



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

PEDÁLOVÁ SESTAVA VOZU FORMULE STUDENT S AUTONOMNÍ FUNKCÍ BRZD

FORMULA STUDENT PEDAL ASSEMBLY WITH AUTONOMOUS BRAKE FUNCTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Adam Skalník

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Tobiáš

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Adam Skalník**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Martin Tobiáš**
Akademický rok: 2021/22

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

Pedálová sestava vozu Formule Student s autonomní funkcí brzd

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V rámci vývoje prvního autonomního vozidla týmu TU Brno Racing je třeba navrhnout novou pedálovou sestavu, která umožní automatické brzdění vozidla při zachování možnosti manuálního ovládání brzd řidičem. Při návrhu musí být brán ohled na omezený prostor uvnitř monokoku, minimalizaci hmotnosti a pravidla zajišťující mimo jiné také bezpečnost vozu a ergonomii.

Cíle bakalářské práce:

Proveďte rešerši brzdných systémů vozů Formula student a jiných závodních vozů.

Sestavte seznam možných řešení ovládání autonomního brzdného systému v souladu s pravidly soutěže Formula student.

Popište a srovnajte možná řešení a vyberte z nich nejvhodnější variantu vzhledem k požadavkům na vůz kladených týmem, zejména váze, zástavbě, ovladatelnosti a spolehlivosti.

Vytvořte konstrukční návrh vybrané varianty pro použití v závodním monopostu Dragon e2.

Seznam doporučené literatury:

MILLIKEN, William a MILLIKEN, Douglas. Race Car Vehicle Dynamics. 1st edition. Warrendale: SAE, 1995. 857 s. ISBN 1-56091-526-9.

GILLESPIE, Thomas. D. Fundamentals of Vehicle Dynamics. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1992. 519 s. ISBN 1-56091-199-9.

REIMPELL, Jornsens. The Automotive Chassis. 2nd edition. Oxford: Butterworth - Heinemann, 2001. 444 s. ISBN 0-7506-5054-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je provést rešerši možných řešení autonomního brzdění pro vozidlo Formule student, stanovit požadavky teamu na tento systém a vybrat nejvhodnější z nich. Na základě rešerše je poté proveden konstrukční návrh tohoto systému společně s celou pedálovou sestavou vozidla. Při konstrukci všech komponentů je kladen důraz na spolehlivost, hmotnost a vhodnou zástavbu do prostoru vozidla.

KLÍČOVÁ SLOVA

Brzdový systém, Formule student, Metoda konečných prvků, Pedálová sestava, Mechanická analýza

ABSTRACT

The goal of this bachelor thesis is to research possible options of autonomous brake system for Formula Student vehicle. Optimal solution is chosen according to the requirements of the team. This solution is designed together with the pedal assembly. Emphasis is placed on reliability, weight and suitable installation in the vehicle compartment when designing the assembly.

KEYWORDS

Brake system, Pedal assembly, Formula Student, Finite Element Analysis, Stress analysis

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SKALNÍK, Adam. *Pedálová sestava vozu Formule Student s autonomní funkcí brzd*. Brno, 2022. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Martin Tobiáš. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/138774>.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Martina Tobiáše a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 20. května 2022

.....

Adam Skalník

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat mému vedoucímu Ing. Martinu Tobiášovi za odborné rady, připomínky a vedení během vytváření této bakalářské práce. Také bych chtěl poděkovat všem, kdo se jakýmkoliv způsobem podíleli na vypracování této práce, zejména členům teamu TU Brno Racing.

OBSAH

Úvod	11
1 Formule Student	12
1.1 Team TU Brno Racing.....	12
1.2 Pravidla a bodování disciplín.....	12
2 Používané brzdné systémy	14
2.1 Základní rozdělení.....	14
2.1.1 Třecí brzdy.....	14
2.1.2 Hydraulický okruh.....	15
2.2 Brzdový systém Formule 1	15
2.3 Řešení autonomního brzdění používaná v silničních vozidlech	15
2.4 Brzdové systémy Formule Student	16
2.5 Brzdový systém monopostu eD2	17
3 Definování požadavků a konstrukčních omezení	18
3.1 Pravidla	18
3.1.1 Brzdový a plynový pedál.....	18
3.1.2 Autonomní brzdový systém.....	18
3.2 Požadovaný výkon brzdného systému.....	20
3.3 Montáž a zástavbový prostor	21
3.4 Spolehlivost.....	22
3.5 Regulovatelnost tlaku.....	22
4 Koncepční návrh možných řešení	23
4.1 Ovládání pneumatických systémů	23
4.1.1 Zásobník stlačeného plynu	23
4.1.2 Ovládací ventily.....	24
4.2 Pneumatické válce působící na pedál.....	25
4.3 Brzdový a pneumatický válec s vahadlem.....	27
4.4 Hydraulicko-pneumatický převodník	28
4.5 Brzdový válec s pneumatickou aktivací.....	29
4.6 Porovnání variant s požadavky	31
4.7 Volba vhodné varianty.....	31
5 Konstrukční řešení	32
5.1 Autonomní systém brzd	32
5.1.1 Pneumatický okruh.....	32
5.1.2 Pneumaticko-hydraulický převodník.....	33
5.1.3 Zásobníky CO ₂ s regulátorem.....	35
5.1.4 Možnost využití plynulé regulace tlaku.....	36
5.1.5 Deska plošných spojů pro EBS	38
5.2 Sestava brzdového pedálu.....	39
5.2.1 Brzdový pedál.....	40
5.2.2 Držák brzdového pedálu.....	41
5.2.3 Ověření konstrukce strukturní analýzou MKP	43

5.3	Sestava plynového pedálu	50
5.3.1	Laminace plynového pedálu.....	50
5.3.2	Nášlap pedálu.....	53
5.3.3	Držák plynového pedálu	53
Závěr.....		55
Použité informační zdroje		56
Seznam použitých zkratek a symbolů		59

ÚVOD

V soutěži Formule Student se v posledních letech výrazně rozvíjí kategorie Driverless. Team TU Brno Racing bude po dvou letech vývoje autonomního systému řízení tento systém implementovat do závodního monopostu eD2. Kromě vývoje řídicího systému se této změně také musí přizpůsobit některé části vozidla. Úpravy mechanických prvků se týkají zejména řízení a brzdového systému.

Tato práce se zabývá řešením možných variant autonomního systému brzdění na základě řešení používaných jinými týmy a návrhem vlastního řešení vhodného pro naši aplikaci. Z bezpečnostních důvodů je konstrukce omezena pravidly, která je nutné brát v potaz při volbě vhodné varianty. Brzdový systém je hlavním bezpečnostním prvkem vozidla, proto je kladen velký důraz na jeho spolehlivost. Důležitá je také konvertibilita vozidla z autonomního na manuální ovládání pro využití na různých závodech během sezony. Všechny tyto požadavky budou brány v potaz při výběru a konstrukci vlastního řešení.

Zástavbový prostor pro autonomní systém brzdění ovlivní také pedálovou sestavu. Společně bude tedy navržena i sestava brzdového a plynového pedálu. Tyto sestavy budou upraveny na základě poznatků z předchozí sezony a v důsledku limitací způsobených implementací nového systému.

Závěrem bude celé konstrukční řešení zhodnoceno a navrženy možné úpravy pro další iteraci.

1 FORMULE STUDENT

Formule Student je projekt, který má za cíl vzdělávat studenty technických oborů a připravit je na budoucí povolání. Projektu se mohou účastnit pouze studenti bakalářských a magisterských oborů. Cílem je během jednoho roku navrhnout, vyrobit a otestovat závodní vozidlo. S tímto vozidlem se potom team účastní závodů po celé Evropě. Součástí celého procesu je i zajištění financí, sponzorů a externí výroby.

Vozidla se dělí do tří kategorií [1]:

- CV – vozidla se spalovacím motorem
- EV – vozidla s elektrickým pohonem
- DV – vozidla s autonomním řízením

Soutěž se dělí na dvě hlavní části, a to dynamické a statické disciplíny. Dynamické disciplíny probíhají na závodní trati. Konkrétně se jedná o Autocross, závod na dvě kola, Endurance, vytrvalostní závod na 22 km, Skid Pad, okruh s pravou a levou zatáčkou ve tvaru číslice 8, Acceleration, zrychlení na 75 m a Efficiency, spotřeba vozidla měřená během závodu Endurance. Mezi statické disciplíny patří Business Presentation, Cost and Manufacturing a Engineering Design. V těchto disciplínách je důležité hlavně obhájení konstrukčních a výrobních řešení.

Na výsledné umístění v soutěži nemá vliv pouze umístění v dynamických disciplínách, ale také disciplíny statické, proto je důležité si výsledný design obhájit daty, zvážit ekonomický aspekt a navrhnout možný plán zpeněžení celého projektu. [1]

1.1 TEAM TU BRNO RACING

Team TU Brno Racing zkonstruoval již 11 monopostů, z toho 10 se spalovacím motorem a jeden elektrický. S postupným přechodem na elektrické a autonomní vozidlo se složení teamu změnilo. Dříve byl team složen převážně ze studentů Fakulty Strojního Inženýrství, dnes je již v teamu velký podíl studentů elektrotechniky a také informačních technologií.

Následující monopost Electric Dragon 2, zkráceně eD2 je druhé elektrické vozidlo teamu a zároveň první Driverless vozidlo s funkcí autonomního řízení. Této změně je nutné nejvíce přizpůsobit dvě konstrukční skupiny, řízení, které bude ovládáno elektrickým motorem, a brzdový systém s funkcí nouzového brzdění.

1.2 PRAVIDLA A BODOVÁNÍ DISCIPLÍN

V letošním roce byla pro soutěž Formula Student Germany změněna pravidla. Driverless vozidla již nejsou vedena pouze jako samostatná kategorie, ale disciplíny Skid Pad a Acceleration je možné odjet v autonomním režimu i v kategoriích EV a CV. Do bodování poté vstupuje součet pokusu odjetého řidičem s maximálním hodnocením 50 bodů a pokusu v autonomním režimu s maximem 75 bodů, čímž je team bodově zvýhodněn. Tato změna byla hlavním podnětem pro konstrukci nového vozidla s autonomním systémem, místo úpravy předchozího vozidla a jeho vyčlenění jen pro Driverless disciplíny.[1]

Tabulka 1 Porovnání bodových hodnocení z předchozí sezony s aktuálními pravidly [1]

	2021	2022 bez DV	2022 s DV
Static Events			
Business Plan Presentation	75	75	75
Cost and Manufacturing	100	100	100
Engineering Design	150	150	150
Dynamic Events			
Skid Pad	75	50	50+75
Acceleration	75	50	50+75
Autocross	100	100	100
Endurance	325	250	250
Efficiency	100	75	75
Overall	1000	850	1000

Z tabulky lze vidět, že teamy s DV monopostem jsou výrazně zvýhodněny v porovnání s ostatními vozidly. V disciplínách Autocross a Skid Pad je možné získat více než dvojnásobek bodů a až o 150 bodů více v celkovém hodnocení. Tato bodová ztráta by například na závodech FSG v roce 2019 pro team TU Brno Racing znamenala propad z celkového devátého místa na osmnáctou pozici. [2]

2 POUŽÍVANÉ BRZDNÉ SYSTÉMY

2.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ

Brzdové systémy lze dělit podle typu brzd [3]:

- Třecí brzdy – bubnové nebo kotoučové
- Retardéry
- Rekuperace

Třecí brzdy jsou nejpoužívanější. Dělí se na bubnové, kde dochází ke tření mezi bubnem a čelistmi a kotoučové, které brzdí pomocí kotouče a brzdových destiček. Retardéry převádí energii na teplo bez tření. Nejčastěji se používají v nákladních vozidlech, kde hrozí při dlouhodobém brzdění třecí brzdou přehřátí a selhání. S růstem popularity elektromobilů je rekuperace využívána stále častěji. Energie je převáděna zpět na elektrickou provozováním motoru v generátorovém režimu. V závodních vozidlech jsou používány téměř výhradně kotoučové třecí brzdy. V některých případech jsou používány v kombinaci s rekuperací.

Dělení je podle typu ovládání [3]:

- Mechanické
- Pneumatické
- Hydraulické

Mechanické brzdy převádí sílu z pedálu k brzdám pomocí mechanických pák a lanek. Tento systém je mechanicky nejjednodušší a dnes se u automobilů používá pouze jako parkovací brzda. Pneumatické brzdy využívají jako zdroj energie stlačený vzduch. Tyto brzdy jsou používané hlavně u nákladních vozidel a užitkových strojů. Hydraulické brzdy jsou dnes nejvyužívanější. Pedál působí na hydraulický válec, který vytváří tlak v brzdovém okruhu. Válec v brzdách působí silou přes brzdové obložení na kotoučovou nebo bubnovou brzdu a tím vytváří brzdny moment. Tento systém je v závodních vozidlech nejpoužívanější.

2.1.1 TŘECÍBRZDY

BUBNOVÉ

Vnitřní bubnové brzdy se skládají z bubnu a nejčastěji dvou čelistí. Buben je pevně spojen s kolem a čelisti jsou stacionární. Čelisti bývají na jednom konci upevněné kloubovým spojem, na druhé roztahovány buď přímo pístem, nebo vačkou která je aktivována pístem umístěným mimo prostor brzdy.

V dnešní době význam těchto brzd upadá a často je nahrazují brzdy kotoučové. Hlavními nevýhodami je špatný odvod tepla a váha brzdy. Naopak výhodou je možnost zástavby velkého průměru styčné plochy v porovnání s kotoučovými. Díky tomu může být vyvinutý větší brzdny moment při stejné síle. [3]

KOTOUČOVÉ

V závodních aplikacích se dnes využívají téměř výhradně hydraulické kotoučové brzdy. Kotouč je pevně spojen s kolem a brzdový třmen je stacionární. Hydraulické písty umístěné ve třmenu působí silou na brzdový kotouč a vyvozují tření mezi brzdovou destičkou a kotoučem. Výhodou těchto brzd je lepší odvod tepla, jednodušší údržba a nižší hmotnost. Brzdná síla má lineární průběh, na rozdíl od brzd bubnových. [3]

2.1.2 HYDRAULICKÝ OKRUH

Hlavní komponenty jsou brzdový válec, hadice a třmeny a brzdová kapalina. Volbou průměru brzdového válce a pístů ve třmenech je možné optimalizovat potřebnou sílu a chod na pedálu pro vyvinutí brzdící síly. Celý okruh musí být naplněn brzdovou kapalinou bez vzduchových bublin. Stlačitelné vzduchové bubliny nebo únik tlaku mohou způsobit selhání celého systému. [3]

2.2 BRZDOVÝ SYSTÉM FORMULE 1

Řešení pedálové soustavy Formule 1 je podobné s Formulí Student. Na brzdovém pedálu jsou umístěny dva brzdové válce. Na opačné straně jsou válce upevněny k vahadlu brzdícího účinku. Pedál je vyroben z hliníkové slitiny. [4]

Přední okruh je čistě mechanický, tlak je z brzdového válce pomocí hadic převeden přímo do šesti-pístových brzdových třmenů, které vytváří tření mezi karbonovými brzdovými disky a karbonovým obložení. Provozní teplota těchto brzd je v rozsahu 300 °C až 1000 °C. [4]

Zadní brzdy jsou ovládány pomocí jednotky brake-by-wire, do které vede okruh od brzdového válce. Většinu brzdícího účinku na zadní nápravě poskytuje ERS systém (energy recovery system). Účinek tohoto systému se ale v průběhu závodu mění v závislosti na nastavení regenerace a teplotě a nabití baterie. Brake-by-wire jednotka tedy podle tlaku v zadním brzdovém válci, který vytvoří řidič stisknutím pedálu, a očekávaného brzdícího účinku ERS systému vyhodnotí potřebný tlak v zadních brzdách. Tímto tlakem poté jednotka působí na zadní brzdové třmeny. Výsledkem je konstantní brzdící účinek při stejné síle sešlápnutí pedálu pro jakýkoliv výkon ERS. V případě poruchy brake-by-wire jednotky nebo jejích senzorů propustí jednotka tlak vytvořený pedálem do zadních brzd a brzda poté funguje pouze mechanicky. [4]

2.3 ŘEŠENÍ AUTONOMNÍHO BRZDĚNÍ POUŽÍVANÁ V SILNIČNÍCH VOZIDLECH

V moderních silničních vozidlech se stejně jako ve vozidlech Formule 1 používá systém brake-by-wire. Na pedálu jsou umístěny senzory polohy a síly, podle kterých řídicí jednotka automobilu dávkuje brzdící výkon. Na rozdíl od Formule 1 je zde touto jednotkou ovládán brzdící výkon všech kol. Tento systém se často používá u elektromobilů, kde je možné brzdící rekuperací. Řídicí jednotka tedy po signálu od řidiče brzdí pouze elektrickými motory a až při vysoké požadované hodnotě zpomalení aktivuje kotoučové brzdy. Tento systém zlepšuje

dojez elektrických vozidel a ekonomii provozu, jak snižováním spotřeby energie, tak nižším opotřebením součástí brzd. [5]

Při autonomní jízdě je tento systém využíván obdobně a vozidlo si je schopné dávkovat brzdny výkon automaticky. Zároveň je zachována funkce pedálu, kdy v případě nebezpečí může řidič stále zabrzdit vozidlo.

Brake-by-wire jednotka vytvářející tlak v hydraulickém okruhu je poháněná elektrickým motorem. V autonomním vozidle Formule Student, kde musí být zajištěna funkčnost bez elektrické energie, tak není možné podobné řešení použít jako systém nouzového brzdění. Tato jednotka by tak musela sloužit pouze jako provozní brzda při jízdě. Nouzový systém by musel být zapojen samostatně s vlastním zdrojem mechanické energie. Vzhledem k výše zmíněným požadavkům není toto řešení vhodné hlavně kvůli přidané hmotnosti.

2.4 BRZDOVÉ SYSTÉMY FORMULE STUDENT

Formule Student běžně využívá hydraulické kotoučové brzdy. Podle pravidel jsou v monopostu dva oddělené okruhy pro přední a zadní brzdy z důvodu bezpečnosti. Při selhání jednoho z okruhů nedojde k úniku tlaku v druhém a vozidlo je stále schopné zastavit. Poměr tlaků v předním a zadním okruhu je nastavován vahadlem umístěným na brzdových válcích.

