

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Technická fakulta**

**Katedra vozidel a pozemní dopravy**



## **Diplomová práce**

**Návrh brzdového systému pro vůz typu Formule student**

**Bc. Vít Šulc**

© 2022 ČZU v Praze

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Vít Šulc

Technika a technologie v dopravě a spojích  
Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

**Návrh brzdového systému pro vůz Formula Student**

Název anglicky

**Design of a brake system for the Formula Student vehicle**

---

### Cíle práce

Cílem práce je návrh a optimalizace funkce jednotlivých komponent brzdového systému vozu typu Formule student.

### Metodika

1. Úvod
2. Cíl práce
3. Metodika práce
4. Přehled řešené problematiky
5. Praktická část práce
6. Zhodnocení výsledků
7. Závěr
8. Seznam použitých zdrojů
9. Přílohy

**Doporučený rozsah práce**

50 – 60 stran

**Klíčová slova**

ABS, pneumatiky, brzdové destičky, brzdové kotouče, brzdová kapalina

---

**Doporučené zdroje informací**

Derek Seward.: Race Car Design, 2014, ISBN 13: 9781137030146.

MILLIKEN, W., MILLIKEN. D.: Race Car Vehicle Dynamics. I st edition. Warrendale: SAE, 1995. 857 s. ISBN 1-56091-526-9.

VLK, F. *Dynamika motorových vozidel : jízdní odpory, hnací charakteristika, brzdění, odpružení, říditelnost, ovladatelnost, stabilita*. Brno: Nakladatelství a vydavatelství Vlk, 2000. ISBN 80-238-5273-6.

---

**Předběžný termín obhajoby**

2021/2022 LS – TF

**Vedoucí práce**

Ing. Petr Jindra, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra vozidel a pozemní dopravy

---

Elektronicky schváleno dne 23. 3. 2022

**doc. Ing. Martin Kotek, Ph.D.**

Vedoucí katedry

---

Elektronicky schváleno dne 25. 3. 2022

**doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.**

Děkan

V Praze dne 31. 03. 2022

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Návrh Brzdového systému pro vůz typu Formule student" jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor(ka) uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 31.3.2022

\_\_\_\_\_

### **Poděkování**

Rád(a) bych touto cestou poděkoval(a) panu Ing. Petru Jindrovi Ph.D. za odborné vedení této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině za bezmeznou podporu během studia a týmu CULS Prague Formula Racing za výbornou spolupráci během psaní diplomové práce.

# **Návrh brzdového systému pro vůz typu formule student**

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá návrhem brzdového systému pro monopost Formule Student. Nejprve jsou probrána teoretická východiska k dané problematice a obecný úvod do problematiky brzdových systémů a jejich komponent. V praktické části práce je nejdříve popsán stávající koncept monopostu FS06 a analyzovány nedostatky předchozích brzdových systémů u starších monopostů. Tyto poznatky jsou také zpracovány do požadavků na brzdový systém. Návrh nového brzdového systému proběhl v programech MS Excel, MathCad Professional 5.0, Solidworks a Solidworks Simulations. Dle výpočtů byly navrženy komponenty nového brzdového systému monopostu FS07. Jejich přínos je diskutován v závěru práce.

**Klíčová slova:** ABS, pneumatiky, brzdové destičky, brzdové kotouče, brzdová kapalina

# **Design of a brake system for a student formula car**

## **Abstract**

The subject of this thesis is the design of a breaking system for Formule Student monopost. In the first part, the theory of the problem are discussed, as well as the general overview of the breaking system and its components. In the second part, the practical part, is described at first the current concept of the FS06 monopost, as well as the analysis of the lacks of the previous breaking systems of the older monoposts. This knowledge is also incorporated in the requirements of the new breaking system. The design of the new breaking system was processed in computer programes MS Excel, MathCad Proffesional 5.0, Solidworks and Solidworks Simulations. The components of the new breaking system for monopost FS07 were designed according to these calculations. The contribution of the new components is discussed in the final part of this thesis.

**Keywords:** ABS, tires, brake pads, brake discs, brake fluid

# Obsah

Úvod.....	1
<b>1 Cíl práce.....</b>	<b>2</b>
<b>2 Metodika .....</b>	<b>2</b>
<b>3 Přehled řešené problematiky.....</b>	<b>3</b>
3.1 Brzdový systém.....	3
3.1.1 Rozdělení brzdových systémů podle účelu brždění.....	4
3.1.1.1 Systém pro provozní brždění.....	4
3.1.1.2 Systém pro nouzové brždění.....	5
3.1.1.3 Systém parkovací brzdy .....	5
3.1.1.4 Systém odlehčovací brzdy.....	5
3.1.1.5 Protiblokovací systém (ABS) .....	5
3.1.2 Zapojení brzdových systémů .....	5
3.1.2.1 Jednookruhová soustava.....	6
3.1.2.2 Zapojení „TT“ .....	6
3.1.2.3 Diagonální zapojení „X“ .....	6
3.1.2.4 Zapojení „HT“ .....	7
3.1.2.5 Zapojení „LL“ .....	7
Každý okruh tohoto systému působí na jedno kolo přední nápravy a na jedno kolo na zadní nápravě. Tento systém se používá velmi zřídka[3].....	7
3.1.2.6 Zapojení „HH“ .....	7
Každý brzdový okruh působí na přední i zadní nápravu současně. Používá se vyjimečně.[1].....	7
3.2 Komponenty brzdového systému.....	7
3.2.1 Brzdový válec .....	7
3.2.1.1 Dvouokruhový brzdový válec.....	8
3.2.1.2 Jednookruhový brzdový válec .....	9
3.2.1.3 Kombinace dvou hlavních brzdových válců .....	10
3.2.2 Bubnové brzdy .....	11
3.2.2.1 Princip funkce bubnové brzdy.....	11
3.2.2.2 Rozdělení bubnových brzd.....	11
3.2.2.3 Použití bubnových brzd.....	12



3.2.2.4	Výhody bubnových brzd .....	13
3.2.2.5	Nevýhody bubnových brzd.....	13
3.2.3	Kotoučové brzdy .....	13
3.2.3.1	Princip funkce kotoučové brzdy .....	13
3.2.3.2	Výhody kotoučové brzdy .....	13
3.2.3.3	Nevýhody kotoučové brzdy.....	14
3.2.3.4	Kotoučová brzda s pevným třmenem.....	14
3.2.3.5	Kotoučová brzda s plovoucím třmenem.....	15
3.2.3.6	Brzdové kotouče .....	17
3.2.4	Brzdové obložení .....	19
3.2.4.1	Organické materiály.....	19
3.2.4.2	Kovové materiály.....	19
3.2.4.3	Polo-kovové materiály .....	19
3.2.5	Brzdová kapalina.....	20
3.3	Soutěž Formule Student .....	21
3.3.1.1	Definice soutěže Formule student.....	21
3.3.2	Disciplíny soutěže formule student.....	22
3.3.2.1	Statické disciplíny .....	23
3.3.2.2	Dynamické disciplíny.....	23
3.3.3	Pravidla soutěže Formule Student.....	26
3.3.4	Základní obecná pravidla pro stavbu monopostu Formule Student.....	26
3.3.5	Pravidla brzdového systému .....	26
3.4	Základní požadavky na závodní monopost .....	28
3.4.1	Nízká hmotnost konstrukce .....	28
3.4.2	Přilnavost pneumatik.....	28
3.4.3	Aerodynamika.....	29
3.4.4	Výkon brzdového systému korespondující s výkonem motoru a hmotností monopostu.....	30
3.4.5	Základní situace jízdní dynamiky .....	31
<b>4</b>	<b>Praktická část práce .....</b>	<b>34</b>
4.1	Současná koncepce monopostu FS06 .....	34
4.2	Budoucí koncepce monopostu FS07 .....	35
4.3	Rozbor a zhodnocení brzdového systému monopostů FS 05 a FS 06 .....	37
4.3.1	Rozbor systému FS05.....	37
4.3.2	Rozbor systému FS06.....	39
4.4	Generální požadavky na brzdový systém pro monopost FS07.....	41

4.5	Návrh nového řešení brzdového systému pro monopost FS07.....	42
4.5.1	Provozní podmínky v disciplínách Formule student.....	42
4.5.2	Teoretický Výpočet brzdového systému .....	43
4.5.2.1	Vstupní parametry brzdového systému: .....	43
4.5.2.2	Zjednodušený model brzdové soustavy pro výpočet .....	44
4.6	Návrh komponent pro monopost FS07 .....	48
4.6.1	Brzdové kotouče .....	48
4.6.2	Brzdové třmeny.....	51
4.6.3	Brzdové destičky.....	53
4.6.4	Brzdová kapalina.....	54
4.6.5	Pedálová skupina.....	54
4.6.5.1	Brzdový pedál .....	55
4.6.5.2	Plynový pedál .....	58
4.6.5.3	Podélné nosníky.....	59
4.6.5.4	Hlavní nosník.....	60
4.6.5.5	Sestava pedálové skupiny.....	62
4.6.6	Hlavní brzdové válce.....	62
4.6.7	Vahadlo brzdných sil.....	63
4.6.8	Ostatní příslušenstv .....	64
4.6.9	Brzdové světlo .....	65
4.7	Údržba brzdového systému.....	65
4.8	Testování Brzdového systému .....	66
4.8.1	Doporučené vybavení pro testování brzdového systému na uzavřené ploše.....	66
4.8.2	Plán testování brzdového systému .....	67
<b>5</b>	<b>Zhodnocení návrhu.....</b>	<b>68</b>
<b>6</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>69</b>
<b>7</b>	<b>Seznam použitých zdrojů .....</b>	<b>71</b>

## Seznam obrázků

Obrázek 1	Rozdíl sdílení tepla u bubnové a kotoučové brzdy [2]	3
Obrázek 2	Brzdová soustava osobního automobilu [3]	4
Obrázek 3	Jednookruhová brzdová soustava[3]	6
Obrázek 4	Brzdový systém se zapojením typu TT[3]	6
Obrázek 5	Brzdový systém se zapojením typu X[3]	6

Obrázek 6 Brzdový systém se zapojením typu HT[3]	7
Obrázek 7 Brzdový systém se zapojením typu LL[3]	7
Obrázek 8 Brzdový systém se zapojením typu HH[3]	7
Obrázek 9 Schéma dvouokruhového brzdového válce[1]	8
Obrázek 10 Schéma jednookruhového brzdového válce [1]	9
Obrázek 11 Schéma vahadla brzdících sil [2]	10
Obrázek 12 Schéma bubnové brzdy[1]	11
Obrázek 13 Škoda Enyaq IV [9]	12
Obrázek 14 Řez čtyřpístkovou a dvoupístkovou kotoučovou brzdou s pevným třmenem[3]	13
Obrázek 15 Dvanáctipístkový třmen od společnosti JBT [10]	14
Obrázek 16 Součásti plovoucího třmenu včetně parkovací brzdy [2]	16
Obrázek 17 Brzdový kotouč z uhlíkového kompozitu [11]	17
Obrázek 18 Různá provedení brzdových kotoučů[1]	18
Obrázek 19 Plovoucí brzdový kotouč[12]	18
Obrázek 20 Tým CULS Prague Formula Racing [Archiv týmu CULS Prague Formula Racing]	21
Obrázek 21 Disciplíny soutěže Formule Student [Archiv týmu CULS Prague Formula Racing]	22
Obrázek 22 Schéma disciplíny akceleration [Archiv týmu CULS Prague Formula Racing]	24
Obrázek 23 Schéma disciplíny Skidpad [Archiv týmu CULS Prague Formula Racing]	24
Obrázek 24 Příklad tratě disciplíny autocross [Archiv týmu CULS Prague Formula Racing]	25
Obrázek 25 Závodní pneumatika AVON A92 na monopostu FS06 [Archiv týmu CULS Prague Formula Racing]	28
Obrázek 26 Popis aerodynamických prvků [Archiv týmu CULS Prague Formula Racing]	29
Obrázek 27 Příklad průběhu vertikálního zatížení v závislosti na přilnavosti[2]	33
Obrázek 28 Monopost FS06 při průjezdu levotočivou zatáčkou - vnitřní přenos zatížení na pravě vnější kolo[Archiv týmu CULS Prague Formula Racing]	33
Obrázek 29 Monopost FS06 při jízdě kempusem ČZU [Archiv týmu CULS Prague Formula Racing]	35

Obrázek 30	Koncept monopostu FS07 [Archiv týmu CULS Prague Formula Racing]	36
Obrázek 31	Prasklý brzdový kotouč monopostu FS05 [Archiv autora]	38
Obrázek 32	Monopost FS05 s disky z horčíkové slitiny OZ Racing[Archiv autora ]	39
Obrázek 33	Monopost FS06 při brake testu[8]	40
Obrázek 34	Pedálová skupina FS07 [Archiv týmu CULS Prague Formula Racing]	41
Obrázek 35	Zjednodušený výpočtový model brzdové soustavy[7]	44
Obrázek 36	Pevností simulace různých designů brzdových kotoučů [Archiv autora]	49
Obrázek 37	Přední a zadní brzdové kotouče vyrobené firmou Motokotouce.cz [Archiv autora]	50
Obrázek 38	Přední brzdový třmen ISR 22-048 [13]	51
Obrázek 39	Zadní brzdový třmen ISR 22-049 [Archiv autora]	51
Obrázek 40	Pevností simulace přední těhlice[14]	52
Obrázek 41	Sada brzdových destiček Ferodo FRP415[15]	53
Obrázek 22	Bzdová kapalina Radi-CAL™ R4[16]	54
Obrázek 43	Model brzdového pedálu [Archiv autora]	55
Obrázek 44	Experiment s piloty týmu CULS Prague Formula Racing [Archiv autora]	56
Obrázek 45	Pevnostní simulace zobrazující souhrnné napětí [Archiv autora]	57
Obrázek 46	Pevnostní simulace zobrazující koeficient bezpečnost [Archiv autora]	57
Obrázek 47	Uložení čepu brzdového pedálu [Archiv autora]	58
Obrázek 38	Uložení čepu pedálu plynu [Archiv autora]	58
Obrázek 49	Simulace podélného nosníku pedálu brzdy ukazující souhrnné napětí v materiálu [Archiv autora]	59
Obrázek 50	Simulace podélného nosníku pedálu brzdy ukazující koeficient bezpečnosti [Archiv autora]	60
Obrázek 51	Model podélného nosníku pedálu plynu[Archiv autora]	60
Obrázek 52	Simulace příčného nosníku pedálové skupiny ukazující souhrnné napětí v materiálu [Archiv autora]	61
Obrázek 53	Simulace příčného nosníku pedálové skupiny ukazují koeficient bezpečnosti v materiálu [Archiv autora]	61
Obrázek 54	Sestava pedálové skupiny [Archiv autora]	62
Obrázek 55	Nový design housingu vahadla brzdných sil	63

Obrázek 56 Otočný ovladač vahadla brzdných sil [Archiv týmu CULS Prague Formula Racing]	63
Obrázek 57 Příslušenství brzdového systému [Archiv týmu CULS Prague Formula Racing]	64
Obrázek 58 Brzdové světlo [Archiv týmu CULS Prague Formula Racing]	65

## **Seznam tabulek**

Tabulka 1 Hodnoty množství FS06 [8] .....	34
Tabulka 2 technické údaje monopostu FS07[8].....	36
Tabulka 3 Vstupní parametry výpočtu brzdového systému .....	43
Tabulka 4 Výsledky experimentu měření sil vyvinutých piloty týmu CULS Prague Formula Racing .....	56

# Úvod

Brzdové systémy bezesporu patří k nejdůležitějším součástem všech vozidel, u kterých je třeba řídit rychlost jízdy nebo rychlost pohybu jejich je součástí. U automobilů jsou tyto systémy ještě důležitější z důvodu vysokého požadavku na bezpečnost a spolehlivost během provozu. V běžném provozu je řidič, respektive posádka vozidla téměř vždy vystavena určitým rizikům vznikům kolize s okolními překážkami nebo nenadálých událostí, na které musí řidič rychle reagovat. Jedním ze základních způsobů, jak vyřešit nebezpečnou situaci, je včas a bezpečně zastavit.

Aby bylo vozidlo schopné spolehlivě zpomalit nebo zcela zastavit, musí být vybaveno odpovídajícím brzdovým systémem, který je dostatečně dimenzovaný pro daný typ vozidla a jeho provozní podmínky. Je tedy více než jasné, že se bude konstrukčně lišit brzdový systém například nákladního automobilu od automobilu osobního.

Samostatnou kapitolou jsou pak brzdové systémy určené pro použití v oblasti motorsportu, kde vozidla ve většině motoristických disciplín potřebují vysoce účinné systémy. Řidič závodního vozu si může dovolit jízdu na limitu možností jen v případě, že navržený systém splňuje vysoké požadavky na závodní brzdové systémy, mezi které patří dobrá dávkovatelnost brzdového účinku, rychlá odezva a stálý účinek brzd. Odměnou za dobře vyřešený závodní brzdový systém není zvýšení brzdné síly samotné, ale jistota, důslednost a ovladatelnost systému, která je poskytována řidiči.

Nejinak tomu je i v případě návrhu brzdového systému pro nový monopost typu Formule Student týmu CULS Prague Formula Racing, kterým se se tato práce zabývá. Důvodem pro přepracování stávajícího řešení brzdového systému na monopostu FS 06 Razor byla jeho opakovaná nespolehlivost, nespokojenost pilotů s ovládáním a množství drobných chyb v návrhu, které dohromady vytvářely řadu problémů na závodních tratích.

První část této práce je věnována problematice brzdových systémů a jejich součástí, různým řešením brzdových systémů a dalším teoretickým východiskům.

V druhé části práce se nachází vlastní návrh nové brzdové soustavy a jejich součástí, zároveň jsou zde porovnávány systémy minulé generace monopostu se současným zamýšleným řešením na monopostu FS 07. Kromě samotného výpočtu systému, výběru a návrhu komponent, je řešeno také testování, zajíždění a servis brzdového systému.

# 1 Cíl práce

Cílem práce je návrh a optimalizace funkce jednotlivých komponent brzdového systému vozu typu Formule Student. Návrh nového systému pro monopost FS 07 musí odstranit konstrukční nedostatky zjištěné při závodech a testování v minulých sezonách. Úkolem práce je vytvořit takový brzdový systém, který bude spolehlivý v náročných podmínkách všech dynamických disciplín soutěže Formule Student. Nový brzdový systém musí pozitivně ovlivnit koncept monopostu FS 07 a pokračovat i nadále v trendu snižování hmotnosti. Při návrhu je zapotřebí zvážit časové, finanční a výrobní možnosti týmu CULS Prague Formula Racing. Komponenty systému je tedy zapotřebí zvolit a navrhnout tak, aby byly vyrobitelné v rámci technického zázemí týmu CULS Prague Formula Racing nebo běžně dostupné u externích dodavatelů, což umožní snížit finanční náročnost návrhu. Přílišné navýšení ceny nebo náročnosti výroby potřebných komponent, může negativně ohrozit chod celého projektu. Ani omezený rozpočet pro sezonu v roce 2022 nesmí v žádném případě negativně ohrozit kvalitu použitých komponent brzdového systému, a proto se v případě potřeby doporučuje raději využití profesionálně zrepasovaných kvalitních dílů, které již byly zakoupeny na starší monoposty.

# 2 Metodika

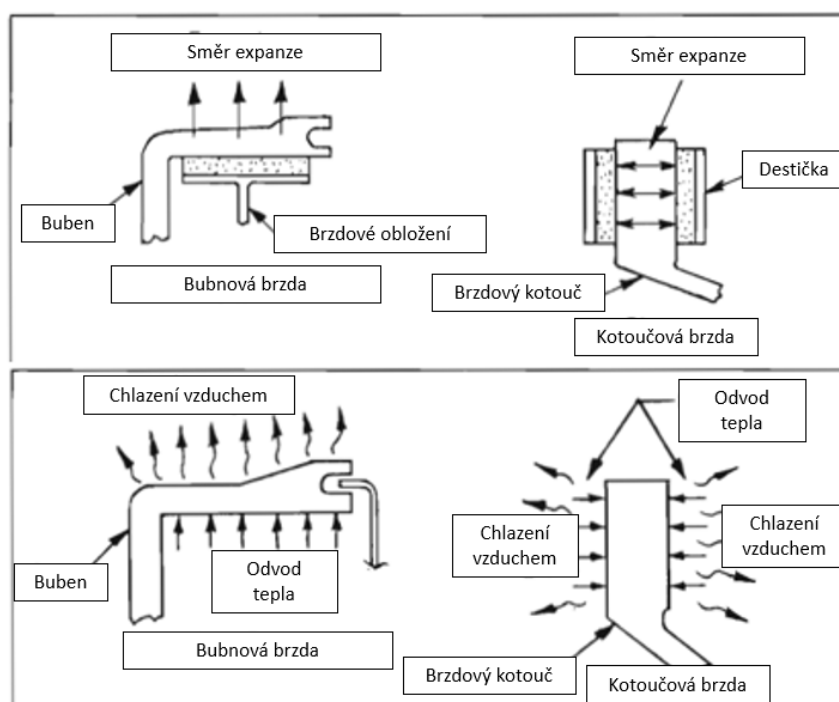
Po úvodu do problematiky a definování cíle této práce byl zpracován přehled řešené problematiky, kde práce seznamuje s teoretickými východisky týkající se brzdových systémů automobilů. Dále jsou probrány důležité komponenty brzdového systému a základní teorie týkající se závodního monopostu. V praktické části práce jsou nejprve analyzovány monoposty FS05 a FS06 především z hlediska brzdových systémů. Rozbor nedostatků a zkušenosti z testování jsou velmi důležité pro návrh komponent nového brzdového systému. Kromě rozboru nedostatků a zkušeností z testování se návrh nového systému opírá o výpočet brzdového systému, který byl proveden v programu MathCad Professional dle odborné literatury a aktuálně platná pravidla soutěže Formule Student. Jednotlivé komponenty jsou následně voleny dle výsledků tohoto výpočtu nebo dle dalších analýz, například pomocí metody konečných prvků, která umožňuje analyzovat díly o složité geometrii. Během vývoje a výběru komponent bylo zvažováno více variant z nichž byla

vybrána vždy nejlepší varianta s ohledem na stanovené cíle. Splnění cílů je diskutováno v kapitole zhodnocení výsledků.

### 3 Přehled řešené problematiky

#### 3.1 Brzdový systém

Hlavními úkoly brzdové soustavy je umožnit bezpečné zastavení vozidla, zajištění vozidla při stání a schopnost snížit rychlost vozidla dle požadavku řidiče. Řízené snížení rychlosti se u kolových brzd dosáhne přeměnou pohybové energie vozidla pomocí tření na energii tepelnou. K tření dochází mezi brzdovým obložením a rotujícím kotoučem, bubnem nebo pásem. Tepelná energie je poté vyzářena do okolí. U závodních vozů je tepelné namáhání a intenzita brzdění mohl být vyšší, a proto musí být brzdový systém speciálně uzpůsoben tak, aby tuto zátěž bezpečně vydržel po celou dobu závodu. Konstrukteři reagují na tuto výzvu vývojem vysoce výkonných komponent z vysoce kvalitních a exotických materiálů. Brzdy u osobních automobilů využívají pro svoje chlazení tři základní způsoby sdílení tepla. Teplo je sdíleno ven z kolové brzdy pomocí proudění (konvekce), sáláním (radiace) a vedením (kondukcí). Na následujícím obrázku jsou k vidění rozdíly u sdílení tepla u kotoučové a bubnové brzdy. [1, 2]



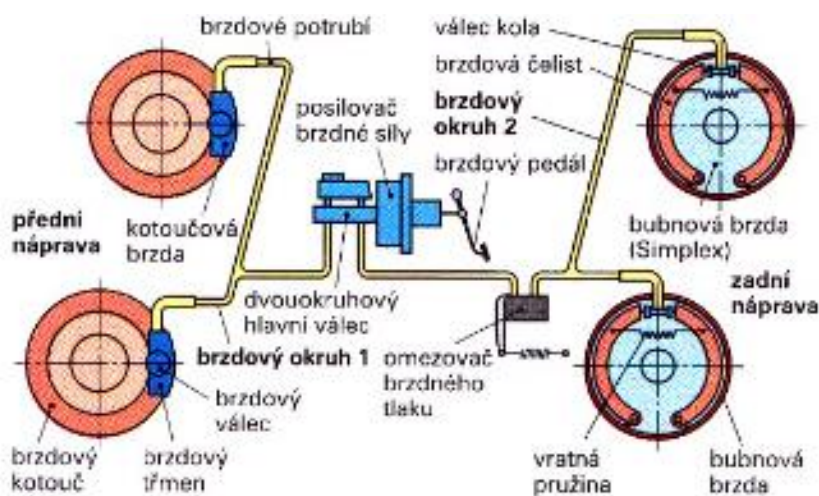
Obrázek 4 Rozdíl sdílení tepla u bubnové a kotoučové brzdy[2]



Rozdělení brzdových soustav dle způsobu přenosu síly:

- mechanicky;
- hydraulicky;
- pneumaticky.

