



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

**NÁVRH ZAŘÍZENÍ PRO ROZTÁČENÍ KOLA
PODVOZKU PŘED PÁDOVOU ZKOUŠKOU**

DESIGN OF A DEVICE FOR SPINNING THE LANDING GEAR WHEEL BEFORE DROP TEST

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Zedníček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marek Horák, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Letecký ústav
Student:	Tomáš Zedníček
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojírenství
Vedoucí práce:	Ing. Marek Horák, Ph.D.
Akademický rok:	2021/22

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

Návrh zařízení pro roztáčení kola podvozku před pádovou zkouškou

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedním ze základních způsobů ověření chování podvozku letounu při dynamickém ději, jaký nastává při přistání letounu, je v laboratorních podmínkách prováděná pádová zkouška podvozku na padostroji. Při těchto zkouškách se u podvozků větších letadel před shozem běžně roztáčí kolo (popř. kola) podvozku tak, aby byla při dopadu simulována také podélná složka zatížení, vznikající v okamžiku náhlého roztočení kol při jejich dotyku se vzletovou a přistávací drahou. A právě konstrukční návrh zařízení pro roztáčení kola podvozku před pádovou zkouškou, které by doplnilo stávající konstrukci padostroje v laboratoři Leteckého ústavu VUT v Brně, je náplní této bakalářské práce.

Cíle bakalářské práce:

- rešerše a výběr nejjednodušších existujících konstrukčních uspořádání,
- definice požadavků na konstrukci,
- návrh konstrukce a úprav stávajících částí padostroje,
- návrh souvisejících systémů, např. systém pro měření otáček kola a měření předozadní síly,
- tvorba výkresové dokumentace (sestavy a vybraných dílů).

Seznam doporučené literatury:

HUB, J. Zkoušení leteckých konstrukcí. Brno: Univerzita obrany, 2012. ISBN 978-80-7231-874-2.

DREXLER, J. Pevnost a zkoušky leteckých konstrukcí: zkoušení leteckých konstrukcí. Brno: Vojenská akademie Antonína Zápotockého, 1965.

PAZMANY, L. Landing Gear Design for Light Aircraft. San Diego, Calif.: Pazmany Aircraft Corporation, 1986. ISBN 978-0961677701.

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

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem zařízení k roztáčení kol podvozků letadel před pádovou zkouškou s cílem zlepšit tak rozsah prováděných měření. V první části jsou rozebrány způsoby zkoušení podvozků letadel. V dalších částech pak popis stávajícího padostroje, konstrukce navrhovaného zařízení a postup výpočtů důležitých částí.

KLÍČOVÁ SLOVA

Roztáčení kol, podvozky letadel, padostroj, návrh.

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with the design of device for spinning the wheels of aircraft landing gear before the drop test in order to improve the range of measurements. The first part discusses the methods of testing aircraft landing gear. In the following sections, a description of the existing drop test machine, the design of the proposed equipment and the calculation procedure of important parts.

KEYWORDS

Wheel spinning, aircraft landing gear, drop test machine, design.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Citace tištěné práce:

ZEDNÍČEK, Tomáš. *Návrh zařízení pro roztáčení kola podvozku před pádovou zkouškou*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/137271>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Marek Horák.

Citace elektronického zdroje:

ZEDNÍČEK, Tomáš. *Návrh zařízení pro roztáčení kola podvozku před pádovou zkouškou* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/137271>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Marek Horák.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Marku Horákovi, Ph.D. za jeho cenné připomínky a rady, které mi pomohly při řešení. A také své rodině, která mě po celou dobu studia podporovala.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Marka Horáka Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

V Brně, dne

.....

Zedníček
Tomáš

OBSAH

1	ÚVOD	12
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	13
2.1	Podvozky malých letadel	13
2.1.1	Malé letouny	13
2.1.2	Podvozky	13
2.1.3	Uspořádání podvozků	14
2.2	Zkoušení podvozků	15
2.2.1	Pádové zkoušky	15
2.2.2	Padostroje	16
2.3	Varianty existujících roztáčecích zařízení	16
3	STÁVAJÍCÍ PADOSTROJ	18
4	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	20
4.1	Popis navrhované konstrukce	20
4.2	Výpočtový návrh součástí	21
4.2.1	Návrh pohonu	21
4.2.2	Volba řemene a řemenic	25
4.2.3	Únosnost matice pohybového šroubu	26
4.3	Návrh měřicího systému	27
5	ZÁVĚR	29
6	BIBLIOGRAFIE	30
7	SEZNAM PŘÍLOH	32

1 ÚVOD

Při přistávání letadel dochází při dotyku s přistávací dráhou k roztáčení kol podvozku během velmi krátkého časového úseku na obvodovou rychlost rovnající se rychlosti jízdy letadla po přistávací dráze. A právě v průběhu zvyšování obvodové rychlosti kol dochází k silovému namáhání konstrukce podvozku v předozadním směru.

K ověření bezpečnosti leteckých podvozků se mimo jiné provádějí jejich pádové zkoušky na zařízení zvaném padostroj, kdy se podvozek nechá volným pádem dopadnout z určité výšky na dopadovou plochu. Jedním ze způsobů, jak v laboratorních podmínkách simulovat zatížení podvozku od roztáčejících se kol, je jejich roztočení před pádovou zkouškou, a naopak jejich následné zastavování, vyvozované dotykem s dopadovou plochou.