Vzhledem k nízké hmotnosti vozidla se běžně používají kotouče a třmeny pro motocykly. U elektrických vozidel s pohonem všech čtyř kol je možné využívat k brzdění rekuperaci. Hydraulické brzdy se v tom případě používají pouze při silném brzdění a mohou být výrazně menší, protože brzdy při zpomalení odvádí pouze část energie a nedochází k přehřívání.

Speciálním systémem uchycení kola a brzd, používaným ve vozidlech Formule Student, je tzv. hubless systém. Kolo není upevněné na náboji. Místo toho jsou ložiska umístěna přímo mezi ráfkem a těhlicí. Brzdový kotouč je uchycen za vnější okraj a třmen je na něm nasunutý z vnitřní strany. Toto provedení vyžaduje kompletní vlastní návrh součástí včetně brzdového třmene. Tento systém používá například FS Team Delft. (Obrázek 1)



Obrázek 1 Sestava zadního kola FS Team Delft [6]

2.5 BRZDOVÝ SYSTÉM MONOPOSTU ED2

Monopost eD2 používá stejné brzdové třmeny a válce jako předchozí DX. Na předních kolech jsou použity čtyř-pístové třmeny Brembo P4.24 (Obrázek 2), na zadních dvou-pístové P2.24. Tyto třmeny jsou vyráběny jako zadní brzdy pro motocykly v závodních sériích Moto2 a Moto3. [7]



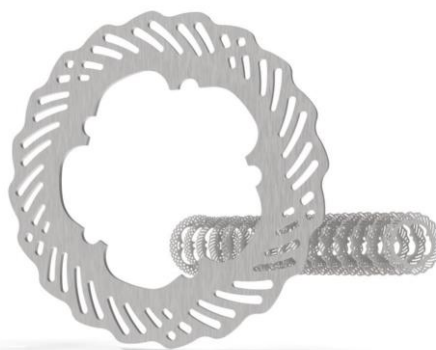
Obrázek 2 Brzdový třmen Brembo P4.24 [7]

Použité brzdové válce jsou od firmy Brembo. (Obrázek 3) Na předním okruhu byly zvoleny válec XA3.G1.42 s průměrem 16 mm, na zadním XA3.G1.45 s průměrem pístu 19 mm. [8]



Obrázek 3 Brzdový válec XA3.G1 [8]

Jedinou změnou v brzdovém systému jsou nové brzdové disky vlastní konstrukce. (Obrázek 4) S přechodem na desetipalcová kola bylo nutné použít kotouče menšího průměru. Hlavním důvodem vývoje vlastních kotoučů bylo snížení hmotnosti v porovnání s kotouči nabízenými na trhu. Kotouče jsou plovoucí. Unášec kotouče je součástí náboje kola. [9]



Obrázek 4 Brzdový kotouč eD2 [9]

3 DEFINOVÁNÍ POŽADAVKŮ A KONSTRUKČNÍCH OMEZENÍ

3.1 PRAVIDLA

Vzhledem k bezpečnosti provozu vozidla je jak manuální, tak autonomní systém brzd značně konstrukčně omezen pravidly soutěže. Pro všechna navržená řešení je nutné ověřit soulad s pravidly a v případě inspirace dříve použitými řešeními, která nesplňují nové předpisy navrhnout možné úpravy. Některá dříve používaná řešení není možné kvůli změně pravidel v tomto roce použít vůbec.

3.1.1 BRZDOVÝ A PLYNOVÝ PEDÁL

Důležitá pravidla omezující konstrukci brzdového pedálu [1]:

- T6.1.8 – Pedál musí být navržen tak, aby vydržel zatížení 2000 N na horní hraně.
- T6.1.9 – Pedál musí být vyroben z oceli, slitin hliníku, nebo titanu.
- T6.2 – Součástí sestavy musí být spínač chodu pedálu, v případě překročení běžného chodu dojde k zatlačení spínače a vypnutí pohonu vozidla.

Vzhledem k výše zmíněným pravidlům není možné pro snížení hmotnosti použít jako materiál kompozit z uhlíkových vláken jako u plynového pedálu a bude použita slitina hliníku. Testované zatížení 2000 N přesahuje běžné provozní podmínky a můžeme očekávat, že za běžných podmínek je výrazně nižší. Pevnostní analýza celého systému je tedy prováděna s tímto zatížením na horní hraně pedálu a uvažujeme pouze statickou únosnost součástí.

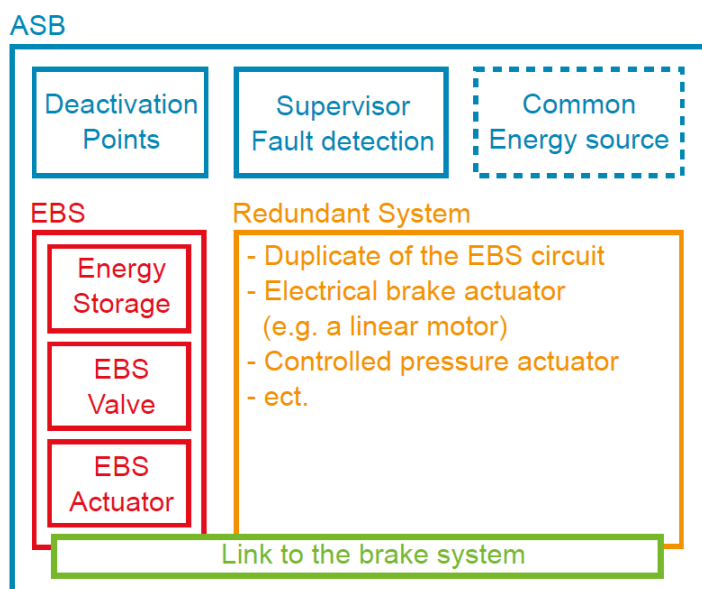
Důležitá pravidla omezující konstrukci plynového pedálu [1]:

- T11.8.4 – Pedál musí mít dvě samostatné vratné pružiny, každá musí být schopná samostatně vrátit pedál do původní polohy.
- T11.8.5 a T11.8.6 – Musí být použity minimálně dva snímače polohy pedálu s rozdílným chodem.

Plynový pedál je z hlediska konstrukce mechanické části méně omezen a je možné použít kompozitní materiály. To společně s nižšími působícími silami umožňuje navrhnout řešení s výrazně nižší hmotností než u brzdového pedálu. Pravidla se týkají pouze bezpečnosti, aby nemohla nastat situace, kdy vozidlo při selhání jedné z komponent samovolně zrychluje.

3.1.2 AUTONOMNÍ BRZDNÝ SYSTÉM

Autonomní brzdový systém (ASB – Autonomous System Brake) je podle pravidel rozdělen na několik celků. (Obrázek 5) Nouzový systém brzdění (EBS – Emergency Brake System), záložní systém (Redundant System), deaktivací body a detekci poruch. Jako záložní systém může být použit druhý, totožný nouzový systém. Na jednotlivé části systému se vztahují níže zmíněná pravidla. [10]



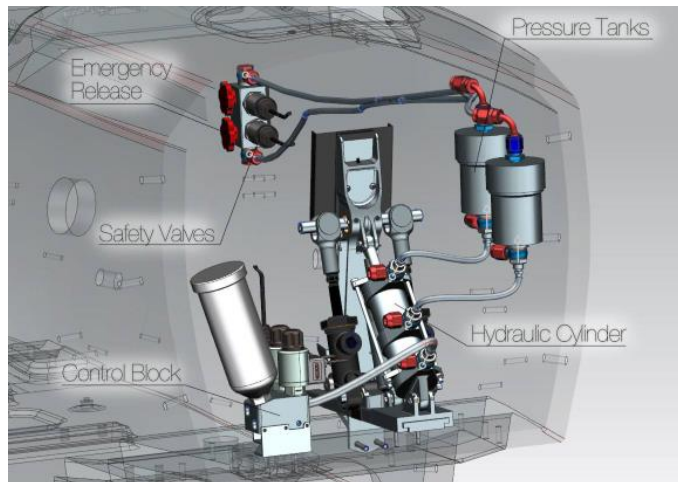
Obrázek 5 Dělení ASB systému [10]

Důležitá pravidla omezující konstrukci [1]:

- T6.1.2 – Brzdový systém musí mít dva oddělené hydraulické okruhy.
- T6.1.4 – Brake-by-wire systémy nejsou povoleny.
- T9.1.1 – Maximální povolený tlak v pneumatickém okruhu je 10 bar.
- T15.1.4 – Manuální brzdění musí být vždy možné, v případě současného manuálního a autonomního brzdění působí na brzdový kotouč vyšší z tlaků.
- T15.1.6 a T15.1.7 – ASB musí být odpojitelné pomocí maximálně dvou manuálních ovládacích prvků. Ty musí být umístěné buď poblíž ovládacího panelu za řidičem, nebo na horní straně přední části monokoku.
- T15.1.8 – Push-in konektory nejsou povoleny.
- T15.2.1 – EBS musí využívat mechanický zdroj energie. V případě ztráty elektrické energie musí dojít k aktivaci systému.
- T15.4.3 – V případě poruchy musí mít systém alespoň poloviční výkon.
- IN11.2.3 – Vozidlo musí být schopné zastavit z rychlosti 40 km/h na vzdálenosti maximálně 10 m.

Tato pravidla představují poměrně výrazná konstrukční omezení a zároveň specifikují funkci a potřebný výkon. Možná řešení navržená v následující kapitole lze díky tomu dobře porovnávat. Nutnost uložení mechanické energie také omezuje výběr prakticky na tři hlavní varianty, buď s mechanickou nebo pneumatickou pružinou se systémem, který působí proti pružině a aktivně odbrzdí, nebo s brzděním pneumatickým systémem. V absolutní většině případů se používá poslední zmíněné řešení. Je konstrukčně jednodušší, lehčí a menší.

Výjimkou je například systém využívaný teamem AMZ. Hlavním prvkem je hydraulické čerpadlo, které působí proti pneumatické pružině stlačující pedál. (Obrázek 6) K zabrzdění dochází uvolněním tlaku v hydraulické části.

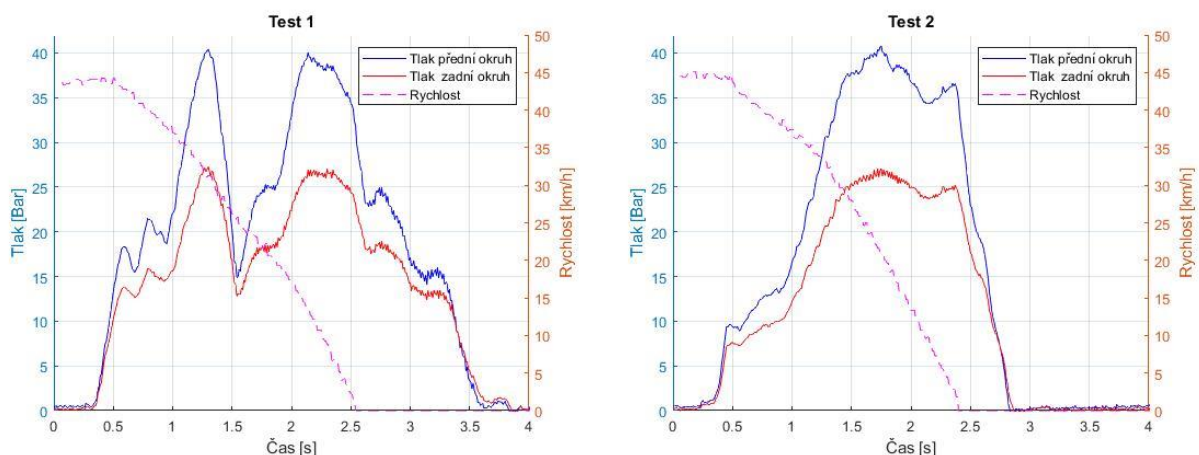


Obrázek 6 Systém týmu AMZ [11]

3.2 POŽADOVANÝ VÝKON BRZDNÉHO SYSTÉMU

Jako základní parametr při výběru a návrhu autonomních brzd byl tlak v hydraulickém brzdovém okruhu brzd. Jelikož limit pneumatického systému daný pravidly je 10 bar, potřebná hodnota tlaku brzdového okruhu přímo ovlivňuje rozměry, zástavu a uložení celé sestavy autonomních brzd.

Na vozidle DX byl proveden test autonomních brzd podle parametrů předepsaných pravidly. Bylo provedeno několik testů, kdy byl zaznamenáván tlak v brzdovém okruhu při brzdění z rychlosti 40 km/h na vzdálenosti 10 metrů. Z naměřených dat byl odečten tlak v brzdovém okruhu na hranici trakce. Tento tlak je maximální potřebný a měl by poskytnout dostatečný výkon a možnost nastavení tlaku.



Obrázek 7 Hodnoty tlaků a rychlosti při testu autonomních brzd

V levém grafu (Obrázek 7) je viditelný propad tlaků během brzdění. Ten je způsoben zablokováním brzd, kde řidič musel přerušit brzdění. Maximální naměřené hodnoty tak odpovídají tlaku při brzdění na hranici trakce. Pro výpočet možných řešení je nutné uvažovat

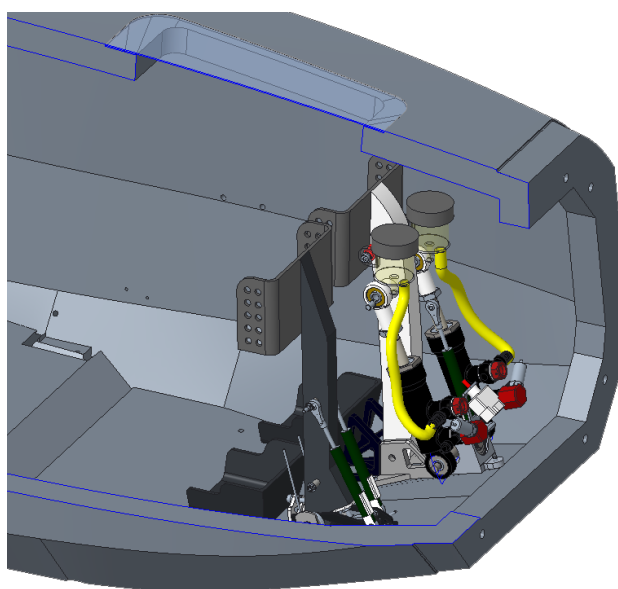
vyšší hodnoty tlaků. Výsledky byly naměřené na monopostu DX a pro nový vůz se můžou lišit. Je možné, že bude nutné využívat vyšší brzdné síly, nebo bude třeba pro stejnou sílu dosahovat vyšších tlaků. To může být způsobeno mnoha faktory, jako je váha vozidla, rozdílné pneumatiky, nebo nové brzdové kotouče.

V prvním testu dosáhl tlak v předním okruhu nejvyšší hodnoty 40,3 bar, v zadním okruhu 27,2 bar. Podobné hodnoty vykazuje i druhý test, maximální hodnoty jsou zde 40,7 bar a 27 bar. Pro následující výpočty bude použit návrhový součinitel 1,25. Budeme uvažovat tlak 50 bar pro přední okruh a 33 bar pro zadní.

3.3 MONTÁŽ A ZÁSTAVBOVÝ PROSTOR

Vzhledem k tomu, že se monopost eD2 má účastnit Driverless kategorie pouze na jednom závodě sezony, Formula Student Germany, je nutné při návrhu věnovat pozornost jednoduchosti montáže a demontáže sestavy, to zkrátí čas potřebný pro konverzi jak mezi samotnými závody, tak při testování. Veškerá spojení s monokokem a sestavou brzd by také měla mít co nejmenší vliv na design těchto komponent. Autonomní brzdový systém by neměl mít negativní dopad na jejich váhu ani funkčnost.

Prostor v přední části šasi je výrazně omezen prostorem pro řidiče, který je dán pravidly. To redukuje prostor pro umístění všech rozměrově větších komponentů do části před pedály. (Obrázek 8) Jelikož poloha pedálů je pevně dána ergonomií vozidla, má velikost vybrané varianty vliv na délku vozidla. Případné nutné prodloužení monokoku by zhoršilo jízdní vlastnosti vozidla a výrazně zvedlo jeho hmotnost.



Obrázek 8 Zástavbový prostor v okolí pedálů ve vozidle DX

Umístění v prostoru za řidičem by umožnilo větší volnost při zástavbě. Některé součásti by zde mohly být umístěny i vně monokoku, případně by bylo možné prostor přizpůsobit požadavkům. Nevýhodou je, že v tomto prostoru je umístěna většina ovládací elektroniky, akumulátor, elektromotory s převodovkou, kabeláž a další součásti. Zástavbou brzdového systému do tohoto prostoru by se zhoršil servis všech těchto skupin. V přední části je naopak pouze několik dalších komponentů a celý prostor je lépe přístupný.

Umístění v přední části je z těchto důvodů preferované a při návrhu konceptu bude na toto brán ohled.

3.4 SPOLEHLIVOST

Spolehlivost autonomních brzd má na návrh možného řešení vliv ze dvou hledisek. Jedná se o spolehlivost při aktivním používání a o spolehlivost pasivní při funkci manuálních brzd.

Při aktivním využívání je spolehlivost z většiny zajištěna pravidly. Nesmí být například využíváno Push-in pneumatických konektorů, u kterých hrozí nebezpečí vypojení. Také musí být použity dva zásobníky stlačeného plynu z důvodu úniku tlaku v jednom z nich. Při výběru vhodné varianty na toto nemusí být brán ohled, jelikož všechny tyto systémy musí splňovat pravidla, a tedy i dosahovat dostatečné aktivní spolehlivosti.

Pasivní bezpečnost při manuálním řízení, kdy autonomní brzdy nejsou aktivní, je pro návrh výrazně důležitější. Například při nejdůležitější a také nejdelší disciplíně Endurance kdy je vozidlo ovládáno řidičem, nesmí dojít k selhání brzd, které by vyřadilo vozidlo z provozu. To by mohlo nastat v důsledku úniku tlaku nebo zablokování pohybu pedálu systémem ASB. Proto je nutné systém navrhnout tak, aby k tomuto nemohlo dojít.

3.5 REGULOVATELNOST TLAKU

Autonomní systém bude na tomto vozidle využit pouze na disciplínách Skid Pad a Acceleration. Při první zmíněné disciplíně je v průběhu dostačující brzdit pouze elektromotory a po ukončení pomocí systému ASB pouze zajistit vozidlo proti samovolnému pohybu. U Acceleration slouží brzdy pouze k zastavení z plné rychlosti v přímém směru. Pro oba případy je dostačující aktivace plného výkonu brzd bez plynulé regulace. To také výrazně zjednoduší ovládací elektroniku a software systému.

