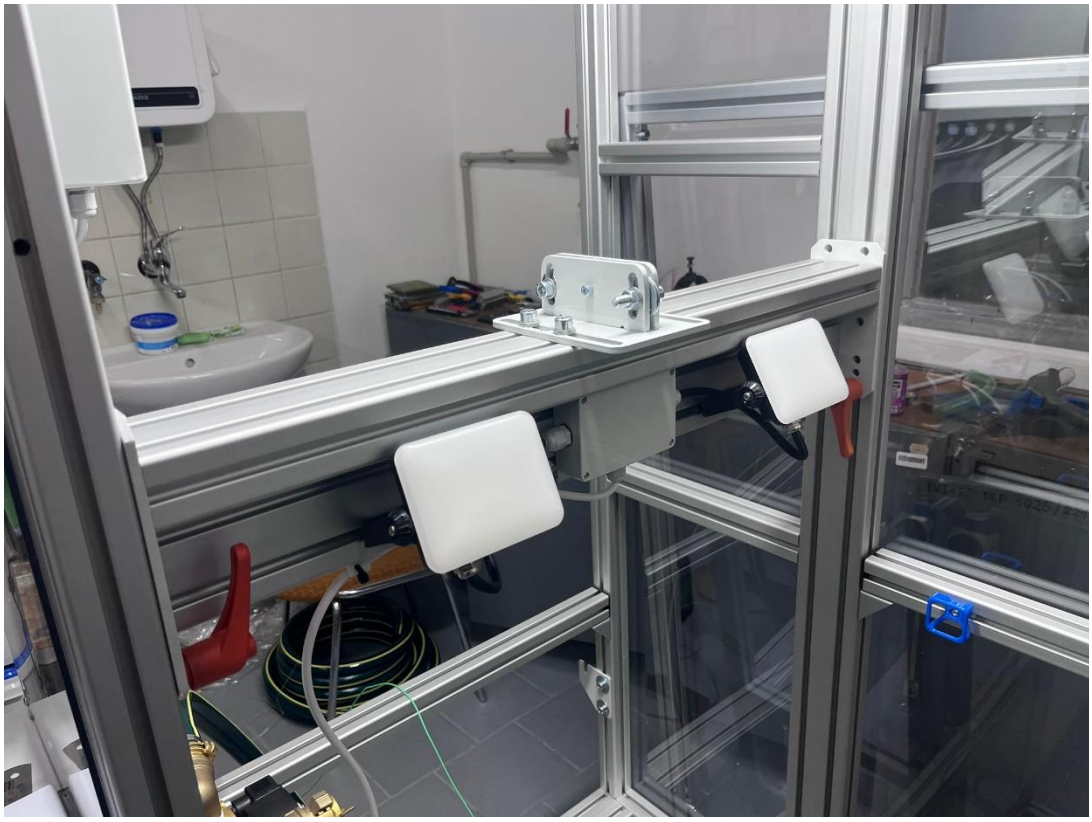
Obr. 26: Nosný rám připravený na povrchovou úpravu práškového lakování

Na nosný rám je vyrobena upínací platforma která v základně využívá výše uvedenou rozteč a následně ji zjemňuje na pole s unifikovanou roztečí děr 40x40mm při zachování stejné velikosti díry. Odsazení platformy od upínacího rámu je 90mm. Použití více kusů je možné díky vhodně navržené konstrukci. Je tedy možné platformy k sobě přikládat ze všech stran pro dosažení požadované upínací plochy a dodržení zjemněné rozteče. Každá platforma váží 3,5 kg.

Obr. 27: Platformy upevněné na nosném rámu

6.2 Nosník

Nosná konstrukce kanónu je tvořena dvojicí hliníkových profilů ITEM 40×80 mm, které jsou orientovány do tvaru obráceného písmene L a pevně spojeny po celé délce. Tato sestava slouží jako hlavní nosný nosník, na jehož horní straně je uchycena stavitelná patka pro uložení pneumatického kanónu. Patka umožňuje úhlové nastavení v rozsahu ±15°, čímž se rozšiřují možnosti směrování tlakového impulzu vůči testovanému vzorku. [32]



Obr. 28: Nosník uchycený ve vedení svislých profilů

Z boku nosníku jsou upevněny dvě čelní vodicí desky, které jsou osazeny aretačními páčkami. Tyto desky zároveň obsahují vodicí prvky, které přesně zapadají do drážek ve svislých profilech rámu zařízení. Celý nosník je tak možné plynule výškově posouvat a polohovat podle aktuálních požadavků testu. Ve spojení s hřebenem přivařeným na spodní straně každého kanónu, který zajišťuje podélný pohyb v patce, vzniká flexibilní a univerzální systém umožňující přesné nastavení kanónu.

Celkově je možné polohovat kanón v pěti osách – posuvem ve směru os X, Y a Z v rámci rámu zařízení, doplněným o dvě rotační možnosti: horizontální úklon patky a úhlové natočení kolem svislé osy skrze nastavení samotného rámu. Tento rozsah nastavitelnosti je klíčový pro přizpůsobení testovacích podmínek konkrétnímu typu vzorku či požadované konfiguraci experimentu. Na obou krajích nosníku jsou navíc umístěny samostatné reflektory, které slouží k přímému a cílenému nasvícení ostřelované plochy, a tím k lepší vizuální kontrole i případnému optickému záznamu průběhu testu.

6.3 Rozvod stlačeného vzduchu

Rozvod stlačeného vzduchu byl navržen s ohledem na jednoduchost montáže, dobrou dostupnost materiálů a dostatečný průtok pro napájení akustického kanónu. Celý systém je tvořen dvěma větvemi, přičemž jedna slouží pro aktuálně používaný kanón a druhá je připravena jako rezerva pro budoucí použití druhého výstupního kanálu nebo případné rozšíření experimentálního pracoviště. Obě větve umožňují samostatné nastavení pracovních podmínek, zejména výstupního tlaku.

Hlavní vedení je provedeno z vícevrstvých tlakových trubek typu PPR o vnitřním průměru 25 mm. Tento rozměr zajišťuje dostatečný průřez pro vedení vzduchu bez výrazných tlakových ztrát a zároveň umožňuje použití běžně dostupných spojovacích prvků. PPR části systému jsou spojeny pomocí teplotního svařování. Na hlavní potrubí navazují mosazné závitové fitinky, jako jsou kolena a T-kusy, které propojují regulační a ovládací prvky. Všechny závitové spoje jsou typu G1 a jsou utěsněny teflonovou páskou. Celková sestava je navržena tak, aby bylo možné jednotlivé větve snadno rozebrat, vyměnit nebo upravit bez zásahu do ostatních částí systému.

Obr. 29: Detail rozvodu stlačeného vzduchu

6.3.1 Jednocestný ventil

Jednocestný ventil DN25 (G1) je mosazná pružinová zpětná klapka, která umožňuje průtok stlačeného vzduchu pouze jedním směrem. V systému slouží k zajištění tlakového oddělení jednotlivých větví rozvodu, čímž zabraňuje ovlivnění nastaveného tlaku v jedné větvi přetlakem z druhé. Díky tomu je zajištěna stabilita tlakových podmínek při provozu pneumatického kanónu.

6.3.2 Redukční ventil

Pro regulaci výstupního tlaku v jednotlivých větvích pneumatického systému byl použit regulátor Airpress s připojovacím závitem G1" a nastavitelným rozsahem od 0 do 15 bar. Tento rozsah umožňuje nastavení podle požadavků zkoušky a zároveň poskytuje dostatečnou rezervu pro provoz s vyššími tlaky. Ventil je určen pro práci se stlačeným vzduchem a je vybaven výstupem pro manometr, který umožňuje přímou kontrolu nastaveného tlaku.

Výstupní tlak se nastavuje otáčením hlavice ventilu, která je vybavena aretačním mechanismem. Tím se zajišťuje stabilita nastavení i při dlouhodobém provozu. Změna tlaku probíhá plynule a bez skokových změn, což je výhodné při hledání optimálních parametrů pro konkrétní testovací scénář. Ventil tvoří základní prvek pro řízení podmínek ve větvi napájející pneumatický kanón. [25]

Obr. 30: Regulátor tlaku [**25**]

6.3.3 Elektromagnetický ventil

V pneumatickém systému byl použit elektromagnetický ventil s pracovními parametry 0–10 bar, závitem G1" a napájením 24 V AC. Ventil je konstruován jako normálně uzavřený, což znamená, že ve výchozím stavu je uzavřený a otevře se pouze při sepnutí napájecího napětí. Tento princip umožňuje přesné časování výstřelu a zároveň zajišťuje bezpečnost systému při výpadku řídicího signálu. Ventil je řízen pomocí PLC a jeho sepnutí je synchronizováno s nastavenými testovacími podmínkami. [24]

Obr. 31: Elektromagnetický ventil [24]

6.3.4 Těla kanónů

Koncovou částí rozvodové soustavy jsou tři samostatné pneumatické kanóny, které slouží jako výstupní členy pro generování řízeného tlakového impulzu na zkušební vzorek. Každý z kanónů má délku jednoho metru a liší se jmenovitým vnitřním průměrem – 40 mm, 80 mm a 120 mm. Toto odstupňování umožňuje volit různé objemy stlačeného vzduchu a přizpůsobit sílu impulzu charakteru testovaného vzorku.

Obr. 32: Kanóny (D=38,4mm, D=80mm, D=120mm)

Připojení ke zbytku systému je realizováno pomocí vnitřního závitu G1" nebo bajonetové rychlospojky, v závislosti na konkrétním kanónu a potřebách montáže. Každý z kanónů je navíc opatřen podélným hřebenem, který slouží k zasunutí do upínací patky. Patka umožňuje vertikální úhlové nastavení výstřelového směru v rozsahu ±15°, což umožňuje simulovat i šikmé dopady tlakového impulzu na testovaný vzorek nebo přizpůsobit dráhu výstřelu konkrétní aplikaci.

Kanóny jsou vyrobeny z korozivzdorné oceli 1.4301, která zajišťuje dostatečnou pevnost a odolnost proti opotřebení i případným chemickým vlivům. Stěna trubek má tloušťku 2 mm, což představuje rozumný kompromis mezi mechanickou tuhostí a hmotností. Vnitřní povrch trubek je leštěn brusnou vlnou, aby bylo dosaženo nižšího tření proudícího vzduchu a zároveň se minimalizovaly turbulentní ztráty během výstřelu. [40]

Tab. 4: Základní parametry kanónů

Kanóny	Vnitřní průměr [mm]	Vnější průměr [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Tlaková ztráta [%]
Cannon 1	38,4	42,4	1000	2,35	5,26
Cannon 2	80	84	1000	4,25	2,21
Cannon 3	120	124	1000	6,27	1,33

6.3.5 Ostatní komponenty a měření tlaku

Pro sestavení rozvodu stlačeného vzduchu byly využity standardní mosazné prvky se závitovým připojením G1", konkrétně kolena, přímé spojky, prodloužení, T-kusy a manometry. Tyto komponenty umožnily vytvořit přehledné a odolné propojení všech klíčových částí systému. Díky robustní konstrukci a rozšířené dostupnosti byly tyto prvky voleny jako základní stavební součásti pneumatické soustavy.