V osobních automobilech se nejčastěji vyskytuje ovládání pomocí hydraulických okruhů. Příklad zjednodušeného základního hydraulického okruhu osobního automobilu je k vidění na následujícím obrázku.[3]



Obrázek 2 Brzdová soustava osobního automobilu [3]

Selhání celého brzdového systému a tím pádem ohrožení zdraví či života posádky, může zapříčinit špatná funkce jakékoliv komponenty v systému. Proto se při konstrukci musí dbát i na nejmenší detaily. Mezi kritické závady u hydraulických a pneumatických okruhů patří netěsnost a úniky media ze systému, které v podstatě znemožní přenos síly hydraulickým okruhem.[3]

### 3.1.1 Rozdělení brzdových systémů podle účelu brždění

#### 3.1.1.1 Systém pro provozní brždění

Umožňuje snížení rychlosti vozidla dle okolností až do úplného zastavení. Vozidlo by při tom mělo udržovat řidičem zvolenou jízdní stopu. Brzdný účinek soustavy musí být předvídatelný a odstupňovatelný.[2]

### 3.1.1.2 Systém pro nouzové brzdění

Tento systém slouží v případě selhání soustavy pro provozní brzdění. V praxi není často používán další brzdový okruh, často postačí dva na sobě navzájem nezávislé okruhy brzdového systému nebo odstupňovaná parkovací brzda.[3]

### 3.1.1.3 Systém parkovací brzdy

Parkovací brzda zajišťuje zaparkované vozidlo na místě proti rozjetí, a to i na nakloněné vozovce. Ovládání často bývá odstupňované s mechanickým spojením pomocí táhla nebo lanka. Parkovací brzda působí u automobilů pouze na kola jedné nápravy.[3]

### 3.1.1.4 Systém odlehčovací brzdy

Tento systém se používá pro mírné zpomalení a udržení stálé rychlosti při jízdě v delším klesání, nejčastěji u nákladních vozidel. Odlehčovací brzdy jsou zpravidla neopotřebitelné a mohou pracovat pouze tehdy pokud vůz jede. Nejčastěji se v praxi vyskytují vířivé a motorové brzdy.[3]

### 3.1.1.5 Protiblokovací systém (ABS)

Brzdový systém vybavený protiblokovacím systémem ABS má za úkol zabránit zablokování kol v kritických situacích a umožnit i při plném brzdění ovládnutí vozidla řidičem. Systém aktivně reguluje a řídí tlak v brzdových okruzích tak, aby bylo zaručeno odvalování jednotlivých kol neboť pouze odvalující se kola jsou říditelná a mohou dobře přenášet příčné i podélné síly.[3]

## 3.1.2 Zapojení brzdových systémů

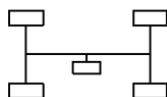
Hydraulický brzdový systém může být zapojený mnoha různými způsoby. Nejčastěji se v praxi vyskytuje dvouokruhové zapojení, neboť je v běžných osobních automobilech předepsáno zákonem z důvodu požadavku na nouzové brzdění a výrazně tak zvyšuje bezpečnost systému.

Ve Formuli Student se používají dva oddělené hydraulické okruhy, přičemž jeden okruh ovládá kolové brzdy přední nápravy a druhý ovládá kolové brzdy zadní nápravy. Výhodnou volbou velikosti brzdových válců je pak možné nastavit rozdělení tlaku v jednotlivých okruzích. S pomocí vahadla brzdných sil lze poté přesně nastavit silové působení od pedálu

na jednotlivé brzdové válce. V běžných vozidlech jsou často používány posilovače brzd snižujících potřebnou ovládací sílu řidiče, v motorsportu se z důvodu snížení hmotnosti a zlepšení zpětné vazby, tohoto řešení nepoužívá. Hydraulický systém tak musí být tedy navrhnout tak, aby ho bylo možné ovládat silou řidiče. [1]

### 3.1.2.1 Jednookruhová soustava

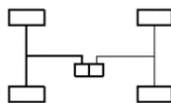
Na všechna kola působí jen jeden brzdový okruh.[3]



Obrázek 3 Jednookruhová brzdová soustava[3]

### 3.1.2.2 Zapojení „TT“

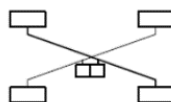
Velmi častý systém zapojení, kdy je zapojena jedním okruhem přední náprava a druhým okruhem zadní náprava[3]



Obrázek 4 Brzdový systém se zapojením typu TT[3]

### 3.1.2.3 Diagonální zapojení „X“

Tento systém s označením „X“ nebo také „K“ je často používán u vozidel s pohonem všech 4 kol a automobily vybavené systémem ABS. Jedná se o zapojení, kdy je jedno přední kolo diagonálně spojeno okruhem se druhým zadním kolem a naopak.[3]



Obrázek 5 Brzdový systém se zapojením typu X[3]

#### 3.1.2.4 Zapojení „HT“

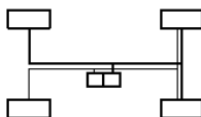
Tento systém je uzpůsoben tak, že jeden okruh brzdí všechny kola vozidla a druhý brzdí jen kola na přední nápravě[3]



Obrázek 6 Brzdový systém se zapojením typu HT[3]

#### 3.1.2.5 Zapojení „LL“

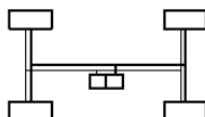
Každý okruh tohoto systému působí na jedno kolo přední nápravy a na jedno kolo na zadní nápravě. Tento systém se používá velmi zřídka[3]



Obrázek 7 Brzdový systém se zapojením typu LL[3]

#### 3.1.2.6 Zapojení „HH“

Každý brzdový okruh působí na přední i zadní nápravu současně. Používá se vyjimečně.[1]



Obrázek 8 Brzdový systém se zapojením typu HH[3]

## 3.2 Komponenty brzdového systému

### 3.2.1 Brzdový válec

Hlavní brzdový válec je hydraulickým válcem ovládaným buď silou řidiče nebo silou řidiče v kombinaci s posilovačem brzd. Síla od od brzdového pedálu, je pomocí pístu hlavního brzdového válce převedena na tlak hydraulické kapaliny v systému, kterým se přenáší síla od brzdových válců do pístů umístěných v brzdových třmenech. Pístky poté tlačí na brzdové destičky, které se třou o brzdový kotouč nebo buben a maří tím tak kinetickou energii vozu.[1]

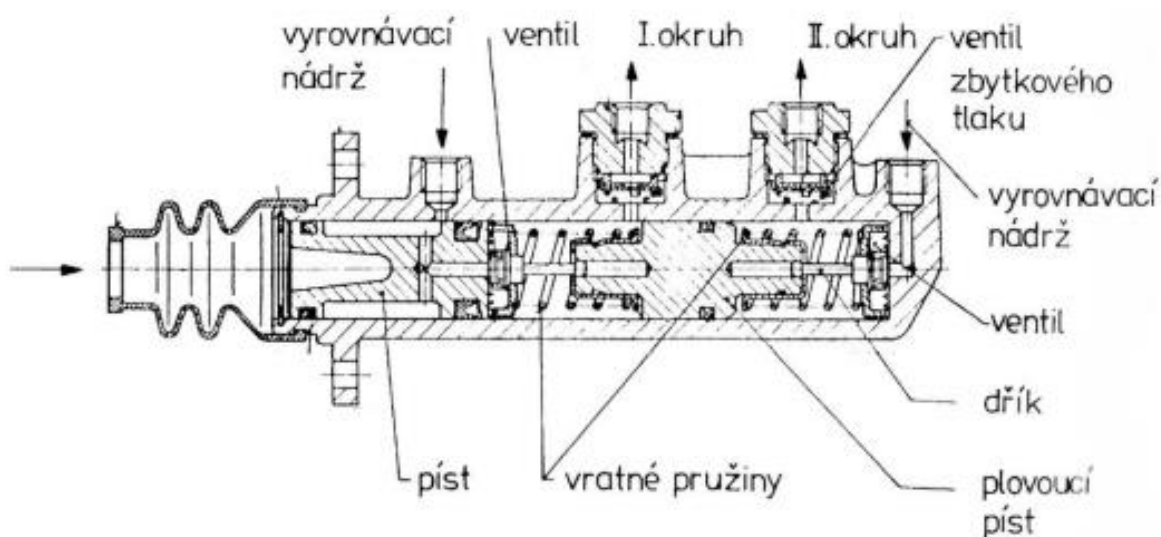
Hlavní brzdový válec má za úkol:

- Rychlý nárůst tlaku v každém brzdovém okruhu;
- Rychlý pokles tlaku pro rychlé uvolnění brzd;
- Vyrovnávání objemu brzdové kapaliny při změnách teploty a zvětšení posuvu brzd naprázdno způsobené opotřebovaným brzdovým obložením.

### 3.2.1.1 Dvouokruhový brzdový válec

V současné době se v osobních automobilech nejvíce používá řešení s hlavním tandemovým válcem, které je cenově příznivé a umožňuje ovládat oba brzdové okruhy zároveň. Pracovní prostory jsou u tohoto typu brzdového válce umístěny za sebou ve stejné ose v jednom společném tělese.

V okamžiku, kdy řidič sešlápně brzdový pedál se začne píst zasouvat do prostoru válce a ventily na obou stranách plovoucího pístu uzavřou propojení mezi tlakovými prostory a vyrovnávací nádržkou. Kapalina v pracovním prostoru před pístem je vtlačována do jednoho brzdového okruhu čímž narůstá tlak, který zároveň působí na plovoucí píst, který generuje tlak v druhém brzdovém okruhu. Postupně se tlaky v obou okruzích vyrovnají. V okamžiku, kdy řidič přestane působit svojí silou na brzdový pedál, vrátí tlačné pružiny oba písty do výchozí polohy a ventily, které spojují tlakovou část a vyrovnávací nádobku se uvolní a

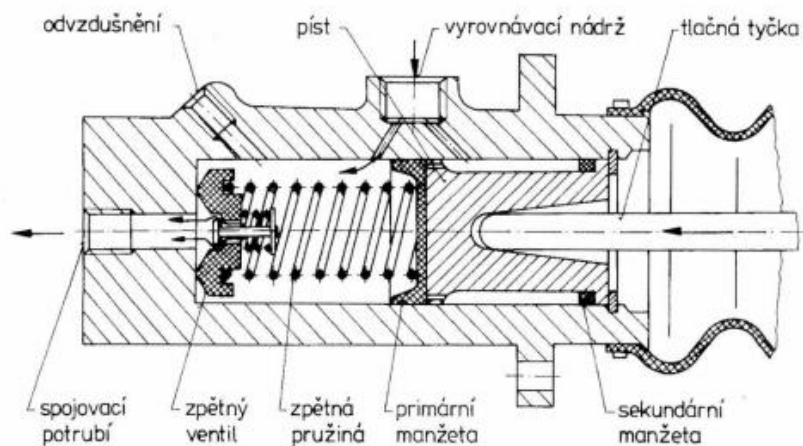


Obrázek 9 Schéma dvouokruhového brzdového válce[1]

brzdová kapalina začne proudit do vyrovnávací nádobky. Tím dochází k objemovému vyrovnání. V případě, že dojde k poruše jednoho z okruhů v brzdovém systému, dojde k zasunutí dřívku ventilu vadného okruhu do plovoucího pístu a brzdný tlak je tvořen pouze v okruhu, který není porušený. Schéma dvouokruhového brzdového válce je znázorněno následujícím obrázkem.[1]

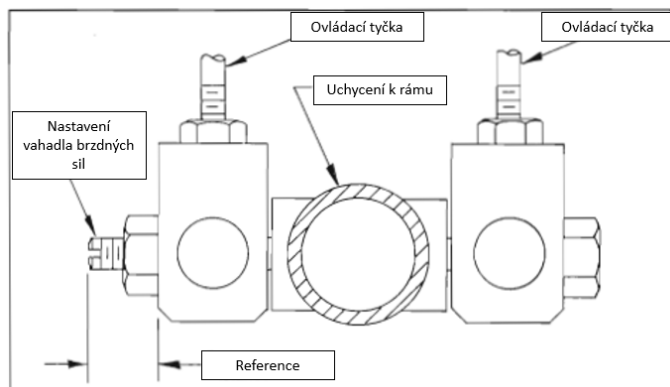
### 3.2.1.2 Jednookruhový brzdový válec

Princip funkce jednookruhového brzdového válce je založen na pohybu pístu v tělese válce. Pokud řidič nepůsobí silou na brzdový pedál, je tlaková komora brzdového válce propojena kanálkem s vyrovnávací nádobkou. V okamžiku, kdy řidič začne působit silou na brzdový pedál, se začne píst zasunovat do tělesa válce, primární manžeta na pístu uzavře kanál do vyrovnávací nádobky a před pístem naroste tlak, který aktivuje kolové brzdy. Jakmile řidič přestane působit silou na brzdový pedál, vratná pružina vrátí následně píst do výchozí polohy a manžeta opět uvolní kanál spojující tlakovou komoru s vyrovnávací nádobkou. Tím se docílí objemového vyrovnání. [1]



### 3.2.1.3 Kombinace dvou hlavních brzdových válců

Pro závodní vozy je výhodné použít dva jednookruhové hlavní brzdové válce uchycené na společném díle, který se nazývá vahadlo brzdných sil. Vahadlo lze vidět na následujícím obrázku č.11.



Obrázek 11 Schéma vahadla brzdných sil [2]

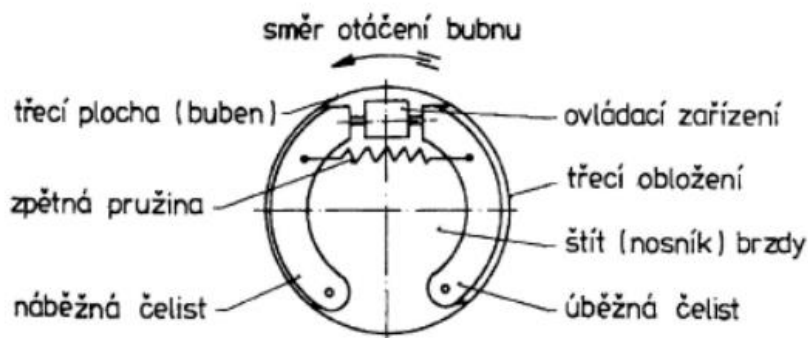
Díky možnosti vychýlení vahadla je možné přesné nastavení brzdného účinku mezi přední a zadní nápravou, které může upravit i pilot během jízdy na závodní trati, a to manuálně pomocí otočného ovladače vychýlení vahadla brzdných sil v Anglickém jazyce nazývaný tzv. balance bar.

Toto donastavení brzdového systému se provádí z důvodu neustále měnících se podmínek na závodní trati, které ovlivňují přilnavost mezi pneumatikou a vozovkou. Na hodnotě přilnavosti závisí maximální zpomalení a míra přenosu zatížení mezi přední a zadní nápravou vozidla. Přední náprava je při brzdění z důvodu přesunu zatížení směrem vpřed zatížena přibližně o 75 % více než náprava zadní. Maximálního zpomalení mnohem dříve je dosaženo v okamžiku těsně před tím, než jsou kola po překročení hranice přilnavosti v ideálním případě zablokována na všech kolech ve stejný okamžik. Aby bylo dosaženo tohoto stavu, je zapotřebí pomocí nastavení balance baru a vhodné volby velikosti hlavních brzdových válců přizpůsobit systém provozním podmínkám tak, aby při brzdění nedocházelo k zablokování kol pouze přední nebo zadní nápravy, což by mělo negativní dopad na jízdní vlastnosti a ovládání vozu.[2]

### 3.2.2 Bubnové brzdy

#### 3.2.2.1 Princip funkce bubnové brzdy

Princip fungování bubnové brzdy spočívá v přitlačování stacionární části, kterou představují čelisti, na rotační část, kterou představuje buben. Vnitřní část bubnu slouží jako třecí plocha, se kterou jsou je v kontaktu brzdové obložení. Radiální přitlačení čelistí na třecí plochu zabezpečuje ovládací zařízení, které působí na jednom konci každé z čelistí. U osobních automobilů se jako ovládací zařízení nejčastěji používá kapalinový válec, který pomocí působení tlaku brzdové kapaliny v pracovním prostoru vytvoří ovládací sílu, která se tlačným čepem přenáší na čelist. Základní schéma bubnové brzdy je jasně viditelné na obrázku č. 12.[1]



Obrázek 12 Schéma bubnové brzdy[1]

#### 3.2.2.2 Rozdělení bubnových brzd

Podle způsobu uložení druhého konce rozlišujeme následující druhy čelistí:

- Otočné – Čelisti tohoto typu jsou uloženy na jednom čepu a tudíž mají jeden stupeň volnosti pohybu.
- Volné – Čelisti tohoto typu se buď opírají o šikmou nebo kolmou opěrou plochu a nazývají se plovoucí čelisti nebo jsou čelisti uloženy pomocí výkyvné vzpěry na čepu a nazývají se nakotvené čelisti a nemají tedy pevný otočný bod což znamená, že mají 2° volnosti.[1]



Podle způsobu uložení a ovládání čelistí rozdělujeme typy bubnových brzd do třech základních skupin:

- Brzda jednoduchá (simplex) – Tento typ má jednu náběžnou a jednu úběžnou čelist. U náběžné čelisti třecí moment zvyšuje její přitlak. U úběžné čelisti snižuje třecí moment její přitlak. K přitlačování slouží jedno ovládací zařízení.
- Brzda dvojběžná (lex) – Tento typ brzdy má obě čelisti náběžné (v případě jízdy vpřed). K přitlačování každé čelisti slouží samostatné ovládací zařízení.
- Brzda se spřaženými čelistmi (servo) – Reakce od uložení primární neboli náběžné čelisti je přenášena pomocí rozpěrného čepu na sekundární čelist, na které vznikne přitlačná síla větší, než je síla ovládací a tato čelist pracuje také jako náběžná s větším účinkem v porovnání s primární čelistí. Obě čelisti mají jedno společné ovládací zařízení.[1]

### 3.2.2.3 Použití bubnových brzd

Bubnové brzdy se v minulosti používali jak v běžných vozech, tak v závodních speciálech. S postupnou modernizací všech vozidel bubnové brzdy postupně vytlačily brzdy kotoučové a až na výjimky kotoučové brzdy ve většině aplikací dnes zcela převládají. V současné době se bubnové brzdy používají na zadních nápravách méně výkonných osobních automobilů a u některých elektromobilů. Elektromobily využívají pro deceleraci ve značné míře rekuperaci elektrické energie, což má za následek výrazně menší zatěžování brzdového systému při běžné jízdě. V některých dopravních situacích brzdění rekuperací plně dostačuje a kolové brzdy nejsou aktivovány vůbec. Dlouhodobé nevyužívání kotoučových brzd, vede k jejich korozivnímu opotřebení, a tudíž k problémům s jejich funkcí. Bubnová brzda má funkční povrchy umístěné zevnitř bubnu, což jí propůjčuje lepší vlastnosti z hlediska odolnosti proti korozi na nečistotám. Na následujícím obrázku je zobrazen moderní elektromobil Škoda Enyaq IV, který je vybaven bubnovými brzdami na zadní nápravě ve všech výkonových variantách pohonů. [4]



Obrázek 13 Škoda Enyaq IV [9]

#### 3.2.2.4 Výhody bubnových brzd

- Konstrukce brzdy chráněná proti nečistotám;
- Delší životnost brzdového obložení;
- Snadná konstrukce parkovací brzdy;
- Prach z brzdového obložení zůstává z velké části uvnitř bubnu.[3] [2]

#### 3.2.2.5 Nevýhody bubnových brzd

- Horší odvod tepla;
- Sklony k vadnutí
- Složitější údržba a opravy. [2, 3]

### 3.2.3 Kotoučové brzdy

Kotoučové brzdy jsou součástí návrhu brzdového systému pro vůz typu Formule Student, a budou tedy v následujících kapitolách probrány podrobněji.

#### 3.2.3.1 Princip funkce kotoučové brzdy

Princip fungování kotoučové brzdy je založen, podobně jako u bubnové brzdy, na kontaktu a vzájemném přitlačení rotující a stacionární části. Rotující část u kotoučové brzdy představuje brzdový kotouč a stacionární část představuje brzdové obložení v podobě brzdových destiček. Na rozdíl od bubnové brzdy zde však přitlačná síla nepůsobí zevnitř na rotující část, ale z vnějšku, kde přitlačuje brzdové destičky na boky kotouče. [1]

#### 3.2.3.2 Výhody kotoučové brzdy

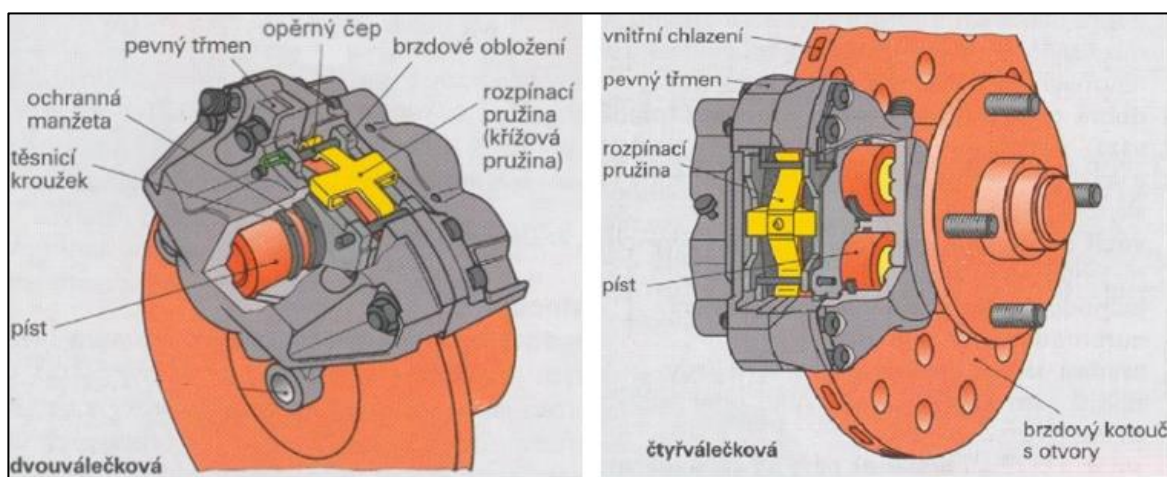
- Dobrá dávkovatelnost brzdné síly;
- Dobré odvod tepla a chlazení;
- Lepší odolnost vůči vadnutí
- Jednoduchá výměna brzdového obložení;
- Samočinné seřizování vůle;
- Dobré samočištění [2]

### 3.2.3.3 Nevýhody kotoučové brzdy

- Nákladné řešení parkovací brzdy;
- Rychlejší opotřebení brzdového obložení;
- Intenzivnější zahřívání brzdové kapaliny;
- Funkční plochy nejsou chráněny proti nečistotám a vlivu okolí.[2]

### 3.2.3.4 Kotoučová brzda s pevným třmenem

U konstrukčního řešení kotoučové brzdy s pevným třmenem jsou hydraulické válce uspořádány proti sobě po obou stranách brzdového třmenu, který není pohyblivý a je pevně spojený s těhlicí nápravy. Pro lepší pochopení problematiky kotoučové brzdy s pevným třmenem je přiložen následující obrázek č 14.