Pro tento rok tedy není regulovatelný brzdový tlak požadovaný. Pro využití v následujících sezonách, kdy by mohl být systém využíván při disciplíně Autocross bude v konstrukčním návrhu tento systém zvažován, ověřena použitelnost aktuálního řešení a navrženy případné budoucí úpravy stávajícího systému nebo při návrhu nového.

Při návrhu budeme tedy požadovat nastavitelnost maximálního tlaku. Toho lze dosáhnout několika způsoby. Nejlepší možností je použití pneumatického či hydraulického okruhu s nastavitelným tlakem. V případě mechanického řešení lze tuto funkci zajistit nastavitelným přepákováním.

4 KONCEPČNÍ NÁVRH MOŽNÝCH ŘEŠENÍ

V této části budou na základě specifikovaných požadavků porovnána možná řešení.

Vzhledem k tomu, že většina teamů v předchozích sezonách pouze upravovala již kompletní formuli z kategorie Combustion nebo Electric na verzi Driverless, byla konstrukční řešení značně omezená a mnohdy jednoduchá. Vliv na váhu a výkonnost vozidla nebyl příliš důležitým parametrem, jelikož všechny disciplíny probíhaly s autonomním ovládním bez přítomnosti řidiče. Největší dopad na výkonnost a z toho vyplývající umístění měl autonomní systém a na mechanické komponenty a váhu vozidla nebyl kladen důraz. Možnost navázat na předchozí řešení je tedy značně omezená.

Pravidla specifikují, že při selhání jakéhokoliv kritického komponentu musí být autonomní systém stále schopen zabrzdit vozidlo pomocí systému EBS a v případě takového selhání musí mít systém alespoň poloviční brzdový výkon. U všech koncepčních řešení je proto nutné systém rozdělit na dvě na sobě nezávislé části.

Při výpočtech u všech variant uvažujeme nutný tlak 50 bar v předním a 33 bar v zadním okruhu. Průměr válců brzdového pedálu 16 mm pro přední okruh a 19 mm pro zadní. Ztráty a odpory nejsou uvažovány.

4.1 OVLÁDÁNÍ PNEUMATICKÝCH SYSTÉMŮ

4.1.1 ZÁSOBNÍK STLAČENÉHO PLYNU

Z důvodu nutnosti dvou oddělených systémů nelze použít pouze jeden zásobník. Na monopostu DX byla pro pneumatické řazení používána tlaková lahev z uhlíkového kompozitu pro paintball zbraň od výrobce ARMOTECH. Její objem je 0,8 l. [12]

Při jedné jízdě v autonomním režimu je třeba zabrzdit maximálně třikrát. Objem zásobníku tak může být výrazně menší. Protože lahve na stlačený vzduch s menším objemem a nízkou hmotností se běžně nevyrábí, jako vhodná alternativa se jeví CO₂ bombičky. Lze je koupit v několika verzích, nejčastěji to je 8 g, 12 g a 16 g. Všechny jsou dostatečně kompaktní, a proto je z hlediska opakovaného použití vhodné volit co největší. S přihlédnutím k ceně, která je u velikosti 16 g v porovnání s 12 g výrazně vyšší, byla zvolena menší z těchto dvou možností.

K nastavení výstupního tlaku je nutné opatřit bombičku tlakovým regulátorem. Stejný koncept se používá k pohánění airsoft zbraní. Je možné zakoupit kompletní řešení obsahující regulátor, adaptér a pouzdro na bombičku. (Obrázek 9) Tyto produkty ale nemají možnost sledování tlaku bombičky před regulátorem. To je nutné z důvodu kontroly úniku tlaku, kdy musí podle pravidel při úniku dojít k nouzovému brzdění. Bude proto třeba navrhnout vlastní adaptér s tlakovým senzorem, ventilem bombičky a dalšími prvky.



Obrázek 9 Příklad pouzdra bombičky s regulátorem [13]

4.1.2 OVLÁDACÍ VENTILY

K aktivaci EBS systému bude použit elektromagnetický pneumatický ventil. Ventil je nutné zapojit tak, aby při přerušení proudu došlo k aktivaci EBS. To znamená, že musí být použit monostabilní ventil, který je výchozím, nenapájeném stavu otevřený. Dalším kritériem výběru byl systém ovládání ventilu, není možné použít ventily s nutností externího zdroje nižšího tlaku k ovládání ventilu, takzvaný pilot, které jsou u ventilů malých rozměrů časté. Preferované napájení je pomocí 24 V DC, které používá celá nízkonapěťová kabeláž formule.

Kvůli častým poruchám v dřívějších sezonách, kdy docházelo k vypojení vzduchové hadice z rychlospojek, byl tento typ připojení zakázán a je nutné použít jiný typ konektoru. Vzhledem k nízkému objemovému toku byly přednostně voleny ventily s malým pneumatickým připojením, konkrétně s interním závitem M5, do kterého bude zašroubován konektor s pojistnou maticí od firmy SMC. [14]

Všechny uvažované ventily byly vybrány z katalogů firem SMC a Festo, s nimiž má team zkušenosti z předchozích let.

Při spojení ventilu s ostatními komponenty vstupní i výstupní hadicí byla vybrána řada VUVG od firmy Festo [15]. Tato řada má maximální povolený tlak 0,8 MPa, nebude tak plně využívat maximální povolený tlak 10 MPa, ale všechny řady s touto maximální hodnotou jsou výrazně větší a těžší. Je proto vhodné zvolit menší variantu.

V případě možnosti namontování ventilu přímo na tělo pneumatického válce vlastní konstrukce bude použita řada V100A od firmy SMC, maximální povolený tlak je pouze 0,7 MPa, což je méně než u produktů od Festo. [16] Tato řada má ale výrazně menší rozměry a spojení bez konektorů a hadic umožní snížení hmotnosti a ceny a zároveň zjednoduší zástavbu a servis.

4.2 PNEUMATICKÉ VÁLCE PŮSOBÍCÍ NA PEDÁL

Tento koncept je nejrozšířenější. Lze takto upravit již kompletní vozidlo pouze s malým zásahem do původních součástí. Společně s tím, že pro úpravu není nutné konstruovat velké množství dílů, je toto řešení využíváno teamy, které upravují již postavené vozidlo na Driverless. Tento systém zvažujeme hlavně kvůli jednoduchosti celé sestavy, spolehlivosti a poměrně nízké pořizovací ceně.

Pro zjištění rozměrů a velikosti válců je nutné vypočítat potřebnou sílu působící na pedál. Z té je poté možné určit průměr a délku ve kterých se vyrábí komerčně nabízené varianty. Tato síla je určena ze součtu sil na obou brzdových válcích, které jsou vypočteny ze známého tlaku a průměru válců.

Síla v ose válců působící na pedál:

$$F_B = F_{B1} + F_{B2} = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \cdot p_1 + \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} \cdot p_2 \quad (1)$$

$$F_B = \frac{\pi \cdot 16^2}{4} \cdot 5 + \frac{\pi \cdot 19^2}{4} \cdot 3,3 = 1941 \text{ N}$$

Pro zachování dvou oddělených okruhů a zajištění funkčnosti při selhání jednoho komponentu budou použity dva válce. Každý musí mít minimálně polovinu potřebného výkonu. [1] Uvažujeme téměř vodorovnou montáž se spojením k pedálu zhruba ve výšce nášlapu. Pro výpočet síly tak můžeme použít přímo pedálový poměr. [17]

Výpočet potřebné síly pneumatického válce:

$$F_V = \frac{1}{2} \cdot \frac{F_B}{i_{PR}} \quad (2)$$

$$F_V = \frac{1}{2} \cdot \frac{2081}{4} = 243 \text{ N}$$

Z této síly a očekávaném tlaku v pneumatickém okruhu s použitím ventilu Festo lze vypočítat průměr válce:

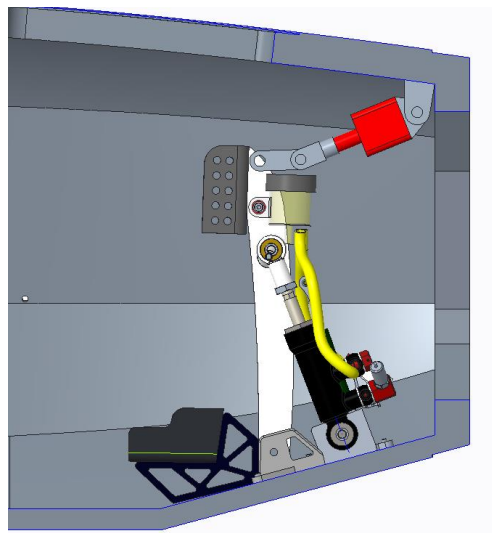
$$F_V = \frac{\pi \cdot d_v^2}{4} \cdot p_v \quad (3)$$

$$d_v = \sqrt{\frac{4F_V}{\pi \cdot p_v}}$$

$$d_v = \sqrt{\frac{4 \cdot 243}{\pi \cdot 0,8}} = 19,67 \text{ mm}$$

Jako možná varianta byl zvolen válec BF0200020. [18] Tento válec má průměr pístu 20 mm a zdvih 20 mm. Průměr válce je nejbližší vyšší vyráběný. Dostatečný je také maximální přípustný tlak 10 bar. Důležitá je jeho malá délka. Tradiční hydraulické válce by nebylo možné do prostoru mezi pedály a přední část monokoku umístit.

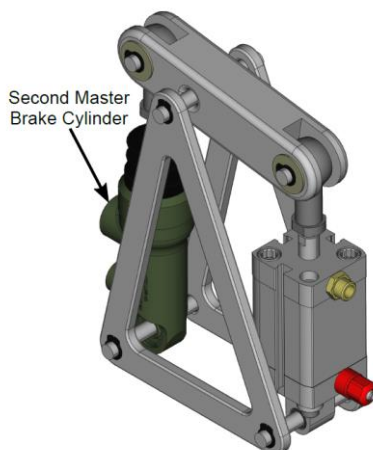
Válec by bylo nutné upravit tak, aby byly ve výchozí poloze vysunutý, nebo ovládat jeho chod v obou směrech pomocí 5/2 ventilu. Válce by také musely být připevněny k pedálu přes kloubový spoj, ten by umožnil stlačení pedálu i v případě, že je válec vysunutý a nebránil by manuálnímu brzdění. (Obrázek 10)



Obrázek 10 Možná zástavba pneumatických válců ve vozidle eD2

Toto řešení by vyžadovalo další bod uchycení v brzdovém pedálu a uchycovací body v horní stěně monokoku. Jedná se o poměrně velký zásah do okolních dílů. Komponenty jsou také umístěny vysoko a měly by negativní dopad na výšku těžiště. Jak je zřejmé z návrhu zástavby, do tohoto prostoru by nebylo možné umístit válec s delším chodem. Je možné, že by chod nebyl dostatečný pro úplné stlačení pedálu. Při návrhu by potřebný chod musel být ověřen měřeními pedálu na vozidle DX, kde je totožný hydraulický systém, jako na eD2.

4.3 BRZDOVÝ A PNEUMATICKÝ VÁLEC S VAHADLEM



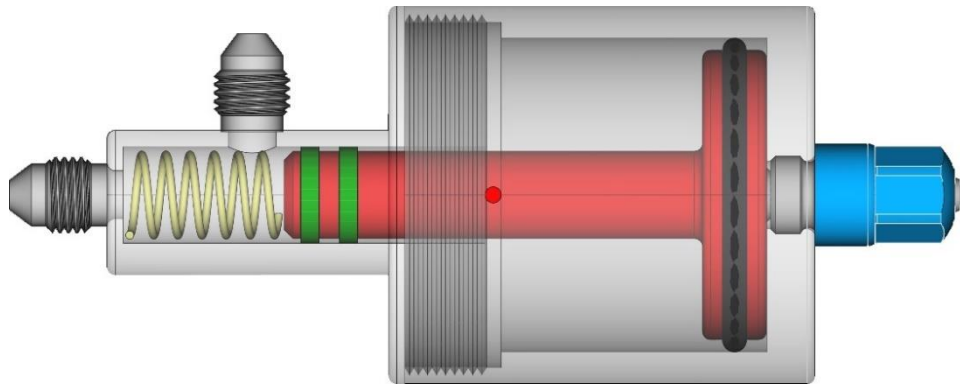
Obrázek 11 Brzdový a pneumatický válec s vahadlem [10]

Tento systém se skládá ze tří hlavních částí – pneumatického válce, brzdového válce a vahadla, které je spojuje. (Obrázek 11) Toto řešení má v porovnání s předchozím několik výhod. Je možné použít pneumatický válec s menším průměrem, jelikož vahadlem jde znásobit síla působící na brzdový válec. Systém je také možné umístit kamkoliv ve vozidle, protože jediné spojení s brzdovou sestavou je pomocí brzdových hadic. Díky tomu nemusí být ovlivněn design ostatních komponentů.

V hydraulickém okruhu by byl použit standardní brzdový válec, používaný na brzdovém pedálu. Spolehlivost při manuální brzdění je v porovnání s předchozím návrhem nižší, jelikož jsou v hydraulickém okruhu zapojeny sériově dva brzdové válce a při selhání jednoho z nich dojde k úniku tlaku z celého okruhu. Z předchozích zkušeností, kdy nedošlo k žádné poruše na brzdových válcích, můžeme říct, že spolehlivost by i tak byla dostatečná.

Toto řešení má také komplikovanější zástavbu, kdy by bylo nutné mít uvnitř monokoku několik bodů uchycení pro jednotlivé komponenty, nebo by celý systém musel být umístěn v samostatném rámu, to zvyšuje hmotnost, rozměry a složitost zástavby.

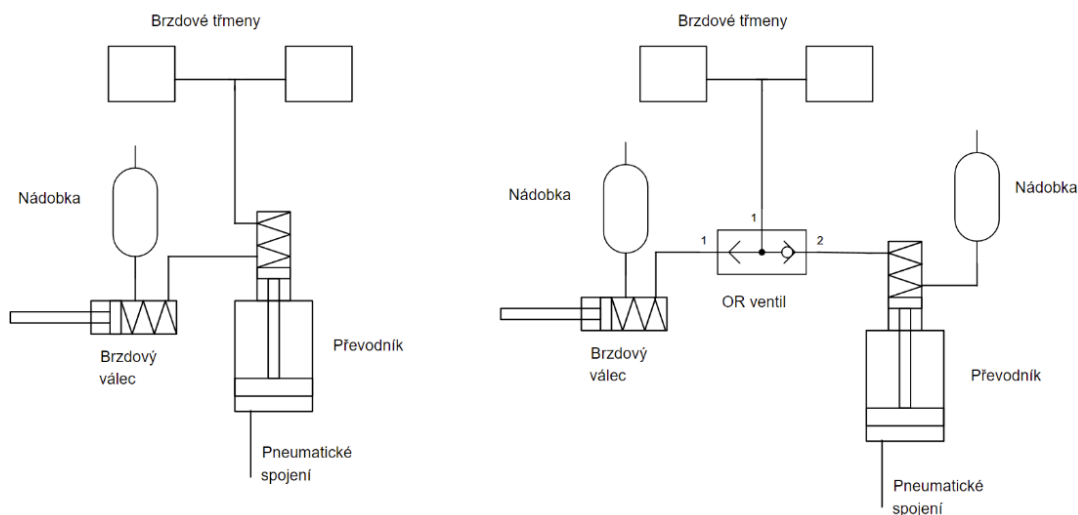
4.4 HYDRAULICKO-PNEUMATICKÝ PŘEVODNÍK



Obrázek 12 Hydraulicko-Pneumatický Převodník [10]

Převodník vlastního návrhu nabízí nejmenší možnou zástavbu a váhu. Hlavní části jsou pneumatický a hydraulický válec a píst společný pro oba válce. (Obrázek 12) Průměry hydraulické i pneumatické části mohou být optimalizovány s ohledem na požadovaný tlak, chod pístu a objem vytlačené brzdové kapaliny.

Výhodou je také jednoduchost zástavby. Součást může být umístěna kdekoli v vozidle a nevyžaduje speciální body pro uchycení k monokoku. Převodník může být v hydraulickém okruhu napojen buď sériově mezi brzdový válec a třmeny, nebo paralelně s válcem s použitím OR ventilu, aby nemohlo dojít k úniku tlaku z převodníku do nádobky brzdového válce nebo naopak. (Obrázek 13)



Obrázek 13 Možná zapojení převodníku

Nevýhodou tohoto řešení je hlavně spolehlivost. Není jisté, jestli by v hydraulické části nedocházelo u úniku kapaliny nebo zavzdušňování. Celý brzdový okruh by se také obtížně odvzdušňoval, zejména v případě použití OR ventilu.

4.5 BRZDOVÝ VÁLEC S PNEUMATICKOU AKTIVACÍ

Jedná se o tlakový převodník vyrobený kombinací brzdového válce Brembo o průměru 16 mm s díly vlastní konstrukce. Tím je možné dosáhnout vyšší spolehlivosti, protože na hydraulické straně je použitý již ozkoušený model brzdového válce. Spolehlivost pneumatické části není kritická, jelikož nebude dlouhodobě aktivní a případný malý únik tlaku nemá na zastavení vliv.

Nevýhodou je konstrukční omezení, které jsou dané rozměry brzdového válce. Vybraný brzdový válec má nejmenší vyráběný průměr a není tedy možné zmenšit pneumatickou část, pokud má být dosaženo požadovaného tlaku v brzdovém okruhu. Pneumatický válec musí být také dostatečně dlouhý, aby se do něj vešla původní hřídel brzdového válce.