Tato práce se zabývá návrhem zařízení k roztáčení podvozku letadel na padostroji umístěném ve zkušebně Leteckého ústavu Vysokého učení technického v Brně, díky kterému by bylo možné zahrnout i předozadní složku zatížení a zkvalitnit tak prováděná měření. Návrh konstrukce je doplněn výpočtem některých kritických částí zařízení a výkresovou dokumentací sestavení a vybraných výrobních výkresů součástí.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Podvozky malých letadel

2.1.1 Malé letouny

Do této kategorie lze zařadit letouny vyznačující se malou maximální vzletovou hmotností, nízkými rychlostmi, malým počtem míst pro cestující a nízkou užitečnou hmotností. Jedná se hlavně o lehké sportovní letouny CS-LSA, velmi lehké letouny CS-VLA, kluzáky a motorové kluzáky CS-22, letouny kategorie normální, cvičná, akrobatická a pro sběrnou přepravu CS-23. Předpis CS-23 mimo jiné definuje schválenou maximální vzletovou hmotnost 5 670 kg pro letouny v kategorii normální, cvičná a akrobatická s maximálně devíti sedadly mimo sedadla pilotů [1].

2.1.2 Podvozky

Podvozek zajišťuje kontakt mezi letadlem a povrchem země při operacích přistání, vzlet, pojíždění a stání. Většina podvozků je složena z nosné části a kola s pneumatikou. Nosná část (podvozková noha) musí být pevně ukotvena ke kostře letadla k zajištění rozložení namáhání od hmotnosti letadla. Podvozková noha může být výsuvná nebo pevná a je složena ze soustavy tlumičů (případně i aktuátorů nebo hydraulických válců u výsuvných podvozků). Kolo je ložisky připojeno k noze podvozku a opatřeno pneumatikou. Některé podvozky – především hlavní – mají brzděná kola, pak jsou ještě opatřena brzdami, u kterých je důležité zajistit odvod tepla, z důvodu hrozícího vznícení pneumatiky [1], [2].

2.1.3 Uspořádání podvozků

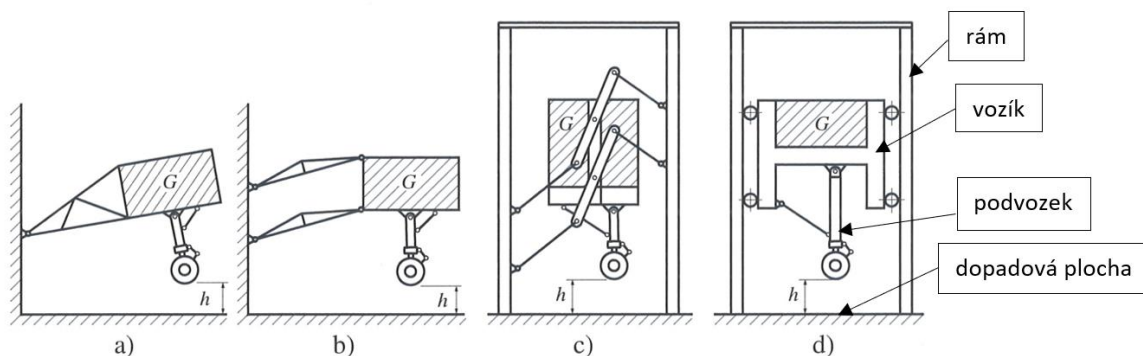
Základní uspořádání podvozků je založeno na trojbodovém podepření letadla, kdy těžiště letadla leží v trojúhelníku mezi těmito body. Hlavní podvozek (často složen ze dvou podvozkových noh) je umístěn pod trupem letadla, přibližně v polovině délky trupu a třetí podvozková noha je buď v přední části trupu – předový podvozek, nebo v zadní části trupu – ostruhový podvozek. Od uspořádání hlavního podvozku s ostruhovým kolem se upouští a používá se pouze u malých letadel. Problémem je hrozící převrácení letadla na před při přistávacím manévru okolo brzděných kol hlavního podvozku. U malých letadel (letoun VUT 001 Marabu) zpravidla každá podvozková noha nese pouze jedno kolo. U větších letadel (letoun Airbus A320-200) je nesen více kol jednou podvozkovou nohou, nebo více podvozkových noh uspořádaných blízko sebe, případně přidáním dalších podvozků. Důvody pro více podvozků a kol jimi nesených jsou nižší zatížení připadající na jedno kolo s pneumatikou, a tedy snížení stykového tlaku mezi pneumatikou a letištní plochou a prodloužení životnosti ploch letiště [1], [3].

2.2 Zkoušení podvozků

Způsobů zkoušení leteckých podvozků existuje mnoho, můžeme z nich vybrat zkoušky funkční, zkoušky brzd a brzdových systémů ověřujících, zda mechanismy podvozků jsou správně namontovány a konají svou funkci dle očekávání (vysouvání a zasouvání podvozku a dostatečný odvod tepla od brzd). Pádové zkoušky ověřují funkčnost tlumičů a pneumatik při dynamickém zatěžování simulující přistání. Odolnost proti rezonanci a únavě prověřují zkoušky frekvenční a únavové [4].

2.2.1 Pádové zkoušky

Pádové zkoušky simulují zatížení podvozku letadla při přistání a provádějí se na zařízení zvaném padostroj, jehož schéma je na obr.2.1. Součástí padostroje je rám, pohyblivý vozík sloužící k upevnění podvozku a závaží G , který se může posuvným pohybem posunovat vertikálně po rámu padostroje, dopadová plocha a měřicí systémy. Zkouška probíhá tak, že vozík s přídatnou zátěží a upevněným podvozkem se vyzvedne do určité výšky h (vzdálenost pneumatiky a dopadové plochy) nad dopadovou plochu a nechá se volným pádem dopadnout. Pádová výška h je stanovena z vertikální složky rychlosti letadla při přistání a hmotnost vozíku s přídatným závažím je ekvivalentní hmotnosti letadla připadající na zkoušený podvozek tak, aby kinetická energie přenášená na deformaci pneumatiky a tlumiče odpovídala výpočtovým provozním zatížením podvozku [5], [6], [7].