Obrázek 14 Řez čtyřpístkovou a dvoupístkovou kotoučovou brzdou s pevným třmenem[3]

Pístky jsou v brzdových třmenech vlivem tlaku brzdové kapaliny v hydraulickém okruhu odtlačovány ven ze svého uložení a je zapotřebí tedy zajišťovat i jejich vratný pohyb při poklesu tlaku v systému vyvolaném uvolněním brzdového pedálu. Pro zajištění vratného pohybu pístků se používá pryžového těsnění uloženého v drážce brzdového třmenu. Během působení pístu na brzdové obložení se pryžový kroužek zdeformuje a vzniklá síla v deformovaném těsnění následně vrátí pístek po uvolnění tlaku do původní pozice. Řešení

tzv. monoblokového brzdíče se velmi často používá v oblasti motorsportu, kdy nejsou výjimkou pevné brzdové třmeny obsahující v některých případech i 6 až 12 pístků.[1, 3]



*Obrázek 15 Dvanáctipístkový třmen od společnosti JBT [10]*

#### 3.2.3.4.1 Výhody kotoučové brzdy s pevným třmenem

- Při použití většího počtu pístků se zlepšuje rovnoměrné působení přítlaku brzdových destiček na brzdový kotouč;
- Pevnější konstrukce;
- Nižší hmotnost;
- Rychlejší a citlivější reakce. [2, 3]

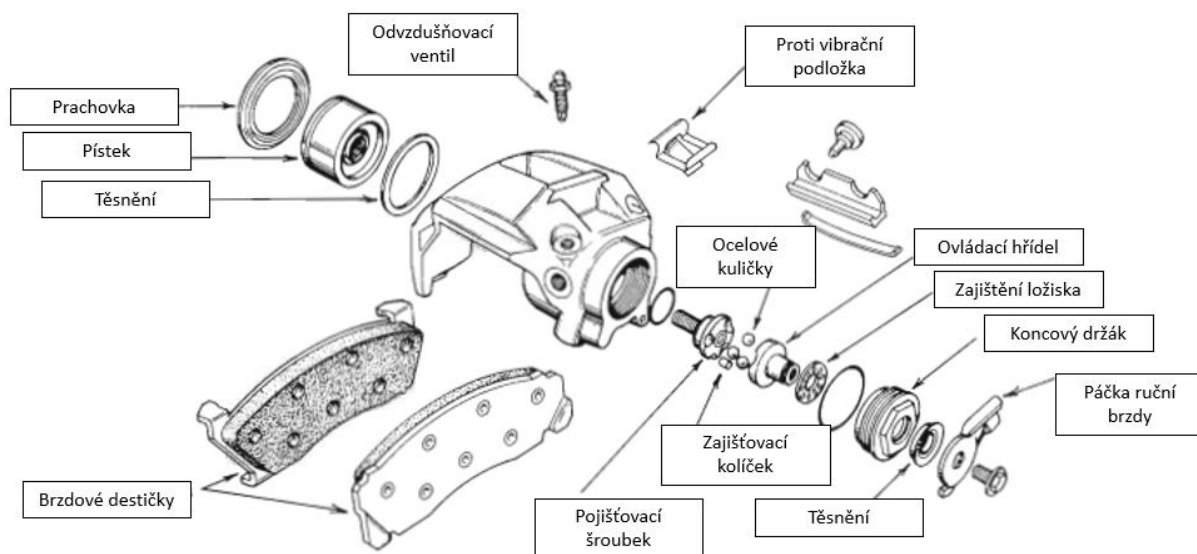
#### 3.2.3.4.2 Nevýhody kotoučové brzdy s pevným třmenem

- Složitá výroba;
- Vyšší cena;
- Sklony k vibracím;
- Sklony k vyšší hlučnosti. [2, 3]

#### 3.2.3.5 Kotoučová brzda s plovoucím třmenem

Konstrukční řešení kotoučové brzdy s plovoucím neboli volným třmenem má hydraulický válec umístěn pouze na jedné straně kotouče a brzdový třmen je pohyblivý ve směru jeho osy. Díky pohyblivému třmenu je ovládací síla působící na třecí desky po obou stranách

kotouče stejná. Vracení pístu zajišťuje vratná síla těsnícího kroužku. Obrázek plovoucího brzdového třmenu a jeho součástí je k vidění na obrázku č. 16.[1]



Obrázek 16 Součásti plovoucího třmenu včetně parkovací brzdy[2]

### 3.2.3.5.1 Výhody kotoučové brzdy s plovoucím třmenem

- Jednoduchá konstrukce
- Levnější výroba
- Méně namáhání brzdové kapaliny
- Méně prostorově náročné
- Velké plochy brzdových destiček
- Téměř bezúdržbové vedení třmenu odolné vůči nečistotám[3]

### 3.2.3.5.2 Nevýhody kotoučové brzdy s plovoucím třmenem

- Horší zpětná vazba řidiči přes brzdový pedál
- Obtížné konstrukční řešení s více pístky
- Horší rozložení přtlaku brzdových destiček na brzdový kotouč[3]

### 3.2.3.6 Brzdové kotouče

Brzdový kotouč je rotační částí kotoučové brzdy. Většinou se vyrábí z litiny, nerezové oceli, temperované litiny nebo ocelolitiny. Tyto materiály jsou vhodné z hlediska výrobní ceny, dobré teplotní odolnosti a pevnosti. Protože brzdový kotouč je často nejtěžší součástí kotoučové brzdy, objevují se brzdové kotouče vyrobené i z lehkých materiálů. V méně zatížených aplikacích se objevují kotouče z hliníkových slitin, například u motocyklů. U sportovních a závodních automobilů se z důvodu extrémního mechanického a tepelného zatížení používají kotouče z kompozitních materiálů. Tento typ kotouče má další velkou výhodu z hlediska hmotnosti, protože kotouč vyrobený z kompozitních materiálů váží zhruba  $\frac{1}{4}$  hmotnosti kotouče litinového. Nevýhodou tohoto řešení je složitá výroba a extrémně vysoká cena. Problémem je také omezený teplotní rozsah, kdy kotouč pracuje optimálně a mění se koeficient tření v závislosti na teplotě. [1–3]

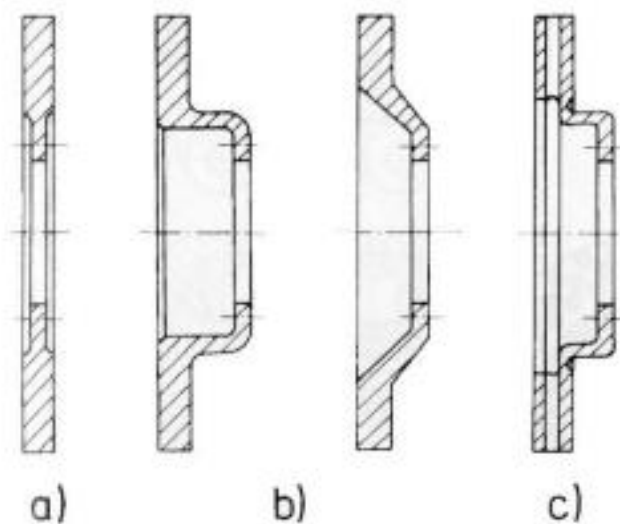


Obrázek 17 Brzdový kotouč z uhlíkového kompozitu[11]

Brzdové kotouče lze rozdělit do dvou základních skupin:

#### 3.2.3.6.1 Pevné brzdové kotouče

Mezi nejjednodušší provedení brzdového kotouče patří plochý brzdový kotouč. Vzhledem k negativním sklonům k deformacím a snadnému přístupu tepla do ložisek v náboji byly vynalezeny další designy brzdových kotoučů. Problémy plochého kotouče řeší brzdový kotouč se středem ve tvaru hrnce. Další zlepšení v oblasti řešení problému s odvodem tepla do okolí představuje brzdový kotouč s vnitřním chlazením. Různá provedení pevných brzdových kotoučů lze vidět na následujícím obrázku. Typ a) je plochý kotouč, typy b) jsou brzdové kotouče s hrncovým středem a typ c) je pevný kotouč s vnitřním chlazením.[1]



Obrázek 18 Různá provedení brzdových kotoučů[1]

#### 3.2.3.6.2 Plovoucí brzdové kotouče

Plovoucí brzdový kotouč se skládá ze dvou základních částí. Jedná se o věnec, na který působí ovládací silou třecí segmenty a o unašeč, který je s věncem společně spojen čepy. Hlavním důvodem, proč byl navržen plovoucí kotouč, je snížení pnutí vyvolané teplotní deformací a umožnění mírného axiálního pohybu věnce kotouče. To má za následek zlepšení reakční doby mezi brzdovými destičkami a kotoučem což má za následek dřívější a přesnější vytvoření brzdého momentu. Další velkou výhodou je výrazné snížení přístupu tepla z horkého brzdového věnce do náboje s ložisky a tím pádem zvýšení životnosti ložisek. Věnec brzdového kotouče, na který působí brzdové destičky je možné vyrobit z rozdílného materiálu než středový unašeč. Tato možnost použití rozdílných materiálů může přinést dodatečné snížení celkové hmotnosti kotouče, které zároveň představuje neodpruženou rotační hmotnost vozu. Proto se plovoucí kotouče používají pro sportovní účely. Příklad tohoto konstrukčního řešení lze vidět na následujícím obrázku.[1–3]



Obrázek 19 Plovoucí brzdový kotouč[12]

### 3.2.4 Brzdové obložení

Brzdové obložení představuje díl, který je přímo v kontaktu s rotující částí kolové brzdy, nejčastěji s bubnem či kotoučem. Při kontaktu brzdového obložení s rotující částí kolové brzdy dochází ke vzájemnému tření a je zde mařena kinetická energie vozidla, která se mění v energii tepelnou. S rostoucí přitlačnou silou, vytvořenou tlakem kapaliny na brzdový pístek v kolové brzdě, roste i koeficient tření mezi kotoučem (bubnem) a brzdovým obložím. Třecí materiál, který je nalepen a nalisován na podkladovou destičku je silně namáhán jak tepelně, tak mechanicky. Na tento materiál jsou tedy kladeny vysoké požadavky jako například stálý součinitel tření i za vysokých teplot, mechanická pevnost, tepelná odolnost, vysoká životnost, odolnost proti vodě a nečistotám, odolnost proti skelnatění povrchu při vysokých teplotách.

Třecí materiály brzdových obložení lze rozdělit na: [1, 2]

#### 3.2.4.1 Organické materiály

Tyto materiály se vyrábí ze směsí obsahující anorganické látky jako například sklo, kevlar, částice kovu či guma, které při sobě drží organické pojivo často v podobě pryskyřice. Výhodou organického materiálu brzdového obložení je jeho dobrá funkce při nižších teplotách. Koeficient tření mezi funkčními plochami brzdového kotouče a brzdového obložení při vysokých teplotách rychle klesá. V praxi se používají v méně náročných aplikacích.[1, 2]

#### 3.2.4.2 Kovové materiály

Tyto materiály se vyrábí metodou spékání kovových prášků za vysokých teplot a tlaků. Mezi výhody těchto materiálů patří lepší odolnost proti slábnutí brzdného účinku při vysokých teplotách, odolávají vyššímu tepelnému namáhání než materiály z organických materiálů. Nevýhodou je drahá výroba, zhoršený brzdný účinek při nízkých teplotách a značný vliv na větší opotřebení brzdového kotouče.[1, 2]

#### 3.2.4.3 Polo-kovové materiály

Tyto materiály jsou kombinací organických a kovových materiálů. Polo-kovové materiály využívají výhody obou skupin materiálů určených pro brzdová obložení. Jedná se o kovová vlákna spojená pomocí pryskyřice. [1, 2]



### 3.2.5 Brzdová kapalina

Nejčastěji používaným médiem pro hydraulické okruhy brzd u osobních automobilů je brzdová kapalina. Tato kapalina zajišťuje přenos síly od hlavního brzdového válce na válce nebo pístky umístěné v kolových brzdách. Na brzdovou kapalinu jsou kladeny níže uvedené požadavky:

- Vysoký bod varu;
- Nízký bod tuhnutí;
- Konstantní viskozita;
- Chemicky neutrální reakce ke kovům a pryži;
- Mazání pohyblivých částí součástí brzdového okruhu;
- Mísitelnost se srovnatelnými brzdovými kapalinami;
- Vysoká čistota kapaliny;
- Konzervační schopnosti;
- Při změně tlaku nesmí pěnit.[3]

Při míchání a výměně brzdové kapaliny je třeba dodržovat předpisy stanovené výrobcem vozidla, popřípadě předpisy stanovené výrobcem brzdové soustavy. Pro jasné základní rozlišení brzdových kapalin dle bodu varu se používají normy DOT.

Vhodnou volbou brzdové kapaliny lze zabránit jejímu přehřátí, dosažení bodu varu a tím pádem vytvoření bublinek páry, které jsou na rozdíl od kapaliny stlačitelné. Základní složkou brzdové kapaliny jsou glykoly a polyglykoly, přesné složení si každý výrobce tají jako výrobní tajemství. Brzdová kapalina je hydrokopická a tzn. pohlcuje vodu. Čím vyšší je obsah vody v kapalině, tím nižší je bod varu kapaliny. Proto u této kapaliny rozlišujeme dva body varu a to tzv. mokrý a tzv. suchý bod varu. [1, 3]

Už od nízkých % obsahu vody v brzdové kapalině výrazně klesá bod varu řádově o desítky stupňů °C. Proto se nesmí zejména u závodních vozů podcenit častý a důsledný servis.

Zvýšené pozornosti se musí dbát při výběru brzdové kapaliny, pokud je vozidlo vybaveno systémem ABS a to z toho důvodu, aby měla kapalina optimální viskozitu pro protékání elektromagnetickými ventily, jak při nízkých, tak při vysokých teplotách. Některé kapaliny určené pro hydraulické okruhy vybavené systémem ABS nemusí být vhodné pro použití pro systémy bez ABS, neboť odlišné výrobní tolerance mohou v kombinaci s viskoznější kapalinou způsobit úniky nebo lekáže kapaliny ven ze systému.

Při práci s brzdovou kapalinou se doporučuje určitá opatrnost, neboť je vysoce jedovatá a působí agresivně na laky a rozpouštědla.[3]

### 3.3 Soutěž Formule Student

#### 3.3.1.1 Definice soutěže Formule student

Formule student je mezinárodní inženýrská soutěž určená převážně pro studenty technických vysokých škol a univerzit. Soutěž vznikla v roce 1981 v USA za účelem zlepšení zapojení studentů do praxe v oboru zábavnou formou. V soutěži panuje velmi silná konkurence, protože mezi sebou soutěží celosvětově přes 500 univerzitních týmů. Úkolem soutěže je navrhnout, vyrobit a otestovat monopost dle platných pravidel Formule Student ve fiktivní edici 1000 ks. Nádhlele demonstrovat jeho schopnosti na světových závodních tratích.

Formule student na Technické fakultě ČZU vychovává od svého vzniku v roce 2011 několik desítek odborníků. Aktuální členové jsou zobrazeni na následující fotografii.



Obrázek 20 Tým CULS Prague Formula Racing [Archiv týmu CULS Prague Formula Racing]

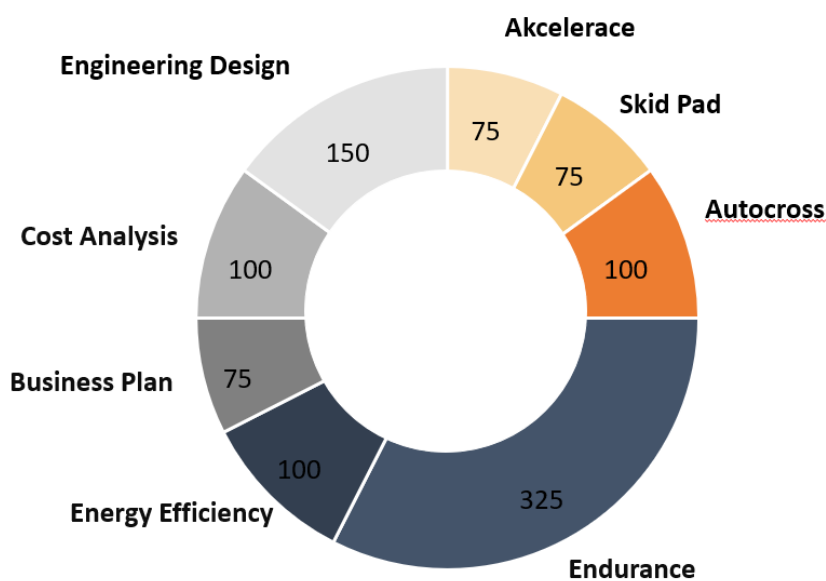
Projekt Formule student produkuje velmi kvalitní mladé inženýry, techniky a manažery, čehož si jsou vědomi partneři a sponzoři týmu ze soukromého sektoru, kteří investují do týmu nemalou finanční, materiální a vědomostní podporu ve snaze získat alespoň jednoho absolventa tohoto projektu. Tým CULS Prague Formula Racing není výjimkou. Silnou podporu a kvalitní zázemí týmu dlouhodobě poskytuje hlavně Technická Fakulta a Česká zemědělská univerzita.

Na závodech se týmy účastní jak statických, tak i dynamických disciplín, kde postupně získávají body, které se nakonec sečtou a stanoví se celkové pořadí. Studentské týmy mohou soutěžit v následujících kategoriích:

- Driverless – Monoposty jezdící bez řidiče;
- Combustion vehicles – Monoposty se spalovacím agregátem;
- Hybrid Vehicles – Monoposty kombinující spalovací agregát a elektrický motor;
- Electric vehicles – Monoposty poháněné čistě na elektrickém pohonem. [5]

### 3.3.2 Disciplíny soutěže formule student

Jak už bylo zmíněno výše, soutěž kombinuje statické a dynamické disciplíny, které mají různý charakter a dohromady velmi důkladně prověří připravenost a úroveň jak samotného monopostu, tak celého týmu. V následujícím grafu jsou přehledně zobrazeny jednotlivé disciplíny i s bodovým hodnocením.



Obrázek 21 Disciplíny soutěže Formule Student [Archiv týmu CULS Prague Formula Racing]

### 3.3.2.1 Statické disciplíny

Statické disciplíny jsou souborem prezentací, které umožňují, aby si odborní porotci udělali představu o úrovni týmu v oblastech detailněji probraných níže a mohli pak tým bodově ohodnotit. V této statické části soutěže monopost nejedí po závodním okruhu, ale slouží ke statické ukázce při týmových prezentacích. Ve statických disciplínách lze získat až 37,5 % bodů z celkového počtu 1000 bodů. [6]

#### 3.3.2.1.1 Engineering design report

V této disciplíně členové týmu prezentují a obhajují technická řešení svého vozu. Techničtí komisaři hodnotí technickou úroveň monopostu a důsledně zjišťují, zda jeho tvůrci rozumí dané problematice. Tým zde předkládá dokumenty obsahující výpočty, simulace, validace a výkresy monopostu.

#### 3.3.2.1.2 Cost Report

V této disciplíně se odborná komise věnuje hodnocení nákladové stránky monopostu. Tým musí do posledního detailu komplexně zpracovat seznam všech dílů na celém monopostu a to často včetně jejich způsobu výroby a sestavení. Jedná se se v podstatě o kusovník. Při prezentaci odborné komisi je vybrána jedna konkrétní sestava a požaduje se velmi detailní nacenění každé operace, každého dílu a nacenění každé operace, která souvisí s daným dílem.

#### 3.3.2.1.3 Bussines report

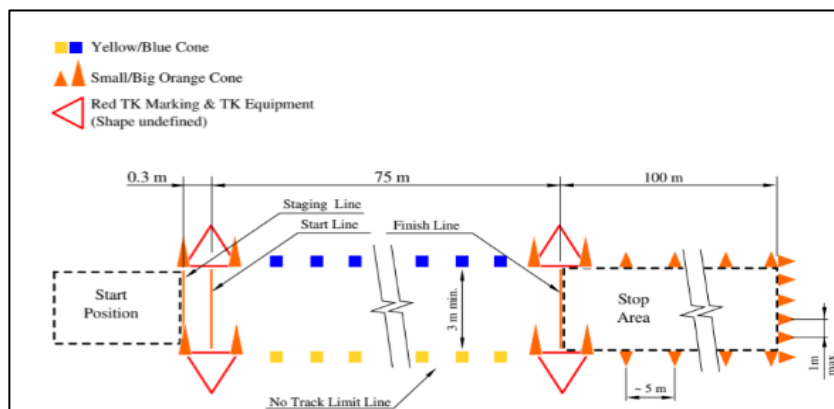
Tato disciplína se věnuje bussines plánu projektu. Před odbornou komisí se prezentuje fiktivní bussines koncept, kde tým prezentuje, komu bude monopost určen, jak oslovit potenciální zákazníky, jak uspět na trhu mezi konkurencí a mnoho dalších aspektů. Důležitá je originalita bussines nápadu, kvalita zpracování nápadu a špičková úroveň prezentace.

### 3.3.2.2 Dynamické disciplíny

V této části soutěže se monopost pohybuje po vyznačené části závodního okruhu, kde je vytvořena závodní trať dle pravidel Formule Student. Podoba některých disciplín se pro jednotlivé kategorie formule může lišit. Níže zmíněné disciplíny se týkají kategorie Combution Vehicles.

### 3.3.2.2.1 Akceleration

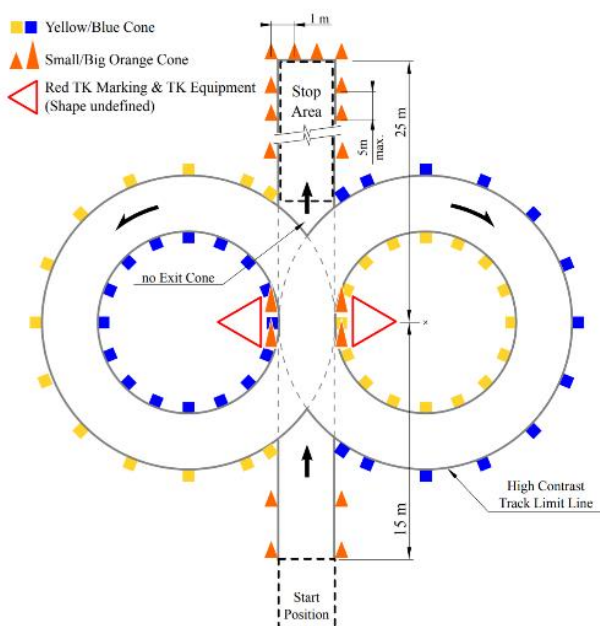
Tato nejkratší disciplína prověřuje dynamické schopnosti monopostu v přímce dráze. Řidič monopostu má za úkol co nejrychleji projet rovnou dráhu o délce 75 m. Trať má pevný start. Project trať netrvá většině monopostů déle než 5 s. Aby byl monopost úspěšný v této disciplíně, musí mít vysoký výkon, optimálně rozloženou hmotnost pro akceleraci a vysokou adhezi zejména na poháněné nápravě.