Z tlaků určených v části 3.1 a průměru brzdového válce můžeme určit teoretický průměr pneumatického válce. Průměr bude poté určen podle normy vzhledem k průměru těsnícího kroužku:

$$p_H \cdot \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} = p_P \cdot \frac{\pi \cdot d_P^2}{4} \quad (4)$$

$$d_P = d_2 \sqrt{\frac{p_H}{p_P}}$$

Pro variantu s ventilem Festo a tlakem 8 bar:

$$d_P = 16 \sqrt{\frac{50}{8}} = 40 \text{ mm}$$

Nejbližší vyšší rozměr podle PN 02 9280: 40 mm [19]

Pro variantu s ventilem SMC a tlakem 7 bar

$$d_P = 16 \sqrt{\frac{50}{7}} = 42,76 \text{ mm}$$

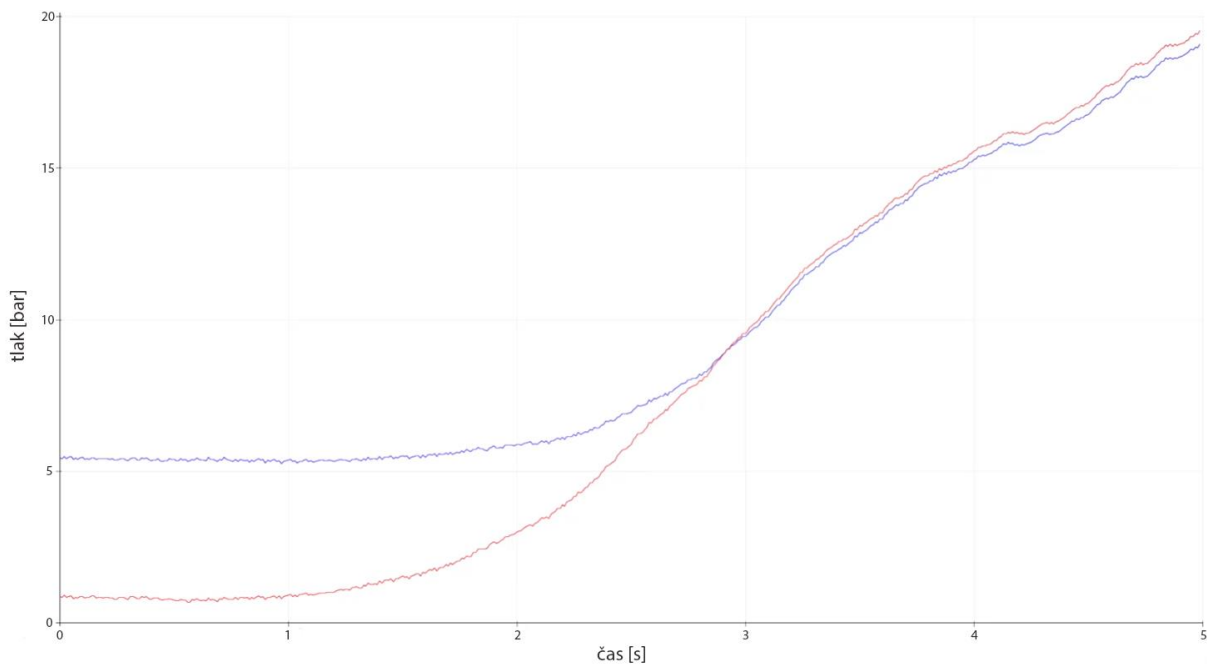
Nejbližší vyšší rozměr podle PN 02 9280: 43 mm [19]

Pro toto řešení bylo také nutné ověřit pravidlo T15.1.4, podle kterého musí při současném brzdění manuálním a autonomním systémem působit větší z těchto tlaků. [1] Byl proveden test, při kterém byly dva válce zapojeny sériově. Druhý válec v sérii byl stlačen do stálé pozice a poté byl stlačován první válec. Cílem bylo zjistit, jestli je možné tlak z prvního válce protlačit skrz těsnění druhého v případě, že jsou oba aktivované. Tlakovými senzory byly měřeny hodnoty za prvním i druhým brzdovým válcem. K záznamu hodnot bylo použito Arduino Uno. (Obrázek 14)



Obrázek 14 Zapojení a zatěžování při testu

Zaznamenané hodnoty tlaků byly vykresleny do grafu. (Obrázek 15)



Obrázek 15 Výsledky testu

Z grafu můžeme vidět, že tlak v prvním válci (červená) při překročení tlaku v druhém válci (modrá) působit na druhý tlakový sensor. Tato konfigurace tedy splňuje pravidla.

4.6 POROVNÁNÍ VARIANT S POŽADAVKY

Pro srovnání byly využity tyto parametry, které byly přesněji popsány v předchozích kapitolách.

SPOLEHLIVOST

Spolehlivost byla zvažována hlavně vzhledem k vlivu na manuální brzdění. Autonomní systém brzd by neměl zvyšovat pravděpodobnost poruchy, jako je únik tlaku nebo zavzdušnění, obzvláště v případě že není aktivní.

HMOTNOST

Zvažujeme hmotnost samotného akčního členu i všech dílů systému a nárůst hmotnosti ostatních dílů z důvodu instalace autonomních brzd. Hmotnost není možné určit přesně, protože zástavba a volba ovládacích ventilů, konektorů a dalších vedlejších komponent má výrazný vliv na hmotnost. Porovnání je tedy orientační.

ZÁSTAVBA

Na zástavbu má vliv hlavně velikost komponent a možnost jejich rozmístění v prostoru monokoku. Zásah do monokoku nebo ostatních dílů je nežádoucí.

SERVIS

Pod servis je zahrnuta náročnost instalace s odvzdušněním brzdové soustavy, vyjmutí celé sestavy z vozidla a vliv na servisování komponent spojených s touto sestavou.

Tabulka 2 Hodnocení možných řešení v jednotlivých kategoriích

Systém	Spolehlivost	Hmotnost	Zástavba	Servis	Celkem
Pneumatické válce na pedálu	9	2	2	8	21
Válce s vahadlem	7	4	5	7	23
Hydraulicko-pneu. převodník	2	10	10	3	25
Brzdový válec s pneu. aktivací	6	8	9	6	29

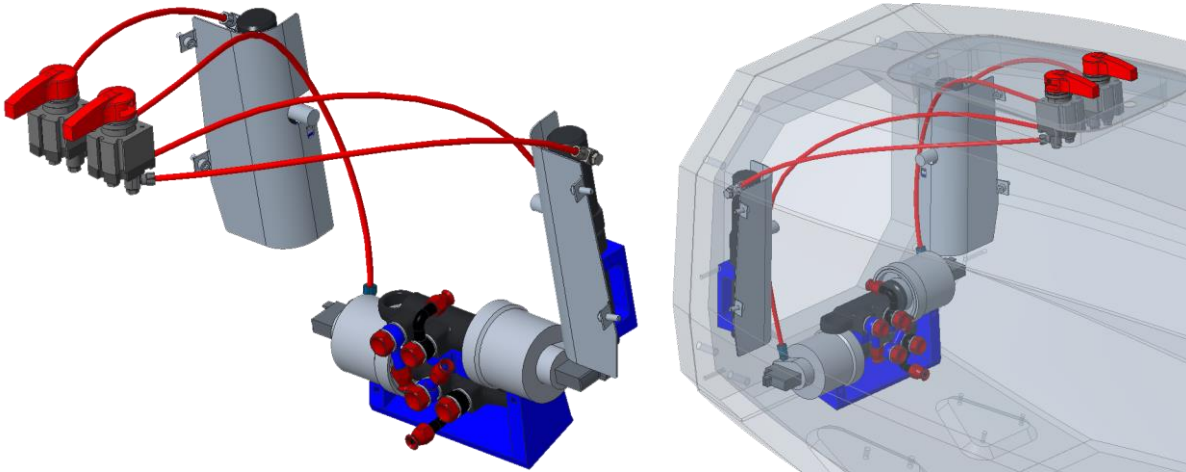
4.7 VOLBA VHODNÉ VARIANTY

Jako nejlepší varianta se jeví brzdový válec s pneumatickou aktivací vlastního návrhu. Systém bude poháněn 12 g CO₂ bombičkou s tlakovým regulátorem. Tato varianta má nejmenší vliv na design pedálové sestavy a dobrou možnost zástavby. Nemělo by dojít k výraznému ovlivnění náročnosti servisu brzd a jejich spolehlivosti. Celý systém je s brzdovým okruhem spojen pouze brzdovými hadicemi a jeho vyjmutí by tedy nemělo být komplikované. Díky velkému množství komponentům vlastního návrhu bude také možné minimalizovat hmotnost celé sestavy.

5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

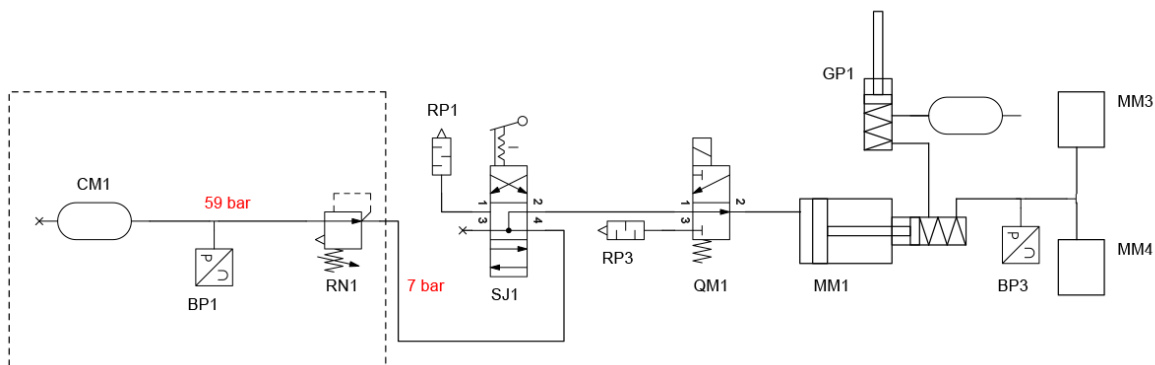
Hlavním cílem konstrukce brzdového a plynového pedálu bylo zlepšit nastavitelnost polohy pedálů a vahadla rozdělení brzdného účinku a zjednodušit servis brzdového systému. Pedálová soustava je navíc omezena prostorem pro pneumaticko-hydraulické převodníky před pedály a CO₂ zásobníky po jejich bocích a bylo nutné ji této změně přizpůsobit.

5.1 AUTONOMNÍ SYSTÉM BRZD



Obrázek 16 Sestava autonomního systému brzd

5.1.1 PNEUMATICKÝ OKRUH



Obrázek 17 Schéma pneumatického a hydraulického okruhu

Komponenty pneumatického a hydraulického okruhu (*Obrázek 17*):

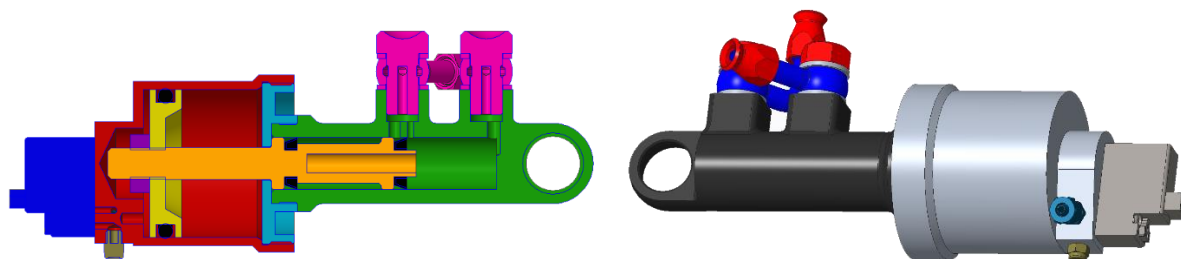
- CM1 – Zásobník CO₂
- BP1 – Sensor tlaku v zásobníku
- RN1 – Tlakový regulátor
- SJ1 – Manuální ventil
- QM1 – Elektromagnetický ventil
- RP1 a RP3 – Pneumatické tlumiče na výstupech
- MM1 – Pneumaticko-hydraulický převodník
- GP1 – Přední brzdový válec s nádobkou brzdové kapaliny
- BP3 – Sensor tlaku v brzdovém okruhu
- MM3 a MM4 – Brzdové třmeny

Z výše uvedených možností bylo zvoleno ovládání elektromagnetickým ventilem SMC 124 A s maximálním tlakem 7 bar. [16] Jedná se o ventil typu Normally Open. Ve výchozím nenapájeném stavu je ventil otevřen a válec natlakovaný. V napájeném stavu je vstup do válce uzavře, výfuk otevře a dojde k uvolnění tlaku.

Mezi zásobníkem stlačeného plynu a pneumatickým akčním členem musí být umístěn manuální ventil pro mechanické odpojení autonomního systému brzd. Byl zvolen ventil Festo VHER-P-H-B43U-B-M5 [20]. Na schématu výše lze vidět zapojení celého systému. V tomto zapojení má ventil více funkcí zároveň. Ve střední poloze je průchozí a umožňuje zabrzdění, v obou krajních polohách dojde k odpojení převodníku od zásobníku. V jedné se při odpojení vypustí tlak z převodníku, tím se odbrzdí vozidlo, tato funkce je předepsána pravidly. Druhá poloha slouží k vypuštění přebytečného plynu ze zásobníku v případě, že chceme vyjmout bombičku z pouzdra nebo systém rozpojit.

Ke spojení jednotlivých komponent je použita pneumatická hadice TU04 o vnějším průměru 4 mm. [21] K regulátoru a manuálnímu ventilu jsou hadice připojené L konektory M5HL. [22] Na tlakovém převodníku je použitý přímý konektor M5H4. [14] Nepotřebný výstup na manuálním ventilu je zaslepen zátkou M5P. [23] Všechny tyto komponenty jsou od firmy SMC. Na výstupech sloužících k uvolnění tlaku je nainstalován pneumatický tlumič od firmy Festo. [24] Všechna pneumatická spojení mají závit M5. Na výstupu z regulátoru je vnitřní závit G1/8. Zde byla použita redukce na M5 od firmy SMC. [25]

5.1.2 PNEUMATICKO-HYDRAULICKÝ PŘEVODNÍK



Obrázek 18 Pneumaticko-hydraulický převodník

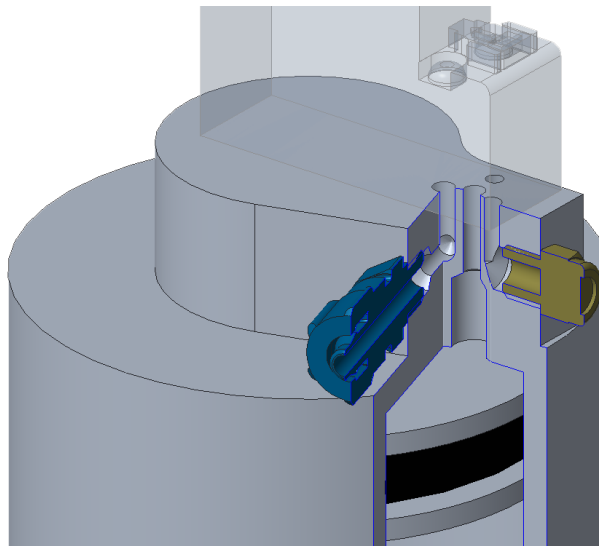
Pro převod tlaku z pneumatického na hydraulický okruh byla z důvodu spolehlivosti zvolena kombinace kupovaného brzdového válce s pneumatickým válcem vlastní konstrukce. (Obrázek 18)

Použitý válec je totožný s pedálovým válcem předního okruhu. Jedná se o model Brembo XA3.G1.42 s průměrem 16 mm. (Obrázek 19) Víčko na straně hřídele lze nahradit adaptérem pro pneumatický válec. [8] Spojení je realizováno závitem M25x1. Ve finálním návrhu byl po diskusi se členy týmu zvolen průměr pneumatického válce 46 mm, aby bylo dosaženo potřebného brzdného účinku za všech podmínek.



Obrázek 19 Brzdový válec Brembo

Ventil SMC 124 A je možné připojit přímo na tělo pneumatického válce. V horní části válce jsou vyvrtány kanálky propojující ventil a vnitřní prostor válce se vstupním a výstupním konektorem. Na vstupu je použitý konektor SMC M-5H-4 [14], na výstupu tlumič od společnosti Festo. [24] Ventil je s válcem spojen dvěma šrouby M2X15. (Obrázek 20)



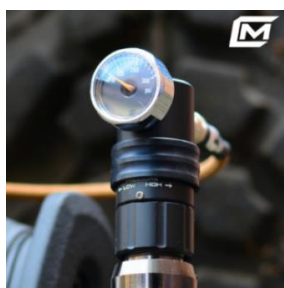
Obrázek 20 Pneumatické spojení ventilu a válce

Píst je našroubován přímo na původní závit hřídele brzdového válce se závitem 3/8-24 UNF a zajištěn proti povolení pojistnou maticí. Těsnění je realizováno O-kroužkem PN 02 9280 46x38.

5.1.3 ZÁSOBNÍKY CO₂ S REGULÁTOREM

Jako zásobník je použita 12 g CO₂ bombička. Tlak uvnitř bombičky je výrazně závislý na teplotě. Za pokojové teploty je CO₂ v kapalně fázi, tlak je zhruba 59 bar. Tento tlak začne za běžných podmínek klesat až v okamžiku odpaření veškeré kapaliny. Při používání je tedy téměř konstantní až do úplného vyčerpání. Při zvyšování teploty tlak roste. Bodu varu dosáhne při teplotě zhruba 88 °C. [26]

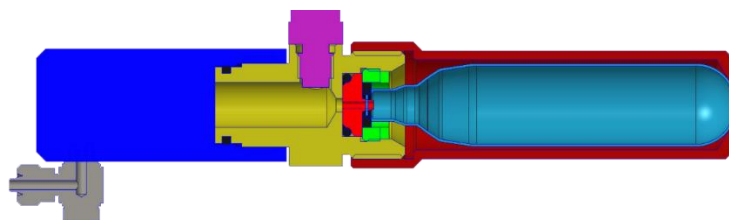
Nejvyšší dovolený tlak v pneumatickém okruhu je 7 bar, tlak bombičky se tedy musí regulovat. Pro regulaci byl použit regulátor Mancraft MMR s rozsahem výstupního tlaku 4 až 17 bar. (Obrázek 21) Tento regulátor je vyráběn pro použití na airsoft zbraních buď s tlakovou lahví, nebo právě CO₂ bombičkou. Byl zvolen kvůli malým rozměrům a hmotnosti, vhodnému rozsahu tlaků a zajištěné funkčnosti s použitým plynem.



Obrázek 21 Mancraft MMR regulátor [27]

Spojení těchto dvou součástí zajišťuje adaptér s pouzdem pro uložení bombičky s ventilem. (Obrázek 22) Těsnění mezi regulátorem a adaptérem zajišťuje O-kroužek PN 02 9281 14x2. K adaptéru se zároveň připojuje tlakový senzor, který snímá tlak přímo v bombičce. Při poklesu tlaku pod povolenou hodnotu v případě úniku plynu dojde k aktivaci brzd a zastavení vozidla.

