

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2024

Daniel Jakl

Univerzita Pardubice

Dopravní fakulta Jana Pernera

Srovnávací analýza konvenčního ocasního rotoru vrtulníku a Fenestronu

Bakalářská práce

2024

Daniel Jakl

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Daniel Jakl**
Osobní číslo: **D21373**
Studijní program: **B0716P040001 Technika, technologie a řízení letecké dopravy**
Téma práce: **Srovnávací analýza konvenčního ocasního rotoru vrtulníku a fenestronu**
Zadávací katedra: **Katedra letecké dopravy**

Zásady pro vypracování

Tato práce se věnuje porovnání systémů konvenčního ocasního rotoru vrtulníku a fenestronu. Obsahem práce je analýza výhod a nevýhod obou systémů z různých perspektiv a specifikace vhodnosti jejich využití pro různá odvětví letectví. Zohledňuje kompromisy jednotlivých konstrukčních řešení a tvoří jejich ucelený přehled. Hlavním záměrem je přispět ke zvýšení bezpečnosti vrtulníkové dopravy.

Rozsah pracovní zprávy: **minimálně 35 stran**
Rozsah grafických prací: **dle pokynů vedoucího práce**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

NEŠTRÁK, Dušan. Aerodynamika, konstrukce a systémy vrtulníků: studijní modul 12. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 454 s. Učební texty dle nařízení komise ES číslo 2042/2003 Part 66. ISBN 80-7204-484-2.

SVOBODA, Václav. Vrtulníky. Naše Vojsko, 1979. ISBN 28-010-79.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Vladimír Němec, Ph.D.**
Katedra letecké dopravy

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Jiří Podolský**
Heliczech s.r.o – letecká společnost

Datum zadání bakalářské práce: **13. října 2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **13. května 2024**

L.S.

doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.
děkan

Ing. Petr Mrázek, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 1. února 2024

Prohlašuji:

Práci s názvem Srovnávací analýza konvenčního ocasního rotoru vrtulníku a fenestronu jsem vypracoval(a) samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil(a), jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne

Daniel Jakl v.r.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval konzultantovi této práce panu Ing. Jiřímu Podolskému za jeho významnou podporu, cenné připomínky a trpělivé předávání svých bohatých zkušeností, které mi pomohly při psaní této práce a v rozvoji vědomostí v oboru vrtulníkové dopravy. Dále bych chtěl vyjádřit velké díky mé rodině a přátelům za jejich neustálou podporu a povzbuzení během celého procesu tvorby této práce.

ANOTACE

Práce popisuje postupný vývoj vrtulníkové technologie se zaměřením na systém vyvažování reakčního momentu. Vysvětlí funkci těchto systémů, shrne historii jejich vývoje a popíše jejich technické řešení. Druhá část práce se zaměří na porovnání dvou dnes nejrozšířenějších systémů vyvažování reakčního momentu, konvenčního ocasního rotoru a Fenestronu. Práce poukáže na odlišnosti systémů z hlediska letových výkonů, bezpečnosti, vlivu na životní prostředí a ovladatelnosti.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vrtulník, vyvažování reakčního momentu, Fenestron, výkonnost vrtulníku, vyvažovací rotor

TITLE

A comparative analysis of a conventional helicopter tail rotor and a Fenestron.

ANNOTATION

The thesis describes the gradual development of helicopter technology focusing on the anti-torque system. It explains the function of these systems, summarizes the history of their development, and describes their technical solutions. The second part of the thesis focuses on comparing the two most common anti-torque systems today: the conventional tail rotor and the Fenestron. The thesis highlights the differences between the systems in terms of flight performance, safety, environmental impact, and controllability.

KEYWORDS

Helicopter, torque balancing, Fenestron, helicopter performance, tail rotor

OBSAH

OBSAH.....	7
SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK	12
ÚVOD.....	13
1 HISTORIE A VÝVOJ VRTULNÍKŮ	14
1.1 Úvod.....	14
1.2 První zmínky o vrtulníku	14
1.3 Paul Cornu	15
1.4 Igor Ivanovič Sikorskij	15
1.5 Počátek Bell Aircraft Corporation	17
1.6 Moskevský vrtulníkový závod M. L. Mila	18
1.7 Historie konstrukce vrtulníků u nás	18
1.8 Civilní sektor vrtulníkové dopravy	20
1.9 Počátky Fenestronu.....	21
2 FUNKCE VYROVNÁVACÍHO ROTORU	23
2.1 Princip.....	23
2.2 Pohon ocasního rotoru	23
2.3 Řídící prvky ocasního rotoru	24
2.4 Konvenční ocasní rotor	25
2.5 Fenestron.....	26
2.6 Vertikální stabilizátor	28
2.7 Ostatní koncepce.....	29
2.7.1 Víc rotorová a koaxiální uspořádání	29
2.7.2 Systém NOTAR	29
2.7.3 Reaktivní pohon rotoru	30
3 POROVNÁNÍ SYSTÉMŮ KONVENČNÍHO VR A FENESTRONU	31
3.1 Vrtulníky použité k porovnání	31

3.1.1	Robinson R22 a Cabri G2	31
3.1.2	Eurocopter EC 145 T1 a EC 145 T2	32
4	LETOVÉ VÝKONY	34
4.1	Dostup	34
4.1.1	Dostup ve visu	34
4.1.2	Dynamický dostup	35
4.2	Rychlost	35
4.3	Prázdná hmotnost a MTOW	35
4.4	Shrnutí výkonnosti	36
5	OVLÁDÁNÍ	37
5.1	Nelinearita a rozdílné výchylky řízení	37
5.2	Pokles otáček hlavního rotoru	39
5.3	Ztráta efektivity ocasního rotoru (LTE)	40
5.4	Shrnutí ovladatelnosti	40
6	BEZPEČNOST	41
6.1	Bezpečnost pozemního personálu	41
6.2	Kolize za letu	42
6.3	Tvrdé přistání	42
6.4	Shrnutí	43
7	HLUKOVÉ ZATÍŽENÍ	44
7.1	Vznik hluku	44
7.2	Vnímání hluku	45
7.3	Snížení hladiny hluku	45
7.4	Měření hluku	46
7.5	Fázová modulace lopatek/listů	46
7.6	Porovnání hlučnosti Fenestronu a konvenčního vyrovnávacího rotoru	49
	ZÁVĚR	52

POUŽITÁ LITERATURA.....	54
-------------------------	----

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK

Obrázek 1 "Létající bicykl" Paula Cornu [3].....	15
Obrázek 2 Vrtulník Sikorsky VS300 [4].....	16
Obrázek 3 Vrtulník Bell 30 [6]	17
Obrázek 4 Vrtulník TAH-1P (Bell 209) [8]	18
Obrázek 5 Návrh vrtulníku Praga E1 konstrukčního týmu LT3 [11].....	19
Obrázek 6 Vrtulník HC-2 pilotovaný Zdeňkem Pondělníčkem na střeše obchodního domu Bílá Labuť v Praze, září 1957 [11]	20
Obrázek 7 Vrtulník Mi-2 letecké záchranné služby [13].....	21
Obrázek 8 Mechanismus systému Fenestron bez vnějšího krytu [16].....	27
Obrázek 9 Vrtulník Robinson R22 s dvoulistým ocasním rotorem [21]	32
Obrázek 10 Vrtulník Cabri G2 s Fenestronem [30]	32
Obrázek 11 Vrtulník EC 145 T1 s dvoulistým ocasním rotorem na vrcholu svislého stabilizátoru [23, s. 46]	33
Obrázek 12 Vrtulník EC 145 T2 s Fenestronem [12]	33
Obrázek 13 Rozsah pozic pedálů nožního řízení mezi dopředným letem a visem: porovnání Fenestron (červeně), konvenční VR (modře)[28].....	37
Obrázek 14 Scénáře přiblížení: vlevo kritický případ přiblížení s větrem zprava bez správné reakce, vpravo správně provedené přiblížení bez vlivu větru [27].....	38
Obrázek 15 Následky tvrdého přistání EC 135[32].....	43
Obrázek 16 Normované křivky stejné hlasitosti [34]	45
Obrázek 17 Účinek fázové modulace lopatek Fenestronu při nominálním výkonu odpovídajícím visu [36].....	47
Obrázek 18 Konfigurace listů ocasního rotoru, vlevo neortogonální rozložení, vpravo normální rozložení čtyřlistého rotoru [37].....	47
Obrázek 19 Neortogonální rozložení listů vyrovnávacího rotoru AH-64 Apache [37].....	48
Obrázek 20 Tabulka úrovní hlukového zatížení při vzletu v závislosti na MTOW [38]	49
Obrázek 21 Tabulka úrovní hlukového zatížení při přiblížení v závislosti na MTOW [38]....	50
Obrázek 22 Tabulka úrovní hlukového zatížení při přeletu v závislosti na MTOW [38].....	50
Obrázek 23 Porovnání plochy nejvýraznějšího hlukového zatížení typů EC 145 T1 a EC 145 T2 při visu [38]	51

Tabulka 1 Statický dostup OGE, IGE jednotlivých typů vrtulníků [21][23][25][26]	34
Tabulka 2 Maximální provozní výšky jednotlivých typů vrtulníků [21][24][26]	35
Tabulka 3 Nepřekročitelná rychlost (V_{ne}) [KIAS] [21][22][23][25]	35
Tabulka 4 Hodnoty MTOW a prázdné hmotnosti jednotlivých typů vrtulníků [21][23][25][26]	36
Tabulka 5 Pokles otáček vyrovnávacího rotoru [24][29][30]	39
Tabulka 6 Vnější hlukové zatížení typů Bell 429 a Bell 427 [39] [40]	48
Tabulka 7 Vnější hlukové zatížení při přeletu Robinson R22 a Cabri G2 [26][41]	49

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

VR – vyvažovací rotor

LZS – Letecká záchranná služba

GND – povrch země

KIAS – indikovaná vzdušná rychlost uvedená v uzlech

IGE – dostup vrtulníku ve visu s vlivem přízemního efektu

OGE – dostup vrtulníku ve visu bez vlivu země

MTOW – maximální vzletová hmotnost

BVI – interakce koncových vírů listů rotorů

Vne – nepřekročitelná rychlost

ÚVOD

Bakalářská práce popisuje vývoj vrtulníkové techniky se zaměřením na koncepci vyvažování reakčního momentu.

První a druhá část se zabývá popisem problematiky vzniku reakčního momentu při pohonu hlavního rotoru a popisuje postupný nástup jednorotorových typů s vyvažovacím rotorem na konci ocasního nosníku. Shrne historii vzniku těchto koncepcí a vysvětlí důvody vedoucí k jejich dalšímu rozšíření. Vysvětluje jednotlivá konstrukční řešení a popisuje možnosti pohonu i umístění systémů. Práce rozebírá okrajově i ostatní koncepce, které se nedostaly přes fázi experimentu. Hlavní důraz je však kladen na systémy tzv. klasické vrtulky a relativně novějšího systému s obchodním názvem Fenestron, jelikož se dnes jedná o dvě nejrozšířenější koncepce.

Třetí část práce se zaměří na podrobné porovnání systémů konvenčního ocasního rotoru a Fenestronu. Pro demonstraci odlišností a jejich vlivu na výkonnost vrtulníku budou použity typy vrtulníku podobné konstrukce, kde hlavní rozdíl představuje právě použitý systém vyrovnávání reakčního momentu. Jako zástupci vrtulníků s konvenčním ocasním rotorem budou použity typy Robinson R22 a Eurocopter EC145, zatímco typy se systémem Fenestron zastoupí stroje Guimbal Cabri G2 a EC 145 T2, který je přímým nástupcem EC145.

Cílem bakalářské práce je detailně popsat systémy konvenčního ocasního rotoru a Fenestronu, vyzdvihnout technické kompromisy jednotlivých koncepcí a poukázat na odlišnosti týkající se vlastností jednotlivých systémů a jejich vlivu zejména na letové výkony a říditelnost vrtulníku. Hlavním účelem práce je zvýšit povědomí o rozdílnostech systémů v zájmu zvýšení bezpečnosti vrtulníkové dopravy.

1 HISTORIE A VÝVOJ VRTULNÍKŮ

V této kapitole bude rozebrán vývoj vrtulníkové techniky od jejich počátků. Bude popsána cesta vývoje, která postupně přivedla na svět konstrukční řešení v podobě ocasního rotoru. Okrajově budou zmíněni i další výrobci vrtulníků.

1.1 Úvod

Vrtulník je jeden z nejvšestrannějších dopravních prostředků dnešní doby. Jeho schopnost kolmého vzletu nabízí možnosti, které klasické letouny s pevnými nosnými plochami jen těžko překonají. Vrtulníky jsou velmi oblíbeným dopravním prostředkem na krátké až středně dlouhé vzdálenosti. Tím že pro vzlet a přistání nepotřebují využívat přistávacích drah nabývají obrovského potenciálu v civilním i vojenském letectví. Dají se využít na širokou škálu leteckých prací. Používají se při hašení požárů, VIP přepravě osob, přepravě materiálu do těžko přístupných lokalit, v lesohospodářství nebo při stavbě výškových budov a vysílačů. Jejich všestrannost však zdaleka nejvíce vyniká v rukou záchranných složek. Schopnost přistát prakticky kdekoli a nezávislost na dopravní infrastruktuře drasticky snižuje dojezdový čas a zvyšuje tak šanci na záchranu života. Jen za rok 2023 Letecká záchranná služba provedla více než 7600 vzletů po celé české republice.[1]

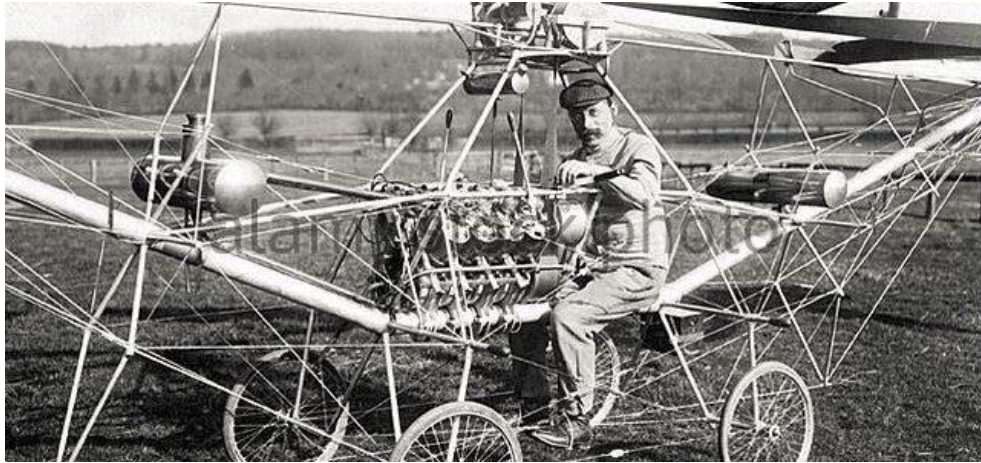
Co se týče osobní přepravy jsou zejména ty lehké vrtulníky na vzestupu. Majitelům a provozovatelům vrtulníků jsou tyto stroje schopny výrazně zkrátit například pracovní cesty. Let z jednoho koutu republiky do druhého se tak stává několikahodinovou záležitostí, nikoliv nutně otázkou cesty na celý den. Pozemní doprava vyžaduje využití již existující dopravní infrastruktury s častými dopravními komplikacemi. Vrtulník tak nabízí flexibilní alternativu. Optimalizací a zjednodušením systémů vrtulníku je docíleno toho, že je dnes vrtulníková doprava dostupnější než kdy dříve.