Obrázek 22 Schéma disciplíny akceleration [Archiv týmu CULS Prague Formula Racing]

### 3.3.2.2.2 Skidpad

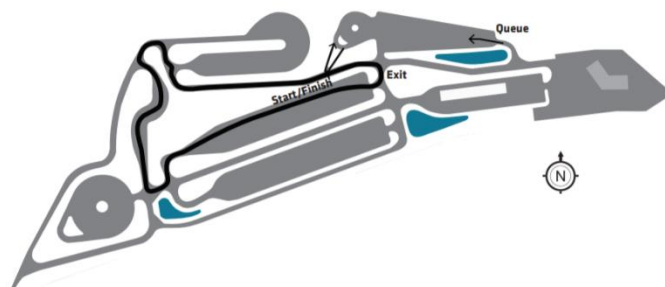
Trať na disciplínu skidpad se skládá ze dvou kružnic. Monopost nejdříve absolvuje dvě pravotočivá kola a posléze dvě levotočivá kola. Započítává se vždy průměrný čas druhých kol. Aby monopost dosáhl co nejlepšího výsledku, musí mít vysokou adhezi, správně naladěné odpružení, nízké těžiště, nízkou hmotnost, funkční aerodynamiku již od nízkých rychlostí, optimálně naladěný samosvorný diferenciál a kinematiku náprav.



Obrázek 23 Schéma disciplíny Skidpad [Archiv týmu CULS Prague Formula Racing]

### 3.3.2.2.3 Autocross

Autocross je trať od délce přibližně jednoho kilometru s charakterem podobným hlavnímu závodu Endurance. Jeden pilot jede dvakrát jedno kolo a výsledný čas má vliv na startovní pozici při následujícím vytrvalostním závodě Endurance. Co nejrychlejší čas na trati bude mít monopost, který je komplexně naladěný na tento typ trati a podmínky během závodu.



Obrázek 24 Příklad trati disciplíny autocross [Archiv týmu CULS Prague Formula Racing]

### 3.3.2.2.4 Endurance

Tato nejobtížnější a nejvíce bodovaná disciplína má charakter vytrvalostního závodu o délce celkem 22 km. Cílem je projet trať v co možná nejkratším čase. V polovině závodu se během časově omezeného úseku mění piloti. Stejně jako všechny ostatní disciplíny, tak i závod Endurance se účastní neprofesionální piloti, proto střídání pilotů je zde hlavně z důvodu bezpečnosti neboť rychlá jízda v monopostu je velmi fyzicky a psychicky náročná. Neméně náročná je tato soutěž i pro samotný monopost. Je zde běžnou praxí, že až 40 % monopostů během závodu má kritickou závadu, nebo závod nedokončí vůbec. Monopost musí mít pro co nejlepší výsledky v této soutěži podobné vlastnosti jako v soutěži Autocross, ale navíc musí prokázat hlavně spolehlivost všech komponent.

### 3.3.2.2.5 Efficiecy

Tato disciplína může do celkového bodového hodnocení přinést až 100 bodů. Na rozdíl od ostatních dynamických disciplín v ní nejde o nejrychlejší čas ale o s potřebu paliva, respektive energie. Výsledná spotřeba se nehodnotí pouze dle množství spotřebované elektrické energie či paliva, ale je zde přepočten pomocí vzorce, kde se započítává i celkový čas dosažený na trati. Pro hodnocení této disciplíny se používají vzorce:

$$\text{Počet bodů} = 100 \times \left( \frac{\frac{E_{\min}}{E_{\text{team}}} - 1}{\frac{E_{\min}}{E_{\max}}} - 1 \right) \quad (1)$$

$$E = \frac{T_{\min} \times V_{\min}}{T_{\text{team}} \times V_{\text{team}}} \quad (2)$$

### 3.3.3 Pravidla soutěže Formule Student

Pravidla v soutěži Formula Student se zaměřují především na bezpečnost a omezují možnost vzniku nebezpečných situací nebo zranění. Bezpečně pravidly vymezený prostor však ponechává dostatek místa pro kreativitu. Přesto pravidla do určité míry určují, jak budou monoposty vypadat. V následujícím textu jsou proto probrána základní pravidla a pravidla týkající se především brzdového systému.

### 3.3.4 Základní obecná pravidla pro stavbu monopostu Formule Student

Pravidla vymezují některé základní rozměry. Mezi tyto rozměry patří například následující hodnoty. Je stanovený minimální rozvor náprav 1525 mm a minimální světlá výška vozidla, která činí 30 mm. Monopost musí mít funkční odpružení s chodem tlumičů minimálně 50 mm. Ostatní důležité rozměry jsou také definovány a odvíjí se především od rozvoru náprav. Pravidla také omezují spalovací motor, neboť je zdrojem energie pro pohyb monopostu a je třeba udržet jeho výkon z hlediska bezpečnosti ve zvládnutelných mezích. Motor musí mít maximální zdvihový objem 710 cm<sup>3</sup>, množství vzduchu nasávaného do motoru, a tím pádem jeho výkon, je omezen restriktorem s průměrem buď 20 mm pro předepsané palivo RON 98, a nebo 19 mm pro alternativní palivo E85. Čtyřtákní motor musí obsahovat písty vykonávající přímočarý vratný pohyb. Maximální rychlost je omezená především samotnou tratí, která se staví podle určitých pravidel a nedovolí monopostům překročit rychlost cca 120 km/h. Nejdelší rovinka nesmí mít délku více než 80 m. Nemá tedy příliš smysl stavět monopost na vyšší rychlosti, než které je schopen na závodní trati dosáhnout. Tratě formule student jsou stavěny na uzavřených plochách především s ohledem na bezpečnost.[6]

### 3.3.5 Pravidla brzdového systému

Tratě formule student jsou technického charakteru a na tento fakt musí být připraven i brzdový systém, který musí splňovat následující pravidla:

- Vozidlo musí být vybaveno hydraulickým brzdovým systémem, který působí na všechna čtyři kola a ovládá se jediným pedálem.
- Brzdový systém musí mít dva nezávislé hydraulické okruhy, aby v případě netěsnosti nebo poruchy v kterémkoli bodě systému, byla zachována účinná brzdná síla alespoň na dvou kolech.

- Každý hydraulický okruh musí mít vlastní nádobku s brzdovou kapalinou.
- Je možné mít jedinou brzdu působící na diferenciál s omezenou svorností.
- Systémy „Brake-by-wire“ jsou zakázány.
- Nepancéřovaná plastová brzdová vedení jsou zakázána.
- Brzdový systém musí být chráněn před selháním hnacího ústrojí, před dotykem jakékoli pohyblivé části a před drobnými kolizemi s okolím.
- V bočním pohledu se jakákoliv část brzdového systému, která je namontována na odpružené části vozidla, nesmí nacházet pod spodní plochou podvozku.
- Brzdový pedál a jeho upevnění musí být navrženy tak, aby vydržely sílu 2 kN bez jakékoli známky poruchy brzdového systému nebo pedálové skříně. To lze vyzkoušet stisknutím pedálu pomocí maximální síly, kterou může vyvinout jakýkoli technický komisař, sedící ve voze v normální pozici.
- Brzdový pedál musí být vyroben ze slitiny hliníku, oceli, nebo titanu
- Systém musí být vybaven brzdovým světlem.

Testování správné funkce brzdového systému na technických přejímkách:

- Brzdový systém je dynamicky testován před každým závodem a musí prokázat schopnost zablokování všech čtyř kol najednou při brždění vozidla v přímé dráze stanovené technickými komisaři. Vozidlo musí při brzděném manévru držet směr, nestáčet se a neopouštět jízdní stopu.
- Vozidlo musí být vybaveno jedním brzdovým světlem, které svítí pouze tehdy, když je aktivován hydraulický brzdový systém.[6]

Brzdové světlo musí splňovat následující požadavky:

- Červené světlo s černým pozadím.
- Brzdové světlo musí mít obdélníkový, trojúhelníkový nebo téměř kulatý tvar.
- Minimální osvětlená plocha je 15 cm<sup>2</sup> s rovnoměrnou intenzitou světla.
- Brzdové světlo musí být vidět zezadu i při velmi jasném slunečním světle.
- Pokud jsou LED světla použita jinde než na difuzoru, nesmí být od sebe vzdálena více než 20 mm.
- Při použití jedné řady LED diod je její minimální délka 150 mm.
- Při bočním pohledu musí být brzdové světlo orientováno svisle nebo téměř svisle a musí být namontováno mezi koly vozidla ve středové ose vozu a ramen řidiče. [6]



### 3.4 Základní požadavky na závodní monopost

Závody monopostů mohou mít mnoho podob od rychlých sprintů po vytrvalostní podniky, kde se závodní piloti snaží dosáhnout cíle, kterým je projet danou trať nebo její část, v co nejkratším čase. Tento cíl je společný pro naprostou většinu disciplín a výjimkou není ani soutěž Formule student. Pro dosažení co nejlepších výsledků se konstruktéři musí snažit o zlepšení klíčových aspektů závodního monopostu:[2]

#### 3.4.1 Nízká hmotnost konstrukce

Díky nízké hmotnosti bude monopost nejen lépe akcelarovat, decelerovat a měnit směr jízdy ale také dojde ke snížení jízdních odporů. Nízká hmotnost a celkově lehká konstrukce je jedním z nejdůležitějších konstrukčních parametrů při stavbě závodního monopostu, neboť má dopad na design všech klíčových komponent. Vozidlo s nižší hmotností nepotřebuje pro svoje zrychlení velký a těžký motor, který by měl také větší spotřebu paliva a potřeboval by více chladícího výkonu, což by ve většině případů znamenalo vyšší odpor vzduchu. Vozidlo o nízké hmotnosti může být vybaveno menšími pneumatikami a brzdami, méně masivním chassis a podvozkovými díly. Aby se plně využil potenciál závodního vozu, mají jeho komponenty často omezenou životnost. Životnost těchto komponent zpravidla končí na konci závodní sezony, nebo i dříve.[2]



Obrázek 25 Závodní pneumatika AVON A92 na monopostu FS06 [Archiv týmu CULS Prague Formula Racing]

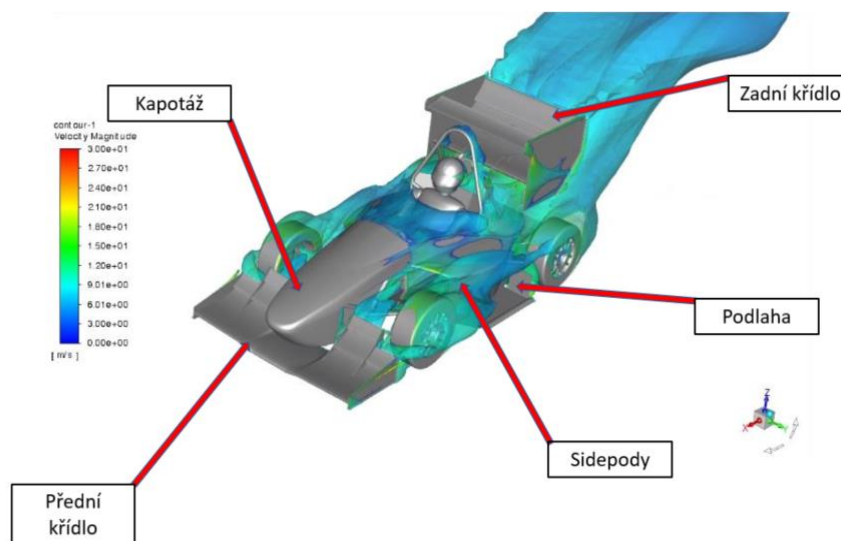
#### 3.4.2 Přílnavost pneumatik

Jedním z důvodů, proč závodní automobily podávají na závodní trati oproti běžným vozům mnohem vyšší výkony je větší úroveň přílnavosti mezi pneumatikou a vozovkou. Závodní pneumatiky se svou konstrukcí a účelem výrazně liší od pneumatik dostupných pro běžný

provoz. Pneumatiky používané týmem CULS Praue Formula Racing jsou viditelné na obrázku č. 25. Míra přilnavosti limituje velikosti sil, které lze přenést mezi pneumatikou a povrchem vozovky. Konstruktéři se snaží dosáhnout co nejlepšího kontaktu pneumatiky s vozovkou, aby byla zajištěná maximální možná míra mechanické přilnavosti (gripu). Přilnavost lze do určitého bodu ještě zvýšit vertikálním zatížením pneumatiky, které lze vytvořit pomocí přitlaku od aerodynamických zařízení nebo přesunem hmotnosti (zatížení) vozu. [2]

### 3.4.3 Aerodynamika

Aerodynamika je složité a rozsáhlé téma, kterému týmy Formule student věnují nemalou pozornost. Důraz je kladen zejména na efektivní tvorbu přitlaku, který umožňuje vytvoření normálové síly působící na kola monopostu za účelem zvýšení trakce vozidla, ale bez přidání další hmotnosti. Celkovým cílem je maximalizovat přitlak bez vytváření zbytečně velkého množství odporu vzduchu působícího proti směru jízdy vozidla. Aerodynamické síly narůstají s druhou mocninou rychlosti monopostu, a proto je velmi důležité zajistit optimální vyvážení těchto sil tak, aby nedocházelo i při měnící se rychlosti k nedotáčivosti či přetáčivosti monopostu. Jízdní vlastnosti by měly zůstat vyvážené při všech rychlostech, kterých monopost dosahuje. Mezi hlavní oblasti optimalizace proudění vzduchu kolem monopostu patří přední a zadní křídlo, podlaha vozu, oblast kolem kol vozidla a části kapotáže. Na obrázku č. 26 je možné vidět simulaci proudění kolem monopostu FS06.[2]



Obrázek 26 Popis aerodynamických prvků [Archiv týmu CULS Prague Formula Racing]

Některé aerodynamické prvky mohou být použity na zlepšení brzdného účinku za pomoci záměrného zvýšení odporu vzduchu. Tzv. aerodynamické brzdy se vyplatí pro rychlosti nad 100 km/h, kde jsou velmi efektivní. Monoposty v soutěži Formule student se pohybují po trati rychlostí, která dramaticky nepřekračuje 100 km/h a proto se tyto aerodynamické brzdy používají jen velmi zřídka. Častěji, než aerodynamických brzd je využíváno systému DRS (z AJ Drag Reduction System), který má za úkol v případech, kde není potřeba využívat přítlaku, snížit odpor vzduchu pomocí aktivních aerodynamických prvků a zlepšit tak akceleraci monopostu.

#### 3.4.4 Výkon brzdového systému korespondující s výkonem motoru a hmotností monopostu

Neméně důležitým elementem pro úspěšný závodní monopost je dostatečná výkonná pohonná jednotka. Způsobů, jak vytvořit výkonnou pohonnou jednotku je více, ale všechny koncepty mají společný cíl. Cílem je co nejrychleji urychlit závodní vozidlo na co nejvyšší rychlost. Koncept pohonné jednotky musí zapadat do celkového konceptu monopostu. Důležitými faktory pro výběr pohonné jednotky ve Formuli student je specifický výkon, průběh a hodnoty výkonu a točivého momentu, rozměry pohonné jednotky, měrná spotřeba paliva a spolehlivost.

S výkonem pohonné jednotky a hmotností monopostu musí úměrně stoupat také výkon brzdové soustavy, aby nedošlo k selhání brzdového systému a monopost byl bezpečný i v náročných provozních podmínkách. Výkon brzdového systému je limitován dle následujících faktorů:

- Síla od pilota – Pilot závodního monopostu má omezenou sílu, kterou dokáže vyvíjet na brzdový pedál. Síla od pilota je limitem ve chvíli, kdy ovládací síla potřebná pro maximální zpomalení překračuje sílu, kterou je schopen vyvinout, což znamená že monopost dokáže zpomalit intenzivněji ale pilot toho nedokáže využít. Z toho důvodu je třeba pilotovi přizpůsobit brzdový systém tak, aby dokázal bez obtíží zablokovat všechna kola monopostu a využil tak maximálního potenciálu brzdného systému.
- Teplotní limit – Kolové brzdy nezvládnou absorbovat nepřetržitě plný výkon motoru bez toho, aniž by mezi zabrzděními byl časový úsek, kde mohou chladnout. Pokud

je dosažen teplotní limit brzd, dochází k zvýšenému opotřebení a vadnutí brzdového účinku. Zároveň se může brzdová kapalina dostat do bodu varu, kdy varem vytvořené bublinky páry zapříčiní další propadání brzdového pedálu a slábnutí brzdového účinku. V krajním případě může dojít až k fatálnímu selhání. Aby se tomu zabránilo, musí mít brzdy vhodnou tepelnou kapacitu a optimalizované chlazení, které udrží teplotu kolových brzd i v náročných podmínkách pod limitem.

- Chod brzdového pedálu – Chod brzdového pedálu limitují buď zástavbové rozměry kokpitu, což znamená, že se brzdový pedál pohybuje jen tak daleko, než se zastaví buď o stěnu kokpitu nebo se pedál zastaví z důvodu maximálního využití chodu hlavního brzdového válce
- Opotřebení – Opotřebení je proměnný faktor závislý především na provozních podmínkách, které působí na brzdový systém. Tento limitní faktor omezuje dobu provozu komponent brzdového systému po jejíž uplynutí je nutné komponenty vyměnit nebo zrepasovat. Limitní opotřebení se týká především závodů s vytrvalostním charakterem.
- Adheze mezi pneumatikou a vozovkou – Pokud je brzdový systém navržen optimálně a nedochází při jeho provozu k přehřívání, je jeho jediným limitem přilnavost mezi vozovkou a pneumatikou. Maximální možný brzdový účinek kolových brzd je dosažen při odvalování kol, těsně před tím, než se zablokují všechna čtyři kola najednou. V situaci, kdy dojde ke smýkání pneumatiky o vozovku se hodnota přenášené síly z pneumatiky na vozovku výrazně sníží, vozidlo ztrácí trakci a ovladatelnost.[2, 7]

#### 3.4.5 Základní situace jízdní dynamiky

- Akcelerace
- Decelerace
- Změna směru
- Kombinace změny směru a akcelerace nebo decelerace.[2]

Všechny tři základní prvky závodění obsahují určitou formu zrychlení. Během závodu běžně nedochází k situaci, kdy se monopost pohybuje konstantní rychlostí. V případě zatáčení se jedná o zrychlení příčné (tzv. laterální) v přímce se jedná o zrychlení podélné (tzv. longituduální). Zrychlení, respektive změna rychlosti za čas, může nabývat kladných i hodnot. Hodnoty zrychlení jsou během akcelerace vozidla zpravidla nižší než při brždění (deceleraci vozidla). Zatímco při akceleraci vozidla jsou překonávány jízdní odpory působící proti pohybu vozidla, které navíc většinou s rychlostí narůstají, při deceleraci jízdní odpory pomáhají vozidlu intenzivněji zpomalit. Jízdní odpory mohou během jízdy narůst do takových hodnot, že se vozidlo dostane do bodu, kdy už není schopno dále akcelarovat, neboť výkon motoru vozidla nedokáže tyto jízdní odpory překonat. Aby vozidlo zrychlilo nebo změnilo směr, musí na něj působit síla, která ho donutí tuto změnu udělat.

Působíště většiny těchto sil, které mají vliv zrychlení, respektive zpomalení a na změnu směru leží v rozhraní mezi pneumatikami a vozovkou. Funkční plocha, kde se dotýká pneumatika s vozovkou, nazýváme kontaktní plocha pneumatik. Schopnost vozidla akcelarovat popřípadě decelerovat a měnit směr závisí především na velikosti adhezní síly vyvinuté mezi vozovkou a pneumatikou. Tato síla se běžně označuje jako trakce nebo přilnavost.[2]

Adhezní síla se vypočítá jako:

$$F_a = F_N \cdot \mu \quad (3)$$

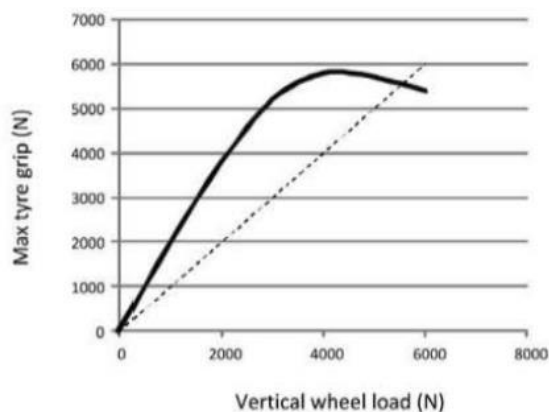
Kde:

$F_a$  je adhezní síla [N],

$F_N$  je normálová síla [N] a  $\mu$  je bezrozměrný koeficient adheze

Konstruktéři se snaží o optimální kontakt pneumatiky s vozovkou a o maximalizaci přilnavosti, jejíž velikost je značným limitujícím faktorem pro změnu rychlosti a směru vozidla. Velikost adhezní síly mezi vozovkou a pneumatikou lze pozitivně ovlivnit

zvýšením hodnoty vertikálního zatížení pneumatiky. Toto platí pouze v určitém rozsahu zatížení, neboť může v určitém bodě dojít k přetížení pneumatiky a ke ztrátě přilnavosti.



Obrázek 27 Příklad průběhu vertikálního zatížení v závislosti na přilnavosti[2]

K tomu však u monopostů Formule student nedochází. Znalost vertikálního zatížení kol vozidla je značně důležitá pro mnoho aspektů designu závodních vozidel. Zatížení jednotlivých kol a jejich přilnavost naprosto zásadním způsobem ovlivňuje design klíčových komponent jakými jsou například podvozkové díly, brzdový systém, závěsné body podvozku, převodovka, atd..[7]

Neméně důležité je určení přesné polohy těžiště vozu. Těžiště je bod, který považujeme za střed působení tíhových sil tělesa (vozidla). Zároveň je velmi důležité znát chování těžiště, neboť se během jízdy vozidla může měnit jeho poloha například v důsledku úbytku paliva v nádrži. Konstrukteři automobilů určují rozložení hmotnosti mezi přední a zadní nápravu vozidla a výšku těžiště ve vzdálenosti od vozovky. Výška těžiště nad zemí ovlivňuje přenos zatížení mezi jednotlivými koly při brzdění, zrychlování a zatáčení. Přenos zatížení je patrný na obrázku číslo 28.



Obrázek 28 Monopost FS06 při průjezdu levotočivou zatáčkou - vitelný přenos zatížení na pravé vnější kolo [Archiv týmu CULS Prague Formula Racing]

## 4 Praktická část práce

### 4.1 Současná koncepce monopostu FS06

Koncepce šesté generace monopostu postavené na Technické fakultě České Zemědělské univerzity vychází svým základem z monopostu FS05. Velmi podobný je design prostorového trubkového rámu z materiálu 25CrMo4, kola, sedačky a jsou shodné jsou některé díly motoru. Všechny ostatní díly jsou zcela přepracované a nový monopost je v mnoha ohledech v rámci týmu CULS Prague Formula Racing revoluční. Motor monopostu FS06 se výrazně liší od seriového provedení. Motor vybaven suchou olejovou skříní, elektrickým čerpadlem vodního chladicího okruhu, restriktorem a sáním vlastní konstrukce, hlavou válců s zaleštěnými kanály, nerezovým výfukovým systémem, dvojitým vstřikováním paliva, ohlehčeným blokem motoru. Motor není vybaven alternátorem, všechny systémy běží na napětí z akumulátoru po celou dobu závodu. Byl kladen důraz na snížení rotačních hmot monopostu. Tomu odpovídá design poloos, nábojů kol, disků kol, setrvačníku motoru, řetězového pohonu a převodovky. Řazení je realizováno elektrickým servomotorem. Konstrukce podvozku je optimalizovaná pro optimální kontakt pneumatiky s vozovkou. Ergonomie byla zlepšena posunou pedálovou skupinou. Aerodynamika byla zcela přepracována za účelem získání maximální hodnoty přitlaku a minimální hodnoty odporu vzduchu. Hlavní technické údaje lze vyčíst z následující tabulky:

Tabulka 1 Hodnoty monopostu FS06 [8]

Motor	Triumph 675
Popis motoru	Tříválcový čtyřdobý vodou chlazený motor, mázání se suchou skříní.
Výkon motoru	Cca 69kW v 10 500 ot./min.
Hmotnost připravená k jízdě	225 kg
Výška těžiště	170 mm
Rozložení hmotnosti	51% přední náprava /49 % zadní náprava
Rám	Prostorový trubkový
Materiál rámu	25CrMo4
Hmotnost rámu	38,5 kg
Rozvor	1560 mm
Rozchod, přední náprava / zadní náprava	1230 mm/1210 mm
Pneumatiky	AVON 14254S

Rozměr pneumatik $\varnothing$ disku, $\varnothing$ vnější, šířka	13“, 20“, 7,2“
Přítlak aerodynamiky	350N v 55km/h, 950N v 100km/h
Přední brzdové kotouče	Plovoucí kotouče $\varnothing$ 230 mm
Zadní brzdové kotouče	Pevné kotouče $\varnothing$ 200 mm
Přední brzdiče	Monoblokové brzdiče ISR - 4 pístky
Zadní brzdiče	Monoblokové brzdiče ISR - 2 pístky
Řídicí jednotka	Ignitech
Spotřeba paliva RON 98	17.5 l/100 km
Baterie / Kapacita baterie	Li-ion 18,2A/h

Reálný vzhled monopostu při jízdě znázorňuje následující fotografie pořízená na Dni s formulí v roce 2021.