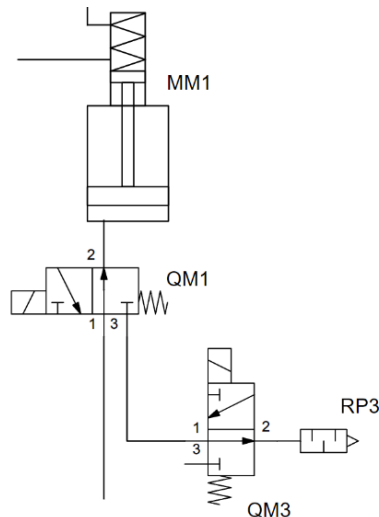
Kuželový ventil při utahování pouzdra prorazí stěnu bombičky. Zároveň musí těsnit, aby mezi bombičkou a ventilem nedocházelo k úniku tlaku. Těsnění je navíc zajištěno plochou gumou, která by měla zabránit malým únikům. Protože tvar kuželu není normalizovaný a nelze dohledat požadované rozměry, byl adaptér navržen tak, aby se tato součást snadno vyměňovala a bylo možné provádět změny. Kužel je v adaptéru zajištěn maticí s vnějším závitem M16x1 a utěsněn O-kroužkem PN 02 9281 10x2. Pouzdro bombičky je našroubováno na adaptér závitem M24x2. Utažením pouzdra se bombička natlačí na kužel a tlak se uvolní do regulátoru. Adaptér, pojistná matice a pouzdro bombičky jsou vyrobeny z hliníkové slitiny EN AW 7075 T6. Kuželový ventil z oceli 25CrMo4.



Obrázek 22 Sestava regulátoru s bombičkou

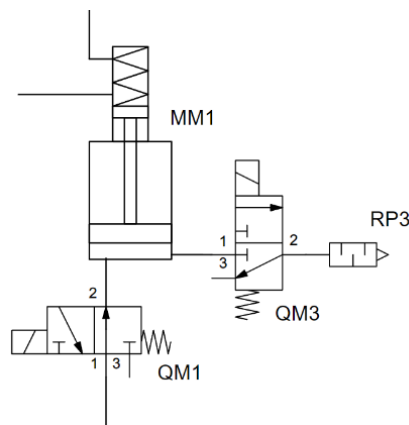
5.1.4 MOŽNOST VYUŽITÍ PLYNULÉ REGULACE TLAKU

V případě potřeby lze tento systém upravit tak, aby bylo možné plynule regulovat tlak. Nejjednodušší řešení je výměna pneumatického tlumiče na výstupu z tlakového převodníku za výstupní konektor a napojení druhého ventilu. (Obrázek 23) Nevýhodou tohoto řešení je, že vzhledem k funkci aktuálně použitého ventilu není možné zároveň napouštět a vypouštět tlak z válce, protože výstup je při napouštění uzavřený. Při přepínání napouštěcího ventilu by také docházelo ke skokové změně tlaku, vlivem rozdílu tlaků mezi pneumatickým válcem a pneumatickým okruhem za ním, který by se otevřel při uzavření napouštěcího ventilu. Toto řešení tedy není optimální, ale je snazší a nevyžadovalo by žádné úpravy původních součástí.



Obrázek 23 Sériově zapojené ventily

Lepším řešením by bylo využití dvou ventilů připevněných přímo na válec. (Obrázek 24) Napouštěcí a vypouštěcí ventily by byly zapojeny paralelně. Tím by bylo možné využívat oba zároveň, a tak plynule regulovat tlak. Také by nedocházelo ke skokovým změnám. Toto řešení by vyžadovalo výrobu nového pneumatického válce s dvěma kanálky pro každý ze dvou ventilů. Zbytek sestavy by mohl zůstat beze změny. Pro splnění pravidel by musel být na vstupu použit ventil v nenapájeném stavu otevřený, na výstupu uzavřený.



Obrázek 24 Paralelně zapojené ventily

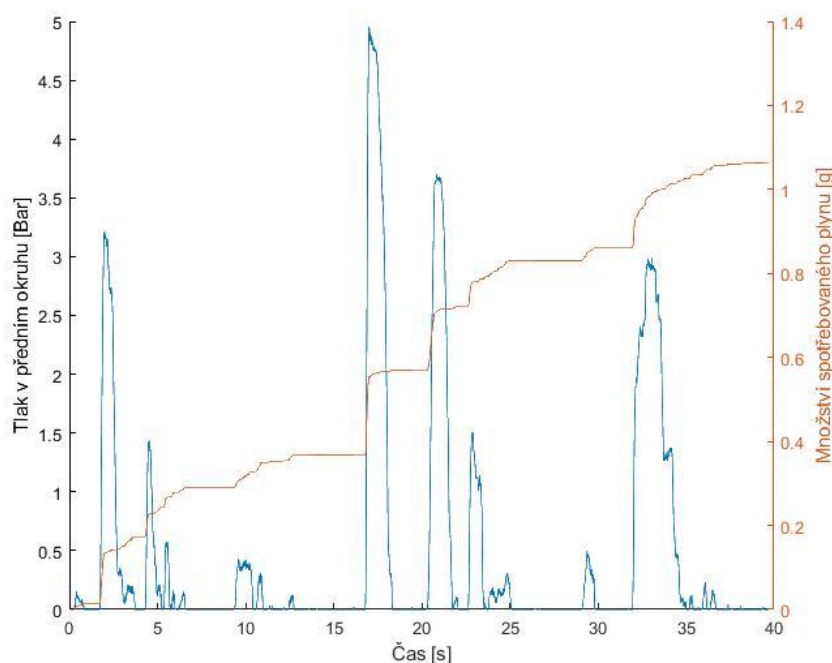
Pro funkci plynulé regulace je také nutné ověřit, zda mají zásobníky stlačeného plynu dostatečný objem a nedošlo by k vyčerpání zásobníku během jízdy.

Pro výpočet byla využita data z jednoho kola tratě Autocross. Hodnoty tlaků v předním brzdovém okruhu byly přepočteny na očekávaný tlak v pneumatickém okruhu. Pomocí iteračního výpočtu lze ze stavové rovnice při známém tlaku, konstantním objemu a při uvažování konstantní teploty vypočítat změnu množství plynu ve válci. Pro výpočet uvažovány pouze kladné změny tlaku, vypočtené změny hmotnosti v každém kroku byly sečteny:

$$\Delta m_n = (P_n - P_{n-1}) \cdot \frac{V}{r \cdot T} \quad (5)$$

$$m = \sum \Delta m_n$$

Hodnoty byly vykresleny do grafu. (Obrázek 25)



Obrázek 25 Spotřeba CO₂ při jednom kole tratě Autocross

Z grafu na lze vidět, že při jednom kole se spotřebuje zhruba 1,05 g CO₂. Při použití na závodech můžeme očekávat při jízdě na dvě kola na delší trati spotřebu do 4 g. Tento výpočet není přesný, neuvažuje ochlazování válce a zásobníku při dlouhodobém používání a ztráty způsobené regulací tlaku. I přesto lze říct, že bombička s obsahem 12 g CO₂ je pro tyto účely dostatečná a celý systém by byl s drobnými úpravami využitelný v budoucích sezonách i pro disciplínu Autocross.

5.1.5 DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ PRO EBS



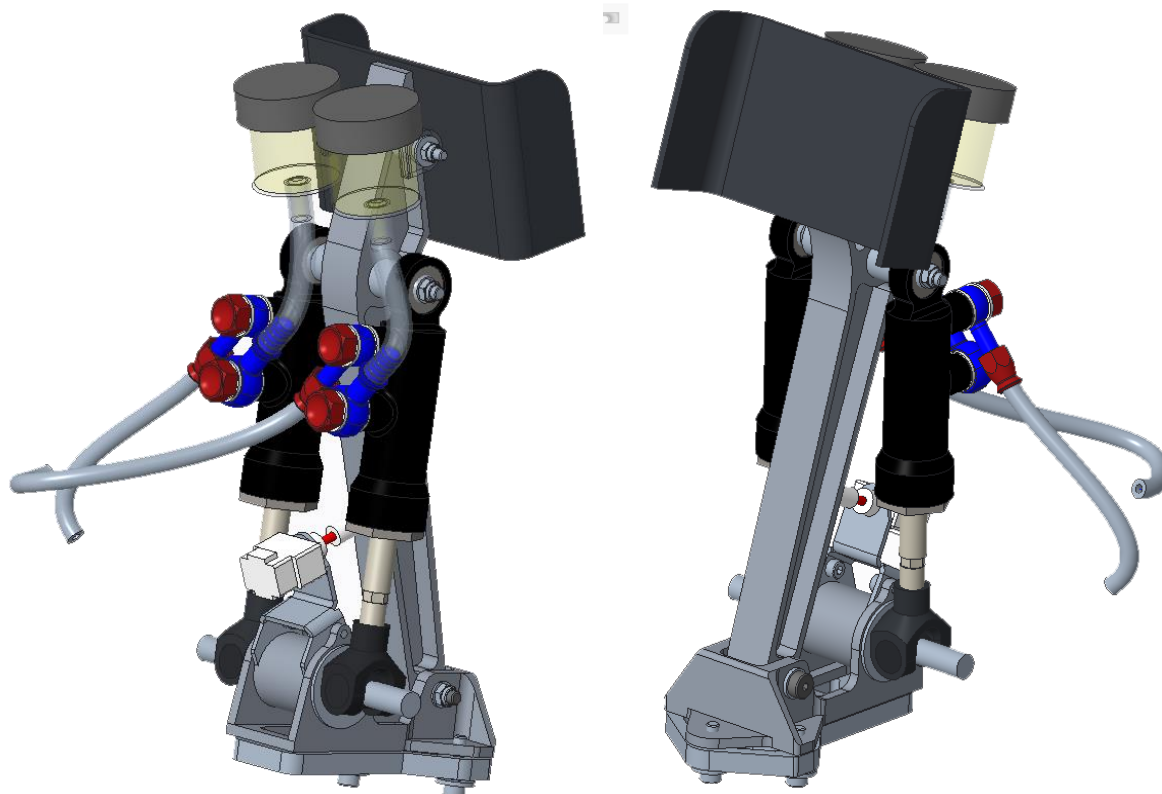
Obrázek 26 Deska plošných spojů pro EBS

Deska plošných spojů pro EBS (Obrázek 26) má za úkol monitorovat tlak v zásobnících plynu a v případě poklesu tlaku pod kritickou úroveň nebo jiné poruchy aktivovat systém nouzového brzdění.

Deska se skládá ze dvou hlavních částí. První částí je neprogramovatelný logický obvod. Tento obvod nesmí obsahovat žádné procesory nebo programovatelné součástky. Vstupem jsou signály ze senzorů tlaku brzd, pneumatického okruhu a z počítače vozidla. Také kontroluje zaseknutí procesoru na druhé části. Tyto signály jsou logickým obvodem zpracovány a v případě nepovolené hodnoty je aktivován Shut Down Circuit, který vypne celé vozidlo a aktivuje nouzové brzdění. [10]

Druhou částí je Supervisor. Tato část je programovatelná. Při zapnutí autonomního režimu provede počáteční kontrolu všech kritických signálů a v případě poruchy nebo chyby aktivuje pomocí neprogramovatelného logického obvodu systém EBS. Během provozu slouží k převodu signálů z počítače pro neprogramovatelnou část a k její kontrole. Vzájemnou kontrolou obou částí je zajištěna bezpečnost celého systému. [10]

5.2 SESTAVA BRZDOVÉHO PEDÁLU



Obrázek 27 Sestava brzdového pedálu

Pro přední a zadní okruh brd byly opět použity válce XA3.G1.42 a XA3.G1.45 s průměrem 16 a 19 mm od firmy Brembo. [8] Na rozdíl od minulého roku byly válce instalovány se vstupem a výstupem nahoře. Dříve použitá opačná poloha měla nižší těžiště, ale komplikovala odvzdušňování brzdového systému a omezovala rozsah nastavení vahadla rozdělení brzdného účinku vlivem umístění širší části válce blízko vahadla.

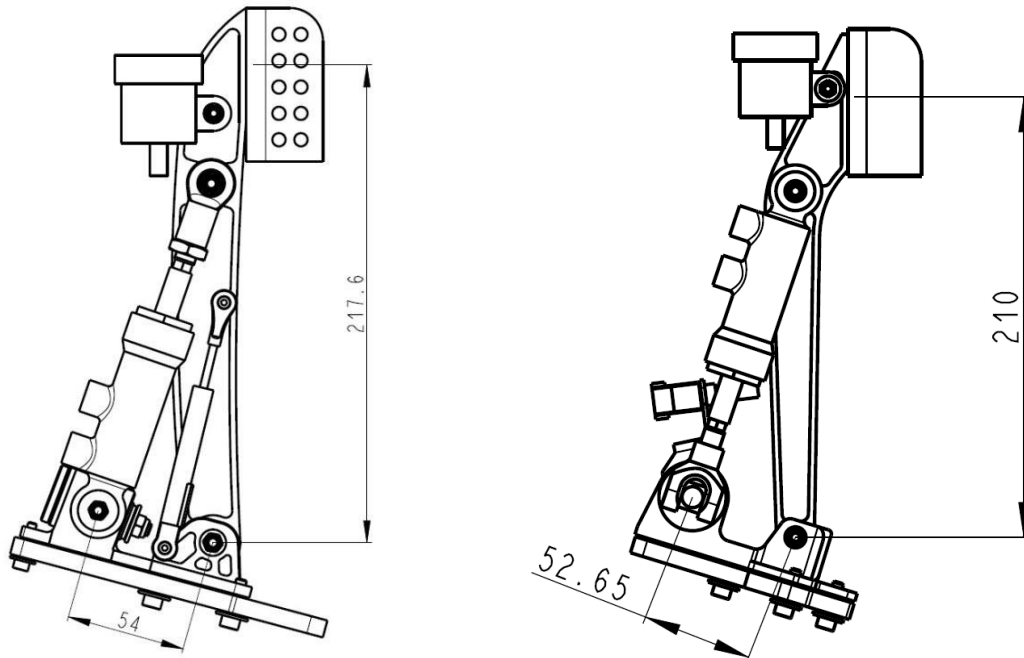
Kvůli rozsahu a obtížnosti nastavení byl také použit jiný design vahadla. Tím bylo možné zjednodušit uložení pedálu z původních dvou na jeden držák a zmenšit počet součástí celé sestavy. Nášlap pedálu je vyroben z uhlíkového kompozitu totožně jako na plynovém pedálu viz. kapitola 5.3.2 a k pedálu připevněn lepidlem Loctite EA 9492. [28] Jedná se o stejný díl jako na plynovém pedálu, je tak možné vyrobit oba díly současně.

Pro namáhané hliníkové součásti zvolen materiál EN AW 7075 T6 s mezí kluzu 450 MPa. [30] Tato tepelně vytvrzená slitina má dobré mechanické vlastnosti. Pro horní hřídel uložení brzdových válců byla použita zušlechtěná ocel 25CrMo4 s mezí kluzu 700 MPa. [29] Pro nenamáhané součásti, jako je distanční váleček pro nádoby brzdové kapaliny a velkoplošné podložky vahadla byla použita hliníková slitina EN AW 6061 T4. [30]

5.2.1 BRZDOVÝ PEDÁL

U pedálu je nutné, aby měl dostatečnou tuhost a nastavitelnost a co nejmenší chod a vůle. To vše přispívá k lepšímu dávkování brzdného účinku a ovladatelnosti vozidla.

Základní rozměry pedálu byly zvoleny totožné s předchozím řešením na vozidle Dragon X. Pedálový poměr vyhovoval všem řidičům a nebyl důvod ho měnit. Byla pro něj zvolena hodnota 4. [17] Výška pedálu byla určena v CAD sestavě podle modelu řidiče tak, aby zhruba odpovídala pozici v modelu DX. Z tohoto rozměru byla poté vypočtena osová vzdálenost pedálu a vahadla. (Obrázek 28)

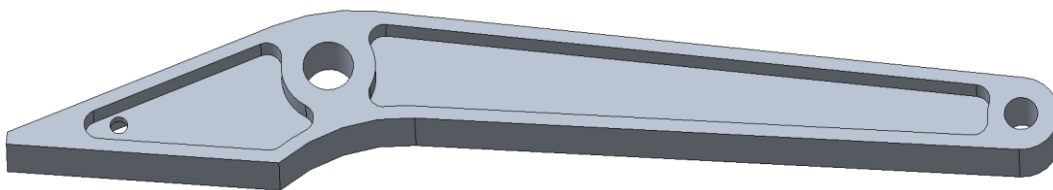


Obrázek 28 Pedálový poměr DX (vlevo) a eD2 (vpravo) [3]

Výsledný pedálový poměr pro Dragon eD2:

$$i_{PR} = \frac{l}{a_v} \quad (6)$$

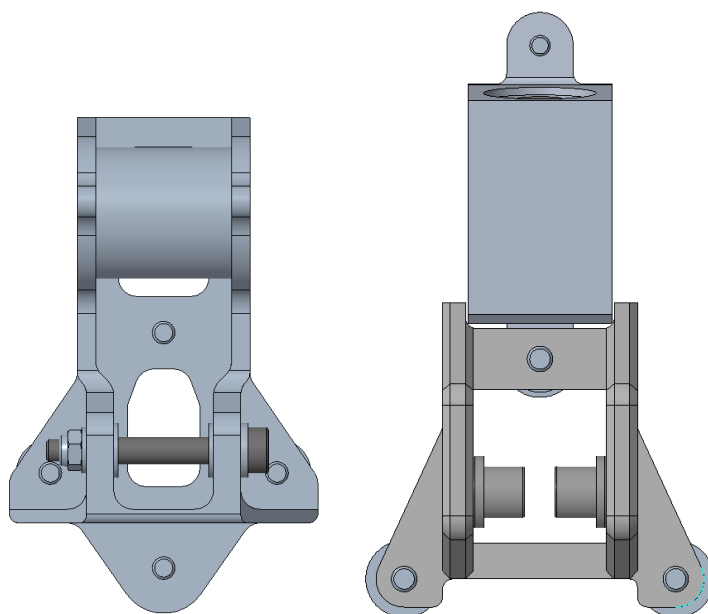
$$i_{PR} = \frac{210}{52,65} = 3,99$$



Obrázek 29 Brzdový pedál

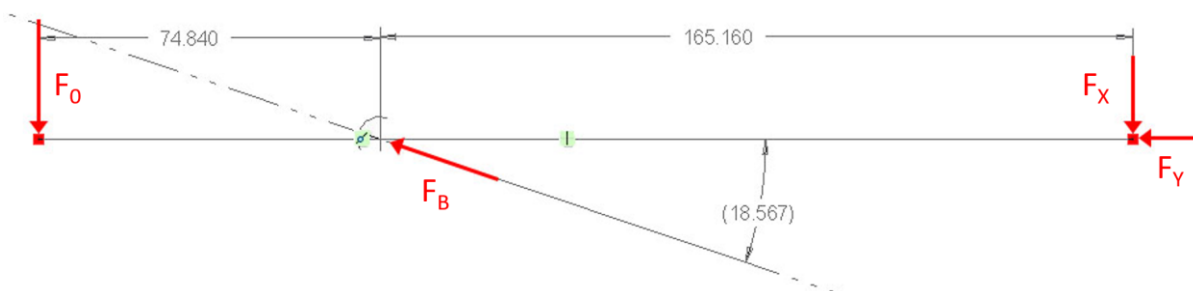
5.2.2 DRŽÁK BRZDOVÉHO PEDÁLU

Pedál i vahadlo bylo díky jinému designu vahadla možné připevnit k jednomu držáku. Zároveň bylo možné optimalizovat rozložení šroubů, připevňujících držák k monokoku. (Obrázek 30) Válce působí na přední část držáku pouze tlakem a šroub v této části není nutný, naopak v místě upevnění pedálu působí převážně tah v kolmém směru k dosedací ploše. V tomto místě vzniká většina deformace držáku, nové rozložení by tedy mělo mít pozitivní vliv na tuhost celé sestavy. Ke spojení s monokokem byly využity 4 šrouby M5x18. V místě kontaktu s držákem je ve stěně monokoku ertalonový insert. Monokok je v tomto místě zahlubněný z důvodu zapuštění hlav šroubů. Tím se zároveň zvyšuje tuhost v okolí pedálů.



