

VYSOKÁ ŠKOLA POLYTECHNICKÁ JIHLAVA

Aplikovaná technika pro průmyslovou praxi

HYDROMECHANICKÝ SYSTÉM OVLÁDÁNÍ BRZD
LEHKÉHO LETADLA

Diplomová práce

Autor práce: David Šteffan

Vedoucí práce: Ing. Bc. Karel Dvořák, Ph.D.

Jihlava 2025

Vysoká škola polytechnická Jihlava

Tolstého 16, 586 01 Jihlava

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Autor práce: **Bc. David Šteffan**
Studijní program: Aplikovaná technika pro průmyslovou praxi
Obor: Aplikovaná technika pro průmyslovou praxi
Garant studijního programu: doc. Ing. Radek Kolman, Ph.D.

Název práce: Hydromechanický systém ovládání brzd lehkého letadla

Vedoucí práce: Ing. Bc. Karel Dvořák, Ph.D.

Cíl práce: Cílem práce je vývoj hydromechanické soustavy ovládání brzd letadla do maximální vzletové hmotnosti 600 kg. Hlavním navrhovaným modulem je hydraulický rozvaděč, ovládaný vstupy ovladačů brzd, výškového kormidla a směrového kormidla. Kombinací impulsů uvedených vstupů je vyvolán symetrický, nebo nesymetrický brzdný účinek na každém z kol hlavního podvozku letadla ostruhové koncepce. Vhodnou kombinací lze současně letoun brzdit a současně řídit směr při pohybu po zemi. Technické řešení je prostorově a silově dimenzováno pro letadla lehké kategorie. Výstupem práce je technická dokumentace uvedeného řešení ve formě modelů, technických výkresů a technického popisu, zahrnující hydraulický rozvaděč s příslušnými prvky a ovládací i silovou hydromechanickou soustavu.

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na vlastní vývoj hydromechanické soustavy pro ovládání brzd lehkého letadla. Hlavním výstupem práce je návrh hydraulického rozvaděče pro vyvolání symetrického nebo asymetrického brzdného účinku na kola podvozku osazená brzdami. Hlavní inovací je možnost ovládání hydraulického rozvaděče pomocí ovládacích prvků pro ovládání výškového a směrového kormidla umožňující tak vhodnou kombinací samotný letoun brzdit a současně řídit při pohybu na zemi. Výstupem práce je technická dokumentace konstrukčního řešení ve formě modelů, výkresů a technického popisu. Pro katalogové komponenty je vytvořena specifická nákupní specifikace obsahující název, specifické rozměry, případnou normu a katalogové číslo.

Klíčová slova

letadlo, brzdy, ovládání, hydraulika, rozvaděč, systém

Abstract

The diploma thesis is focused on the development of a hydromechanical system for controlling the brakes of a micro-light aircraft. The main output of the work is the design of a hydraulic distributor for inducing a symmetrical or asymmetrical braking effect on the wheels of the landing gear equipped with brakes. The main innovation is the possibility of controlling the hydraulic distributor using controls for controlling the elevator and rudder, thus allowing the aircraft itself to brake and simultaneously steer when moving on the ground with a suitable combination. The output of the work is technical documentation of the design solution in the form of models, drawings and technical description. A specific purchasing specification is created for catalog components containing the name, specific dimensions, possible standard and catalog number.

Keywords

aircraft, brakes, controls, hydraulics, switchgear, system

Prohlašuji, že předložená diplomová práce je původní a zpracoval/a jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušil/a autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, v platném znění, dále též „AZ“).

Byl/a jsem seznámen/a s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje **AZ**, zejména § 60 (školní dílo).

Podle § 47b zákona o vysokých školách souhlasím se zveřejněním své práce podle Směrnice pro vedení, vypracování a zveřejňování závěrečných prací na VŠPJ, a to bez ohledu na výsledek obhajoby.

Beru na vědomí, že VŠPJ má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom/a toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠPJ, která má právo ode mě požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených vysokou školou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše), z výdělku dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence.

V Jihlavě dne 26. listopadu 2025

.....

Podpis studenta

Poděkování

Rád bych v této části práce vyjádřil mé poděkování panu Ing. Bc. Karlu Dvořákovi, Ph.D. za cenné rady, vstřícnost a pomoc při konzultacích u zpracování mé diplomové práce. Dále chci poděkovat rodině za trpělivost a možnost studia na vysoké škole.

Obsah

Seznam obrázků.....	7
Seznam tabulek	9
Seznam zkratk.....	10
Úvod	12
1 Teoretická část	13
1.1 Historie letectví.....	13
1.2 Význam brzd a jejich použití	20
1.3 Lehký letoun	20
1.4 Řízení letadla.....	22
1.5 Brzdy letadel	24
1.6 Hydraulické ventily a rozvaděče	33
1.7 Brzdová kapalina.....	33
1.8 Letouny s ostruhovým podvozkem.....	36
1.9 Ovládání letadla s ostruhovým podvozkem	37
1.10 Další druhy podvozků letadel	38
2 Praktická část	41
2.1 Schématický návrh hydraulického rozvaděče.....	41
2.2 Výpočty a volba vhodného materiálu	48
2.3 Výběr těsnících kroužků a vhodných tolerancí dle tabulek	56
2.4 Tvorba modelů, výkresů a nákupní specifikace	60
2.5 Finální sestava a výkres sestavy.....	69
3 Diskuse	72
Závěr	73
Seznam použité literatury	74
Přílohy.....	76

Seznam obrázků

Obr. 1: První let montgolfiery	14
Obr. 2: Vzducholod' Hindenburg nad olympijským stadionem v Berlíně v Německu, srpen 1936.	15
Obr. 3: Letadlo bratří Wrightů	16
Obr. 4: Poslední dochovaný bombardér Ar 234B-2	17
Obr. 5: Douglas DC-3A.....	17
Obr. 6: Avia Av-14 / Iljušin Il-14	18
Obr. 7: Boeing 787 Dreamliner	19
Obr. 8: L-39C základní cvičný letoun	19
Obr. 9: Špaček SD-1 Minisport	21
Obr. 10: Síly působící na letadlo.....	22
Obr. 11: Ovládání letadla	23
Obr. 12: Rozložený pohled na sestavu jednokotoučové brzdy	25
Obr. 13: Pohled v řezu na jednokotoučový brzdový třmen Goodyear	26
Obr. 14: Dvukotoučová brzda	27
Obr. 15: Vícekotoučová brzda	28
Obr. 16: Vícekotoučová brzda s detaily automatického seřizovače	29
Obr. 17: Rozložené a detailní pohledy na segmentové brzdy rotoru	30
Obr. 18: Karbonová brzda pro Boeing 737.....	31
Obr. 19: Sestava brzdy expanzní trubky.....	32
Obr. 20: Rozložený pohled na brzdou expanzní trubky	32
Obr. 21: Letadlo s ostruhovým podvozkem	36
Obr. 22: Tříkolový podvozek předového typu	38
Obr. 23: Letoun An-225 Antonov	39
Obr. 24: B-47 Stratojet	39
Obr. 25: U-2 Dragon Lady.....	40
Obr. 26: B-52 Stratofotress	40
Obr. 27: Schéma hydraulického rozvaděče.....	42
Obr. 28: Schéma hydraulického rozvaděče v prvním stavu	43
Obr. 29: Schéma hydraulického rozvaděče v druhém stavu.....	44
Obr. 30: Schéma hydraulického rozvaděče v druhém stavu při sešlápnutí pravého pedálu směrového kormidla	45
Obr. 31: Schéma hydraulického rozvaděče v druhém stavu při sešlápnutí levého pedálu směrového kormidla	46
Obr. 32: První okruh bez přitažení páky řízení a sešlápnutí pravého pedálu.....	47
Obr. 33: První okruh bez přitažení páky řízení a sešlápnutí levého pedálu	47
Obr. 34: Rozměry O-kroužků.....	56
Obr. 35: Způsoby uložení O-kroužků a označení rozměrů.	57
Obr. 36: Tělo rozvaděče se zobrazením vnitřní struktury	60
Obr. 37: Řezy tělem rozvaděče	61
Obr. 38: Tělo rozvaděče se zobrazením vnitřní struktury z druhé strany.....	62
Obr. 39: Otvory označené žlutou barvou pro uchycení těla rozvaděče k rámu letadla	62

Obr. 40: Výrobní výkres těla rozvaděče	63
Obr. 41: Přehled navržených šoupátek.....	64
Obr. 42: Šoupátko 5/2.....	64
Obr. 43: Šoupátko 2/2.....	65
Obr. 44: Šoupátko 3/2.....	65
Obr. 45: Tyčka 1	65
Obr. 46: Šroubení 1	66
Obr. 47: Modely Pák.....	66
Obr. 48: Model Tyčky 2	67
Obr. 49: Výrobní výkres šoupátka 3	67
Obr. 50: Ukázka nákupní specifikace	68
Obr. 51: Finální sestava hydraulického rozvaděče.....	69
Obr. 52: Rozpad sestavy.....	70

Seznam tabulek

Tab. 1: Údaje vlastností brzdových kapalin.....	35
Tab. 2: Tabulka pro šířku a hloubku drážky O-kroužků.....	56
Tab. 3: Tabulka tvrdosti a mezery pro těsnící spáru	57
Tab. 4: Tabulka tolerance a lícování v mm.....	59
Tab. 5: Tabulka doporučené drsnosti povrchů	59
Tab. 6: Tabulka doporučené rozměry rádiusů v zápichu dle tloušťky O-kroužku.....	59
Tab. 7: Tabulka kusovníku sestavy	71

Seznam zkratek

SLZ	sportovní létající zařízení
Kč	korun českých
DOT	Department of Transportation (normy brzdových kapalin)
km/h	kilometrů za hodinu
kg	kilogram
Kč	Korun českých
l/hod	litrů za hodinu
l/s	litrů za vteřinu
°C	stupňů Celsia (teplota)
P	U výpočtů je udáván pod tímto znakem udáván tlak na plochu
PSI	imperiální jednotka tlaku
Bar	jednotka tlaku
MPa	Megapascal (Jednotka tlaku)
$F_{brzd.}$	brzdná síla udávaná jednotka N
N	jednotka síly (Newton)
m	hmotnost udávaná jednotka kg
a	značka pro zrychlení nebo zpomalení udávaná jednotka m/s^2
m/s^2	metry za sekundu na druhou
F_{kolo}	síla působící na jedno kolo udávaná jednotka N
A	plocha udávaná v mm^2
mm^2	milimetr čtvereční
D	značka průměru
mm	jednotka milimetr
Π	Ludolfovo číslo
V	objem udávaný v cm^3
cm^3	centimetry krychlové
H	výška neboli zdvih udávaný v mm
$V_{celk.}$	Celkový objem udávaný v cm^3
Q	hodnota průtok udávaná v l/min nebo přepočtená na l/s
T	doba dosažení účinku udávaná v sekundách

EN AW-6082 T6 (AlMgSi1) hliníková slitina

σ_{kluzu}	napětí v kluzu zvoleného materiálu udávaného v MPa
$\sigma_{dov.}$	dovolené napětí při návrhu zvoleného materiálu udávaného v MPa
K	koeficient bezpečnosti
t	tloušťka stěny udávaná v mm
h	tloušťka dna udávaná v mm
1.4112	martenzitická nerezová ocel s vyšším obsahem uhlíku
M_{max}	maximální ohybový moment
σ_{max}	maximální napětí při výpočtu udávaný v MPa
EPDM	materiál Etylénpropylenová pryž
d_1	vnitřní průměr O-kroužku v mm
d_2	tloušťka O-kroužku v mm
L_1	šířka drážky pro O-kroužek v mm
S	hloubka drážky pro dynamické utěsnění v mm
F	velikost těsnící spáry v mm
d_a	nejmenší průměr zápichu v mm
D_a	průměr válce šoupátka v mm
$D_{šoupátka}$	průměr šoupátka v mm
d_b	průměr ovládací tyčky v mm
D_b	největší průměr zápichu v šroubení v mm
$D_{díry}$	průměr díry v šroubení udávaný v mm
NX	software, pro strojírenské návrhy a konstrukce
SOLIDWORKS	software, pro strojírenské návrhy a konstrukce
step; stp	typ a formát souboru pro převod modelů mezi softwary
ml	mililitr
DIN 913	Zkratka označující příslušnou normu

Úvod

Diplomová práce se zabývá konstrukčním návrhem hydraulického rozvaděče pro ovládání brzd lehkého letounu. Samotný navržený hydraulický rozvaděč má být zakomponovaný do již fungujícího brzdového systému letadla s podvozkem ostruhové koncepce. Ostruhový podvozek se vyznačuje dvěma předními koly před těžištěm letadla a v zadní části se nachází jedno ostruhové koleso.

Navrhovaný rozvaděč má mít připojené ovládací prvky k výškovému kormidlu a ke dvěma pedálům ovládající směrové kormidlo. Dle specifické kombinace pozic ovládacích prvků je pomocí rozvaděče možno samotné letadlo brzdit oběma brzdami stejnou silou v předních dvou kolech, jako kdyby navrhovaný rozvaděč v systému vůbec nebyl a také možnost brždění pouze jedním zvoleným kolem, a tak možnost ovládání pohybu letadla na zemi.

Teoretická část diplomové práce nás seznámí se stručným přehledem a historickým vývojem samotného letectví od samotného počátku až po dnešní dny. Následuje vymezení pojmu lehkého letounu s vhodnými informacemi a s následným seznámením ovládání letadla a silami působící na letadlo během letu. Dále se v teoretické části nachází rešerše a představení jednotlivých typů brzd od kotoučových brzd až po druhy brzd jako jsou karbonové či expandérové brzdy. Následuje představení brzdové kapaliny, význam a její využití v brzdových systémech s požadovanými vlastnostmi. V této části jsou také vypsány nejpoužívanější druhy brzdových kapalin pod jejich označením DOT (Department of Transportation). V poslední teoretické kapitole diplomové práce se představuje podvozek typu ostruhové koncepce a jeho způsob řízení.

Praktická část se zabývá samotným konstrukčním návrhem samotného hydraulického rozvaděče, počínající od samotných návrhů schémat rozvaděče, přes základní pevnostní výpočty při zvolených hodnotách tlaku brzdové kapaliny pro zvolené letadlo o maximální vzletové hmotnosti nepřesahující 600 kg. Praktická část práce se také zabývá vhodnou volbou těsnících O-kroužků a dle tabulek dopočtem rozměrů navrhovaných komponent pro umístění navoleného těsnění. Mimo samotné rozměry jsou také dle tabulek zvoleny vhodné tolerance a případné drsnosti povrchu. V posledních kapitolách se práce zabývá popisem a tvorbou jednotlivých navrhovaných komponent pro hydraulický rozvaděč společně s výkresovou dokumentací a nákupní specifikací s krátkým popisem finální sestavy návrhu.

1 Teoretická část

Teoretické kapitoly diplomové práce se v první řadě zabývají představením počátku a historie samotného letectví. Následující vysvětlením pojmů jako je lehký letoun s vysvětlením základních ovládacích prvků letounu. Po těchto kapitolách se teoretická část diplomové práce zabývá základním výpisem a popisem jednotlivých druhů brzd, které jsou na letadlech používány jako jsou například různé typy kotoučových brzd a dalších typů. Po představení brzd se vyskytuje stručná kapitola zabývající se hydraulickými ventilech a rozvaděčích, která s odkazem na praktickou část, kde je toto téma při návrhu podrobněji popsáno. Dále se nachází kapitola o brzdových kapalinách a jejich rozdělení a vlastnostech. Poslední část teoretické práce popisuje koncept ostruhového podvozku letadla se způsobem ovládání. Následuje stručným popisem ostatních vybraných koncepcí podvozků letadel.

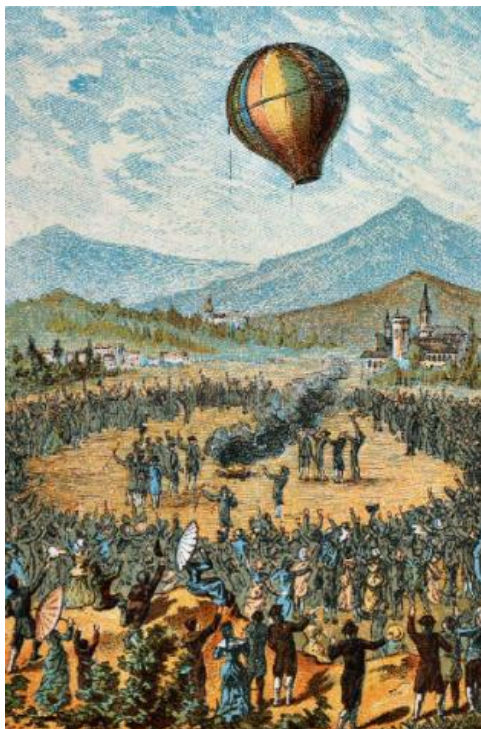
1.1 Historie letectví

1.1.1 Počátky letectví

Historie letectví má samotný počátek už ve starověké Číně, kde okolo 4. století před naším letopočtem byly používány první létací draky pro spojení s bohy. Zároveň se používaly při zahánění blížící se bouře a nepřátel. Původní draky bývaly vyráběny nejen z papíru, ale také z hedvábí a bambusových hůlek. (*Odkud pochází draci? Online. Kokiskashop. 2020*)

V 15. století Leonardo da Vinci, slavný umělec, vytvořil první nákresy létajícího stroje. V roce 1647 byl sestrojen model letadla se čtyřmi páry klouzavých křídel. Tento stroj ovšem nebyl dostatečně pevný na to, aby unesl člověka. V roce 1670 byla publikována teorie, dle které by bylo možné sestrojení létajícího stroje lehčího než samotný vzduch pomocí měděných válců naplněných plynem. Tuto teorii publikoval Francesco Terzi, někdy označovaný za otce aeronautiky. (*History of Aviation. Online. Spartan College of Aeronautics and Technology*)

Díky objevu vodíku bylo v 17. století možné sestrojit první vodíkový balón. Dále v roce 1783 bratři Montgolfierovi, Jacques-Étienne a Joseph-Michel, uskutečnili první let bezpilotního horkovzdušného balónu nad francouzským městem Annonay. Později v tomto roce provedli i let s posádkou která se skládala z Giroud de Villette, Jean-François Pilâtre de Rozier a Jean-Baptiste Réveillon. Později byl vypuštěn i první volně letící horkovzdušný balón, který uletěl vzdálenost devíti kilometrů za 25 minut. Samotné horkovzdušné balóny se ke konci 18. století staly velmi populární a pomáhaly vědcům pochopit vztah mezi výškou a chováním atmosféry. Ovšem jejich hlavní nevýhodou byla špatná ovladatelnost. (*History of Aviation. Online. Spartan College of Aeronautics and Technology*)



Obr. 1: První let montgolfiery.

Zdroj: Bratři Montgolfiérové: 5. června 1783, první veřejný let balónem na tržišti v Annonay.

Online. In: Vyletbalonem.cz

Problémy s ovladatelností balónů byly vyřešeny až s příchodem vzducholodí. Vzducholodě na rozdíl od horkovzdušných balónů byly naplněny vodíkem nebo heliem a dokázaly tak přepravovat cestující na větší vzdálenosti. První člověk, který vzlétl s volně letící vzducholodí poháněnou spalovacím motorem, byl Alberto Santos-Dumont, který v roce 1901 úspěšně přeletěl Paříž za méně než 30 minut. Jeho vzducholod' nesla jméno Number 6, ale již před ním v roce 1899 začínal pracovat Ferdinand von Zeppelin na prvních vzducholodích typu Zeppelin, které byly vybaveny motory Daimler. V roce 1902 uvedl španělský vynálezce Leonardo Torres Quevedo vlastní vylepšenou verzi Zeppelinu odstraňující problémy s vyvažováním. Éra vzducholodí skončila v roce 1937 po tragické nehodě vzducholodi Hindenburg v Lakehurstu. (*History of Aviation. Online. Spartan College of Aeronautics and Technology*)

Příčina zkázy vzducholodi Hindenburgu spočívala ve spojení statické elektřiny a úniku vodíku, který nadnášel vzducholod' při přistávání v Lakehurstu. Samotné přistání bylo zpožděno kvůli bouři. Během přistávacího manévru vznikla jiskra ze statické elektřiny, která pravděpodobně zapálila vodíkový plyn. Ten začal unikat z pláště vzducholodě v důsledku poškození a způsobil tak okamžitý požár, který loď během 34 sekund zcela zničil. (*Viky. Za pád Hindenburgu mohla statická elektřina, tvrdí britský vědec. Online. Lovecpokladu.cz. 2013*)



Obr. 2: Vzducholoď Hindenburg nad olympijským stadionem v Berlíně v Německu, srpen 1936.

Zdroj: The airship Hindenburg: The airship Hindenburg over the Olympic stadium in Berlin, Germany, August 1936. Online. In: Britannica

I přes to, že vzducholoďe a balóny přinesly významné pokroky v letectví, byly tak postupně zastíněny vynálezem letadel těžší než vzduch. Již v roce 1869 Samuel Pierpont Langley vypustil bezpilotní letoun těžší než vzduch na dlouhodobý let. Později získal od americké vlády finanční podporu za účelem vyvinutí pilotované verze jeho stroje. Tato verze měla sloužit k průzkumu nepřátelského území. Jeho návrh nakonec nebyl úspěšný. (*History of Aviation. Online. Spartan College of Aeronautics and Technology*)

V letech 1900 až 1902 bratři Wrightové, Wilbur a Orville z Daytonu v Ohio, navrhli a otestovali řadu modelů kluzáků a draků. Také si postavili vlastní aerodynamický tunel a vyvinuli různé nástroje k měření vzlaku a odporu na více než dvě stě návrzích křídel. Jejich třetí kluzák dosáhl úspěchu, protože překonal předchozí modely a významně přispěl k rozvoji letectví. (*History of Aviation. Online. Spartan College of Aeronautics and Technology*)

Bratři se také zaměřili v té době na největší výzvu, a tou byl řízený let s motorovým pohonem. Přišli s ovládáním letadla tím, že vyvinuli techniku kroucení křídel zajišťující kontrolu náklonu, zatáčení a přidali říditelnou směrovku. Dne 17. prosince roku 1903 úspěšně sestavili a vzlétli s prvním pilotovaným letounem těžším než vzduch. Tento den je dodnes považován za začátek moderního letectví. V tento den bratři Wrightové uskutečnili čtyři lety, nejdelší z nich, který řídil Wilbur, trval 49 vteřin a urazil vzdálenost 260 metrů. (*History of Aviation. Online. Spartan College of Aeronautics and Technology*)



Obr. 3: Letadlo bratří Wrightů

Zdroj: History of Aviation. Online. Spartan College of Aeronautics and Technology

V roce 1906 byl vytvořen světový rekord, kdy Alberto Santos-Dumont přeletěl nad Paříží vzdálenost 220 metrů za 21,5 vteřiny se svým letounem 14-bis. U svého letounu zlepšil stabilitu tím, že do křídel přidal pohyblivé části. V roce 1908 začal spolupracovat se společností Clément-Bayard na výrobě prvního sériově vyráběného letounu pod názvem Demoiselle No. 19. (*History of Aviation. Online. Spartan College of Aeronautics and Technology*)

1.1.2 Vývoj letectví od vojenského využití k civilnímu

Samotná letadla začala být využívána pro vojenské účely téměř okamžitě po jejich vynalezení. Itálie byla první zemí, která nasadila tuto technologii do bojových operací během italsko-turecké války v Libyi, kde používala vzducholodě a jednoplošníky k bombardování, ostřelování a přepravě zásob. (*History of Aviation. Online. Spartan College of Aeronautics and Technology*)

V roce 1914 Roland Garros přišel s nápadem připevnit kulomet k letounu. Později se do historie zapsal jako jeden z prvních leteckých es. (*History of Aviation. Online. Spartan College of Aeronautics and Technology; A trailblazer for aviation and a war hero: Roland Garros.*)

V roce 1915 Kurt Wintgens dosáhl prvního vzdušného vítězství díky stíhacímu letounu s kulometem. (*History of Aviation. Online. Spartan College of Aeronautics and Technology*)

Během bojů v první světové válce bylo letectví hojně využíváno, čímž hrálo rozhodující roli při bojích. Francie se v té době držela prvenství největšího výrobce letadel, kdy od roku 1914 do roku 1918 vyrobila přes 68 tisíc kusů letadel. Během druhé světové války se téměř všechny státy zaměřovaly na rozvoj a masovou výrobu létajících strojů všech kategorií, včetně stíhacích, strategických a střemhlavých bombardérů a bitevních letounů. (*History of Aviation. Online. Spartan College of Aeronautics and Technology*)

Zlom ve vojenském letectví přinesl objev a nasazení radarové technologie, čímž umožnil přesnější a efektivnější nasazení leteckých sil. V roce 1942 byl Arado Ar 234, první proudový motorem poháněný bombardér, uveden do provozu. (*History of Aviation. Online. Spartan College of Aeronautics and Technology*)



Obr. 4: Poslední dochovaný bombardér Ar 234B-2

Zdroj: Arado Ar 234 Blitz – poslední německý letoun na britské obloze. Online. ARMYWEB.cz. 2023

Během druhé světové války byl také značně urychlen vývoj vrtulníků, které byly hojně využívány až v dalších konfliktech. Po druhé světové válce bylo vybudováno v mnoha obcích letiště nebo přistávací dráhy. Díky tomuto došlo k obrovskému rozmachu civilního letectví, jelikož mnoho vojenských letadel bylo po válce přestavěno na dopravní stroje. Jedním takovým strojem se stal i známý Douglas DC-3 díky jeho spolehlivé celokovové konstrukci, vybavený pryžovými sedadly pro tlumení vibrací a plastovou izolací snižující hluk. Díky těmto inovacím se cestování na dlouhé vzdálenosti stalo pohodlnější a dostupnější pro širokou veřejnost. (*History of Aviation. Online. Spartan College of Aeronautics and Technology*)



Obr. 5: Douglas DC-3A

Zdroj: VOJENSKÝ HISTORICKÝ ÚSTAV PRAHA. Douglas DC-3A. Online. VHU Praha. 2020.

