



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
LETECKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

ROTORY VRTULNÍKŮ

HELICOPTER ROTORS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PETR BROŽEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. MILOSLAV PETRÁSEK, CSc

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Letecký ústav

Akademický rok: 2011/12

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Petr Brožek

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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:

Rotory vrtulníků

v anglickém jazyce:

Helicopter rotors

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Definujte vrtulník jako dopravní prostředek, charakterizujte jeho hlavní části, jejich funkci a v užší analýze se zaměřte na nosné a vyrovnávací rotory z hlediska typů, konstrukce a jejich předností a nedostatků.

Cíle bakalářské práce:

Stručný historický vývoj vrtulníků jako dopravního a bojového prostředku

Hlavní části vrtulníku a jejich funkce.

Úvod do aerodynamiky nosného rotoru v rozsahu nezbytném pro analýzu konstrukčního řešení.

Konstrukce nosných a vyrovnávacích rotorů soudobých vrtulníků s podrobnějším zhodnocením předností a nedostatků jednotlivých typů.

Seznam odborné literatury:

- [1] KULČÁK, L. a kol.: Aerodynamika, konstrukce a systémy vrtulníků, CERM, Brno, 2006
- [2] PETRÁSEK, M. Vrtulníky. Skriptum S-867, VAAZ Brno, 1997.
- [3] CAITHAML, R. Konstrukce vrtulníků. Skriptum S-2364, VAAZ Brno, 1971.
- [4] WATKINSON, J. The Art of the Helicopter. Elsevier Butterworth Heinemann, Great Britain, 2004, ISBN 0 7506 57154
- [5] MIL. M. L. a kol. Vertoljoty. Mašinstrijenje, Moskva, 1967.
- [6] MICHEEV, R.A. Pročnost vertoljotov. Mašinstrijenje, Moskva, 1984..
- [7] DALIN, V.N. a kol. Vertoljoty. Izdatělsto MAI, Moskva, 2001.
- [8] BOGDANOV, J.S. a kol. Kontrukcija vertoletov. Mašinstrojenje, Moskva, 1990. ISBN 5 217 01097 9.
- [9] Jeppesen: Helicopter Maintanance, Jeppesen, Frankfurt, Germany, 1980, 343 s.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Miloslav Petrásek, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/12.

V Brně, dne 21.11.2011



prof. Ing. Antonín Píštěk, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

Abstrakt

Bakalářská práce Rotory vrtulníků má několik cílů. Nastínit historický vývoj vrtulníku jako dopravního a bojového prostředku. Charakterizovat hlavní části vrtulníků s popisem plněných funkcí. Uvést do aerodynamiky rotorů. Vytvořit přehled nejčastěji používaných typů nosných rotorů a způsobů kompenzace reakčního momentu u soudobých vrtulníků a následně detailněji analyzovat základní části rotorů.

Klíčová slova

Vrtulník, rotor, nesymetrie tahu, mávání, kývání, křídélkování, kloubové rotory, rotory s pružnými členy, polotuhé rotory, tuhé rotory, ocasní rotory, fenestron, notar.

Abstract

The Bachelor thesis Helicopter rotors has several purposes. Delineate historical development of the helicopters as a vehicle and combat vehicle. Describe main parts and their roles in helicopter. Put into aerodynamics of the rotors. Create overview of the most commonly used types of the helicopter main rotors and anti-torque configurations for contemporary helicopters, followed by a more detailed analysis.

Key words

Helicopter, rotor, disymetry of the lift, flapping, lead – lag movement, feathering, fully articulated rotors, bearingless rotors, semirigid rotors, rigid rotors, tail rotors, fenestron, notar

Bibliografická citace

BROŽEK, P. *Rotory vrtulníků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 54 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Miloslav Petrásek, CSc.

Prohlášení autora o původnosti práce

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně a že pro tvorbu byly použity prameny, uvedené v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 23. 5. 2012

.....