Obr. 2.1 Typy padostrojů [4]

2.2.2 Padostroje

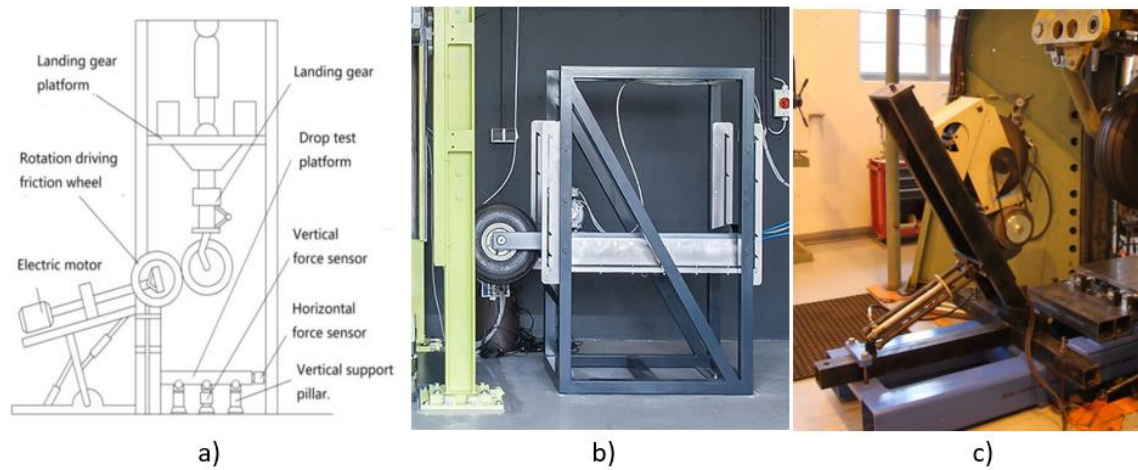
Různá konstrukční provedení padostrojů dovolují přizpůsobit podmínky zkoušky odlišným typům zkoušek. Provedení padostroje znázorněné na obr. 2.1 a), b) je jednoduché konstrukce vhodné pro zkoušení malých podvozků a s výhodou použitelné pro únavové zkoušky s mnoha shozy. Uspořádání dle obr. 2.1 c) d) je mohutnější konstrukce používané pro větší podvozky. Padostroje mohou být vybaveny dalšími prvky k vyvození podmínek a zatížení, která se blíží skutečnosti v provozu. Jednou z nich je soustava pružných lan nebo tlumičů, instalovaných jako náhrada odlehčení podvozku od vztlakových sil při přistání. Pro vyvození sil působících při vybočení letadla se dopadová rovinná plocha skloní podélně s osou rotace kola podvozku. Pro vyvození sil při roztáčení kol při styku s přistávací a vzletovou dráhou se dopadová rovinná plocha skloní příčně od osy rotace kol. Obě tyto varianty vyvození sil lze provést i natočením podvozku vůči dopadové ploše [4], [5].

Vliv zatížení od roztácející se pneumatiky při styku s ranvejí lze dobře nahradit rotující válcovou dopadovou plochou, na kterou dopadne podvozek s kolem, které se vlivem tření roztočí, přibližně na obvodovou rychlost dopadové plochy, anebo roztočením kola podvozku před jeho shozem, kde při styku s rovinnou dopadovou plochou je kolo naopak brzděno. Tato řešení průběhu zkoušky jsou výhodná zvláště proto, že zohledňují rozdíl v tuhosti mezi rotující a stojící pneumatiky při měření stlačení pneumatiky, narozdíl od dříve zmíněného natočení podvozku nebo dopadové plochy ve směru valení [7], [4].

2.3 Varianty existujících roztáčecích zařízení

Níže uváděné konfigurace roztáčecích zařízení jsou ve většině případů složeny z více celků pohybujících se vůči sobě. Pohyb je vyvozován nejčastěji hydraulickými válci (jedním válcem, nebo více válci), a to z důvodu, že jsou roztáčecí zařízení používána především pro zkoušení podvozku velkých letadel.

Mohou být přidělána k podlaze, ke stěně, nebo k rámu padostroje. Nevýhodou upevnění k rámu padostroje je přenášení dynamických rázů přímo do instalovaného roztáčecího zařízení, a to vede k jeho rychlejšímu opotřebení. Jedná se buď o naklápěcí mechanismy okolo dvou os, nebo kombinaci posuvu a naklápění okolo jedné osy, anebo čistě výsuvná zařízení ve dvou osách. Jejich přehled je vidět na obr. 2.2. [7], [6]



Obr. 2.2 Používané typy roztáčecích zařízení [7], [8], [9]

3 STÁVAJÍCÍ PADOSTROJ

Padostroj umístěný v pádové zkušebně Leteckého ústavu VUT v Brně zobrazený na obr. 3.1 je rámového typu. Jeho tři základní celky jsou rám obdélníkového průřezu, pohyblivý vozík jezdící po rámu a dopadová rovinná plocha. Rám tvoří čtyři kolmo k podlaze umístěné sloupky profilu U umístěné v rozích obdélníku. Vždy dva sloupky na kratší straně obdélníku jsou spojeny výztuhami ve třech bodech. Dopadová plocha a rám jsou upevněny šrouby a příložkami k podlaze zkušebny. Podlahu zkušebny tvoří množství nosníků, ke kterým je možno připevnit různé vybavení zkušebny.



Obr. 3-1 Obrázek padostroje ve zkušebně Leteckého ústavu [8].

Vozík padostroje tvaru kvádru zhotovený z hutních polotovarů je vybaven vodícími kladkami definujícími vertikální pohyb po rámu, částí pro připevnění zkoušeného podvozku, místem pro přídavné zatížení (drobné kovové částice zašité v pytlích) a ukotvení vázacích lan pro uchycení. Zdvihání vozíku je zajišťováno mostovým jeřábem umístěného u stropu haly.