Obrázek 30 Porovnání rozložení šroubů na eD2 (vlevo) a DX (vpravo)

Ke spojení pedálu s držákem byla zvolena dvě kluzná ložiska SKF PCM 060810 E se statickou únosností 15 kN [31] uložená na lícovaném šroubu ISO 7379 6x35. [32] Bronzová pouzdra použita v předchozím pedálu měla větší vůle a vykazovala předčasné opotřebení, bylo tedy použito jiné řešení ve snaze tento problém eliminovat. Pro kontrolu bezpečnosti kluzného ložiska vůči statickému zatížení a lícovaného šroubu je nutné určit reakční sílu v tomto místě při maximální zátěži 2000 N. (Obrázek 31)



Obrázek 31 Schéma pedálu k určení statické síly

Výpočet maximální síly ve spojení:

$$F_Y = F_B \cdot \cos \alpha = F_0 \cdot \frac{240}{a_v} \cdot \cos \alpha \quad (7)$$

$$F_Y = 2000 \cdot \frac{240}{52,65} \cdot \cos 18,567 = 8642 \text{ N}$$

$$F_X = F_B \cdot \sin \alpha \cdot \frac{74,84}{240} = F_0 \cdot \frac{240}{a_v} \cdot \sin \alpha \cdot \frac{74,84}{240}$$

$$F_X = 2000 \cdot \frac{240}{52,65} \cdot \sin 18,567 \cdot \frac{74,84}{240} = 905 \text{ N}$$

$$F = \sqrt{F_X^2 + F_Y^2}$$

$$F = \sqrt{905^2 + 8642^2} = 8680 \text{ N}$$

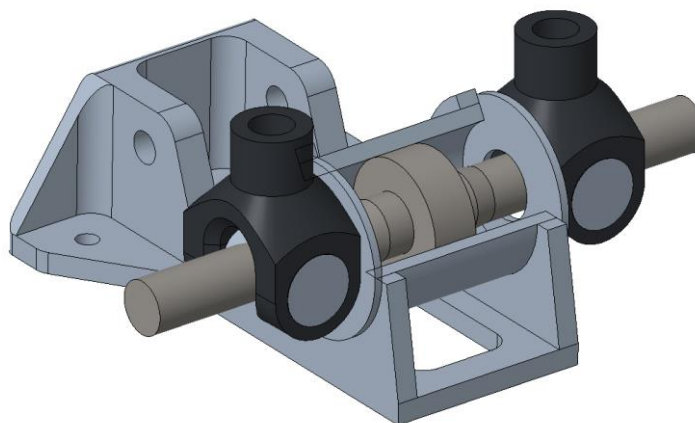
Výpočet bezpečnosti kluzného ložiska:

$$k = \frac{2 \cdot C_0}{F} \quad (8)$$

$$k = \frac{2 \cdot 15}{8,68} = 3,46$$

Bezpečnost uložení pedálu je dostatečná.

Součástí držáku pro uložení pedálu je i vahadlo rozdělení brzdného účinku. Z důvodu snížení hmotnosti byla zvolena kombinace dílů vahadla firmy AP Racing a vyráběných dílů. Ocelový válec zajištěný pomocí dvou pojistných kroužků, ve kterém se pohybuje sférické ložisko byl nahrazen lehčím, hliníkovým, lisovaným do držáku. Stejně tak ocelové koncovky válců byly nahrazeny menšími hliníkovými. Z původních dílů byla použita pouze hřídel se sférickým ložiskem. Toto řešení bylo ověřeno strukturní analýzou v programu Ansys. U válečku je nutné ověřit, jestli je použití hliníkové slitiny možné a nebude docházet k otlačení nebo velkým deformacím.



Obrázek 32 Uložení vahadla v držáku

Nad vahadlem je umístěn vypínač BOTS. Který je v případě úniku tlaku v jednom z okruhů stlačen a dojde k zastavení vozu. Tato součást má zajistit bezpečnost provozu a je nařízena pravidly. Vypínač je připevněn k hliníkovému plechu, jeho ohýbáním je možné nastavit optimální vzdálenost od pedálu.

5.2.3 OVĚŘENÍ KONSTRUKCE STRUKTURNÍ ANALÝZOU MKP

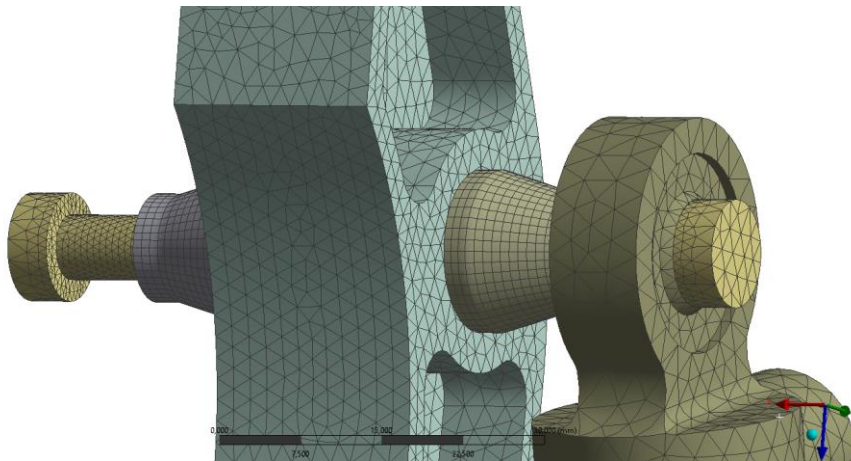
Celá sestava byla ověřena pomocí statické strukturní analýzy v systému Ansys Mechanical. Jako zátěžný stav byla zvolena nejhorší možná situace, což je síla 2000 N na horní hranu pedálu. Tímto zatížením je pedál testován při technické přejímce a je popsán v pravidlech. [1]

Celá sestava byla z důvodu složitosti nastavení simulace a času výpočtu zjednodušena. V místě kluzných ložisek mezi pedálem a lícovaným šroubem byla zvolena vazba Frictionless, šroubové spoje držáku s insertem byly nahrazeny vazbou Bonded. Ostatní vazby kontakty byla nastavena vazba Frictional s velikostí součinitele tření $\mu = 0,2$.

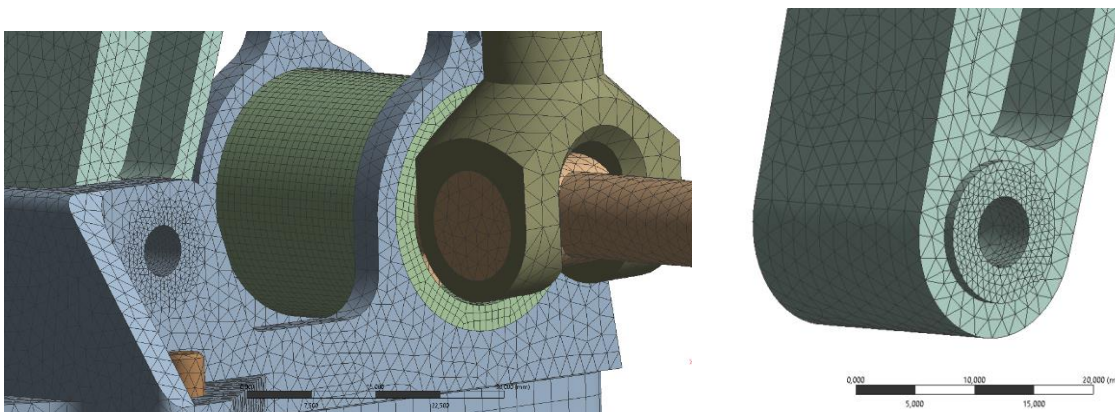
SÍŤ KONEČNÝCH PRVKŮ

Výchozí velikost prvků je 2 mm. Napětí na insertu a brzdových válcích nejsou pro simulaci důležité a příliš neovlivní výsledky. Pro zjednodušení výpočtu byla na těchto tělesech nastavena velikost 3 mm. V okolí kontaktu brzdového válce s horní hřídelí a kuželovými podložkami docházelo k nereálnému nárůstu napětí. Síť zde byla zjemněna pomocí funkce Face Sizing na 0,75 mm a na celých kuželových podložkách nastavena velikost 1 mm. (Obrázek 33) K podobným problémům docházelo i na hranách pedálu a držáku v kontaktu s lícovaným šroubem. Zde byla síť zjemněna funkcí Sphere of Influence také na 0,75 mm. (Obrázek 34)

Pro většinu součástí byly využity čtyřstěnné kvadratické prvky. Pro válec vahadla, insert a kuželové podložky byly nastaveny prvky Hex Dominant.



Obrázek 33 Zjemnění v kontaktu válce s hřídelí a podložkou



Obrázek 34 Zjemnění v kontaktu lícovaného šroubu, pedálu a držáku

NASTAVENÍ ANALÝZY

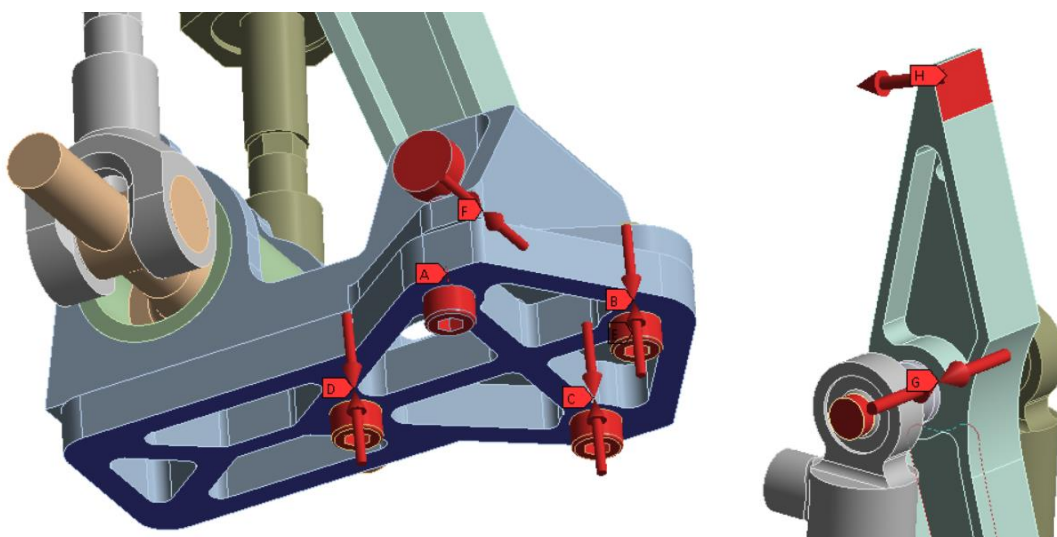
Byla použita vazba Fixed Support na dolní ploše insertu. (Obrázek 35) Výsledky analýzy na této součásti nejsou důležité a vliv vazby můžeme ignorovat.

Simulace je rozdělena na dva kroky, v prvním dojde k předepnutí všech šroubů. Hodnoty předepnutí:

- Šrouby spojující držák s insertem – 3000 N
- Lícovaný šroub – 1000 N
- Horní hřídel brzdových válců – 1000 N

V druhém kroku je pedál zatížen silou 2000 N na ploše na horním konci nášlapu pedálu, protože při zatěžování na hraně pedálu byla napětí na horní polovině pedálu nereálná. (Obrázek 35) Šrouby jsou v tomto kroku nastaveny jako Locked.

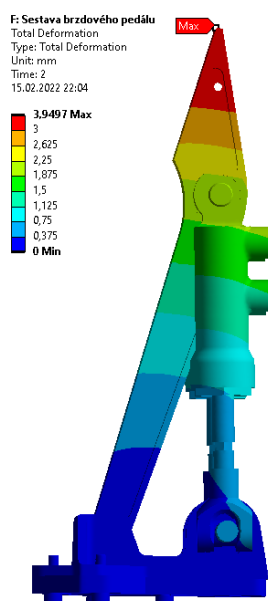
Materiál pro většinu součástí je hliníková slitina 7075 T6 pro kterou byl nastaven Youngův modul pružnosti 69 GPa a Poissonův poměr 0,323. Pro horní hřídel upevnění brzdových válců, hřídel vahadla a šrouby byla použita ocel s modulem pružnosti 210 GPa, a Poissonovým poměrem 0,3.



Obrázek 35 Nastavení simulace

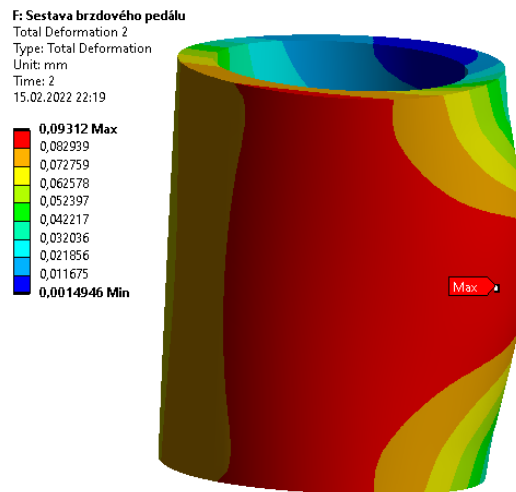
DEFORMACE

Výsledná deformace celé sestavy je 3,95 mm a maxima dosahuje na vrcholu pedálu. (Obrázek 36) Největší podíl na deformaci má hřídel vahadla. Deformaci by bylo možné snížit zkrácením válečku vahadla a upevněním válců blíže ke středu pedálu. Snížila by se tím deformace jak na hřídeli vahadla, tak na horní hřídeli uložení válců, která má také výrazný vliv na celkovou deformaci. Byl by ale negativně ovlivněn rozsah nastavení rozdělení brzdného účinku. Délka hřídele byla zvolena jako kompromis mezi tuhostí a rozsahem nastavení. Při běžných provozních podmínkách je zatížení nižší a můžeme očekávat výrazně nižší deformace.



Obrázek 36 Deformace celé sestavy a samostatného pedálu

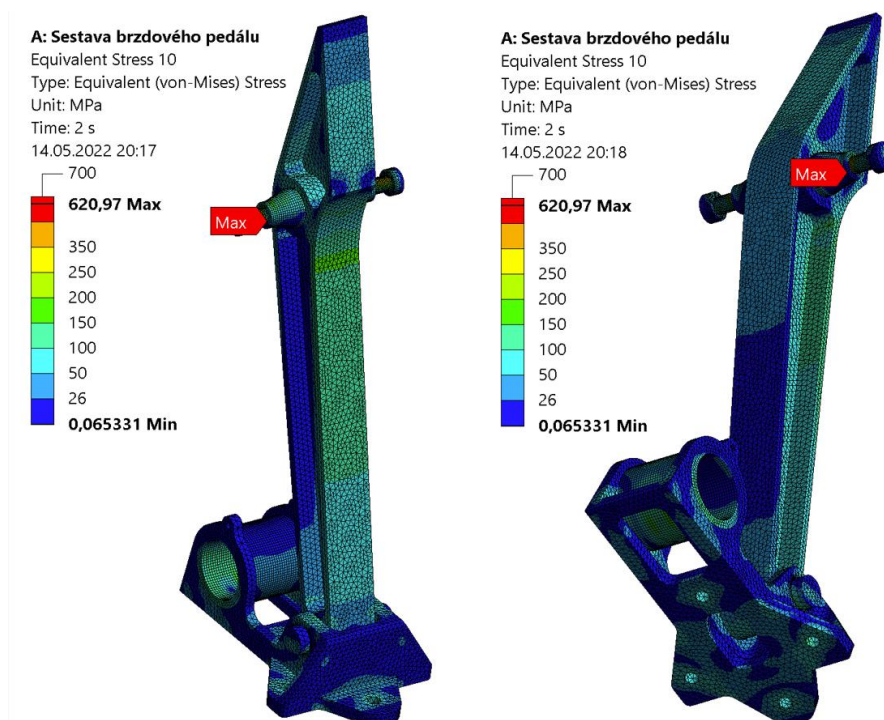
Deformace hliníkového válečku vahadla byla ověřena samostatně. Maximální deformace dosahuje hodnoty 0,093. (Obrázek 37) V porovnání s deformací hřídele je tato hodnota zanedbatelná.