Měření tlaku bylo realizováno pomocí analogových manometrů, ke kterým je tlak přiveden polyuretanovou hadičkou Festo o vnějším průměru 6 mm. Každá z větví má samostatné měření, které je přivedeno přímo do čelního panelu operátora. Tento způsob umožňuje okamžitou a nezávislou kontrolu výstupního tlaku v každé větvi bez nutnosti přepínání nebo elektronického zpracování signálu.

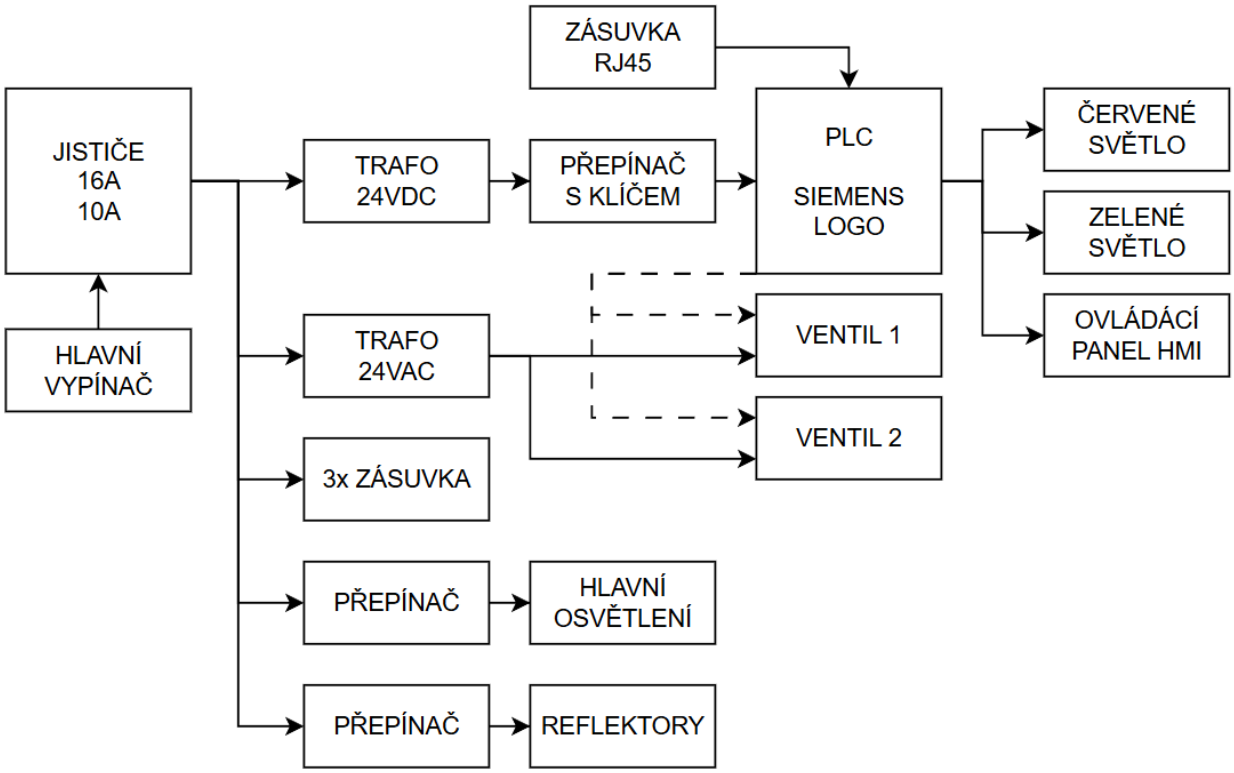
Pro propojení pevných částí rozvodu s ventilem byl použit úsek flexibilní tlakové hadice s vnitřním průměrem 25 mm. Hadice je na obou stranách osazena rychloupínacími bajonetovými koncovkami, které umožňují rychlou montáž i demontáž. Tento úsek slouží jako kompenzační prvek pro drobné pohyby a vibrace zařízení, a zároveň usnadňuje údržbu bez nutnosti rozebírat celé potrubí.

Obr. 33: Přehled běžně používaných mosazných fitinek [27]

6.4 Elektrická výbava zařízení

Návrh elektrické části zařízení byl veden snahou o dosažení funkčního a přehledného řešení při zachování nízkých pořizovacích nákladů. Použité komponenty byly voleny s ohledem na jejich dostupnost, modularitu a možnost dalšího rozšiřování systému. Soustava je rozdělena do tří samostatných celků: silového rozvaděče, řídicího rozvaděče a operátorského panelu. Toto členění umožňuje oddělit silovou část od logiky řízení a současně zpřístupnit základní ovládací prvky obsluze v ergonomické výšce.

S ohledem na budoucí vývoj a experimentální charakter zařízení byly do systému zařazeny můstky pro oddělení napěťových větví, řadové svorky pro přehledné zakončení kabeláže a dostatečná rezerva v napájecích okruzích. Zvolené uspořádání zahrnuje i základní signalizaci stavu zařízení a průmyslový řídicí systém typu PLC, který umožňuje přesné časování a kontrolu jednotlivých výstupů. Celkové řešení tak zajišťuje nejen požadovanou funkčnost, ale také připravenost pro případné rozšíření nebo integraci pokročilejších řídicích prvků.



Obr. 34: Schéma elektrických komponent

Na začátku realizace byla snaha využít pouze spodní, silový rozvaděč pro všechny komponenty. V průběhu montáže však vznikla potřeba dalšího prostoru pro uchycení elektrických komponent. Z toho důvodu jsem se rozhodl vysunout operátorský panel na konzoli dvířka posazená na pentech. Prostor původně vyhrazený pro operátorský panel tak nahradily komponenty sloužící k řízení celé struktury.

6.4.1 Silový rozvaděč

Silový rozvaděč je umístěn v dolní části zařízení, na zadní straně základního rámu konstrukce. Jeho umístění umožňuje snadný přístup při instalaci a údržbě a zároveň fyzicky odděluje silovou část od ostatních funkčních bloků. Napájení je zajištěno pomocí pětimetrové přívodní šňůry, zakončené standardní vidlicí, která přivádí napětí 230 V AC. Přívod je veden třížilovým měkkým vodičem o průřezu 1,5 mm² (flexibilní vodič typu H05VV-F 3×1,5), který odpovídá běžným instalačním normám pro podobná zařízení.

Obr. 35: Náhled na silový rozvaděč umístěný na spodní části zařízení.

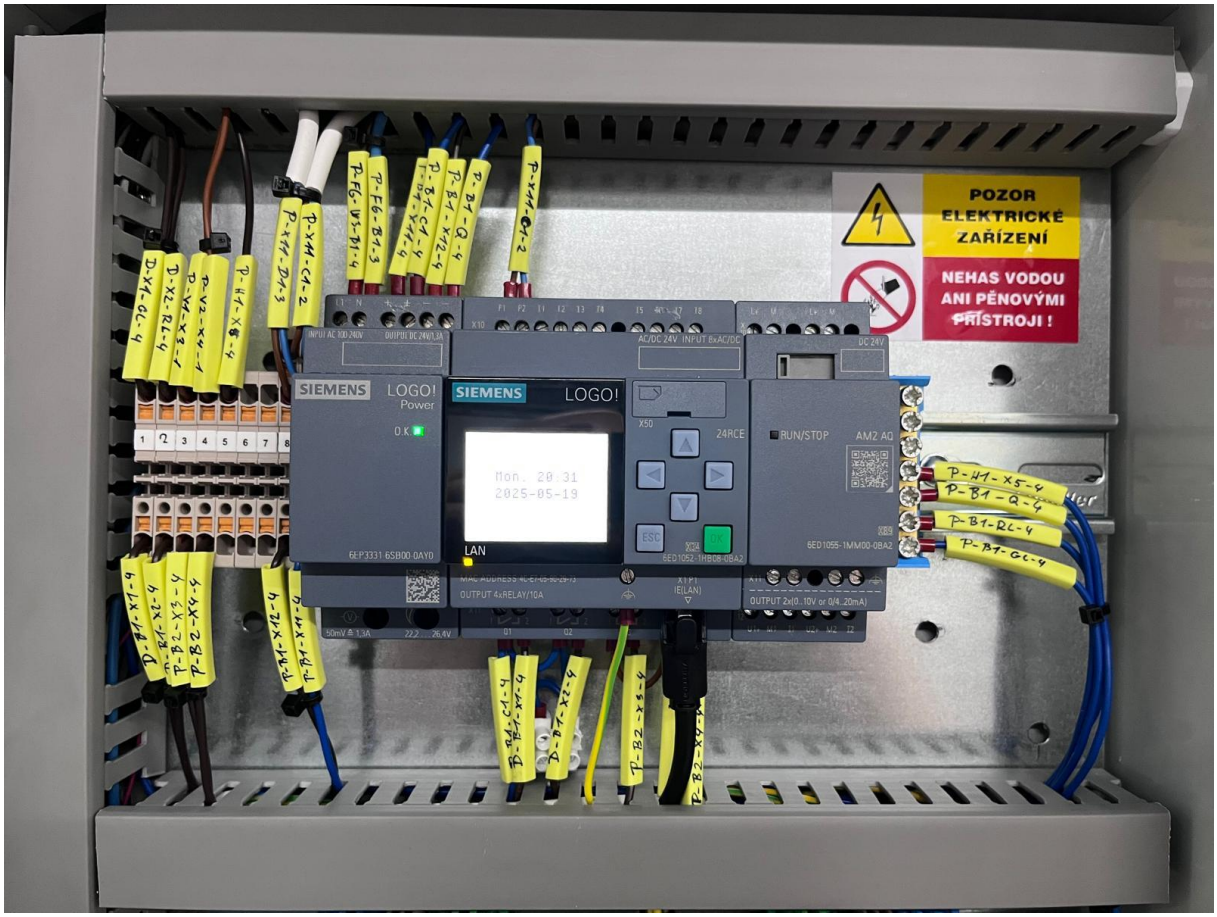
Všechny komponenty jsou upevněny na jediné DIN liště. Na jejím začátku se nachází hlavní vypínač, kterým je možné zařízení kompletně odpojit od napájení. Za vypínačem je osazena sestava šesti jističů – tři s hodnotou 16 A a tři s hodnotou 10 A. Každý z jističů napájí samostatný okruh pro konkrétní spotřebič nebo skupinu spotřebičů. Tato sestava umožňuje nezávislé jištění a případné servisní odpojení jednotlivých větví bez nutnosti odpojovat celé zařízení.