Petr Brožek

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu doc. Ing. Miloslavu Petráskovi, CSc. za cenné rady a připomínky při tvorbě této bakalářské práce.

Obsah

1 Úvod	- 11 -
1.1 Definice vrtulníku	- 11 -
1.2 Definice vírníku	- 11 -
2 Historický vývoj vrtulníků jako dopravního a bojového prostředku	- 11 -
3 Typická kritéria rozdělení vrtulníků, hlavní části a jejich funkce	- 15 -
3.1 Typická kritéria rozdělení vrtulníků	- 15 -
3.1.1 Vzletová hmotnost	- 15 -
3.1.2 Účel, použití	- 15 -
3.1.3 Počet motorů	- 15 -
3.1.4 Uspořádání rotorů	- 15 -
3.2 Hlavní části jednorotorového vrtulníku	- 17 -
3.2.1 Drak	- 17 -
3.2.2 Hnací soustava	- 18 -
3.2.3 Výstroj	- 20 -
4 Úvod do aerodynamiky nosného rotoru	- 21 -
4.1 Nosný rotor při svislých letových režimech	- 21 -
4.1.1 Vliv vyrovnávacího rotoru	- 23 -
4.1.2 Svislé stoupání	- 23 -
4.1.3 Viseň	- 24 -
4.1.4 Svislé klesání	- 24 -
4.2 Nosný rotor při horizontálních letových režimech	- 26 -
4.2.1 Pohyby a obtékání listu nosného rotoru v závislosti na azimutálním úhlu	- 26 -
4.2.2 Náklon roviny rotorového disku	- 29 -
4.2.3 Zpětné obtékání listů	- 30 -
5 Základní přehled rotorů, rotorových hlav	- 30 -
5.1 Kloubové rotory	- 31 -
5.1.1 Tlumiče kývání	- 32 -
5.1.2 Dorazy	- 33 -
5.2 Rotory s pružnými členy	- 34 -
5.3 Polotuhé rotory	- 35 -
5.3.1 Rotor firmy Bell	- 35 -
5.3.2 Rotor Hiller	- 35 -
5.4 Tuhé rotory	- 36 -
5.5 Tlumiče vibrací	- 36 -
5.6 Rotorové listy	- 37 -
5.7 Mechanismy ovládání cyklického a kolektivního řízení nosných rotorů	- 40 -
5.7.1 Šikmá deska	- 40 -
5.7.2 Systém pavouk	- 41 -
5.7.3 Výstředníková deska	- 42 -
5.8 Vybraná netradiční konstrukční řešení nosných rotorů	- 42 -
5.8.1 Rotory vrtulníků Enstrom	- 42 -
5.8.2 Rotor Eurocopteru EC 135	- 43 -
5.8.3 Rotor firmy Lockheed	- 43 -

5.8.4	Jednolistý rotor.....	- 44 -
5.8.5	Rotory pro vysoké rychlosti	- 44 -
6	Vyrovnávací konfigurace – směrové řízení	- 45 -
6.1	Ocasní rotory	- 45 -
6.2	Fenestron.....	- 47 -
6.3	NOTAR.....	- 47 -
7	Závěr	- 48 -
8	Seznam použitých zdrojů.....	- 49 -
8.1	Seznam použité literatury	- 49 -
8.2	Seznam zdrojů ilustrací	- 51 -
9	Seznam použitých zkratek a symbolů	- 53 -

1 Úvod

Vrtulníky se v dnešní době staly nedílnou součástí našeho života. Slouží jako dopravní prostředky ať už v době míru, nebo v době válečných konfliktů. Zachraňují lidem život, a to i na takových místech, která by jinými prostředky byla dosažitelná jen s velkými obtížemi, či by nebyla dosažitelná vůbec. Existují speciálně upravené typy ve funkci létajících hasičů. Pomáhají s likvidací požáru nejen transportem hasičů k místu požáru, ale jsou schopny přímo svrhávat vodu s hasicími prostředky na oheň. Vrtulníky slouží i jako létající jeřáby, umožňující přenášet břemena těžká až 20 tun. Kromě výše uvedených činností mohou být vybaveny postřikovacím zařízením. Na rozdíl od letadel je možné postřiky provádět při menších rychlostech. Dosáhne se vyšší kvality ošetření. Existují speciální útočné vrtulníky, podporující vlastní jednotky proti nepřátelským vojákům, či proti obrněné technice ve válečných konfliktech.