Obrázek 37 Deformace válečku vahadla

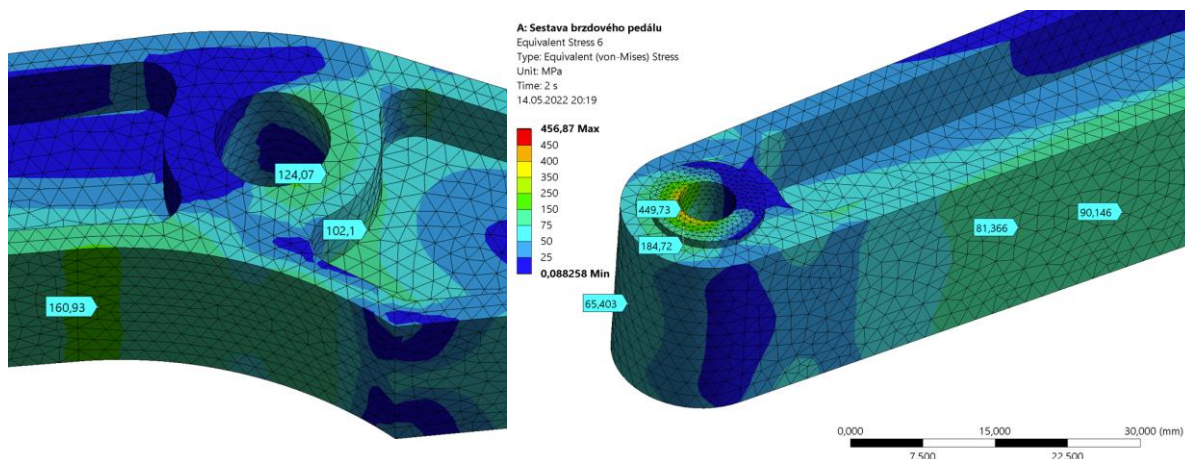
KRITICKÉ NAPĚTÍ A KONTROLA PEVNOSTI

Celkové maximální napětí je 621 MPa a nachází se na hřídeli uchycení brzdových válců. (Obrázek 38) Napětí na všech součástech se zdají být reálná.



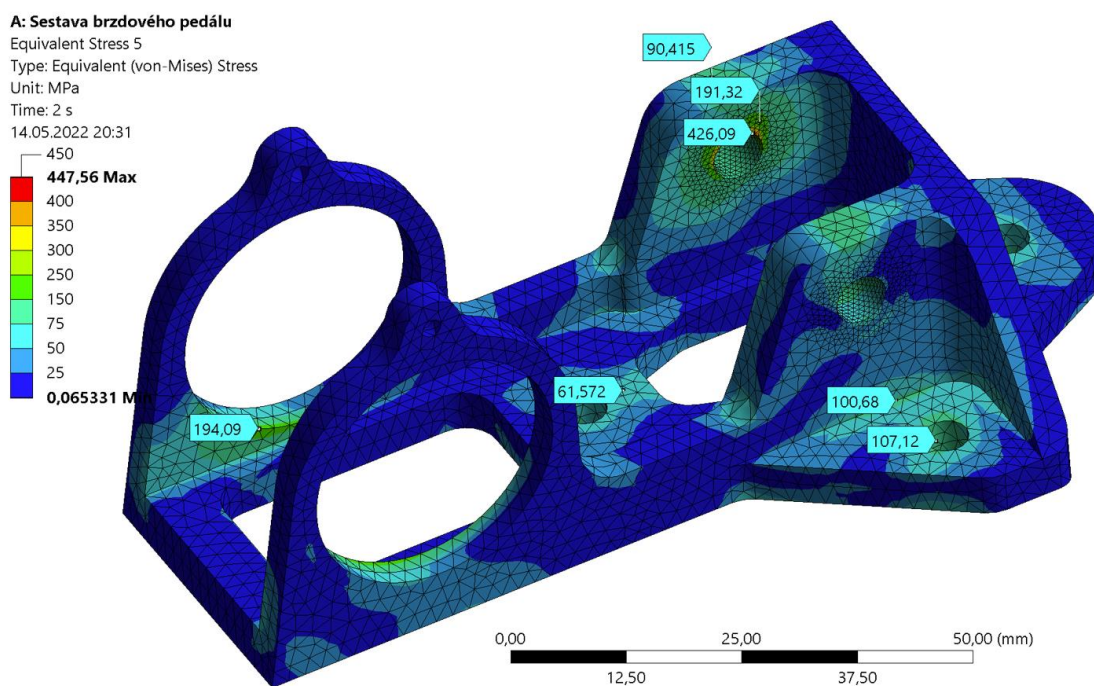
Obrázek 38 Celkové napětí

Maximální hodnoty napětí na pedálu (Obrázek 39) a držáku (Obrázek 40) jsou v místě kontaktu s lícovaným šroubem. Tyto hodnoty nebudeme ve výsledcích uvažovat. Mimo toto místo je nejvyšší hodnota napětí na pedálu 161 MPa. Nachází se v rádiusu pod nášlapem pedálu. Hodnota nedosahuje meze kluzu a tento výsledek tedy považujeme za vyhovující.



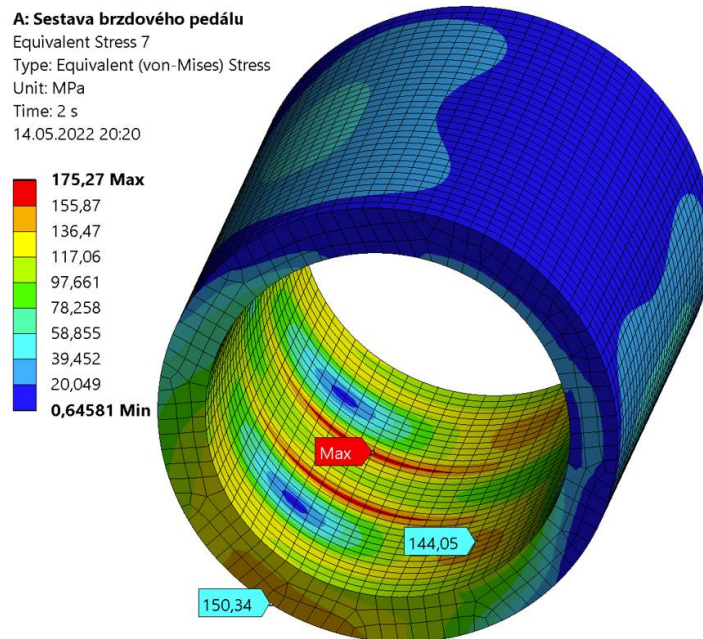
Obrázek 39 Napětí na horní a dolní části pedálu

Nejvyšší hodnota napětí, pomineme-li místo kontaktu se šroubem, je v kontaktu válečku vahadla s držákem. Dosahuje hodnoty 194 MPa. (Obrázek 40) Napětí na zbytku součásti se neblíží mezi kluzu a nedochází k výrazné koncentraci napětí.



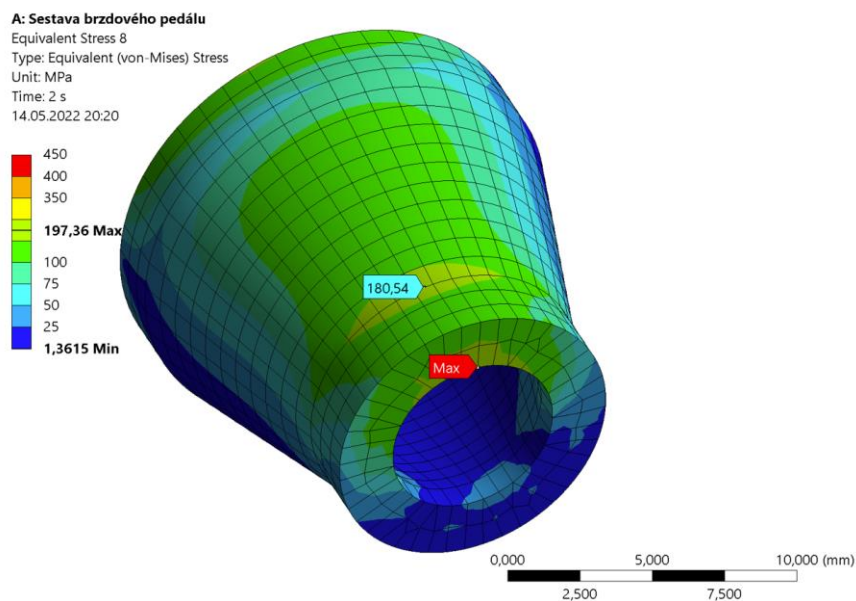
Obrázek 40 Napětí na držáku

Maximální napětí na válečku dosahuje hodnoty 175 MPa v kontaktu válečku s hřídelí vahadla. (Obrázek 41) Tyto hodnoty považujeme za je bezpečné. Nemělo by dojít k otlacení válečku ložiskem.



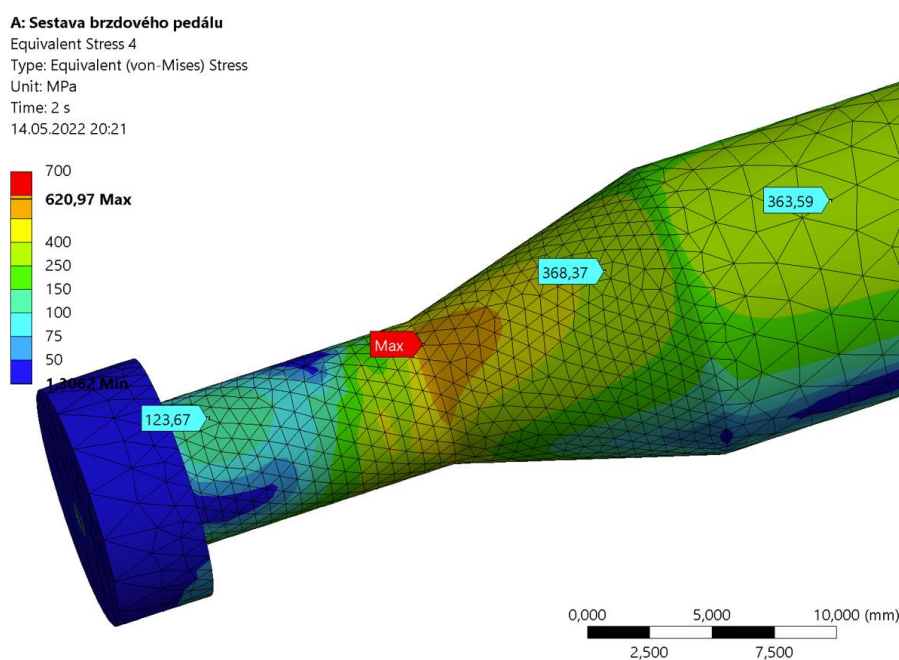
Obrázek 41 Napětí na válečku vahadla

Na kuželové podložce nedochází k výrazným koncentracím a napětí nedosahuje meze kluzu. Maximální napětí je v místě kontaktu podložky s brzdovým válcem. (Obrázek 42)



Obrázek 42 Napětí na kuželové podložce

Napětí na hřídeli opět nedosahuje meze kluzu a zdá se být reálné. Maximální hodnota 621 MPa je v přechodu kuželové a válcové části. Napětí na zbytku hřídele je výrazně nižší. (Obrázek 43)



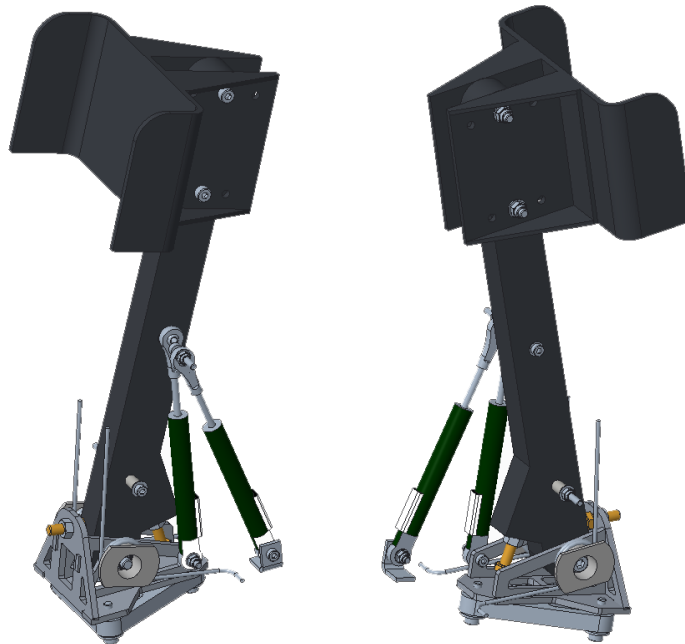
Obrázek 43 Napětí na horní hřídeli brzdových válců

Tabulka 3 Bezpečnosti důležitých součástí

Součást	Napětí [MPa]	Mez kluzu [MPa]	Bezpečnost
Pedál	161	450	2,80
Držák pedálu	194	450	2,32
Váleček vahadla	175	450	2,57
Kuželová podložka	197	450	2,28
Horní hřídel válců	621	700	1,13

Minimální bezpečnost celé sestavy je 1,13. Kritické místo se nachází na horní hřídeli brzdových válců. Hodnoty napětí v dotyku přesahující mez kluzu, které byly popsány výše, byly ignorovány.

5.3 SESTAVA PLYNOVÉHO PEDÁLU



Obrázek 44 Sestava plynového pedálu

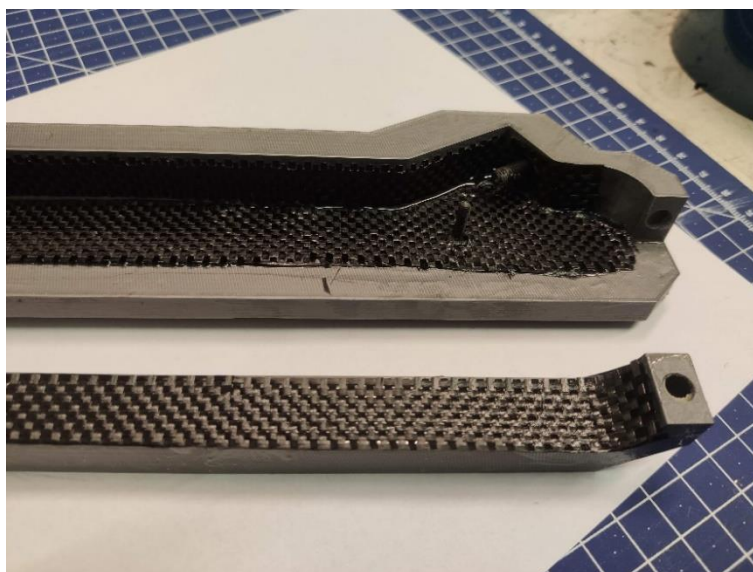
V minulé sezoně byly na této sestavě identifikovány dva hlavní problémy. V průběhu testování došlo k selhání pedálu na spodním rádiusu, kde se uhlíkový kompozit porušil a pedál se vylomil z držáku. Vada byla zhodnocena a určena pravděpodobná příčina selhání. Materiál v tomto místě byl nekvalitně laminován, což snížilo jeho pevnost. Tento problém byl řešen změnou technologie výroby pedálu a skladby materiálu.

Druhou komplikací byla obtížná nastavitelnost polohy pedálu, která probíhala nastavováním dorazů v obou krajních polohách pedálu. Při každé úpravě pozice však bylo nutné překalibrovat potenciometry. To značně komplikovalo celý proces a nebylo možné nastavení rychle upravit například při změně řidiče. Bylo nutné vyvinout pedál se systémem nastavování, který nezmění polohu potenciometrů.

5.3.1 LAMINACE PLYNOVÉHO PEDÁLU

Místo volné laminace použité v předchozím roce, kdy byl materiál naskládán na jádro, byla zvolena metoda laminování ve formě. Tím by mělo být dosaženo kvalitnějšího spojení a větší pevnosti materiálu. Zároveň byla změněna skladba vrstev potahu. Forma byla vyrobena metodou 3D tisku. Dva díly formy jsou spojeny šrouby M6, které umožní stažení formy při laminaci. Tím by mělo být dosaženo kvalitnější laminace bez vzduchových kapes. Pro správné pozicování pedálu ve formě byly použity díry pro šrouby v hliníkových insertech pedálu. Tím byla zajištěna průchodnost hliníkových insertů a správné umístění. Inert dorazu byl k formě přišroubován a otvor v insertu uložení pedálu byl zablokovan voskem, pro ochranu před zatečením pryskyřice. Jako jádro byla použita pěna Rohacell o tloušťce 15 mm. [33]

Vnější pohledová vrstva byla laminována do formy. Byla použita tkanina CC 200 P. (Obrázek 45) [34]



Obrázek 45 Laminace vnější vrstvy plynového pedálu

V okolí insertu uložení pedálu byla zvolena jednosměrná tkanina UD 90 v orientaci 0° . (Obrázek 46) Ta zajišťuje potřebnou pevnost a zabraňuje vytržení insertu uložení z pedálu. Na spodní stranu formy byly vloženy dvě vrstvy. Po obvodu byly použity tři vrstvy.



Obrázek 46 Laminace jednosměrné tkaniny

Pro zvýšení tuhosti v krutu byla jako vnitřní vrstva použita tkanina UD 90 ve dvou vrstvách v orientaci 45° a -45° . (Obrázek 47) Tato vrstva byla laminována přímo na jádro.



Obrázek 47 Vnitřní vrstvy UD 90

Po naskládání těchto vrstev byly insert uložení pedálu a pěnové jádro vloženy do formy. Forma byla stažena pomocí šroubů. Na horní stranu byla použita skladba symetricky se spodní. Tyto vrstvy přesahovaly vnější prostor formy. Po vytvrzení pryskyřice byly ořezány.

Forma byla zakryta rovnou deskou pro dosažení hladkého povrchu na horní straně. Pryskyřice byla vytvrzena ve vakuu za pokojové teploty 24 hodin. Po vyjmutí z formy byl z pedálu ořezán přebytečný materiál, zabroušeny hrany a provrtány díry pro šrouby přes horní stěnu. (Obrázek 48)



Obrázek 48 Plynový pedál

5.3.2 NÁŠLAP PEDÁLU

Místo lepení nášlapu přímo na pedál je tento přišroubovaný dvěma šrouby M4x30. (Obrázek 50) Nášlap je možné umístit do tří poloh. Je tak možné rychle změnit polohu pro různě vysoké řidiče, a to bez nutnosti kalibrace potenciometrů. Tím je zlepšena ergonomie a nastavitelnost pedálové sestavy.