1.2 První zmínky o vrtulníku

Historie svislého letu sahá přibližně až do roku 400 našeho letopočtu. V historických dokumentech se dočteme o čínských létajících dracích, které požívaly rotující křídlo jako zdroj vztlaku. Ve středověku byly známé hračky připomínající listy vrtulníku, které byly roztočeny tahem za provázek. První zmínky o vrtulníku čili o létajícím stroji schopném kolmého vzletu, můžeme zaznamenat již v patnáctém století našeho letopočtu. Autorem prvního návrhu nebyl nikdo jiný než Italský malíř a vynálezce Leonardo Da Vinci. Jeho návrh ovšem pravděpodobně nebyl nikdy sestaven a je velice nepravděpodobné, že by byl schopen letu. [2]

1.3 Paul Cornu

Na další vývoj si musíme počkat celých 5 století. První let letadlem s rotujícími nosnými plochami provedl 13. listopadu roku 1907 Francouzský vynálezce a výrobce jízdních kol Paul Cornu. Cornu se narodil roku 1881 ve Francouzském městečku Lisieux. Od svého mládí pracoval v rodinném podniku jeho otce, který byl zaměřen na motocykly, automobily a jízdní kola. Jeho talent se projevil v jeho 24 letech kdy navrhl a sestrojil první funkční model vrtulníku, který vážil necelých 13 kg. Úspěch modelu ho inspiroval k vytvoření létajícího stroje v životní velikosti schopného nést pasažéra. To se mu nakonec také podařilo. Stroj byl dvurotorového uspořádání s motorem Antoinette o výkonu 24 koňských sil. První vrtulník byl schopen visu ve výšce přibližně 1,5 metru nad zemí po dobu přibližně dvaceti vteřin. Do historie se stroj zapsal jako „létající bicykl“. Cornu zemřel při bombardování v roce 1944. [3]



Obrázek 1 "Létající bicykl" Paula Cornu [3]

1.4 Igor Ivanovič Sikorskij

První praktický vrtulník, který byl schopen delšího samostatného letu je stroj s označením VS-300. Byl navržen leteckým konstruktérem Igorem Ivanovičem Sikorskim a sestaven firmou Vought-Sikorski Aircraft.

Igor Ivanovič Sikorskij se narodil 25.5.1889 v Kyjevě na území dnešní Ukrajiny, tehdy ještě součástí Ruska. Své znalosti nabyl jako kadet na Námořní akademii v Petrohradě, dále na polytechnickém institutu v Kyjevě a na škole letecké techniky a konstrukce automobilů v Paříži. Svůj první letoun zkonstruoval roku 1909. Typ letounu S-6 zvítězil na exhibici Ruské armády v Moskvě a Sikorskij byl následně jmenován hlavním konstruktérem Rusko-Baltského vagonového závodu RBVZ. Zkonstruoval několik unikátních čtyřmotorových letounů jako jsou Russkij vitjaz, Grand a Ilja Muromec.

Po rozpadu ruské monarchie emigroval do spojených států, kde založil vlastní leteckou společnost. Sikorskij využil svou dosavadní praxi k vývoji velkých letounů. Úspěšným se stal dopravní letoun S-29 pro 14 cestujících, který mohl být využit i jako bombardér. Pro pojmenování letadel používal své poangličtěné příjmení Sikorsky.



Obrázek 2 Vrtulník Sikorsky VS300 [4]

Vývoji vrtulníku se Sikorskij věnoval již ve druhé polovině třicátých let. Jeden z prvních návrhů vznikl ovšem již v roce 1909. Ve spolupráci se společností Vought, zkonstruoval Sikorskij první vrtulník s označením VS-300. První volný let byl uskutečněn 13. května 1940. Sikorskij jako první představil koncepci vrtulníku s jedním hlavním nosným rotorem. Musel se tak jako první konstruktér vypořádat s výzvou v podobě vzniku reakčního momentu při přenosu výkonu na hlavní rotor. Na svět tak přišlo konstrukční řešení v podobě **vyrovnávacího rotoru** umístěném na ocasním nosníku, který má za úkol reakční moment vyrušit a zajistit říditelnost stroje kolem jeho svislé osy. Zároveň se jednalo o první létající stroj s cyklickým naklápěním listů rotoru. Sikorskij svým vrtulníkem dokázal, že koncept stroje s kolmým vzletem není pouze utopickou vizí, ale může fungovat i v praxi. Nechal tak vzniknout zcela novému odvětví letectví. Ihned začaly být zřejmé možnosti využití vrtulníků jak v civilním sektoru, tak v boji. Dalším vývojem vznikaly další typy vrtulníků. Po typu VS-300 přišla na řadu jeho vylepšená verze pro sériovou výrobu označená jako R-4. Následovaly typy R-5, S-56 Mojave se dvěma motory, nebo typ S-64 známý pod označením Skycrane (nebeský jeřáb). Od počátku vývoje

jevily zájem o vrtulník ozbrojené síly. Typ UH-60 v roce 1976 mimo jiné zvítězil v konkurzu pro americkou armádu a jeho sériová výroba započala roku 1979, kdy vstoupil do služby americké armády jako náhrada vrtulníků Bell UH-1. [4][5]

1.5 Počátek Bell Aircraft Corporation

V roce 1935 se do vývoje vrtulníků přidal i výrobce Bell Aircraft Corporation (dnes Bell Helicopter). Ve čtyřicátých letech byla firma Bell již úspěšným výrobcem druhoválečných stíhačů jako je například P-39 Aircobra a započala vývoj prvního nadzvukového letounu P-59. Jeho první vrtulník s označením Bell 30 poprvé vzlétl v prosinci 1942. Další typ Bell 47 vzlétl roku 1945 a byl prvním vrtulníkem certifikovaným pro civilní použití. Do roku 1947 bylo vyrobeno více než 5600 kusů. S rozvojem vrtulníkové techniky začaly být více a více patrné možnosti jeho využití v boji. Mimo další tak na svět tak přišel víceúčelový vrtulník UH-1 Huey, který byl navržen zejména pro přepravu a výsadky vojsk v boji nebo pro přepravu munice, zásob či jiného materiálu. Své uplatnění ovšem našel i v civilním sektoru jako záchranný nebo dopravní vrtulník.[6]



Obrázek 3 Vrtulník Bell 30 [6]

Válečné konflikty nasadily vysoké tempo vývoje nových typů vrtulníků. Letadla s rotujícími nosnými plochami nabývala zejména díky válce ve Vietnamu nevídaného potenciálu. Po úspěšných typech víceúčelových vrtulníků byl rozvoj směřován k vývoji prvního bitevního vrtulníku. V září 1965 tak vzlétl první prototyp vrtulníku AH 1 Cobra (Bell 209). Jeho konstrukce vychází z konstrukčních prvků UH-1. Jedná se o dvoumístný jednomotorový vrtulník osazený střeleckou věží s možností instalace 7,62mm rotačního kulometu GAU-2B/A Minigun a 40mm granátometu XM75. Dále je pak možnost připevnění dodatečné výzbroje na závěsníky pod křídly. O dva roky později se stroj dostal do aktivní výzbroje armády Spojených Států. [6] [7, s. 222-223]



Obrázek 4 Vrtulník TAH-1P (Bell 209) [8]

1.6 Moskevský vrtulníkový závod M. L. Mila

Vyjma spojených států zaznamenal velký pokrok ve vývoji vrtulníků tehdejší Sovětský Svaz. Moskevský vrtulníkový závod M. L. Mila započal vývoj vrtulníků v roce 1947. Zaměřen byl převážně na víceúčelové a transportní vrtulníky pro armádu sovětského svazu. Jejich první bitevní, respektive transportně-bitevní vrtulník vzlétl pod označením Mi 24 v září 1969.[9]

1.7 Historie konstrukce vrtulníků u nás

Již v roce 1925 u nás vznikl model třírotorového vrtulníku. Autorem modelu byl plzeňský letecký průkopník Karel Tuček. Ten se proslavil svými leteckými pokusy z období před první světovou válkou. Jeho model vrtulníku měl trup příhradové konstrukce čtvercového průřezu, ukončený vodorovnou ocasní plochou. Model byl vyhotoven v měřítku 1:10. Zkoušky tohoto modelu probíhaly ve Vojenském leteckém ústavu studijním (VLÚS), který vznikl roku 1923. Z důvodu nedostatku financí se jeho nápad bohužel nerealizoval. [10]

Bezesporu nejvýznamnějším československým vrtulníkovým konstruktérem byl však **Ing. Jaroslav Šlechta**. Již ve třicátých letech působil jako konstruktér letadel v leteckém oddělení Praga a pod jeho vedením přišel na svět typ Praga E-210 s motory v tlačném provedení nebo Praga E-114 zvaný Air Baby. Během německé okupace byl v letech 1942 až 1943 nasazen k práci v letecké továrně v německé Halle. V Halle získal mnoho zkušeností při výrobě německých dvourotorových vrtulníků Fa-223. Během tohoto období již pracoval na svém vlastním návrhu cyklického řízení pro jednorotorové vrtulníky. Po návratu do

letadlového oddělení ČKD nechal svůj návrh sestrojít a podrobil ho mnohačetným zkouškám. V roce 1946 si nechal svůj vynález patentovat pod názvem "**výstředníková soustava pro cyklické ovládání lopatek rotorů u letadel s obíhajícími křídly.**" Vynálezem tohoto systému významně přispěl do světového vývoje vrtulníkové dopravy. [11]

Šlechtovy projekty započaly rekonstrukcí ukořistěných vrtulníku Fa-223, které po dokončení oprav nesly československé označení VR-1. Šlechta se po skončení okupace stal vedoucím konstrukční skupiny LT3 leteckého oddělení Praga, se kterou započal práce na konstrukci prvních československých vrtulníků. Vlastní vývoj započal typem Praga I exp. roku 1945. Stroj měl tříkolový podvozek a dva prolínající se dvoulisté rotory o průměru 7,4 metru. Pohon měl být zajištěn plochým čtyřválcem Praga DR o výkonu 59 kW. Typ však



Obrázek 5 Návrh vrtulníku Praga E1 konstrukčního týmu LT3 [11]

vznikl pouze na papíře. Následovala upravená verze Praga E1 se stejným typem uspořádání hlavního rotoru. U tohoto typu již vznikaly jeho konstrukční celky, jako byl například reduktor prolínajících se rotorů. Šlechtova konstrukční skupina však od tohoto uspořádání rotoru upustila a zahájila vývoj typu s jedním hlavním rotorem a vyrovnávacím rotorem na konci ocasního nosníku. Vznikl tak prototyp Praga XE II, který již byl schopen letu. Byl velmi jednoduché příhradové konstrukce s odkrytou kabinou a dvoulístým hlavním rotorem. Během testovacích letů proběhlo na tomto typu mnoho úprav jako například změna rozložení řízení, nový typ rotorové hlavy, stabilizátor na ocasních plochách nebo kapotáž. [11]

Konstrukcí typu XE II přinesla konstrukční skupině LT3 nespočet zkušeností a cenných poznatků, které následně využili při vývoji nového typu HC-2 Heli Baby. HC-2 je lehký cvičný a spojovací vrtulník s třírotorovým uspořádáním hlavního rotoru a palubou pro dvě osoby usazené vedle sebe. Stavba byla zahájena roku 1951. První let byl však uskutečněn až o 3 roky později v roce 1954 na letišti v pražských Letňanech. Výroba byla předána národnímu podniku Moravan Otrokovice. Zálet prvních sériových HC-2 proběhl v roce 1958. Roku 1961 pak byly staženy k přestavbě na vylepšené verze HC-102 s výkonnějšími motory a úpravami draku. HC-102 vznikl v době, kdy v československé armádě létaly již typy Mi-1 a Mi-4 a HC-102 tak byly předány aeroklubům Svazarmu. [11]



Obrázek 6 Vrtulník HC-2 pilotovaný Zdeňkem Pondělníčkem na střeše obchodního domu Bílá Labuť v Praze, září 1957 [11]

Již v průběhu vývoje HC-2 vznikly návrhy pro další typy československých vrtulníků jako například větší verze HC-3, HC-4, HC-5 a HC-6. Dále také vrtulník s dvourotorovým uspořádáním LC-III. Typ HC-32 vznikl ve dvou letuschopných prototypch. Další vývoj vrtulníků v Československu byl bohužel znemožněn tehdejším politickým nátlakem ve prospěch sovětských strojů. [11]

1.8 Civilní sektor vrtulníkové dopravy

Po konci druhé světové války započal výrazný vývoj vrtulníků i v civilní sféře. Vrtulníky byly zařazovány do pozic leteckých prací jako je hašení požárů, policejní služba, postřik plodin v zemědělství, přeprava pošty nebo služby letecké záchrany. Již v roce 1952 vznikla první letecká záchranná služba v Evropě, konkrétně Švýcarská letecká záchranná služba Rega. K záchranným letům používali lehký pozorovací vrtulník Hiller 360. [12]



Obrázek 7 Vrtulník Mi-2 letecké záchranné služby [13]

Úvahy nad zavedením letecké záchranné služby na území Československa započaly až roku 1977. Průlomový byl rok 1985 kdy ve Švýcarském Curychu proběhl již druhý mezinárodní kongres leteckých záchranných služeb AIRMED 85, kterého se již účastnili i zástupci Československa. První etapa zkušebního provozu letecké záchranné služby byla zahájena 30. května 1988. Jako první typ vrtulníku provozovaným leteckou záchrannou službu byl vrtulník Mil Mi-2. [14]

1.9 Počátky Fenestronu

S rozšířením letecké záchranné služby a dalších leteckých prací vznikla poptávka po víceúčelových vrtulnících. Začal se vyskytovat problém s bezpečností pozemního personálu kolem vrtulníků, jelikož se pozemní personál v terénu pohyboval v těsné blízkosti rotujících listů hlavního a vyrovnávacího rotoru. Tento problém byl částečně eliminován používáním typů vrtulníku s vyvažovacím rotorem typu Fenestron. Myšlenka uzavřít ocasní rotor do prstence se objevila již v polovině šedesátých let. Vývoj Fenestronu započal v sedmdesátých letech minulého století společností Sud Aviation (dnešní Airbus Helicopters). První Fenestron byl úspěšně představen na vrtulníku Gazelle, který původně vyvinula a vyráběla Francouzská společnost Sud Aviation, později Aérospatiale. Gazelle je lehký jednomotorový průzkumný vrtulník vyvinutý jako nástupce vrtulníku Alouette III. Krom Fenestronu přinesl také inovace ve výrazném snížení nároků na údržbu. První prototyp SA 340 byl osazen konvenčním ocasním rotorem převzatým od jeho předchůdce Alouette III a první let provedl 7. dubna roku 1967. Další postavené modely byly již osazeny první generací Fenestronu. Mezi dnes nejlétanější typy vrtulníků s Fenestronem patří EC135, H145, H120 nebo Cabri G2. Krom bezpečnosti

pozemního personálu přináší Fenestron také výhodu v podobě nižší hlučnosti. Tuto vlastnost využijí především vrtulníky LZS a vrtulníky v soukromém vlastnictví, které často létají v městských oblastech. [7, s. 253-254][15][16]

2 FUNKCE VYROVNÁVACÍHO ROTORU

Abychom si mohli popsat k čemu slouží ocasní rotor, rozvedeme si nejprve základní principy fungování vrtulníku.