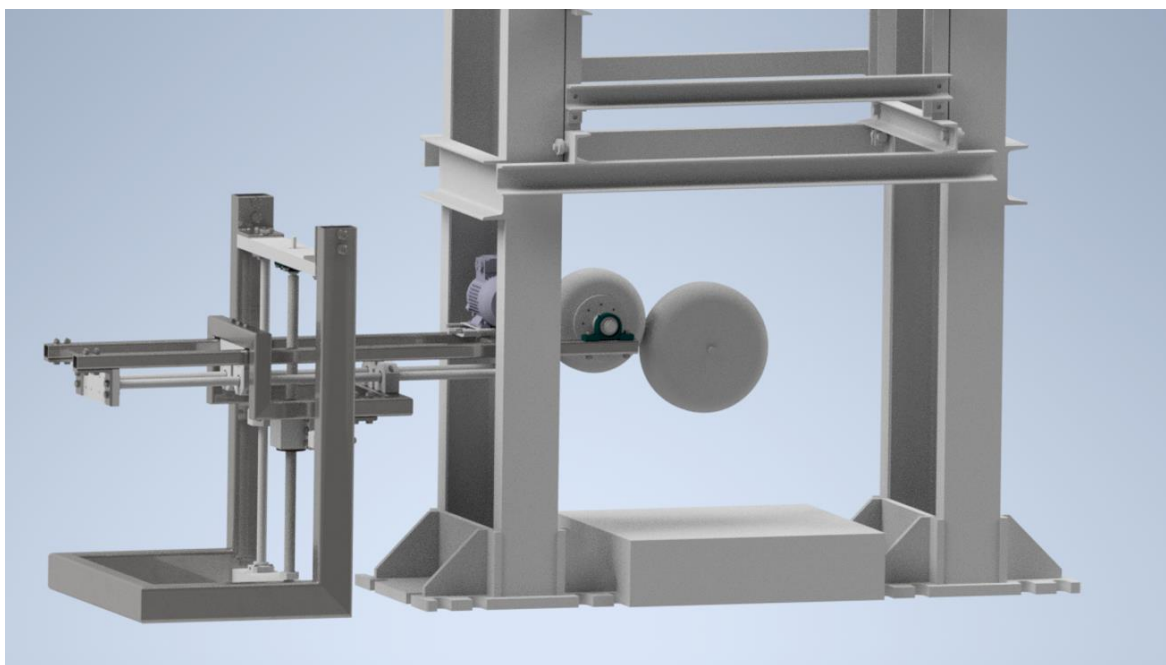
Na háku kladnice je zavěšena váha k měření hmotnosti, pod kterou je umístěno odpalovací zařízení sloužící k rozpojení vozíku s podvozkem od zavěšení na jeřábu při zahájení pádové zkoušky. Po odpalu se vozík začne pohybovat volným pádem k dopadové plošině.

Provádí se zde měření výškové polohy vozíku dvojicí lankových potenciometrických snímačů Micro-Epsilon WPS-1250-MK46-P10 a celkové svislé síly na dopadové desce čtyřmi siloměry HBM HLCBC3 4.4T. Časový průběh měřených veličin zaznamenává měřicí ústředna Devesoft Sirius HD-STGS.

4 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

4.1 Popis navrhované konstrukce

Předkládané konstrukční řešení zařízení pro roztáčení kol podvozku letadel před pádovou zkouškou zobrazené na obr. 4.1 a na výkrese sestavení v příloze A doplněné seznamem položek kusovníku (příloha D) a dvěma výrobními výkresy vybraných součástí (přílohy B a C) je složeno ze tří svařenců. A to rámu, vertikálního a horizontálního svařence. Materiál všech svařovaných částí je ocel ČSN 11 523.0 vhodná ke svařování. Rám je nepohyblivý, ukotvený k nosníkům žebrované podlahy dvěma závitovými tyčemi, svařený z pěti dílů dutých obdélníkových profilů a jednoho dílu plechu. Vertikální svařenec se skládá z šesti dutých tyčí čtvercového profilu o hraně 50 mm a koná vertikální pohyb vůči rámu po pohybovém šroubu a dvou vodicích tyčích ukotvených v rámu. Třetí svařenec označovaný jako horizontální je svařen ze čtyř dutých čtvercových profilů 40 mm a je opatřen dvěma vodicími tyčemi umožňujícími pohyb horizontálně k roztáčenému kolu.



Obr. 4.1 Navrhované roztáčecí zařízení v pracovní poloze

Všechny vodicí tyče jsou stejného průměru 25 mm a uchyceny na obou koncích ve stahovacích uchyceních typu SFWR, jež jsou šroubově spojena s deskami se závitovými dírami. Stahování je provedeno pomocí jednoho zápusťného šroubu s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem. Soustava vodicí tyč, její uchycení a lineární kuličkové vedení v pouzdře je dodána společností T.E.A. TECHNIK s.r.o.

Uložení závitové tyče ve spodní části je realizováno v neprůchozím otvoru v rámu na axiálním kuličkovém ložisku prostřednictvím součásti s číslem položky 11, která je uložena v hřídelovém kroužku ložiska a v duté části opatřena drážkou na těsné pero umístěné v závitové tyči. Ložiskový prostor je utěsněn hřídelovým těsněním gufero, jehož manžeta doléhá na povrch této součásti. V horní části je tyč uložena letmo přímo v radiálním kuličkovém ložisku s ložiskovým domkem s přírubou a dále prochází otvorem v horní desce rámu a přečnívající část závitové tyče z rámu je obrobena do tvaru šestihranu pro ruční ovládání vertikálního posuvu položky 2.