Celý rozvaděč je zakrytován průhledným plexisklem, které zajišťuje ochranu proti nechtěnému kontaktu s živými částmi a zároveň umožňuje vizuální kontrolu zapojení. Kabeláž je vedena v plastových kabelových žlabech, které slouží pro uspořádání a mechanickou ochranu vodičů v rámci rozvaděče. Každý jednotlivý vodič je opatřen popiskem, který odpovídá značení v elektrotechnickém schématu zařízení. Tím je zajištěna snadná orientace při zapojování i při následné diagnostice nebo úpravách systému.

6.4.2 Řídící rozvaděč

Řídicí rozvaděč tvoří základní uzel automatizace a logického řízení celého zařízení. Jeho konstrukce byla navržena s cílem dosáhnout přehledného, modulárního a servisovatelně jednoduchého systému. Celý rozvaděč je zapuštěn do těla zařízení, konkrétně do rámové konstrukce tvořené hliníkovými profily. Vnitřní elektroinstalace je provedena na samostatném montážním plechu, který je do skříně zasazen jako vložený díl. Tím je zajištěn snadný přístup ke všem komponentům jak při instalaci, tak při následném ladění nebo případných úpravách.

Na montážní plech jsou upevněny dvě DIN lišty, které nesou veškeré prvky potřebné pro napájení, řízení a rozvod signálů. Mezi lištami jsou osazeny tři vodorovné kabelové žlaby pro vedení vodičů mezi jednotlivými úrovněmi zapojení, jeden svislý žlab slouží k výstupům směřujícím ke kabelovým průchodkám ve spodní části. Celkové uspořádání bylo zvoleno tak, aby vedlo k maximální přehlednosti, snadné orientaci a rychlé identifikaci vodičů.

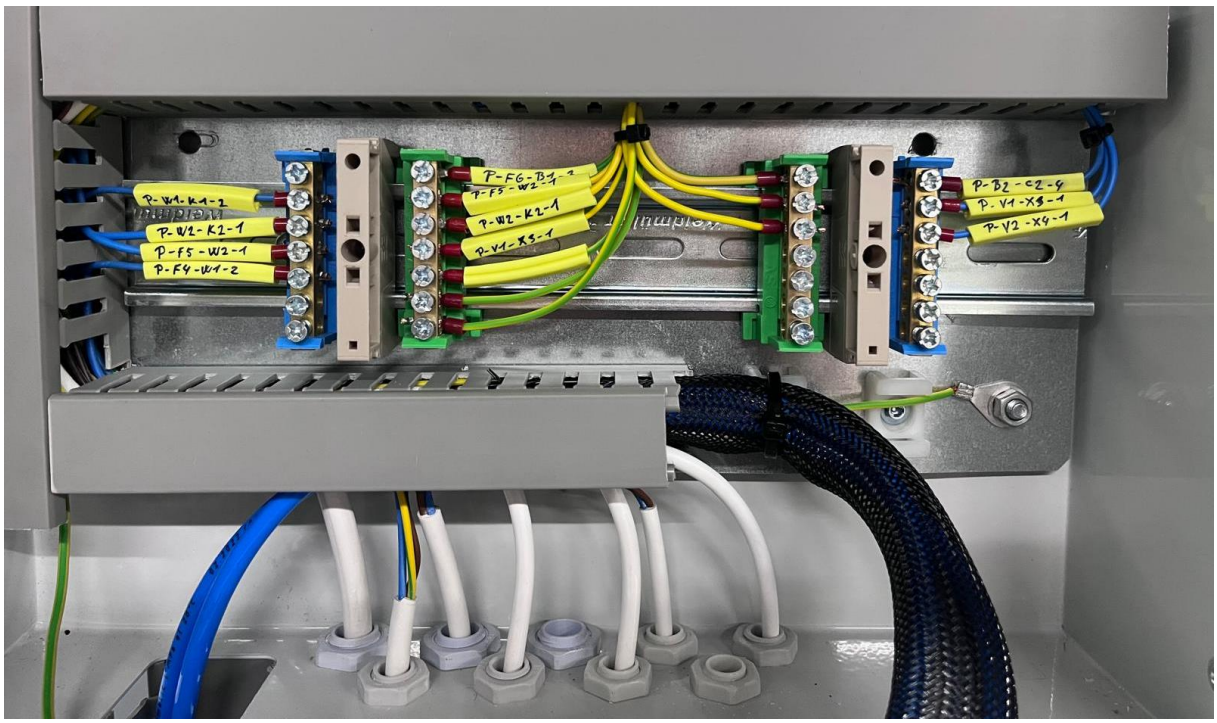


Obr. 36: Detail na vrchni část řídícího rozvaděče
(zleva: svorkovnice, zdroj 24VDC, Siemens Logo CPU, rozšiřující analogový modul, můstek 24VDC)

Horní lišta obsahuje vstupní řadové svorky, napájecí zdroj 24 V DC a hlavní řídicí jednotku – programovatelný automat Siemens LOGO! 12/24 RCE, doplněný o analogový výstupní modul. Napětí 24 V DC je dále distribuováno pomocí můstku k jednotlivým spotřebičům a logickým vstupům. Veškeré komponenty jsou orientovány tak, aby bylo možné pohodlně sledovat popisky a zapojení jednotlivých svorek.

Na spodní liště jsou osazeny čtyři samostatné můstky pro rozvod napětí 230 V AC, 24 V AC, a pro dva oddělené okruhy ochranného uzemnění (PE). Toto dělení bylo zvoleno s ohledem na bezpečnost a snadné rozdělení napájecích větví. Uspořádání rozvaděče umožňuje přehledné oddělení napájení, vstupů a výstupů, a současně ponechává dostatek prostoru pro budoucí rozšíření.

Ve spodní části rozvaděče se nachází průchodky pro výstup vodičů směrem k operátorskému panelu. Všechny vývody jsou označeny jednoznačnými popisky podle elektrotechnického schématu. Přestože se jedná o prototypové a experimentální zařízení, byla elektroinstalace vedena s ohledem na osvědčené zásady průmyslové praxe. V případě potřeby by tak zařízení mohlo být snadněji připraveno na revizní kontrolu nebo budoucí začlenění do většího



Obr. 37: Detail na spodní část řídící svorkovnice
(zleva: můstek 230AC, zemnění, zemnění, můstek 24VAC

6.4.3 Operátorský panel

Operátorský panel představuje hlavní rozhraní mezi obsluhou a automatizovanou částí zařízení. Z konstrukčního hlediska je panel usazen na rámečku tvořeném profily ITEM 40×80 mm, přičemž je celá sestava uchycena pomocí bočních pantů. Díky tomuto řešení slouží dvířka panelu zároveň jako pohyblivý kryt řídicího rozvaděče. Panel je navržen tak, aby poskytoval snadný přístup ke všem ovládacím a indikačním prvkům, a zároveň umožňoval přehledné sledování provozního stavu zařízení.

Obr. 38: Zadní a přední pohled na operátorský panel

Dominantním prvkem panelu (Obr. 38) je displej HMI systému Siemens LOGO! TDE, který slouží pro zadávání parametrů, sledování stavů vstupů a výstupů a pro interakci s řídicím programem. Na levé straně od obrazovky jsou umístěny analogové manometry, zobrazující aktuální tlak v první a druhé větvi pneumatického systému. Tlakoměry umožňují nezávislé a okamžité odečítání hodnot bez potřeby elektronického zpracování signálu.

Nad HMI je umístěna síťová zásuvka RJ45, která slouží k připojení programovacího zařízení přímo k PLC bez nutnosti otevírat rozvaděč. Vedle ní jsou umístěny dvě kontrolní signálky, jejichž funkce je určena pro indikaci základních stavů systému (např. přítomnost napájení nebo aktivace ventilu). V nejvyšší části panelu se nachází řada tří otočných přepínačů. První z nich je opatřen zámkem na klíč a slouží k povolení spuštění PLC. Zbývající dva přepínače slouží k manuálnímu zapínání hlavního pracovního světla a doplňkových reflektorů.

Celkový návrh operátorského panelu odpovídá potřebám ručního ovládání, rychlé orientace obsluhy a snadného servisního přístupu. Konstrukční řešení navíc umožňuje případné doplnění dalších prvků bez zásahu do hlavního tělesa zařízení.

6.5 Řídící systém

Řídicí systém zařízení je založen na kompaktním programovatelném automatu Siemens LOGO! a doplněn o vybrané komponenty stejné produktové řady. Zvolená konfigurace byla navržena s ohledem na jednoduchost použití, přehledné programování a cenovou dostupnost, přičemž zároveň umožňuje rozšiřování a budoucí modernizaci bez potřeby zásahu do základní struktury systému.

Základním prvkem je PLC Siemens LOGO! 12/24 RCE (6ED1052-1HB08-0BA2) s napájením 24 V DC. Tato jednotka disponuje osmi digitálními vstupy a čtyřmi výstupy, interním ethernetovým rozhraním a podporou jednoduchého vizualizačního rozhraní. Pro potřeby tohoto projektu je PLC využíváno k řízení logiky sepnutí elektromagnetických ventilů, zpracování vstupních signálů a obsluze základních režimů provozu.

Systém je dále rozšířen o analogový výstupní modul AM2 AQ (6ED1055-1MM00-0BA2), který poskytuje dva analogové výstupy v rozsahu 0–10 V.

Jako operátorské rozhraní je použita jednotka LOGO! TDE (6ED1055-4MH08-0BA1), připojená přímo na PLC přes ethernetový kabel. Na displeji jsou zobrazovány aktuální stavy, možnost spuštění a zastavení testu, přepínání režimů a základní hodnoty vstupů a výstupů.