2.1 Princip

Vrtulník je motorové letadlo těžší než vzduch s motoricky poháněnými nosnými plochami, rotujícími v přibližně vodorovné rovině, které jsou jediným zdrojem nosné i propulzní síly. Rotace nosných ploch vyvozuje aerodynamickou sílu, která působí proti směru síly tíhové. Naklopení vektoru tahu nosného rotoru nám umožňuje řídit stroj ve vodorovné ploše. Řízení vrtulníku je zajištěno kombinací cyklické a kolektivní změny úhlů náběhu na jednotlivých listech nosného rotoru a kolektivním nastavením lopatek ocasního rotoru. Na nosném rotoru však kromě vztlaku vzniká také odpor. Výsledný odpor působí proti pohybu rotace nosných ploch. To vede ke vzniku reakčního momentu na hřídeli nosného rotoru. [7, s. 10-15]

Třetí Newtonův pohybový zákon – zákon akce a reakce: "Jestliže jedno těleso působí silou na druhé těleso, působí druhé těleso na první stejně velkou silou opačného směru. Síly současně vznikají a zanikají." [17]

Třetí Newtonův zákon platí stejně jak na působení sil, tak i na vzájemné působení dvou momentů. Přenos výkonu z pohonné jednotky k nosnému rotoru zajišťuje transmise¹ vrtulníku. Točivý moment od pohonné jednotky je pomocí transmise převeden na hřídel nosného rotoru. Nosný rotor však stejným momentem opačného smyslu působí na transmisi vrtulníku a vzniká tak reakční moment, který má snahu stroj „roztočit“ opačným směrem, než je rotace nosného rotoru. Ocasní rotor za pomoci rotujících listů rotoru vyvozuje aerodynamickou sílu, která na rameni ocasního nosníku vytváří moment v opačném smyslu, než je moment reakční. Reakční moment je tak vyrušen. [18, s. 29]

2.2 Pohon ocasního rotoru

Pohon ocasního rotoru je zajištěn transmisí, na kterou je přenášen výkon od pohonné jednotky. Hřídel náhonu ocasního rotoru může být u některých vrtulníků s pístovými motory hnaná pouze s mírným převodem přímo od pohonné jednotky bez nutnosti výraznější redukce otáček, jelikož ocasní rotor vrtulníku má podobné rozmezí otáček jako nominální režim

¹ Transmise je soustava vrtulníku, která zajišťuje přenos kroutícího momentu od pohonné jednotky na nosný a vyrovnávací rotor. Zároveň je jejím účelem redukovat otáčky pro NR, VR a případně další agregáty.

pístového motoru. Například u pístových Robinsonů je použito hnací hřídele, která je hnaná řemenovým převodem s malým převodovým poměrem od pístové pohonné jednotky přibližně v první čtvrtině její délky mezi hlavním reduktorem a ocasním reduktorem. Cabri G2 disponuje podobným systémem, pouze jinak uspořádaném. Použití jediné hřídele výrazně snižuje složitost hnacího systému, zjednodušuje údržbu a s ní spojené provozní náklady. U vrtulníků s turbínovými motory jsou již zapotřebí otáčky výrazně snížit a hřídele náhonu ocasních rotorů jsou tak vyvedeny vždy z hlavního reduktoru.

Hnací hřídel ocasního rotoru je dále vedena nejčastěji skrze ocasní nosník. Ocasní nosníky bývají poloskořepinové konstrukce nebo příhradové konstrukce bez potahu. U některých typů je hřídel vedena nad ocasním nosníkem a chráněna odklápěcím krytem. Tento systém oproti hřídeli přímo v nosníku zjednodušuje údržbu a pravidelné kontroly.

Ocasní nosník vrtulníku nemusí být kompletně tuhý a za letu se tak může nepatrně prohýbat. Aby však tato vlastnost nijak neohrozila funkci hnací hřídele, může být hnací hřídel ocasního rotoru rozdělena na několik částí vzájemně propojených pružnými prvky (flex plate) které dovolují drobné vyosení pohybujících se hřídelí vůči sobě. Dále pak na několika místech bývají podepřeny ložisky. V dnešní době však čím dál častěji najdeme vrtulníky s hnací hřídelí z jednoho kusu. Občas bývají vybaveny tlumiči radiálních kmitů. Odpadá tak pravidelná údržba ložisek a zjednodušují se tím pravidelné kontroly.

Na konci ocasního nosníku je zpravidla koncový (ocasní) reduktor, který mění směr transmise většinou o 90° . Zajišťuje tak převod točivého momentu na hřídel ocasního rotoru. Ocasní reduktory sestávají z ozubeného převodu. Ten je tvořen dvěma na sebe kolnými kuželovými ozubenými koly. Koncové reduktory mohou mít malý převodový poměr, který upravuje konečné otáčky ocasního rotoru.

U vrtulníků s ocasními rotory umístěnými na vrcholu svislé ocasní plochy najdeme vložený ocasní reduktor. Ten zajišťuje změnu směru osy hnací hřídele. Stejně jako u koncových reduktorů je změna směru zajištěna ozubeným převodem. Na rozdíl od nich však mají konstantní převodový poměr a nemění tak otáčky hřídele. [18, s. 143-161]

2.3 Řídící prvky ocasního rotoru

Ocasní rotor vyjma vylučování reakčního momentu slouží také k řízení vrtulníku kolem jeho svislé osy. Tah ocasního rotoru i Fenestronu je ovládán kolektivním nastavením úhlu náběhu jednotlivých listů/lopatek. K tomu pilot používá pedály nožního řízení. Pohyb pedálů

nožního řízení je převeden systémem táhel nebo lan a kladek na mechanismus ocasního rotoru. [18, s. 84-85]

2.4 Konvenční ocasní rotor

Samotná konstrukce vyrovnávacího rotoru sestává z těchto základních částí:

1. Listy rotoru
2. Rotorová hlava
3. Mechanismus pro změnu úhlu nastavení listu VR

Jako materiál listů VR je dnes nejčastěji použita nerezová ocel a hliník. Náběžná hrana je tvořena dutým nerezovým nosníkem. Na ten je nalepen hliníkový potah. Ten tvoří tvar profilu listu a odtokové hrany. Jádro potahu je vyplněno hliníkovou výplní tvaru včelích pláství (honeycomb). V současnosti jsou na vzestupu rotory z kompozitních materiálů, nejčastěji uhlíkové nebo skelné vlákno. Dutá místa v kompozitových listech mívají pěnovou výplň. Na náběžné hraně jsou nalepeny nerezové pásnice chránící list proti opotřebení. Kompozitové listy VR přináší výhody jako vyšší životnost, z toho vyplývající nižší náklady na údržbu, vyšší pevnost, odolnost vůči korozi a díky optimalizaci profilu a schopnosti kompozitu lépe tlumit vibrace také výrazné snížení hlučnosti. [18, s. 84-91][19]

Zavěšení VR je umístěno na prodloužené hřídeli od ocasního reduktoru. Rozeznáváme několik typů zavěšení vyvažovacích rotorů:

1. VR s tuhým upevněním listů
2. VR s kloubovým zavěšením listů
3. VR s kardanovým zavěšením listů

Tuhé upevnění listů VR je nejjednodušším řešením upevnění listů. Za dopředného letu je však vlivem rozdílných rychlostí nabíhajícího a ustupujícího listu působí vztlaku posunuto mimo střed VR a vzniká nerovnováha vztlaku. Tato nerovnováha vytváří dodatečné momentové namáhání hřídele od reduktoru. Řešením této problematiky jsou **ocasní rotory s kloubovým zavěšením**, které mají osový a vodorovný (vztlakový) závěs. Osový závěs slouží pro změnu úhlu nastavení listu a tím velikost tahu VR. Vztlakový závěs umožňuje mávání listu. Vymávnutí listu kompenzuje nárůst vztlaku vzniklý větší rychlostí proudění kolem nabíhajícího listu. Momentové zatížení hřídele VR tak bude výrazně nižší než u tuhého uspořádání. Tento typ zavěšení nalezneme u rotorových hlav, které mají 3 a více listů. Pro dvoulisté VR používáme **Kardanové závěsy**. Hlavu kardanového závěsu tvoří tělo závěsu, které je připevněno na hřídel

VR pomocí čepu, který umožňuje naklápění obou listů jako jednoho celku. Naklonění roviny kardanového závěsu má pak za následek změnu úhlu náběhu na jednotlivých listech VR. Tím je podobně jako u kloubových závěsů eliminován posun působistiště vztlaku a sníženo momentové zatížení hřídele a reduktoru. [18, s. 84-91]

Většina vyrovnávacích rotorů je tlačná, kde aerodynamická síla tlačí v ose rotoru směrem do ocasního reduktoru. Toto uspořádání zvyšuje aerodynamickou účinnost VR a snižuje dodatečné aerodynamické zatížení ocasního nosníku. Přesto však najdeme i tažné varianty ocasního rotoru.

U lehkých vrtulníků se setkáme převážně s dvoulistou konfigurací VR, jelikož je konstrukčně nejjednodušší. Menší počet listů zajišťuje lepší účinnost rotoru. U těžších vrtulníků nalezneme vícelisté uspořádání. Nejčastěji třílisté a čtyřlisté, ovšem nalezneme vrtulníky s až šestilistým uspořádáním. Více listů nám nabídne možnost přenosu většího množství výkonu na rotor. Můžeme také snížit průměr či rychlost rotoru. To má za následek snížení obvodové rychlosti konců rotoru a snížení hlučnosti. Jejich nevýhodou je ovšem větší konstrukční složitost, vyšší hmotnost a nižší účinnost z důvodu interakce proudění mezi jednotlivými listy rotoru. [18, s. 84-91]

2.5 Fenestron

Fenestron je vysokootáčkový ventilátor umístěný v prstenci na konci ocasního nosníku. Fenestron má zpravidla sedm až třináct lopatek. Jako materiál lopatek byly dříve používány hliníkové slitiny. Nově vyráběné vrtulníky jsou již vybaveny lopatkami z kompozitových materiálů. Samotný prstenec s Fenestronem je zastavěn přímo do vertikálního stabilizátoru.

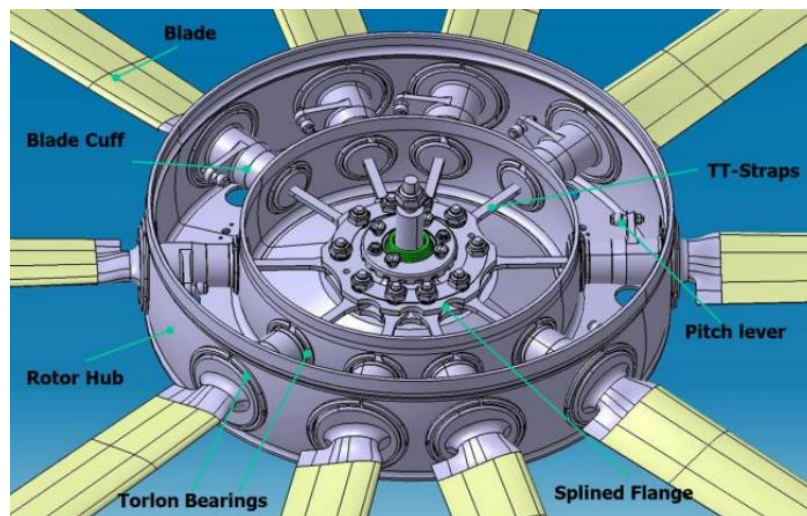
Konstrukce Fenestronu se skládá, podobně jako konvenční vyrovnávací rotor, z několika hlavních částí:

1. Lopatky
2. Statorové lopatky
3. Náboj rotoru
4. Reduktor
5. Mechanismus stavění lopatek
6. Aerodynamický kryt

Lopatky Fenestronu od svého počátku prošly výrazným vývojem. Hlavními materiály použitých pro výrobu lopatek jsou podobně jako u konvenčního VR slitiny hliníku a

kompozitové materiály. Lopatky jsou tvořeny potahem a plným jádrem. Na náběžné hraně lopatek pak můžeme najít nerezové opláštění zamezující nadměrnému opotřebení vlivem kontaktu lopatek s nečistotami a cizími předměty. Do samotné lopatky je integrovaný konstrukční prvek schopný přenášet tahovou složku od působení odstředivé síly při rotaci a zároveň umožňující kroucení podél své osy (v angličtině zvaný Tension-Torsion Strap). Kroucení umožňuje změnu úhlu nastavení lopatky bez nutnosti použití ložisek. Tím jsou výrazně sníženy nároky na údržbu. Konec „strapu“ je pak upevněn do středu náboje. Na kořen lopatky je pak připevněna objímka, která je uložena v náboji rotoru a napojena na mechanismus stavění lopatek. [16]

Samotný stavěcí mechanismus je řešen obdobně jako u konvenčního ocasního rotoru pouze s tím rozdílem, že jeho pohyblivý prvek je připevněn k výrazně většímu počtu listů. Táhllo řízení je vedeno koaxiálně skrze hnací hřídel z reduktoru na talíř ovládaní úhlu nastavení (Pitch-Change Spider). Ten se pohybuje v ose hřídele a svým pohybem kolektivně mění úhel nastavení lopatek. Reduktor Fenestronu je prakticky totožný s reduktory konvenčních ocasních rotorů. Jediný výraznější rozdíl spočívá v převodovém poměru, který je menší (více do rychla) než u konvenčního VR z důvodu výrazně vyšších otáček Fenestronu. [16]



Obrázek 8 Mechanismus systému Fenestron bez vnějšího krytu [16]

Další součástí konstrukce Fenestronu je aerodynamický kryt. Ten je nejčastěji dutý, laminátový. Slouží jako prstenec uzavírající lopatky a zároveň jako vertikální stabilizátor vrtulníku. V jeho prstenci mohou být upevněny statorové lopatky, které redukuje rotaci proudu vzduchu a zvyšují tak aerodynamickou účinnost systému. [16]

Počátečním cílem vývoje Fenestronu bylo především zvýšení bezpečnosti při spolupráci s pozemním personálem a snížení rizika kontaktu vyrovnávacího rotoru s cizími předměty při

dopředném letu nebo při provádění leteckých prací v prostředí se zvýšeným množstvím překážek. Takovými překážkami bývají nejčastěji vedení vysokého napětí nebo stromy. Benefity spojené se snížením hluku přišly až později dalším vývojem a optimalizací systému. [20]

Během vývoje fenestronu byly podniknuty různé experimenty a konstruktéři měli snahu zakomponovat tento nový systém do více typů vrtulníků. Vznikla tak například verze Mi-24 A s Fenestronem. Sami Francouzi pak implementovali fenestron i na stroj SA 330 Puma (dnešní H225). Ukázalo se však, že fenestrony u velkých strojů nejsou výhodné kvůli vyšší hmotnosti tohoto systému, která je více patrná u středně těžkých a těžkých vrtulníků. Dnes je největším typem vrtulníku osazeným fenestronem typ H155 (dříve EC155) výrobce Airbus Helicopters.