Nášlap je laminován z tkaniny z uhlíkových vláken a aramidu. Pro zvýšení tuhosti a zachování nízké hmotnosti je do pedálu vloženo pěnové jádro. (Obrázek 49)

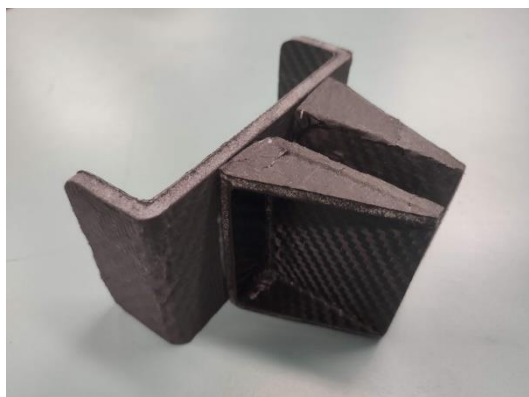
Skladba:

- CC 200 P – 0°
- Aramid – 0°
- CC 200 P – 0°
- Rohacell 5 mm
- 2x CC 200 P – 0°

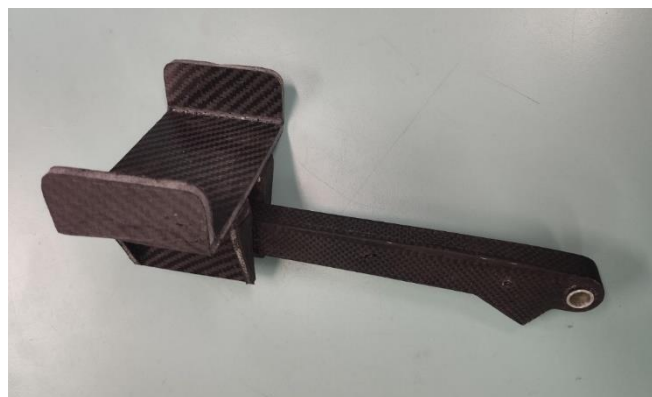
Části ve tvaru L připevňující nášlap k pedálu byly vyrobené obdobně se slabším pěnovým insertem z pěny AIREX C 70 [35] a bez vrstvy aramidu. Jednotlivé části jsou spojeny lepidlem Loctite EA 9492. [28] (Obrázek 49)

Skladba:

- 2x CC 200 P – 0°
- AIREX C 70 3 mm
- 2x CC 200 P – 0°



Obrázek 49 Nášlap plynového pedálu



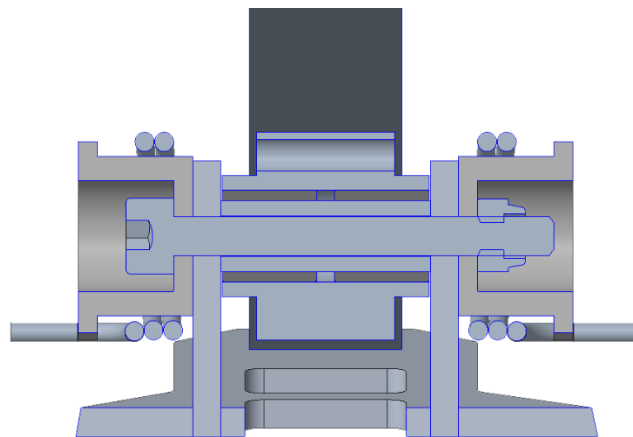
Obrázek 50 Plynový pedál s nášlapem

5.3.3 DRŽÁK PLYNOVÉHO PEDÁLU

Držák je sestaven z výpalků z hliníkového plechu o tloušťce 3 mm. Pro přesné pozicování při skládání jsou na dílech vypáleny výstupky a otvory. Jednotlivé součásti jsou svařeny. Tímto lze dosáhnout nízké hmotnosti a jednoduché výroby. Součástí držáku je i šroub pro nastavení výchozí polohy pedálu.

Spoj mezi držákem a pedálem na vozidle DX měl velkou vůli. To bylo problémové jak z důvodu ovládání, kdy se pedál kýval, tak z důvodu snímání polohy pedálu. Vykláněním do strany se měnila poloha potenciometrů a ty zaznamenávaly chybné hodnoty. Z těchto důvodů bylo tedy nutné toto spojení upravit.

Stejně jako u brzdového pedálu byla místo bronzových kluzných ložisek použita ocelová, konkrétně PCM 081010 [36], statická únosnost je vyšší než u ložisek použitých na brzdovém pedálu a působící síly jsou nižší, proto není nutné kontrolovat bezpečnost. Většina vůle v pedálu byla způsobena tím, že lícovaný šroub, na kterém je pedál uložený, nemohl být dostatečně předeprnutý, protože docházelo k sevření pedálu a zablokování rotace. Místo lícovaného šroubu byl tedy použit šroub M5x35 s broušenou trubkou. Díky tomu je možné šroub plně utáhnout a dosáhnout tak větší tuhosti spojení. (Obrázek 51)



Obrázek 51 Uložení plynového pedálu

Použité vratné pružiny jsou stejné jako v předchozím roce. Řidiči byli s tuhostí pedálu spokojeni a nebylo tedy nutné ji měnit. Stejně je také uložení pružin.

Jeden potenciometr je připevněn přímo k držáku pedálu. Druhý je umístěn na samostatném držáku, který je nalepen uvnitř monokoku. K pedálu jsou oba připojeny ve společném bodě pomocí šroubu M3x45. Opět byly použity lineární potenciometry ELPM-25 od firmy Variohm. [37]

Spojení držáku je stejné jako u brzdového pedálu. Jsou zde použity tři šrouby M4x16.

ZÁVĚR

V rešerši byly popsány základní prvky brzdného systému a jejich konkrétní použití v závodním vozidle Formule 1 a Formule Student. Můžeme zde vidět rozdíly, které jsou způsobené především rozdílem v hmotnosti a dosahované rychlosti vozidel, vliv mají také pravidla obou závodních kategorií. Je zde také vysvětlena funkce brzdového systému brake-by-wire u silničních vozidel, která používají podobnou jednotku, jako vozy Formule 1. Z této části lze vyvodit, že v závodech Formule Student není možné podobná řešení použít a je třeba navrhnout řešení vlastní.

Prvním krokem výběru vhodné varianty bylo stanovení požadavků na autonomní brzdný systém vzhledem k očekávané funkci, konstrukčním omezením a provedeným testům. V návaznosti na rešerši byla navržena možná řešení nouzového brzdného systému. Varianty byly porovnány z hlediska spolehlivosti, hmotnosti, zástavby a obtížnosti servisu. Z těchto variant byla vybrána nejvhodnější a proveden konstrukční návrh. Zároveň s touto sestavou byly navrženy i sestavy brzdového a plynového pedálu.

Navržené řešení systému nouzového brzdění je úmyslně předimenzované. Celý návrh byl limitován dostupnými daty. Během testování nového monopostu budou provedeny testy tohoto systému a na základě jejich výsledků bude možné přesněji určit potřebný brzdný výkon. Bude možné optimalizovat rozměry tlakového převodníku a tím snížit váhu a zlepšit zástavbu celého systému. Pokud bude další vozidlo softwarově připraveno na závodní disciplínu Autocross, půjde toto řešení jednoduše upravit tak, aby bylo možné tlak plynule regulovat a dávkovat tak brzdný účinek. Provedenými výpočty bylo ověřeno, že aktuální systém má pro tuto funkci dostatečně velký zásobník plynu. Byly také navrženy možné úpravy, jak v případě použití aktuálních dílů, tak v případě konstrukce nového pneumatického válce.

V sestavě brzdového pedálu došlo ke změně uložení vahadla brzdného účinku. Nové řešení kombinuje velký rozsah nastavení a nízkou hmotnost. S touto změnou bylo také možné upravit držák pedálu. Snížením počtu součástí byla zjednodušena instalace a servis a snížena hmotnost. Celá sestava byla ověřena statickou strukturní MKP analýzou v prostředí Ansys Mechanical. Jako zátěžný stav byl zvolen test popsaný v pravidlech soutěže, který je prováděn při každé technické přejímce na závodech. Sestava pedálu vykazovala velké deformace. Největší vliv na deformaci měla hřídel vahadla. Deformaci nebylo možné snížit bez toho, aby byl negativně ovlivněn rozsah nastavení rozdělení brzdného účinku a byl tedy zvolen kompromis. Napětí v posuzovaných místech nedosahovalo meze kluzu materiálu a návrh je považován za vyhovující.

Plynový pedál byl vyroben z kompozitu z uhlíkových vláken a aramidů. Provedené konstrukční úpravy se týkaly především možnosti nastavení polohy a s tím spojené ergonomie vozidla. Díky posuvnému nášlapu pedálu je možné pomocí základních nástrojů rychle upravit polohu nášlapu pro různě vysoké řidiče, a to beze změny polohy samotného pedálu. Není tedy nutné při každé úpravě kalibrovat potenciometry snímající polohu. U pedálu došlo v minulém sezoně k selhání v místě uchycení k držáku, proto byla upravena technologie výroby. Místo volné laminace pedálu bylo využito metody laminování do dvoudílné formy. Bylo dosaženo lepšího stlačení součástí, tím se zlepšila kvalita laminace a zpřesnil se výsledný tvar součástí. Byla také použita jiná skladba tkaniny s ohledem na nejvíce namáhaná místa.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] Formula Student Rules 2022. Formula Student Germany [online]. 2021 [cit. 2022-02-15].
Dostupné z: https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2022/rules/FS-Rules_2022_v1.0.pdf
- [2] Results FSG 2019. FSG [online]. [cit. 2022-04-21]. Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/fsg/results/2019/>
- [3] PUHN, Fred. Brake handbook. Tucson, AZ: HP Books, c1985, 176 s. ISBN 08-958-6232-8.
- [4] Formula One Brakes Explained. Motorsport Technology [online]. [cit. 2022-04-26].
Dostupné z: <https://motorsport.tech/formula-1/formula-one-brakes-explained>
- [5] Brake-by-wire. Brembo [online]. [cit. 2022-04-27].
Dostupné z: <https://www.brembo.com/en/company/news/future-brake>
- [6] FS Team Delft. Instagram [online]. [cit. 2022-04-27].
Dostupné z: <https://www.instagram.com/fsteamdelft/>
- [7] High Performance Brake Systems. BREMBO [online]. [cit. 2022-04-20].
Dostupné z: <https://www.oppracing.com/images/cmsuploads/Brembo/Brembo%20Motorcycle%20Catalog%202010%20-%20OPP%20Racing.pdf>
- [8] FORMULA STUDENT/SAE CATALOGUE. BREMBO [online]. 2014 [cit. 2022-02-15].
Dostupné z: https://www.bremsen-center.de/brembo/downloads/racing/brembo-formula-student-katalog-2014_1.pdf
- [9] NOVOSAD, Pavel. Návrh brzdového kotouče formule Student. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132283>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Ondřej Blážík.
- [10] Autonomous System Beginners Guide 2021/22. Formula Student Germany [online]. [cit. 2022-03-29].
Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/pr/news/details/article/autonomous-system-beginners-guide-202122-v09-released/>
- [11] AMZ Akademischer Motorsportverein Zürich. Facebook [online]. [cit. 2022-04-06].
Dostupné z: <https://www.facebook.com/amzracing/photos/pcb.10156035201186107/10156035200841107/>
- [12] Armotech-Products. ARMOTECH [online]. [cit. 2022-03-01].
Dostupné z: <http://www.armotech.cz/products/product-range>

- [13] U Shape Expansion Chamber. MANCRAFT [online]. [cit. 2022-03-01].
Dostupné z: <https://shop-mancraft.com/en/co2-adaptors/184-hrr-with-u-shape-expansion-chamber-gen2.html>
- [14] Specialty Fitting, Miniature, Hose Nipple - M5H. SMC [online]. [cit. 2022-04-19].
Dostupné z: <https://www.smc.eu/el-gr/products/hose-nipple-m5h~89973~cfg?partNumber=M-5H-4>
- [15] Air solenoid valve for individual connection VUVG. Festo [online]. [cit. 2022-03-01].
Dostupné z: https://www.festo.com/us/en/p/air-solenoid-valve-for-individual-connection-id_VUVG/?q=~:festoSortOrderScored
- [16] V100A, 3-Port Direct Operated Solenoid Valve, Large flow. SMC [online]. [cit. 2022-03-01].
Dostupné z: <https://www.smc.eu/en-eu/products/v100a-3-port-direct-operated-solenoid-valve-large-flow~35036~cfg>
- [17] BRADÁČ, Jan. Brzdový systém vozidla Formule Student. Brno, 2020.
Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124876>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 79 s. Vedoucí práce Ondřej Blaťák.
- [18] BF 32100 - KRÁTKOZDVIŽNÝ VÁLEC - Dvojčinný. GMS [online]. [cit. 2022-03-01].
Dostupné z: <https://www.gms.cz/bf-32100-kratkozdvizny-valec>
- [19] SVOBODA, Pavel. Základy konstruování: výběr z norem pro konstrukční cvičení. Brno: CERM, 2001, 288 s. : il. ISBN 80-7204-214-9.
- [20] Hand lever valve VHER-P-H-B43U-B-M5. Festo [online]. [cit. 2022-04-19].
Dostupné z: <https://www.festo.com/tw/en/a/3410684/?q=VHER-P-H-B43U-B-M5>
- [21] Polyurethane Tubing. SMC [online]. [cit. 2022-04-19].
Dostupné z: https://static.smc.eu/pdf/TU-29COLOR-A_EU.pdf
- [22] Specialty Fitting, Miniature, Hose Elbow - M5HL. SMC [online]. [cit. 2022-04-19].
Dostupné z: <https://www.smc.eu/el-gr/products/hose-elbow-m5hl~89974~cfg>
- [23] Specialty Fitting, Miniature, Plug - M5P. SMC [online]. [cit. 2022-04-19].
Dostupné z: <https://www.smc.eu/el-gr/products/plug-m5p~89980~cfg?partNumber=M-5P>
- [24] Silencer AMTE-M-H-M5. Festo [online]. [cit. 2022-04-19].
Dostupné z: <https://www.festo.com/gb/en/a/1206621/?q=AMTE-M-H-M5>
- [25] Specialty Fitting, Miniature, Bushing - M5B. SMC [online]. [cit. 2022-04-19].
Dostupné z: <https://www.smc.eu/en-eu/products/bushing-m5b~89968~cfg>
- [26] Why Should You Choose a 12g CO2 Cartridge?. ALIZEE [online]. [cit. 2022-04-12].
Dostupné z: <https://www.alzgas.com/Why-Should-You-Choose-a-12g-CO2-Cartridge-id3648259.html>

- [27] Mancraft MMR Regulator. MANCRAFT [online]. [cit. 2022-04-19].
Dostupné z: <https://shop-mancraft.com/en/regulators/212-mancraft-mmr-regulator.html>
- [28] LOCTITE EA 9492. Henkel Adhesives [online]. [cit. 2022-04-19].
Dostupné z: https://www.henkel-adhesives.com/cz/cs/produkt/structural-adhesives/loctite_ea_9492.html
- [29] Přehled vlastností oceli 25CrMo4. CZECH TECHNICAL UNIVERSITY DIGITAL LIBRARY [online]. [cit. 2022-04-02].
Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/73029/F2-BP-2017-Aulich-Ondrej-priloha-25CrMo4.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- [30] ALFUN KATALOG 2020. ALFUN [online]. 2020 [cit. 2022-02-15].
Dostupné z: https://www.alfun.cz/wp-content/uploads/2020/10/Katalog_2020_ver.2.pdf
- [31] PCM 060810 E. SKF [online]. [cit. 2022-02-15].
Dostupné z: <https://www.skf.com/group/products/plain-bearings/bushings-thrust-washers-strips/bushings/productid-PCM%20060810%20E>
- [32] ISO 7379 6x35. Fabory [online]. [cit. 2022-04-22]. Dostupné z:
<https://www.fabory.com/en/hexagon-socket-head-shoulder-screw-tolerance-f9-iso-%e2%89%887379-steel-plain-012-9-%28m5%296x35/p/07111050035>
- [33] ROHACELL® IG-F. ROHACELL® - High-performance structural foam cores [online]. [cit. 2022-04-02].
Dostupné z: <https://www.rohacell.com/en/products-services/rohacell-ig-ig-f>
- [34] CC200P. BNS Industrial [online]. [cit. 2022-04-26].
Dostupné z: <https://media.publit.io/file/BNSIndustrial/Products/pds-cc200p-rev003-2020-02-20.pdf>
- [35] AIREX C70. 3A Composites Core Materials [online]. [cit. 2022-04-26].
Dostupné z: <https://www.3accorematerials.com/en/markets-and-products/airex-foam/airex-c70-pvc-foam>
- [36] PCM 081010 E. SKF [online]. [cit. 2022-04-22].
Dostupné z: <https://www.skf.com/group/products/plain-bearings/bushings-thrust-washers-strips/bushings/productid-PCM%20081010%20E>
- [37] Motorsports Linear Position Sensor - ELPM series. VARIOHM [online]. [cit. 2022-04-19].
Dostupné z:
https://www.variohm.com/contentfiles/datasheets/ELPM_Position%20Sensor_%201703_H.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

a_v	[mm]	Osová vzdálenost brzdového pedálu a vahadla
d_1	[mm]	Průměr pístu předního brzdového válce
d_2	[mm]	Průměr pístu zadního brzdového válce
d_p	[mm]	Průměr pneumatické části tlakového převodníku
d_v	[mm]	Průměr pístu pneumatického válce
F	[N]	Síla v uchycení brzdového pedálu
F_B	[N]	Síla v ose brzdových válců
F_{B1}	[N]	Síla v ose zho brzdového válce
F_{B2}	[N]	Síla v ose zadního brzdového válce
F_V	[N]	Síla působící na nášlap pedálu;
F_X	[N]	Síla v uchycení brzdového pedálu v horizontálním směru
F_Y	[N]	Síla v uchycení brzdového pedálu ve vertikálním směru
i_{PR}	[-]	pedálový poměr
k_B	[-]	Bezpečnost uložení brzdového pedálu
l	[mm]	Pracovní délka brzdového pedálu
m	[g]	Celkové množství spotřebovaného CO ₂
p_1	[MPa]	Maximální tlak v předním brzdovém okruhu
p_2	[MPa]	Maximální tlak v zadním brzdovém okruhu
P_n	[Pa]	Tlak v pneumatickém válci v aktuálním kroku
P_{n-1}	[Pa]	Tlak v pneumatickém válci v předchozím kroku
p_p	[MPa]	Maximální tlak v pneumatickém okruhu
r	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	plynová konstanta CO ₂
T	[K]	Teplota plynu v pneumatickém válci
V	[m ³]	Objem pneumatického válce
Δm_n	[g]	Změna množství spotřebovaného CO ₂ pro jeden krok