Vrtulníky prošly dlouhým složitým vývojem. Je zajímavé, že v dnešní době se používá několika málo uspořádání rotorů. Dále je zajímavé, že všechny typy dnešních vrtulníků mají rotory, konstrukčně vycházející ze čtyř základních řešení, které nejlépe odolávají zvláštním aerodynamickým a mechanickým jevům vznikajících během letu.

1.1 Definice vrtulníku

„**Vrtulník, helikoptéra** - motorové rotorové letadlo, jehož nosný rotor (nosné rotory) s přibližně svislou osou otáčení je za letu poháněn motorem a tah potřebný k horizontálnímu letu je vyvozován složkou aerodynamické síly na nosném rotoru (nosných rotorech).“ (5, str.76)

1.2 Definice vírníku

„**Vírník** - rotorové letadlo, jehož rotory nejsou poháněny motorem s výjimkou počátečního roztáčení, ale jsou uváděny do rotace účinkem vzduchu při pohybu rotorového letadla a jehož pohonná soustava zahrnuje zpravidla běžné vrtule a je nezávislá na rotorové soustavě.“ (5, str.76)

2 Historický vývoj vrtulníků jako dopravního a bojového prostředku

Vrtulníky, jak je známe dnes, jsou výsledkem dlouhého vývoje, který započal již ve starověké Číně. Odtud pochází hračka tvořená bambusovou tyčinkou s pery na jednom konci. Jejím roztočením v dlaních pera produkovala vztlak a hračka létala. Podobné hračky lze koupit i dnes.



Obr. 2.2 Da Vinciho létající stroj [12]

Historicky zajímavé jsou nákresy renesančního génia Leonarda da Vinciho, na nichž je vidět stroj s otáčející se šroubovou nosnou plochou. Kolem roku 1754 se odehrál velký zlom v technologii vrtulníků. Michail Vasiljevič Lomonosov použil pro vynášení meteorologických přístrojů létající stroj s koaxiálním rotorem, jehož pohon zajišťovala pružina.

Další velké pokroky nastaly v průběhu 19. a 20. století. Byly nakresleny spousty návrhů strojů pro horizontální lety s kolmým startem a přistáním. Mnoho jich bylo i postaveno, přinejmenším jako modely. Velmi často také docházelo k objevům a vývoji podobných strojů na různých místech



Obr. 2.1 Moderní podoba čínské hračky [11]

prakticky současně. Vývoji strojů s rotující nosnou plochou se věnovali především v Evropě, Spojených státech amerických, v carském Rusku a později i v Sovětském svazu. Do tohoto období patří významná jména jako Sir George Cayley, nebo Ponton d'Amecourt. Ponton d'Amecourt je významný kromě návrhů a stavby různých modelů létajících aparátů i tím, že je nazýval *helicopteres*. Toto slovo má původ v řeckých slovech „helix“ znamenající spirálovitý a „pteron“ znamenající pero či křídlo.