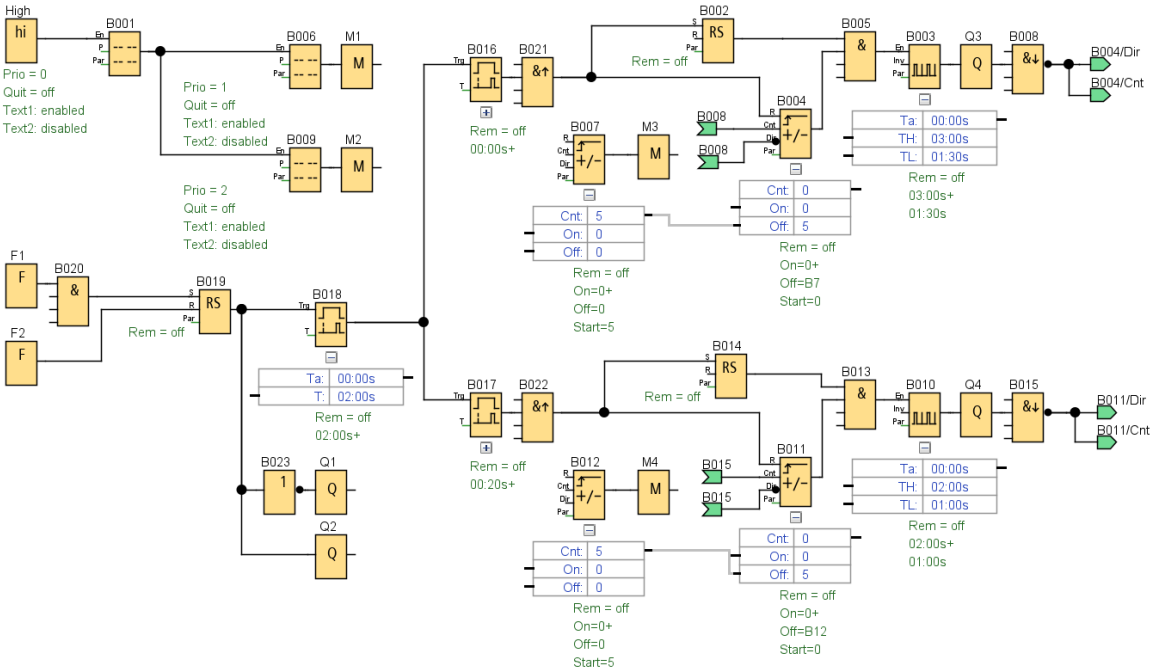
Napájení logické části systému zajišťuje průmyslový zdroj 24 V DC Siemens LOGO!Power (6EP3331-6SB00-0AY0), který dodává stabilní napětí potřebné pro všechny komponenty řídicího systému.

Programování systému bylo provedeno v softwarovém prostředí LOGO! Soft Comfort (6ED1058-0BA08-0YA1), které umožňuje intuitivní sestavování logiky pomocí blokového schématu.

Celková architektura řídicího systému je navržena tak, aby poskytovala spolehlivou základnu pro provoz současné verze zařízení a zároveň umožňovala rozšíření o další moduly, komunikační rozhraní nebo sběr dat. Díky použití jednotného systémového řešení od jednoho výrobce je zajištěna dobrá servisovatelnost a dlouhodobá podpora komponent.

6.6 Řídící program

Řídicí systém zařízení je založen na kompaktním programovatelném automatu Siemens LOGO! a doplněn o vybrané komponenty stejné produktové řady. Zvolená konfigurace byla navržena s ohledem na jednoduchost použití, přehledné programování a cenovou dostupnost, přičemž zároveň umožňuje rozšiřování a budoucí modernizaci bez potřeby zásahu do základní struktury systému.



Obr. 39: Aktuální verze programu používaný pro dvě výstupní děla

Na obrázku (Obr. 39) je zachycena aktuálně používaná verze programu vytvořená v prostředí Siemens LOGO! Soft Comfort. Tato konfigurace umožňuje obsluze zobrazit stav zařízení v reálném čase, řídit spouštění dvou nezávislých ventilových větví a volit zpoždění aktivace celé sekvence podle potřeby. Logika je navržena tak, aby byla přehledná, snadno rozšiřitelná a zároveň dostatečně flexibilní pro základní testovací scénáře. Níže jsou popsány jednotlivé funkční části programu rozdělené podle příslušných bloků.

Bloky B016–B008 (včetně B007 a M3) – 1. větev řízení ventilů

Tato část programu zajišťuje řízení ventilového výstupu první větve. Po zpoždění spuštění větve (blok B016) dojde k aktivaci výstupní logiky. Timer B003 vytváří impulzní signál s definovanou délkou otevření a zavření ventilu (3 s / 1,5 s). Výstupní signál je následně vyhodnocován logickými podmínkami (AND B005 a RS B002), které spouští ventil prostřednictvím Q3. Počítadlo B004 zároveň eviduje počet vykonaných cyklů. Získaná hodnota je zobrazována pomocí aritmetického bloku B007 a vnitřní proměnné M3. Celá sekvence se zastaví po dosažení nastaveného počtu opakování.

Bloky B001–M1/M2 – zobrazení stavu na HMI

V této části programu jsou využity bloky pro vizualizaci stavu systému na ovládacím panelu HMI. Konkrétně se jedná o výstupy M1 a M2, které indikují aktuální režim systému. Bloky B001, B006 a B009 určují pomocí prioritizovaných vstupů, zda se má na displeji zobrazit, že systém je zapnutý, připravený nebo probíhá test. Díky této logice má obsluha okamžitou zpětnou vazbu o aktuálním stavu zařízení.

Zrcadlová část (Bloky B017–B015 (včetně B012 a M4)) zajišťuje ovládání druhé větve. Jde o totožnou část programu se stejnými prvky ovládání pro zajištění logiky ovládání.

Pro lepší orientaci v zapojení a při následné diagnostice systému byla sestavena přehledová tabulka fyzických vstupů a výstupů použitého PLC. Tabulka obsahuje přiřazení jednotlivých signálů ke konkrétním svorkám, jejich název a funkci v rámci řízení testovací sekvence. Program je dostupný v příloze 3.

Tab. 5: Přehledová tabulka fyzických vstupů a výstupů s popisem

Symboly	Název	Význam
F1	Tlačítko 1	Spuštění sekvence
F2	Tlačítko 2	Reset sekvence
Q1	Zelené světlo	Signalizace připravenosti k testu
Q2	Červené světlo	Signalizace probíhajícího testu
Q3	Ventil 1	Elektromagnetický ventil č.1
Q4	Ventil 2	Elektromagnetický ventil č.2

6.6.1 Obsluha HMI

Ovládání zařízení probíhá prostřednictvím připojeného HMI panelu Siemens LOGO! TDE na operátorském panelu, který umožňuje jednoduchou a přehlednou interakci s uživatelem. Uživatel má zde možnosti nastavit základní parametry sekvence. Navigace mezi obrazovkami probíhá pomocí tlačítek na čelním panelu.

Upravení jednotlivého parametru se provádí stisknutím klávesy ESC po dobu cca 3 sekund. Přes šipky na straně obrazovky si lze zvolit daný parametr. Pro jeho přímou úpravu je potřeba stisknout ENTER a šipkami navolit požadovanou hodnotu.

Obr. 40: Hlavní obrazovka (vlevo) a parametry 1. větve (vpravo)
OV – Open Valve; CV – Close Valve; NU - Number

7 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ

V této části budou experimentálně prověřeny různé zátěžové stavy kalibračního disku. Testy budou probíhat s využitím kanónů různých průměrů, při různých vzdálenostech mezi ústím a diskem a za různých vstupních tlaků. Výsledná síla působící na disk bude odečtena z dynamometru a následně převedena na odpovídající dynamickou rychlost pomocí činitele prostředí. Tyto hodnoty budou porovnány s výsledky analytických výpočtů a numerických simulací.

7.1 Kalibrační disk

Kalibrační disk slouží jako validační těleso pro ověření opakovatelnosti a základní srovnatelnosti výsledků z jednotlivých testů. Jedná se o plochý ocelový kotouč z materiálu S235, o průměru 250 mm a tloušťce 5 mm. Povrchová úprava je provedena práškovým lakem v jednotném odstínu, což zajišťuje nejen ochranu proti korozi, ale i dobrý vizuální kontrast pro případné sledování dějů. Disk je navržen tak, aby jeho chování při zatížení bylo dostatečně předvídatelné a opakovatelné, čímž slouží jako referenční prvek pro úvodní kalibraci nebo ladění výstupního impulzu zařízení.

7.2 Měřící sestava

Pro záznam mechanické odezvy kalibračního disku byla využita měřicí sestava sestávající z dynamometru, nábojového zesilovače a digitálního osciloskopu.

Základním snímačem je piezoelektrický dynamometr Kistler 9105, který umožňuje měřit síly v jednom směru s vysokou dynamickou citlivostí. Jeho kompaktní rozměry a konstrukce zajišťují rychlou odezvu a stabilní měření i při vysoké frekvenci změn zatížení. Vzhledem ke své piezoelektrické povaze generuje dynamometr elektrický náboj úměrný působící síle. [46]

Tento náboj je dále zpracováván pomocí nábojového zesilovače Kistler 5018, který převádí výstupní signál z dynamometru na napěťový výstup vhodný pro další digitální záznam [47]

Posledním prvkem měřicího řetězce je digitální osciloskop Tektronix TDS 210, který slouží ke záznamu napěťového průběhu v čase. Díky možnosti nastavení vysoké vzorkovací frekvence lze s jeho pomocí zachytit velmi krátké impulzy v řádu milisekund a analyzovat dynamické chování zkušebního tělesa. [48]

Obr. 41: Osciloskop Textronix (vlevo) a zesilovač Kistler (vpravo)