Letoun Douglas DC-3 je typický příklad letadla s ostruhovým typem podvozku. Obdobným příkladem je letadlo IL-14, tento typ byl ovšem osazen příďovým typem podvozku. Letadlo IL-14 je na obrázku níže.



Obr. 6: Avia Av-14 / Iljušin IL-14

Zdroj: Avia Av-14 / Iljušin IL-14. Online. Třebíč Nuclear Model Club

Letoun Iljušin IL-14 byl vyráběn licenčně v Československu pod názvem Avia Av-14 v letech 1956 až 1960 v pražské továrně Avia. Celkem se vyrobilo 203 kusů pro Československé aerolinie, vojenské letectvo a export. *(Avia Av-14 / Iljušin IL-14. Online. Třebíč Nuclear Model Club)*

Pro zajištění bezpečnosti, standardizace a efektivity civilního letectví byla v roce 1944 založena úmluva o mezinárodním civilním letectví. Díky sjednocení pravidel se létání stalo nejen bezpečnějším, ale také cenově dostupnějším, což umožnilo vznik velkých leteckých společností. *(History of Aviation. Online. Spartan College of Aeronautics and Technology)*

1.1.3 Moderní letectví

Éra digitalizace a technologické pokroky přinesly změny v leteckém průmyslu. Zavedení softwaru pro počítačem podporované navrhování a výrobu, které v 70. letech umožnilo vývoj vylepšených konstrukcí letadel, bylo zásadní. Například počítačové simulace pomohly při výrobě lehčích a zároveň odolnějších materiálů pro stavbu letadel. *(History of Aviation. Online. Spartan College of Aeronautics and Technology)*

Moderní letouny jsou vybaveny digitálními systémy, umožňující úplné nahrazení analogových a mechanických přístrojů. Významným milníkem se stalo použití takzvaného skleněného kokpitu v letadlech Boeing 767 v roce 1981. Moderní displeje v kombinaci s autopilotem zásadně změnily koncepci posádky pro řízení letounu, což se stalo klíčovým faktorem bezpečnosti letu. *(History of Aviation. Online. Spartan College of Aeronautics and Technology)*

Pojem skleněný kokpit neboli glass cockpit, znamená použití například digitálního LCD displeje k sjednocení a zobrazení klíčových informací o letu, navigaci a systémech, čímž poskytuje přehledný, grafický a komplexní pohled na situaci. *(Glass Cockpit. Online. AIR TEAM)*

Dalším zásadním pokrokem bylo využití kompozitních materiálů, například těch, které se uplatnily při konstrukci Boeingu 787 Dreamliner. Díky nim se podařilo výrazně snížit hmotnost

letadel, což přineslo vyšší palivovou úspornost. Tyto pokročilé materiály také umožnily vytvoření aerodynamických zakončení křídel, která nejen odlehčují konstrukci letounu, ale zároveň zlepšují jeho letové vlastnosti. (*History of Aviation. Online. Spartan College of Aeronautics and Technology*)



Obr. 7: Boeing 787 Dreamliner

Zdroj: BOENING. 787 Dreamliner family. Online. Boeing.

1.1.4 L-39 Albatros

V kapitole historie letectví stojí také za zmínku letoun zvaný L-39 Albatros. Letoun je koncipován jako cvičný dvoumístný proudový letoun a lehký bitevník, sériově vyráběný v letech 1971 až 1995 výrobcem Aero Vodochody v tehdejším Československu / České republice. Za tuto dobu bylo vyrobeno 3000 kusů a byl dodáván do více než 30 zemí světa. (*AERO VODOCHODY AEROSPACE a.s. 2024. L-39 Albatros; LETECKÉ MUZEUM KUNOVICE. b.r. Aero L-39 ZA Albatros*)



Obr. 8: L-39C základní cvičný letoun

Zdroj: AERO VODOCHODY AEROSPACE a.s. 2024. L-39 Albatros

Letoun L-39 Albatros disponuje podobným řešením řízení a brždění letadla při pohybu na zemi, jaké je úkolem zhotovení návrhu této závěrečné práce, ovšem pro lehká letadla s ostruhovou koncepcí podvozku.

Letoun L-39 je osazen třibodovým zatažitelným podvozkem příďového typu, kde jsou obě hlavní kola podvozku bržděna, příďové kolo je neřiditelné a nebržděné. Brzdy letounu jsou ovládány hydraulickou soustavou. Hydraulický tlak pracuje se jmenovitým tlakem 0,2 až 3,3 MPa (Megapascal). Pilot letadla ručně nastavuje brzdící tlak pro obě brzdy současně pomocí páčky na řídicí páce. Pokud chce využít diferenciální brždění pro řízení směru pohybu na zemi, musí využít nožní pedály řízení, které ovládají také směrové kormidlo. (HANČAR, Miroslav. *Popis L-39. Online. 2005*)

Při vyšlápnutí pedálů se ručně zvolený tlak rozdělí do samostatných okruhů levé a pravé brzdy. Pokud pilot vyšlápne pravý pedál, zvětší se tlak na pravou brzdou a letoun zatáčí doprava a naopak. (HANČAR, Miroslav. *Popis L-39. Online. 2005*)

1.2 Význam brzd a jejich použití

Aplikace brzd je klíčovým bezpečnostním prvkem ať již jakýchkoliv vozidel, tak i letadel, hlavně na zemi. Hlavním účelem brzd je možnost regulace rychlosti nejčastěji za použití tření a zajištění možnosti letadlo bezpečně zastavit v požadovaném čase a na požadovaném místě nebo vzdálenosti. Bez aplikace brzd by nebylo možné efektivně reagovat na náhlé překážky, situace na trati nebo změny v terénu, což by vedlo k výraznému zvýšení rizik vzniku nehod.

Samotná funkce brzd nespočívá pouze v brždění, ale i v možnosti ovládnutí letadla, dodržování rychlostních limitů na letištích a udržení stability při pohybu. Brzdové systémy také přispívají k ochraně ostatních účastníků a umožňují pilotu udržet kontrolu nad letadlem i v krizových situacích.

Bezpečnostní význam brzd a jejich osazení do všech druhů letadel je tedy zásadní v tom, že tvoří neoddělitelnou součást řízení a jsou nezbytné pro bezpečný a efektivní provoz.

1.3 Lehký letoun

Lehká letadla jsou specifická svou dostupností pro amatérské stavitele a nižšími provozními náklady oproti běžným letadlům. Také umožňují efektivní turistické cestování na dlouhé vzdálenosti a mají vysoké výkony mezi sportovními letadly. (*Ultralehké letouny. Online. Letecká amatérská asociace ČR*)

Dle zákona o civilním letectví (Zákon č. 49/1997 Sb.) spadají tato letadla do národní kategorie SLZ – sportovní létající zařízení, která je konvertována do vybraných evropských zemí. ((ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon č. 49/1997 Sb., o civilním letectví a o změně a doplnění zákona č. 455/1991 Sb.)

1.3.1 Vymezení kategorie

Lehký letoun je malé motorové letadlo, určené maximálně pro dvě osoby. Konstrukce letounu musí zajišťovat nízkou pádovou rychlost nepřesahující 83 km/h. Maximální vzletová hmotnost těchto letadel je obvykle do 600 kg, avšak u modelů uzpůsobených pro přistávání na vodě může být limit navýšen až na 650 kg. Tyto letouny jsou oblíbené pro rekreační i sportovní létání díky

své ekonomické provozní náročnosti a dostupnosti. (*Ultralehké letouny. Online. Letecká amatérská asociace ČR*)

1.3.2 Pořizovací náklady

Cena lehkého letadla se odvíjí od způsobu pořízení – vlastní stavba může stát několik set tisíc korun, zatímco továrně vyrobený model vychází až na 4 miliony Kč. Nejvýznamnější položkou je motor, který lze získat úpravou automobilového agregátu. (*Ultralehké letouny. Online. Letecká amatérská asociace ČR*)

1.3.3 Provozní náklady

Cena letové hodiny se pohybuje mezi 400 až 3 000 Kč podle typu letounu a provozovatele. Vlastnictví letadla přináší dodatečné náklady, jako je palivo (7–20 l/hod podle modelu) a uskladnění (15–30 tisíc Kč ročně) a servisní kontroly. Velký podíl fixních nákladů také představuje pojištění letounu. (*Ultralehké letouny. Online. Letecká amatérská asociace ČR*)

1.3.4 Pilotní výcvik

Létání s tímto typem letadla vyžaduje nejdelší a zároveň nejdražší výcvik mezi sportovními letadly, kromě vrtulníků. Výcviková střediska nabízejí profesionální kurzy. (*Ultralehké letouny. Online. Letecká amatérská asociace ČR*)

1.3.5 Výhody a nevýhody

Moderní lehká letadla dosahují rychlostí srovnatelných s vyššími kategoriemi letadel, umožňují zahraniční lety a nejsou tolik závislé na počasí. Hlavní nevýhodou jsou vyšší pořizovací a provozní náklady, nutnost vhodné infrastruktury pro vzlety, přistání a nároky na uskladnění. (*Ultralehké letouny. Online. Letecká amatérská asociace ČR*)



Obr. 9: Špaček SD-1 Minisport

Zdroj: Špaček SD1 Minisport. Online. Aero klub Náchod-Vysokov.

Navrhovaný hydraulický rozvaděč v praktické části práce je určen pro implementaci do kategorie lehkých letadel s ostruhovým typem podvozku pro zjednodušení a zlepšení ovládání při pohybu letadla na zemi. Do této kategorie se řadí i letoun Špaček SD-1 Minisport, kde by navrhovaný systém mohl najít uplatnění.

1.4 Řízení letadla

1.4.1 Síly působící na letadlo

Samotné letadlo je schopno létat pomocí čtyř základních sil: síly vztlaku, tíhy, tahu a odporu. Letadlo je schopno udržet se ve vzduchu díky aerodynamickému jevu, který vzniká obtékáním vzduchu kolem křídla. Rozdíl v tlaku nad a pod křídlem je vytvářen vztlakem, působícím proti tíze letadla a umožňuje mu vzlétnout. Aerodynamické síly se mimo jiné podílejí i na ovládání letadla na zemi při popojíždění, vzletu, přistání a dalších úkonech. (Podstata létání. Online. Blue sky Aviation)



Obr. 10: Síly působící na letadlo

Zdroj: Podstata létání. Online. Blue sky Aviation

Pohyb letadla vpřed je zajištěn pomocí tahu motoru, který překonává přirozený odpor vzduchu bránící letu. Pokud letadlo letí rovnoměrně a udržuje stálou rychlost i výšku, znamená to, že všechny čtyři síly jsou v rovnováze neboli vztlak se přesně rovná tíze letadla a tah odpovídá odporu vzduchu. (Podstata létání. Online. Blue sky Aviation)

1.4.2 Ovládání letadla

Pro správné ovládání letadla je základem stabilita, která zajišťuje, aby letadlo nedělalo samo od sebe nežádoucí pohyby. Ke stabilitě přispívají ocasní plochy a mírně nahoru skloněná křídla, udržující rovnováhu.

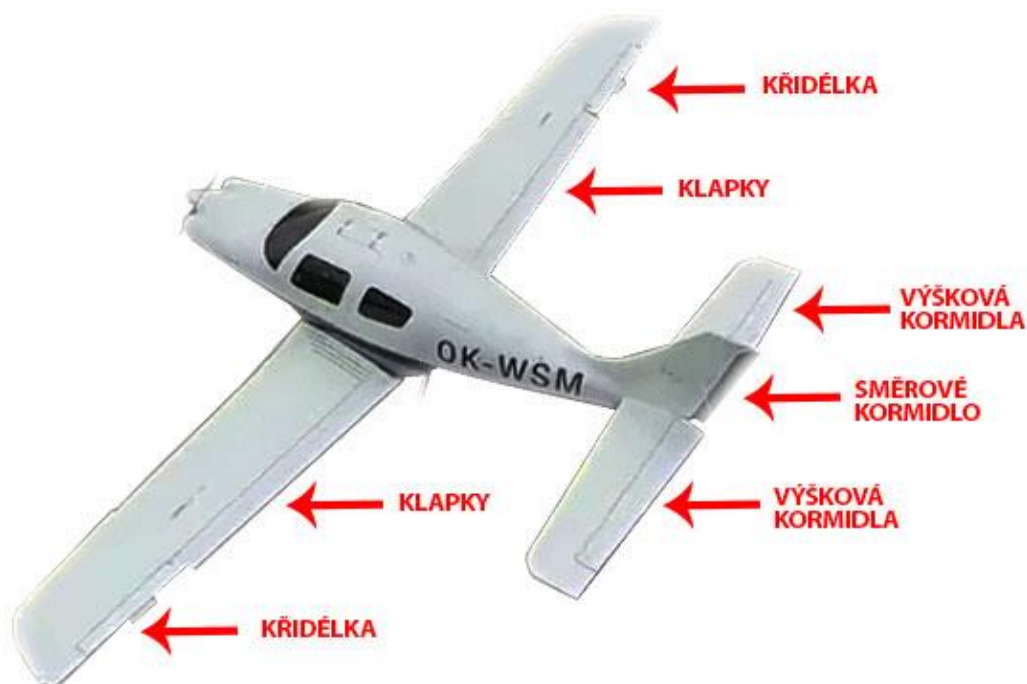
Pro ovládání letu slouží pohyblivé plochy na křídlech a ocase, nazývané křídélka, výšková a směrová kormidlo. Ty upravují proudění vzduchu kolem letadla, což umožňuje pilotovi měnit směr a výšku letu dle potřeby. (Podstata létání. Online. Blue sky Aviation)

1.4.3 Klopení

Pro zvednutí příďe letadla musí být výšková kormidla vychýlena nahoru a letoun začne stoupat. Křídélka a směrové kormidlo přitom zůstávají v neutrální pozici. Pro klesání musí být výšková kormidla vychýlena dolů. Tento pohyb, kdy příď letadla se zvedá či klesá, se nazývá klopení. (Podstata létání. Online. Blue sky Aviation)

1.4.4 Klapky křidel

Pro přistávání a vzlet jsou využívány speciální zařízení pro úpravu tvaru křidel. Tato zařízení se nazývá klapky a sloty. Tyto součásti se vysouvají pro zvýšení vztlaku, což umožňuje letadlům přistávat a vzletat v nižších rychlostech. (Podstata létání. Online. Blue sky Aviation)



Obr. 11: Ovládání letadla

Zdroj: Podstata létání. Online. Blue sky Aviation

1.4.5 Připojení navrhovaného rozvaděče k ovládacím prvkům letadla

Navržený hydraulický rozvaděč má být připojen k již zabudovaným ovládacím prvkům zvoleného lehkého letadla. Původní ovládání obou brzdy má zůstat stejné jako před instalací rozvaděče. Ovládací prvky rozvaděče pro možnost diferenciálního brzdění mají být připojeny k ovládací páce (kniplu) letadla tak, aby po přitažení došlo k rozdělení okruhů brzdového systému. Ovládání jednotlivých brzd má být spoutáno s pedály směrového kormidla. Tímto způsobem má zůstat stejný počet ovládacích prvků letadla, aby manipulace s letadlem nebyla po připojení zařízení složitější než před instalací.

1.5 Brzdy letadel

1.5.1 Brzdové systémy letadel

Z počátku letadla nebyla vybavena žádným brzdovým systémem, který by je mohl zpomalit nebo zastavit na zemi. Místo toho se spoléhala na pomalou rychlost, měkké povrchy letišť a tření ocasního smyku, které vznikalo při pozemním provozu. Samotné brzdové systémy se pro letadla staly běžnými až po první světové válce, kde byly zapotřebí kvůli zvyšující se rychlosti a složitosti letadel, zejména na zpevněných přistávacích drahách. Dnes jsou již všechna moderní letadla vybavena brzdami, zajišťující bezpečný pohyb po zemi. Brzdy zpomalují, zastavují a pomáhají při ovládání letadla na zemi. Brzdy jsou obvykle nainstalovány na hlavních kolech, zatímco předové nebo zadní kolo brzdový systém neobsahuje.

Brzdový systém ovládá pilot pomocí pedálů směrového kormidla, kdy tlakem na pravý pedál aktivuje pravou brzdu a levým pedálem levou. Samotný brzdový systém funguje na přeměně pohybové energie, pomocí tření na teplo, což klade vysoké nároky na jejich odolnost. Pro brzdový systém letadla je důležitá pravidelná kontrola a jeho údržba pro bezchybný a bezpečný provoz.

Nejčastěji jsou u moderních letadel využívány kotoučové brzdy, kde se samotný kotouč otáčí společně s kolem a třmen vytváří při brždění tření, čímž zpomaluje pohyb otáčení kotouče a kola. Samotná konstrukce kotoučových brzdových systémů závisí na velikosti, hmotnosti a přistávacích rychlostech samotného letadla. Kotoučové brzdy existují v různých provedeních od jednoduchých až po dvojité či vícenásobné kotouče. Velká letadla často využívají segmentové rotorové brzdy, zatímco starší modely letadel využívají brzdy s expanzní trubicí. V současné době se stále více využívají karbonové disky nabízející vyšší výkon a odolnost. (*Aircraft Brakes. Online. Aeronautics guide*)

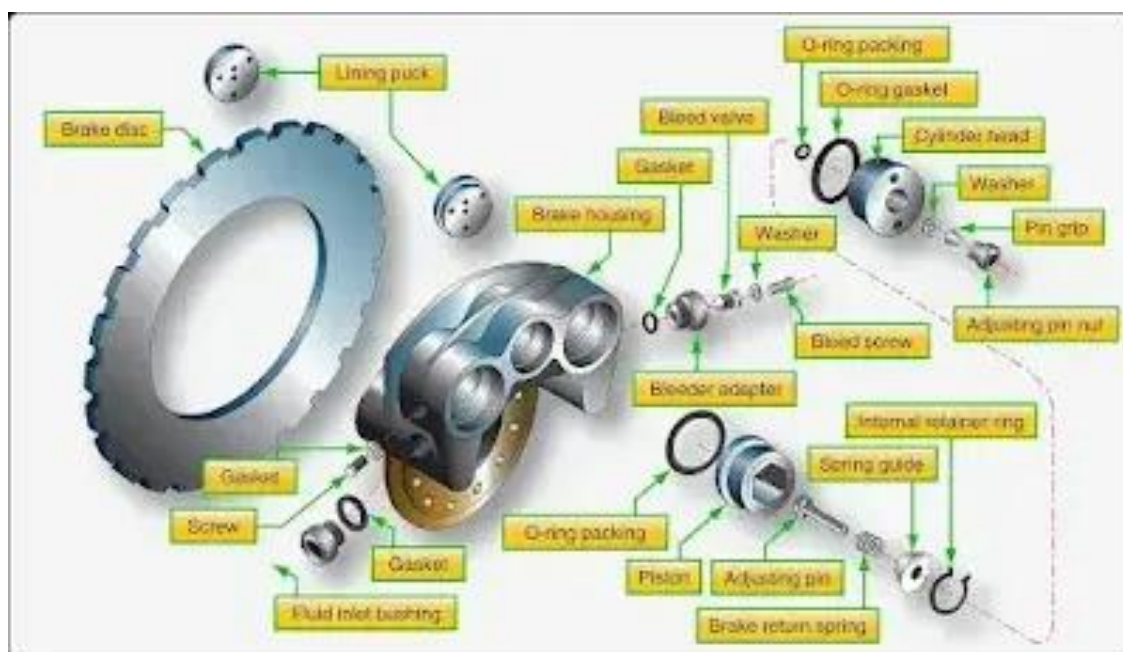
1.5.2 Jednokotoučové brzdy

Lehká a malá letadla k brždění využívají jednoduchý kotouč připevněný ke každému kolu. Jak již bylo psáno výše, u tohoto systému se kotouč otáčí společně s kolem, zatímco brzdový třmen je připevněný k nápravě podvozku a pomocí tření zpomaluje otáčení kotouče a kola. Samotné brždění funguje na principu, že hydraulické písty v třmenu tlačí brzdové destičky proti kotouči, čímž vzniká tření a letadlo se zpomaluje. Hydraulický tlak potřebný k procesu se vytváří v hlavních válcích. Tyto válce jsou propojeny s pedály směrového kormidla. (*Aircraft Brakes. Online. Aeronautics guide*)

1.5.3 Plovoucí kotoučové brzdy

Tento typ brzdy je zkonstruován tak, že třmen obklopuje kotouč a obsahuje několik hydraulických válců, nejčastěji tři, ale jejich počet se může lišit dle typu brzdy. Každý hydraulický válec obsahuje sestavu ovládacího pístu, zahrnující píst, vratnou pružinu a automatický seřizovací čep. Brzdová sestava se skládá ze šesti brzdových obložení. Tři z nich jsou připevněny k pohyblivým pístům na vnější straně třmenu a při brždění se posouvají směrem k disku, čímž vytvářejí třecí sílu. Zbýlá obložení jsou pevně uchycena na vnitřní straně třmenu

a nepohybují se, čímž pomáhají vyvinout tlak na kotouč, a tak zpomalit otáčení kola. (*Aircraft Brakes. Online. Aeronautics guide*)

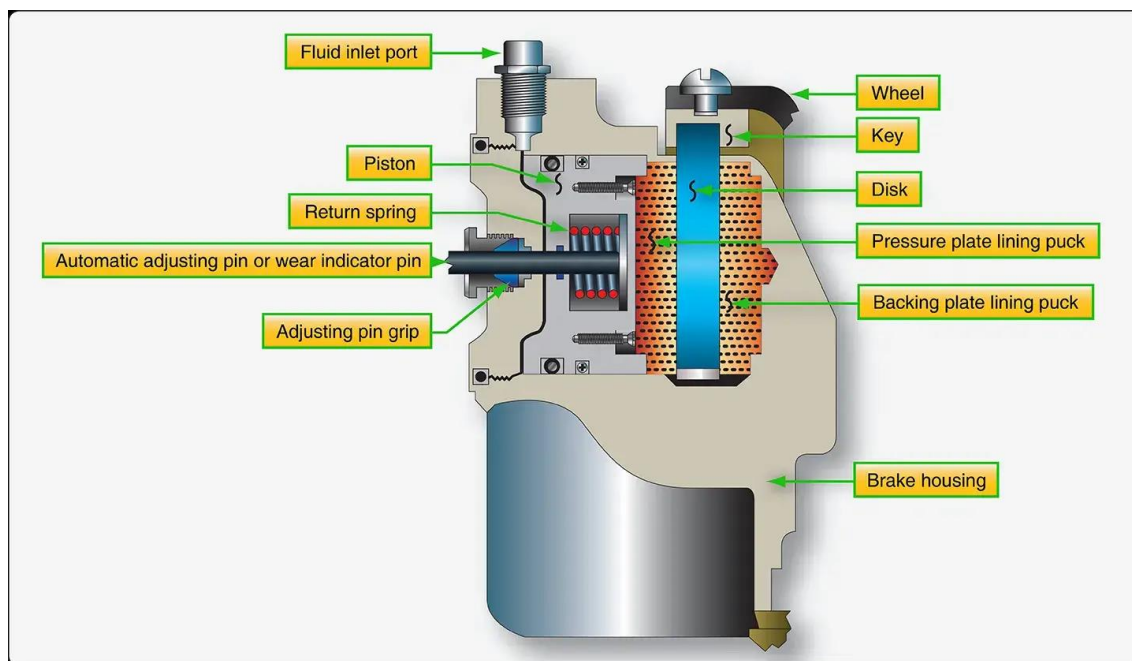


Obr. 12: Rozložený pohled na sestavu jednokotoučové brzdy

Zdroj: Aircraft Brakes. Online. Aeronautics guide

Brzdový kotouč je připevněn ke kolu s možností se pohybovat v klíčovách drážkách do stran, což mu umožňuje takzvaný plovoucí efekt. Při sešlápnutí brzd se písty vysunou a přitlačí brzdové obložení ke kotouči. Samotný kotouč se mírně posouvá, dokud se také pevné brzdové obložení na vnitřní straně třmenu nezačnou dotýkat jeho povrchu. Výsledkem tohoto pohybu je rovnoměrné tření po obou stranách disku, čímž zpomaluje otáčení kola. (*Aircraft Brakes. Online. Aeronautics guide*)

Při uvolnění brzdového tlaku se pomocí vratné pružiny vrací píst zpět do výchozí polohy, čímž se mezi kotoučem a brzdovým obložением vytvoří opět předepsaná mezera. Tato mezera se díky samo nastavovacímu mechanismu udržuje konstantní bez ohledu na opotřebení obložení. Seřizovací čep, který se pohybuje s pístem, se zastaví v určité poloze, což má tak za následek konzistentní brzdový účinek. Vyčnívající část čepu poté slouží jako indikátor opotřebení, přičemž minimální délka vysunutí je dána výrobcem pro zachování letuschopnosti brzdového systému. Tento čep je možné vidět na obrázku níže. (*Aircraft Brakes. Online. Aeronautics guide*)



Obr. 13: Pohled v řezu na jednokotoučový brzdový třmen Goodyear

Zdroj: Aircraft Brakes. Online. Aeronautics guide

V brzdovém třmenu jsou speciální kanálky, umožňující pohyb hydraulické kapaliny a správné šíření tlaku při brzdění. Součástí třmenu je také otvor pro odvodu vzduchu. Tento otvor se využívá k odstraňování vzduchu z brzdového systému. Tento proces se nazývá odvodušňování brzd a měl by být prováděn v souladu s pokyny výrobce. (*Aircraft Brakes. Online. Aeronautics guide*)

1.5.4 Pevné kotoučové brzdy

Mimo plovoucí kotoučové brzdy se také často využívá kotoučové brzdy s pevným kotoučem a plovoucím třmenem. U tohoto typu brzd je kotouč pevně připevněn ke kolu a místo něj se při působení tlaku bočně pohybuje brzdový třmen s obložení. Tento typ brzd se běžně používá u lehkých letadel a osobních automobilů. (*Aircraft Brakes. Online. Aeronautics guide*)