Vertikální svařenec je opatřen deskou se dvěma lineárními kuličkovými sety a bronzovou maticí s přírubou upevněnou v součásti 10 šesti zápusťnými šrouby. Přestože je pohybový šroubový spoj samosvorný, je navrženo pojištění maticí se třemi závity šroubovice o délce matice 18 mm a podložky. Posuv mezi horizontálním a vertikálním svařencem je zajišťován po lineárním vedení se dvěma vodicími tyčemi upevněnými v horizontálním svařenci. Ve vertikálním svařenci jsou celkem čtyři kuličková vodicí pouzdra, pro každou z tyčí dvě.

Horizontální svařenec nese elektromotor s motorovou základnou, roztáčecí kolo na hřídeli uložené ve dvou radiálních kuličkových ložiscích v ložiskových domcích. Axiální poloha hřídele je zajištěna osazením hřídele na jedné straně ložiska bližšího k řemenici oproti součásti 14 upevněné k hřídeli šroubem M5 držícím řemenici a rozpěrný kroužek. Druhé ložisko je letmo uloženo vůči hřídeli. Uložení hřídele v ložiscích je provedeno s vůlí a je jištěno dvěma přitlačnými šrouby s vnitřním šestihranem. Správná axiální poloha řemenic se nastavuje při montáži polohou motoru vůči motorové základně.

Protože je nutné vyloučit situaci, kdy se část roztáčecího zařízení nachází v dráze vozíku padostroje, je zhotoven v horizontálním a vertikálním svařenci otvor o průměru 9 mm pro například pojízdný kolík s přírubou.

4.2 Výpočtový návrh součástí

4.2.1 Návrh pohonu

Navržená pohonná soustava je složena z třífázového motoru řízeného frekvenčním měničem, řemenového převodu a roztáčecího kola. Roztáčecí kolo s řemenicí a motorem jsou pevně spojeny se svařeným vozíkem, který pomocí lineárního vedení posouvá jednotku pohonu do pracovní pozice k roztáčenému kolu zkoušeného podvozku.

Třífázový asynchronní motor byl vybrán na základě jeho dobré dostupnosti, možnosti řízení otáček, možnosti přímého připojení do sítě a jednoduchého rozběhu bez nutnosti dalších rozběhových vinutí [9]. Protože je potřeba roztáčet kola různých podvozků na rozdílné obvodové rychlosti, které jsou rovny přistávací rychlosti, jež je definována dle rovnice (4.1) uváděné v [10] a je pro každé letadlo rozdílná. Pro návrh výkonu motoru byla uvažována potřebná rychlost roztáčecího kola vyšší, a to 1,4násobek pádové rychlosti. Bylo tedy nutné zvolit takové řešení, které tomuto požadavku na proměnnou rychlost vyhoví.

$$v_p = (1,10 \div 1,15)v_{s0} \quad (4.1)$$

Kde:

v_p přistávací rychlost

v_{s0} pádová rychlost v přistávací konfiguraci

Řízený třífázový dvoupólový asynchronní motor od společnosti Siemens s katalogovým označením 1LE1001-0CA32-2TA4 o výkonu 550 W a hmotnosti 7 kg je v provedení s hliníkovým rámem. Narozdíl od varianty s železným rámem je o 6 kg méně hmotný. Tato úspora hmotnosti snižuje namáhání konstrukce, což má výrazný vliv především při maximálním vyložení v pracovní pozici. Další úsporu hmotnosti přinesl výběr dvoupólové varianty. Oproti vícepólovým motorům, které mají výhodnější hodnotu jmenovitých otáček, jichž lze dosáhnout i navrhovaným převodovým poměrem mezi řemenicemi, má dvoupólová varianta o 4 kg menší hmotnost [11].

V pádové zkušebně Leteckého ústavu jsou k dispozici dva typy připojení do elektrické sítě 230 V jednofázové a 400 V třífázové. Z důvodu lepší využitelnosti třífázové sítě a relativně nízkému výkonu pohonu je zvoleno připojení na síť jednofázovou 230 V přes frekvenční měnič A 550-2S0007-230V/5A od společnosti VYBO Electric a.s. o výkonu 750 W s rozsahem výstupní frekvence 0 až 400 Hz s možností programování proporcčně-integračně-derivačního (PID) regulátoru přímo, nebo vzdáleně. Změna frekvence je dosahována pulzně-šířkovou modulací. Parametry na vstupu jsou 230 V, 50 Hz střídavé jednofázové a na výstupu 230 V třífázové [12].

Převodová soustava (motor, řemenový převod, roztáčecí kolo) byla zvolena tak, aby potřebná obvodová rychlost na roztáčeném kole při jmenovitých otáčkách motoru byla přibližně rovna průměrné potřebné obvodové rychlosti $26 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ z rychlostí uvedených v tabulce 4.1. Snížením výstupní frekvence přibližně na 30 Hz a zvýšením na 65 Hz byl pokryt rozsah potřebných obvodových rychlostí pro uváděné podvozky v téže tabulce, tedy od 20 do $35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Tab. 4.1 Podklady k výpočtům

označení letadla	vnější poloměr [m]	hmotnost pneu s ráfkem [kg]	pádová rychlost v_{50} [m/s]	přistávací rychlost $1,4v_{50}$ [m/s]	redukovaný moment setrvačnosti J_{red} [kg m ²]	potřebný výkon P [W]	doba rozběhu při zvoleném výkonu [s]
TL-Ultralight Stream	0,140	3,0	18,06	25,28	0,023	373	3,39
TL-Ultralight Stream	0,178	3,0	18,06	25,28	0,024	387	3,52
Aerospool WT-9 Dynamic	0,178	2,7	18,06	25,28	0,024	387	3,52
Aerospool WT-9 Dynamic	0,191	2,7	18,06	25,28	0,024	387	3,52
Aerospool WT-10 Advantic	0,178	4,0	24,44	34,22	0,024	712	6,47
Czech Sport Aircraft PS-28 Cruiser	0,178	3,9	15,28	21,39	0,024	278	2,53
Czech Sport Aircraft PS-28 Cruiser	0,178	4,0	15,28	21,39	0,024	278	2,53
Shark UL	0,140	2,9	17,78	24,89	0,024	375	3,41
TL-Ultralight Stream	0,140	3,0	18,06	25,28	0,023	373	3,39
Shark UL	0,178	3,4	17,78	24,89	0,023	362	3,29
Z 142	0,216	4,2	24,72	34,61	0,023	702	6,38
Z 142	0,178	3,4	24,72	34,61	0,023	700	6,37
L33-Solo	0,175	3,4	18,06	25,28	0,023	374	3,40
L33-Solo	0,130	2,5	18,06	25,28	0,023	372	3,39