Obr. 2.3 Model podle návrhu Sira George Cayleyho [13]

Pro někoho může být překvapivé, že problematikou vrtulníků se nějakou dobu zabýval i slavný vynálezce žárovky Thomas Alva Edison. Všechny projekty tohoto období musely být uskutečněny jako modely, především z jednoho důvodu. V této době totiž nebyla k dispozici dostatečně silná pohonná jednotka, která by umožnila let s pilotem. Skutečný rozmach letectví začal až po roce 1876, kdy byl vynalezen Ottův spalovací motor. Spalovací motory vhodné pro použití v letadlech této doby měly poměr hmotnost k výkonu přibližně 0,11 kW/kg. Pro rozvoj svisle startujících strojů, potažmo budoucích vrtulníků, bylo potřeba vyvinout motor, který by měl tento poměr alespoň 0,54 kW/kg.

Historicky první volné visení s pilotem uskutečnil francouzský výrobce jízdních kol 13. listopadu 1907. Jeho stroj je možné vidět na obrázku 2.4. Stroj neoplýval velkou stabilitou. Volnému letu bránila především nestabilita, vznikající vlivem nesymetrie tahu.



Obr. 2.4 Stroj Paula Cornu [14]

Další významnou překážkou byla absence kvalitního řízení. Tyto problémy bránily vzniku prakticky použitelných vrtulníků. Vývoj se však nezastavil, i když pokračoval malou odbočkou od původní koncepce svisle startujících strojů. Díky této odbočce vznikly stroje, nazývané vírníky, které se také staly prvními prakticky použitelnými stroji s rotující nosnou plochou. S vírníky je spojeno jméno španěla Juana de la Ciervy, jenž úspěšně vyřešil problém nesymetrie tahu. První vírníky měly malá křídla kvůli řízení letu. Ve 30. letech 20. století však již nebyly potřebné díky pokroku v konstrukci naklápění a naklápění rotoru. Tyto pokroky otevřely dveře vývoji prvních vrtulníků, jaké známe dnes.



Obr. 2.5 Cierva C.30A [15]

V roce 1936 německý inženýr a vynálezce Heinrich Focke zkonstruoval první prakticky použitelný vrtulník na světě. Snad ani netřeba dodávat, že překonal všechny rekordy do té doby. Stroj nesl označení Fa – 61. Někoho by mohla zmást vrtule na hvězdicovém motoru. Tato vrtule neměla pohonnou funkci, ale sloužila jako ventilátor chlazení pro motor. V roce 1937 se Anton Flettner zabýval konstrukcí nového typu nosné soustavy



Obr. 2.6 Stroj Heinricha Fockeho Fa - 61 [16]

vrtulníků. Tato soustava byla tvořena dvěma proplétajícími se rotory, umístěných vedle sebe nad trupem, přičemž každý se otáčel na opačnou stranu. Uspořádání vyzkoušel na typu FI 265.

Ve 30. letech 20. století dělal podobné pokroky s vrtulníky ve Spojených státech americký ruský emigrant Igor Sikorsky. Již v Rusku se věnoval problematice vrtulníků. Postavil tam dva typy. Ani jeden však nelétal. V Americe pro své vrtulníky zvolil koncepci s jedním hlavním rotorem. Pro ověření správnosti této koncepce postavil zkušební stroj VS – 300. Během několika let na tomto typu vyzkoušel řadu konfigurací kompenzace reakčního momentu. Jako nejlepší se nakonec ukázal malý vyrovnávací rotor s horizontální osou rotace, umístěný na konci trupu. Časem se toto uspořádání používalo u většiny vrtulníků. Na základě armádních požadavků později navrhl model R – 4. První testy proběhly v roce 1941. Tento typ se později stal historicky prvním sériově vyráběným vrtulníkem na světě. Prvním sériově produkovaným vrtulníkem v Sovětském svazu byl typ Mi – 1, kurýrní vrtulník pro armádu. První let uskutečnil v roce 1948.