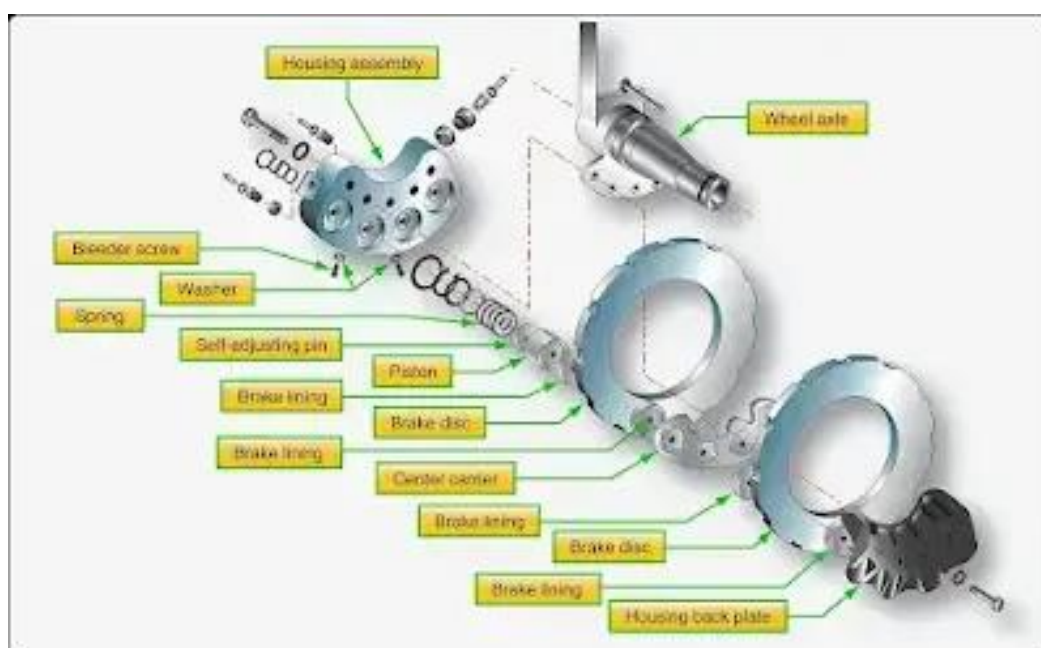
Tato konstrukce umožňuje automatické vyrovnání brzdového třmenu a obložení vůči kotouči. Brzdové destičky jsou připevněny k přitlačné a zadní desce. Přitlačnou deskou procházejí dva kotevní šrouby a jsou upevněny k válcové sestavě, zatímco jejich opačné konce se mohou volně pohybovat v pouzdech momentové desky, která je připevněna k nápravě. Pokud je na brzdy při brzdění vyvinut tlak, tak třmen a destičky se přizpůsobí poloze kotouče pomocí posuvného pohybu na kotevních šroubech. Tento pohyb zajišťuje rovnoměrné rozložení tlaku na obě strany kotouče, což má za následek zpomalování jeho otáčení. (*Aircraft Brakes. Online. Aeronautics guide*)

Samotná údržba a kontrola jednokotoučových brzdových systémů s plovoucím třmenem je obdobná jako u jiných typů brzd. Je potřebné pravidelné kontrolování opotřebení obložení, kotoučů a případná výměna nadlimitně opotřebovaných dílů. Po výměně se provádí provozní test spočívající v popojíždění letadla a ověřování, zda mají obě hlavní kola stejný brzdový účinek při stejném tlaku působícím na pedály. Samotné pedály by měly být pevné. Nesmí být měkké nebo houbovité. Po uvolnění tlaku musí brzdy okamžitě reagovat, a to bez odporu. (*Aircraft Brakes. Online. Aeronautics guide*)

1.5.5 Dvoukotoučové brzdy

Tyto brzdy se používají u letadel, u kterých jediný kotouč na každém kole neposkytuje už dostatečný brzdný účinek. Místo jednoho kotouče připojeného ke kolu jsou připevněny dva kotouče. Mezi těmito kotouči se nachází středový nosič. Tento nosič obsahuje brzdová obložení na obou stranách, která při brzdění tlačí na oba kotouče současně. Tímto se zvyšuje tření při brzdění a je zvýšena účinnost brzdění. Montážní šrouby třmenu jsou u tohoto typu delší, protože prochází nejen zadní deskou, ale i středovým nosičem, který drží celou sestavu pohromadě. Tento typ brzd je využíván u letadel, která vyžadují vyšší brzdný výkon, ale stále nejsou dostatečně těžká na to, aby potřebovala vícekotoučové brzdy. (*Aircraft Brakes. Online. Aeronautics guide*)

Schéma dvoukotoučové brzdy je zobrazen na obrázku níže.



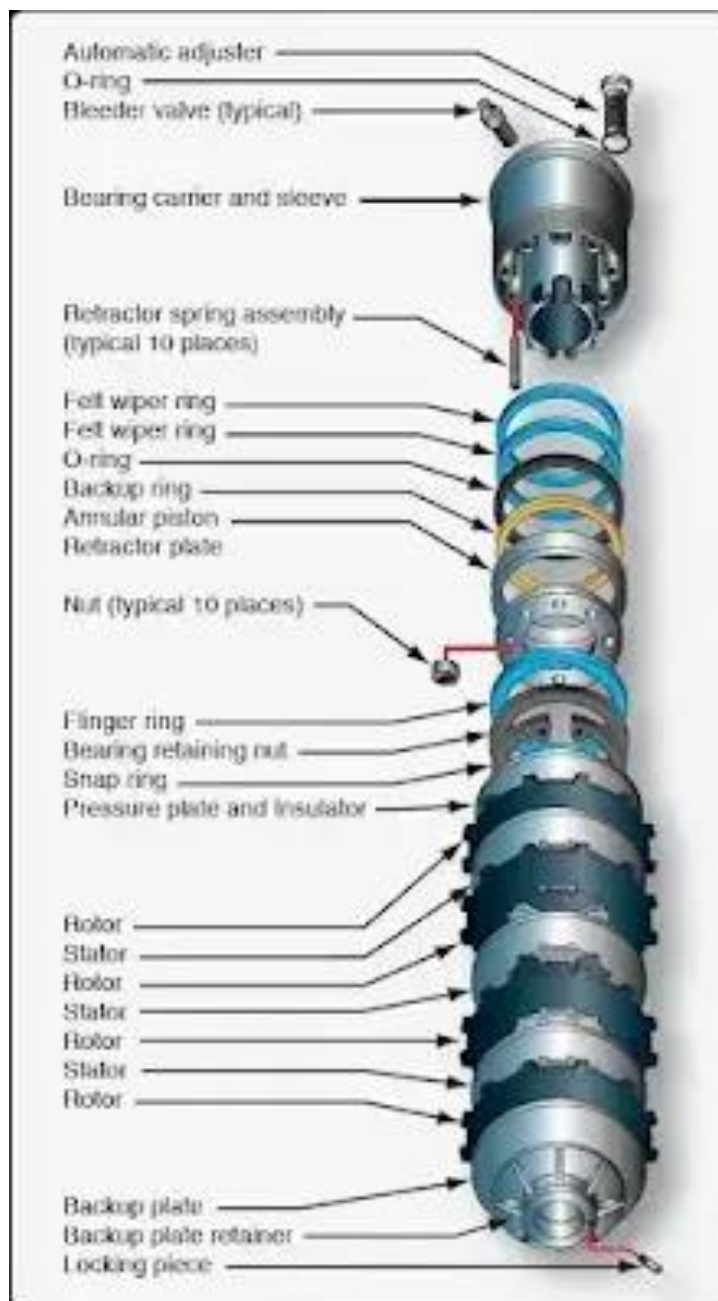
Obr. 14: Dvoukotoučová brzda

Zdroj: Aircraft Brakes. Online. Aeronautics guide

1.5.6 Vícekotoučové brzdy

Tento typ brzd se využívá u velkých a těžkých letadel, která potřebují vysoký brzdný výkon. Tyto brzdy jsou navrženy tak, aby fungovaly ve spojení s řídícími ventily posilovače brzd nebo hlavními válci posilovače výkonu. Samotná brzdová soustava se skládá z prodlouženého ložiskového nosiče, podobného torzní trubce. Tento nosič je upevněn k přírubě nápravy. Nosič drží hlavní části brzd, jako je prstencový válec a píst, několik ocelových kotoučů střídajících se s bronzovými nebo měděnými kotouči, zadní desku a její držák, jak je možné vidět na obrázku níže.

Ocelové statory jsou upevněny k nosiči ložiska, zatímco měděné / poniklované rotory jsou propojeny s rotujícím kolem. Pokud je na píst vyvinut hydraulický tlak, celá sada statorů a rotorů se stlačí, což vytvoří intenzivní tření a vysoké teploty, čímž se efektivně zpomaluje rotace kola. (*Aircraft Brakes. Online. Aeronautics guide*)

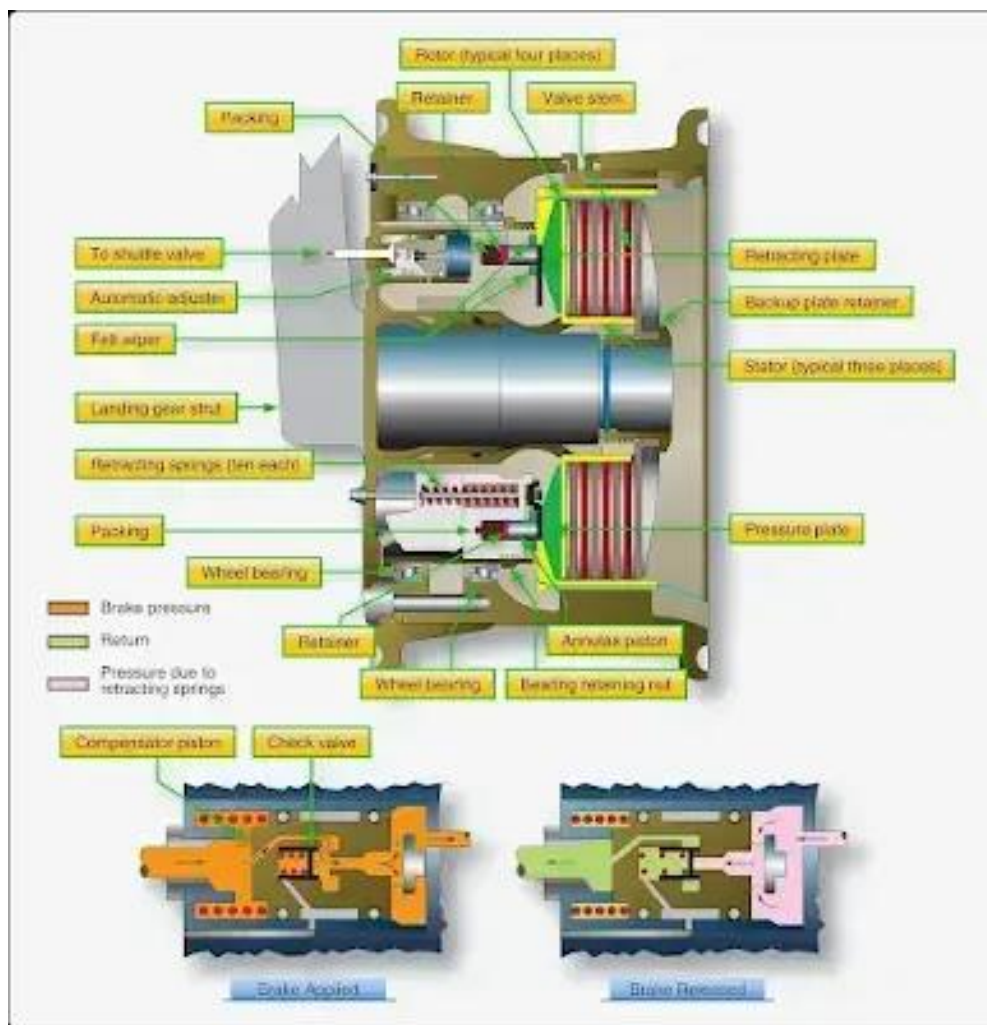


Obr. 15: Vícekotoučová brzda

Zdroj: Aircraft Brakes. Online. Aeronautics guide

Podobně jako u jednokotoučových a dvukotoučových brzd se po uvolnění hydraulického tlaku píst vrací zpět do komory pouzdra nosiče ložiska díky zatahovacím pružinám. Hydraulická kapalina pak odtéká zpět do vratného potrubí přes automatický seřizovač. Ten zajišťuje, že v brzdovém systému zůstává přesně odměřené množství kapaliny, které je nezbytné pro udržení správné vzdálenosti mezi rotory a statory. (*Aircraft Brakes. Online. Aeronautics guide*)

Opotřebení těchto brzd se obvykle kontroluje pomocí speciálního měřidla, které není součástí samotné brzdové sestavy. Tyto brzdy se častěji vyskytují u starších dopravních letadel. Jejich rotory a statory mají poměrně malou tloušťku, přibližně 1/8 palce, což znamená, že neodvádějí teplo příliš efektivně a mají tendenci se deformovat. (*Aircraft Brakes. Online. Aeronautics guide*)



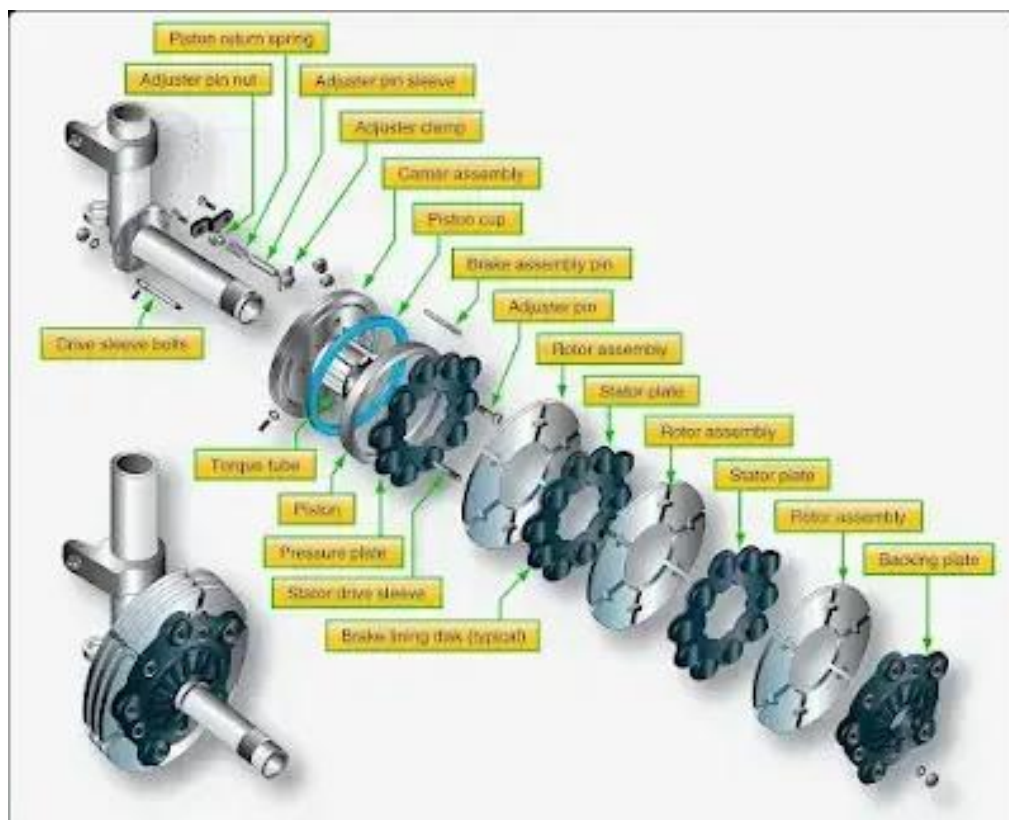
Obr. 16: Vícekotoučová brzda s detaily automatického seřizovače

Zdroj: Aircraft Brakes. Online. Aeronautics guide

1.5.7 Segmentované kotoučové brzdy rotoru

Velká a výkonná letadla při brzdění generují značné množství tepla, což může být problém. Aby se teplo lépe odvádělo, byly vyvinuty segmentové kotoučové brzdy rotoru. Tyto brzdy jsou vylepšenou verzí vícekotoučových brzd s modernějším designem. Existuje několik variant, přičemž většina z nich obsahuje prvky pro efektivní rozptýl tepla. Jsou speciálně upraveny pro použití s vysokotlakými hydraulickými systémy brzd. Brzdění funguje na principu několika stacionárních brzdových obložení s vysokým třením, která se dostávají do kontaktu s rotujícími segmenty. Rotory mají štěrby nebo jsou rozděleny do sekcí s mezerami mezi nimi, což pomáhá s odvodem tepla a dává brzdám jejich charakteristický název. Tento typ brzd je běžný u velkých dopravních a vysoce výkonných letadel. (Aircraft Brakes. Online. Aeronautics guide)

Segmentová rotorová brzda má podobnou konstrukci jako vícekotoučová brzda. Její sestava zahrnuje několik klíčových komponent: unašeč, píst s těsněním, přitlačnou desku, pomocnou statorovou desku, segmenty rotoru, statorové desky, automatické seřizovače a opěrnou desku. Tyto komponenty jsou zobrazeny na obrázku níže. (Aircraft Brakes. Online. Aeronautics guide)



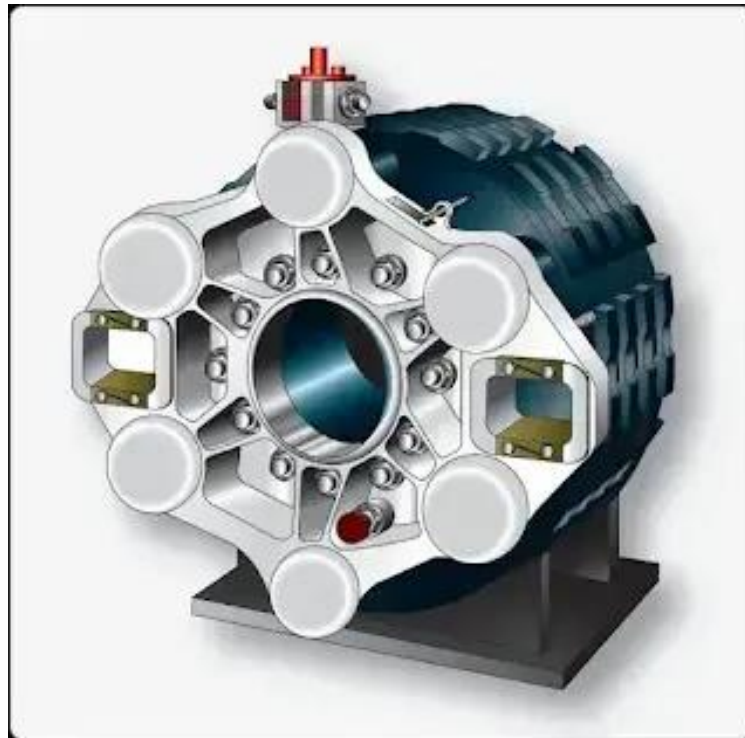
Obr. 17: Rozložené a detailní pohledy na segmentové brzdy rotoru

Zdroj: Aircraft Brakes. Online. Aeronautics guide

1.5.8 Karbonové brzdy

Segmentovaná vícekotoučová brzda slouží v leteckém průmyslu spolehlivě již mnoho let. Postupně se vyvíjela s cílem snížit hmotnost a zároveň efektivně odvádět teplo vznikající při brzdění. Nejmodernější verzí této technologie je karbonová kotoučová brzda, která se dnes využívá u výkonných letadel a dopravních strojů. Název karbonová brzda vychází z použití uhlíkových vláken při výrobě brzdových rotorů. *(Aircraft Brakes. Online. Aeronautics guide)*

Karbonové brzdy jsou až o 40 % lehčí než klasické brzdové systémy, což u velkých dopravních letadel znamená úsporu stovek kilogramů. I když jsou kotouče z uhlíkových vláken silnější než jejich slinuté ocelové protějšky, jsou výrazně lehčí. Zvládají teploty až o 50 % vyšší než ocelové brzdy, přičemž jejich maximální provozní teplota je omezená pouze tepelnou odolností okolních komponent. Karbonové brzdy mohou snést až dvakrát až třikrát více tepla než ocelové varianty používané mimo letectví. Navíc odvádějí teplo efektivněji, přičemž si zachovávají pevnost a stabilní rozměry i při extrémních teplotách. Další výhodou je jejich delší životnost – vydrží o 20 až 50 % déle než ocelové brzdy, což snižuje náklady na údržbu. Hlavní nevýhodou zůstává jejich vysoká výrobní cena, ale očekává se, že s vývojem technologie a rostoucí poptávkou budou tyto náklady postupně klesat. *(Aircraft Brakes. Online. Aeronautics guide)*



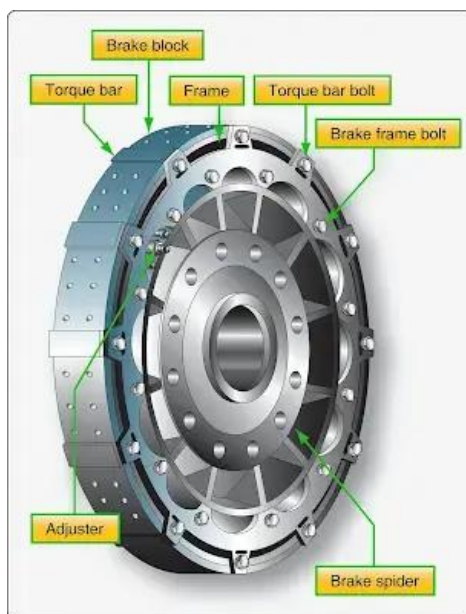
Obr. 18: Karbonová brzda pro Boeing 737

Zdroj: Aircraft Brakes. Online. Aeronautics guide

1.5.9 Expandérové brzdy

Expandérové brzdy představují specifický typ brzdového systému, který byl využíván v leteckém průmyslu především mezi 30. a 50. lety 20. století. Tento systém je charakteristický svou lehkou konstrukcí a nízkotlakým provozem. Brzda je připevněna k přírubě nápravy a umístěna do brzdového bubnu. *(Aircraft Brakes. Online. Aeronautics guide)*

Klíčovým prvkem je tkaninou vyztužená neoprenová trubka, která je upevněna po obvodu momentové příruby. Tato trubka je vybavena brzdovými špalíky z materiálu podobného brzdovému obložení. Jejímu obvodovému pohybu brání momentové tyče, které jsou upevněny mezi jednotlivými špalíky. Tento systém zajišťuje rovnoměrné rozložení brzdné síly a efektivní zpomalení letadel. *(Aircraft Brakes. Online. Aeronautics guide)*



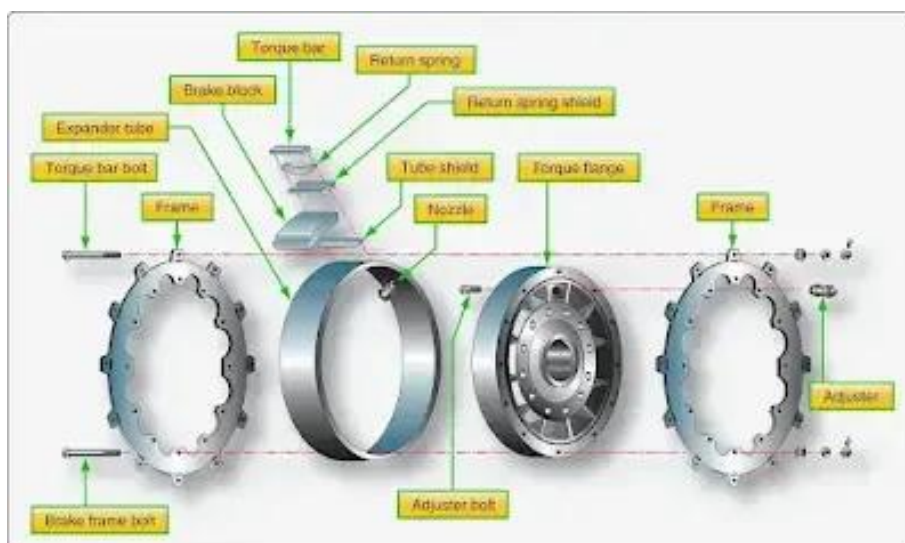
Obr. 19: Sestava brzdy expanzní trubky

Zdroj: Aircraft Brakes. Online. Aeronautics guide

Expandérová trubka obsahuje na vnitřním povrchu kovovou trysku, kterou je pod tlakem přiváděna hydraulická kapalina. Při aktivaci brzd dojde k rozpínání trubky směrem ven, čímž se brzdové špalíky přitlačí k bubnu kola a vznikne tření zpomalující jeho otáčení. Síla brzdění roste úměrně se zvyšujícím se hydraulickým tlakem. (*Aircraft Brakes. Online. Aeronautics guide*)

Po uvolnění tlaku se trubka díky poloeliptickým pružinám vrací zpět do původního tvaru. Mezera mezi trubkou a bubnem je u některých modelů nastavitelná pomocí seřizovače, jehož správné nastavení specifikuje výrobce. (*Aircraft Brakes. Online. Aeronautics guide*)

Ačkoliv byly expandérové brzdy funkční, měly i své nevýhody – při nižších teplotách docházelo k jejich smršťování, při zahřátí naopak k bobtnání a případnému úniku kapaliny. Tyto problémy vedly k postupnému nahrazení expandérových brzd kotoučovými systémy. (*Aircraft Brakes. Online. Aeronautics guide*)



Obr. 20: Rozložený pohled na brzdu expanzní trubky

Zdroj: Aircraft Brakes. Online. Aeronautics guide

1.6 Hydraulické ventily a rozvaděče

Hydraulické ventily a rozvaděče představují klíčové prvky v hydraulických systémech. Tyto součásti umožňují řízení směru, tlaku a průtoku pracovních kapalin. Hlavní funkcí těchto součástí je zajištění správné distribuce energie v systémech, která ovlivňující rychlost, sílu a přesnost pohybů hydraulických zařízení.