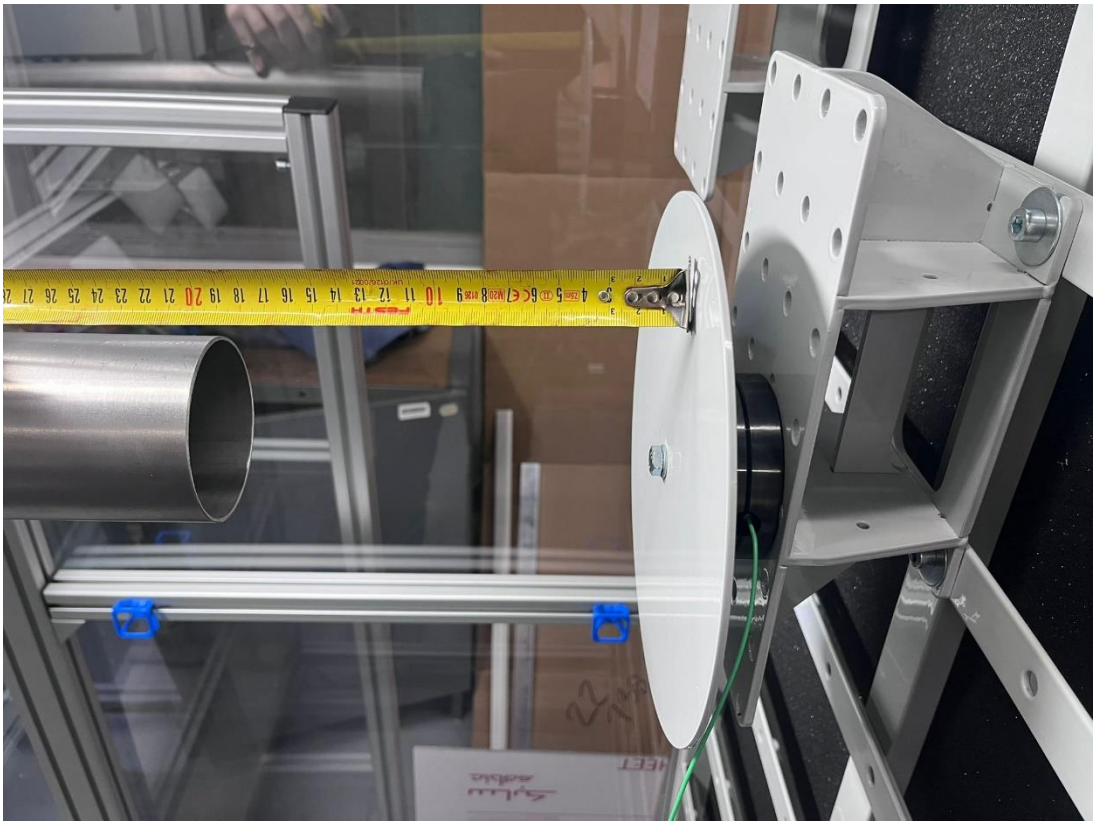
7.3 Proces měření

Měření probíhalo s cílem experimentálně ověřit účinnost pneumatického impulzu na kalibrační disk a zároveň validovat hodnoty výstupní rychlosti získané z analytického modelu. Hlavní pozornost byla věnována konfiguraci, která odpovídá variantě použitou i v numerické simulaci – tedy kanón s vnitřním průměrem 80 mm a délkou 200 mm. Tato sestava byla vybrána jako referenční pro podrobné srovnání mezi experimentem a výpočtem.

Kromě této konfigurace bylo provedeno také doplňkové měření pro validaci hodnot uvedených v přehledové tabulce dynamických rychlostí (Tab. 2), kde jsou přehledně uvedeny teoreticky vypočtené výstupní rychlosti pro různé kombinace vstupního tlaku, průměru trubky a vzdálenosti měřeného bodu. Cílem měření bylo zaznamenat reálný impulz působící na testovaný disk a zpětně z něj určit odpovídající dynamickou sílu a rychlost pomocí tenzometrického měření a známého vztahu mezi tlakem a rychlostí proudění. Všechna měření byla zaznamenávána pomocí zvoleného snímače a zpracovávána v prostředí osciloskopu.

7.3.1 Upevnění kalibrační desky

Kalibrační kotouč je během měření upevněn na předem připravené platformě. Mezi deskou platformy a samotným kotoučem je vložen piezoelektrický dynamometr, který zajišťuje záznam silové odezvy. Aby mohl snímač správně měřit i obousměrné dynamické výkyvy, je nutné jej mechanicky předepnout. Toto předpětí zajišťuje stabilitu měření a umožňuje snímači detekovat jak nárůst, tak pokles síly vůči nulové referenci. Osa kanónu a terče jsou soustředné. Tímto je zamezeno vytváření ohybových momentů na disku jenž pro účely validace nejsou vhodné.



Obr. 42: Umístění referenční desky na platformě s vloženým dynamometrem s kanónem (D80) ve vzdálenosti 200mmú

7.4 Testování dynamické rychlosti

První experimentální měření bylo zaměřeno na záznam silové odezvy kalibračního kotouče při působení vzduchového impulzu generovaného akustickým dělem. Testy byly prováděny pro kombinace parametrů definovaných v tabulce 2., která obsahuje přehled použitých vstupních tlaků, průměrů kanónu a vzdáleností mezi ústím trubky a zkušebním tělesem. Získané hodnoty zatěžovací síly byly zaznamenány pomocí piezoelektrického dynamometru a následně převedeny do podoby dynamické rychlosti výpočtem na základě vztahu pro aerodynamický odpor.

Maximální tlak dostupný v rozvodové soustavě byl během měření 7 bar, což prakticky umožnilo provést pouze testy pro vstupní tlaky 4 bar a 6 bar. Měření pro 2 bar nebylo realizováno, jelikož při tak nízkém tlaku docházelo ke značným ztrátám v potrubí a ventilovém systému a výsledný impulz nebyl dostatečný pro spolehlivý záznam síly. Měření byla provedena ve shodné sestavě zobrazené na obrázku Obr. 42, která zahrnuje referenční disk, dynamometr a platformu. Testovací režim byl nastaven tak, aby jednotlivé výstřely probíhaly za identických podmínek, což umožnilo vzájemné porovnání mezi konfiguracemi i s výsledky analytického modelu.

Tab. 6: Výsledek měření sil na referenční kotouč

Vstupní tlak [bar]	4			6			8		
Vzdálenost [mm]	50	100	200	50	100	200	50	100	200
Cannon 1 [N]	17,2	11,0	5,8	25,8	16,9	9,6	-	-	-
Cannon 2 [N]	19,4	12,1	7,4	28,6	19,5	11,3	-	-	-
Cannon 3 [N]	21,1	16,6	10,1	32,9	23,7	16,4	-	-	-

Pro ověření výpočtového modelu byla vybrána jedna z naměřených hodnot silové odezvy kalibračního disku, konkrétně síla o velikosti 11,3 N. Tato hodnota byla převedena na odpovídající dynamickou rychlost vzduchu dopadajícího na čelní plochu disku pomocí vztahu uvedeného v rovnici 5.1, který vychází z klasického výrazu pro aerodynamický odpor.

Výsledná rychlost je následně porovnána s hodnotami získanými z analytického modelu a numerické simulace. Srovnání prokázalo shodný řád výsledků u všech tří metod a potvrdilo správnost použitého výpočtového přístupu. Odchylky mezi jednotlivými přístupy lze přičíst zejména zjednodušením použitým v analytickém modelu a ideálním okrajovým podmínkám v CFD simulaci.

Tab. 7: Porovnání dynamických rychlostí pro danou případoovu studii

Dynamická rychlost [m/s]	Analytika	Simulace	Testování
Cannon 1 p = 6 bar z = 200 mm	201,9	164,7	30,99

Rozdíl mezi výsledky získanými z experimentu a výpočtových metod lze přičíst několika faktorům. Prvním z nich je výrazné skokové snížení tlaku v rozvodové soustavě v okamžiku otevření ventilu, které není v analytickém modelu ani v CFD simulaci zohledněno. To má za následek nižší reálný tlakový impulz, než jaký je předpokládán při výpočtu.

Obr. 43: Pokles tlaku během otevření ventilu (vpravo) proti nominálnímu stavu (vlevo)

Druhým faktorem je samotný analytický model, který pro zjednodušení zanedbává turbulentní vlastnosti proudění, viskózní ztráty i interakci proudu se stěnami a okolní geometrií. Tyto vlivy přitom mohou významně ovlivnit rychlostní profil a účinnost přenosu energie na testovaný objekt. Třetím omezením je zjednodušený model použitý v CFD simulaci, který rovněž abstrahuje od detailní geometrie vnitřního toku, přesnosti časového průběhu a případných kompresibilních efektů. Kombinace těchto faktorů může vést k odchylkám mezi jednotlivými výsledky.

7.5 Měření odezvy materiálu na rázové buzení

Druhé experimentální měření bylo zaměřeno na zjištění dynamické odezvy plošného materiálu při jednorázovém rázovém buzení. Cílem testu bylo stanovit vlastní frekvenci pružné desky z plexiskla a následně ověřit, zda je možné pomocí tlakového impulzu generovaného akustickým dělem tuto frekvenci cíleně excitovat. Princip vychází z předpokladu, že každá mechanická soustava má vlastní frekvence, při jejichž buzení dochází k výraznému zesílení odezvy.

Obr. 44: Setup pro měření odezvy materiálu na rázové buzení

Nejprve byla teoreticky spočítána první vlastní frekvence daného materiálu, která závisí na jeho rozměrech, mechanických vlastnostech a způsobu uložení. Následně byl proveden jeden impulzní výstřel, jehož účelem bylo vyvolat přirozenou odezvu systému. Vibrace materiálu byly sledovány pomocí měřicího řetězce a analyzovány v silovém frekvenčním rozsahu. Na základě výsledků bylo provedeno ladění výstřelu s cílem co nejpřesněji zasáhnout rezonantní frekvenci a dosáhnout zesílené odezvy. [54]

Materiál je v tomto případě ESLON (PMMA). Jde o materiál podobný plexisklu s rozměry testovaného vzorku 340x120x4mm. Hustota eslonu je 1190 kg*m^{-3}. Modul pružnosti se udává v rozmezí E = 2,8÷3 GPa. Pro naše potřeby zvolíme střední hodnotu. [53]

$$f = \frac{\pi}{2} * \sqrt{\frac{D_f}{\rho_{eslon} * h_E}} * \left(\left(\frac{m_E}{a}\right)^2 + \left(\frac{n_E}{b}\right)^2\right) \tag{7.1}$$

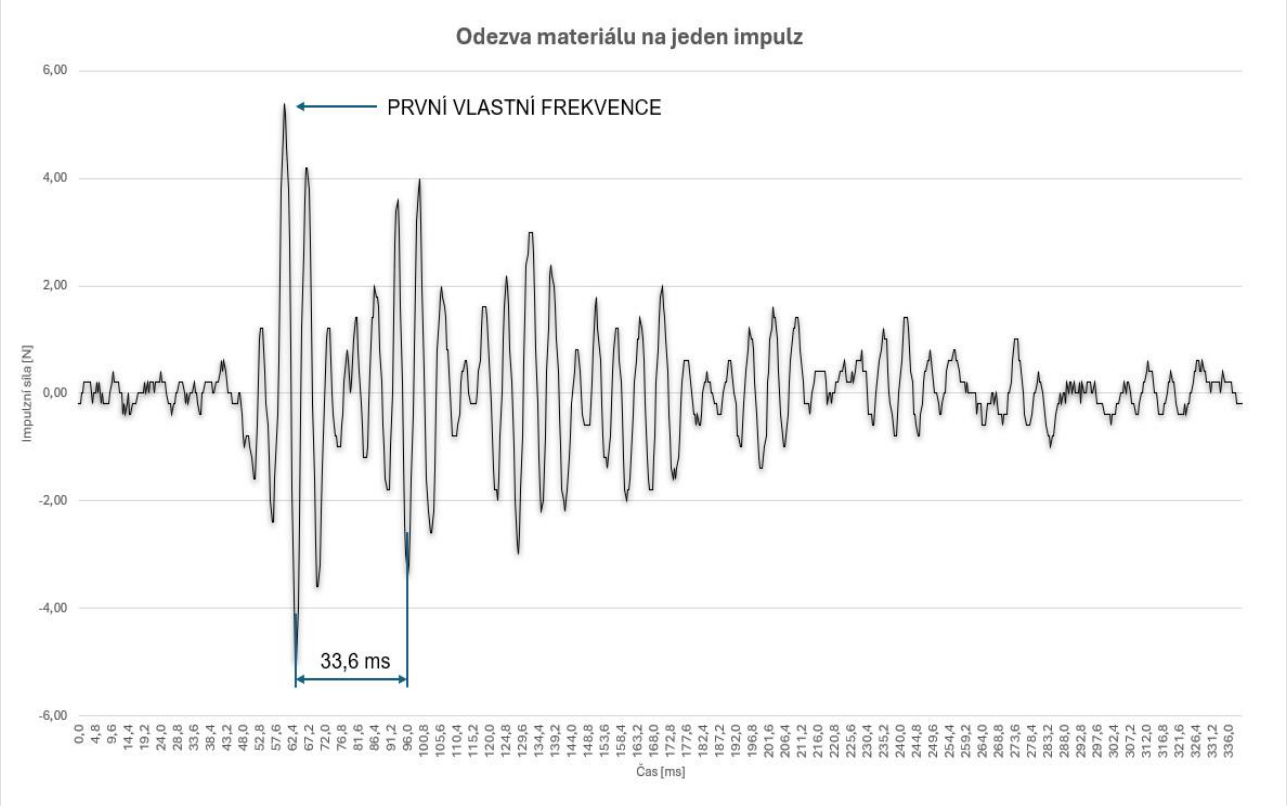
kde: D_f – ohybová tuhost desky [-],
ρ_{eslon} – hustota materiálu eslon [kg*m^3]
h_E – tloušťka desky [m]
m_E –šířka desky [m]
n_E – délka desky [m]
f – vlastní frekvence [Hz]
a – číslo módu pro směr X [-]
b – čísla módů pro směr Y [-]