Obr. 2.7 První sériově produkované vrtulníky v USA a v SSSR [17; 18]
(vlevo Sikorsky R - 4; vpravo Mil Mi - 1)

Další významné vrtulníky ze Spojených států amerických se staly stroje Američana polského původu Franka Piaseckiho. Roku 1944 obdržel od námořnictva spojených států kontrakt na výrobu těžkého transportního vrtulníku s označením PV – 3. Vrtulník byl zajímavý tím, že byl vybaven dvěma tandemovými rotory. Na základě úspěchů této koncepce byly později postaveny další verze vrtulníků s tandemovými rotory. Díky jejich zakřivenému tvaru, který zaručoval, že se rotory vzájemně nepoškodí, se pro tyto vrtulníky vžilo pojmenování létající banány.

V roce 1945 Nikolaj Ilič Kamov navrhl a postavil ultralehký vrtulník Ka – 8 s koaxiálními rotory poháněný motocyklovým motorem, který nikdy nevzlétl. Koaxiální uspořádání se pak dodnes stalo charakteristickým znakem vrtulníků firmy Kamov. Pozdější model Ka – 10, již letuschopný, byl použit sovětským námořnictvem na palubě ledoborce. Koncepci koaxiálních rotorů si oblíbilo sovětské námořnictvo kvůli úspoře místa v lodním hangáru.

V 50. letech 20. století přišel velký rozvoj vrtulníků spojený s válkou v Koreji. Aruthur Young pracující pro společnost Bell - Aircraft vyvinul ve 40. letech 20. století nový dvoulistý rotor, který zkoušel na vrtulníku Model 30. Ten se stal základem modelu Bell 47. Bell 47 se velmi dobře osvědčily během Korejské války. Tento typ se pyšní také jedním historickým prvenstvím. Bell 47 se stal prvním typem vrtulníku certifikovaný pro civilní sektor.



Obr. 2.8 Bell 47 [19]

České veřejnosti je málo známá práce československého inženýra Jaroslava Šlechty, který se po druhé světové válce stal naším nejznámějším konstruktérem vrtulníků. Již v době druhé světové války se tajně zabýval problematikou konstrukce vrtulníků. Po válce svoji práci dál rozvíjel a díky němu se od 50. let 20. století stalo

Československo jednou z mála zemí, kde se vyráběly vrtulníky vlastní konstrukce. Jeho první postavený experimentální vrtulník XE – II, vybavený hlavním dvoulístým rotorem a jedním pomocným vyrovnávacím rotorem, absolvoval první volný let 5. září 1950. Zajímavostí Šlechtových vrtulníků byla jednoduchá konstrukce rotorové hlavy a řízení letu pomocí výstředníkové desky.



Obr. 2.9 XE - II [I10]

Aby bylo možné začít stavět větší a výkonnější vrtulníky, bylo potřeba nahradit pístové motory. Jako vhodná náhrada se ukázal turbohřídelový motor. Od přelomu 50. a 60. let 20. století začala jejich sériová výroba. Prvním létajícím vrtulníkem s turbohřídelovým motorem se stal v roce 1951 Kaman K – 225. Prvními sériově vyráběnými vrtulníky s turbohřídelovým pohonem byl americký typ Bell UH – 1 Iroquois (Huey) a francouzský typ Alouette II.



Obr. 2.10 První sériově vyráběné vrtulníky s turbohřídelovým motorem [I11; I12]
(vlevo Bell UH - 1; vpravo Alouette II)

Ve druhé polovině 60. let 20. století Mil postavil vrtulník V – 12, dodnes největší vrtulník na světě, který kdy létal. S hmotností převyšující 100 000 kg byl poháněn čtyřmi turbohřídelovými jednotkami po 4780 kW. Tah zajišťovaly dva rotory, každý o průměru 35 metrů, umístěné vedle sebe.



Obr. 2.11 Mil V - 12 [I13]

Americká armáda v roce 1965 vypsala požadavky na útočný vrtulník. Výběrové řízení nakonec vyhrál Model 209 od firmy Bell, ve vojenském označení AH – 1 Cobra. Stal se tak prvním útočným vrtulníkem na světě. Typ byl nasazen ve Vietnamu.