K volbě vhodného výkonu motoru se přistoupilo na základě parametrů podvozků letadel zkoušených na padostroji a letadel s podobnými podvozky, které by bylo možné zkoušet na padostroji. Zmíněné parametry kol jsou uvedeny v tabulce 4.1. Prvních osm uváděných kol letadel bylo již zkoušeno na padostroji a představují reprezentativní vzorek. Jejich parametry jako jsou hmotnost pneumatiky s ráfkem, typ pneumatiky a její velikost, byly poskytnuty Leteckým ústavem a pádové rychlosti letadel byly zjištěny dle [13], [14].

Z těchto dat byl vypočítán konzervativním způsobem moment setrvačnosti, tedy jako moment setrvačnosti rotujícího plného válce okolo geometrické osy o celkové hmotnosti ráfku i pneumatiky s vnějším poloměrem rovným poloměru pneumatiky dle rovnice (4.2) Pro zbylých šest podvozkových kol uvedených ve spodní části tabulky nebyla známa jejich hmotnost, a tak byla odhadnuta na základě hustoty závislé na poloměru z průměrné hmotnosti a z průměrného vnějšího poloměru pneumatiky prvních osmi kol v horní části tabulky.

$$J_3 = m_3 r_3^2 \quad (4.2)$$

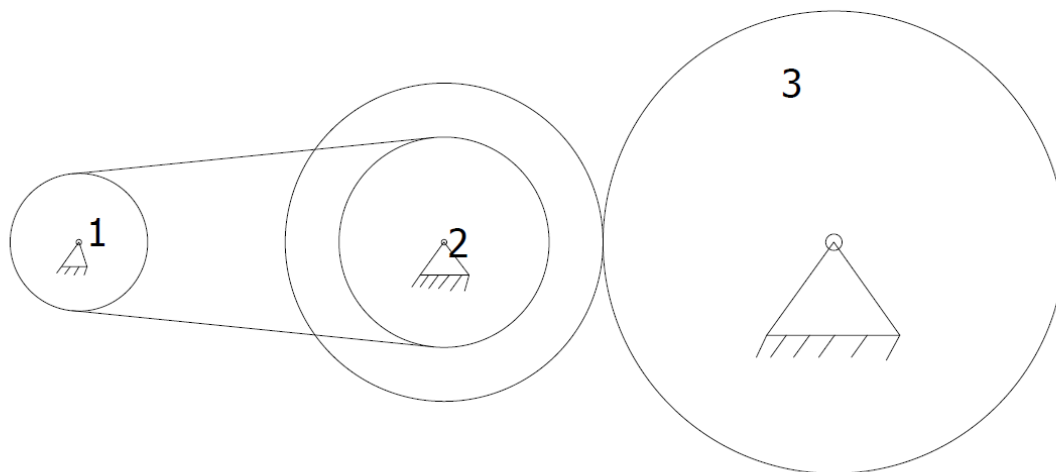
Kde:

J_3 moment setrvačnosti kola

m_3 hmotnost kola

r_3 poloměr kola

Potřebný výkon motoru byl vypočten pro každé kolo dle rovnice (4.3) metodou redukce podle schématu na obr. 4.2. redukcí na těleso 1 (motor) při zanedbání všech pasivních účinků a zahrnutí do výpočtu pouze parametry roztáčecího kola (těleso 2) a roztáčeného kola (těleso 3). Výpočet redukovaného momentu setrvačnosti byl proveden podle rovnice (4.4).



Obr. 4.2 Schéma pro výpočet redukovaného momentu setrvačnosti

$$P = \frac{J_{red}}{t} \left(\frac{v_2 r_{w2}}{R_2 R_{w1}} \right)^2 \quad (4.3)$$

$$J_{red} = J_2 \left(\frac{R_{w1}}{r_{w2}} \right)^2 + J_3 \left(\frac{R_{w1} R_2}{r_{w2} R_3} \right)^2 \quad (4.4)$$

Kde:

P	výkon motoru
J_{red}	redukovaný moment setrvačnosti
R_{w1}, r_{w2}	poloměr řemenice hnací, hnané
R_2, R_3	poloměr kola roztáčecího, roztáčeného
t	čas
v_2	obvodová rychlost roztáčecího kola
J_2, J_3	moment setrvačnosti kola roztáčecího, roztáčeného

Jako roztáčecí kolo bylo zvoleno kolo odpovídající výpočtovými parametry kolu v osmém řádku tabulky – letounu Shark UL s vnějším poloměrem pneumatiky 139,7 mm. Doba rozběhu byla zvolena na 5 s. Vypočtený potřebný průměrný výkon vyšel 436 W a zvolený nejbližší vyšší výkon motoru byl 550 W. V posledním sloupci tabulky je přepočítaná doba rozběhu s motorem o zvoleném výkonu, která ani v jednom případě není příliš dlouhá.

4.2.2 Volba řemene a řemenic

Vzhledem k tomu, že vzdálenost mezi U profily tvořícími rám padostroje není velká (400 mm), tak bylo upřednostněno uspořádání motoru a roztáčecího kola za sebou s rovnoběžnými osami rotace. Narozdíl od uspořádání na jedné ose je třeba se zabývat přenosem momentu na větší vzdálenost, čehož je možné dosáhnout ozubeným, řetězovým, řemenovým, nebo jiným převodem. Uspořádání s kolnými osami by vyžadovalo např. převod s kuželovými ozubenými koly [15].