Hydraulické ventily se využívají pro regulaci tlaku a zabezpečení proti případnému přetížení, zatímco hydraulické rozvaděče řídí směr proudění kapaliny k jednotlivým pohonům. V praxi tyto součásti nacházejí uplatnění v široké škále strojů a zařízení. Počínaje mobilní technikou, stavebními stroji či průmyslovými výrobními linkami. Tyto součásti se také vyskytují v brzdových systémech využívajících brzdovou kapalinu, jako je například téma této diplomové práce.

Využití hydraulické komponenty jsou podrobněji rozepsány v praktické části této práce v kapitole pojednávající o návrhu schématu hydraulického rozvaděče.

1.7 Brzdová kapalina

Brzdová kapalina je speciální hydraulická tekutina, která slouží k přenosu síly v brzdovém systému zařízení. Po sešlápnutí brzdového pedálu dochází ke změně tlaku v brzdové soustavě, a právě prostřednictvím této kapaliny je tlak efektivně přenášen na jednotlivé brzdové prvky, jako jsou například pístky v brzdových třmenech, které vyvíjejí sílu potřebnou k přitlačení brzdových destiček na kotouče a tím zpomalují vozidlo či letadlo.

1.7.1 Požadavky na brzdovou kapalinu

Brzdová kapalina musí splňovat celou řadu náročných technických požadavků. Klíčovým požadavkem je její nestlačitelnost, která zajišťuje efektivní a bezprostřední přenos síly mezi brzdovým pedálem, posilovačem brzd a samotným brzdovým pístkem. Dále je nezbytné, aby kapalina spolehlivě fungovala v širokém teplotním rozsahu – od velmi nízkých teplot v zimních podmínkách až po vysoké teploty vznikající v důsledku brzdění, kdy dochází k jejímu intenzivnímu zahřívání. Současně musí být kompatibilní s materiály, které se běžně používají v automobilovém průmyslu, a to vše za rozumnou cenu. Brzdová kapalina musí být tedy schopna vyhovět velmi různorodým nárokům, a to jak z hlediska výkonu, tak i ekonomické efektivity. (MOKŘÍŠ, Jakub. *Druhy brzdových kapalin*. Online. Portál řidiče. 2023)

1.7.2 Bod varu brzdové kapaliny

Nejdůležitější technickou charakteristikou brzdové kapaliny je bod varu, který se uvádí ve dvou variantách: „suchý“ a „mokrý“. Označení „suchý“ znamená, že kapalina je v ideálním, tedy zcela bezvodém stavu. Naproti tomu „mokrý“ bod varu se vztahuje ke kapalině, která obsahuje přibližně 3,7 % vody. Tato specifikace je důležitá z důvodu, že většina brzdových kapalin je hygroskopická, tedy má schopnost přirozeně absorbovat vlhkost z okolního prostředí. Tím se snižuje jejich bod varu a zhoršují se jejich vlastnosti, což má přímý dopad na bezpečnost a účinnost brzdového systému. Proto je pravidelná výměna brzdové kapaliny důležitou součástí údržby letadla. (MOKŘÍŠ, Jakub. *Druhy brzdových kapalin*. Online. Portál řidiče. 2023)

1.7.3 Rozdělení brzdových kapalin

Brzdové kapaliny se standardně třídí podle normy DOT (Department of Transportation), což je americký standard uznávaný mezinárodně. Tento systém klasifikace umožňuje snadnější orientaci a zajišťuje kompatibilitu mezi jednotlivými typy kapalin. (UNITED STATES. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Federal Motor Vehicle Safety Standard No. 116: Motor Vehicle Brake Fluids. 49 CFR 571.116)

Oproti motorovým olejům, kde jednotlivé automobilky vyžadují specifické normy, je výběr brzdové kapaliny podle DOT normy jednodušší a univerzálnější. (MOKŘÍŠ, Jakub. Druhy brzdových kapalin. Online. Portál řidiče. 2023)

1.7.4 DOT 3

Tento typ brzdové kapaliny byl běžně používán v minulosti, dnes se však již prakticky nepoužívá. (MOKŘÍŠ, Jakub. Druhy brzdových kapalin. Online. Portál řidiče. 2023)

Její suchý bod varu přesahuje 205 °C, zatímco mokrý bod varu dosahuje přibližně 140 °C. (UNITED STATES. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Federal Motor Vehicle Safety Standard No. 116: Motor Vehicle Brake Fluids. 49 CFR 571.116)

Vzhledem ke svým nižším tepelným vlastnostem nevyhovuje současným nárokům moderních brzdových systémů. (MOKŘÍŠ, Jakub. Druhy brzdových kapalin. Online. Portál řidiče. 2023)

1.7.5 DOT 4

DOT 4 je v současnosti nejpoužívanější brzdová kapalina v osobních automobilech. (MOKŘÍŠ, Jakub. Druhy brzdových kapalin. Online. Portál řidiče. 2023)

Nabízí vyšší odolnost vůči teple – suchý bod varu činí minimálně 230 °C, mokrý pak 155 °C. (UNITED STATES. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Federal Motor Vehicle Safety Standard No. 116: Motor Vehicle Brake Fluids. 49 CFR 571.116)

Na rozdíl od DOT 3 má zlepšené přísady (aditiva), ale obě kapaliny jsou založeny na glykolové bázi, což znamená, že jsou vzájemně mísitelné. Při přechodu z DOT 3 na DOT 4 tedy není nutné brzdový systém proplachovat. (MOKŘÍŠ, Jakub. Druhy brzdových kapalin. Online. Portál řidiče. 2023)

1.7.6 DOT 5

Tento typ představuje zvláštní kategorii, protože se nevyrábí na bázi glykolu, ale silikonu. Díky tomu neabsorbuje vodu, ale naopak ji odpuzuje. DOT 5 se používá především v uzavřených brzdových systémech, které jsou navrženy pro dlouhodobý provoz bez nutnosti výměny kapaliny – typicky ve vojenské technice nebo v náročných podmínkách, kde je údržba složitá. (MOKŘÍŠ, Jakub. Druhy brzdových kapalin. Online. Portál řidiče. 2023)

Suchý bod varu dosahuje 260 °C. (UNITED STATES. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Federal Motor Vehicle Safety Standard No. 116: Motor Vehicle Brake Fluids. 49 CFR 571.116)

Dále se brzdová kapalina DOT 5 vyznačuje provozuschopností i při nízkých teplotách až -55°C. (SWASTIKOIL. Hydraulic Brake Fluid DOT-5)

Důležité je, že DOT 5 není kompatibilní se systémy ABS a nesmí se míchat s jinými typy kapalin. (MOKŘÍŠ, Jakub. Druhy brzdových kapalin. Online. Portál řidiče. 2023)

1.7.7 DOT 5.1

Tato brzdová kapalina je určena pro vysoce náročné aplikace, například v motorsportu nebo u výkonných vozidel. (MOKŘÍŠ, Jakub. *Druhy brzdových kapalin*. Online. Portál řidiče. 2023)

Má podobný suchý bod varu jako DOT 5 (260 °C), ale lepší mokrý bod varu (až 180 °C). (UNITED STATES. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. *Federal Motor Vehicle Safety Standard No. 116: Motor Vehicle Brake Fluids*. 49 CFR 571.116)

Brzdová kapalina pod označením DOT 5.1 se vyznačuje schopností udržovat viskozitu i při -50 °C. (SWASTIKOIL. *Hydraulic Brake Fluid DOT-5*)

Na rozdíl od DOT 5 je však založena na glykolové bázi, takže ji lze bez problémů použít jako náhradu za DOT 3 nebo DOT 4. (MOKŘÍŠ, Jakub. *Druhy brzdových kapalin*. Online. Portál řidiče. 2023)

1.7.8 Porovnání brzdových kapalin

Níže se nachází tabulka se základními údaji pro jednotlivé druhy brzdových kapalin. Tabulka obsahuje hodnoty suchého i mokrého bodu varu. Hodnotu viskozity při -40 a při 100°C, která ukazuje chování a rozsah použití brzdové kapaliny při dané teplotě. Tato hodnota je velmi důležitá při návrhu brzdového systému u letadel, kde se s nadmořskou výškou mění také teplota. Dále tabulka zmiňuje hodnotu kyselosti nebo zásaditosti kapaliny neboli pH. Ztrátu odpařováním při 100°C vyjádřenou jako podíl hmotnosti dané složky ve vztahu k celkové hmotnosti roztoku (%w/w).

Tab. 1: Údaje vlastností brzdových kapalin

	DOT-3	DOT-4	DOT-5.1	DOT-5
Equilibrium Reflux Boiling point (°C)	>220	>245	>280	325
Wet Equilibrium Reflux Boiling point (°C)	147	155	182	198
Viscosity @ -40°C (cSt.)	1400	1600	820	852
@100°C (cSt.)	1.9	2.0	2.0	39.45
pH Value	9.6	9.8	7.8	7.52
Evaporation Loss@ 100°C (%w/w)	60	60	45	10.21
Residue pour point (°C)	< -5	< -5	< -5	< -5
Residue Texture	Pass	Pass	Pass	Pass

Zdroj: SWASTIKOIL. Hydraulic Brake Fluid DOT-5

1.8 Letouny s ostruhovým podvozkem

Ostruhový podvozek (angl. tailwheel) je konstrukční uspořádání hlavního podvozku letadla, kdy jsou dvě hlavní kola umístěna před těžištěm letounu a třetí, menší kolo – tzv. ostruha – se nachází v zadní části trupu. Tento typ podvozku byl dříve velmi rozšířen, především u letadel konstruovaných do poloviny 20. století. V současnosti jej nacházíme zejména u historických, akrobatických a některých zemědělských letounů. (PETRMAN, Tom. *Jak se létá s ostruhovým podvozkem*. Online. Aeroweb.cz. 2006)



Obr. 21: Letadlo s ostruhovým podvozkem

Zdroj: Aeroweb.cz

1.8.1 Výhody ostruhového podvozku

- Nižší hmotnost a odpor: Ostruhový podvozek bývá lehčí než příďové uspořádání a má menší aerodynamický odpor, což může vést k lepším letovým vlastnostem.
- Vhodnost pro nezpevněné plochy: Díky vyšší světlé výšce vrtule a posunutému těžišti jsou tyto letouny vhodné pro provoz na travnatých nebo nerovných plochách.
- Jednodušší konstrukce a údržba: Ostruhové uspořádání je mechanicky jednodušší, což snižuje nároky na údržbu a opravy.
- Lepší využití plochy letounu: U některých typů, zejména akrobatických nebo lehkých sportovních letadel, může toto uspořádání přispět ke kompaktnějšímu a efektivnějšímu návrhu trupu.

(PETRMAN, Tom. *Jak se létá s ostruhovým podvozkem*. Online. Aeroweb.cz. 2006)

1.8.2 Nevýhody ostruhového podvozku

- Omezený výhled při pojíždění: Kvůli sklonu letounu dozadu a vyšší přídi je výhled směrem vpřed výrazně omezen. To vyžaduje tzv. „hadovité pojíždění“ – cik-cak manévrování, při kterém si pilot průběžně kontroluje prostor před sebou.
- Zvýšené riziko překlopení na před: Prudké přidání plynu při rozjezdu nebo nesprávné těžiště mohou způsobit, že se letoun překloupí dopředu, což může vést k poškození vrtule nebo motoru.
- Náchylnost k smykům a vybočení: Při vzletu a přistání dochází k projevu gyroskopického momentu vrtule a šikmého obtékání směrovky. To může způsobit náhlé vybočení letounu ze směru. Pilot musí aktivně a přesně pracovat se směrovým kormidlem.
- Náročnější přistání: Pro bezpečné přistání je třeba, aby všechna tři kola dosedla zároveň. V opačném případě může dojít k „kozlování“ – rytmickému odskakování letadla, které může vyústit až v nekontrolovatelný odraz nebo poškození podvozku.
- Vyšší nároky na pilotáž: Letouny s tímto podvozkem obecně vyžadují zkušenější piloty s lepší koordinací práce s nohama, jemnějším řízením a větší pozorností při změnách výkonu.
- Korekce směrové stability letounu při pohybu po zemi, zejména při vzletu a přistání, kdy těžiště letounu nacházející se za hlavním podvozkem vytváří zatáčející moment.

(PETRMAN, Tom. *Jak se létat s ostruhovým podvozkem*. Online. Aeroweb.cz. 2006)

1.9 Ovládání letadla s ostruhovým podvozkem

Řízení takového letounu je náročné především při nízkých rychlostech po zemi, proto je v této práci vytvořen konstrukční návrh pro ovládání brzd letounu za účelem zlepšení ovladatelnosti v těchto rychlostech při vzletu, přistání a popojíždění po zemi.

Samotné zlepšení ovladatelnosti letounu nastává po zvednutí ostruhy a započnutí účinného fungování řídicích ploch. Vzlet vyžaduje přesné korekce směru – jakékoli vychýlení od osy rozjezdu se bez rychlé reakce může rychle zhoršovat. Terén, boční vítr nebo konstrukce řízení ocasního kola mohou ovladatelnost dále komplikovat. Při přistání se používají tři techniky: na všechny tři body, pouze na hlavní podvozek nebo výjimečně nejprve na ostruhu. Ostruhová letadla mají obvykle nižší odolnost vůči bočnímu větru než ta s příďovým kolem. Létání s ostruhovým podvozkem je náročnější, ale rozvíjí pilotní schopnosti a cit pro řízení letounu.

(ZEJDA, Filip. *Přeškolení na ostruhová letadla*. Online. Aeroweb.cz. 2013)

1.10 Další druhy podvozků letadel

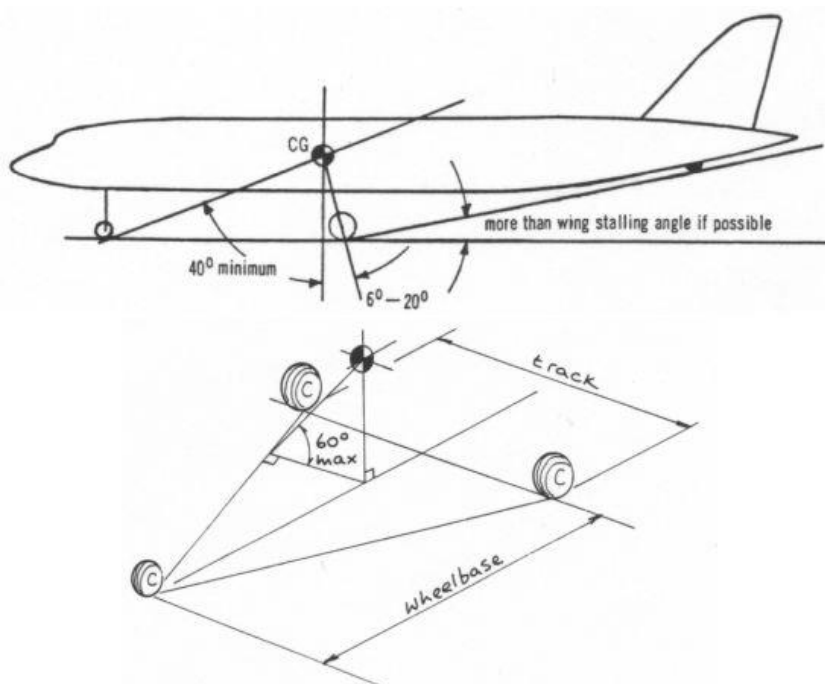
Mimo již zmíněného typu podvozku ostruhové koncepce, na který je v praktické části dle zadání navrhován hydraulický rozvaděč brzd pro možnost diferenciálního brzdění a umožnění ovládání lehkého letadla při pohybu po zemi pomocí brzd. Máme další koncepce podvozků, které jsou níže stručně popsány. Na některé druhy podvozků z níže vypsanych typů by se navržený rozvaděč mohl také aplikovat.

1.10.1 Tříkolové uspořádání (Nose Gear)

Podvozek se vyznačuje dvěma hlavními koly za těžištěm a jedním menším kolem u nosu letadla. (AEROSPACEWEB.ORG. Taildragger or Nose-Wheel Landing Gear?)

- Výhodou je stabilita letadla, jelikož se hlavní kola nacházejí za těžištěm letadla, jednodušší řízení a poskytuje lepší výhled přes nos letadla.
- Nevýhodou vyšší hmotnost a odpor vzduchu kvůli přídové vzpěře, a proto téměř vždy letadla s tímto typem podvozku vyžadují zatahovací mechanismy.
- **Příklady:** F-16; Cessna 172; Boeing 747

(AEROSPACEWEB.ORG. Taildragger or Nose-Wheel Landing Gear?)



Obr. 22: Tříkolový podvozek přídového typu

Zdroj: AEROSPACEWEB.ORG. Taildragger or Nose-Wheel Landing Gear?

1.10.2 Více kolové podvozky (Multi-bogey Gear)

Tento typ podvozku u letadel se používá hlavně kvůli rozložení hmotnosti na dráhu a pro bezpečnost. Je použito více kol na jedné podvozkové vzpěře. U tohoto typu podvozku platí, že čím těžší letadlo, tím více kol. Nejčastěji je podvozek využit u velkých komerčních a nákladních letadel. Příkladem jsou letadla An-225 s 32 koly a Boeing 747 s 18 koly. (AEROSPACEWEB.ORG. Taildragger or Nose-Wheel Landing Gear?)



Obr. 23: Letoun An-225 Antonov

Zdroj: AEROSPACEWEB.ORG. Taildragger or Nose-Wheel Landing Gear?

1.10.3 Bicyklový podvozek (Bicycle Gear)

Obsahuje dvě hlavní kola podél středové osy, kde se jedno kolo nachází vpřed a druhé za těžištěm letadla. Obsahuje také stabilizační výložky na křídlech. Výhodou je nízká hmotnost a odpor, podvozek je vhodný pro dlouhé a štíhlé trupy. Složitější je ovládání pro pilota, který musí udržet rovnou polohu při vzletu a přistání. Příkladem je B-47 Stratojet. (AEROSPACEWEB.ORG. Taildragger or Nose-Wheel Landing Gear?)



Obr. 24: B-47 Stratojet

Zdroj: AEROSPACEWEB.ORG. Taildragger or Nose-Wheel Landing Gear?

1.10.4 Jeden hlavní podvozek (Single Main Gear)

Jedná se o podkategorii bicyklového typu podvozku. Obsahuje jedno velké přední kolo a jedno malé zadní kolo. Stabilitu zajišťují výsuvné podpěry nazývané pogo. Výhodou je váha a jednoduchost. Příkladem jsou různé kluzáky a U-2 Dragon Lady. (AEROSPACEWEB.ORG. Taildragger or Nose-Wheel Landing Gear?)



Obr. 25: U-2 Dragon Lady

Zdroj: AEROSPACEWEB.ORG. Taildragger or Nose-Wheel Landing Gear?

1.10.5 Čtyřkolový podvozek (Quadricycle Gear)

Koncept se skládá ze čtyř hlavních podvozků podél trupu letadla. Umožňuje mít podlahu blízko země pro snadnější nakládání a vykládání nákladu; nevýhodou je větší hmotnost. Příkladem je letadlo B-52 Stratofotress. (*AEROSPACEWEB.ORG. Taildragger or Nose-Wheel Landing Gear?*)



Obr. 26: B-52 Stratofortress

Zdroj: AEROSPACEWEB.ORG. Taildragger or Nose-Wheel Landing Gear?

2 Praktická část

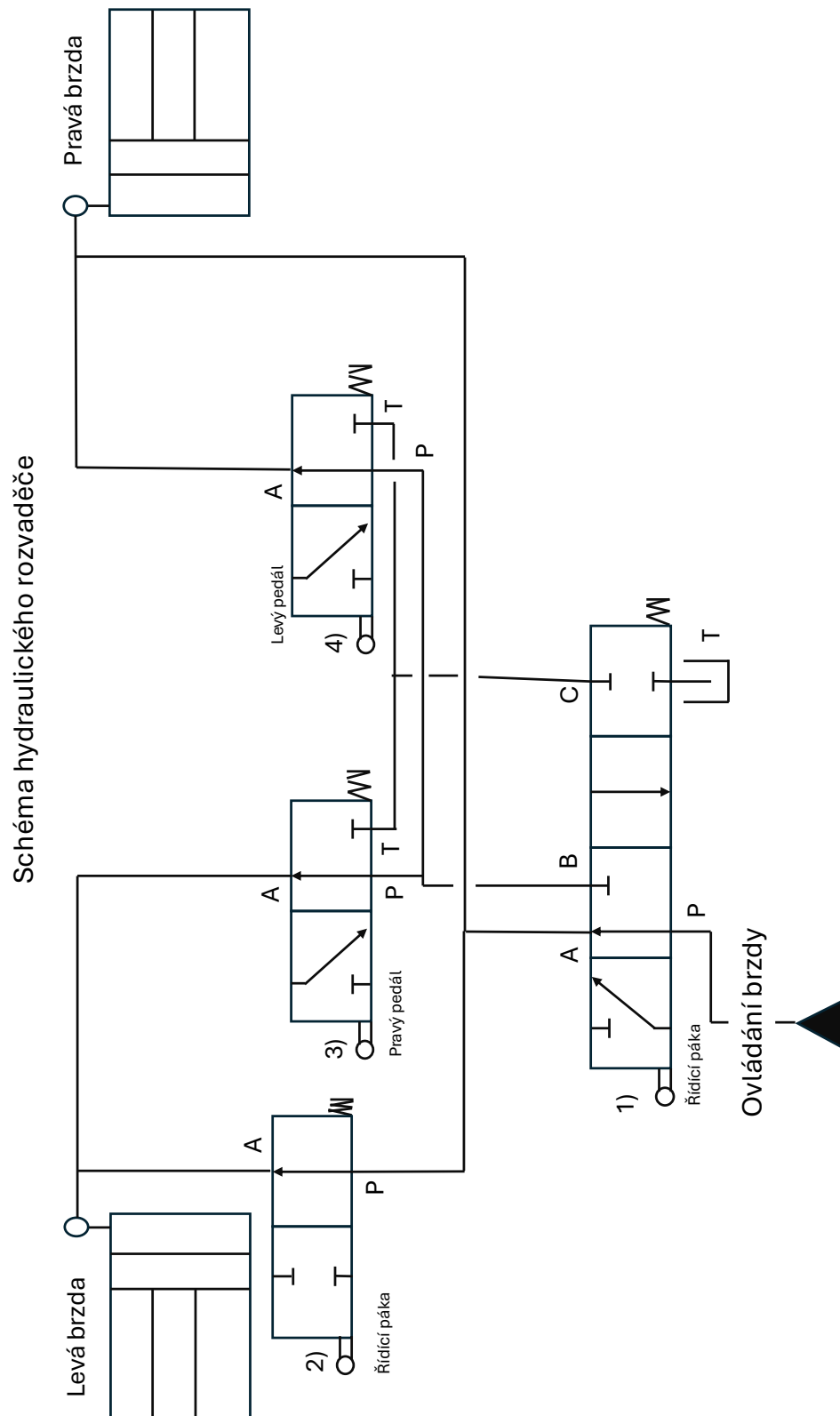
Cílem praktické části diplomové práce je vytvořit vlastní návrh mechanicky ovládaného hydraulického rozvaděče, který bude přidán do původního brzdového systému již fungujícího letadla. Rozvaděč umožní brzdění buď obou kol stejnou brzdovou silou, anebo po přitažení řídicí páky k sobě a sešlápnutí jednoho ze dvou pedálů pro ovládání směrového kormidla bude brzděno pouze jedno kolo. Tím se získá možnost ovládání letadla na zemi neboli jednoduše řečeno možnost zatáčení.

Praktická část se skládá z několika samostatných částí. Jedna část se zabývá návrhem hydraulického rozvaděče pomocí schémat a analýzou možných stavů. Část poté se zabývá výpočty potřebných pro konstrukční návrh, s danými vstupními hodnotami a vhodnou volbou materiálů. Dále se nachází část věnována výběru těsnících komponent a vhodných tolerancí, vybraných dle dostupných tabulek. Předposlední část se zabývá tvorbou modelů, nákupní specifikací a tvorbou technické dokumentace s vhodnými tolerancemi a rozměry. Poslední část diplomové práce se zabývá popisem sestavy a její výkresové dokumentace.

2.1 Schématický návrh hydraulického rozvaděče

Pro návrh schématu byli vybrány plovoucí kotoučové brzdy, u nichž je brzdová kapalina přiváděna pouze jednou hadicí do třmenu. Zpětný pohyb vysunutého pístu je realizován pomocí samotného kotouče, který po uvolnění působícího tlaku píst odtlačí. Ve schématu níže je brzda kola znázorněna jako jednočinný hydraulický motor. Vstup do hydraulického rozvaděče následuje po ovládání brzdy, která zůstává z původní konstrukce systému a s níž je možné dávkovat brzdící sílu. Samotný rozvaděč se poté skládá ze dvou hydraulických rozvaděčů 3/2 (čísla označují: počet vstupů a výstupů / počet poloh), přičemž jsou rozvaděče připojeny k pedálům směrového kormidla. Tyto rozvaděče jsou v navrženém schématu označeny čísly 3 a 4. Dále navrhovaný rozvaděč obsahuje jeden rozvaděč typu 2/2, označený číslem 2, a jeden specificky navržený rozvaděč 5/2 s označením 1, který plní požadavky dle zadání. Teoreticky se jedná o sjednocení rozvaděčů 3/2 a 2/2. Rozvaděče 5/2 a 2/2 musí být připojeny k řídicí páce.

Jelikož se jedná o mechanicky ovládaný rozvaděč, je jeho ovládání jednotlivých šoupátek ve schématu znázorněno pomocí tlačítek. Zpětný pohyb je realizován a vykreslen pomocí pružiny.