Doplňkově pak musíme ještě zjistit ohybovou tuhost desky.

$$D_f = \frac{E * h_E^3}{12 * (1 - \upsilon_E^2)} \tag{7.2}$$

kde: E – modul pružnosti v tahu [gPa],
υ_E – Poissonovo číslo eslonu [-]

Dosazením do výše uvedených rovnic získáme odhad pro první vlastní frekvenci. Pro základní mód (m = 1, n = 1) byla výsledná vlastní frekvence určena na **26,7 Hz**, což odpovídá periodě přibližně **37,5 ms**. Tato hodnota bude sloužit jako cílová při ladění akustického impulsu pro buzení rezonance materiálu v navazujícím experimentálním měření.

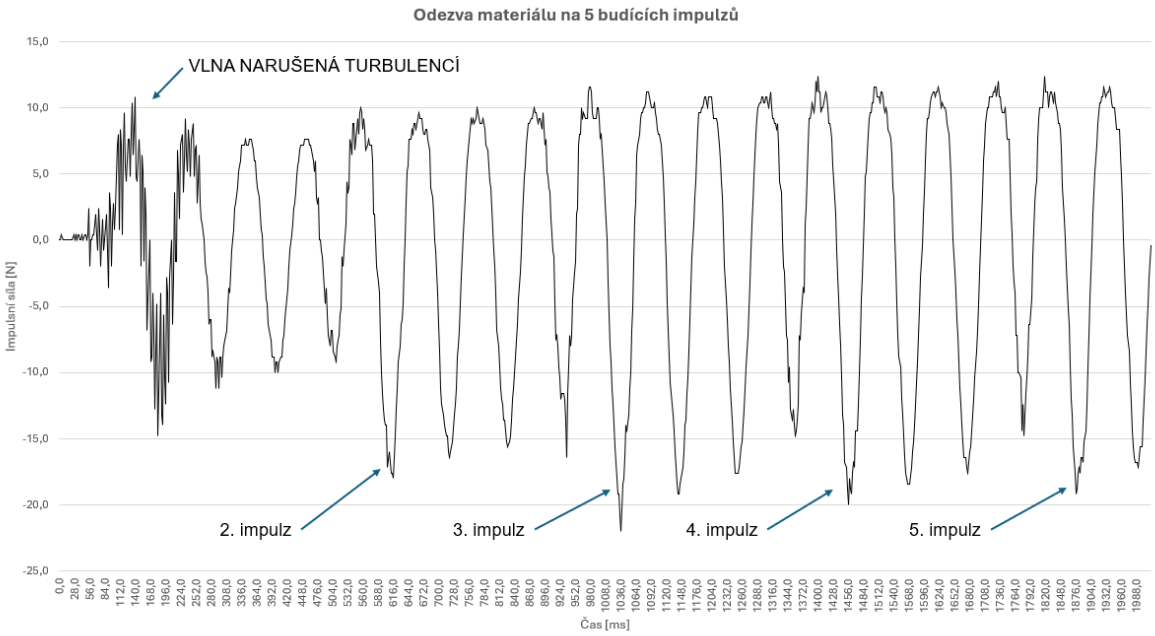


Obr. 45: Odezva materiálu na jeden impulz

Na obrázku je znázorněna časová odezva materiálu na jeden mechanický impuls. Křivka znázorňuje tlumené harmonické kmitání, které vzniklo v důsledku jednorázového buzení materiálu. Z průběhu je patrné, že po úvodním impulzu materiál reaguje výrazným rozkmitáním – vlna oscilací s nejvyšší amplitudou odpovídá první vlastní frekvenci desky.

Na základě načtených dat byla perioda této odezvy odečtena na **33,6 ms**, což odpovídá frekvenci přibližně **29,8 Hz**. Tato hodnota je v souladu s teoretickým výpočtem a bude využita jako cílová při nastavování frekvence buzení v řídicím systému PLC. Cílem bude excitovat materiál právě na této frekvenci, aby došlo k rezonanci a maximálnímu přenosu energie do konstrukce.

V experimentu bude buzení materiálu realizováno pomocí pneumatického ventilu, jehož otevření bude řízeno přes PLC. Délka otevření ventilu byla zvolena na 5 ms, což představuje limitní hodnotu, při které se ventil ještě spolehlivě otevře. Zároveň se jedná o horní hranici délky impulsu, která stále umožňuje efektivní excitaci a podporu původní vlny odezvy. Zavření ventilu bude nastaveno s časovým odstupem 35 ms od začátku impulsu, což odpovídá přibližně jedné periodě první vlastní frekvence materiálu (33,6 ms). V rámci jednoho měřicího cyklu bude aplikováno celkem pět po sobě jdoucích impulsů, jejichž načasování bude optimalizováno tak, aby co nejvíce podporovalo rezonanci sledované desky.



Obr. 46: Odezva materiálu na 5 budících impulzů

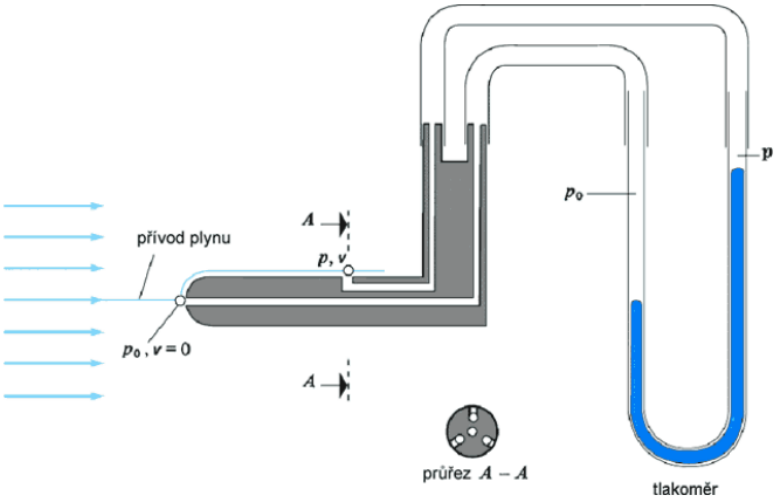
Zvolený způsob buzení materiálu pomocí krátkých pneumatických impulsů se ukázal jako funkční a efektivní. Nastavením délky otevření ventilu na 5 ms a časového odstupu zavření na 35 ms se podařilo dosáhnout rezonance – odezva materiálu vykazovala oscilace s dominantní periodou odpovídající první vlastní frekvenci desky. Aplikace pěti po sobě jdoucích impulsů vedla k výraznému rozkmitání systému, čímž byl úspěšně naplněn cíl experimentu: vybudit materiál v jeho přirozené frekvenční oblasti a ověřit vhodnost navrženého buzení pro další dynamické zkoušky.

8 VYHODNOCENÍ KONSTRUKCE

Na základě dosavadního návrhu a experimentálního ověření konstrukce lze identifikovat několik oblastí, kde by bylo možné provést úpravy vedoucí k vyšší přesnosti, opakovatelnosti a celkové funkčnosti zařízení. Jedná se zejména o prvky ovlivňující plynulost proudění, přesnost řízení ventilů, mechanickou tuhost rámu a kvalitu měření. Cílem této části je shrnout poznatky získané během návrhu i testování a navrhnout konkrétní zlepšení, která by mohla mít přímý dopad na kvalitu výstupních dat i uživatelský komfort při provozu zařízení.

8.1 Prandtlova trubice

Pro zpřesnění a přímé ověření výstupní rychlosti proudění vzduchu v blízkosti ústí kanónu je vhodné zvážit použití Prandtlovy trubice. Tento prvek umožňuje měřit diferenční tlak mezi stagnací a statickým tlakem ve směru proudění, což lze s využitím Bernoulliho rovnice převést na aktuální rychlost vzduchu. Výhodou této metody je její jednoduchost, přímá interpretace výsledků a možnost umístit snímač do přesně definovaného bodu bez zásadního ovlivnění proudového pole. [43]



Obr. 47: Základní schéma principu Pitotovy trubice [43]

Pro realizaci měření bude zapotřebí diferenční tlakový senzor, který dokáže zaznamenat velmi rychlé změny tlaku s dostatečným rozlišením a frekvenční odezvou. Vhodným kandidátem je snímač Festo SDE5, který je schopen měřit tlakové rozdíly v řádu desetin milibarů a poskytuje analogový výstup pro snadné napojení na záznamové zařízení nebo řídicí systém. Použitím Prandtlovy trubice v kombinaci s tímto senzorem lze přímo měřit aktuální rychlost proudění při různých režimech výstřelu, což umožní validovat výsledky analytického modelu i CFD simulací nezávislou cestou.

Implementace tohoto měření je doporučena zejména pro ladění zařízení a jeho validaci v případě že bude potřeba analyzovat opravdu citlivé materiály nebo při testování složitějších těles či časově proměnných průběhů zatížení.