Obrázek 29 Monopost FS06 při jízdě kampusem ČZU [Archiv týmu CULS Prague Formula Racing]

## 4.2 Budoucí koncepce monopostu FS07

Monopost FS 07 svojí koncepcí navazuje na úspěšný monopost FS 06, ponechává si jeho výhody a zdokonaluje jeho největší nedostatky. Tento budoucí koncept zatím existuje pouze ve virtuální realitě v podobě funkčního CAD modelu. Designový koncept je k vidění na obrázku. číslo.30.

Mezi oblasti, které si vyžádaly výšnou pozornost při vývoji oproti monopostu FS 06 patří aerodynamika, nastavení podvozku, rám, řízení, řazení a také brzdový systém. Tým CULS Prague Formula Racing se opět zaměřil při vývoji na jednoduchá, ale promyšlená technická řešení s důrazem na snížení hmotnosti a zvýšení spolehlivosti. Vůz FS07 přebírá některé osvědčené díly z vozu FS06, proto se rozdíly mezi vozy nemusí zdát značné, nicméně vůz FS07 by měl mnohem lépe fungovat jako celek bez nedostatků, které snižují jeho celkový výkon a kvalitu. Důležité technické údaje monopostu FS07 jsou uvedeny v následující tabulce.



Tabulka 2 technické údaje monopostu FS07[8]

Motor	Triumph 675
Popis motoru	Tříválcový čtyřdobý vodou chlazený motor, mázání se suchou skříní.
Výkon motoru	Cca 69kW v 10 500 ot./min.
Hmotnost připravená k jízdě	210 kg
Výška těžiště	165 mm
Rozložení hmotnosti	49% přední náprava /51 % zadní náprava
Rám	Prostorový trubkový
Materiál rámu	25CrMo4
Hmotnost rámu	28 kg
Rozvor	1560 mm
Rozchod, přední náprava / zadní náprava	1220 mm/1220 mm
Pneumatiky	AVON 14254S
Rozměr pneumatik $\varnothing$ disku, $\varnothing$ vnější, šířka	13“, 20“, 7,2“
Přítlak aerodynamiky	420N v 55km/h, 1050N v 100km/h
Přední brzdové kotouče	Plovoucí kotouče $\varnothing$ 230 mm
Zadní brzdové kotouče	Pevné kotouče $\varnothing$ 200 mm
Přední brzdiče	Monoblokové brzdiče ISR - 4 pístky
Zadní brzdiče	Monoblokové brzdiče ISR - 2 pístky
Řídicí jednotka	Ignitech
Spotřeba paliva RON 98	17.5 l/100 km
Baterie / Kapacita baterie	Li-ion 20 A/h



Obrázek 30 Koncept monopostu FS07 [Archiv týmu CULS Prague Formula Racing]

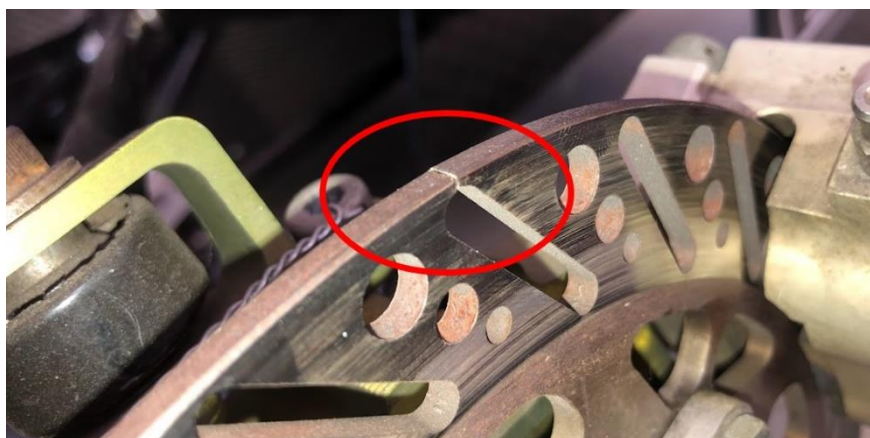
### 4.3 Rozbor a zhodnocení brzdového systému monopostů FS 05 a FS 06

Rozbor nedostatků a chyb brzdových systémů předchozích monopostů je důležitý pro vylepšení nového brzdového systému budoucího monopostu FS07. Monoposty FS05 a FS06 mají většinu komponent rozdílných, sdílí však základní koncept a samozřejmě oba vyhovují pravidlům formule student v roce, kdy se účastnili mezinárodních závodů. Brzdové systémy obou minulých monopostů mají svoje specifické nedostatky. Tyto nedostatky budou probrány v následujících kapitolách.

#### 4.3.1 Rozbor systému FS05

Tento monopost lze označit na poměrně úspěšný a spolehlivý, nicméně na brzdovém systému se objevilo několik závažných nedostatků, které budou eliminovány v novém návrhu. Mezi hlavní nedostatky patřily nevhodně navržené brzdové kotouče z nerezové oceli. Na všech kolech byly použity pevné kotouče s axiálně vypálenými otvory pro odlehčení, lepší odvod nečistot a chlazení. Vzor vypálených otvorů bohužel nebyl rozmístěn optimálně a docházelo ke koncentraci napětí. Navíc díky konstrukci pevného kotouče, se napětí vzniklé v oblasti dotyku brzdových destiček s kotoučem, nemělo kam uvolnit a došlo ke zkroucení zejména předních kotoučů. Na odolnosti kotoučů se také podepsal fakt, že byly v minulosti už použity na monopostech FS04 a FS03 a byly tím pádem již před začátkem závodní sezony monopostu FS05 opotřebené. Zkroucené kotouče neposkytovaly dle pilotů dobrou zpětnou vazbu. Během závodu došlo opakovaně k přehřátí předních brzdových kotoučů, vadnutí brzdového účinku a propadání brzdového pedálu vlivem bublinek páry vzniklé varem brzdové kapaliny. Brzdový pedál se začal propadat do takové míry, že bezprostředně hrozilo sepnutí bezpečnostního spínače přerušujícího napájení monopostu elektrickým proudem a tím pádem diskvalifikaci. Pevné kotouče také umožňovaly snadný přenos tepla do náboje a následně do ložisek, což se negativně podepsalo na jejich životnosti. Brzdové kotouče na přední nápravě vlivem značného tepelného a mechanického namáhání

nakonec popraskaly a při dalším provozu by mohla hrozit nebezpečná nehoda. Prasklina je viditelná na obrázku č 31.



Obrázek 31 Prasklý brzdový kotouč monopostu FS05 [Archiv autora]

Pokud by došlo k dalšímu poškození, kdy by v jeho důsledku při jízdě došlo k nečekanému zablokování některého z kol, hrozí nebezpečí nejen pilotovi, ale i okolním pozorovatelům.

Mezi další nedostatky patřila nenastavitelná pedálová skupina, která se nedala nijak přizpůsobit různým pilotům. Pedálová skupina, měla stejně jako běžný osobní automobil vybavený manuální převodovkou, sestavu tří pedálů tzn. pedály plynu, spojky, a brzdy. Výhodou tohoto řešení bylo, rychlé navyknutí nezkušených pilotů na systém ovládání monopostu, který byl podobný, jaký už znali z běžného osobního vozu. Po většinu doby měl však pilot nepohodlně vyosené nohy, protože během závodu se používaly pouze dva ze tří pedálů. Během jízdy pilot ovládal pouze brzdový a plynový pedál, spojkový pedál používal pouze za účelem rozjezdu. Nevýhodou byla také vysoká hmotnost a prostorová náročnost pedálové skupiny o třech pedálech. Základ pedálové skupiny tvořily svařované ocelové trubky. Oblastí, které mohla být také věnována větší pozornost byly zadní brzdové třmeny. Zde byly použity zadní brzdové třmeny od společnosti Wilwood Engineering Inc., které byly prostorově náročné a měly vyšší hmotnost než výrobky konkurenčních firem. Díky větším prostorovým nárokům nebyly tyto třmeny kompatibilní s disky kol z hořčíkové slitiny firmy OZ Racing na zadní nápravě, které jsou vidět na obrázku č.32. Pro montáž musely být použity distanční podložky pro zadní kola.



Obrázek 32 Monopost FS05 s disky z hořčkové slitiny OZ Racing [Archiv autora ]

#### 4.3.2 Rozbor systému FS06

U tohoto monopostu se podařilo vyřešit řadu problémů týkajících se brzdového systému z minulých let. Největší problém brzdové soustavy FS05, který představovaly zejména přední brzdové kotouče, se podařilo odstranit použitím plovoucích kotoučů s odlišným designem a materiály. Podrobnosti týkající se návrhu a použití plovoucích kotoučů na monopostu FS07 budou probrány v kapitole volba komponent brzdového systému FS07. Nahrazena byla i pedálová skupina, nastavitelnou pedálovou skupinou, tentokrát opět se třemi pedály. Nová pedálová skupina vyřešila problém s vysokou hmotností a zlepšila ergonomii pro piloty různého vzrůstu. Byl také vyřešen problém s kompatibilitou disků z hořčkové slitiny od firmy OZ Racing a brzdiči Wilwood. Brzdiče byly nahrazeny menšími a lehčími brzdiči od společnosti ISR Brakes, které umožnili použití disků z hořčkové slitiny. Objevily se však nové a neméně závažné problémy. Týmu CULS Prague Formula Racing se po celou sezonu nedařilo správně odvzdušnit brzdový systém. Tento problém se podařilo odhalit a vyřešit až zcela na závěr sezony. Za tento problém mohla chyba při finální montáži monopostu, kdy byl použit nepatřičně dlouhý průtokový šroub na výstupech z hlavních brzdových válců. To zapříčinilo značné snížení průtoku brzdové kapaliny směrem z rezervoáru brzdové kapaliny do brzdového válce při uvolnění plynového pedálu a naopak. Podtlak v pracovním prostoru brzdového válce pak nasával místo brzdové kapaliny z rezervoáru vzduch přes těsnění z atmosféry. Systém se pak velmi brzy znovu zavzdušnil a brzdový pedál začal měkce propadat opět téměř na hranici, kde by musel zasáhnout snímač

přerušující napájení celého monopostu elektrickým proudem. Tento problém působil enormní problémy během technických přejímk, kdy tým CULS Prague Formula Racing téměř nebyl schopen splnit brake test. Blokování kol pouze jedné nápravy je patrné na obrázku č.33.

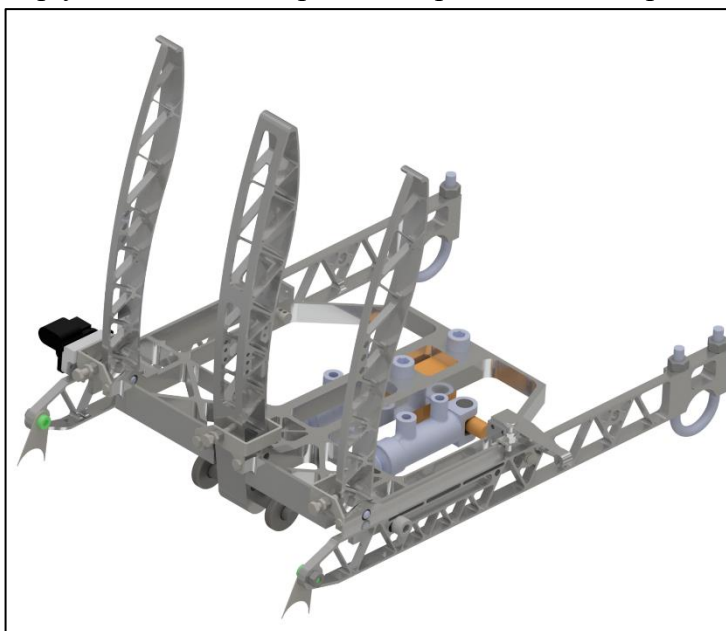


*Obrázek 33 Monopost FS06 při brake testu[8]*

Problém se podařilo nakonec zvládnout a projít tech. přejímkou. Závada však přetrvávala i nadále. Díky tomuto problému měl pilot velmi špatnou zpětnou vazbu od brzdového pedálu. Chod pedálu byl navíc nezvykle dlouhý což bylo potvrzeno různými piloty. Zavzdušněný brzdový systém představoval bezpečnostní riziko, jak pro pilota, tak pro ostatní účastníky závodů, protože kromě snížení nečitelného brzdového účinku.

Celý problém ještě zhoršovala špatná volba hlavních brzdových válců jak pro přední, tak zadní brzdový okruh. Blokování pouze přední nápravy a nedostatečně bržděná zadní náprava přispěla k problémům během technických přejímk. U nově navržené pedálové skupiny se objevily koncepční problémy. V praxi bylo zjištěno, že v omezením čase, který je vyhrazen na výměnu pilotů během disciplíny Endurance, tým nestíhá přenastavit pedálovou skupinu pro druhého pilota. Nastavovací mechanismus tak v podstatě nebyl využíván. Právě díky tomuto mechanismu, byla pedálová skupina mnohem složitější konstrukce než v případě nenastavitelné pedálové skupiny u monopostu FS05. Složitá konstrukce nastavitelné pedálové skupiny měla problémy s tuhostí svého základu, což mělo za následek potenciálně nebezpečnou situaci. Při silném sešlápnutí brzdového pedálu, se základová konstrukce deformovala a zablokovala vracení plynového pedálu. Tento zvláštní jev znovu negativně

přispíval k problémům na brake test technických přejímkách, kdy při plném brzdění pilot nevědomě přidával plyn. Pedálovou skupinu monopostu FS06 zle spatřit na obr. 34.



Obrázek 34 Pedálová skupina FS07 [Archiv týmu CULS Prague Formula Racing]

Velkou chybou bylo použití zcela nevhodných brzdových destiček z organického materiálu velmi nízké kvality. Výběru optimální směsi brzdových destiček se věnovala zcela minimální pozornost a výsledný brzdový účinek a spolehlivost tomu odpovídal.

Špatně zvolená byla i brzdová kapalina, která sice odpovídala svému použití bodem varu ale už ne viskozitou. Brzdová kapalina byla určena pro moderní vozidla, která jsou vybavena systémem ABS a tudíž mají zvýšený požadavek na viskozitu brzdové kapaliny. Brzdová kapalina pro tyto systémy má nižší viskozitu z toho důvodu, aby kapalina dobře protékala elektromagnetickými ventily a šoupátky. Monopost typu formule student však není vybaven žádným takovým systémem. Viskoznější brzdová kapalina může způsobit problémy s těsností a lekážemi v systému, protože komponenty používané v brzdovém systému monopostu Formule Student mají jiné výrobní tolerance než díly například pro bloky ventilů.

#### 4.4 Generální požadavky na brzdový systém pro monopost FS07

1. Brzdový systém monopostu FS07 musí splňovat aktuálně platná pravidla soutěže Formule student;
2. Dimenzování brzdového systému musí odpovídat náročným podmínkám provozu monopostu ve všech dynamických disciplínách Formule student;

3. Brzdový systém musí být navržen takovým způsobem, aby jej bylo možné spolehlivě ovládat silou řidiče bez další vnější síly;
4. Monopost musí být schopen stabilně spolehlivě brzdit s maximálním možným zpomalením;
5. Nový návrh musí odstranit nedostatky zjištěné při analýze brzdových systémů monopostu FS05 a FS06;
6. Konstrukce nového brzdového systému musí umožnit nastavení brzdného účinku na přední a zadní nápravě;
7. Při vývoji a výrobě použít maximálně možné množství běžně dostupných komponent;
8. Komponenty určené pro výrobu optimalizovat s ohledem na výrobní, časové a finanční možnosti týmu CULS Prague Formula Racing.;
9. Konstrukční řešení by měla pokračovat v trendu snižování hmotnosti všech komponent.;
10. Pedál spojky nebude uvažován jako součást pedálové skupiny;
11. Pedálová skupina musí zůstat nastavitelná;
12. V návrhu musí být popsána údržba brzdového systému.

#### **4.5 Návrh nového řešení brzdového systému pro monopost FS07**

Jako reakce na technické problémy u minulých monopostů je v následujících částech práce proveden výpočet a návrh nového brzdového systému určeného pro monopost

##### **4.5.1 Provozní podmínky v disciplínách Formule student**

Provozní podmínky, ve kterých se monopost pohybuje závisí na charakteru dynamické disciplíny. Jednotlivé disciplíny byly popsány v teoretické části práce. Z analýzy jízdy monopostu FS06 v nejnáročnější disciplíně Endurance na okruhu v Italském Varano De Mellegari vyplývá, že brzdový pedál byl pilotem sešlápnut 25krát. Každé zabrzdění mělo jinou intenzitu a dobu trvání. Vzhledem k tomu, že byl závod vyměřen na 23 kol, byl brzdový systém aktivován minimálně 575krát. Kolové brzdy mají jen krátké okamžiky v řádech jednotek sekund, kdy nejsou v činnosti a musí být schopny vydržet toto mechanicko tepelné namáhání během celého závodu. Během všech dynamických disciplín je brzdový systém zatížen opotřebením, nesmí dojít k limitnímu opotřebení brzdových destiček nebo



jiných součástí. Závody formule student se konají jak za dobrého počasí, kdy je povrch závodní trati suchý a teplota vzduchu ve stínu přesahuje i 35 °C, tak při dešti nebo po něm, kdy je povrch vozovky polosuchý nebo mokrý. Těmto podmínkám se musí přizpůsobit nastavení podvozku a brzd z důvodu rozdílného přesunu zatížení, které je ovlivněno sníženou trakcí pneumatik.

#### 4.5.2 Teoretický Výpočet brzdového systému

Teoretický výpočet brzdového systému je vypočítán s důrazem na maximální brzdny účinek, kterého lze s monopostem FS07 dosáhnout na suchém povrchu závodní trati. Zanedbán je vliv aerodynamických sil a rozdílné rozvážení monopostu na pravé a levé straně. Tyto vlivy by zkomplikovaly zkomplikovali výpočet. Změny způsobu přesunu hmotnosti lze částečně kompenzovat donastavením vahadla brzdnych sil pilotem při jízdě. Větší ovládací sílu na pedál potřebnou pro zablokování všech v důsledku působení přtlaku na kola monopostu řidiči pomáhá vytvořit samotné zpomalení vozu, které působí na tělo pilota. Pilot pak dokáže snadněji vytvořit vyšší ovládací sílu. Výpočty brzdového systému probíhaly v programech MathCad Professional 5.0 a MS Excel.

##### 4.5.2.1 Vstupní parametry brzdového systému:

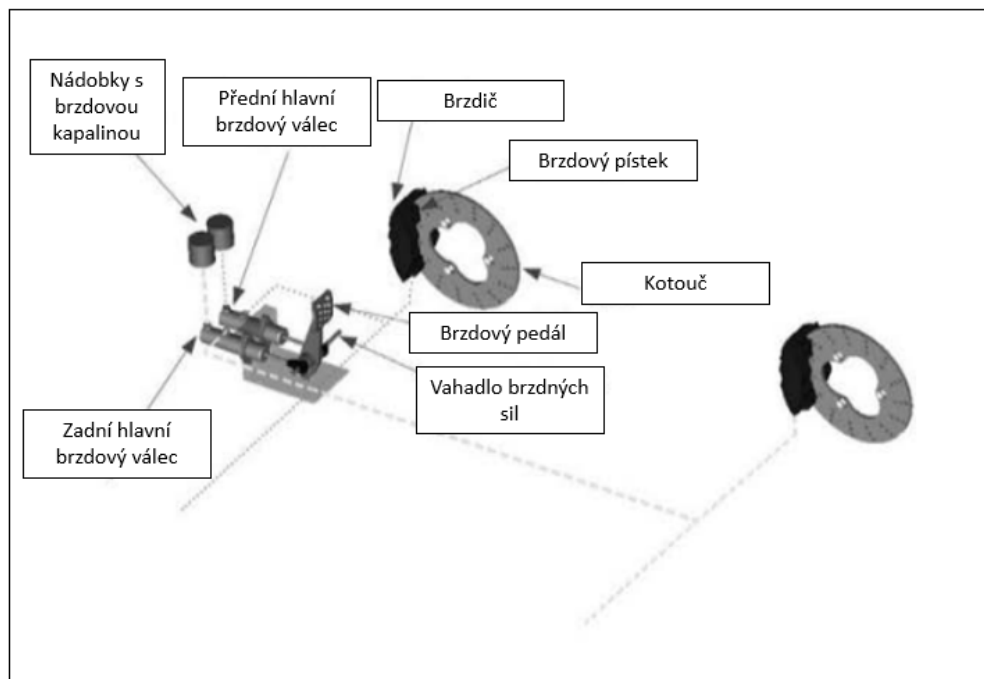
Tabulka 3 Vstupní parametry výpočtu brzdového systému

Hmotnost monopostu včetně pilota byla zvolena jako monopost o váze 210 kg + pilot o váze 85 kg + 5 kg oblečení a doplňky.	$m = 300 \text{ kg}$
Tíhové zrychlení	$g = 9,807 \frac{m}{s^2}$
Rozvor náprav vychází z geometrie podvozku	$L = 1560 \text{ m}$
Součinitel adheze mezi pneumatikou a vozovkou byl zjištěn výpočtem ze skidpadu při testování monopostu FS 05	$\mu = 1,684 [-]$
Součinitel tření mezi brzdovou destičkou a ocelovým kotoučem byl zvolen jako tabulková hodnota vyvozená z odborné literatury.	$\mu_b = 0,48$



Vzdálenost osy přední nápravy od těžiště monopostu byla zjištěna za pomoci CAD programu Solidworks, kde vznikl z 97% kompletní model monopostu FS07	$x = 811,2 \text{ mm}$
Výška těžiště vozu od povrchu vozovky byla zjištěna za pomoci CAD programu Solidworks, kde byl zpracován z 97 % kompletní model monopostu FS07	$x = 811,2 \text{ mm}$
Poloměr kola monopostu vychází ze zvolených disků OZ Racing o průměru 13" a pneumatik Avon A 92S s vnějším průměrem 20".	$r_r = 260 \text{ mm}$
Poloměr působení síly od brzdových destiček na přední brzdový kotouč vychází z velikosti předního brzdového kotouče a umístění předního brzdiče	$r_{bf} = 101,215 \text{ mm}$
Poloměr působení síly od brzdových destiček na zadní brzdový kotouč vychází z velikosti zadního brzdového kotouče a umístění zadního brzdiče	$r_{br} = 89,9 \text{ mm}$

#### 4.5.2.2 Zjednodušený model brzdové soustavy pro výpočet



Obrázek 35 Zjednodušený výpočtový model brzdové soustavy[7]

Výpočty:

Tíha vozidla

$$G = g \cdot m \quad (2)$$

$$G = 2941,995 \text{ N}$$

Statické zatížení zadní nápravy

$$WR = G \cdot xL \quad (3)$$

$$WR = 1529,837 \text{ N}$$

Statické zatížení přední nápravy

$$WF = G - Wr$$

$$WF = 1412,158 \text{ N} \quad (4)$$

Brzdná síla

$$F = G \cdot \mu \quad (5)$$

$$F = 4954,32 \text{ N}$$

Podelný přenos hmotnosti

$$\Delta W_x = \frac{(F \cdot h_m)}{L} \quad (6)$$

$$\Delta W_x = 857,478 \text{ N}$$

Vertikální zatížení předních kol

$$W_{FL} = \frac{(W_F + \Delta W_x)}{2} \quad (7)$$

$$W_{FL} = 1134,818 \text{ N}$$

Vertikální zatížení zadních kol

$$W_{RL} = \frac{(W_R - \Delta W_x)}{2} \quad (8)$$

$$W_{RL} = 336,18 \text{ N}$$

Brzdná síla předního kola

$$F_{FWBF} = W_{FL} \cdot \mu \quad (9)$$

$$F_{FWBF} = 1911,034 \text{ N}$$

Brzdná síla zadního kola

$$F_{RWBF} = W_{RL} \cdot \mu \quad (10)$$

$$F_{RWBF} = 566,126 \text{ N}$$

Brzdny moment předního kola

$$T_{bf} = F_{FWBF} \cdot r_r \quad (11)$$

$$T_{bf} = 496,869 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Brzdny moment zadního kola

$$T_{br} = F_{RWBF} \cdot r_r \quad (12)$$

$$T_{br} = 147,193 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Svěrná síla předního brzdového třmenu

$$F_{cf} = \frac{T_{bf}}{(2 \cdot r_{bf} \cdot \mu_b)} \quad (13)$$

$$F_{cf} = 5113,586 \text{ N}$$

Průměr předního brzdového pístku

$$D_{FP} = 25 \text{ mm}$$

Počet pístků v předním brzdíči

$$i_f = 4$$

Výpočet plochy pístků v předním třmenu

$$A_{pff} = \left( \frac{(\pi \cdot D_{FP}^2)}{4} \right) \cdot i_f \quad (14)$$

$$A_{pff} = 1963,495 \text{ mm}^2$$

Tak brzdové kapaliny v hydraulickém okruhu ovládající přední brzdy

$$P_{bff} = \frac{F_{cf}}{A_{pff}} \quad (15)$$

$$P_{bff} = 2,604 \text{ MPa}$$

Svěrná síla zadního brzdového třmenu

$$F_{cr} = \frac{T_{br}}{(2 \cdot r_{br} \cdot \mu_b)} \quad (16)$$

$$F_{cr} = 1705,516 \text{ N}$$

Průměr zadního brzdového pístku

$$D_{RP} = 25 \text{ mm}$$

Počet pístků v předním brzdíči

$$i_r = 2$$

Výpočet plochy pístků v zadním brzdovém třmenu

$$A_{prr} = \left( \frac{(\pi \cdot D_{RP}^2)}{4} \right) \cdot i_r \quad (17)$$

$$A_{prr} = 981,748 \text{ mm}^2$$

Tlak brzdové kapaliny v hydraulickém okruhu ovládající zadní brzdy

$$P_{br} = \frac{F_{cr}}{A_{pr}} \quad (18)$$

$$P_{br} = 1,737 \text{ MPa}$$

Průměr hlavního brzdového válce předního brzdového okruhu

$$D_{MCF} = 15,9 \text{ mm}$$

Výpočet plochy brzdového válce předního brzdového okruhu

$$A_{mf} = \left( \frac{(\pi \cdot D_{MCF}^2)}{4} \right) \quad (19)$$

$$A_{mf} = 198,557 \text{ mm}^2$$

Výpočet síly na brzdový válec předního hydraulického okruhu

$$F_f = P_{bf} \cdot A_{mf} \quad (20)$$

$$F_f = 517,106 \text{ N}$$

Průměr hlavního brzdového zadního brzdového okruhu

$$D_{MCR} = 19,1 \text{ mm}$$

Výpočet plochy brzdového válce zadního brzdového okruhu

$$A_{mr} = \left( \frac{(\pi \cdot D_{MCR}^2)}{4} \right) \quad (21)$$

$$A_{mr} = 286,521 \text{ mm}^2$$

Výpočet síly na brzdový válec zadního hydraulického okruhu

$$F_r = P_{br} \cdot A_{mr} \quad (22)$$

$$F_r = 497,751 \text{ N}$$

Celková síla na rameno rozdělující brzdny účinek

$$F_C = F_f + F_r \quad (23)$$

$$F_C = 1014,858 \text{ N}$$

Doporučená ovládací síla od pilota

$$F_{DO} = 650 \text{ N}$$

Minimální pedálový poměr

$$P_R = \frac{F_C}{F_{DO}} \quad (24)$$

$$P_R = 1,561 \text{ N}$$

Výpočet geometrie brzdového pedálu

Převod páky brzdového pedálu

$$B = 255 \text{ mm}$$

$$A = \frac{B}{P_R} \quad (25)$$

$$A = 163,323 \text{ mm}$$

Rozložení síly na pedál do směru brzdového válce

$$\alpha = 25,5^\circ$$

$$C = \sin(\alpha) \cdot A \quad (26)$$

$$C = 70,313 \text{ mm}$$

Finální vztah pro výpočet převodového poměru brzdového pedálu s šikmo uloženými brzdovými válci.

$$P_{RF} = \frac{B}{C} \quad (27)$$

$$P_{RF} = 3,627$$

Síla působící na píst jednoho hlavního brzdového válce při uvažované maximální síle na pedál 2000 N.

$$P_{PP} = \frac{P_{RF} \cdot 2000}{2} \quad (28)$$

$$P_{PP} = 3626,665 \text{ N}$$

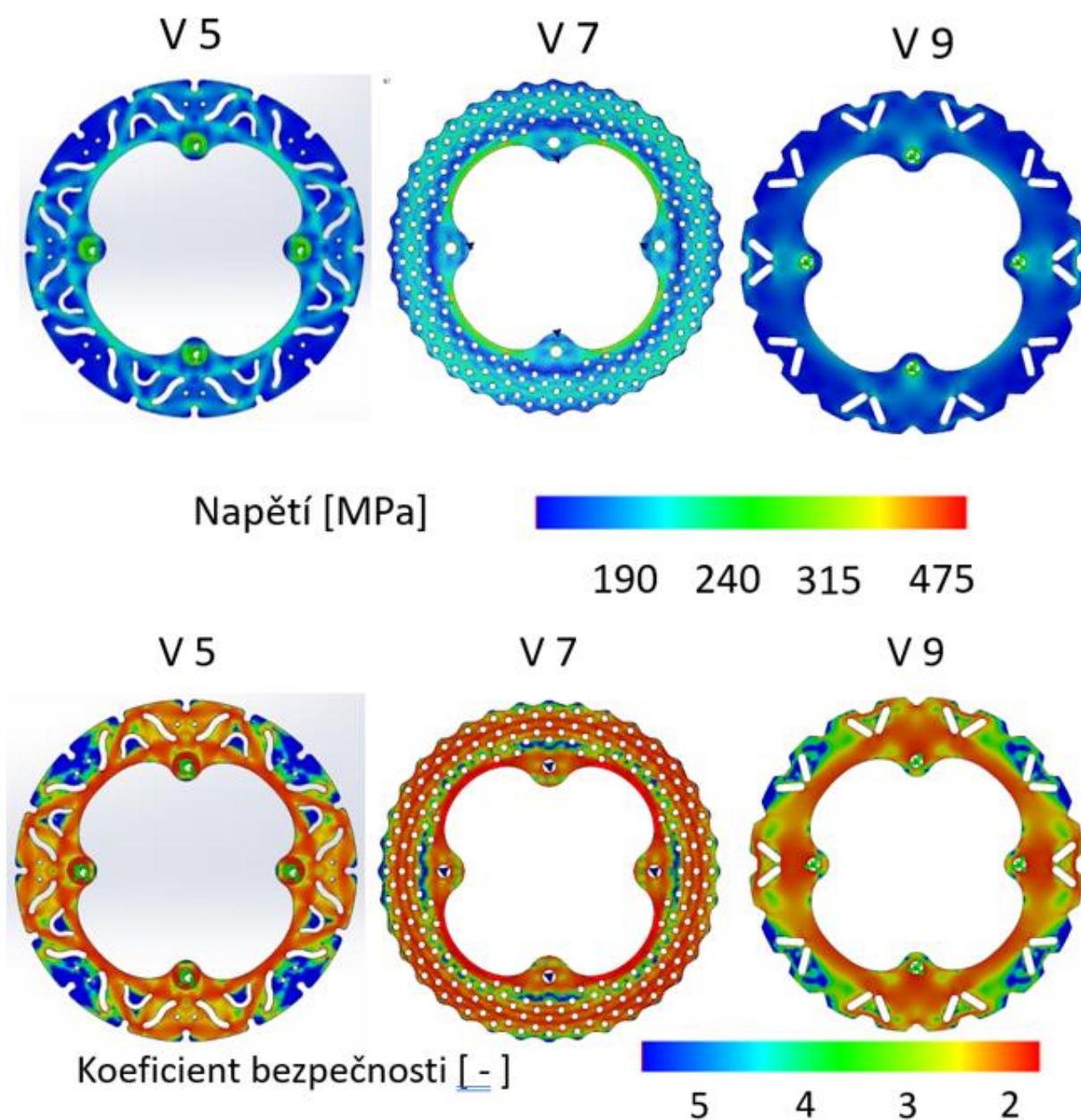
## 4.6 Návrh komponent pro monopost FS07

Návrh komponentů brzdové soustavy je založen na výpočtech, simulacích, testování, měření a dlouholetých zkušenostech týmu CULS Prague Formula Racing získaných získaných na mezinárodních okruzích.

### 4.6.1 Brzdové kotouče

Vzhledem ke značnému množství problémů s pevnými kotouči na minulých monopostech, bylo rozhodnuto u nového návrhu použít plovoucí kotouče na přední nápravě. Toto řešení se vyskytlo už na monopostu FS06 a tudíž prošlo testováním a závodní sezonou, ve které toto řešení obstálo bez problémů. Základní koncepční řešení vyživá brzdový věnec

uložený přes ocelové čepy na středovém unašeči. Čepy jsou zajištěny třmenovými podložkami. Celá konstrukce kotouče je pak přípevněna pomocí lícovaných šroubů k náboji kola z materiálu EN AW 7075-T6. Odzkoušené řešení nových plovoucích kotoučů s optimálním profilem drážek pro lepší odvod tepla, nečistot, vody a snížení hmotnosti dodala firma Motokotouce.cz. Vhodnost tohoto řešení, oproti jiným designům brzdových kotoučů, ukázaly pevnostní simulace brzdového kotouče provedené v programu Solidworks Simulations. Poslední finální verze V9 vykazuje nejrovnoměrnější rozložení napětí a nejnižší hodnotu koeficientu bezpečnosti. Pevnostní simulace lze vidět obr. č.36.



Obrázek 36 Pevnostní simulace různých designů brzdových kotoučů [Archiv autora]

Modely pro účely simulace vznikaly v prostředí CAD programu Solidworks. Celkem bylo simulováno 9 verzí brzdových kotoučů ze stejného materiálu, ale s jiným profilem odlehčovacích otvorů. Cílem simulace bylo ověřit nové řešení, které umožní na kotouči co možná nejrovnoměrněji rozložit tepelně-mechanické namáhání. Příliš mnoho odlehčovacích otvorů by snížilo tuhost kotouče a jeho tepelnou kapacitu, tudíž by se snadněji přehříval a rychle ztrácel provozní teplotu. Brzdový kotouč bez odlehčovacích otvorů má zbytečně vysokou hmotnost, a navíc není usnadněn odvod nečistot a vody drážkami pryč z funkčního povrchu, proto toto řešení nebylo od počátku návrhu vůbec zvažováno.

Finální provedení předního brzdového kotouče vyrobeného z materiálu EN X46Cr13 má vnější průměr 230 mm, tloušťku 4,5 mm, hmotnost 620 g.

Pro zadní kotouče byl aplikován stejný materiál a profil drážek jako v případě předních kotoučů, nicméně zadní kotouče byly provedeny ve variantě s pevným kotoučem. Plovoucí provedení se zatím pro zadní nápravu neopodstatnilo. Zadní brzdové kotouče mají hmotnost 545 g a vnější průměr 200 mm

Z finančního hlediska znamenala výroba brzdových kotoučů u dodavatele Motokotouce.cz finanční náklady 10 000 Kč. Tato částka je však opodstatněná složitou výrobou brzdových kotoučů, která nepředstavuje pouze vyřezání tvarů a drážek do materiálu polotovaru. Součástí výroby je mnoho důležitých procesů jako například kalení, kovoobrábění broušení, frézování, pískování a další neméně podstatné operace. Přesný výrobní proces si výrobce tají.



Obrázek 37 Přední a zadní brzdové kotouče vyrobené firmou Motokotouce.cz [Archiv autora ]

#### 4.6.2 Brzdové třmeny

Pro přední brzdy byly vybrány osvědčené brzdové třmeny od společnosti ISR Brakes s označením ISR 22-048, který je k vidění na obrázku č. 38. Jedná se o třmeny monoblokové konstrukce z lehké hliníkové slitiny vybavené čtyřmi pístky o průměru 25 mm. Velikost průměru pístků byla zvolena již při výpočtu brzdového systému. Hmotnost předního třmenu je 460 g a funkční plocha destiček v jednom předním brzdíči je 14 cm<sup>2</sup>.



Obrázek 38 Přední brzdový třmen ISR 22-048 [13]

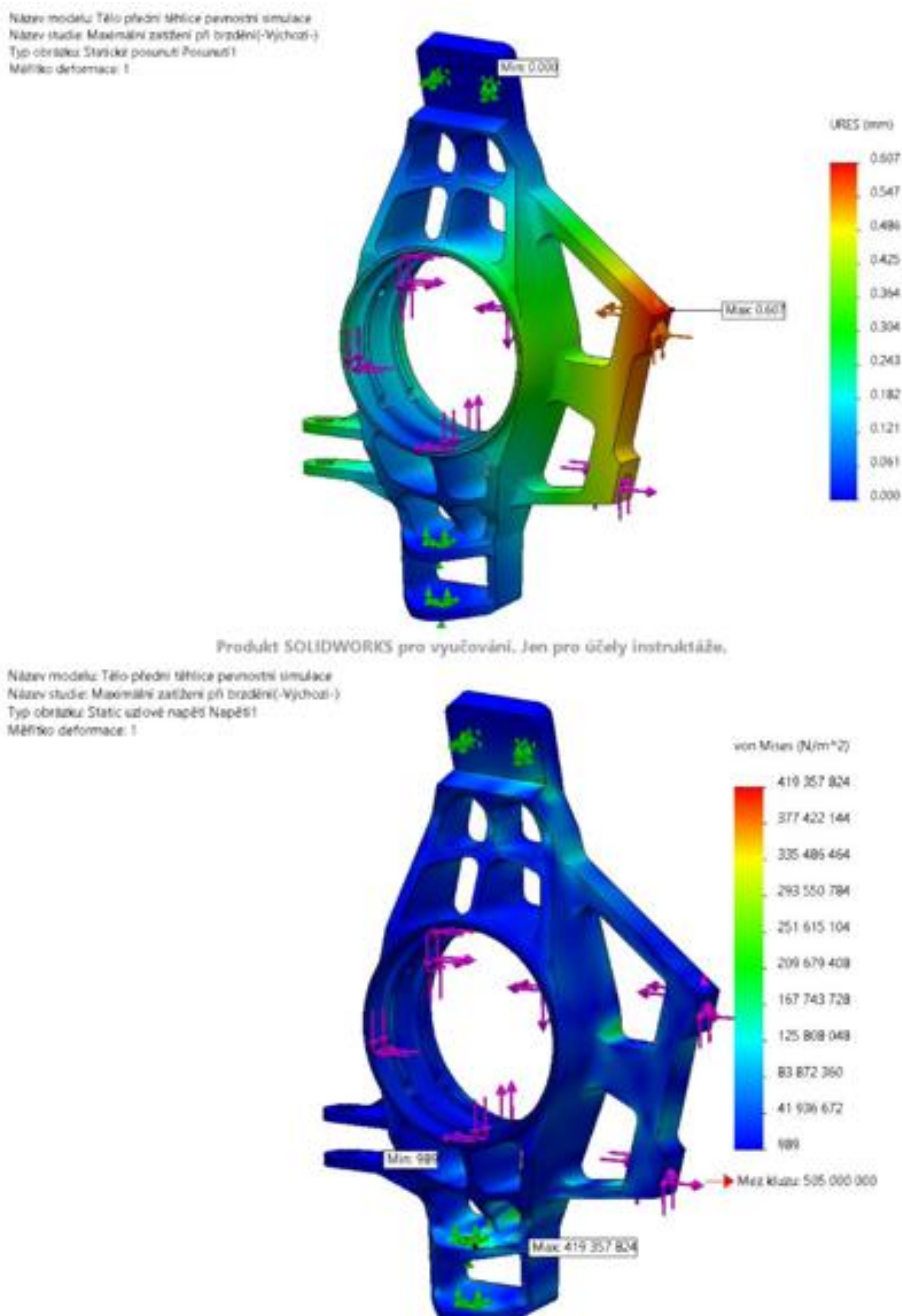
Pro zadní brzdy byly vybrány brzdové třmeny od stejného výrobce jako v případě předních brzdíčů. Firma ISR Brakes dodala brzdové kotouče s označením ISR 22-049. Jedná se o monoblokové brzdové třmeny z lehké hliníkové slitiny se dvěma pístky o průměru 25 mm. Zadní třmeny mají hmotnost 290 g a funkční plocha destiček v jednom zadním brzdíči je 7 cm<sup>2</sup>. Velikost pístků byla zvolena při výpočtu brzdového systému.



Obrázek 39 Zadní brzdový třmen ISR 22-049 [Archiv autora ]



Třmeny společně s ostatními díly brzdového systému byly podrobeny zástavbové zkoušce, jak v rámci CAD modelu monopostu, tak následně ještě před montáží povozku. Je tak zajištěno, že nedojde ke vzájemné kolizi dílů při provozu a problémům při sestavování. Přední i zadní třmeny jsou k tělu těhlice přichyceny radiálně. Uchycení třmenu k těhlici bylo pevnostně prověřeno na přední těhlici, která je více zatížená při brzdění, pomocí pevnostní simulace v prostředí Solidworks Simulation. Výsledky simulace můžete vidět a následujícím obrázku číslo 40, kde je vypočítáno posunutí a napětí v materiálu v důsledku zatížení. Hodnota maximálního napětí v materiálu nepřesahuje mez kluzu materiálu



Obrázek 40 Pevnostní simulace přední těhlice[14]

EN AW 7075-T6, ze kterého je těhlice vyrobena. Jak přední, tak zadní brzdový třmen poskytuje díky svojí pevné monoblokové konstrukci optimální zpětnou vazbu řidiči. Z finančního hlediska vyházejí pořízení brzdových třmenů příznivě, neboť se je podařilo již zakoupit z peněz rozpočtu pro rok 2019.

#### 4.6.3 Brzdové destičky

Brzdové destičky byly zvoleny na základě konzultace s odborníky z firmy Renovak. Pro monopost budou použity brzdové destičky od firmy Ferodo FRP415, které jsou vyrobeny z polokovového materiálu a určeny pro nerezové brzdové kotouče.



Obrázek 41 Sada brzdových destiček Ferodo FRP415[15]

Tato směs se běžně používá například pro vysoce výkonné silniční motocykly z toho důvodu, že má dostatečnou odolnost při vysokém zatížení a zároveň spolehlivě funguje již od nízkých teplot, na rozdíl od celokovových směsí brzdového obložení. Dobré fungování již od nízkých teplot je v krátkých disciplínách jako je například skidpad nebo autocross zcela zásadní, neboť se zde brzdové obložení během závodu nestihne zahřát na vysokou provozní teplotu, kde fungují brzdová obložení s celokovovou výplní. Zvolené destičky mají certifikace TUV/KBA a ECE-R90. Cena těchto destiček je od dodavatele Renovak 429 Kč za sadu 2 kusů. Na celém monopostu FS07 je celkem 16 stejných brzdových destiček což znamená cenu celkem 3432 Kč. Varianta brzdových destiček pro celý monopost se směsí 29-00-DC od společnosti ISR vychází finančně na 5161 Kč. Volbou brzdových destiček od společnosti Ferodo bude ušetřeno 1729 Kč na každé sadě brzdových destiček. Za celou závodní sezonu tým spotřebuje minimálně 2,5 sady brzdových destiček, čili celková úspora činí min. 4322,5 Kč.

#### 4.6.4 Brzdová kapalina

Vhodná brzdová kapalina byla zvolena dle požadavků výrobce AP Racing, který pro tým CULS Prague Formula Racing dodává kromě vahadla brzdových sil také hlavní brzdové válce. Společnost AP racing silně nedoporučuje používat ve všech svých produktech brzdovou kapalinu na bázi silikonu. Jako vhodné médium pro brzdový systém monopostu FS07 byla zvolena brzdová kapalina s označením Radi-CAL™ R4 určená pro závodní účely. Kapalina vyniká svým suchým bodem varu, který je nejvyšší ze všech běžně nabízených brzdových kapalin. Suchý bod varu dosahuje hodnoty až 340 °C. Mokrý bod varu má hodnotu 195°C. Při teplotě 20 °C je hodnota viskozity 10-15 cSt a hustoty 1.040 – 1.095 g/ml.



Obrázek 62 Brzdová kapalina Radi-CAL™ R4[16]

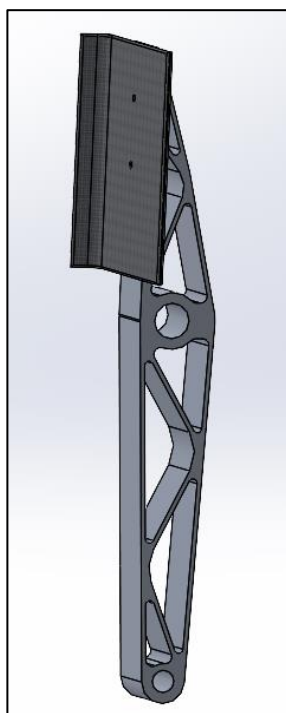
#### 4.6.5 Pedálová skupina

Pedálová skupina v běžných automobilech obsahuje tři pedály, které umožňují společně s volantem a dalšími ovladači řídiči ovládat vozidlo. Pedál ovládající spojku, brzdový a plynový pedál. Toto řešení bylo používáno i u minulých generací monopostů FS05 a FS06. Spojkový pedál je využíván pouze pro rozjezdy monopostu, protože sekvenční převodovka umožňuje řadit bez spojky pomocí krátkého přerušením přenášeného momentu v převodovce díky krátkodobému vypnutí zapalování, které zařídí řídicí jednotka motoru. Proto bylo rozhodnuto přesunout ovládání spojky na sloupek řízení, kde bude spojka ovládána rukou pilota. Změna základního konceptu umožní kompaktnější provedení přední část rámu, což bude mít pozitivní dopad na aerodynamiku vozu. Základní koncept je u FS07 nově tvořen dvěma pedály, které jsou uchyceny pomocí držáků do podlahy rámu. Pedálová skupina musí zůstat i nadále nastavitelná, aby umožnila jízdu v monopostu pilotům různého vzrůstu. Nová pedálová skupina nesmí opakovat nedostatky z minulých generací

monopostu. V následujících odstavcích je popsána konstrukce jednotlivých dílů pedálové skupiny:

#### 4.6.5.1 Brzdový pedál

Úkolem brzdového pedálu, jakožto součásti pedálové skupiny, je přenést sílu vytvořenou pilotem na hlavní brzdové válce, které vytvoří tlak v brzdovém systému, který aktivuje kolové brzdy. Brzdový pedál podléhá přísným pravidlům Formule student, které byly již probrány v kapitole 4.3.5.