Obr. 27: Schéma hydraulického rozvaděče

Zdroj: Vlastní tvorba

Jednotlivé označení otvorů je ve schématu označeno písmeny:

- P – Vstup do rozvaděče
- T – Odtok z rozvaděče
- A – Pracovní výstup z rozvaděče
- B – Pracovní výstup z rozvaděče
- C – Pracovní výstup z rozvaděče

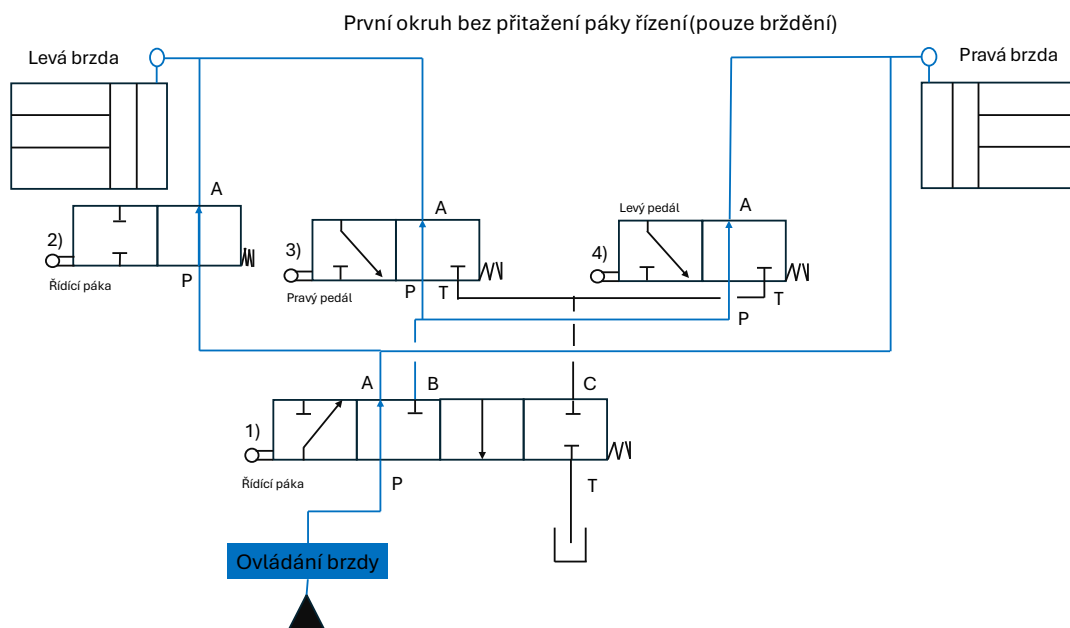
Seznam použitých rozvaděčů a jejich označení ve schématu:

- 1) – Rozvaděč 5/2 (spojený rozvaděč 3/2 a 2/2)
- 2) – Rozvaděč 2/2
- 3) – Rozvaděč 3/2
- 4) – Rozvaděč 3/2

2.1.1 První stav rozvaděče bez přitažení řídicí páky k sobě

V první stavu, po zmáčknutí ovládání brzdy, se brzdová kapalina dostává přes první rozvaděč 5/2 do pravé brzdy a přes rozvaděč 2/2 i do levé brzdy. V křižovatkách dochází také k šíření tlaku přes rozvaděče 3/2 zpět do rozvaděče 5/2 na výstup B, který je v tuto chvíli zavřen. Nedochází tak k žádnému úniku kapaliny ani ke ztrátě tlaku v brzdovém systému.

Proudění brzdové kapaliny je ve schématu vyznačeno modrou čarou. Černou barvou jsou označeny kanály, které jsou v tomto stavu uzavřeny.



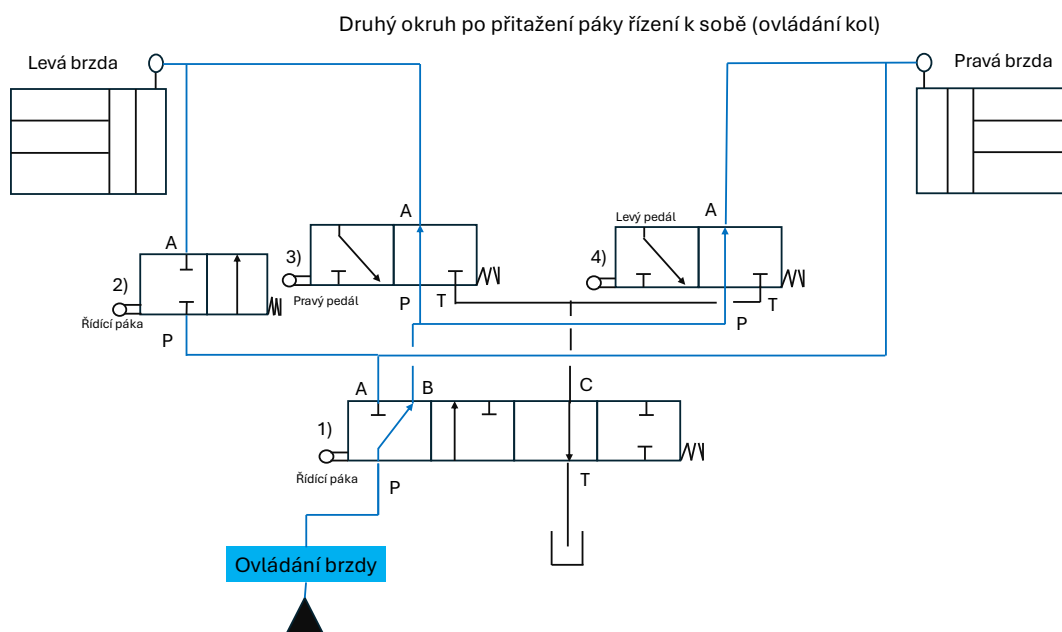
Obr. 28: Schéma hydraulického rozvaděče v prvním stavu

Zdroj: Vlastní tvorba

2.1.2 Druhý stav rozvaděče po přitažení řídicí páky k sobě

Po přitažení řídicí páky k sobě dochází k posunutí šoupátek v rozvaděčích 5/2 a 2/2. Po zmáčknutí brzdy se brzdová kapalina přivedena na vstup P u rozvaděče 5/2 dostává pracovním výstupem B do rozvaděčů 3/2 připojeným k pedálům směrového kormidla. Přes tyto rozvaděče se brzdová kapalina dostává do brzd a zpět do rozvaděče 5/2 na pracovní výstup A, který je nyní uzavřen, takže kapalina nemá kam odtéct a nedochází tak ke ztrátě tlaku.

Na schématu níže je původní schéma upraveno podle poloh rozvaděčů v tomto stavu. Průtok brzdové kapaliny je opět zvýrazněn modrou čarou. Černou barvou jsou označeny kanály, které jsou v tomto stavu uzavřeny.



Obr. 29: Schéma hydraulického rozvaděče v druhém stavu

Zdroj: Vlastní tvorba

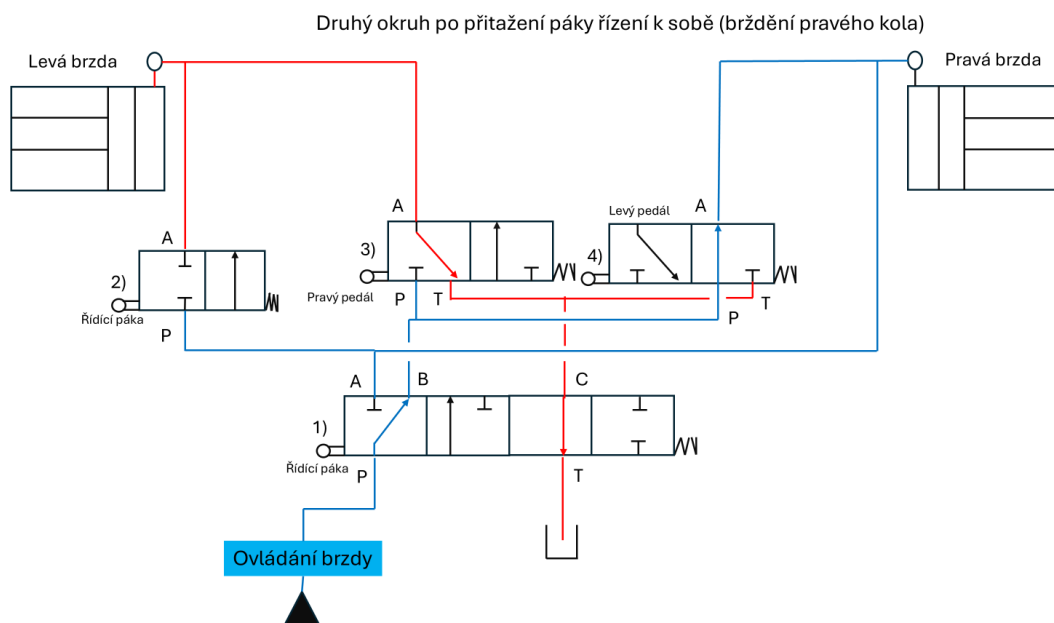
2.1.3 Druhý stav po sešlápnutí pravého pedálu směrového kormidla

Po přitažení řídicí páky, zmáčknutí brzdy a sešlápnutí pravého pedálu směrového kormidla brzdová kapalina proudí přes rozvaděč 5/2 ze vstupu do pracovního výstupu B do rozvaděčů 3/2. Jelikož je rozvaděč označený číslem 3 připevněn ovládacím prvkem k pedálu směrového kormidla, je nyní jeho pracovní vstup uzavřen a brzdová kapalina proudí pouze přes rozvaděč číslo 4 do levé brzdy.

Jinak řečeno, v tomto stavu brzdí pouze pravá brzda. Při sešlápnutí pravého pedálu se otevírá odtok z levého okruhu brzdy, z něhož uniká tlak a brzdová kapalina odtéká do odtoku T v rozvaděči 5/2.

V tuto dobu také rozvaděč 2/2, který je ovládán pomocí řídicí páky letounu, rozepíná první okruh. Díky němu může brzdít pouze pravá či levá brzda podle sešlápnutí pedálu směrového kormidla. Bez toho prvku v rozvaděči by jinak unikl tlak a brzdová kapalina z celého systému. Výsledkem by žádné kolo nebrzdilo.

Na obrázku schématu níže jsou modrou barvou vyznačeny kanály pod tlakem a přívodem brzdové kapaliny. Červenou barvou je vyznačen okruh, ve kterém dochází ke ztrátě tlaku. Přebytečná brzdová kapalina je odváděna do odtoku přes rozvaděč 5/2.



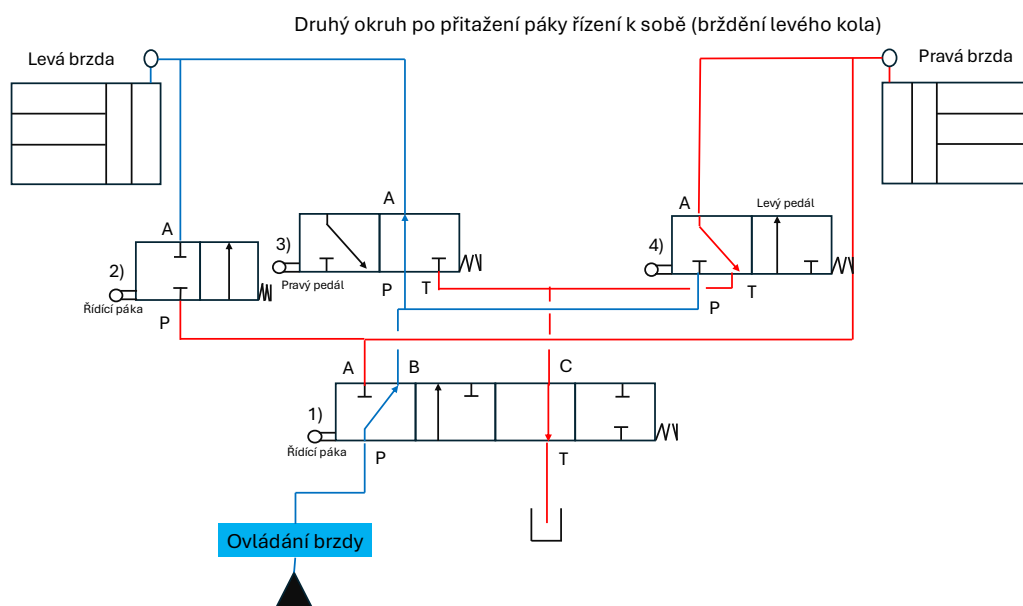
Obr. 30: Schéma hydraulického rozvaděče v druhém stavu při sešlápnutí pravého pedálu směrového kormidla

Zdroj: Vlastní tvorba

2.1.4 Druhý stav po sešlápnutí levého pedálu směrového kormidla

Po přitažení řídicí páky k sobě, zmáčknutí brzdy a sešlápnutí levého pedálu směrového kormidla proudí brzdová kapalina přes rozvaděč 3/2 připojený k pravému pedálu směrového kormidla do levé brzdy. Druhý rozvaděč 3/2, připojený k levému pedálu směrového kormidla, který je v tuto chvíli sešlápnutý, rozepíná okruh pravé brzdy a brzdová kapalina odtéká skrze tento rozvaděč zpět do odtoku přes rozvaděč 5/2.

Na obrázku níže jsou opět modrou barvou vyznačeny kanály navrženého rozvaděče pod tlakem a s přívodem brzdové kapaliny. Červenou barvou jsou vyznačeny kanály, ze kterých odtéká přebytečná brzdová kapalina zpět do odtoku, čímž se snižuje tlak působící na pravou brzdu.



Obr. 31: Schéma hydraulického rozvaděče v druhém stavu při sešlápnutí levého pedálu směrového kormidla

Zdroj: Vlastní tvorba

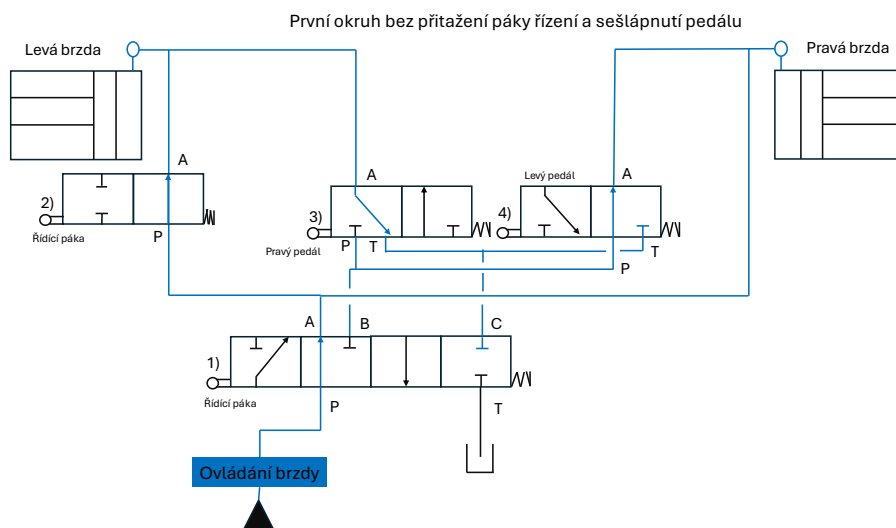
2.1.5 Zamezení vzniku chybových stavů v rozvaděči

Pro správné navržení rozvaděče je důležité brát v úvahu i prevenci vzniku chybových stavů. Jedná se o navrhovaný rozvaděč složený ze čtyř menších rozvaděčů s ovládacími prvky, zapojených tak, aby plnili správně svou funkci. I v tomto případě se mohou vyskytnout kombinace stisknutí ovládacích prvků, při kterých nechceme, aby v rozvaděči vznikl chybový stav.

Prvním omezením, na které je nutno brát zřetel, je ovládání rozvaděčů označených čísly 1 a 2. U těchto dvou rozvaděčů je zapotřebí vytvořit konstrukční řešení ovládání tak, aby oba rozvaděče byly v poloze 1 nebo 2 totožně.

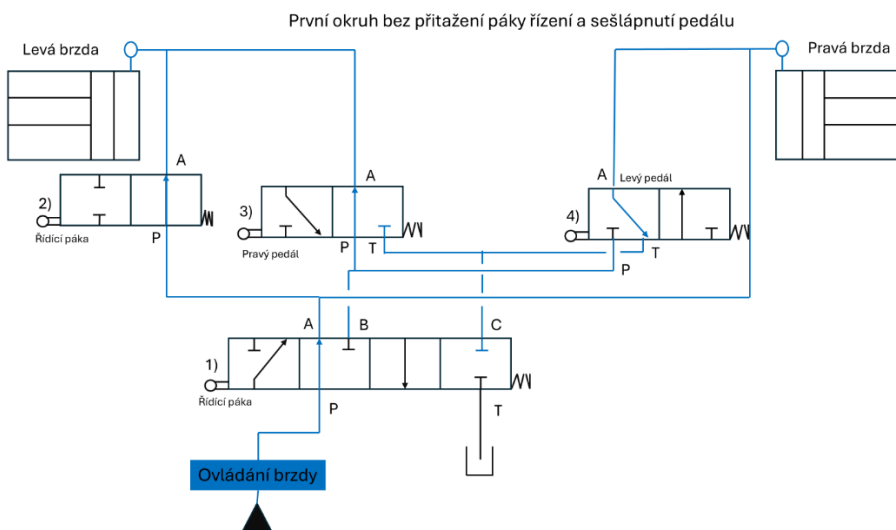
Druhým omezením je možnost zmáčknutí obou rozvaděčů 3/2 ve stejnou chvíli. Tyto dva rozvaděče jsou připojeny k pravému a levému pedálu směrového kormidla, jak již bylo uvedeno výše. Už ze samotné konstrukce letounu musí být omezena možnost sešlápnutí obou pedálů naráz, protože směrové kormidlo je pouze jedno a nemůže být současně vytočeno vlevo i vpravo.

Posledním chybovým stavem je možnost sešlápnutí pedálu směrového kormidla bez přitažení řídicí páky. Tento stav je řešen již při navrhování schématu, kdy při sešlápnutí pedálu směrového kormidla a zmáčknutí brzd bez přitažení řídicí páky k sobě brzdová kapalina proudí jako v prvním stavu s posunutou pozicí rozvaděče 3/2 připojeného k sešlápnutému pedálu. I přes otevřený odtok v rozvaděči 3/2 je kapalině bráněno k odtoku a ztrátě tlaku v systému díky uzavřenému odtoku v rozvaděči 5/2. Stavy při sešlápnutí pravého nebo levého pedálu směrového kormidla jsou zobrazeny na obrázcích níže. Modrou barvou je znázorněny kanály rozvaděče pod tlakem s proudící brzdovou kapalinou a černě jsou vyznačeny uzavřené kanály.



Obr. 32: První okruh bez přitažení páky řízení a sešlápnutí pravého pedálu

Zdroj: Vlastní tvorba



Obr. 33: První okruh bez přitažení páky řízení a sešlápnutí levého pedálu

Zdroj: Vlastní tvorba

2.2 Výpočty a volba vhodného materiálu

Tato část diplomové práce se zabývá výběrem vhodného typu materiálu, ze kterého jsou vyrobeny hlavní funkční komponenty navrženého hydraulického rozvaděče. Dále se zabývá výpočtem potřebné brzdné síly s navolenými koeficienty.

2.2.1 Navolené a vstupní hodnoty pro dimenzování

Pro výpočty uvedené v této kapitole jsou dány hodnoty hmotnosti letounu, počtu ovládaných brzd a maximálního tlaku v systému, který se běžně udává od 400 do 600 PSI (pounds per square inch). Tyto hodnoty při přepočtu odpovídají 27,6 až 41,4 Barů. Pro navržený rozvaděč je maximální tlak při výpočtech stěn materiálu a dalších potřebných hodnot stanoven na 40 Barů. Tato hodnota odpovídá 4 MPa (Megapascal). V praxi je pak možné dle typu letounu, na který bude rozvaděč montován, přepočítat tloušťky stěn a na jejich základě upravit celý rozvaděč a jednotlivé komponenty.

2.2.2 Výpočet potřebné brzdné síly

Pro výpočet potřebné brzdné síly je nutné znát hmotnost letounu. Tato hodnota je uvedena již v zadání, kdy se jedná o letadlo s maximální vzletovou hmotností do 600 kg. Dále je důležitý faktor zvoleného zpomalení. V tomto případě je zvoleno 4 m/s^2 . Tato hodnota znamená, že letadlo je při hmotnosti 600 kg dokáže brzdit se zpomalením 4 m/s^2 .

$$F_{brzd.} = ? \text{ [N]}$$

$$m = 600 \text{ [kg]}$$

$$a = 4 \text{ [m/s}^2\text{]}$$

$$F_{brzd.} = m * a \quad (1.1)$$

$$F_{brzd.} = 600 * 4 \quad (1.2)$$

$$F_{brzd.} = 2400 \text{ [N]} \quad (1.3)$$

Potřebná síla pro letoun s maximální hmotností 600 kg se zpomalením 4 m/s^2 vychází na 2400 N. Jelikož zvolený letoun je ostruhové koncepce a obsahuje brzdy na obou předních kolech, je spočtená hodnota vydělena počtem brzd a určena jako potřebná brzdná síla vyvinutá na jednotlivé brzdy.

$$F_{kolo} = ? \text{ [N]}$$

$$F_{brzd.} = 2400 \text{ [N]}$$

$$\text{Počet brzd} = 2$$

$$F_{kolo} = \frac{F_{brzd.}}{\text{Počet brzd}} \quad (2.1)$$

$$F_{kolo} = \frac{2400}{2} \quad (2.2)$$

$$F_{kolo} = 1200 \text{ [N]} \quad (2.3)$$

2.2.3 Výpočet brzdného systému pro průměr brzdového pístu

Pro výpočet minimálního průměru brzdového pístu pro působící sílu na brzdu 1200 N a maximální tlak brzdové kapaliny 40 barů je použit následující vztah.

A = plocha brzdového pístu [mm^2]

$F_{kolo} = 1200$ [N]

$P = 4$ [Mpa]

$$A = \frac{F_{kolo}}{P} \quad (3.1)$$

$$A = \frac{1200}{4} \quad (3.2)$$

$$A = 300 \text{ mm}^2 \quad (3.3)$$

Z vypočtené plochy jednoho brzdového pístu je dále možné spočítat minimální průměr pístu pomocí následujícího vztahu:

$A = 300$ [mm^2]

D = průměr pístu [mm]

Π (Matematický koeficient) = 3,14

$$A = \frac{\Pi * D^2}{4} \quad (3.4)$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * A}{\Pi}} \quad (3.5)$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * 300}{\Pi}} \quad (3.6)$$

$$D = 19,54 \text{ [mm]} \approx 20 \text{ [mm]} \quad (3.7)$$

Pro letoun s maximální hmotností do 600 kg musí být minimální průměr jednoho brzdového pístu roven nebo větší než 19,54 mm. Pro další výpočty je tato hodnota zaokrouhlena a bude se pracovat s průměrem 20 mm.

2.2.4 Hodnota objemu brzdového válce

Pro výpočet průtoku rozvaděčem je z předchozího výpočtu zvolen průměr brzdového pístu 20 mm. Zdvih brzdového pístu pro přitlačení brzdové destičky ke kotouči je také zvolen 20 mm. S těmito hodnotami je možné vypočítat objem potřebné brzdové kapaliny v brzdě.

V (objem) = ? [cm^3]

$D = 20$ [mm]

H (zdvih) = 20 [mm]

Π (Matematický koeficient) = 3,14

$$V = \Pi * \frac{D^2}{2^2} * H \quad (4.1)$$

$$V = \Pi * \frac{20^2}{2^2} * 20 \quad (4.2)$$

$$V = 6283,19 \text{ mm}^3 \rightarrow 6,28 \text{ cm}^3 \quad (4.3)$$

Objem jednoho naplněného brzdícího válce po zdvihu 20 mm se rovná $6,28 \text{ cm}^3$. Jelikož má letadlo dvě brzdy, je třeba tuto hodnotu vynásobit 2.

$$V = 6,28 [\text{cm}^3]$$

$$V_{celk.} = ? [\text{cm}^3]$$

$$\text{Počet brzd} = 2$$

$$V_{celk.} = V * \text{Počet brzd} \quad (4.4)$$

$$V_{celk.} = 6,28 * 2 \quad (4.5)$$

$$V_{celk.} = 12,56 \text{ cm}^3 \quad (4.6)$$

Požadovaný průtok pro dosažení účinku do 0,2 sekundy je poté spočítán podle následujícího vztahu:

$$V_{celk.} = 12,56 [\text{cm}^3]$$

$$Q (\text{průtok}) = ? [\text{l/min}]$$

$$T (\text{doba dosažení účinku}) = 0,2 [\text{sekundy}]$$

$$Q = \frac{V_{celk.}}{T} \quad (5.1)$$

$$Q = \frac{12,56}{0,2} \quad (5.2)$$

$$Q = 62,8 \frac{\text{cm}^3}{\text{sekundu}} \rightarrow 3,77 \text{ l/min} \quad (5.3)$$

Průtok navrhovaným hydraulickým rozvaděčem musí být schopen dosáhnout hodnoty průtoku $3,77 \text{ l/min}$, což při převedení na litrů za vteřinu vychází na hodnotu $0,06283 \text{ l/s}$. Tato hodnota udává, že pokud budou oba brzdové pístky o průměru 20mm v brzdách zcela zatlačené do třmenu, při maximálním zmáčknutí brzdy se vysunou o 20mm během 0,2 vteřiny.

2.2.5 Výpočet minimální tloušťky stěn v těle rozvaděče

Pro návrh těla rozvaděče byl zvolen materiál s označením EN AW-6082 T6.