2.6 Vertikální stabilizátor

U vrtulníků se systémy vyrovnávání reakčního momentu najdeme téměř vždy nějakou formu svislé stabilizační plochy. Svislý stabilizátor slouží ke stabilizaci vrtulníku kolem svislé osy při letu. Jelikož reakční moment vniká i za dopředného letu je i v tomto případě třeba tento moment vyrušit, aby vrtulník udržel přímý směr. Stabilizátory mají zpravidla profil, který při obtékání vytváří aerodynamický vztlak, stejně jako klasická křídla. Tento vztlak při dopředném letu působí ve stejném směru jako tah ocasního rotoru, tedy proti smyslu reakčního momentu. Tento jev pomáhá pilotovi při pilotáži. Bez svislé ocasní plochy by byl vrtulník směrově nestabilní což by znamenalo nutnost neustálých zásahů do nožního řízení a při letech vyšší rychlostí by se stroj stal prakticky neřiditelným. Stabilizátor síly v nožním řízení přebírá a snižuje tedy zároveň zátěž pilota. Účinek stabilizátoru roste s rychlostí letu. Při dopředném letu tak s rostoucí rychlostí ubývá potřeba korekce směru nožním řízením. I při letu cestovní rychlostí však většinou drobná korekce ze strany pilota je potřeba. Naopak při přechodu z dopředného letu do visu postupně stabilizátor vytrácí účinek a při určité rychlosti přestane být účinný úplně. Při letu pomalou rychlostí a při visu tak veškerá síla potřebná k vyrušení reakčního momentu pochází pouze z ocasního rotoru.

Svislý stabilizátor nemusí být samostatný. Kupříkladu u typu EC145 tak najdeme koncepci se třemi svislými stabilizátory, u dalších typů jsou stabilizační plochy umístěny na koncích stabilizátoru horizontálního a například prvotní typy OH-6 (dnešní MD-500) nebo Schweizer S300 disponují stabilizátory podobnými motýlkové koncepci, které kombinují funkce vodorovného a svislého stabilizátoru. U spousty typů bývají ocasní rotory umístěny přímo na vrcholu svislého stabilizátoru. [18, s.180]

2.7 Ostatní koncepce

2.7.1 Víceroťorová a koaxiální uspořádaní

Hodí se dodat, že užití ocasních vyrovnávacích rotorů není jediným řešením problematiky reakčního momentu. Existují vrtulníky s víceroťorovým (CH-47 Chinook), či koaxiálním (Kamov Ka-52) uspořádaním, kde jsou vlivem opačných smyslů rotace jednotlivých rotorů protiběžné reakční momenty v rovnováze. Řízení kolem svislé osy je u těchto typů zajištěno změnou reakčních momentů na jednotlivých hřídelích pomocí rozdílných úhlů kolektivního nastavení listů obou rotorů. Víceroťorové uspořádaní je běžnější u těžkých vrtulníků. Reakční moment u nich nevzniká, není tedy zapotřebí vyrovnávacího rotoru a veškerý výkon lze tak plně využít pro pohon hlavních rotorů. Víceroťorová a koaxiální uspořádaní tak poskytují zvýšenou nosnost vrtulníku, která je jejich hlavní výhodou. Víceroťorová uspořádaní jsou pak méně citlivá na posun těžiště, mají lepší podélnou stabilitu a lepší poměr užitečného zatížení ku hmotnosti. Nevýhodou je ovšem jejich konstrukční složitost, zejména co se týče transmise u víceroťorového typu, kde se jedná prakticky o dvě jednorotorové koncepce spojené do jednoho systému, aby zůstaly zachovány stejné otáčky obou rotorů. S tím jsou dále spojené vysoké provozní náklady. U koaxiálních koncepcí je výhodou možnost zkrácení ocasního nosíku, který zde plní pouze funkci nosíku pro uchycení ocasních stabilizačních ploch, čímž se sníží hmotnost vrtulníku. Tyto vlastnosti však vyvažují nevýhody v podobě vysoké složitosti rotorových hlav včetně systému řízení, které naopak hmotnost mírně zvýší a snížená účinnost vlivem vzájemného ovlivňování se nad sebou umístěných rotorů. Výhody, které tyto koncepce nabízí jsou v dnešní době využitelné převážně u vojenských a nákladních vrtulníků a v soukromé či obchodní dopravě se až na pár výjimek prakticky nevyskytují. [7, s. 11-16]

2.7.2 Systém NOTAR

Za zmínku také stojí systém NOTAR (zkratka pro „No tail rotor“) od výrobce Hughes Helicopters (dnes již McDonnell Douglas Helicopter System). Tento systém, jak napovídá jeho název, nemá ocasní rotor a vyrovnávání reakčního momentu je řešeno výstupem proudu vzduchu ze zadní části ocasního nosíku. Proud vzduchu generuje dmychadlo umístěné v kořenové části ocasního tubusu. Tento systém je použit na typech MD520N, větší verzi MD600N a osmimístné verzi MD Explorer. Výhody tohoto systému spočívají ve výrazně nižší hlučnosti a odolnosti proti zásahu cizími předměty. Tyto výhody jsou ovšem zastíněny výrazným zhoršením letových vlastností, vyšší hmotností a výrazně vyšších nákladů na údržbu z důvodu složitosti konstrukce. [18, s. 91-92]

2.7.3 Reaktivní pohon rotoru

S vývojem vrtulníků vznikly i další experimentální koncepce u kterých reakční moment nevznikal. Byly to stroje, které spadají do kategorie vrtulníků s reaktivním pohonem hlavního rotoru. Princip byl v umístění pohonu na konec listů nosného rotoru. První skupina využívala pro pohon reakčního účinku vzduchu nebo jiného plynu. Listy takového vrtulníku jsou duté a dutinou je přiveden stlačený vzduch od pohonné jednotky nebo jiného systému umístěného v trupu. Na koncích dutých listů stlačený plyn procházel tryskou a reakční účinek plynu tak poháněl rotor. Jelikož systém pracuje se stlačeným vzduchem, dochází tak obrovským tepelným a hydraulickým ztrátám.

Druhá koncepce reaktivního pohonu hlavního rotoru je umístění pohonných jednotek přímo na konce listů rotoru. Listy byly také duté, ovšem zejména za účelem přívodu pohonných hmot do motorů. Jako nejvhodnější bývají označovány motory raketové, pulsační a náporové. Ne každý motor je totiž schopen pracovat spolehlivě při tak vysokých odstředivých silách jaké jsou na koncích listů.

Tyto koncepce nabízely možnost využití různých typů pohonu. Generování stlačeného vzduchu může být zajištěno širokou škálou pohonných jednotek. Ztráty spojené s vedením stlačeného vzduchu poměrně dlouhou cestou a katastrofální následky v případě nouzových situací přispěly k tomu, že se tyto konstrukce i přes jejich poměrnou konstrukční jednoduchost nedostaly přes úroveň experimentálního modelu. [7, s. 11-16]

3 POROVNÁNÍ SYSTÉMŮ KONVENČNÍHO VR A FENESTRONU

V další části této práce se zaměříme na porovnání systémů vyvažování reakčního momentu konvenčního ocasního rotoru a Fenestronu. Každý z těchto systémů, byť jejich funkce je totožná, má své konstrukční a výkonnostní kompromisy. Ty nejpodstatnější rozdílnosti budou rozebrány v následujících kapitolách.

3.1 Vrtulníky použité k porovnání

Teoretické kalkulace výkonností a účinností rotujících součástí, stejně jako počítačové aerodynamické analýzy, vnášejí jistou míru nepřesností a často neodpovídají praktickým poznatkům. Navíc jejich náročnost značně přesahuje rozsah bakalářské práce. Nejlepším způsobem, jak tedy demonstrovat vliv rozdílných systémů na výkonnost vrtulníku bude srovnání letových parametrů podobných typů vrtulníků s odlišnými koncepcemi ocasních rotorů.

3.1.1 Robinson R22 a Cabri G2

Pro srovnání výkonnosti použijí vrtulníky Robinson R22 s konvenčním ocasním rotorem a vrtulník Guimbal Cabri G2 s Fenestronem. Tito dva zástupci lehkých dvoumístných vrtulníků se vyjma rozdílných systémů vyrovnávání reakčního momentu liší také typem rotorové hlavy. Zatímco Robinson R22 disponuje dvoulistým polotuhým hlavním rotorem, Cabri G2 je osazen třílistým volně uloženým kompozitovým hlavním rotorem. Je tedy třeba mít na paměti, že typ ocasního rotoru nemusí nutně být jediným faktorem, který může ovlivnit jednotlivé parametry. Srdce obou vrtulníků tvoří vzduchem chlazený čtyřválcový boxer Textron Lycoming O-360-J2A o výkonu 180 HP. U R22 je výkon motoru omezen na 132 HP, u G2 na 160 HP (pětiminutový režim). Jelikož tyto vrtulníky disponují stejným motorem o podobném výkonu, dá se očekávat, že volba vyššího počtu listů hlavního rotoru bude především z důvodu požadavku na nižší hlučnost, a nikoliv potřebě přenosu vyššího výkonu na hlavní rotor, jak tomu bývá u větších, výkonnějších typů vrtulníků. Toto tvrzení podporuje i fakt že G2 má s třílistým uspořádáním o 47 centimetrů menší průměr hlavního rotoru než R22. R22 i G2 mají téměř shodné rozmezí provozních otáček hlavního rotoru a sice 515–530 (540 u G2) otáček za minutu. Konce listů Cabri G2 tak při stejných otáčkách hlavního rotoru dosahují menší obvodové rychlosti. Kombinace třílistého rotoru společně s Fenestronem dělá z Cabri G2 jeden z nejtišších lehkých vrtulníků dnešní doby. [21][22][29]



Obrázek 9 Vrtulník Robinson R22 s dvoulistým ocasním rotorem [21]



Obrázek 10 Vrtulník Cabri G2 s Fenestronem [30]

3.1.2 Eurocopter EC 145 T1 a EC 145 T2

Jako další dva typy, které poslouží pro srovnání výkonnosti budou využity typy EC145 (BK 117 C-2) a jeho novější verze EC145 T2 (BK 117 D-2). EC 145 a E145 T2 jsou víceúčelové dvoumotorové lehké vrtulníky. Vývoj těchto typů byl započat ve spolupráci německé společnosti Messerschmitt-Bölkow-Blohm (MBB) a japonské společnosti Kawasaki. Výsledkem této spolupráce je lehký víceúčelový vrtulník BK 117, který byl uveden na trh roku 1982. Společnost MBB se později stala součástí Eurocopter a novou verzí BK 117 C-2 tak známe již pod označením EC 145. EC 145 vznikla kombinací prvků BK 117 a EC 135. Je poháněna dvěma turbohřídelovými motory Turbomeca Arriel 1E2 o výkonu 738 shp. Hlavní rotor je typu Bölkow, tedy tuhý čtyřlístý. Později byl rotor nahrazen čtyřlístým volně uloženým rotorem, který byl plně zpětně zaměnitelný se starším typem rotoru. Ocasní rotor je dvoulistý o průměru 1,96 m umístěný na vrcholu vertikálního stabilizátoru. Pracovní prostor ocasního rotoru je tak vyzdvižen necelé dva metry nad zem. V průběhu vývoje typu EC145 T2 došlo opět ke změně názvu výrobce a z Eurocopter se stal Airbus Helicopters. Typ T2 tak již nese označení H 145 (BK 117 D-2). Pro účely této práce bude používáno označení EC 145 T2. Oproti EC 145 je EC 145 T2 poháněn silnějšími motory Turbomeca Arriel 2E o výkonu 894 shp a je osazen pětilístým volně uloženým rotorem. Místo ocasního rotoru je vybaven desetilopátkovým Fenestronem o průměru 1,15 m implementovaným do vertikálního stabilizátoru. [23][24][25]



Obrázek 12 Vrtulník EC 145 T1 s dvoulistým ocasním rotorem na vrcholu svislého stabilizátoru [23, s. 46]



Obrázek 11 Vrtulník EC 145 T2 s Fenestronem [12]

4 LETOVÉ VÝKONY

Jedním z nejvýraznějších faktorů bezpečnosti je bezpochyby výkonnost vrtulníku. Létání na hranici výkonnosti vrtulníku přináší jistá rizika. Naopak přebytek výkonu vrtulníku nám dává větší kontrolu nad strojem, snižuje zatížení pilota a snižuje riziko nechtěného překročení provozních omezení. Ocasní rotor hraje v tomto odvětví výraznou roli, jelikož oba typy vyrovnávacích rotorů odebírají výkon motoru, který by jinak mohl být využit nosným rotorem. Nejvíce výkonu odebírají oba typy VR při visu, jelikož, jak jsme si již řekli v předešlých kapitolách, za dopředného letu vytváří velkou část vyvažovacího momentu svislý stabilizátor. To má za následek rozdílné hodnoty dostupů vrtulníku za visu a za dopředného pohybu. V následujících kapitolách si pomocí porovnání hodnot ukážeme, jakým způsobem ovlivňují rozdílné koncepce ocasního rotoru letové výkony vrtulníku.

4.1 Dostup

Udává se, že Fenestron na rozdíl od konvenčního ocasního rotoru vyžaduje více výkonu při pomalém letu, respektive při visení. Tato vlastnost se podepisuje především na statickém dostupě vrtulníku. Z tohoto důvodu jsou vrtulníky s Fenestronem méně vhodné pro lety s přistáním v horských oblastech a vyšších nadmořských výškách. Parametr dostupů IGE udává, v jaké výšce je vrtulník schopen visu s vlivem země nebo také s vlivem vzduchového polštáře. Parametr OGE pak udává dostup bez vlivu země. Z porovnání typů jsou tyto skutečnosti více zřejmé.