Jako nejvhodnější řešení, a to cenově i hmotnostně, byl vybrán převod úzkým klínovým řemenem. Úzký klínový řemen oproti plochému řemenu nepotřebuje tak velkou sílu v přepětí a tím je dosaženo zvýšení trvanlivosti ložisek, jak v motoru, tak na hřídeli roztáčecího kola.

Větší osová vzdálenost mezi řemenicemi zpříčiňuje menší působící moment na konstrukci od uložení motoru v pracovní pozici stroje. Ale koncept motoru s příliš velkou osovou vzdáleností by vedl k velkým průměrům řemenic a k překročení maximální obvodové rychlosti řemenu a v navrhované konfiguraci řešení k velkému vyložení od rámu k padostroji z důvodu nutnosti vyjetí roztáčecího kola z dráhy padajícího vozíku padostroje v době shozu.

$$D_w < a < 3(d_w + D_w) \quad (4.5)$$

Kde:

a osová vzdálenost mezi řemenicemi

d_w, D_w výpočtový průměr řemenice hnací, hnané

Řemenice včetně řemenu jsou dodány společností SIT S.p.A. Velikost výpočtových průměrů řemenic byla zvolena na základě podmínky v rovnici (4.5) uvedené v [15] při zachování vhodného převodového poměru. Z rovnice (4.6) byla vypočtena nejprve potřebná délka řemenu v neutrálním vláknu s návrhovou hodnotou osově vzdálenosti, poté vybrán řemen průřezu SPZ z katalogu délky 825 mm a na závěr stanovena osová vzdálenost 260 mm při dané délce řemenu.

$$L_w = 2a + \frac{\pi(D_w + d_w)}{2} + \frac{(D_w - d_w)^2}{4a} \quad (4.6)$$

Kde:

L_w výpočtová délka řemenu

Také byla vypočtena síla v přepětí řemenu [15], kterou je nutno vyvodit při montáži převodu k zajištění přenosu kroutícího momentu 5,7 Nm mezi hnací a hnanou řemenicí o velikosti 142 N. Hodnota momentu byla uvažována o 20 % větší, než je hodnota momentu zvratu udávána výrobcem motoru. Ověřoval se také výpočtetně potřebný počet řemenů s výsledkem, že jeden řemen plně postačuje.

K ustavení motoru je využita motorová základna (položka 22) typu COMPATTA-TC 80 z pozinkované oceli od výrobce SIT S.p.A. a je upevněna k horizontálnímu svařenci čtyřmi šrouby velikosti M8. K ní je pomocí čtyř šroubů M6 přichycen motor. Předpětí v řemenu je zajišťováno právě pohybem mechanismu motorové základny v horizontálním směru, a tím zvětšování osově vzdálenosti řemenic.

4.2.3 Únosnost matice pohybového šroubu

Nastavení polohy roztáčecího kola ve vertikálním směru zajišťuje otočně uložená ocelová závitová tyč s jednochodým lichoběžníkovým závitem Tr 30 × 6 společně s bronzovou maticí. Výrobce uvádí, že realizované pohybové spojení matice a šroubu je samosvorné. Bylo kontrolováno výpočtem, zda nebude překročen dovolený tlak 5 MPa podle rovnice (4.7) a navržen počet deseti závitů matice s uvažovanou osovou silou o velikosti 700 N byl vypočten tlak v závitu a porovnán s přípustným tlakem. Matice osově délky 60 mm bude mít dostatečnou bezpečnost i při snížení velikosti styčné plochy neideálním rozložením zatížení.

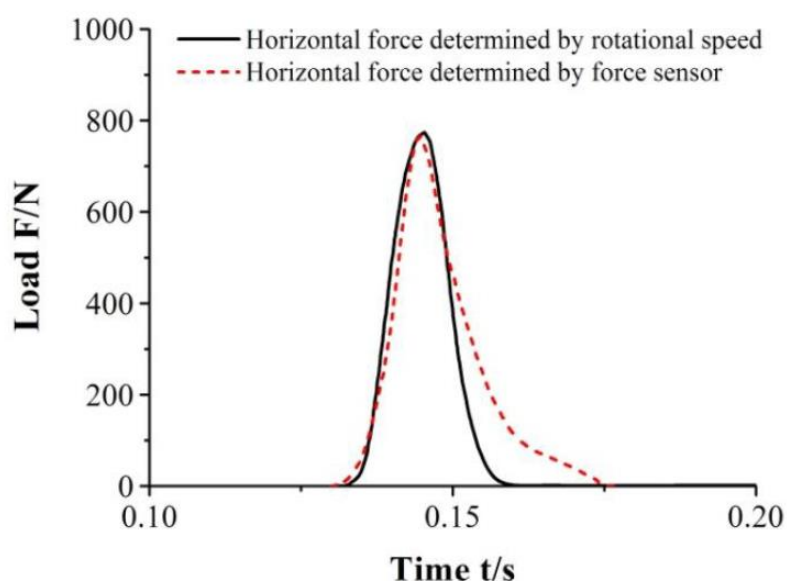
$$p = \frac{2F}{\pi d_2 n_z P_h} \quad (4.7)$$

Kde:

p	tlak v dosedací ploše závitu
F	osová síla
n_z	počet závitů šroubovice
P_h	stoupání závitu

4.3 Návrh měřicího systému

K tomu, aby bylo možné vyvodit a vyhodnotit působící sílu, která odpovídá nárokům pro daný typ podvozku a letadla a jejich způsobu provozu, je třeba provést shoz při určité obvodové rychlosti. Toho lze dosáhnout pouze jejím změřením, abychom mohli deklarovat, za jakých podmínek zkouška proběhla. Na základě zde uváděných výsledků [7] lze měřit předozadní sílu nepřímo, a to přepočtením z průběhu změny rychlosti kola zkoušeného podvozku s uspokojivou chybou, jak je znázorněno na obr. 4.3, kde na svislé ose je síla v newtonech a na vodorovné ose čas v sekundách. Plná čára představuje měření síly podle změny rychlosti rotace, zatímco čerchovaná čára měření tradičními siloměry. Proto byl navržen systém přesného měření rychlosti otáčení kola na základě, kterého bude přepočtena velikost síly v závislosti na čase.