EN AW-6082 T6 (AlMgSi1) je hliníková slitina vytvrzená precipitací (vytvrzování), která kombinuje vysokou pevnost, nízkou hmotnost a dobrou odolnost vůči korozi. Ve stavu T6, po žíhání, kalení a umělým stárnutím, má mez kluzu srovnatelnou s konstrukční ocelí S235, avšak při mnohem nižší hmotnosti. To z ní dělá ideální materiál pro lehkostní konstrukce. Uplatnění najde v různých oborech – od stavebnictví kde zastává nosné prvky, přes dopravu, kde se z materiálu tvoří nádrže, přívěsy, až po strojírenství, výrobě nábytku, potravinářství a loděnictví (např. jachty). Slitina má výbornou korozní odolnost v běžném i mořském prostředí, kterou lze dále zlepšit anodizací (eloxováním). (BERKA, Pavel. EN AW-6082 T6 (AlMgSi1 F28/F31/F32). Online)

Zvolený materiál má pevnost v tahu 300 MPa a mez kluzu 255 MPa. S těmito hodnotami a podle dostupné normy (ČSN EN ISO 4413:2011. *Hydraulika – Všeobecná pravidla a bezpečnostní požadavky na hydraulické systémy a jejich součásti*. Praha: Český normalizační institut, 2011.) byl zvolen koeficient bezpečnosti 10 a následně spočítáno maximální dovolené napětí pro bezpečný provoz těla rozvaděče.

$$\sigma_{kluzu} = 255 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_{dov.} = ? \text{ [MPa]}$$

$$K \text{ (koeficient bezpečnosti)} = 10$$

$$\sigma_{dov.} = \frac{\sigma_{kluzu}}{K} \quad (6.1)$$

$$\sigma_{dov.} = \frac{255}{10} \quad (6.2)$$

$$\sigma_{dov.} = 25,5 \text{ [MPa]} \quad (6.3)$$

S hodnotou dovoleného napětí a koeficientem bezpečnosti 10 je dále spočítána teoretická minimální tloušťka stěny kanálu rozvaděče o průměru 4 mm.

$$t \text{ (tloušťka stěny)} = ? \text{ [mm]}$$

$$P = 4 \text{ [MPa]}$$

$$D = 4 \text{ [mm]}$$

$$\sigma_{dov.} = 25,5 \text{ [MPa]}$$

$$t = \frac{P * D}{2 * \sigma_{dov.}} \quad (7.1)$$

$$t = \frac{4 * 4}{2 * 25,5} \quad (7.2)$$

$$t = 0,314 \text{ [mm]} \quad (7.3)$$

Vzorec výše uvádí, že tloušťka stěny závisí na tlaku v kanále o jeho poloměru (proto je ve vzorci zahrnuta hodnota $D/2$), děleno dovoleným napětím zvoleného materiálu.

Dále je spočítána teoretická minimální tloušťka stěny u jmenovitého průměru 16 mm, ve které se nachází šoupátko.

t (tloušťka stěny) = ? [mm]

$P = 4$ [MPa]

$D = 16$ [mm]

$\sigma_{dov.} = 25,5$ [MPa]

$$t = \frac{P * D}{2 * \sigma_{dov.}} \quad (8.1)$$

$$t = \frac{4 * 16}{2 * 25,5} \quad (8.2)$$

$$t = 1,255 [\text{mm}] \quad (8.3)$$

Z výpočtů vyplývá, že nejmenší tloušťka stěny při maximálním tlaku 4 MPa musí být u průměru 4mm větší než 0,314 mm a u průměru 16 mm větší než 1,255 mm.

Dále je spočítána minimální tloušťka dna vrtané díry kanálu rozvaděče o průměru 4mm s kuželovým tvarem dna o úhlu špičky po vrtáku 118°. Pro zjednodušení výpočtu je dno považováno jako rovné. Níže je spočítána teoretická minimální tloušťka stěny pod dnem otvoru, přičemž je uvažována jako tenká kruhová destička pevně vetknutá do stěny.

h (tloušťka dna) = ? [mm]

$P = 4$ [MPa]

$D = 4$ [mm] / $r = 2$ [mm]

$\sigma_{dov.} = 25,5$ [MPa]

ν (Poissonovo číslo) = 0,33 pro hliník

Pro vetknutý kruhový disk pod rovnoměrným tlakem P je ve středu maximální ohybový moment:

$$M_{max} = \frac{(1 + \nu) * P * r^2}{16} \quad (9.1)$$

A povrchové ohybové napětí se získá z:

$$\sigma_{max} = \frac{6 * M_{max}}{h^2} \quad (9.2)$$

Po úpravě dostaneme vztah pro tloušťku h :

$$\sigma_{max} = \frac{3 * (1 + \nu) P * r^2}{8 * h^2} \rightarrow h = \sqrt{\frac{3 * (1 + \nu) * P * r^2}{8 * \sigma_{dov}}} \quad (9.3)$$

Po dosazení hodnot a následném výpočtu vyjde hodnota:

$$h = \sqrt{\frac{3 * (1 + 0,33) * 4 * 2}{8 * 25,5}} \quad (9.4)$$

$$h = \sqrt{\frac{3 * (1 + 0,33) * 4 * 2}{8 * 25,5}} \quad (9.5)$$

$$h = 0,396 [mm] \quad (9.6)$$

Při výpočtu vyšla minimální tloušťka dna u otvoru o průměru 4 mm na hodnotu 0,396 mm. Z technologického hlediska je takto tloušťka velmi malá a při návrhu součásti bude tloušťka dna vždy větší.

Minimální tloušťka dna u průměru 16 mm, kde se nachází šoupátko je spočítáno níže stejným způsobem.

h (tloušťka dna) = ? [mm]

$P = 4$ [MPa]

$D = 16$ [mm] / $r = 8$ [mm]

$\sigma_{dov.} = 25,5$ [MPa]

ν (Poissonovo číslo) = 0,33 pro hliník

$$\sigma_{dov.} = \frac{3 * (1 + \nu) * P * r^2}{8 * h^2} \quad (10.1)$$

$$102 = \frac{3 * (1 + 0,33) * 4 * 8^2}{8 * h^2} \quad (10.2)$$

$$102 = \frac{3 * 1,33 * 4 * 64}{8 * h^2} \quad (10.3)$$

$$102 = \frac{1021,44}{8 * h^2} \quad (10.4)$$

$$h = \sqrt{\frac{1021,44}{8 * 25,5}} \quad (10.5)$$

$$h = 2,238 [mm] \quad (10.6)$$

Výsledky ukazují, že tloušťka dna otvoru o průměru 4 mm, vrtaného vrtákem se špičkou o úhlu 118°, musí být rovna nebo větší než 0,396 mm a pro otvor o průměru 16 mm s rovným dnem musí být tloušťka dna nejméně 2,238 mm. Při návrhu modelu součásti budou tyto hodnoty zohledněny a tloušťky stěn budou vždy větší.

2.2.6 Výpočet minimální tloušťky stěn šoupátek

Materiál, ze kterého se mají vyrobit jednotlivá šoupátka rozvaděče je materiál 1-4112.

Ocel 1.4112 (také označována jako AISI 440B, ČSN 17042 nebo X90CrMoV18) je martenzitická nerezová ocel s vyšším obsahem uhlíku. Patří mezi magnetické materiály a vyniká velmi vysokou tvrdostí, odolností proti opotřebením a dobrou korozní odolností. Je dobře lešitelná až do zrcadlového lesku a zároveň má dobrou houževnatost. Dosahuje pevnosti v tahu 750–950 MPa a meze kluzu 550 MPa. Není vhodná ke svařování ani pro tvárění za studena. Používá se zejména pro výrobu čepelí, řezných a chirurgických nástrojů, čerpadlech, potravinářských strojů a obecně ve strojírenství. (Online. AGST Draht & Biegetechnik GmbH)

Pro materiál 1-4112 s mezí kluzu 550 MPa je výpočet dovoleného napětí proveden s koeficientem bezpečnosti 10, stejně jako u předešlého materiálu.

$$\sigma_{kluzu} = 550 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_{dov.} = ? \text{ [MPa]}$$

$$K \text{ (koeficient bezpečnosti)} = 10$$

$$\sigma_{dov.} = \frac{\sigma_{kluzu}}{K} \quad (11.1)$$

$$\sigma_{dov.} = \frac{550}{10} \quad (11.2)$$

$$\sigma_{dov.} = 55 \text{ [MPa]} \quad (11.3)$$

Šoupátka mají vnější nejmenší průměr 12 mm, na který působí tlak 4 MPa a vnitřní průměr 4,2 mm. Níže je uveden výpočet pro zjištění minimální tloušťky stěny šoupátka a ověření, zda vyhovuje zvolený menší průměr. Výpočet je založen na stejném principu jako u předchozích výpočtů minimální tloušťky stěn v rozvaděči.

$$\sigma_{dov.} = 55 \text{ [MPa]}$$

$$P = 4 \text{ [MPa]}$$

$$D_1 = 12 \text{ [mm]} \text{ vnější průměr} \rightarrow r_1 = 6 \text{ [mm]}$$

$$D_2 = 4,2 \text{ [mm]} \text{ vnitřní průměr} \rightarrow r_2 = 2,1 \text{ [mm]} \text{ (Zvoleno, jestli může být)}$$

$$t \text{ (tloušťka stěny)} = ? \text{ [mm]}$$

$$\sigma_{dov} = \frac{D_1 * P}{2 * t} \quad (12.1)$$

$$t = \frac{D_1 * P}{2 * \sigma_{dov}} \quad (12.2)$$

$$t = \frac{12 * 4}{2 * 55} \quad (12.3)$$

$$t = 0,436 \text{ [mm]} \quad (12.4)$$

Z výpočtu vyplývá, že teoretická minimální tloušťka stěny šoupátka pohybujícího se v rozvaděči je 0,436 mm. Vnitřní otvor o průměru 4,2 mm může být skrze šoupátko proveden.

Dále je proveden výpočet tloušťky přepážek mezi jednotlivými sekcemi navrhovaného hydraulického rozvaděče při maximálním zatížení tlakem 4MPa, s dovoleným napětím 55 MPa z materiálu 1-4112. Největší průměr přepážky šoupátka je stanoven na 16mm. Výpočet je opět založen na stejném principu jako při výpočtu minimální tloušťky dna jednotlivých otvorů těla rozvaděče.

$$\sigma_{dov.} = 55 \text{ [MPa]}$$

$$P = 4 \text{ [MPa]}$$

$$D \text{ (průměr šoupátka)} = 16 \text{ mm} \rightarrow r = 8 \text{ [mm]}$$

$$h = ? \text{ [mm]}$$

$$\nu \text{ (Poissonovo číslo)} = 0,3 \text{ pro ocel}$$

$$\sigma_{dov.} = \frac{3 * (1 + \nu) * P * r^2}{8 * h^2} \quad (13.1)$$

$$h = \sqrt{\frac{3 * (1 + 0,3) * 4 * 8^2}{8 * 55}} \quad (13.2)$$

$$h = \sqrt{\frac{998,4}{440}} \quad (13.3)$$

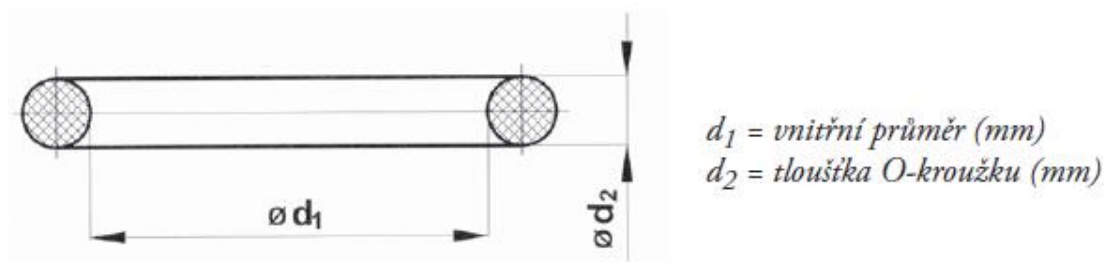
$$h = 1,506 \text{ [mm]} \quad (13.4)$$

Po dosazení a provedení výpočtu vychází, že teoretická minimální tloušťka stěny přepážky musí být 1,506 mm. Při tvorbě modelů musí být tloušťka stěny mezi jednotlivými sekcemi vždy větší než tato hodnota.

2.3 Výběr těsnících kroužků a vhodných tolerancí dle tabulek

Pro správné utěsnění a chod rozvaděče jsou zvoleny O-kroužky z materiálu EPDM (Etylén-propylenová pryž). Tento materiál odolává brzdovým kapalinám DOT 3; 4 a 5.1. Pokud by byla v systému použita jiná kapalina, musí být O-kroužky vyměněny a kroužky z vhodného materiálu.

Pro těsnění jednotlivých sekcí v šoupátkách jsou zvoleny O-kroužky o rozměrech $d_1 = 12$ mm a $d_2 = 2$ mm. Pro šroubení jsou zvoleny O-kroužky $d_1 = 6$ mm a $d_2 = 1,5$ mm. K těmto vybraným těsnícím O-kroužkům jsou dle dostupných tabulek od dodavatele těsnících prvků Hostř Liberec upraveny rozměry pro jednotlivé vyráběné dílce.



Obr. 34: Rozměry O-kroužků

Zdroj: HOSTR LIBEREC S.R.O. Katalog OK01. Online. 2018.

Při vybraných parametrech O-kroužků je podle tloušťky d_2 z tabulek určena šířka drážky L_1 a hloubka drážky S pro dynamické utěsnění.

Tab. 2: Tabulka pro šířku a hloubku drážky O-kroužků

Tloušťka d_2	Šířka L_1	Hloubka - hydr. S	Hloubka - pneu. S
1	1,3	0,9	0,95
1,5	1,9	1,3	1,35
1,6	2	1,4	1,45
1,8	2,3	1,5	1,55
1,78	2,3	1,5	1,55
1,9	2,4	1,7	1,7
2	2,4	1,7	1,8
2,4	2,9	2,1	2,15
2,5	3,0	2,2	2,25
2,65	3,1	2,3	2,35
2,62	3,1	2,3	2,35
3	3,6	2,6	2,75
3,5	4,2	3,1	3,25
3,55	4,2	3,1	3,25

Zdroj: HOSTR LIBEREC S.R.O. Katalog OK01. Online. 2018.

Z tabulky byly pro O-kroužek 12x2 vybrána hodnota $L_1=2,4$ mm a $S=1,7$ mm. Pro O-kroužek 6x1,5 jsou hodnoty $L_1=1,9$ mm a $S=1,3$ mm.

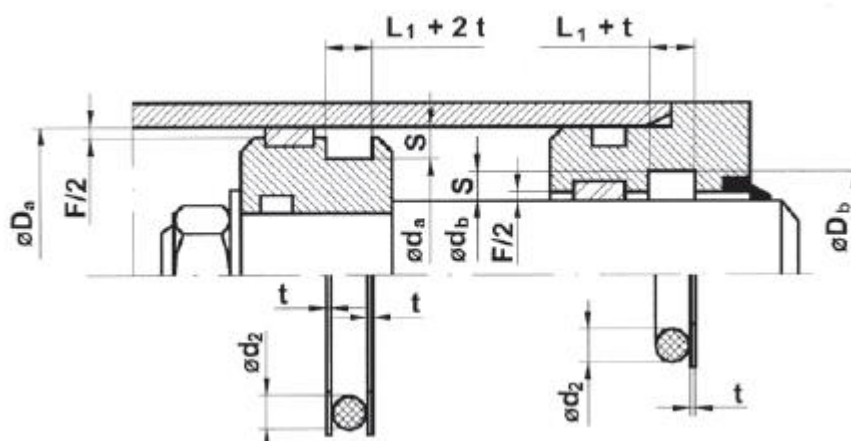
Důležitá je také vhodná volba tvrdosti O-kroužků, která se vybírá podle hodnot tlaků v systému pro dynamické utěsnění. Navrhovaný systém je v tomto případě dimenzován na tlak 40 barů. Této hodnotě odpovídají tvrdosti 70, 80 a 90 Shoreho. Dle dostupnosti na trhu byla zvolena tvrdost 70 Shore, která je pro navrhovaný rozvaděč dostačující a pomocí tabulky níže byla navržena vhodná velikost těsnící spáry $F = 0,1$ mm.

Tab. 3: Tabulka tvrdosti a mezery pro těsnící spáru

Maximální těsnící spára F v mm - dynamické těsnění (tab. 19)			
Tvrdost (Sh A)	Tlak (bar)	maximální těsnící spára F	
		bez opěrného kroužku	s opěrným kroužkem
70	10	0,25	0,3
	25	0,2	
	50	0,1	
80	25	0,25	0,3
	50	0,2	
	75	0,1	
90	50	0,2	0,3
	75	0,15	
	100	0,1	

Zdroj: HOSTR LIBEREC S.R.O. Katalog OK01. Online. 2018.

S vybranými hodnotami d_1 , d_2 , L_1 , S a F je možné podle obrázku a uvedených vzorců níže jednotlivé hodnoty ostatních průměrů dopočítat.



Obr. 35: Způsoby uložení O-kroužků a označení rozměrů.

Zdroj: HOSTR LIBEREC S.R.O. Katalog OK01. Online. 2018.

Zápich pro O-kroužek o rozměrech 12x2 mm se nachází na pohyblivém šoupátku. O-kroužek o rozměrech 6x1,5 mm má zápich v pevně usazeném šroubení. Obrázek výše zobrazuje jednotlivé důležité hodnoty pro návrh uložení O-kroužků oběma způsoby.

2.3.1 Výpočet hodnot pro O-kroužek 12x2 mm

Jak je již uvedeno výše, O-kroužky o rozměru 12x2 mm se nacházejí na pohyblivém šoupátku. Pro tento stav platí že:

d_1 = vnitřní průměr O-kroužku = 12 mm

d_a = průměr zápichu v mm

$$d_1 = d_a \quad (14.1)$$

$$d_a = 12 \text{ [mm]} \quad (14.2)$$

Dále je potřené znát průměr D_a [mm], který značí průměr válce šoupátka. Ten je určen vztahem dle tabulek:

$$d_a = D_a - 2 * S \quad (15.1)$$

$$12 = D_a - 2 * 1,7 \quad (15.2)$$

$$D_a = 12 + 2 * 1,7 \quad (15.3)$$

$$D_a = 15,4 \text{ [mm]} \quad (15.4)$$

S vypočítanou hodnotou D_a a velikostí těsnící spáry F je možné dopočítat největší průměr navrhovaného šoupátka.

$D_a = 15,4 \text{ [mm]}$

$F = 0,1 \text{ [mm]}$

$D_{\text{šoupátka}} = ? \text{ [mm]}$

$$D_{\text{šoupátka}} = D_a - F \quad (16.1)$$

$$D_{\text{šoupátka}} = 15,4 - 0,1 \quad (16.2)$$

$$D_{\text{šoupátka}} = 15,3 \text{ [mm]} \quad (16.3)$$

2.3.2 Výpočet hodnot pro O-kroužek 6x1,5 mm

O-kroužek o rozměrech 6x1,5 mm je pevně usazen v zápichu šroubení v rozvaděči. Pro tento způsob se pro výpočet použije vztah:

d_1 = vnitřní průměr O-kroužku = 6 mm

d_b = průměr ovládací tyčky [mm]

$$d_1 = d_b \quad (17.1)$$

$$d_b = 6 \text{ [mm]} \quad (17.2)$$

Poté je spočítán největší průměr zápichu v šroubení D_b [mm] daný vztahem dle tabulek:

$$D_b = d_b + 2 * S \quad (18.1)$$

$$D_b = 6 + 2 * 1,3 \quad (18.2)$$

$$D_b = 8,6 \text{ [mm]} \quad (18.3)$$

Dle hodnoty d_b a těsnící spáry F je nyní opět možné dopočítat průměr otvoru šroubení.

$$d_b = 6 \text{ [mm]}$$

$$F = 0,1 \text{ [mm]}$$

$$D_{díry} = ? \text{ [mm]}$$

$$D_{díry} = d_b + F \quad (19.1)$$

$$D_{díry} = 6 + 0,1 \quad (19.2)$$

$$D_{díry} = 6,1 \text{ [mm]} \quad (19.3)$$

2.3.3 Drsnosti povrchů, tolerance a rádiusy pro navržené rozměry

S navrženými a dopočítanými rozměry zápichů pro těsnící O-kroužky v hydraulickém rozvaděči je dále podle tabulek přiřazena správná tolerance a případně doplněna požadovaná drsnost povrchu, pokud je to vyžadováno.

Tab. 4: Tabulka tolerance a lícování v mm

<i>Tolerance a lícování v mm (tab. 17)</i>				
<i>Rozměr</i>	<i>Tolerance</i>			
D_a, d_b	$H 8/f7$			
d_a	$h 9$			
D_b	$H 9$			
<i>Průměr kroužku d_2</i>	<i>do 4</i>	<i>do 6</i>	<i>do 8</i>	<i>do 10</i>
<i>Šířka drážky L_1</i>	$+ 0,2/0$	$+ 0,3/0$	$+ 0,4/0$	$+ 0,5/0$

Zdroj: HOSTR LIBEREC S.R.O. Katalog OK01. Online. 2018.

Tab. 5: Tabulka doporučené drsnosti povrchů

<i>Doporučené drsnosti R_{max} v μm (tab. 18)</i>	
<i>Plocha</i>	<i>Drsnost R_a</i>
<i>Základní průměr drážky d_a, D_b</i>	<i>1,6</i>
<i>Bok drážky L_1</i>	<i>3,2</i>
<i>Kluzné plochy D_a, d_b</i>	<i>max. 0,4</i>

Zdroj: HOSTR LIBEREC S.R.O. Katalog OK01. Online. 2018.

V tabulce jsou také uvedeny hodnoty zaoblení vnitřní a vnější hrany zápichů podle tloušťky zvoleného O-kroužku. Tabulky s hodnotami je zobrazena níže.

Tab. 6: Tabulka doporučené rozměry rádiusů v zápichu dle tloušťky O-kroužku

<i>Zaoblení v mm (tab. 7)</i>		
<i>Tloušťka d_2</i>	<i>1,0 do 2,0</i>	<i>2,5 do 10</i>
<i>poloměr r_1</i>	<i>0,1</i>	<i>0,25</i>
<i>poloměr r_2</i>	<i>0,2</i>	<i>0,6</i>

Zdroj: HOSTR LIBEREC S.R.O. Katalog OK01. Online. 2018.

2.4 Tvorba modelů, výkresů a nákupní specifikace

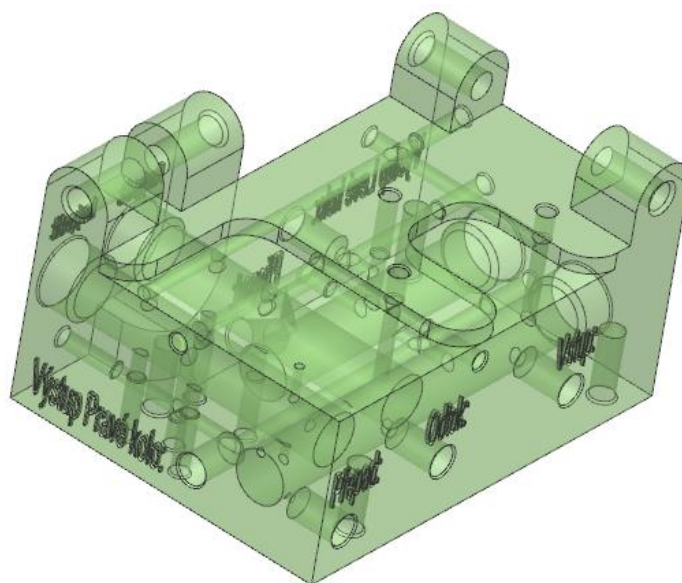
Kapitola 2.4 diplomové práce se zabývá vlastním návrhem mechanicky ovládaného hydraulického rozvaděče pomocí vlastních navržených dílů a katalogových komponent, tvořící finální sestavu rozvaděče. Pro tvorbu konstrukčního návrhu je použit software NX a Solidworks 2016. Některé katalogové komponenty byly vybrány z dostupné knihovny Solidworks a pomocí formátu STEP (.step; .stp) převedeny a využity v sestavě v softwaru NX. Kapitola se dále zabývá tvorbou vhodné výkresové dokumentace a specifikací katalogových komponent v nákupní specifikaci.

2.4.1 Model těla rozvaděče

Hlavním požadavkem je navržení těla rozvaděče, které tvoří klíčovou součást celého návrhu, podle níž jsou ostatní komponenty optimalizovány. Při návrhu součásti byl zohledněn požadavek na co nejmenší velikost a hmotnost. Velikost je určena hlavně vnitřními součástmi, jako jsou šoupátka, pružiny, závity otvorů pro připojení hadic a uchycení ovládacích prvků rozvaděče. Hmotnost byla minimalizována vhodnou volbou hliníkové slitiny EN AW-6082 T6.

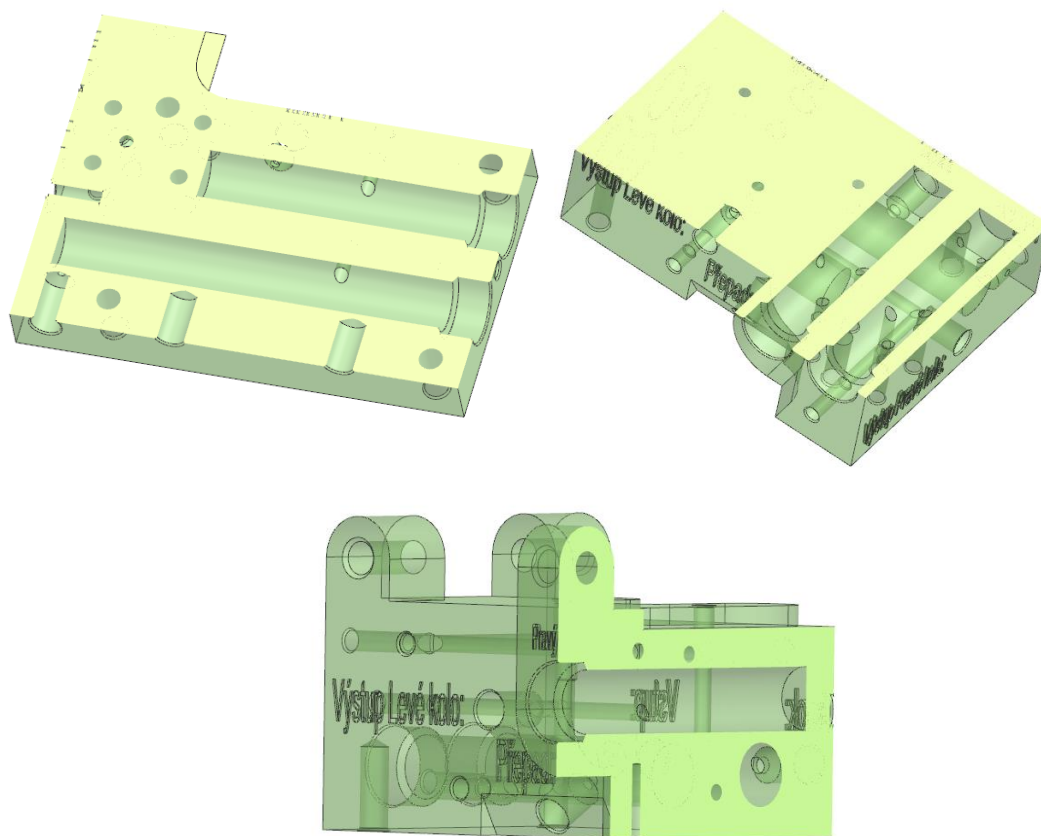
Tělo rozvaděče ve finální podobě má rozměry: největší délku 130 mm, šířku 100 mm a výšku 75 mm. Přívod brzdové kapaliny od ovládání brzdy je do rozvaděče veden otvorem označeným jako „vstup“ a brzdová kapalina je poté vyvedena otvory pro pravou a levou brzdu. Přebytečná brzdová kapalina je odváděna otvorem, označený jako „odtok“. U hydraulických rozvaděčů je důležité vytvořit „přepady“ pro možnost odtoku kapaliny, která se dostane přes těsnící kroužky před a za šoupátko. Pro tuto kapalinu jsou v rozvaděči vytvořeny dva výstupní otvory označené jako „přepad“. Všechny výše zmíněné otvory mají trubkový závit G1/8 o délce 0,5 palce, umožňující připojení hydraulických hadic s tímto závitem.