4.1.1 Dostup ve visu

Výkon Cabri G2 činí 160 koňských sil, zatímco Robinson R22 pouze 132 na pětiminutový režim. Přesto dosahuje R22 většího dostupů jak v přízemním efektu, tak mimo něj. Podobnou vlastnost můžeme zaznamenat i při porovnání typů EC 145 a EC 145 T2 kde je rozdíl výkonu ještě výraznější. EC 145 T2 s motory 2E nabízí výkon 894 koňských sil, slabší starší verze EC 145 s motory 1E2 o výkonu 738 koňských sil má i přes rozdíl 156 koní **vyšší statický dostup**. To vše i přes fakt že oba typy s Fenestronem mají rotor o více listech který je schopen přenášet více výkonu na hlavní rotor. [21][23][25][26]

Tabulka 1 Statický dostup OGE, IGE jednotlivých typů vrtulníků [21][23][25][26]

<u>Typ vrtulníku</u>	<u>Robinson R22</u>	<u>Cabri G2</u>	<u>EC 145 T1</u>	<u>EC 145 T2</u>
Hover ceiling IGE	9400 ft	7500 ft	12600 ft	12490 ft
Hover ceiling OGE	8000 ft	5000 ft	11300 lb	8955 ft

4.1.2 Dynamický dostup

Dynamický dostup udává, jak vysoko je schopen vrtulník vystoupat za dopředného pohybu bez vlivu země. Jako hranice dostupu je považován režim letu, kdy není letadlo schopno stoupat vyšší vertikální rychlostí než 1000 ft za minutu. Jak je znát z uvedených údajů, Cabri G2 i přes vyšší výkon ztrácí na dostupu 1500 ft. Naopak u EC 145 T2 je znát navýšení dynamického dostupu až o 2000 ft. Na dynamickém dostupu se tedy pravděpodobně podepsal především vyšší výkon motorů a dodání páteho listu na hlavní rotor. I přes tyto navýšení výkonu a počtu listů však T2 stále ztrácí na dostupu statickém. U Cabri však nadbytek výkonu nepřináší žádné zlepšení dostupu. [21][24][26]

Tabulka 2 Maximální provozní výšky jednotlivých typů vrtulníků [21][24][26]

Typ vrtulníku	R22	G2	EC 145 T1	EC 145 T2
Maximální provozní výška v ISA	14000 ft	12500 ft	18000 ft	20000 ft

4.2 Rychlost

Přesto, že Fenestron je označován za konfiguraci, která odebírá méně výkonu při dopředném letu a je označována jako konfigurace vhodná pro let vysokou rychlostí, u typu EC 145 T2 nemá výraznější vliv na maximální rychlost vrtulníku. Dá se očekávat, že svislý stabilizátor, který má u Fenestronu výrazně větší tloušťku profilu, bude zároveň klást větší odpor než u tenkých stabilizačních ploch konvenčních ocasních rotorů. Naopak úspora odporu nastává eliminací indukovaného odporu na koncích listů ocasního rotoru. [15, s. 9]

Cabri G2 nabízí oproti Robinsonu vyšší nepřekročitelnou rychlost o 24 KIAS. Krom Fenestronu však bude mít pravděpodobně výraznější vliv především kratší třílistý rotor, který má při stejných otáčkách menší obvodovou rychlost konců listů.

Tabulka 3 Nepřekročitelná rychlost (V_{ne}) [KIAS] [21][22][23][25]

Typ vrtulníku	R22	Cabri G2	EC 145 T1	EC 145 T2
V_{ne}	102 KIAS	126 KIAS	145 KIAS	143 KIAS

4.3 Prázdná hmotnost a MTOW

U typů s Fenestronem nacházíme zvýšení prázdné hmotnosti. Přestože je Cabri konstruována z větší části z kompozitových a odlehčených materiálů, oproti hliníkovému

Robinsonu váží o 30 kg více. Mezi EC 145 a EC 145 T2 pak došlo při přechodu na Fenestron k navýšení prázdné hmotnosti o téměř 130 kilogramů.

Tabulka 4 Hodnoty MTOW a prázdné hmotnosti jednotlivých typů vrtulníků [21][23][25][26]

Typ vrtulníku	Robinson R22	Cabri G2	EC 145 T1	EC 145 T2
MTOW	622 kg / 1370 lb	700 kg / 1543 lb	3585 kg / 7903 lb	3700 kg / 8157 lb
Prázdná hmotnost	400 Kg / 880 lb	430 kg / 945 lb	1792 kg / 3951 lb	1919 kg / 4231 lb

U hodnot MTOW nelze jednoznačně určit, jestli na ně má rozdílná koncepce ocasního rotoru výraznější vliv či nikoliv.

4.4 Shrnutí výkonnosti

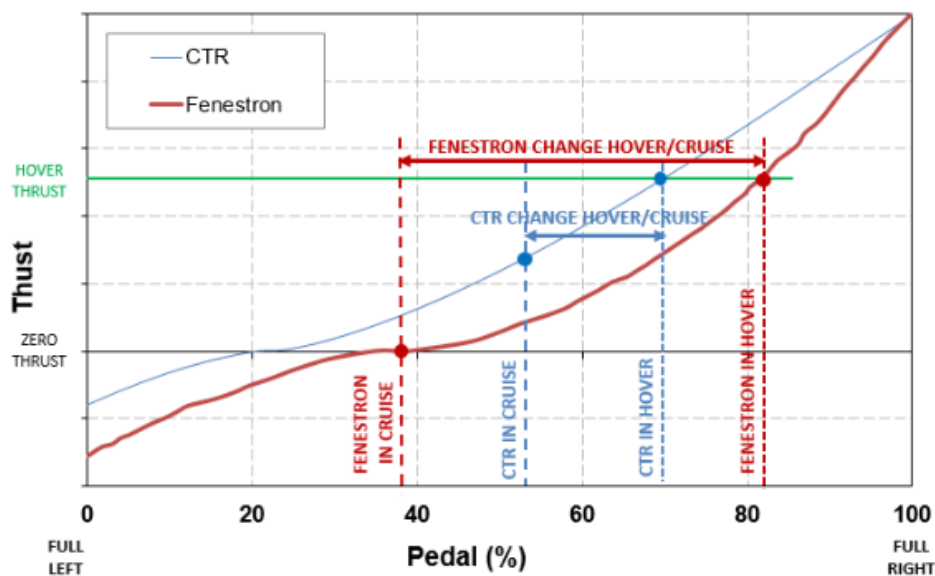
Z předešlých tabulek můžeme vyvodit následující závěry. Fenestron pravděpodobně nemá přímý vliv na maximální vzletovou hmotnost ani na maximální rychlost vrtulníku. Z dat je ale patrné, že u střední kategorie vrtulníků přináší změna typu vyrovnávacího rotoru navýšení prázdné hmotnosti o téměř 130 kg. Z předešlých hodnot vyplývá, že systém Fenestron má výrazný negativní účinek na dostup ve visu jak v s vlivem přízemního efektu, tak bez jeho vlivu, kde je rozdíl mnohem podstatnější. Tato vlastnost bude zásadní, pokud chceme využívat vrtulník v horských oblastech, kde je přebytek výkonu ve visu důležitým bezpečnostním prvkem. Pokud však nevyžadujeme po vrtulníku co nejvyšší dostup, nemusí nás jeho nižší hodnota výrazněji omezovat. Důležitý závěr tohoto porovnání je však potvrzení informace, že za visu **Fenestron skutečně vyžaduje více výkonu** než konvenční ocasní rotor. **Fenestron je tedy za visu méně účinný.**

5 OVLÁDÁNÍ

Co se týče ovládání i zde přináší odlišné koncepce rozdílné chování. Tato odlišnost má výrazný vliv na bezpečnost systému. Pilotům, kteří jsou zvyklí létat s konvenční koncepcí je doporučeno důkladně se seznámit s ovládáním nožního řízení u typu Fenestron. [27]

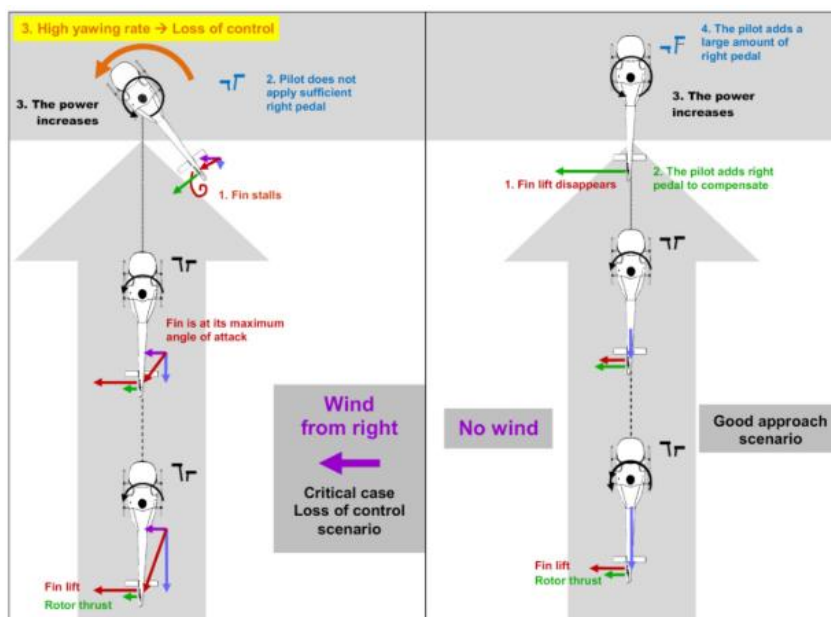
5.1 Nelinearita a rozdílné výchylky řízení

U klasické vrtulky roste tah vyrovnávacího rotoru s vyšlápnutím pedálu téměř lineárně. Značně vyšší nelinearita je znát v případě Fenestronu. Pilot pak může nabýt dojmu, že Fenestron „zabírá“ až v krajních výchylkách nožního řízení, nebo že je systém „tupý na nohy“. Nelinearita bude nejvíce znát v případě přiblížení na přistání kdy stroj pomalu vytrácí rychlost a účinnost vertikálního stabilizátoru se postupně snižuje. Pilot při tomto režimu zaznamená potřebu většího pohybu nožního řízení, než je tomu u konvenčního VR. Při vytrácení rychlosti dojde nakonec k odtržení proudění od vertikálního stabilizátoru. Vrtulník tak při určitých povětrnostních podmínkách bude mít tendenci skokově bočit vlevo. Jev, který způsobuje skokové odtržení proudění se vyskytuje i u konvenčního ocasního rotoru, ovšem u Fenestronu je mnohem znatelnější. Tato anomálie se stává nebezpečnou v případě, kdy pilot nemá dostatečné zkušenosti s daným typem ocasní koncepce a neprovede včasnou korekci nožním řízením. [28]



Obrázek 13 Rozsah pozic pedálů nožního řízení mezi dopředným letem a visem: porovnání Fenestron (červeně), konvenční VR (modře)[28]

Byly zaznamenány nehody vrtulníku Cabri G2 s Fenestronem, kdy při přiblížení s větrem zprava došlo ke ztrátě kontroly nad vrtulníkem a následné nehodě. Vrtulník pomalu vytrácel rychlost na přiblížení. Při postupném přechodu do visu u tohoto typu bylo potřeba postupně zvětšovat vyšlápnutí pravého pedálu pro korekci snahy vrtulníku točit vlevo. Na svislém stabilizátoru v případě pravého větru docházelo společně se snižováním rychlosti letu k postupnému zvyšování úhlu náběhu na profilu stabilizátoru. V momentě, kdy svislý stabilizátor přesáhl kritický úhel náběhu, ztratil stabilizátor skokově svou účinnost. Vrtulník začal prudce bočit vlevo na což pilot nezareagoval včas a došlo k přechodu vrtulníku do levé rotace. Následná snaha přerušit přistání zdvižením kolektivního řízení vytvořila větší reakční moment a tím pádem větší nároky na výkon vyrovnávacího rotoru. Tím se levotočivá rotace ještě více umocnila a došlo k úplné ztrátě kontroly nad vrtulníkem s následným nárazem do země. K podobným případům docházelo například i na typech EC 120. Airbus kvůli desítkám podobných případů, včetně těch smrtelných, vydal Information Notice², který na tento jev upozorňuje. Tento dokument platí pro všechny typy vrtulníků opatřených Fenestronem. [27]



Obrázek 14 Scénáře přiblížení: vlevo kritický případ přiblížení s větrem zprava bez správné reakce, vpravo správně provedené přiblížení bez vlivu větru [27]

Z výsledků závěrečné zprávy vyplývá, že za těmito nehodami stála nezkušenost pilotů se systémem Fenestron. Fenestron má obecně pomalejší reakci než konvenční ocasní rotor. Ovládání směru vyžaduje více pohybu v řízení, to může piloty konvenčních uspořádání

² Information Notice je dokument nejčastěji vydávaný výrobcem, který má za úkol rozšířit kritické informace mezi majitele letadel, uživatele letadel a letecké organizace. Nejčastěji informuje o změnách v předpisech, bezpečnostních doporučeních nebo technických a provozních změnách.

překvapit. Klíčové je započít výchylku řízení před, nebo přesně v moment, kdy je výchylka potřeba a počítat s tím, že bude třeba výrazně větší výchylky. Leteckým školám a instruktorům je doporučeno klást důraz na tento fenomén při výcviku pilotů. [27]

Zarážející v tomto případě je fakt, že tato situace vzniká za povětrnostních podmínek, které by za normálních okolností měly pilotovi napomáhat, jelikož vítr zprava v případě stroje s pravotočivým nosným rotorem vyvíjí při visu na ocasní stabilizátor sílu ve shodném směru jako je směr tahu vyrovnávacího rotoru. Tím snižuje míru potřebného výkonu. Problematický je tedy moment kdy tato síla skokově přestane pomáhat.

5.2 Pokles otáček hlavního rotoru

Jak jsme si již řekli v předešlých kapitolách, Fenestron má výrazně vyšší otáčky oproti vrtulce. Otáčky hlavního a ocasního rotoru jsou pevně propojeny hřídelemi o konstantním převodovém poměru. Tah ocasního rotoru se při poklesu otáček exponenciálně snižuje. Při nouzových situacích, kdy dojde k poklesu otáček hlavního rotoru o 10 %, tak pokles účinnosti Fenestronu bude výrazně větší a zároveň více skokový než u konvenčního ocasního rotoru.

Tabulka 5 Pokles otáček vyrovnávacího rotoru [24][29][30]

Typ vrtulníku	EC 145	EC 145 T2	Robinson R22	Cabri G2
Otáčky ocasního rotoru [ot/min]	2169	3177	3396	5148
Otáčky VR při poklesu ot. o 10 % [ot/min]	1952	2859	3056	4633
Rozdíl otáček [ot/min]	217	318	340	515

5.3 Ztráta efektivity ocasního rotoru (LTE)

Fenestron je méně náchylný na tvorbu stavu vírového prstence na ocasním rotoru. Je tak nižší šance vzniku jevu LTE (Loss of Tail rotor Effectiveness) neboli ztráta účinnosti ocasního rotoru a následné ztráty kontroly nad vrtulníkem. To však neznamená, že je vůči tomuto jevu imunní.