8.2 Tlaková nádoba

Pro dosažení stabilního a opakovatelného výstřelu je vhodné doplnit pneumatickou soustavu o tlakovou nádobu umístěnou co nejblíže k elektromagnetickému ventilu. Jejím hlavním účelem je zajistit dostatečnou zásobu vzduchu bez tlakových výkyvů v okamžiku otevření ventilu. Při prudkém odběru vzduchu by jinak docházelo k náhlému poklesu tlaku v potrubí, což by mělo přímý vliv na variabilitu výstupní rychlosti. [44]

Obr. 48: Tlaková nádoba o objemu 50l [44]

Tlaková nádoba slouží jako vyrovnávací prvek, který stabilizuje podmínky v kritickém bodě mezi řízením a výstřelem. Ideální je její instalace přímo před vstup ventilu, s minimální délkou spoje. Celkový objem nádoby by měl být navržen podle maximálního očekávaného objemu vystřeleného vzduchu a požadovaného počtu výstřelů v rámci jednoho cyklu bez nutnosti opětovného natlakování. Tento objem bude stanoven výpočtem na základě spotřeby při jednom impulzu, avšak již nyní lze odhadnout potřebný rozsah na 50 až 100 litrů. [44]

Použití tlakové nádoby výrazně zvyšuje stabilitu systému a zajišťuje lepší opakovatelnost výstřelů i při různých vstupních podmínkách. Pro praktickou realizaci je vhodné využít běžně dostupné ocelové tlakové nádoby určené pro pneumatické systémy, vybavené standardními závity G1 pro snadnou integraci do rozvodu.

8.3 Změna ventilu

Na základě předběžného ověření odezvy aktuálně použitého elektromagnetického ventilu se ukazuje, že jeho reakční doba je příliš dlouhá na to, aby bylo možné přesně řídit krátké a dynamické impulzy požadované pro účely testování. Tato zpožděná odezva může vést k prodloužení impulzu a snížení opakovatelnosti testů, zejména při simulaci rychlého rázového zatížení.

Z tohoto důvodu je doporučeno přehodnotit volbu ventilu a zvolit rychlejší variantu s adekvátním průtokem. V ideálním případě by měl být použit speciální ventil s extrémně krátkou odezvou a vysokým jmenovitým průtokem, odpovídajícím dimenzím rozvodu. Alternativním přístupem je rozdělení požadovaného průřezu na více paralelně zapojených ventilů s menším jmenovitým průměrem. V takovém případě lze využít osvědčené standardní ventily od výrobců jako Festo nebo SMC, jejichž parametry jsou dobře známé a dostupné v běžném průmyslovém sortimentu.

Paralelní uspořádání nabízí výhodu vyšší spínací rychlosti, lepší dostupnosti náhradních dílů a možnost nezávislého testování jednotlivých větví. Tato změna představuje důležitý krok směrem ke zvýšení přesnosti a opakovatelnosti výstřelových cyklů a zároveň otevírá prostor pro řízení vícenásobných impulzů či sekvenčních výstřelů.

Obr. 49: Vysokorychlostní ventil Festo MHJ [45]

8.4 Rám pro oboustranné zatěžování

V rámci dalšího rozvoje zařízení je možné zvážit doplnění druhého rámu, který by umožňoval připojení druhého kanónu z opačné strany testovaného vzorku. Toto rozšíření by umožnilo provádět oboustranné zatěžování a tím dosáhnout specifických režimů deformace, například průhybu vzorku do tvaru „S“. Takové uspořádání může být užitečné zejména při testování tenkých nebo poddajnějších materiálů, u kterých je žádoucí sledovat i reverzní fázi deformace nebo kombinované zatížení v osovém směru.

Druhý rám by bylo možné konstrukčně uchytit souběžně s původním rámem, ideálně pomocí přesných dorazů a spojovacích prvků, které zajistí vyrovnání os obou kanónů vůči vzorku. Návrh by měl zároveň zohlednit bezpečnostní opatření. Tento doplněk rozšiřuje funkčnost zařízení a umožňuje simulovat složitější zátěžové stavy, které by jinak nebylo možné realizovat v rámci jednosměrného impulzního systému.

8.5 Vývěva pro řízenou změnu tlaku v okolním prostoru

Další potenciální rozšíření funkčnosti zařízení představuje možnost řízené změny okolního tlaku pomocí připojené vývěvy. Úpravou tlaku v prostoru za testovaným vzorkem lze ovlivnit podmínky šíření tlakové vlny, míru aerodynamického odporu nebo simulovat specifické prostředí, například podtlakový režim. Tato úprava může být zajímavá zejména při ladění šíření vzduchového impulzu nebo při měření, kde je žádoucí eliminovat vliv okolního vzduchu.

V současném stavu je prostor testovací oblasti částečně krytován pomocí odnímatelného plexiskla. Pro umožnění stabilního podtlaku nebo regulovaného přetlaku by bylo nezbytné tento prostor doplnit o těsnění v oblasti spojů, styčných ploch a potenciálních netěsností. To se týká zejména hran krytování, přechodů mezi plechovými a profilovými díly a všech montážních otvorů. Použití vývěvy předpokládá také návrh odpovídajícího napojení a případné regulace odtahu.

ZÁVĚR

Předmětem práce byl návrh a experimentální ověření zařízení schopného generovat řízené dynamické zatížení materiálů prostřednictvím tlakového vzduchu. Byla provedena rešerše běžně používaných metod vysokorychlostního testování, jejichž výstupy sloužily jako referenční rámec pro návrh vlastního řešení. Na základě stanovených požadavků byla navržena konstrukce akustického děla, zahrnující rámový systém, pneumatický rozvod, výměnné kanóny a řídicí jednotku. Celá soustava byla dimenzována s ohledem na bezpečný provoz a možnost modularity. Řídicí část založená na platformě Siemens LOGO! umožňuje spouštění jednotlivých větví a základní parametrizaci testovací sekvence.

Analytický model vycházející z charakteristiky škrceného proudění byl zpracován v prostředí MATLAB a umožňuje odhadnout hodnoty dynamického tlaku i výstupní rychlosti v závislosti na vstupním tlaku, vnitřním průměru trubky a vzdálenosti cílového bodu. Výpočty potvrdily, že pro zvolenou případovou studii, kdy vstupní tlaku je 6 bar, tak při běžné konfiguraci dochází k sonickému režimu proudění, a že dynamický tlak se se vzdáleností výrazně snižuje vlivem kuželového rozptylu. Odchylka analytického přístupu se simulací činila pro daný případ 22%

Experimentálně získané hodnoty síly byly převedeny na odpovídající dynamickou rychlost a porovnány s výsledky analytického modelu a CFD simulace. V rámci tohoto porovnání byl zaznamenán rozdíl v absolutních hodnotách, přičemž analytická metoda i simulace vykazovaly vyšší rychlosti než měření. Odchylka je přisuzována skokovému poklesu tlaku při otevření ventilu, zjednodušeným předpokladům v analytickém výpočtu a idealizaci proudového pole v CFD modelu. Přesto však všechny tři přístupy vykazují shodný trend, což potvrzuje obecnou správnost navrženého řešení.

Druhý experiment zaměřený na buzení pružného materiálu potvrdil, že navržené zařízení je vhodné i pro zkoušky zaměřené na dynamickou odezvu v oblasti vlastní frekvence. Na základě teoretického výpočtu byla určena první vlastní frekvence deskového vzorku a následně byl impulzními výstřely proveden experiment, který tuto hodnotu potvrdil. Systém umožnil nejen jednorázové buzení a záznam odezvy, ale také opakované řízené impulzy, které vedly ke vzniku rezonance. Výsledky ukazují, že zařízení lze s vhodným nastavením parametrů impulzu využít k cílené excitaci tenkých materiálů a sledování jejich kmitočtové odezvy.

Zařízení navržené v rámci této práce prokázalo svou funkčnost při generování řízeného tlakového impulzu a testování dynamické odezvy materiálů. Bylo ověřeno jak v základní konfiguraci pro měření zatěžovací síly, tak při buzení vlastní frekvence pružné desky. Výsledky potvrzují, že navržený systém je vhodný pro laboratorní aplikace v oblasti dynamického testování s potenciálem dalšího rozšíření.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. MEYERS, Marc A., 1994. *Dynamic behavior of materials*. New York: Wiley. ISBN 04-715-8262-X.
2. CHEN, D.Y.; XU, Y.; ZHANG, S.H.; MA, Y.; EL-ATY, A.A.; POKROVSKY, A.I.; BAKINOVSKAYA, A.A. A novel method to evaluate the high strain rate formability of sheet metals under impact hydroforming. J. Mater. Process. Technol. 2021, 287, 116553.
3. GRAY, G.T., 1999. Classic Spli-Hopkinson Pressure Bar Testing. In: Mechanical Testing and Evaluation. ASM Handbook. Volume 8. ASM International. ISBN 978-0-87170-389-0
4. SIVIOUR, C. R., 2025. *The Split-Hopkinson Bar*. 2. Springer Cham. ISBN 978-3-031-83152-2.
5. HOKKA, M., 2023. *Dynamic Behavior of Materials: Fundamentals, Material Models, and Microstructure Effects*. Elsevier. ISBN 978-0-323-99154-4.
6. CHAPMAN, D.J. a WALLEY, S.M., 2005. *A History of the Taylor Test and Its Present Use in the Study of Lightweight Materials. In: Design and Use of Light-Weight Materials*. Aveiro: Universidade de Aveiro. ISBN 972-99784-0-9.
7. DAVIS, J.R., 2004. *Tensile Testing*. 2. vydání. ASM International. ISBN 978-1-62708-355-3.
8. HOPKINSON, John. On the Rupture of Iron Wire by a Blow. Proceedings of the Manchester Literary and Philosophical Society. 1872, s. 40-45.
9. BLAZYNSKI, T.Z., 1987. *Materials at High Strain Rates*. 1987. Dordrech. ISBN 978-1-85166-067-4.
10. *Composite Materials: High Strain Rate Studies*, 2023. Boca Raton: CRC Press. ISBN 978-1-032-40294-9.
11. KNEUBUEHL, B.P., 2024. *Ballistics: Theory and Practice*. Springer. ISBN 978-3-662-69237-0.
12. , P.W. Cooper, 1996. *Explosives Engineering*. Wiley-WCH. ISBN 978-0-471-18548-4.
13. CELLIERS, P.M. a MILLOT, M., 2023. Imaging velocity interferometer system for any reflector (VISAR) diagnostics for high energy density sciences. Review of Scientific Instruments. Roč. 2023, , s. 94.
14. *Basics of Dynamic Mechanical Analysis (DMA)*, 2025. Online. Anton Paar. Dostupné z: https://wiki.anton-paar.com/us-en/basics-of-dynamic-mechanical-analysis-dma/. [cit. 2025-04-27].
15. *Dynamic Mechanical Analysis (DMA)*, 2025. Online. Alemnis. Dostupné z: https://alemnis.com/dma/. [cit. 2025-04-27].
16. GDOUTOS, M.K., 2024. *Mechanical Testing of Materials*. Springer Cham. ISBN 978-3-031-45989-4.
17. ABARKANE, CH.; LAMUELA, D.G.; CLIMENT, A.B.; SUARÉZ, E. a GALLEGO, A., 2017. Ultrasonic Pulse-Echo Signal Analysis for Damage Evaluation of Metallic Slit-Plate Hysteretic Dampers. *Metals*. Roč. 2017, č. 7.
18. TAYLOR, Geoffrey Ingram, 1946. *The testing of materials at high rates of loading*. Online. Journal of the Institution of Civil Engineers. Dostupné z: icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/ijoti.1946.13699. [cit. 2025-05-11].
19. *Experimentální sestava pro Split-Hopkinsonův test*, 2022. Online. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Experimental-setup-for-SPHB-impact-tests_fig2_365618284. [cit. 2025-05-11].