Obr. 4.3 Porovnání průběhu zatížení různými metodami měření [7]

Navrhovaný systém se skládá z vestavného magneticko-indukčního snímače KSMO20-U-OK27 s přípojným kabelem, snímacího reluktorového kroužku ABS NK 391945, duté hřídele s přírubou a dvoupulzního neřízeného usměrňovače. Snímací kroužek vnitřního průměru 90 mm a vnějšího průměru 99 mm je nalisován na konci duté hřídele až po osazení o průměru 94 mm a šířky 15 mm. Velikost vnitřního průměru hřídele je 80 mm a konec je opatřen přírubou průměru 130 mm tloušťky 8 mm s šesti dírami pro šrouby M5. Celková délka duté hřídele upínající snímací kroužek je 34 mm. Upevnění snímače je navrhováno k vidlici podvozkové nohy.

Nevýhodou tohoto řešení je nutnost upravit upevnění snímače i duté hřídele k podvozku pro každý zkoušený podvozek zvlášť.

5 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo navrhnout zařízení, které by se používalo při pádových zkouškách podvozků letadel k roztáčení jejich podvozkových kol. Motivací bylo zkvalitnění výsledků zkoušek zahrnutím v provozu běžně se vyskytujícími zatížení do průběhu zkoušek.

V první části jsou rozebrány typy podvozků a jejich zkoušení, dále pak padostroje a průběh pádové zkoušky. V další části je následně popsána konstrukce stávajícího padostroje Leteckého ústavu, používané měřicí systémy a postup zkoušky.

Návrh pohonu byl pak realizován na základě parametrů již dříve zkoušených podvozků. Použitím asynchronního motoru s hliníkovou kostrou řízeného frekvenčním měničem byla jednak uspořena část hmotnosti a docíleno proměnnosti otáček. V neposlední řadě je komentován i výpočet a jeho postup dalších komponent s odůvodněním jejich výběru.

V práci byly výpočtově řešeny jen některé součásti, a proto by bylo vhodné se před samotnou realizací výroby tohoto zařízení zabývat únosností a optimalizací zbylých součástí, a to i s přihlédnutím k dynamicky se měnícím cenám použitých materiálů a polotovarů.

6 BIBLIOGRAFIE

- [1] KUNDU, Ajoy Kumar, Mark PRICE a David RIORDAN. *Conceptual aircraft design: an industrial approach*. 1. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2019. Aerospace series. ISBN 978-111-9500-285.
- [2] MIKULA, Jan. *Konstrukce a projektování letadel II*. 1. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-010-3338-4.
- [3] CURREY, Norman S. *Aircraft landing gear design: principles and practices*. 2. Dhillon: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1988. ISBN 0930403-41-X.
- [4] HUB, Juraj. *Zkoušení leteckých konstrukcí*. 1. Brno: Univerzita obrany, 2012. ISBN 978-80-7231-874-2.
- [5] SKORUPKA, Zbigniew. Dynamic Fatigue Tests Of Landing Gears. *Fatigue of Aircraft Structures*. 2020, **2020**(12), 69-77. ISSN 2300-7591. Dostupné z: doi:10.2478/fas-2020-0007
- [6] DREXLER, Jan. *Pevnost a zkoušky leteckých konstrukcí: zkoušení leteckých konstrukcí*. 1. Brno: Vojenská akademie Antonína Zápotockého, 1965.
- [7] WANG, Huaitao, Dafang WU, Feng WANG, P. LIU a X. TU. A New Method for Determining Horizontal Impact Load Based on Rotational Speed of Aircraft Wheel in Landing Gear Drop Test. *MATEC Web of Conferences*. 2017, **114**(03004), 7. ISSN 2261-236X. Dostupné z: doi:10.1051/mateconf/201711403004
- [8] Drop test. In: *Heggemann* [online]. Büren [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.heggemann.com/markets-products/service>
- [9] HORÁK, Marek. *Fotografie padostroje*. Brno: Soukromý archiv fotografií, 2022.
- [10] KOBRLE, Pavel a Jiří PAVELKA. *Elektrické pohony a jejich řízení*. 3. přepracované vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-06007-0.
- [11] DANĚK, Vladimír. *Mechanika letu*. Druhé vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2019. ISBN 978-80-7623-014-9.

- [12] SIEMENS. *SIMOTIC Motors Catalog D 81.1*. Update 02/2022. 2021.
- [13] Frekvenční měnič. In: *VYBO electric a.s. Česká republika* [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://vyboelectric.cz/obchod/frekvencni-menic-standard-e550-2s0007/>
- [14] Letouny. In: *Aeroweb* [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.aeroweb.cz/letadla/letouny>
- [15] List of aircraft. In: *Wikipedia* [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_aircraft_\(0%E2%80%93A\)](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_aircraft_(0%E2%80%93A))
- [16] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, Miloš VLK, ed. *Konstruování strojních součástí*. 1. vyd. V Brně: VUTIUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0. Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:6789ee90-02bf-11e5-a8ce-005056827e52>

7 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A	výkres sestavení
Příloha B	výrobní výkres součásti závitová tyč
Příloha C	výrobní výkres součásti uchycení Tr matice
Příloha D	kusovník