5.4 Shrnutí ovladatelnosti

Piloti vrtulníků, zejména ti zkušení v létání s konvenčními ocasními rotory, se musí řádně seznámit s odlišnostmi řízení strojů opatřených Fenestronem. U Fenestronu musí pilot více předvídat aerodynamické a environmentální výkyvy vrtulníku a být připraven aplikovat velké a energické výchylky nožního řízení. Výchylky nožního řízení mají za běžného letu u Fenestronu mnohem větší rozsah, než je tomu u řízení konvenčního VR. Většina nehod na tento způsob vznikla z důvodu neinformovanosti pilotů o tomto fenoménu. Ti pak nereagovali adekvátně na vzniklou situaci a došlo k nehodě. Obecně tedy můžeme dodat, že Fenestron je náročnější na ovládání při bočním větru. Tato kapitola tak částečně podporuje tvrzení o **nižší účinnosti Fenestronu za visu**.

6 BEZPEČNOST

Každý letový provoz s sebou nese určitá bezpečnostní rizika. Cílem leteckých předpisů je taková rizika buď úplně odstranit nebo minimalizovat do jejich přípustné míry. Díky těmto tendencím je letecká doprava statisticky nejbezpečnějším způsobem dopravy.

Bezpečnost můžeme pro účely této práce rozdělit z několika hledisek:

1. Bezpečnost letová – výkonnost vrtulníku jako prvek aktivní bezpečnosti
2. Bezpečnost pozemní – bezpečnost z hlediska okolí vrtulníku

Letová bezpečnost je rozebrána v kapitole 4 o letových výkonech. Pozemní bezpečnost zahrnuje opatření pro zvýšení bezpečnosti při činnostech v malých výškách a na zemi, zároveň je její součástí bezpečnost pro pozemní personál.

6.1 Bezpečnost pozemního personálu

Hlavní a vyrovnávací rotory vrtulníku představují zdaleka největší riziko pro pozemní personál pohybující se kolem spuštěného stroje. Lidské oko nedokáže plně zpracovat rychlý rotační pohyb listů. To má za následek, že rychle se pohybující plochy za zhoršených světelných podmínek nedosahují dostatečného kontrastu s okolím a je tak snadné je přehlédnout. Přiblížení se k vrtulníku bez řádného proškolení se tak stává kritickým bezpečnostním rizikem, které může vést k vážnému zranění či smrti.

Pro zvýšení bezpečnosti byly podniknuty kroky za účelem zvýšení kontrastu listů za pohybu. Listy rotorů jsou z tohoto důvodu často pruhované, s kombinací barev bílé, černé, červené a žluté. To výrazně přispívá ke zviditelnění rotoru při rotaci. Totéž platí pro rotory vyrovnávací. Vyrovnávací rotory jsou často opatřeny i bezpečnostním „zábradlím“. Jedná se především o drobné nenosné konstrukce výrazných kontrastních barev, které mají za účel vizuálně znepřístupnit okolí ocasního rotoru a zabránit tak pokusům o podlezení ocasního nosníku. Dále je okolí ocasních rotorů opatřeno kontrastními nápisy upozorňující na nebezpečí.

[31]

U konvenčních ocasních rotorů je další možností, jak zvýšit bezpečnost pohybu v okolí vrtulníku umístit ocasní rotor do vyšší úrovně od země. Vyrovnávací rotor tak můžeme často nalézt umístěn na vrcholu svislého stabilizátoru. Tuto koncepci zastává EC145, kde se pracovní prostor nachází necelé dva metry nad úrovní země. U tohoto typu je navíc před úrovní pracovního prostoru ocasního rotoru umístěn vodorovný stabilizátor. Riziko nechtěného vstupu do blízkosti rotoru je tak sníženo na minimum. Toto provedení zároveň zvyšuje bezpečnost při

přistání do nerovného terénu a snižuje nebezpečí kontaktu vyrovnávacího rotoru se zemí. Velmi oblíbené je toto konstrukční řešení u armádních vrtulníků. Nalezneme jej například na typech UH-60, AH-64, Mi-24 a většině dalších strojů z produkce sovětské konstrukční kanceláře Mil.

Zvýšení bezpečnosti pro personál obsluhující vrtulník je jedním z primárních důvodů vzniku Fenestronu. Fenestron oproti konvenčnímu rotoru v odvětví bezpečnosti v několika aspektech vyniká. Uzavřený prstenec vytváří velmi výraznou vizuální i fyzickou bariéru a zabraňuje tak nebezpečným situacím, kdy se člen pozemního personálu nebezpečně přiblíží k vyrovnávacímu rotoru. [31]

6.2 Kolize za letu

Oproti konvenčním VR je Fenestron lépe chráněn za letu např. před zásahem ptákem nebo před drobným kontaktem s vegetací. Dále je odolný v případě přistání do nerovného terénu a drobném kontaktu se zemí. Co se týče konvenčního VR, ten je chráněn před kontaktem VR se zemí výraznou ostruhou na konci ocasního nosníku. Při letu v prašném nebo kamenitém prostředí má Fenestron díky menšímu průměru, vyšším otáčkám a většímu usměrnění proudu vzduchu větší možnost nasátí nečistot a jejich následné urychlení skrz prstenec Fenestronu. To může být potenciálně nebezpečné pro osoby po stranách vrtulníku.

6.3 Tvrdé přistání

V případě tvrdého přistání je Fenestron méně odolný než konvenční VR. Důvodem je jeho větší hmotnost, zároveň tedy i vyšší setrvačnost která v případě nárazu tvoří výrazně větší namáhání u kořene ocasního nosníku. V Čechách je zaznamenána nehoda vrtulníku EC 135 s Fenestronem. Při tvrdém přistání došlo vlivem nárazu krom kolapsu ližin také k odlomení ocasního nosníku.



Obrázek 15 Následky tvrdého přistání EC 135[32]

6.4 Shrnutí

Co se týče bezpečnosti pro pozemní personál, je bezpečnějším řešením použití Fenestronu. Pokud však pohyb v prostorách s vyšším pohybem osob není naší prioritou, použití typu vrtulníku s ocasním rotorem usazeným ve vyšší poloze nad úrovní výšky osob dokáže většinou nahradit tuto funkci Fenestronu. Pokud hledáme bezpečnost s ohledem na omezení kolize rotoru s okolními předměty, může se Fenestron jevit jako lepší varianta. Hlavní rotor, jehož konce se pohybují v těsné blízkosti svislého stabilizátoru, však proti kolizím s překážkami odolný není. Fenestron je tak odolný například vůči drobnému kontaktu s vegetací, proti větším kolizím však nemůžeme očekávat vysokou míru ochrany. Jak Fenestron tak konvenční VR mají jistou míru ochrany ocasního rotoru před kontaktem se zemí. Za dopředného letu je Fenestron dobře chráněn proti např. ptákům či předmětům vypadlých z kabiny. K těmto situacím však dochází zřídka, navíc se cizí předmět musí dostat přes tělo vrtulníku a hlavní rotor, aby byl schopen zasáhnout ocasní rotor.

7 HLUKOVÉ ZATÍŽENÍ

S rozvojem civilního letectví začaly být více patrné vlivy letadel na životní prostředí. Nejvýraznějším vlivem, který se nejvíce dotýká zejména městských oblastí, je především hlučnost letadel, a to včetně vrtulníků. Hlukové zatížení ve městech výrazně snižuje kvalitu života obyvatel, kterým může hluk způsobit narušení spánku. V přírodě pak hluk letadel narušuje chování a komunikaci zvířat což může vést až k jejich úhynu. Dále pak hluk vrtulníku snižuje komfort osob na jeho palubě a může mít negativní dopady na psychiku a soustředění pilota.

Vliv letadel na životní prostředí zpracovává první část dodatku 16 předpisů ICAO. Předpis byl přijat v roce 1971. Od svého prvního vydání byl Dodatek 16 několikrát revidován a aktualizován, aby zahrnoval nové technologické a vědecké poznatky a přizpůsoboval se měnícím se požadavkům na ochranu životního prostředí v leteckém průmyslu. To má za důsledek postupné zpřísnování požadavků na hlučnost jednotlivých letadel. Hlukový certifikát je tedy často podmínkou pro certifikaci letadla a jeho provoz v mnoha jurisdikcích. Bez tohoto certifikátu letadlo může čelit omezením, nebo může být vyloučeno z provozu na některých letištích, zejména ve vysoce regulovaných oblastech s přísnými hlukovými předpisy.

7.1 Vznik hluku

Hluk u vrtulníků má několik zdrojů, které lze rozdělit do následujících kategorií:

1) Hluk od hlavního rotoru

- Hlavní zdroj hluku u vrtulníků.
- Vzniká prouděním vzduchu kolem profilu listu. Vyšší obvodová rychlost listu má za následek vyšší hlučnost rotoru.
- Hluk generovaný od vírů vznikajících na koncích listů. Při kontaktu listu s víry generovanými předchozím listem vzniká impulsní hluk známý jako Blade-Vortex interaction (BVI)

2) Hluk od ocasního rotoru

- Druhá nejvýraznější příčina hluku vrtulníku
- Vzniká za stejných příčin jako hluk od hlavního rotoru

3) Hluk od pohonné jednotky

- Vzniká v důsledku procesu spalování a mechanických vibrací od pohybu pohyblivých částí motoru.

4) Aerodynamický hluk

- Hluk způsobený kontaktem proudu vzduchu s trupem vrtulníku. Aerodynamická čistota trupu výrazně snižuje hlučnost.

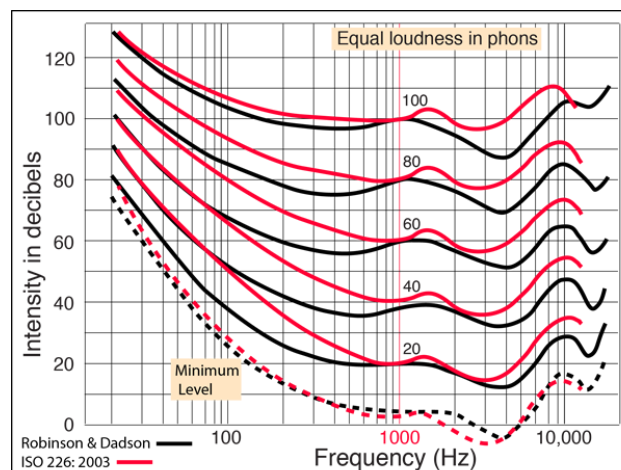
5) Hluk interakce rotoru a trupu

- Vzniká, když proudění vzduchu od hlavního rotoru narazí na různé části trupu vrtulníku, což může způsobit dodatečné vibrace a emise zvuku.

[33]

7.2 Vnímání hluku

Lidské ucho je schopné vnímat frekvenční rozmezí přibližně od 16 Hz do 20 kHz. Vnímání hlasitosti zvuku se liší v závislosti na frekvenci zvuku. Z následujícího grafu (ČSN ISO 226) můžeme vyčíst, že lidské ucho je nejcitlivější na frekvence v rozmezí 2500–4000 Hz. Toto rozmezí přibližně odpovídá lidské řeči. Méně citlivé je pak na frekvence u spodní hranice frekvenčního spektra. [34]



Obrázek 16 Normované křivky stejné hlasitosti [34]

7.3 Snižování hladiny hluku

Pokud chceme snížit hladinu hluku, máme několik možností. Můžeme se zaměřit na snížení příčin hluku a redukovat amplitudu vibrací. Další možností je rozložení zvukových frekvencí napříč sluchovým spektrem, případně posun frekvencí do oblastí, které lidské ucho vnímá méně citlivě.

Snižování příčin hluku a amplitudy vibrací dosáhneme odstraněním mechanického tření, redukcí rezonancí a zvýšením aerodynamické čistoty vrtulníku. Snižování úrovně hluku na

rotorech jak vyrovnávacích, tak hlavních jsme schopni docílit optimalizací profilu listu, zvýšením aerodynamické čistoty a úpravou konce listu. Tím jsme schopni snížit koncové víry na jejich koncích a následující kontakt s víry od hlavního rotoru případně trupem vrtulníku. Kompozitové materiály jsou schopny lépe tlumit vibrace oproti kovovým listům. Jejich použití také přispívá ke snížení úrovně hluku. Dvojitě zahnuté listy pak pomáhají rozložit frekvenční spektrum, mají tedy podobný efekt jako fázová modulace Fenestronových lopatek. Klíčové je také správné vyvážení jednotlivých listů. Hluk od pohonné jednotky může být eliminován například umístěním výfuků. Tak je tomu například u Cabri, která má výfuk vyveden směrem vzhůru. V praxi se aplikují postupy pro letové režimy pro nižší hlučnost. U vrtulníků najdeme postupy, které například snižují rázy (BVI) tvořené od hlavního rotoru při určitých letových režimech.

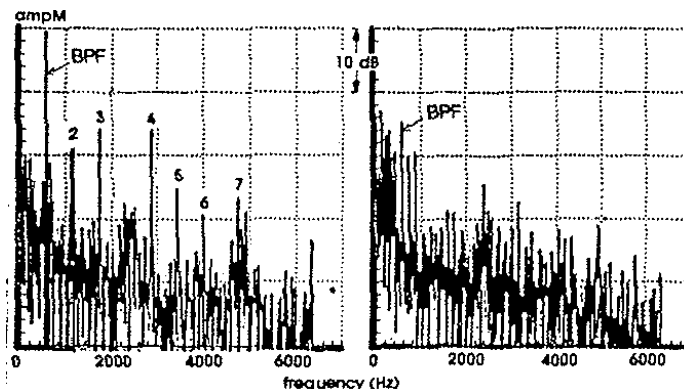
7.4 Měření hluku

Pro hodnocení hluku letadel jsou používány metriky SEL (Sound Exposure Level) a EPNL (Effective Perceived Noise Level). Tyto metriky sjednocují pravidla pro měření hluku letadel. Získání hlukového certifikátu vycházejícího z hodnot EPNL je dnes součástí procesu certifikace letadel.

7.5 Fázová modulace lopatek/listů

Jedna z největších předností fenestronu oproti konvenčnímu ocasnímu rotoru je právě jeho nižší hlučnost. Fenestron má zpravidla více lopatek o menší hloubce profilu a vyšší otáčky. To způsobuje posun frekvencí hluku do vyšších frekvenčních hladin, kde je hluk vnímán méně intenzivně. Podíváme-li se na fenestron vrtulníku EC 145 T2, zjistíme, že lopatky jsou nesymetricky uspořádány neboli fázově modulovány. Nesymetrické uspořádání lopatek pomáhá eliminovat rezonance v samotném ventilátoru a vyhlazuje tak tzv. spektrální píky na spektru frekvencí. Tím je docíleno snížení míry intenzity hluku. Obrázek vlevo znázorňuje spektrum hluku Fenestronu bez fázové modulace, napravo s fázovou modulací, při hodnotách

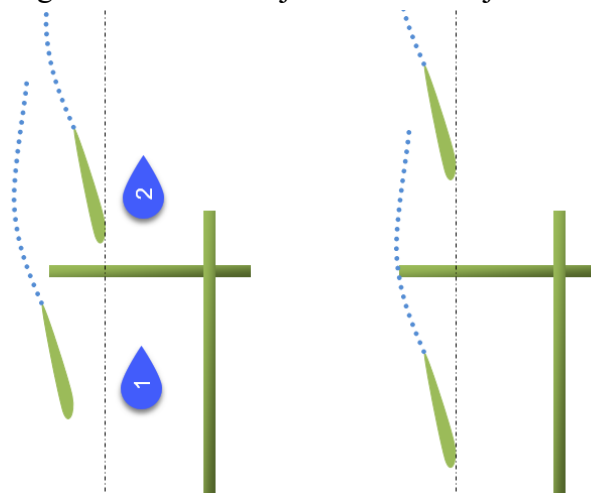
tahu odpovídajících visu. Konkrétně u typu EC 145 T2 je uspořádání lopatek 4-1-4-1, tedy 4 lopatky se stejným rozmístěním a jedna s odlišným. [35]



Obrázek 17 Účinek fázové modulace lopatek Fenestronu při nominálním výkonu odpovídajícím visu [36]

Dalším aspektem, který přispívá k nižší hlučnosti Fenestronu je částečné odstranění vírů na koncích listů rotoru díky těsnému uložení lopatek v prstenci stabilizátoru. Víry tak nemohou dále kolidovat s víry od hlavního rotoru nebo konstrukcí vrtulníku a nevzniká tak jev BVI (Blade vortex interaction) mezi hlavním a vyrovnávacím rotorem. Zároveň je eliminován indukovaný odpor na koncích lopatek.