Obrázek 43 Model brzdového pedálu [Archiv autora]

Design brzdového pedálu vychází kromě pravidel hlavně z výpočtu brzdové soustavy, kde byl určen minimální pedálový převod s hodnotou

$P_{RF} = 3,627$ , spočítány síly působící na brzdové válce (při ovládací síle 2000N) s hodnotou

$P_{PP} = 3626,665$  N a základní geometrie brzdového pedálu. Jako materiál pro brzdový pedál

byla zvolena dostupná slitina hliníku EN AW 7075-T6. Po diskusi s piloty týmu CULS

Prague Formula Racing byla zvolena ovládací síla brzdového pedálu 650 N. Jedná se o sílu,

kteřá umožní vyvolat maximální brzdny moment na hranici přilnavosti pneumatik, těsně

před tím než dojde k zablokování všech kol. Za účelem ověření schopností pilotů týmu

CULS Prague Formula Racing bezpečně překonat ovládací sílu a zjistit, jaké extrémní

hodnoty jsou schopni piloti vyvinout na brzdový pedál, byl proveden krátký experiment.

Piloti působili svojí nohou maximální silou, zapření zády o překážku, na váhu. Díky zjištěné hmotnosti bylo možné následně spočítat extrémní sílu na brzdový pedál. Provádění experimentu lze spatřit na následujícím obrázku č. 44.



Obrázek 44 Experiment s piloty týmu CULS Prague Formula Racing [Archiv autora]

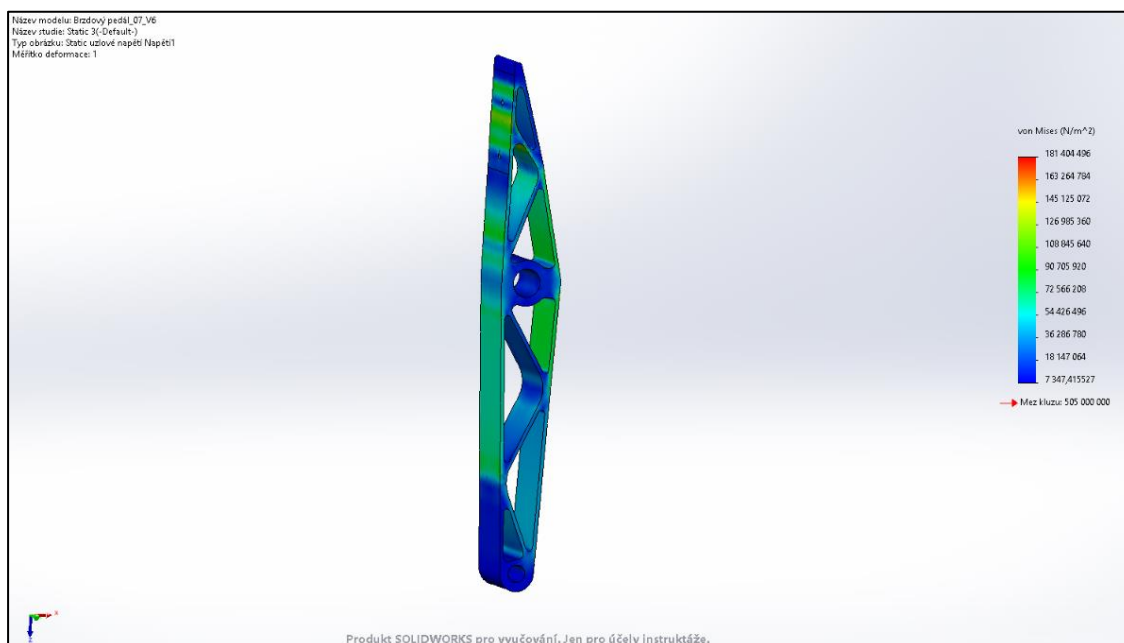
Výsledky experimentu jsou zaneseny v následující tabulce:

Číslo pilota týmu CULS PFR	Velikost síly vyvinutá pilotem
1	1729 N
2	1092 N
3	777 N
4	1568 N
Maximální naměřená hodnota síly	1729 N
Průměrná hodnota síly	1291,5 N

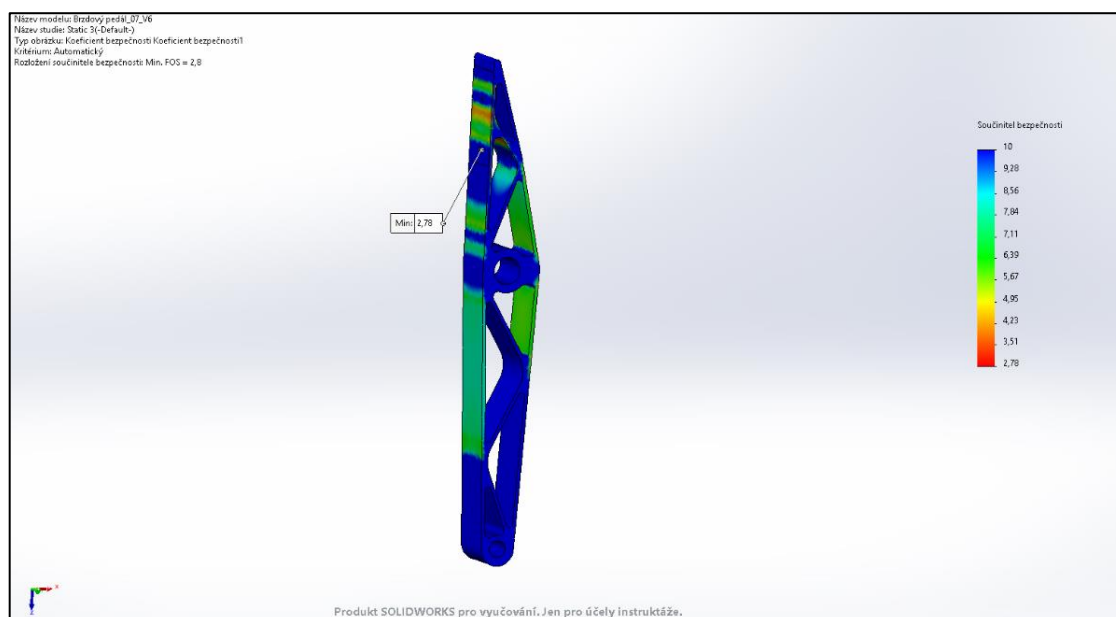
Tabulka 4 Výsledky experimentu měření sil vyvinutých piloty týmu CULS Prague Formula Racing.

Z výsledků je patrné, že všichni piloti zvládli s rezervou překonat ovládací sílu, někteří dokonce dvojnásobně.

Pro účely určení finálního designu brzdového pedálu byla použita metoda konečných prvků. Pro pevnostní simulace byla použita síla daná pravidly Formule student a to konkrétně 2000 N. Cílem simulace bylo vytvořit geometrii s minimální hodnotou koeficientu bezpečnosti 2, který pokryje i možnost zatížení brzdového pedálu v extrémních situacích, kdy pilot může například pod vlivem adrenalinu vyvinout mnohem větší síly na brzdový pedál, než jaké byly změřeny nebo uvažovány. Pevnostní simulaci brzdového pedálu v prostředí Solidworks simulation lze vidět na následujících obrázcích.



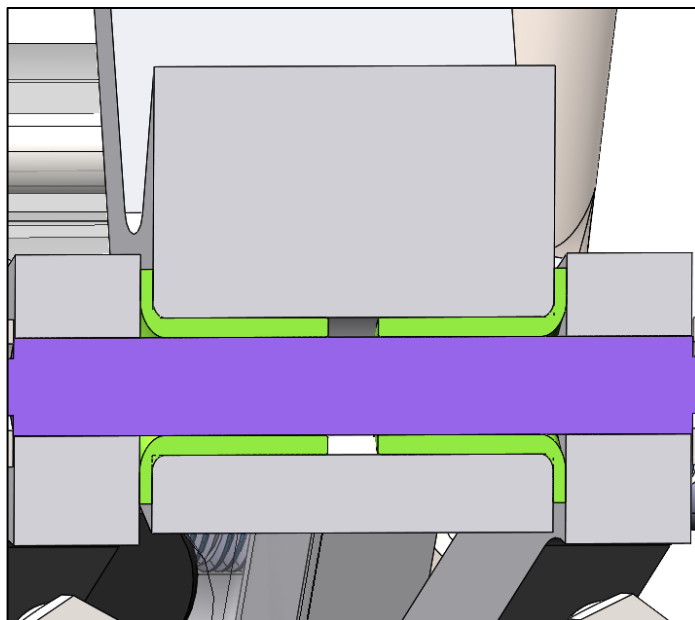
Obrázek 45 Pevnostní simulace zobrazující souhrnné napětí [Archiv autora]



Obrázek 46 Pevnostní simulace zobrazující koeficient bezpečnost [Archiv autora]

Brzdový pedál byl optimalizován celkem 7krát. Výsledný design brzdového pedálu má hmotnost 222 g s koeficientem bezpečnosti minimálně 2,78. Výsledný návrh je optimalizován tak, aby se dal vyrobit v podmínkách týmu CULS Prague Formula Racing nebo u některého týmových dodavatelů výrobních kapacit. U tohoto dílu by mohla být hmotnost snížena ještě na nižší hodnotu při použití nákladnějších metod výroby.

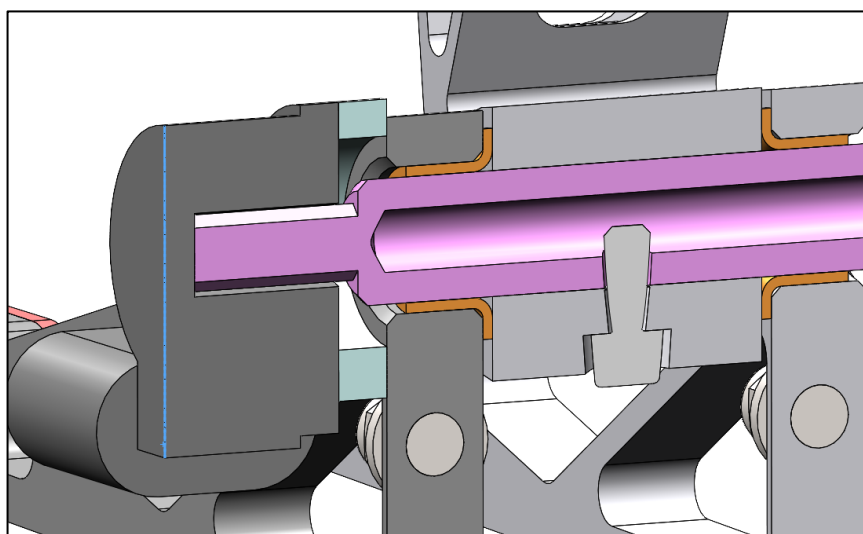
Vůle na spodním čepu brzdového pedálu je vymezena pomocí dvou kluzných pouzder SKF\_PCMF 121415 E. Uložení brzdového pedálu je viditelné na následujícím obrázku.



Obrázek 47 Uložení čepu brzdového pedálu [Archiv autora]

#### 4.6.5.2 Plynový pedál

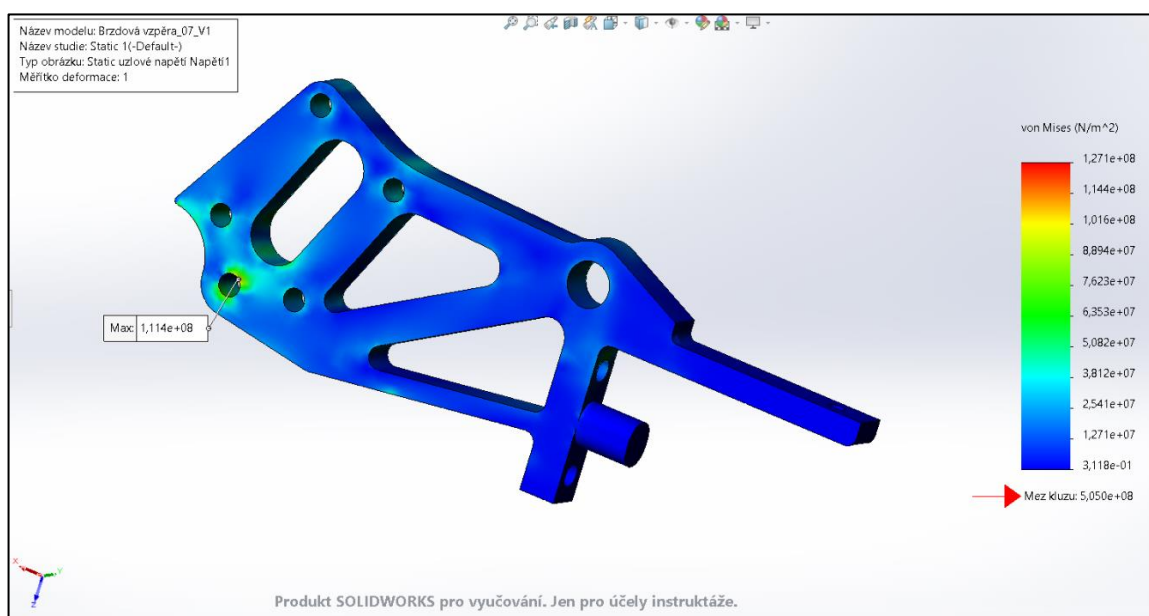
U plynového pedálu je požadavek na otáčení snímačem polohy pedálu plynu. Proto je zde čep uložen napevno, zajištěný ze spodní strany kolíčkem a dvě kluzná pouzdra PTFE KU 1209 P jsou uloženy v podélných nosnících pedálu plynu viz. obr.48. Hmotnost pedálu plynu je 135 g. Vyroben bude z materiálu EN AW 7075-T6 Plynový pedál je k vidění na obrázku č.54.



Obrázek 78 Uložení čepu pedálu plynu [Archiv autora]

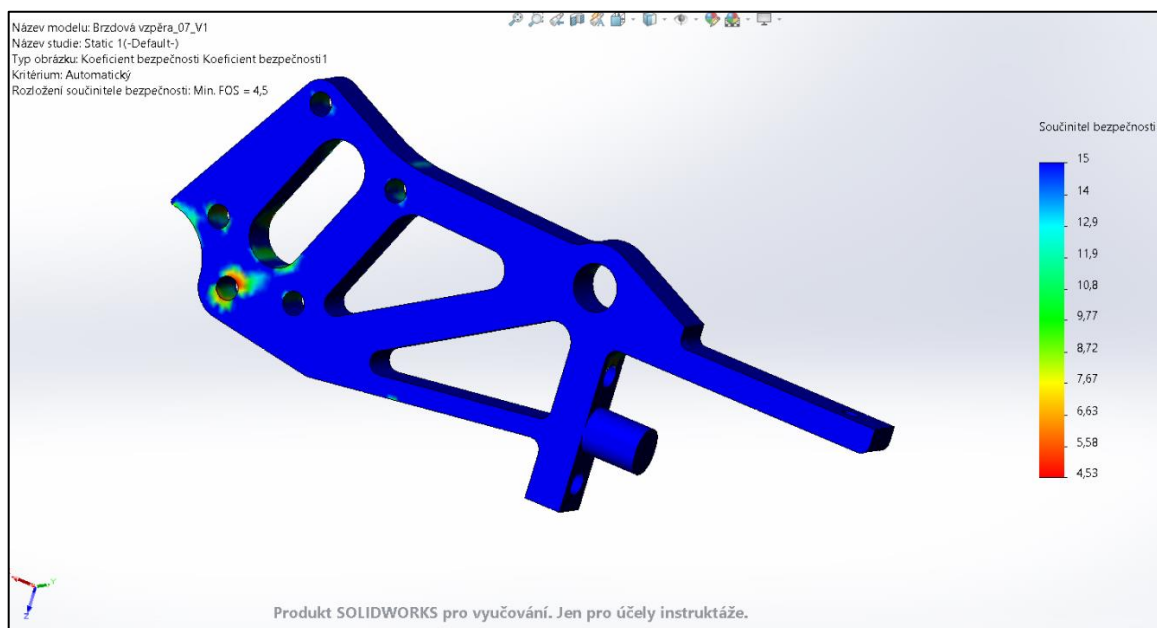
#### 4.6.5.3 Podélné nosníky

Tyto nosníky zachycují síly od brzdového pedálu a od brzdových válců, které se následně přenášejí dále do příčného nosníku a do rámu monopostu. Mezi těmito dvěma podélnými nosíky se nachází uložení vahadla brzdných sil, které bylo třeba přepracovat z důvodu rozdílného uložení brzdových válců v pedálové skupině. Jako materiál podélných nosníků byla zvolena slitina EN AW 7075-T6. Hmotnost jednoho podélného nosníku u brzdového pedálu činí 140 g, hmotnost jednoho podélného nosníku u pedálu plynu je 78,92 g. Výsledky pevnostní simulace lze spatřit na následujících obrázcích.



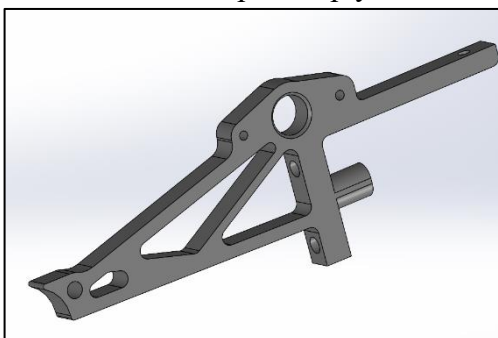
Obrázek 49 Simulace podélného nosníku pedálu brzdy ukazující souhrnné napětí v materiálu [Archiv autora]





Obrázek 50 Simulace podélného nosníku pedálu brzdy ukazující koeficient bezpečnosti [Archiv autora]

Podélný nosník pedálu plynu je zatížen oproti podélnému brzdovému nosníku jen zlomkem síly. Proto nebyl podroben pevnostní simulaci. Byl zde kladen důraz zejména na správně umístění otvorů pro senzor natočení pedálu plynu a na vedení pedálu.

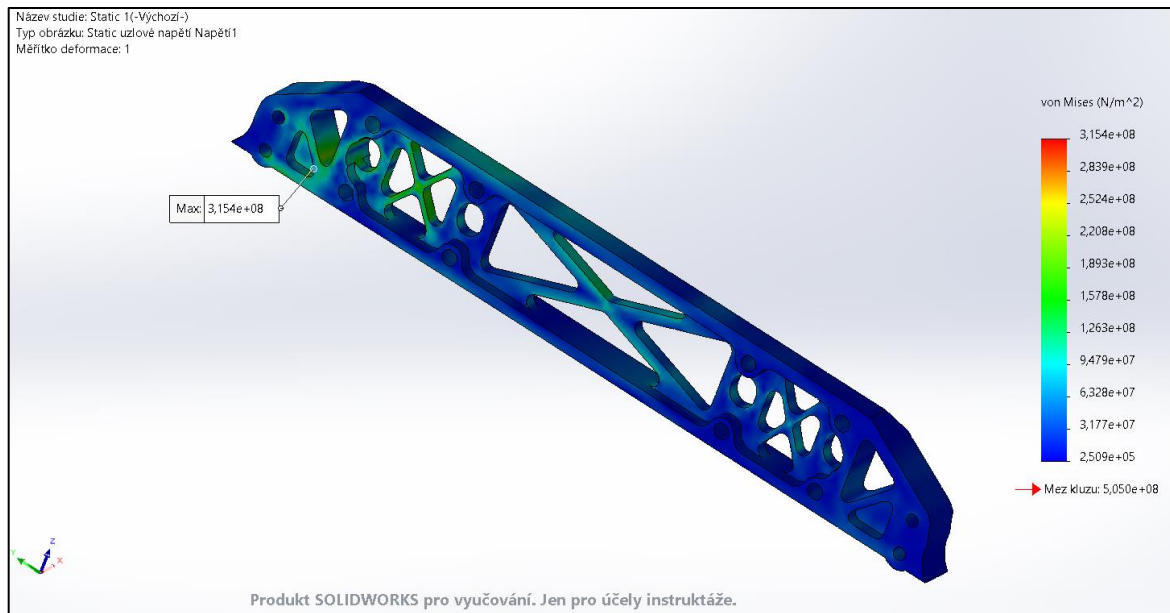


Obrázek 51 Model podélného nosníku pedálu plynu [Archiv autora]

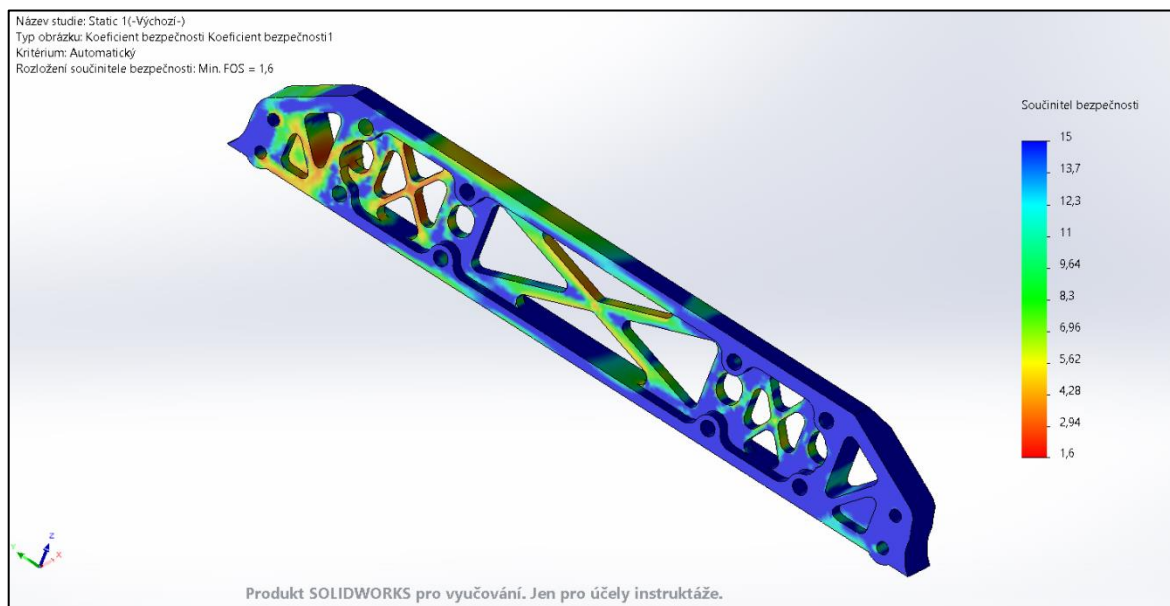
#### 4.6.5.4 Hlavní nosník

Hlavní nosník uložený napříč směru jízdy monopostu zachycuje síly od pedálové skupiny, které následně roznáší do prostorového trubkového rámu monopostu, do kterého je ukotven. Hmotnost navrhnutého finálního řešení nosníku je 209 g s minimálním koeficientem bezpečnosti 1,7. Jako materiál pro hlavní příčný nosník byl opět zvolen dostupný materiál EN AW 7075-T6. Díky dostupnosti polotovaru tohoto materiálu a konstrukci optimalizované pro výrobu na 3-osém CNC obráběcím centru, je tento díl, stejně jako ostatní navržené (nenakupované) komponenty vyrobitelný v podmínkách týmu CULS Prague

Formula Racing což má pozitivní dopad na ekonomickou stránku návrhu. Analýzu v prostředí Solidworks Simulation lze spatřit na následujících obrázcích.