Obr. 2.12 Bell AH - 1 Cobra [I14]

3 Typická kritéria rozdělení vrtulníků, hlavní části a jejich funkce

3.1 Typická kritéria rozdělení vrtulníků

Vrtulníky lze rozdělit do různých skupin podle mnoha kritérií. Nejčastější z nich jsou uvedeny dále.

3.1.1 Vzletová hmotnost

▪ Základní rozdělení

- Lehké (do 3000 kg)
- Střední (3000 kg – 8000 kg)
- Těžké (8000 kg a více)

Toto rozdělení je však příliš hrubé pro aplikaci na dnes vyráběný velký sortiment vrtulníků. Vzhledem k rozvoji lehkých typů je lepší používat vícestupňovou klasifikaci.

▪ Modifikované rozdělení

- Velmi lehké (do 1000 kg)
- Lehké (1000 kg – 3000 kg)
- Střední (3000 kg – 8000 kg)
- Těžké (8000 kg – 15000 kg)
- Velmi těžké (nad 15000 kg)

Je vhodné zde zdůraznit, že normy takového rozdělení neznají, avšak s tímto či podobným rozdělením se lze běžně setkat v odborné literatuře.

3.1.2 Účel, použití

▪ Civilní

- Přeprava osob
- Přeprava nákladů
- Pátrací a záchranné
- Policejní
- Hasicí
- Zemědělské

▪ Vojenské

- Transportní
- Výsadkové
- Průzkumné
- Spojovací
- Bitevní
- Protiponorkové
- Pátrací a záchranné

3.1.3 Počet motorů

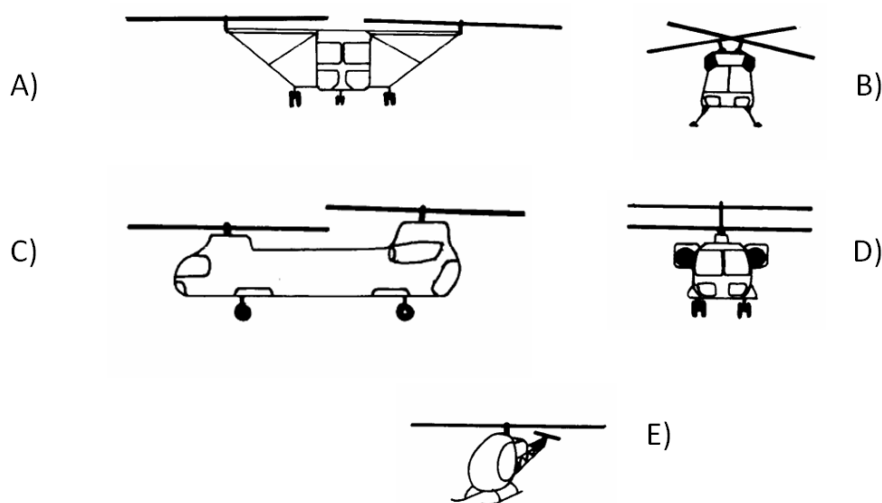
- Jednomotorové
- Dvoumotorové
- Vícemotorové

3.1.4 Uspořádání rotorů

▪ Příčné uspořádání

Příčné uspořádání rotorů se v dnešní době nepoužívá. Nevýhodou je složitost, velké příčné rozměry, značné zvýšení hmotnosti způsobené nutností boční konstrukce pro uchycení rotorů a tím zvýšení odporu vzduchu. Na druhou stranu tato koncepce dosahuje skvělé příčné ovladatelnosti a stability. Navíc všechny výkon

z motorů, snížený o ztráty v převodech, je využit nosnými rotory pro generaci tahu, přičemž každý z nich se otáčí na opačnou stranu.