Fázovou modulaci vyrovnávacího rotoru najdeme i mezi konvenčními VR. Jedná se o čtyřlístové ocasní rotory s uspořádáním do tvaru „X“ často popisované jako neortogonální nebo nůžkové. Nalezneme je u typů Bell 429, AH-64 Apache nebo Mi-28. Vznikly za účelem snížení obvodové rychlosti listů a s tím spojenou hlučností rotoru. Aby bylo dosaženo stejného tahu rotoru při nižší obvodové rychlosti, byl ke dvoulistě uspořádanému rotoru přidán rotor druhý. Každá dvojice listů neortogonálních rotorů je umístěna v jiné rovině. Tím je snížena



Obrázek 18 Konfigurace listů ocasního rotoru, vlevo neortogonální rozložení, vpravo normální rozložení čtyřlístového rotoru [37]

interference proudění mezi listy, zvýšena účinnost a snížena hlučnost. Nejvýraznější redukce hluku je zaznamenána v rozmezí 600 Hz – 2000 Hz primárně při vyšších rychlostech. [36]

Neortogonální rozložení nabízí mírně sníženou hlučnost vyrovnávacího rotoru. V následující tabulce srovnáme velmi podobné typy Bell 429 s neortogonálním VR a Bell 427 s dvoulistým VR.

Tabulka 6 Vnější hlukové zatížení typů Bell 429 a Bell 427 [39] [40]

Vnější hluková zátěž EPNL(EPNdB)	Takeoff	Flyover	Approach
Bell 429 při 7000 lb	88.9	89.6	91.4
Bell 427 při 6550 lb	88.8	89.0	91.3

Na první pohled z tabulky vyplývá, že rozdíl v hluku je spíše negativní. Hlučnost vrtulníku však roste proporcionálně ku vzletové hmotnosti vlivem generování větších vírů od listů rotoru při větším zatížení rotoru. Musíme tedy vzít v potaz, že měření u Bellu 429 je při vzletové hmotnosti o 450 lb vyšší než u Bellu 427.



Obrázek 19 Neortogonální rozložení listů vyrovnávacího rotoru AH-64 Apache [37]

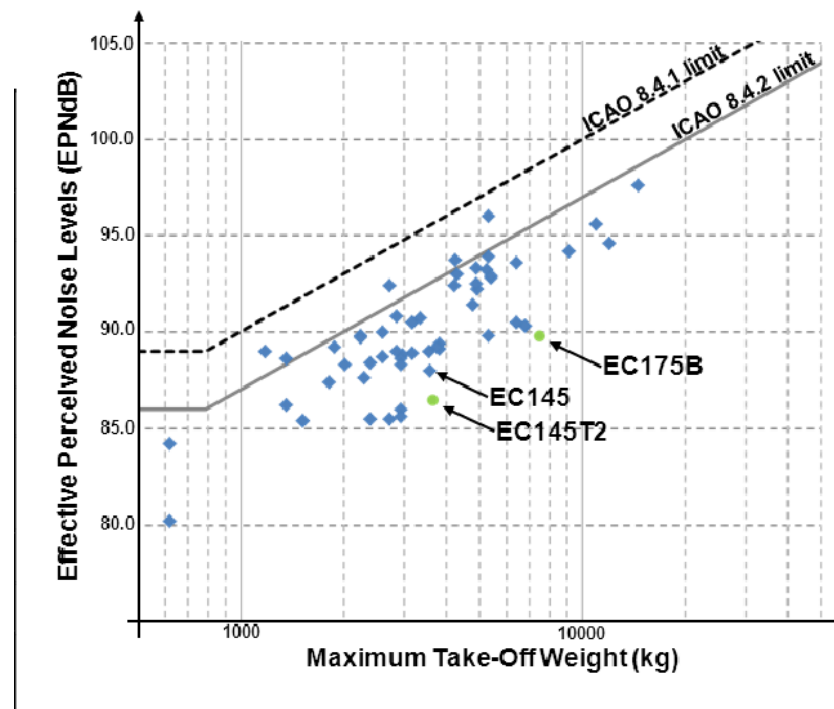
7.6 Porovnání hlučnosti Fenestronu a konvenčního vyrovnávacího rotoru

Porovnání hlučnosti je poměrně výrazné mezi Robinsonem a Cabri. Z porovnání je vidět rozdíl 3,2 dB což je úctyhodná eliminace hlučnosti oproti Robinsonu.

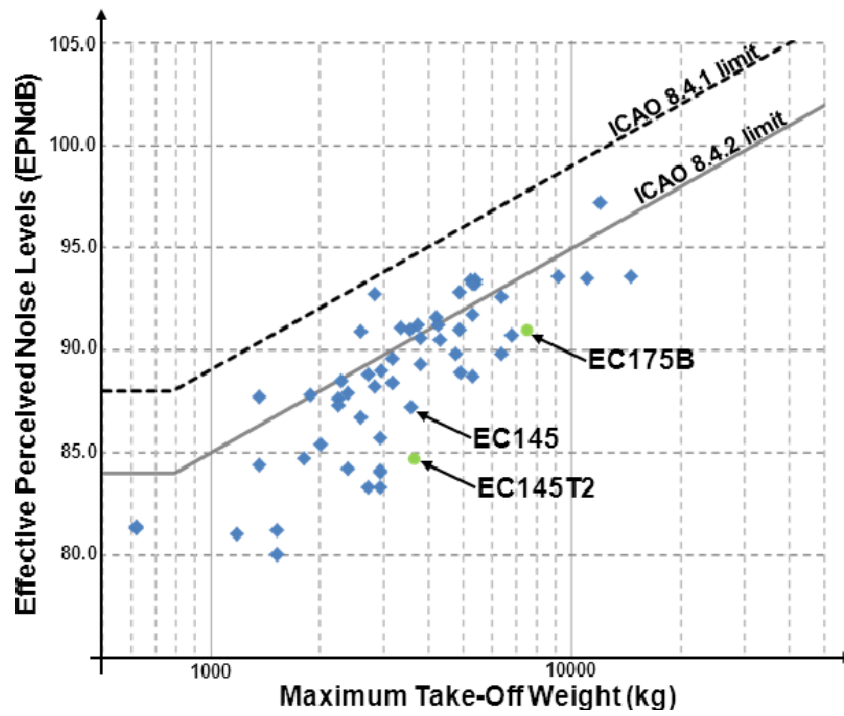
Tabulka 7 Vnější hlukové zatížení při přeletu Robinson R22 a Cabri G2 [26][41]

	Overflight EPNL (EPNdB)
Robinson R22	78.9 dB
Cabri G2	75,7 dB

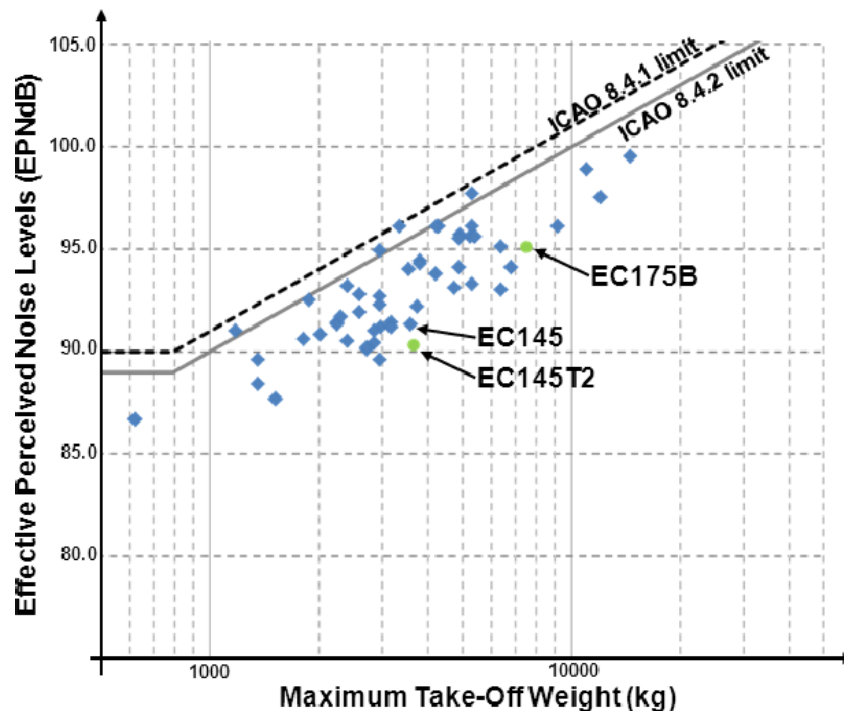
Co se týče typu EC 145 T1 a T2 přesné hodnoty hluku EPNL nejsou veřejně dostupné u obou typů vrtulníku. Přesného porovnání dosáhnout v současné době tedy nemůžeme. Můžeme však nahlédnout do několika dostupných grafů, které hlučnost jednotlivých typů znázorňují.



Obrázek 20 Tabulka úrovní hlukového zatížení při vzletu v závislosti na MTOW [38]

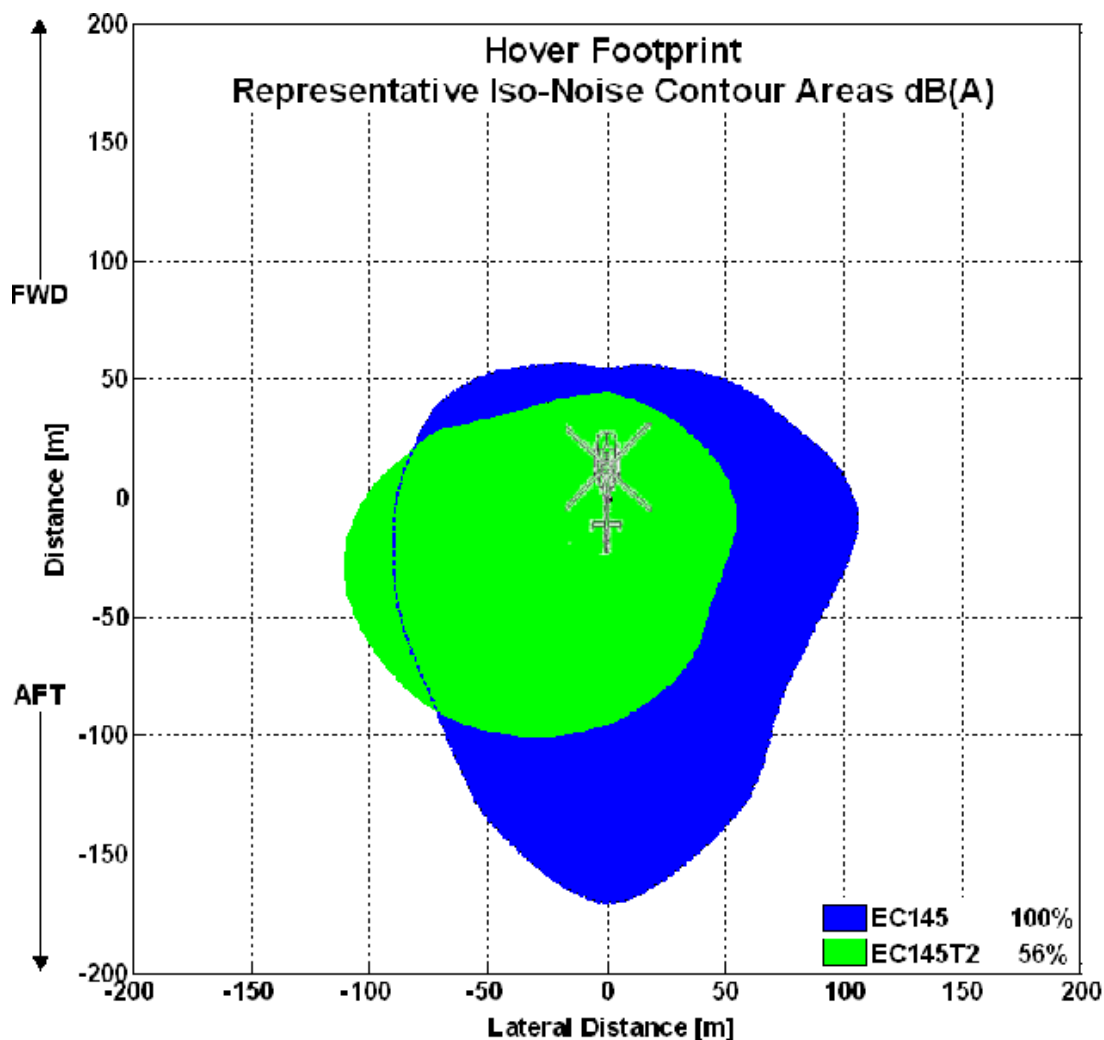


Obrázek 22 Tabulka úrovní hlukového zatížení při přeletu v závislosti na MTOW [38]



Obrázek 21 Tabulka úrovní hlukového zatížení při přiblížení v závislosti na MTOW [38]

Z grafů je i přes absenci konkrétních hodnot zřejmé, že hlučnost je skutečně u typu s Fenestronem výrazně nižší. Hodnoty hluku jsou blíže u sebe v případě úrovně hluku při přiblížení, ovšem stále s výrazným rozdílem ve prospěch Fenestronu.



Obrázek 23 Porovnání plochy nejvýraznějšího hlukového zatížení typů EC 145 T1 a EC 145 T2 při visu [38]

Z obrázku 19 vidíme výrazný pokles plochy nejvýraznějšího hlukového zatížení která je u typu s Fenestronem pouze 56 % z plochy zatížení typu s konvenčním ocasním rotorem.

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo porovnat systémy konvenčního ocasního rotoru vrtulníku a systému Fenestron.

Z rešerše na toto téma jsem ovšem nabýval pocitu, že majitel ochranné známky Fenestron vynakládá aktivní snahu podobným porovnáním předejít. Tato nepodložená informace vychází z dříve publikovaných materiálů o výkonnosti jednotlivých strojů, která v současné době nejsou k dispozici na stránkách výrobce, nebo nejsou běžně dostupné.