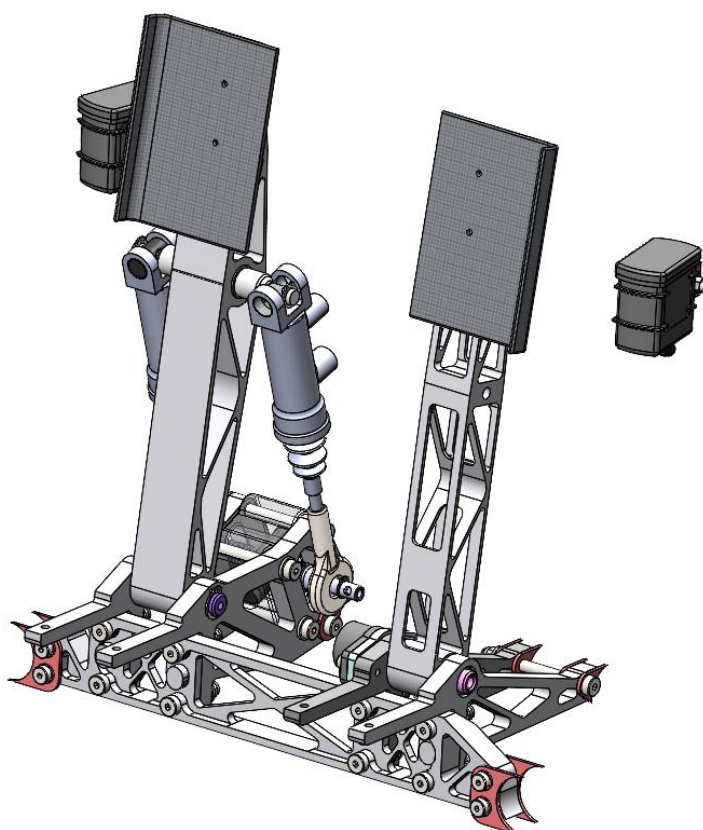
Obrázek 52 Simulace příčného nosníku pedálové skupiny ukazující souhrnné napětí v materiálu [Archiv autora]



Obrázek 53 Simulace příčného nosníku pedálové skupiny ukazují koeficient bezpečnosti v materiálu [Archiv autora]

#### 4.6.5.5 Sestava pedálové skupiny

Celková hmotnost sestavy včetně spojovacího materiálu a dalšího příslušenství činí 2061,41 g. Celá sestava je k vidění na následujícím obrázku č.54. Pedálová skupina zůstane i nadále nastavitelná pomocí výměných nášlapů pedálů o různých tloušťkách.



Obrázek 54 Sestava pedálové skupiny [Archiv autora]

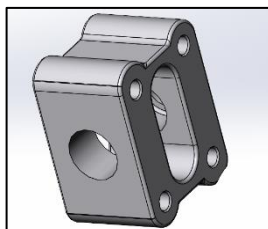
#### 4.6.6 Hlavní brzdové válce

Pro potřeby brzdového systému, který tvoří dva oddělené hydraulické okruhy, byly vybrány dva hlavní hydraulické válce od společnosti AP Racing s označením CP7854-90PRTE pro přední okruh a pro zadní okruh byl zvolen typ CP7854-92PRTE. Hlavní brzdový válec pro přední okruh má pístek o průměru 15,9 mm. Hlavní brzdový válec zadního okruhu má pístek o průměru 19,1 mm. Oba hlavní brzdové válce mají shodnou hodnotu zdvihu 30 mm. Volba hlavních brzdových válců vychází z výpočtu brzdového systému v kapitole 5.5.2. Těla brzdových válců se vyrábí pomocí odlévání a následného obrábění, jejich hmotnost proto činí v případě typu CP7854-90PRTE 282 g a v případě typu CP7854-92PRTE 288 g. Uložení brzdových válců je nově situováno šikmo namísto vodorovného

uložení, což oproti předchozímu řešení umožňuje snazší odvodu vzduchu systému. Podélné vodorovné uložení válců nebylo možné zachovat z hlediska zástavbových rozměrů. Hlavní brzdové válce není nutné znovu nakupovat, budou využity již zakoupené válce z minulé sezóny, které budou před sezonou profesionálně zrepasovány. Úspora díky použití dostupných dílů zde činí odhadem 14 000 Kč.

#### 4.6.7 Vahadlo brzdných sil

Jedním z požadavků na brzdový systém je možnost nastavení brzdného účinku mezi přední a zadní nápravou. Aby byl tento požadavek splněn, je do brzdového systému zařazeno vahadlo brzdných sil, které umožňuje nastavení brzdného účinku mezi přední a zadní nápravou pomocí vychýlení vahadla do jedné nebo druhé strany. Pro brzdový systém monopostu FS07 bude jako základ použito vahadlo brzdných sil od společnosti AP Racing s označením CP5520-4. Aby systém nastavení brzdného účinku na nové pedálové skupině optimálně fungoval, musí být z důvodu odlišného umístění a zástavbových rozměrů přepracován housing ložiska čepu, který umožňuje vychýlení vahadla. Sériové provedení housingu bude nahrazeno vlastním návrhem, ale zbytek dílů systému nastavení brzdného účinku bude zachován. Přepracované uložení vahadla brzdných sil je k vidění na následujícím obrázku.



Obrázek 55 Nový design housingu vahadla brzdných sil

Pro ovládání nastavení rozložení brzdného účinku slouží otočný ovladač dostupný z místa řidiče, který je propojený speciálním ovládacím lankem se závitovou tyčí ve vahadle brzdných sil. Řidič tak má možnost nastavovat rozložení brzdného i při jízdě.



Obrázek 56 Otočný ovladač vahadla brzdných sil [Archiv týmu CULS Prague Formula Racing]

#### 4.6.8 Ostatní příslušenství

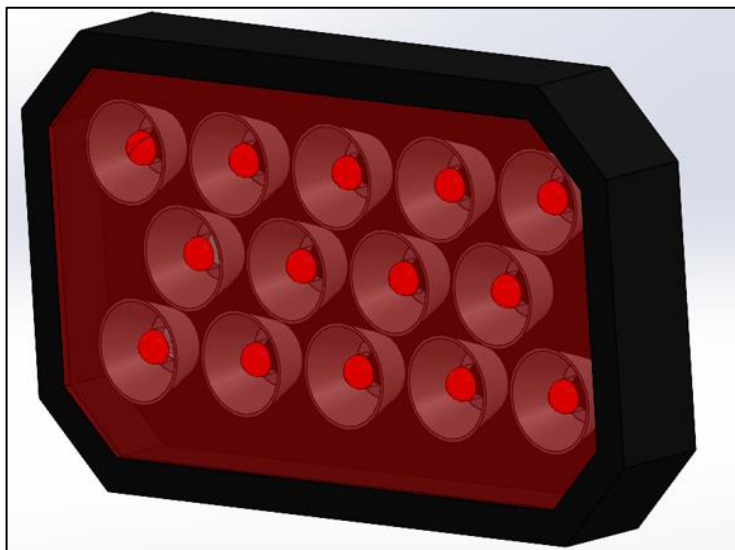
Díky výpočtu brzdového systému je možné bezpečně zvolit pro rozvod brzdové kapaliny hydraulické hadice a ostatní příslušenství. Monopost FS07 bude využívat pancéřové hadice s vnitřním teflonovým jádrem a vnějším PVC opletem od firmy ProRacing. Hydraulické hadice musí odolat tlaku brzdové kapaliny při maximálním brzděném účinku. V předním brzdovém okruhu tlak brzdové kapaliny dosahuje hodnoty 2,604 Mpa a v zadním okruhu 1,737 Mpa. Zvolené hydraulické hadice tento tlak zvládnou, neboť jsou konstruované dle údajů výrobce až do tlaku 20 Mpa. Větší průměr hadice je 6,35 mm, světlost činí 3,17 mm. Minimální poloměr ohybu je 50 mm. Tento typ hadice je určený pouze pro fitinky PTFE. Celková délka hadice voze FS07 je 5500 mm. Pokud se hydraulické hadice musí spojit nebo rozdělit do více směrů je zapotřebí použít správné hadicové spojky, popřípadě rozdělovače atd. V brzdovém systému se objevuje nerezový rozdělovač pro brzdy zadní nápravy typu T s dvěma kolmými výstupy na hadice. Závit na vstupu je typu 3/8"x24-UNF. Samozřejmě je použití nerezových průtokových šroubů o délce zaručující bezpečnou funkčnost systému. Do brzdových válců se musí průtokové šrouby 7/16"x20-UNF – s délkou 24 mm záměrně zkrátit tak, aby nedošlo k problémům s průtokem brzdové kapaliny viz. kapitola 5.3.2. Pro připojení brzdových hadic do brzdových třmenů se používají průtokové šrouby 3/8"x24-UNF s délkou 20 mm. Průtokové šrouby jsou s hadicemi připojeny pomocí Banja odpovídající daným průtokovým šroubům (velkost závitu průtokových šroubů je na monopostu FS07 buď AN3 nebo AN4). Těsnost zajišťují měděné deformovatelné těsnící kroužky. Pro každý brzdový okruh je použit samostatný rezervoár na brzdovou kapalinu s vyznačenou maximální a minimální doporučenou hladinou. Celková cena příslušenství, které bude nutné pořídit pro nový brzdový systém monopostu FS07 se pohybuje kolem částky 9000 Kč. Většina dílů příslušenství se musí pořídit znovu nové, neboť jsou určeny pouze jen na jedno použití. Při opakovaném použití by byla ohrožena těsnost systému což by negativně ovlivnilo bezpečnost provozu.



Obrázek 57 Příslušenství brzdového systému [Archiv týmu CULS Prague Formula Racing]

#### 4.6.9 Brzdové světlo

Nové brzdové světlo vyrobené pomocí technologie 3Dtisku, je umístěno na zadním hliníkovém podrámu. Světlo se skládá z tištěného rámu, 15 červených led diod a sklíčka z materiálu PETG chránící diody před nečistotami. Brzdové světlo má osvětlenou plochu o obsahu 20 cm<sup>2</sup> a je jasně viditelné za všech světelných podmínek.



Obrázek 58 Brzdové světlo [Archiv týmu CULS Prague Formula Racing]

#### 4.7 Údržba brzdového systému

Správně prováděná údržba brzdového systému tvoří dobrý základ k jejímu spolehlivému fungování v náročných podmínkách závodu. Údržbu brzdového systému je nutné provádět před každým vyjetím monopostu na závodní trať. Mezi základní úkony údržby patří vizuální kontrola úniků brzdové kapaliny. Těsnost systému se dá také prověřit funkční zkouškou, kdy je mechanik zatlačí na brzdový pedál, který se nesmí pod tlakem propadat. Pokud by k tomu došlo, tak je na vině pravděpodobně vnější netěsnost brzdového systému nebo zavzdušněné vedení brzdové kapaliny. Netěsnosti lze opravit výměnou poškozené části brzdového systému nebo například výměnou těsnění. Před každou jízdou musí být systém dokonale zkontrolován a odvzdušněn, aby brzdová kapalina dokázala přenášet silové účinky. Brzdová kapalina se musí pravidelně obměňovat vzhledem k jejímu značnému namáhání zejména v oblasti brzdového třmenu. Pravidelné výměny také zajistí, že bod varu kapaliny nebude klesat v důsledku schopnosti brzdové kapaliny pohlcovat vodu. Hladina kapaliny v rezervoárech musí být ležet v optimálním rozhraní vyznačeném na nádobce.



Důsledná péče se musí věnovat brzdovým destičkám, zejména čistotě v oblasti vodících drážek a čepů. Musí být bezpečně zajištěno, že se brzdové destičky po odbrzdění vrátí do původního stavu a vymezí se potřebná vůle mezi kotoučem a brzdovou destičkou.

Před každou jízdou je také třeba provést celkovou kontrolu brzdového systému, jeho spoju a uchycení, aby se včas odhalilo potenciální poškození systému a zabránilo se tak potenciálně nebezpečné situaci.

Funkční plochy brzdových kotoučů a brzdových destiček nesmí v žádném případě přijít do kontaktu s oleji a mazacími tuky. Před každou jízdou se silně doporučuje brzdové kotouče pečlivě odmastit čističem na brzdy nebo alkoholem.

Vzhledem k tomu, že brzdové destičky závodního monopostu nemají senzor opotřebení, je třeba pravidelně kontrolovat stav opotřebení a tloušťku brzdového obložení. Při jakémkoliv podezření na poškození brzdové destičky, se musí destičky na celé nápravě vyměnit současně. Pokud je zpozorováno limitní opotřebení brzdové destičky a tloušťka brzdového obložení není dostatečná na to, aby v něm monopost spolehlivě dokončil závod, musí se obložení taktéž vyměnit.

## 4.8 Testování Brzdového systému

Testování závodního monopostu je velice důležité, protože umožní připravit monopost na sezonu, odstranit drobné nedostatky, ověřit funkčnost komponent, nasbírat data a důkladně nastavit klíčové komponenty. Je výhodné věnovat dostatek času testování než se potýkat s problémy po zbytek sezony. Pro testování brzdového systému existují dva základní způsoby testování. Prvním z nich jsou laboratorní testy, kde na například typicky používá brzdového dynamometru. Rozsáhlejší a používanější metodou testování brzdového systému v týmu CULS Prague Formula Racing je testování na uzavřených plochách a okruzích. Testováním monopostu na uzavřené trati ideálně v podobně závodního okruhu je nejlepší způsob, jak se maximálně přiblížit podmínkám v závodě.

### 4.8.1 Doporučené vybavení pro testování brzdového systému na uzavřené ploše

- Sada náradí potřebná pro práci na voze
- Hasící přístroj
- Notebook pro přenos a zpracování dat
- Náhradní pneumatiky

- Náhradní díly brzdového systému (brzdové destičky, brzdové vedení, těsnění, atd.)
- Quick jack nebo jiné zvedací zařízení
- Stopky
- Sportovní kamera s příslušenstvím
- Termokamera
- Psací potřeby
- Provozní kapaliny (palivo, brzdová kapalina, chladící kapalina, oleje)
- Veškeré vybavení pilota (nehořlavé oblečení, kombinéza, přilba, rukavice boty, atd.)
- Kužely
- Zařízení na měření vzdálenosti

#### 4.8.2 Plán testování brzdového systému

1. Důkladná kontrola brzdového systému.
2. Spuštění a kontrola systému pro sběr a přenos dat.
3. Celkový test zaměřený na výkon brzd
  - a) Zaznamenání dat a poznámek dat z tohoto testu
  - b) Zaznamenat zpětnou vazbu pilota
  - c) Před další jízdou znovu zkontrolovat a popřípadě nastavit brzdový systém, nesrovnalosti ihned zaznamenat.
4. Test zaměřený na nastavení vyvážení brzdového systému
  - a) Zaznamenání maximálního zpomalení vozidla před nastavením vyvážení brzdového systému.
  - b) Test různého nastavení vyvážení brzdového systému
  - c) Zaznamenávání zpomalení vozidla a pozorování chování vozu při deceleraci.
  - d) Pokračovat v testování a nastavování brzdového systému, dokud nebude nalezena maximální hodnota zpomalení.
5. Provést test chlazení brzd
  - a) Pokud je vozidlo vybaveno chladícími kanály, je zapotřebí ověřit kvalitu proudění těmito kanály.
  - b) Provést kontrolu teploty termokamerou zejména u brzdových kotoučů a dílů kolových brzd po zastavení vozidla.



- c) Za jízdy pozorovat teplotu brzd a měřit čas za účelem zjištění efektivity chlazení.
6. Provést alternativní testy v přímce
  7. Dlouhodobé testování brzdového systému
    - a) Pozorovat opotřebení součástí brzdového systému
    - b) Pozorovat teplotu brzd v průběhu dlouhodobého testování
    - c) Zaznamenat zpětnou vazbu řidiče po delším testování
  8. Opakovat celý postup na mokré trati s pneumatikami pro mokré podmínky

## 5 Zhodnocení návrhu

Tato práce se zabývá návrhem brzdového systému pro monopost typu formule student, konkrétně je systém optimalizován pro nový monopost FS07. Během analýzy brzdových systémů předchozích monopostů FS05 a FS06 byly úspěšně odhaleny a popsány kritické nedostatky, které měly negativní dopad na spolehlivost a bezpečnost provozu monopostů. Díky odhalení těchto nedostatků může být zdokonalen návrh nového brzdového systému, který tyto nedostatky odstraňuje. Je zde tedy potenciál pro zlepšení spolehlivosti. Nově navržený systém úspěšně plní i všechny stanovené cíle s výjimkou zvýšení hmotnosti u brzdových kotoučů u monopostu FS07 oproti brzdovým kotoučům použitých na monopostu FS05. Hmotnost nových kotoučů je přibližně o 15 % vyšší. Důvodem nesplnění tohoto cíle je pravděpodobně značné opotřebení kotoučů u monopostu FS05 a použití složitějších plovoucích brzdových kotoučů na přední nápravě u monopostu FS07. Hmotnost byla úspěšně snížena u pedálové skupiny o 253 g oproti minulému návrhu pedálové skupiny. I navzdory zcela odlišnému konceptu zůstala pedálová skupina nastavitelná nastavitelná. Další snížení hmotnosti by bylo možné při použití nákladnějších metod výroby. Výrazně se zvýšila kvalita a životnost brzdového obložení, které funguje již od nízkých teplot v krátkých disciplínách a zároveň je schopno odolat vysokým teplotám při závodě typu Endurance. Díky použití dostupných komponent, optimalizaci výroby dle časových, finančních a výrobních možností týmu CULS Prague Formula Racing bylo dosaženo příznivých finančních nákladů na nový brzdový systém. Aby brzdový systém fungoval optimálně i v průběhu sezony, byl zpracován popis úkonů údržby což pravděpodobně povede k jejímu důkladnému provádění a tím pádem k prevenci závad. Pro správnou funkci celého systému

a maximalizování dynamického potenciálu monopostu na závodní trati Formule student byl zpracován podrobný plán testování brzdového systému monopostu.

## 6 Závěr

Konkurence v soutěži Formule student je na velmi vysoké úrovni, proto se týmy soutěžící v této mezinárodní inženýrské soutěži snaží neustále přicházet s novými inovacemi, aby si zachovali konkurenceschopnost. Podmínky, ve kterých se závodní monoposty pohybují jsou náročné a důkladně prověřují připravenost celého týmu a vyspělost monopostů. Mít konkurenceschopný monopost ještě nemusí znamenat, že bude úspěšný i na závodní dráze. Monoposty mnoha často špičkových týmů mají problémy se spolehlivostí zejména při disciplíně endurance, kdy buď vůbec nedokončí závod nebo kvůli technické poruše přijdou o dobré dynamické schopnosti monopostu. Tato situace se týmu CULS Prague Formula Racing nesmí přihodit, pokud chce být na závodech úspěšný. Tato práce se proto snaží vylepšit spolehlivost a dynamické schopnosti monopostu v oblasti brzdového systému.

Pro lepší proniknutí do problematiky práce jsou na začátku práce probrána teoretická východiska z oblasti brzdových systémů a jejich komponent, pravidel a disciplín soutěže formule student, aspekty závodního monopostu ovlivňující brzdové systémy a limity omezující výkon brzdového systému.

Hlavním cílem této diplomové práce bylo navrhnout nový brzdový systém určený pro monopost FS07. Tomuto hlavnímu cíli je věnována praktická část práce. Nejdříve byl popsán stávající stav na konceptu monopostu FS06 a a budoucí stav na monopostu FS07. Dále byly analyzovány brzdové systémy starších monopostů FS05 a FS06, kde byly zjištěny vážné nedostatky ohrožující bezpečnost a spolehlivost při provozu monopostu. podrobněji definovány cíle, které byly brány na vědomí při návrhu nového brzdového systému pro monopost FS07. Ještě před samotným návrhem byly stanoveny generální požadavky na brzdový systém. Za účelem splnění stanovených cílů byl proveden teoretický výpočet brzdového systému, který se stal posléze základem pro volbu klíčových komponent brzdového systému. Některé komponenty musely být dodatečně analyzovány pomocí metodou konečných prvků. Aby bylo možné komponenty analyzovat ještě před samotnou výrobou, bylo nutné vytvořit 3D modely jednotlivých komponent v softwaru Solidworks.. Z finančního hlediska se podařilo ušetřit náklady značnou měrou díky použití běžně

dostupných komponent, spolupráci se sponzory týmu, optimalizaci komponent dle časových, finančních a výrobních možností týmu a použití profesionálně repasovaných komponent. Zpracována byla také dříve zanedbávaná údržba brzdového systému a podrobný plán předsezónního testování. Skutečný přínos brzdového systému monopostu FS07, bude zjištěn až po jeho výrobě a následné montáži do vozu, kdy se společně s ostatními systémy vozu vyzkouší na závodní trati. Nový brzdový systém má ale zatím dobrý potenciál pro podávání stabilních výkonů v sezoně 2022.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] VLK, František. *Podvozky motorových vozidel*. 2. vyd. Brno: F. Vlk, 2003. ISBN 80-239-0026-9.
- [2] PUHN FRANK. *Brake handbook*. 1985. ISBN ISBN 08-958-6232-8.
- [3] GSCHEIDLE, Rolf a kolektiv. *Příručka pro automechanika*. B.m.: Europa-Sobotáles cz, 2007. ISBN 978-80-86706.
- [4] TEODOR FERSETA. *Why Drum Brakes Make Sense on EVs* [online]. 2020. Available at: <https://www.autoevolution.com/news/why-drum-brakes-make-sense-on-evs-149568.html>
- [5] CULS PRAGUE FORMULA RACING. *Formule Student/SAE* [online]. 2012. Available at: <http://culsracing.cz/formule-studentsae/>
- [6] FORMULA STUDENT GERMANY. *Formula student Rules 2022* [online]. 2021. Available at: [https://www.formulastudent.de/fileadmin/user\\_upload/all/2022/rules/FS-Rules\\_2022\\_v1.0.pdf](https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2022/rules/FS-Rules_2022_v1.0.pdf)
- [7] DEREK SEWARD. *Race car design*. 2014. ISBN ISBN: 978-1-137--03014-6.
- [8] CULS PRAGUE FORMULA RACING. *Archiv týmu CULS Prague Formula Racing*. 2022.
- [9] DUCHOŇ, Jiří. *Škoda Enyaq IV – Elektroéra* [online]. 2020. Available at: [https://www.automobilrevue.cz/rubriky/testy/predstavujeme/skoda-enyaq-iv-elektroera\\_48198.html](https://www.automobilrevue.cz/rubriky/testy/predstavujeme/skoda-enyaq-iv-elektroera_48198.html)
- [10] MOTORS, Warren Anderson. *JBT Brake systems* [online]. 2021. Available at: <https://www.warrenandersonmotors.co.nz/jbt-brake-systems>
- [11] RACING, AP. *Carbon Brake Discs & Pads* [online]. 2022. Available at: <https://apracing.com/race-car/carbon-brake-discs-pads>
- [12] SPEARS RACING. *BREMBO BRAKE FULL FLOATING DISC* [online]. 2022. Available at: <https://spearsenterprises.com/product/brembo-oversized-front-brake-rotor-108973757-machined-brake-rotor-kawasaki-ninja-ex300/>
- [13] ISR BRAKES. *22-048 4-piston caliper* [online]. 2004. Available at: <https://www.isrbrakes.se/products/calipers/22-048.html>
- [14] TOMÁŠ, Flajšman. *Návrh těhlice s možností rychlého nastavení odklonu kol na studentské formuli* [online]. B.m., 2021. b.n. Available at: [https://is.czu.cz/auth/zp/index.pl?podrobnosti\\_zp=256405;zpet=;prehled=vyhledavani;vzorek\\_zp=Těhlice;dohledat=Dohledat;kde=nazev;kde=autor;kde=klic\\_slova;stav\\_filtr=bez;typ=1;typ=2;typ=3;typ=101;typ=8;typ=7;fakulta=20;fakulta=41;fakulta=40;fakulta=71;faku](https://is.czu.cz/auth/zp/index.pl?podrobnosti_zp=256405;zpet=;prehled=vyhledavani;vzorek_zp=Těhlice;dohledat=Dohledat;kde=nazev;kde=autor;kde=klic_slova;stav_filtr=bez;typ=1;typ=2;typ=3;typ=101;typ=8;typ=7;fakulta=20;fakulta=41;fakulta=40;fakulta=71;faku)
- [15] FERODO. *FERODO FRP 415 Scheibenbremsbeläge NEU & OVP* [online]. Available at: <https://www.ebay.de/itm/FERODO-FRP-415-Scheibenbremsbelaege-NEU-OVP-/152088223227>
- [16] RACING, AP. *Radi-CAL™ R4 Racing Brake Fluid - CP6005* [online]. 2022. Available at: <https://apracing.com/race-car/brake-fluid/radi-cal-r4-racing-brake-fluid-cp6005>