20. ŠLAIS, Miroslav, 2012. *Studium vlivu rychlostních a teplotních parametrů na tvařitelnost Ti slitin*. Disertační práce. Brno: VUT Fakulta Strojního Inženýrství.
21. *Dynamic Mechanical Analysis of Epoxy/Natural Fiber Composites*, 2021. Online. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/A-schematic-of-the-various-loading-functions-of-the-DMA-testing-machine-a-axial_fig1_362536993. [cit. 2025-05-11].
22. SARVA, Sai; MULLIKEN, Adam D. a BOYCE, Mary C., April 2007. Mechanics of Taylor impact testing of polycarbonate. *International Journal of Solids and Structures*. Roč. 44, č. 7-8, s. 2381-2400.
23. GILLIS, P.P. a GROSS, T.S., 1985. *Effect of Strain Rate on Flow Properties: Metals Handbook*. 9. Ohio: American Society for Metals.
24. *Elektromagnetický ventil 0-10bar G1*, 2025. Online. Dostupné z: https://www.elventil.cz/elektromagneticky-ventil-0-10bar-g1-24v-ac-nc-f.s.a. [cit. 2025-05-11].
25. *Regulátor tlaku Airpress 1" - 15bar*, 2025. Online. Dostupné z: https://www.enaradinastroje.cz/regulator-tlaku-airpress-1-15bar/. [cit. 2025-05-11].
26. *Hliníkové profily ITEM*, 2025. Online. Dostupné z: https://www.item24.com/cs-cz/profilova-technologie/hlinikove-profily. [cit. 2025-05-11].
27. *Tvarovky a fitinky*, 2025. Online. Dostupné z: https://www.heavenshop.cz/tvarovky-a-fitinky/. [cit. 2025-05-11].
28. WHITE, Frank M., 2016. *Fluid Mechanics*. 8th. New York: McGraw-Hill Education. ISBN 978-0-07-339827-3.
29. *Analysis of Wind Load on Billboard with CFD*, 2025. Online. Dostupné z: https://www.simscale.com/projects/dheiny/billboard/. [cit. 2025-05-14].
30. *Balistic testing of Material*, 2025. Online. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Ballistic-impact-test-a-Testing-set-up-b-11g-projectile_fig1_372299405. [cit. 2025-05-14].
31. MUNSON, Bruce R., c2013. *Fundamentals of fluid mechanics*. 7th ed. Hoboken, N.J.: Wiley. ISBN 978-1-11811613-5.
32. *Haberkorn: Hliníkové profily*, 2025. Online. Dostupné z: https://www.haberkorn.cz/systemy-hlinikovych-profilu/. [cit. 2025-05-18].
33. *MYLMS: Siemens Logo!*, 2022. Online. Dostupné z: https://www.mylms.cz/zajimave-clanky-a-videa-siemens-logo/. [cit. 2025-05-18].
34. *Siemens Logo!*, 2025. Online. Dostupné z: https://www.siemens.com/cz/cs/products/automation/systems/industrial/plc/logo.html. [cit. 2025-05-18].
35. ČSN. 33 1500, *Elektrotechnické předpisy. Revize elektrických zařízení*. Neznámé.
36. *Profil dutý svařovaný černý s obdélníkovým průřezem, EN 10219*, 2025. Online. Dostupné z: https://online.ferona.cz/detail/26179/profil-duty-svarovany-cerny-s-obdelnikovym-prurezem-en-10219-rozmer-40x20x2. [cit. 2025-05-18].
37. *Profil nerovnoramenný L z konstrukční oceli válcované za tepla, EN 10056*, 2025. Online. Dostupné z: https://online.ferona.cz/detail/22684/profil-nerovnoramenny-l-z-konstrukcni-oceli-valcovane-za-tepla-en-10056-l-30x20x3. [cit. 2025-05-18].
38. *KOVOMAX - technologie*, 2016. Online. Dostupné z: https://www.kovomax.cz/technologie.php. [cit. 2025-05-22].
39. *VERMATECH - Zpracování kovového materiálu*, 2023. Online. Dostupné z: https://vermatech.cz/. [cit. 2025-05-22].

40. *AKROS - Nerezový hutní materiál*, 2025. Online. Dostupné z: https://www.akros.cz/nerezovy-hutni-material. [cit. 2025-05-22].
41. MIZANUR RAHMAN, M., 2023. Numerical and analytical solutions of new Blasius equation for turbulent flow. *Heliyon*. Roč. 9, č. 3, s. 57-66.
42. *Rittal - Přehled rozvaděčů*, 2025. Online. Dostupné z: https://www.rittal.com/cz-cs/products/PG20231215SCH101. [cit. 2025-05-22].
43. FORMÁNEK, Josef, 2019. *Podklady k principu měření rychlosti a rychlosti proudění*.
44. *Tlakové nádoby a vzdušníky s certifikací EU*, 2025. Online. Dostupné z: https://www.kompresory-vzduchotechnika.cz/tlakove-nadoby--samostatne-i-vystrojene/. [cit. 2025-05-23].
45. *FESTO - Rychlé ventily MHJ*, 2025. Online. Dostupné z: https://www.festo.com/cz/cs/p/rychle-ventily-id_MHJ/. [cit. 2025-05-23].
46. *Kistler - Piezoelectric Force Sensor*, 2025. Online. Dostupné z: https://www.kistler.com/INT/en/cp/piezoelectric-force-sensors-910xc/P0000597. [cit. 2025-05-23].
47. *Kistler - Laboratory Charge Apmlifier*, 2025. Online. Dostupné z: https://www.kistler.com/INT/en/cp/laboratory-charge-amplifiers-5018a/P0000262. [cit. 2025-05-23].
48. *Tektronix - Osciliskop TDS 210*, 2025. Online. Dostupné z: https://www.tek.com/en/documents/fact-sheet/tds-210-tds-220-fact-sheet. [cit. 2025-05-23].
49. MUNSON, B.R.; YOUNG, D.F.; OKIISHI, T.H. a HUEBSCH, W.W., 2016. *Fundamentals of Fluid Mechanics*. 8th. Wiley. ISBN 978-1-119-11277-4.
50. VERSTEEG, H. K., MALALASEKERA, W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. 2nd ed. Harlow: Pearson Education, 2007. ISBN 978-0-13-127498-3.
51. FLUENT Inc. ANSYS Fluent User's Guide, Release 2025 R1. ANSYS Inc., 2025.
52. WILCOX, D. C. *Turbulence Modeling for CFD*. 3rd ed. La Canada: DCW Industries, 2006. ISBN 978-1-928729-08-2.
53. *Plexiglass - summary*, 2025. Online. Dostupné z: https://www.plexiglas.de/en/service/glossary?utm_source=chatgpt.com. [cit. 2025-05-23].
54. KREJČÍ, J. Porovnání metod řešení nelineárních dynamických soustav. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 33 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Daniel Dušek, Ph.D.

.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symboly

Označení	Legenda	Jednotka
a	číslo módu pro směr X	[-]
b	číslo módu pro směr Y	[-]
A_{pot}	průřez potrubí	[mm^2]
C_x	odporový součinitel	[-]
D_0	průměr kanónu	[mm]
D_f	ohybová tuhost desky	[-]
D_z	efektivní průměr dopadu	[mm]
E	modul pružnosti v tahu	[Pa]
f	vlastní frekvence	[Hz]
F_{Rimp}	reakční síla od impulzu	[N]
F_s	maximální síla v simulaci	[N]
G	tíhová síla zařízení	[N]
h_f	tloušťka desky	[m]
H_{max}	maximální výška osy kanónu	[m]
k	izoentropický exponent	[-]
L_G	vzdálenost těžiště ke klopnému bodu	[m]
L	délka trubky	[m]
m_f	šířka desky	[m]
m_{max}	maximální hmotnostní tok	[kg·s^{-1}]
M_{imp}	impulsní moment	[Nm]
M_T	tíhový moment	[Nm]
n_f	délka desky	[m]
p_{atm}	atmosférický tlak	[MPa]
p_{dyn}	dynamický tlak	[MPa]
$p_{dyn,z}$	dynamický tlak ve vzdálenosti z	[MPa]
p_0	absolutní tlak v komoře	[MPa]
R	měrná plynová konstanta	[J·kg^{-1}·K^{-1}]
Re	Reynoldsovo číslo	[-]
S_E	plocha efektivního průměru dopadu	[mm^2]
T	absolutní teplota prostředí	[K]
v	rychlost proudění dle daných parametrů	[m·s^{-1}]
v_{crit}	kritická rychlost proudění	[m·s^{-1}]
v_{cfd}	rychlost proudění ze simulace	[m·s^{-1}]
v_z	dynamická rychlost ve vzdálenosti z	[m·s^{-1}]
z	vzdálenost tělesa od ústí komory	[m]
ρ	objem stlačeného vzduchu	[kg·m^{-3}]
ρ_0	objem stlačeného vzduchu při atmosférickém tlaku	[kg·m^{-3}]
ρ_{eslon}	hustota materiálu (eslon)	[kg·m^{-3}]
λ	odporový součinitel tření	[-]
υ_e	Poissonovo číslo (eslon)	[-]
θ	úhel rozptylu	[°]

Zkratky

Označení	Legenda
CPU	Central Processing Unit
HMI	Human Machine Interface
PLC	Programmable Logic Controller
PMMA	Polymethylmethakrylát
SHPB	Split Hopkinson Pressure Bar

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Výpočtové modely z programu MATLAB

A1_INPUTS

B2_FRICTION

C1_CHOKED_FLOW

D1_SYSTEM

Příloha 2 Pracovní skript z programu MATLAB

E1_TEST

Příloha 3 Řídící program zařízení z programu Siemens SoftComfort