Na obrázcích níže je tělo rozvaděče zobrazeno v průhledném stavu pro lepší znázornění vnitřního uspořádání šoupátek a kanálů. Jsou také přidány vhodné obrázky řezů rozvaděčem.



Obr. 36: Tělo rozvaděče se zobrazením vnitřní struktury

Zdroj: Vlastní tvorba



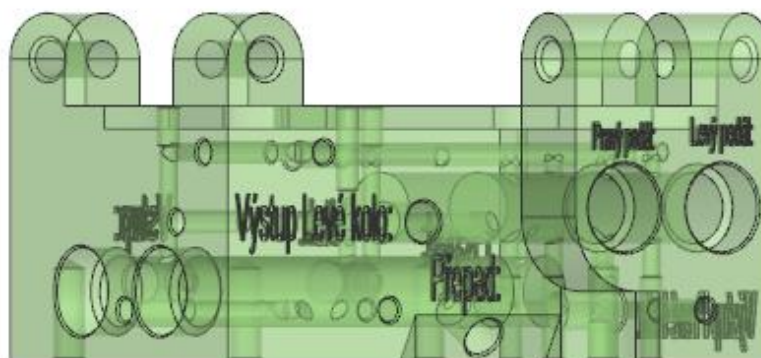
Obr. 37: Řezy tělem rozvaděče

Zdroj: Vlastní tvorba

V navrhovaném rozvaděči se nacházejí čtyři řídicí prvky pro ovládání průtoku a distribuci brzdové kapaliny. Tyto prvky jsou tvořeny čtyřmi otvory o průměru 15,4 mm s vhodnou tolerancí pro těsnící kroužky a rovným dnem o hloubkách podle navržených šoupátek. Otvory pro vložení šoupátek jsou osazeny závity M20 x 1,5 pro navržené šroubení.

Kanály, které propojují dílčí rozvaděče mezi sebou a se vstupy i výstupy, jsou tvořeny otvory o průměru 4mm, které lze vyvrtat. Nepotřebné vstupy do kanálů jsou osazeny závity M6 x 1 pro ucpávky. Vedení kanálů je uspořádáno podle schémat uvedených v kapitole 2.1. Kanály pro přepady jsou tvořeny otvory o průměru 2,5 mm. Na nepotřebných vstupech otvorů o průměru 2,5 mm jsou vytvořeny závity M3 x 0,5 pro ucpávky.

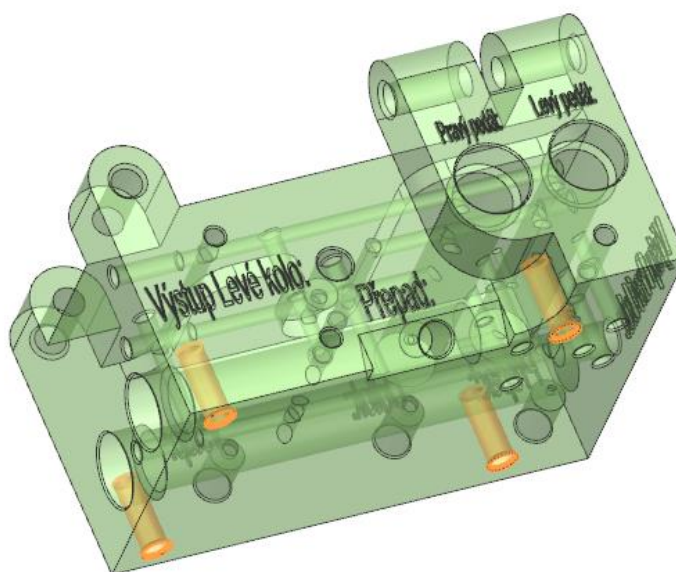
Na horní části navržené komponenty se nacházejí prvky pro uchycení ovládacích součástí jednotlivých šoupátek v rozvaděči. Dále jsou zde vybrány pro odstranění přebytečného nežádoucího materiálu a snížení hmotnosti. Celková hmotnost těla rozvaděče se zvoleným materiálem činí 1,43 kg.



Obr. 38: Tělo rozvaděče se zobrazením vnitřní struktury z druhé strany

Zdroj: Vlastní tvorba

Uchycení navrženého těla rozvaděče k rámu letadla je realizováno pomocí čtyř otvorů se závity M8 x 1,25 ze spodní strany rozvaděče. Hloubky otvorů byly zvoleny podle doporučených parametrů strojnických tabulek. Pro závity M8 s délkou závitu 15 mm byla zvolena hloubka otvoru 20 mm. Tyto hodnoty odpovídají krátkému výběhu vnitřního metrického závitu. (LEINVEBER, Jiří a VÁVRA, Pavel. *Strojnické tabulky*. 2011)

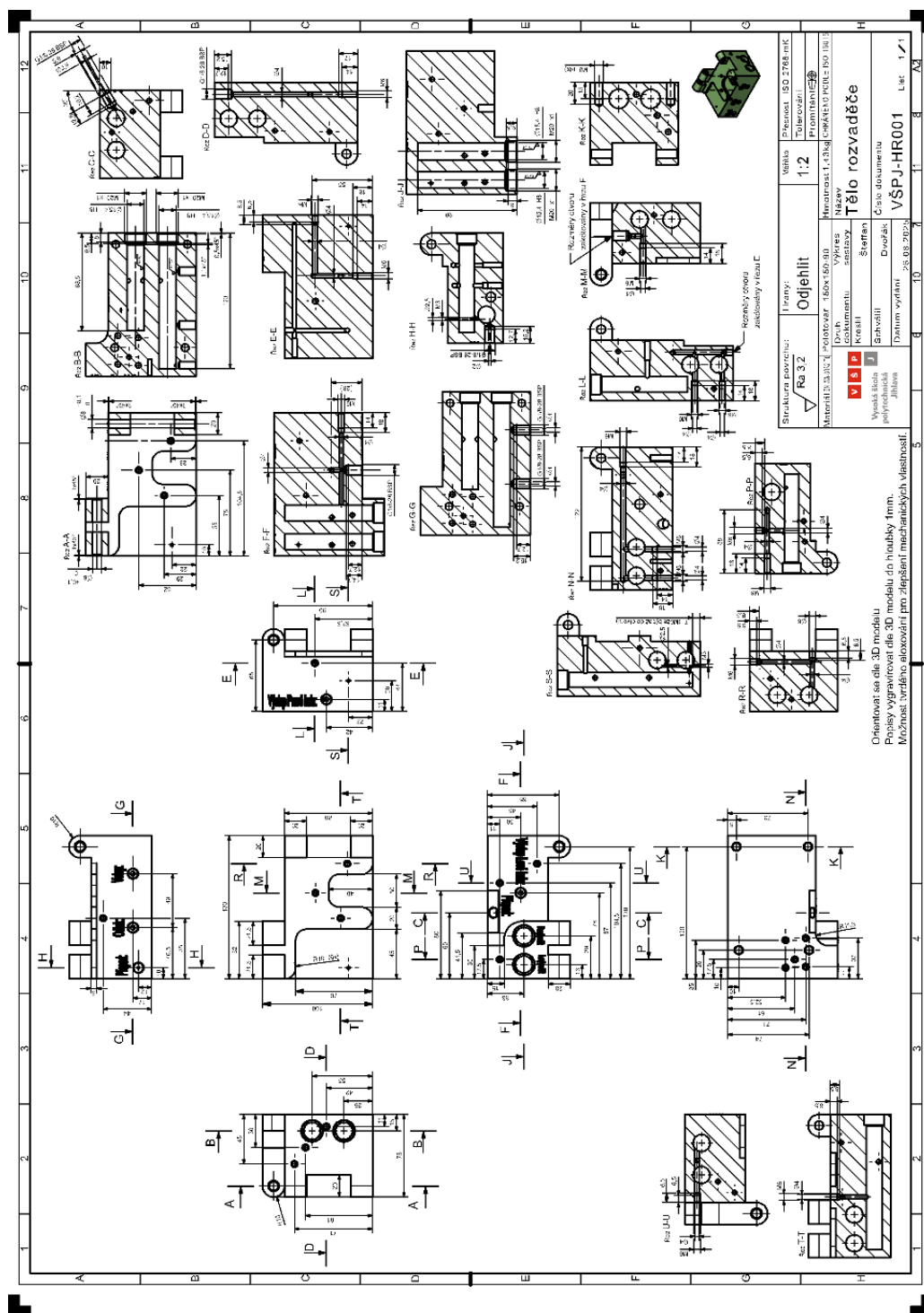


Obr. 39: Otvory označené žlutou barvou pro uchycení těla rozvaděče k rámu letadla

Zdroj: Vlastní tvorba

Pro samotné tělo rozvaděče je vytvořen výrobní výkres, na kterém jsou zakótovány všechny rozměry a polohy otvorů. Kvůli velkému množství kanálů pro přívod a distribuci brzdové kapaliny bylo vytvořeno několik řezů rozvaděčem, v nichž jsou jednotlivé kanály zobrazeny s příslušnými rozměry a označením závitů. Samotné tělo rozvaděče váží 1,43 kg. Tato váha byla dosažena vhodnou volbou materiálu, jak již bylo uvedeno výše, konkrétně hliníkové slitiny EN AW-6082 T6. Na výkrese je rovněž uvedena možnost použití tvrdého eloxování pro zlepšení mechanických vlastností, bude-li to vyžadováno.

Tvrdé eloxování je elektrolytický proces aplikovaný zejména na hliníkové slitiny, při němž vzniká odolná oxidová vrstva. Její tloušťka i zabarvení závisí na vlastnostech slitiny a provozních podmínkách procesu. Tato vrstva významně zlepšuje mechanické parametry materiálu, například tvrdost, ořezuvzdornost a odolnost proti korozi i zvýšeným teplotám. Proces je navíc šetrný k životnímu prostředí, protože využívá přirozené oxidační schopnosti hliníku a nevznikají při něm škodlivé vedlejší produkty. V průmyslové praxi se často používá technologie tvrdého eloxování v roztoku kyseliny sírové. (*BOMEX. Tvrdé eloxování. Online*)

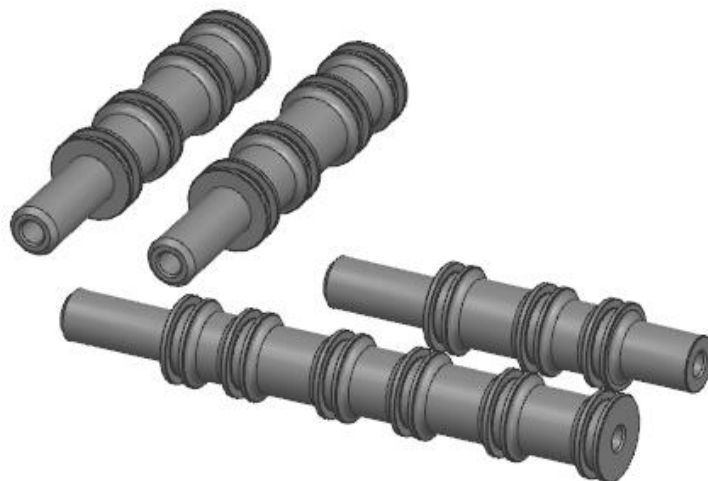


Obr. 40: Výrobní výkres těla rozvaděče

Zdroj: Vlastní tvorba

2.4.2 Modely jednotlivých šoupátek

Navrhovaný rozvaděč je složen z jednoho šoupátka 5/2, jednoho šoupátka 2/2 a dvou šoupátek 3/2, jak již bylo zmíněno výše v kapitole 2.1. Všechny šoupátka jsou navržena obdobným způsobem se stejnými průměrovými rozměry, liší se pouze celkovou délkou, počtem a délkami jednotlivých sekcí, umožňující distribuci brzdové kapaliny. Materiál šoupátek byl zvolen 1-4112.



Obr. 41: Přehled navržených šoupátek

Zdroj: Vlastní tvorba

Nejdelší navržené šoupátko v rozvaděči je šoupátko 5/2. Toto šoupátko se skládá z pěti sekcí pro řízení průtoku brzdové kapaliny ze vstupu a do odtoku v celém rozvaděči. Jednotlivé sekce mají různé délky, což umožňuje uzavření nebo otevření kanálů při posunu šoupátka. Na největších průměrech je šoupátko opatřeno zápichy pro vložení těsnících O-kroužků mezi přepážkami. Na konci šoupátka je navržen doraz, který omezuje posunutí šoupátka ovládacím prvkem pouze o určitou vzdálenost. Skrze celé šoupátko vede otvor umožňující odtok přebytečné brzdové kapaliny, která se dostane přes těsnění před nebo za šoupátko do „přepadu“. Přední otvor je opatřen závitem M5 x 0,8 pro montáž ovládací tyčky.



Obr. 42: Šoupátko 5/2

Zdroj: Vlastní tvorba

V navrhovaném rozvaděči se nachází dílčí rozvaděč 2/2, pro který je speciálně navrženo šoupátko plnící jeho funkci. Tato součástka se skládá pouze z dvou sekcí, mezi nimiž se šoupátko posouvá pomocí ovládací tyčky a pružiny. Šoupátko je rozměrově upraveno dle vstupních a výstupních kanálů v rozvaděči, aby fungovalo společně s rozvaděčem 5/2 při stejném stlačení ovládacího prvku. Zápichy pro těsnící O-kroužky, průměry jednotlivých částí i vnitřní otvor pro odvod přebytečné brzdové kapaliny jsou shodné s řešením šoupátka 5/2. Stejná je také konstrukce dorazu. Model šoupátka pro rozvaděč 2/2 je zobrazen na obrázku dále.



Obr. 43: Šoupátko 2/2

Zdroj: Vlastní tvorba

Posledním navrženým šoupátkem v sestavě rozvaděče je šoupátko pro dílčí rozvaděč 3/2. Ačkoliv se v navrhovaném rozvaděči nacházejí dva dílčí rozvaděče tohoto typu, při konstrukčním návrhu bylo rozhodnuto, že budou totožné. Šoupátko pro rozvaděč 3/2 je navrženo obdobným způsobem jako šoupátka 5/2 a 2/2 – zachovává shodné průměry a konstrukční řešení. Odlišuje se pouze celkovou délkou a počtem sekcí, případně jejich délkami, které odpovídají funkčním požadavkům rozvaděče. Model navržené šoupátka je zobrazen na obrázku níže.

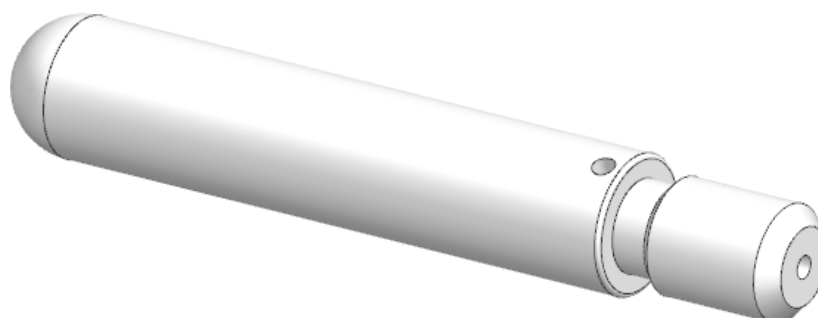


Obr. 44: Šoupátko 3/2

Zdroj: Vlastní tvorba

2.4.3 Model Tyčka 1

Do jednotlivých šoupátek použitých v rozvaděči je našroubována Tyčka 1. Tato navržená komponenta slouží k ovládání pohybu šoupátek, tedy k jejich stlačení v rámci rozvaděče. Jeden konec součásti je opatřen rádiusem, který zajišťuje plynulý kontakt s ovládacím mechanismem. Druhý konec je opatřen závitem M5 x 0,8 pro našroubování do těla šoupátka. V této části jsou rovněž vyvrtány dva otvory o průměru 1 mm, které umožňují odvod případně uniklé kapaliny ze sekcí šoupátek přes těsnící O-kroužky do přepadového kanálu v zadní části dílčích rozvaděčů.

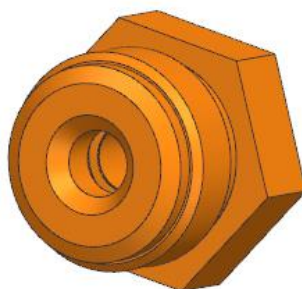


Obr. 45: Tyčka 1

Zdroj: Vlastní tvorba

2.4.4 Model Šroubení 1

Pro uzavření a možnost ovládání jednotlivých dílčích rozvaděčů v navrženém hydraulickém rozvaděči bylo navrženo šroubení, které je do těla rozvaděče upevněno závitem M20x1. Ve vnitřní části šroubení je vytvořen zápich pro těsnící O-kroužek o rozměrech 6x1,5 mm, zajišťující utěsnění mezi šroubením a ovládací tyčkou. Skrze šroubení prochází tyčka 1, která zajišťuje posuv šoupátek mezi jednotlivými pracovními polohami rozvaděče. Šroubení je navrženo z materiálu CuZn40Pb2 neboli druhu mosazi, vyznačující se dobrou obrobitelností, odolností vůči korozi a vhodnými mechanickými vlastnostmi pro hydraulické aplikace. Celková hmotnost jednoho šroubení činí 45,8 gramů. Model šroubení je zobrazen na obrázku níže.

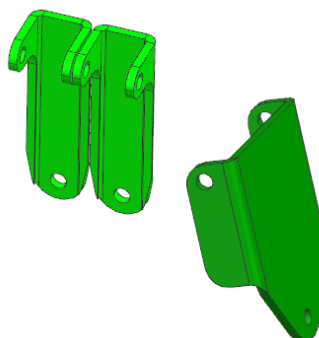


Obr. 46: Šroubení 1

Zdroj: Vlastní tvorba

2.4.5 Modely Páky a Páky malé

Pro ovládání jednotlivých dílčích rozvaděčů byly navrženy a vymodelovány komponenty pod označením Páka a Páka malá. Tyto součásti jsou k tělu rozvaděče přichyceny prostřednictvím dílů Tyčka 2 a Tyčka 3 a svým tvarem se opírají o ovládací Tyčku 1, která zajišťuje posuv šoupátek v rozvaděči. Páka je navržena tak, aby umožňovala současné ovládání rozvaděčů 5/2 a 2/2. Naproti tomu Páka malá slouží k samostatnému ovládání jednoho rozvaděče typu 3/2. Oba druhy pák jsou navrženy z nerezového plechu o tloušťce 4 mm. Výroba může být realizována technologií řezání laserem, po níž následuje ohýbání do požadovaného tvaru a dokončovací úpravy. V dolní části komponent je umístěn průchozí otvor o průměru 8 mm pro připojení táhel nebo lanovodů a propojení tak k ovládacím prvkům letadla jako je řídicí páka nebo pedály směrového kormidla. Modely obou pák jsou na obrázku níže.

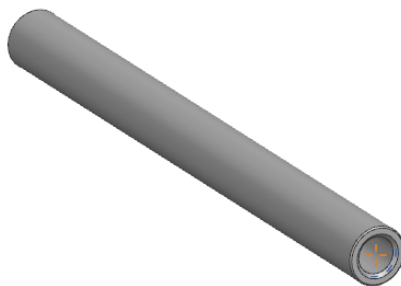


Obr. 47: Modely Pák

Zdroj: Vlastní tvorba

2.4.6 Modely Tyčky 2 a 3

Jak je již uvedeno výše, pro uchycení jednotlivých pák k tělu rozvaděče byly navrženy komponenty Tyčka 2 a Tyčka 3. Tyto díly mají tvar hřídelí o průměru 8 mm. Na obou čelech se nachází otvory se závitem M6 o hloubce 12 mm pro našroubování šroubů. Tyčka 2 je delší než Tyčka 3. Zvolený materiál součástí je 1-4112, která zajišťuje dostatečnou pevnost a odolnost vůči opotřebení.

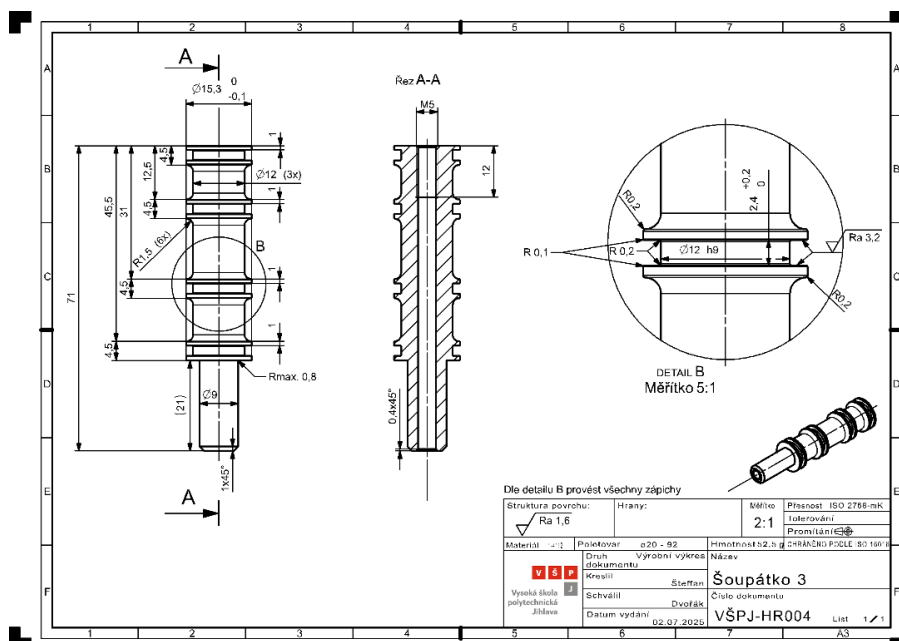


Obr. 48: Model Tyčky 2

Zdroj: Vlastní tvorba

2.4.7 Výkresová dokumentace

Pro každou speciálně navrženou komponentu byl kromě 3D modelu vytvořen také odpovídající výrobní výkres, na němž jsou uvedeny všechny potřebné rozměry součásti včetně příslušných tolerancí a požadované drsnosti povrchů. V kapitole 2.4.1 je uveden výkres samotného těla rozvaděče. Jako příklad je níže uveden výrobní výkres součásti označené jako Šoupátko 3. Každý výrobní výkres obsahuje popisové pole, ve kterém je uveden název komponenty, číslo výkresu a měřítko, jež určuje poměr zobrazení vůči skutečné velikosti dílu. Dále jsou zde uvedeny informace o hmotnosti součásti, materiálu, ze kterého má být komponenta vyrobena a velikosti polotovaru.



Obr. 49: Výrobní výkres šoupátka 3

Zdroj: Vlastní tvorba

2.4.8 Náкупní specifikace

Pro navržený hydraulický rozvaděč byly kromě specificky navržených komponent zvoleny také součásti, které jsou normalizované nebo běžně dostupné na trhu. Mezi tyto prvky patří například šrouby, podložky či těsnící O-kroužky, jejichž příklad je uveden na obrázku níže. Pro tento typ komponent je vytvořen specifický dokument místo výrobního výkresu jako je tomu u vyráběných komponent. Tento dokument se nazývá nákupní specifikace a nachází se v něm všechny volně prodejné komponenty potřebné pro navržený hydraulický rozvaděč.

V hlavičce nákupní specifikace je možné dohledat a zjistit popis součásti, výrobce, normu, dle které je komponenta vyráběna. Mimo to je možné v dokumentu dohledat specifické rozměry dílu s druhem materiálu, ze kterého se komponenta vyrábí. Dále se v dokumentu nachází katalogové číslo s případným odkazem, který je schovaný v názvu prodejce, aby bylo možné komponentu zakoupit.

Pod každou hlavičkou nákupní specifikace pro komponentu se nachází obrázek, pro znázornění tvaru součásti. Pokud prodejce udává je pod obrázkem přiložen výstřížek se základními parametry požadované komponenty.