V první části bakalářské práce jsem shrnul počátky vrtulníkové techniky a jejich přirozený vývoj, který vedl ke vzniku konstrukčního řešení vyrovnávání reakčního momentu vrtulníku. Popsal jsem jeho následovný rozvoj a počáteční důvody, které vedly až ke vzniku systému Fenestron. Vyzdvihl jsem nejvýznamnější průkopníky vrtulníkového letectví ve světě i u nás. Část historického oddílu jsem věnoval panu Ing. Jaroslavu Šlechtovi a jeho konstrukční skupině. Jeho celoživotní dílo a významný podíl na rozvoji vrtulníkové dopravy v Československu si zasluhuje jeho připomenutí a ocenění. Při rešerši mě zarazilo jak malé množství informací a článků připomínajících odkaz tohoto geniálního Československého konstruktéra vzniklo.

Ve druhé části jsem podrobně rozepsal konstrukční řešení jednotlivých prvků ocasních rotorů a detailně popsal jejich funkci a varianty. Zmíněny byly i konstrukční řešení, které se neosvědčily v praxi a vysvětlil jsem důvody jejich neúspěchu. Dále jsem popsal různé materiály jednotlivých konstrukčních prvků vyrovnávacích rotorů a kompromisy využití jejich různých variant.

Třetí částí započalo porovnání systému konvenčního ocasního rotoru a Fenestronu. Z porovnání výkonnosti, bezpečnosti a vlivu na životní prostředí jsem vyvodil několik závěrů:

Fenestron jednoznačně odebírá více výkonu za visu. To má za následek nižší statický dostup vrtulníků opatřených Fenestronem. Tyto stroje tak nejsou vhodné pro lety s přistáním v horských oblastech, kde je rezerva výkonu za visu důležitým bezpečnostním faktorem.

Co se týče ovládání je Fenestron méně citlivý na výchyly nožního řízení. Znatelná je také nelinearita tahu s vyšlápnutím pedálu. Reakce nožního řízení je tak výraznější spíše v jeho krajních výchylných. Tyto vlastnosti jsou v kombinaci s určitými povětrnostními podmínkami potenciálně nebezpečné pro nezkušené piloty, kteří přechází z konvenčního VR na typ s Fenestronem.

V odvětví bezpečnosti pro pozemní personál je Fenestron o něco lepší variantou. Podobnou úroveň bezpečnosti však nabízí i umístění konvenčního vyrovnávacího rotoru na vrchol svislého stabilizátoru. Co se týče střetu s překážkami za letu, nabízí Fenestron také o trochu vyšší stupeň ochrany. Pro jistou míru kontaktu ocasní části se zemí za letu je díky pevné ostruže konvenční ocasní rotor srovnatelně zabezpečen jako Fenestron. Proti většímu nárazu však není spolehlivě odolná ani jedna z koncepcí.

Ačkoliv existují konstrukční řešení snižující úroveň hluku konvenčních VR, Fenestron je v tomto odvětví bezkonkurenční. Úroveň hluku vrtulníků opatřených Fenestronem je nižší v jakýchkoliv režimech letu a dlouhodobě se nachází hluboko pod úrovní stanovených hlukových limitů ICAO. Jejich tichý chod v kombinaci s odhlučněním pohonné jednotky a hlavního rotoru dělá z vrtulníků s Fenestronem vhodnější volbu pro časté lety blízko obydlených oblastí, přírodních rezervací nebo zemědělských lokalit.

Fenestron, ač disponuje řadou výhod, přináší také své nedostatky. Při výběru správného typu vrtulníku se musíme zaměřit na základní otázku: **Co od daného stroje požadujeme?** Hledáme-li vrtulník pro činnost nad městy s velkým pohybem pozemního personálu kolem vrtulníku, bude vrtulník s Fenestronem lepší volbou. Požadujeme-li však dostatek výkonu i ve vyšších nadmořských výškách, bude výhodnější sáhnout po stroji s konvenčním vyrovnávacím rotorem.

Věřím, že informace uvedené v této práci mají potenciál přispět k bezpečnosti vrtulníkového provozu nejen v České republice.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] FRANĚK, Ondřej. *Počet vzletů LZS dál roste a nikdo neví proč. Skokanem roku je Plzeň*. Online. ZACHRANNASLUZBA.cz. 2024. Dostupné z: <https://zachrannasluzba.cz/pocet-vzletu-lzs-dal-roste-a-nikdo-nevi-proc-skokanem-roku-je-plzen/>. [cit. 2024-06-21].
- [2] BOYNE, James W. *Helicopter*. Online. Encyclopedia Britannica. ©2024, May 31, 2024. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/helicopter>. [cit. 2024-06-21].
- [3] CLEGHORN, Debra. *Aviation History – First Helicopter Flight-November 13, 1907*. Online. Flight Journal. © 2024, November 30, 2017. Dostupné z: <https://www.flightjournal.com/today-1907-first-helicopter-flight/>. [cit. 2024-06-21].
- [4] *World's First Helicopter – Today in History: September 14*. Online. Connecticut History. 2021. Dostupné z: <https://connecticuthistory.org/worlds-first-helicopter-today-in-history/>. [cit. 2024-06-21].
- [5] SVĚCENÝ, Jindřich. *Letecký génius z Kyjeva Igor Ivanovič Sikorskij, konstruktér slavných vrtulníků a letadel*. Online. Armádní zpravodaj. 2022. Dostupné z: <https://armadnizpravodaj.cz/historie/letecky-genius-z-kyjeva-igor-ivanovic-sikorskij/>. [cit. 2024-06-21].
- [6] *Bell Helicopter*. Online. Helis.com. © 1997-2024. Dostupné z: <https://www.helis.com/timeline/bell.php>. [cit. 2024-06-21].
- [7] SVOBODA, Václav. *Vrtulníky*. Naše Vojsko, 1979. ISBN 28-010-79.
- [8] VIDO, Vladimír. *OK-AHC - Bell TAH-1P Cobra operated by HELI CZECH s.r.o.: taken by Vladimír Vido*. Online. In: Planephotos.net. 6 May 2019n. l. Dostupné z: https://www.planephotos.net/photo/18577/Bell-TAH-1P-Cobra_OK-AHC/. [cit. 2024-06-24].

- [9] *The Creative Work of Mil Moscow Helicopter Plant*. Online. Helis.com. © 1997-2024. Dostupné z: <https://www.helis.com/timeline/mil.php>. [cit. 2024-06-21].
- [10] *Konstrukce u výzkumáku se zaměřením na stroje s rotujícími křídly*. Online. Vrtulnik.cz. 2024. Dostupné z: <http://www.vrtulnik.cz/vyzkum.htm>. [cit. 2024-06-23].
- [11] *Historie konstrukce vrtulníků u nás (mimo VZLÚ)*. Online. Vrtulnik.cz. 2019. Dostupné z: <http://www.vrtulnik.cz/vyroba.htm>. [cit. 2024-06-23].
- [12] *Rega in brief*. Online. Rega.ch. © 2024. Dostupné z: <https://www.rega.ch/en/about-us/reg-a-in-brief#history>. [cit. 2024-06-21].
- [13] *Vrtulník Mil Mi-2, výr. č. 5311147060*. Online. In: Vhu.cz. ©2020. Dostupné z: <https://www.vhu.cz/exhibit/vrtulnik-mil-mi-2-vyr-c-5311147060/>. [cit. 2024-06-24].
- [14] *Historie Letecké služby pátrání a záchrany LSPZ a Letecké zdravotnické záchranné služby LZS (LZS) v Československu do převratu*. Online. Vrtulnik.cz. 2021. Dostupné z: <http://www.vrtulnik.cz/lzs/rescue1.htm>. [cit. 2024-06-21].
- [15] LAFARGUE, M. *The shrouded tail rotor "Fenestron". Paper No. 3*. Buckeburg, Federal Republic of Germany, 1976. Dostupné také z: <https://dspace-erf.nlr.nl/server/api/core/bitstreams/0d8de81c-0683-470a-9c57-51c48c4ad00c/content>.
- [16] AHCI-EZGI, Elif. *Evolution of Fenestron™ Development in terms of Safety, Design and Substantiation Characteristics*. Online. In: Research Gate. 2015. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/341671235_Evolution_of_Fenestron_Development_in_terms_of_Safety_Design_and_Substantiation_Characteristics. [cit. 2024-06-11].

- [17] *Newtonovy pohybové zákony*. Online. Onlineschool.cz. © 2023.
Dostupné z: <https://onlineschool.cz/fyzika/newtonovy-pohybove-zakony/>.
[cit. 2024-06-22].
- [18] NEŠTRÁK, Dušan a PÍLA, Ján. *Aerodynamika, konstrukce a systémy vrtulníků: studijní modul 12*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006.
ISBN 80-720-4484-2.
- [19] *Composite Tail Rotor Blades for Bell 206 JetRangers Fitted with New Bearings*. Online. Dakotaairparts.com. © 2020. Dostupné
z: <https://www.dakotaairparts.com/composite-tail-rotor-blades-bell-206-jetranger>. [cit. 2024-06-23].
- [20] AIRBUS. *Safety innovation #2: The Fenestron Airbus Helicopters' trademark and major safety enhancement*. Online. Airbus.com. 01 July 2022n. l. Dostupné z: <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2022-07-safety-innovation-2-the-fenestron>. [cit. 2024-06-24].
- [21] *R22 Beta II Helicopter*. Online. In: Shop.robinsonheli.com. C2022.
Dostupné z: <https://shop.robinsonheli.com/r22-beta-ii-helicopter/>. [cit. 2024-06-24].
- [22] *CABRI G2 Flight Manual*. Online. In: Cabri-usa.com. [2021]. Dostupné
z: <https://cabri-usa.com/wp-content/uploads/2018/03/J40-001-Issue-10.1-Cabri-G2-Flight-Manual.pdf>. [cit. 2024-06-24].
- [23] *Eurocopter EC 145 Technical Data*. Online. In: Helicoptermontage.fr.
©2006. Dostupné
z: http://www.helicomontage.fr/photosecour/DOC_EC145_data.pdf. [cit. 2024-06-24].
- [24] *Operational evaluation board report*. Online. In: Easa.europa.eu.
2014. Dostupné
z: [https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/EC145%20\(BK117\)_F](https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/EC145%20(BK117)_F)

- [amily-Draft%20Report_%2029%2004%2014%20-%20draft.pdf](#). [cit. 2024-06-24].
- [25] *H145 The newest Airbus Helicopters solution for today's most demanding operations*. Online. In: Helibras.com. ©2015. Dostupné z: https://www.helibras.com.br/website/docs_wsw/RUB_19/tile_90/H145-1_2016.pdf. [cit. 2024-06-24].
- [26] *Cabri G2*. Online. In: Guimbal.com. 2017. Dostupné z: <https://www.guimbal.com/downloads/brochure-2017.pdf>. [cit. 2024-06-24].
- [27] *CAA Safety Investigation Report Loss of control on approach ZK-IMZ Guimbal Cabri G2 Waikawa Beach 24 August 2017*. Online. In: Aviation.govt.nz. 2018. Dostupné z: <https://www.aviation.govt.nz/assets/publications/safety-investigation-reports/ZK-IMZ.pdf>. [cit. 2024-06-24].
- [28] *Information Notice No. 3539-I-00*. Online. In: Airbus.com. 2020. Dostupné z: <https://www.airbus.com/sites/g/files/jlcbta136/files/2021-10/3539-I-00-Rev-0-EN.pdf>. [cit. 2024-06-24].
- [29] *Robinson: R22 Beta II*. Online. In: Rotorcraft.info. ©2024. Dostupné z: <https://rotorcraft.info/fe/acft/150>. [cit. 2024-06-24].
- [30] *Guimbal: G2 Cabri*. Online. In: Rotorcraft.info. ©2024. Dostupné z: <https://rotorcraft.info/fe/acft/85>. [cit. 2024-06-24].
- [31] MASSON, Michel. *Avoiding Collisions with Rotor Blades*. Online. In: Easa.europa.eu. 20 February 2024n. l. Dostupné z: <https://www.easa.europa.eu/community/topics/avoiding-collisions-rotor-blades>. [cit. 2024-06-24].
- [32] *Eurocopter EC135T2*. Online. In: Planes.cz. 2011. Dostupné z: <https://www.planes.cz/cs/photo/1100297/eurocopter-ec135t2-ok-byd-policie-cr-slany-lksn>. [cit. 2024-06-24].

- [33] *Vrtulník a hluk*. Online. In: Vrtulnik.cz. 2006. Dostupné z: <http://www.vrtulnik.cz/teorie/hluk.htm>. [cit. 2024-06-24].
- [34] *Equal Loudness Curves*. Online. In: Hyperphysics.phy. [2003]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Sound/eqloud.html>. [cit. 2024-06-24].
- [35] *Why are the tail rotor blades unevenly spaced on the Eurocopter?* [@Rexrollo150]. Online. 2023. Dostupné z: Reddit, https://www.reddit.com/r/Helicopters/comments/178x991/why_are_the_tail_rotor_blades_unevenly_spaced_on/. [cit. 2024-06-24].
- [36] ARNAUD, G. *A NEW GENERATION OF FENESTRON FAN-IN-FIN TAIL ROTOR ON EC 135*. Online. In: . 2011. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-NEW-GENERATION-OF-FENESTRON-FAN-IN-FIN-TAIL-ROTOR-Arnaud/746fc38481005d7323b21d76f8cc746b1b2a8f39>. [cit. 2024-06-24].
- [37] *What are the benefits of a non-orthogonal (scissor) tail-rotor?* Online. Aviation.stackexchange.com. 2017. Dostupné z: <https://aviation.stackexchange.com/questions/43279/what-are-the-benefits-of-a-non-orthogonal-scissor-tail-rotor>. [cit. 2024-06-24].
- [38] GARETON, V.; GERVAIS, M. a HEGER, R. *Acoustic design and testing of the Eurocopter EC145T2 and EC175B: A harmonized Franco-German approach*. Online. In: Semanticscholar.org. 2013. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Acoustic-design-and-testing-of-the-Eurocopter-and-A-Gareton-Gervais/c0491b87209c96dbbfa898fd7d8b91bb7b4f46b1#citing-papers>. [cit. 2024-06-24].
- [39] *Type Acceptance Report: TAR 11/21B/29 BELL 427*. Online. In: Aviation.govt.nz. 2011. Dostupné

z: https://www.aviation.govt.nz/assets/aircraft/type-acceptance-reports/Bell_427.pdf. [cit. 2024-06-24].

- [40] *Bell 429 product specifications*. Online. Bellflight.com. JAN 2024.
Dostupné z: <https://www.bellflight.com/-/media/site-specific/bell-flight/documents/products/429/bell-429-product-specifications.pdf>. [cit. 2024-06-24].
- [41] *Robinson R44 POH: Section 5 - performance*. Online. In: Robinsonheli.com. 18 DEC 2015n. I. Dostupné z: https://robinsonheli.com/wp-content/uploads/2020/06/r44_poh_5.pdf. [cit. 2024-06-24].