Popis součásti:	O-kroužek DICHTOMATIK EPDM 70 - 6.00 x 1.50
Výrobce:	DICHTOMATIK
Výrobek v souladu s normou:	IN ISO 3601-1:2013-11 (CLASS B)
Specifické rozměry:	6.00 x 1.50
Materiál:	EPDM - Etylénpropylenová pryž
Katalogové číslo:	OK-006.00x1.50
URL:	Mateza



Parametry a specifikace

Výrobce / Značka	DICHTOMATIK	Barva	Černá
Vnitřní průměr	6 mm	Typ těsnění	O-kroužky X-kroužky
Průměr profilu - d1	1,5 mm	Typ provedení těsnění	O-kroužky
Min. teplota	-45 °C	Typ balení těsnění	Kus
Max. teplota	130 °C	Tvrdost	70
Materiál	EPDM - Etylénpropylenová pryž	Hmotnost	0 kg

Obr. 50: Ukázka nákupní specifikace

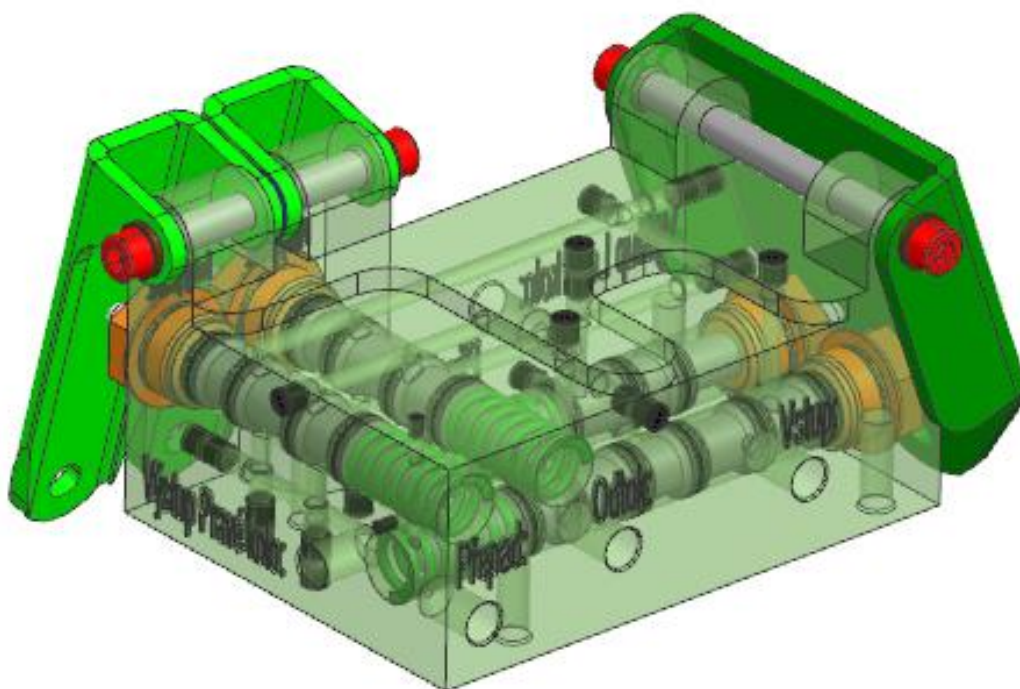
Zdroj: Vlastní tvorba

2.5 Finální sestava a výkres sestavy

Finální sestava hydraulického rozvaděče je uvedena na obrázku níže. Tělo rozvaděče je v modelu znázorněno částečně průhledně pro možnost zobrazení uspořádání vnitřních součástí a jednotlivých kanálků rozvaděče, které by jinak nebylo možné takto zobrazit.

Na zobrazení sestavy níže je také vidět, že rozvaděč se skládá ze čtyř dílčích hydraulických rozvaděčů v těle samotného rozvaděče. Ovládání je poté realizováno pomocí ovládacích pák, jak již uvedeno výše.

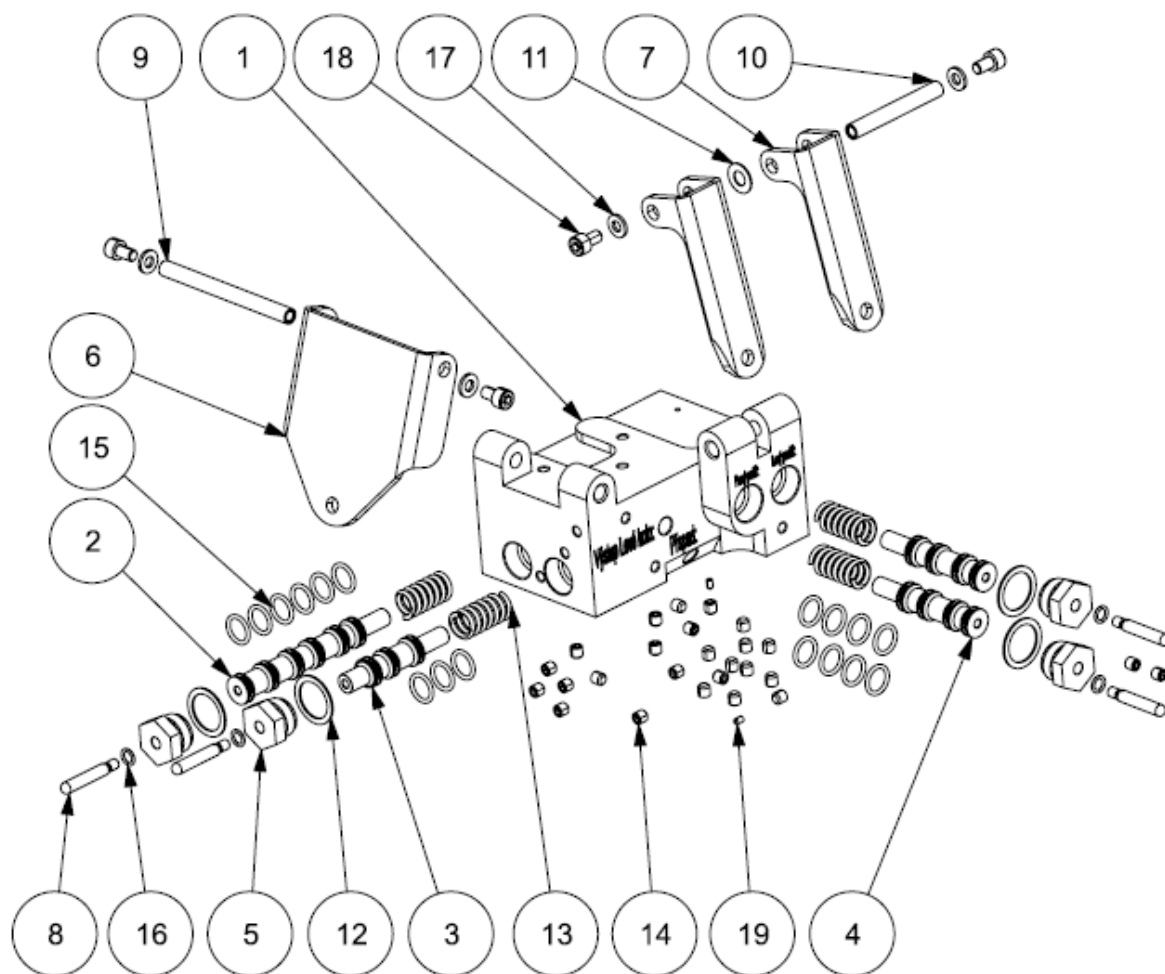
Celková hmotnost sestavy činí 2,55 kg. Tato hodnota je stanovena na základě součtu hmotností navržených komponent a hmotností nakupovaných součástí.



Obr. 51: Finální sestava hydraulického rozvaděče

Zdroj: Vlastní tvorba

Na výkrese sestavy je pro zjednodušené zobrazení vnitřního uspořádání zobrazen rozložený pohled celého hydraulického rozvaděče s číselným označením jednotlivých druhů součástí - od nakupovaných až po samostatně navržené komponenty. Při tvorbě rozloženého pohledu jsou komponenty vysunuty z těla rozvaděče co nejvhodnějším způsobem, aby co nejlépe znázorňovaly vnitřní složení rozvaděče. Při samotné montáži je doporučeno řídit se jak výkresovou dokumentací, tak i samotným 3D modelem, jelikož některé zaslepovací otvory neobsahují pouze jeden šroub DIN 913, ale případně i dva, aby se zamezilo vzniku volného místa v kanálech. Rozložený pohled celé sestavy je znázorněn na obrázku níže na další stránce.



Obr. 52: Rozpad sestavy

Zdroj: Vlastní tvorba

Mimo samotný rozložený pohled se na výkrese nachází také seznam položek neboli kusovník. Kusovník obsahuje 20 položek. Tyto položky jsou označeny v pořadí 1 až 20 a v rozloženém pohledu, jak již bylo uvedeno výše. Kusovník mimo označení čísla pozice na výkrese sestavy obsahuje také názvy všech použitých komponent s jejich množstvím. Následuje číslo výkresu pro navrhované součásti a případná norma či katalogové číslo pro nakupované díly. Dále je v kusovníku uveden materiál, ze kterého jsou jednotlivé komponenty vyrobeny. U specificky navržených komponent se jedná o materiály polotovarů, u nakupovaných dílů se jedná o materiály uvedené dodavateli v nákupní specifikaci. Poslední sloupec udává hmotnost jednotlivých součástí v kg.

Jediná odchylka oproti standardnímu popisu pozic je u dvacáté položky, kterou tvoří specifické lepidlo pro utěsnění šroubů v brzdových systémech, které chemicky odolává brzdovým kapalinám. Tato pozice je uvedena v závorce, jelikož se na ni nelze odkázat v rozloženém pohledu sestavy. Místo hmotnosti je zde uvedena hodnota 50 ml (mililitr), označující množství v jednom balení. Na výkrese sestavy je doplněna poznámka, že toto lepidlo slouží pro utěsnění šroubů DIN 913.

Samotná tabulka kusovníku se nachází níže na další stránce.

Tab. 7: Tabulka kusovníku sestavy

(20)	Loctite 545 Těsnění pro hydrauliku	1	135486	Methakrylát ester	50 ml
19	DIN 913 M5x5	2	DIN913; ISO4026; ČSN021187	Ocel	0,001
18	DIN 912 M6x10	4	DIN912; ISO4762; ČSN021143	Ocel	0,005
17	Podložka - 6	4	ČSN 021721; DIN 126; ISO 7091	Ocel	0,001
16	O-kroužek EPDM 70 - 6x1,5	4	IN ISO 3601-1:2013-11 (CLASS B)	EPDM - Etylénpropylenová pryž	0,001
15	O-kroužek EPDM 70 -12x2	17	IN ISO 3601-1:2013-11 (CLASS B)	EPDM - Etylénpropylenová pryž	0,001
14	DIN 913 M6x6	26	DIN913; ISO4026; ČSN021187	Ocel	0,001
13	Pružina 15x2,5x32	4	PRUZTL 2,5x15-32	Ocel	0,01
12	Kroužek 20X26_1	4	DIN 7603A , ČSN 02 9310.2	Měď (CU)	0,002
11	Vymezovací podložka	1	VŠPJ-HR011	1.4301/7	0,001
10	Tyčka 3	1	VŠPJ-HR010	1-4112	0,02
9	Tyčka 2	1	VŠPJ-HR009	1-4112	0,03
8	Tyčka 1	4	VŠPJ-HR008	1-4112	0,01
7	Páka malá	2	VŠPJ-HR007	1.4301/7	0,12
6	Páka	1	VŠPJ-HR006	1.4301/7	0,3
5	Šroubení 1	4	VŠPJ-HR005	CuZn40Pb2	0,05
4	Šoupátko 3	2	VŠPJ-HR004	1-4112	0,05
3	Šoupátko 2	1	VŠPJ-HR003	1-4112	0,05
2	Šoupátko 1	1	VŠPJ-HR002	1-4112	0,08
1	Tělo rozvaděče	1	VŠPJ-HR001	EN AW-6082 T6	1,43
POZ.	Název	MN.	Číslo výkresu/Norma/K.Č.	Materiál	Váha (Kg)

Zdroj: Vlastní tvorba

3 Diskuse

3.1.1 Využití

Využití navrženého konstrukčního řešení hydraulického rozvaděče spočívá v možné integraci do již existujícího brzdového systému letounu. Cílem je dodatečné ovládání letadla prostřednictvím regulace tlaku brzdové kapaliny, který je vyvíjen v jednotlivých brzdách při dosažení specifické kombinace pozic ovládacích prvků letadla. Díky tomuto řešení dojde ke zlepšení ovladatelnosti, zjednodušení a zvýšení komfortu řízení letounu při pozemním pohybu. To zahrnuje popojíždění po letištních plochách, rozjezd, vzlet a přistání.

Z hlediska přínosu je nutné systém posoudit v kontextu případové studie postupu řízení. Nízká hmotnost rozvaděče zajišťuje, že jeho integrací nedochází k navýšení celkové hmotnosti brzdového systému, což má pozitivní vliv na případnou spotřebu paliva a letové vlastnosti. Zvýšená účinnost regulace tlaku umožňuje preciznější a rychlejší reakci brzd během poježdění například na mokré či zledovatělé ploše, čímž se významně zvyšuje bezpečnost provozu na zemi. Zlepšená ovladatelnost zvyšuje pilotní komfort řízení, zejména při manévrování v omezených prostorech.

Ovládací prvky rozvaděče je nutné připojit k řídící páce a k jednotlivým pedálům směrového a výškového kormidla letounu. Připojení se realizuje například ocelovými lany vedenými v bowdenech nebo jiným obdobným způsobem vhodným pro zvolený typ letounu.

Hydraulický rozvaděč je propojen s brzdovým systémem letounu pomocí trubkových závitů G 1/8 – 28 BSP. Tyto závity slouží k připojení vstupů, výstupů i přepadů, které zajišťují odtok přebytečné brzdové kapaliny z hydraulického rozvaděče. Uchycení samotného rozvaděče je realizováno čtyřmi otvory s metrickými závity M8, které umožňují přímou montáž do rámu letounu nebo uchycení jiným vhodným způsobem.

Hydraulický systém je navržen pro lehké letouny s maximální vzletovou hmotností do 600 kg a dimenzován pro maximální tlak v brzdové soustavě 40 barů (4 MPa). Pro brzdové systémy o vyšších tlacích je nutné opětovně provést základní pevnostní výpočty tlouštěk stěn. Z těchto výpočtů může vyplynout nutnost úpravy rozměrů rozvaděče nebo poloha pozic jednotlivých kanálů.

3.1.2 Pokračování na projektu

Pro další postup při realizaci navrženého hydraulického rozvaděče je doporučeno vytvořit pevnostní simulaci. Tato simulace má sloužit ověření vypočtených hodnot pro maximální navržený tlak v rozvaděči a stanovení, zda tyto hodnoty splňují požadavky. Zároveň je doporučeno provést analýzu cyklického namáhání pomocí specializovaného softwaru, čímž bude zaručena bezpečná dlouhodobá použitelnost rozvaděče. I přes provedené základní výpočty minimálních požadovaných tlouštěk stěn, které se týkaly pouze statického namáhání, se mohou skutečné hodnoty při dlouhodobém cyklickém provozu lišit. Po provedení pevnostní kontroly je dalším krokem vytvoření technologických postupů pro výrobu jednotlivých navržených komponent v souladu s modely a poskytnutou výkresovou dokumentací. Následně je nutné zajistit nákup katalogových komponent dle poskytnuté nákupní specifikace. Důležitou fází je vytvoření postupu pro montáž celého rozvaděče a zároveň příprava návodu pro jeho instalaci a seřízení s ovládacími prvky letounu, ke kterým má být rozvaděč připojen.

V poslední řadě je klíčové pečlivé testování vyrobeného prototypu dle konstrukčního návrhu. Testování by mělo proběhnout v praxi na zkušebním modelu před jeho instalací do skutečného letounu a zařazením do provozu.

Závěr

Cílem diplomové práce je splnit zvoleného zadání a navrhnout hydromechanický systém pro ovládání brzd lehkého letadla. Práce se zaměřuje na konstrukční řešení mechanicky ovládaného hydraulického rozvaděče. Ten je určen pro integraci do brzdového systému letounu s maximální vzletovou hmotností do 600 kg a navoleným maximálním tlakem brzdového systému 40 barů. Rozvaděč umožňuje, při správně navolené kombinaci ovládacích prvků, regulovat tlak a distribuci brzdové kapaliny do jednotlivých brzd. Tímto je zajištěna možnost řízení pohybu letadla během pozemního provozu. Integrací rozvaděče do brzdového systému představuje významný přínos z hlediska zvýšení bezpečnosti a komfortu řízení letounu s ostruhovou koncepcí podvozku díky precizní regulaci tlaku.

Hlavním přínos práce spočívá ve vytvoření komplexního konstrukčního řešení, které nezahrnuje pouze tvorbu 3D modelů, výkresovou dokumentaci navržených komponent a přesnou nákupní specifikaci katalogových dílů. Zahrnuje také vypracování schémat a základních pevnostních výpočtů. Při návrhu byl důsledně zohledněn požadavek na minimalizaci hmotnosti, přičemž výsledná hmotnost zařízení činí pouhých 2,55 kg. Nízké hmotnosti bylo dosaženo vhodnou volbou materiálů, jako je například hliníková slitina pro tělo rozvaděče a nerezová ocel pro šoupátka. Všechny zvolené materiály jsou odolné vůči brzdovým kapalinám typu DOT 3, 4 a 5.1.

Současně byly minimalizovány i rozměry, kdy rozměry finální sestavy rozvaděče v klidové poloze činí 177,5 x 97,7 a 149,6 mm. Tyto kompaktní hodnoty jsou výsledkem optimalizace cest kanálů a uspořádání šoupátek pro distribuci brzdové kapaliny. Během výpočtů bylo ověřeno, že navržené rozměry stěn, stanovené s bezpečnostním koeficientem 10, vyhovují danému tlakovému zatížení. Samotný konstrukční návrh se skládá z jedné hlavní sestavy. Sestava se skládá z 11 druhů specificky navržených součástí a z 9 vhodných katalogových komponent. Soupis těchto položek je zobrazen v tabulce č. 7 zobrazující kusovník sestavy.

Pro tvorbu schémat a jejich jednotlivých stavů v konstrukčním návrhu je použita aplikace PowerPoint. Schémata jsou podrobně popsána v kapitole „Schématický návrh hydraulického rozvaděče“. Pro návrh rozměrů, toleranci a drsnosti povrchů těsnění a jejich uložení byly použity katalogové tabulky společnosti HOSTR LIBEREC S.R.O. (Katalog OK01), dostupné na internetu.

Navržené komponenty byly vytvořeny v modelovacím softwaru Siemens NX společně s veškerou výkresovou dokumentací. Katalogové díly byly vytvořeny rovněž v softwaru NX nebo byly vybrány z knihovny normovaných dílů v softwaru SolidWorks 2016 a pomocí formátu STEP převedeny a uloženy do prostředí NX. Katalogové komponenty jsou sepsány v nákupní specifikaci vytvořené v aplikaci Microsoft Word, přičemž kopie ve formátu PDF slouží pouze pro čtení.

Konstrukční návrh je přiložen k diplomové práci formou příloh. Příloha “A” obsahuje všechny modely komponent a sestavu s výkresovou dokumentací ve formátu pro otevření v programu NX. Příloha “B” obsahuje výkresová dokumentace ve formě PDF pouze pro zobrazení a příloha “C” obsahující soubory nákupní specifikace katalogových dílů.

Seznam použité literatury

- Odkud pochází draci? Online. Kokiskashop. 2020. Dostupné z: <https://www.kokiskashop.cz/cz/blog/odkud-pochazi-draci-B473/>. [cit. 2025-10-29].
- History of Aviation. Online. Spartan College of Aeronautics and Technology. 1 Nov 2021. Dostupné z: <https://www.spartan.edu/news/history-of-aviation/>. [cit. 2025-02-04].
- Viky. Za pád Hindenburgu mohla statická elektřina, tvrdí britský vědec. Online. Lovecpokladu.cz. 2013. Dostupné z: https://www.lovecpokladu.cz/home/za-pad-hindenburgu-mohla-staticka-elektrina-tvrdi-britsky-vedec-5893?_fid=5ex2. [cit. 2025-10-29].
- A trailblazer for aviation and a war hero: Roland Garros. Online. Roland-Garros 2025. Dostupné z: <https://www.rolandgarros.com/en-us/page/a-trailblazer-for-aviation-and-a-war-hero-roland-garros>. [cit. 2025-10-28].
- The airship Hindenburg: The airship Hindenburg over the Olympic stadium in Berlin, Germany, August 1936. Online. In: Britannica. Dostupné z: <https://www.britannica.com/topic/Hindenburg>. [cit. 2025-10-07].
- Bratři Montgolfiérové: 5. června 1783, první veřejnou let balónem na tržišti v Annonay. Online. In: Vyletbalonem.cz. Dostupné z: <https://www.vyletbalonem.cz/balonove-letani/bratri-montgolfierove-a-pocatky-balonoveho-letani/>. [cit. 2025-10-07].
- Arado Ar 234 Blitz – poslední německý letoun na britské obloze. Online. ARMYWEB.cz. 2023. Dostupné z: <https://www.armyweb.cz/clanek/blesk-z-nebes-arado-ar-234-blitz-posledni-nemecky-letoun-na-britske-obloze>. [cit. 2025-02-04].
- VOJENSKÝ HISTORICKÝ ÚSTAV PRAHA. Douglas DC-3A. Online. VHU Praha. 2020. Dostupné z: <https://www.vhu.cz/exhibit/douglas-dc-3a/>. [cit. 2025-10-07].
- Avia Av-14 / Iljušin Il-14. Online. Třebíč Nuclear Model Club. Dostupné z: https://www.tnmc.cz/walkaround/av_14.php. [cit. 2025-10-28].
- Glass Cockpit. Online. AIR TEAM. Dostupné z: <https://www.airteam.eu/cz/glass-cockpit-1>. [cit. 2025-10-29].
- BOEING. 787 Dreamliner family. Online. Boeing. Dostupné z: <https://www.boeing.com/commercial/787#overview>. [cit. 2025-10-07].
- AERO VODOCHODY AEROSPACE a.s. 2024. L-39 Albatros. [online]. Vodochody: AERO VODOCHODY AEROSPACE a.s. Dostupné z: <https://www.aero.cz/l-39-albatros/>. [cit. 2025-10-30]
- LETECKÉ MUZEUM KUNOVICE. b.r. Aero L-39 ZA Albatros. [online]. Kunovice: Letecké muzeum Kunovice. Dostupné z: <https://www.muzeum-kunovice.cz/aero-l-39-za-albatros/>. [cit. 2025-10-30].
- HANČAR, Miroslav. Popis L-39. Online. 2005. Dostupné z: https://l-39.cz/tisk_L-39_popis.html. [cit. 2025-10-30].

ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon č. 49/1997 Sb., o civilním letectví a o změně a doplnění zákona č. 455/1991 Sb., o živnostenském podnikání (živnostenský zákon), ve znění pozdějších předpisů. In: Sbírka zákonů České republiky. 1997, částka 18, s. 921–965.

Ultralehké letouny. Online. Letecká amatérská asociace ČR. Dostupné z: https://www.laacr.cz/ultralehke-letouny/?fbclid=IwY2xjawlVoiFleHRuA2FlbQlxMAABHQLpyHBxJ7ggd1eN_uRB-FD0f0DV4QAxzrZHloFgoqZfMpFBKrZgFZkmuA_aem_yLtUePPtO8woqg3-F2DGDA. [cit. 2025-03-31].

Špaček SD1 Minisport. Online. Aero klub Náchod-Vysokov. Dostupné z: <https://www.aknachod.cz/spacek-sd-1-minisport/>. [cit. 2025-10-07].

Podstata létání. Online. Blue sky Aviation. 2015, 08.12.2015. Dostupné z: <https://blueskyaviation.cz/podstata-letani>. [cit. 2025-02-04].

Aircraft Brakes. Online. Aeronautics guide. Dostupné z: https://www.aircraftsystemstech.com/p/aircraft-brakes_9081.html. [cit. 2025-03-31].

MOKŘÍŠ, Jakub. Druhy brzdových kapalin. Online. Portál řidiče. 2023. Dostupné z: <https://www.portalridice.cz/clanek/druhy-brzdovych-kapalin>. [cit. 2025-07-07].

UNITED STATES. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Federal Motor Vehicle Safety Standard No. 116: Motor Vehicle Brake Fluids. 49 CFR 571.116. Washington, D.C.: National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA),

SWASTIKOIL. Hydraulic Brake Fluid DOT-5. [online]. Dostupné z: <https://swastikoil.com/hydraulic-brake-fluids/>. [Cit. 2025-10-31].

PETRMAN, Tom. Jak se létá s ostruhovým podvozkem. Online. Aeroweb.cz. 2006. Dostupné z: <https://www.aeroweb.cz/clanky/104-jak-se-leta-s-ostruhovym-podvozkem>. [cit. 2025-06-28].

ZEJDA, Filip. Přeskolení na ostruhová letadla. Online. Aeroweb.cz. 2013. Dostupné z: <https://www.aeroweb.cz/clanky/3785-preskoleni-na-ostruhova-letadla>. [cit. 2025-06-28].

AEROSPACEWEB.ORG. Taildragger or Nose-Wheel Landing Gear? [online]. Dostupné z: <https://aerospacweb.org/question/design/q0200.shtml>. [cit. 2025-11-01].

BERKA, Pavel. EN AW-6082 T6 (AlMgSi1 F28/F31/F32). Online. Alunet Hliníkové profily na míru. Dostupné z: <https://www.alunet.cz/ENAW-6082>. [cit. 2025-06-28].

AGST. <https://www.agst.de/4112?lang=cs>. Online. AGST Draht & Biegetechnik GmbH. Dostupné z: <https://www.agst.de/4112?lang=cs>. [cit. 2025-06-28].

ČSN EN ISO 4413:2011. Hydraulika – Všeobecná pravidla a bezpečnostní požadavky na hydraulické systémy a jejich součásti. Praha: Český normalizační institut, 2011.

HOSTR LIBEREC S.R.O. Katalog OK01. Online. 2018. Dostupné z: <https://hostr.cz/>. [cit. 2025-07-05].

LEINVEBER, Jiří a VÁVRA, Pavel. Strojnické tabulky. 2011. Albra, 2011. ISBN 978-80-7361-081-4.

BOMEX. Tvrdé eloxování. Online. BOMEX. Bomex.cz. Dostupné z: <https://www.bomex.cz/technologie/tvrde-eloxovani->. [cit. 2025-08-30].

Přílohy

Příloha A – Modely komponent, sestavy v programu NX s výkresovou dokumentací

Příloha B – Výkresová dokumentace ve formě PDF

Příloha C – Nákupní specifikace katalogových dílů