Obr. 3.1 Uspořádání rotorů vrtulníků [115]

(A - Příčné; B - Prolínající; C - Tandemové; D - Koaxiální; E – Jednorotorové)

▪ Uspořádání s prolínajícími se rotory

Uspořádání s prolínajícími se rotory kombinuje výhody dvou rotorů vedle sebe, za současného zmenšení příčných rozměrů a snížení váhy. Nutností se stává synchronizace otáček rotorů transmisí soustavou.

▪ Tandemové uspořádání

Tandemové uspořádání je, podobně jako příčné uspořádání, efektivní z hlediska přeměny výkonu na vztlak. Je poměrně necitlivé na změnu těžiště. Vykazuje vysokou podélnou stabilitu. Oproti předchozímu příčnému uspořádání má menší odpor. Hmotnostní výhoda v absenci postranních konstrukcí je bohužel kompenzována složitou, a tudíž i těžkou převodovou soustavou. Zadní rotor bývá vyvýšen nad rotor přední. Proud vzduchu od předního rotoru při dopředném letu tak méně ovlivňuje zadní rotor. Díky této koncepci je nutný dlouhý trup, a proto se tandemové uspořádání používá u středně těžkých a těžkých transportních vrtulníků. Podobně jako u příčného uspořádání se každý rotor otáčí na opačnou stranu, aby se vykompenzoval reakční moment.

▪ Koaxiální uspořádání

Koaxiální uspořádání, kdy jsou dva rotory nad sebou, přičemž se každý otáčí na opačnou stranu, je výhodné z hlediska úspory místa v hangáru. Velkou výhodou je také o 13 až 15 % větší tah při jednotkovém výkonu než v případě jediného rotoru. Úspora místa je vykoupena větší výškou vrtulníku. Ta je také odpovědná za snížení stability a zvýšení odporu. Koncepce se vyznačuje jednoduchým ovládáním. Nevýhodou je konstrukční složitost.

▪ Jednorotorové uspořádání

V současné době je toto uspořádání nejrozšířenější. Kombinuje vysokou spolehlivost, přiměřeně nízké provozní náklady, jednoduchou transmisí soustavu a relativně jednoduchou konstrukci draku. Největší nevýhodou tohoto uspořádání je odebrání části výkonu, potřebné pro pohon vyrovnávacího rotoru, jenž eliminuje

reakční moment rotoru. Další nevýhodou je nutnost poměrně přesně dodržovat centráž. Uspořádání s jedním rotorem bude podrobně rozebráno dále.

3.2 Hlavní části jednorotorového vrtulníku

3.2.1 Drak

Drak je souhrnné označení pro trup, stabilizační plochy, systém řízení a přistávací zařízení. Drak vrtulníku je možné dále členit.

▪ Trup

Trup lze rozčlenit na kabinu, ocasní nosník a koncový nosník. Kabinu lze rozdělit na přední část, kde se nachází posádka, a zadní část, kde jsou umístěni cestující, případně náklad. Ocasní nosník plní funkci ramena pro sílu vznikající na vyrovnávacím rotoru. Koncový nosník nemají všechny typy vrtulníků. Při použití koncového nosníku je osa otáčení vyrovnávacího rotoru posunuta blíže či přímo do roviny otáčení nosného rotoru. Tím je eliminován silový moment kolem podélné osy vrtulníku. Všechny části trupu jsou v dnešní době poloskořepiny, či skořepiny. U některých typů, hlavně vojenských, se používají křídla. Křídla slouží k připevnění výzbroje. Zároveň vytvářejí vztlak, čímž dojde k odlehčení rotoru, a tím se zvýší ovladatelnost vrtulníku.

▪ Stabilizační plochy

Vodorovná stabilizační plocha má za úkol eliminovat moment vzhledem k těžišti, vzniklý vodorovnou složkou síly generované nosným rotorem při dopředném letu, a tím zvýšit říditelnost. Podobnou funkci plní i svislá stabilizační plocha, jež při dopředném letu odlehčuje ocasní rotor a zvyšuje ovladatelnost.

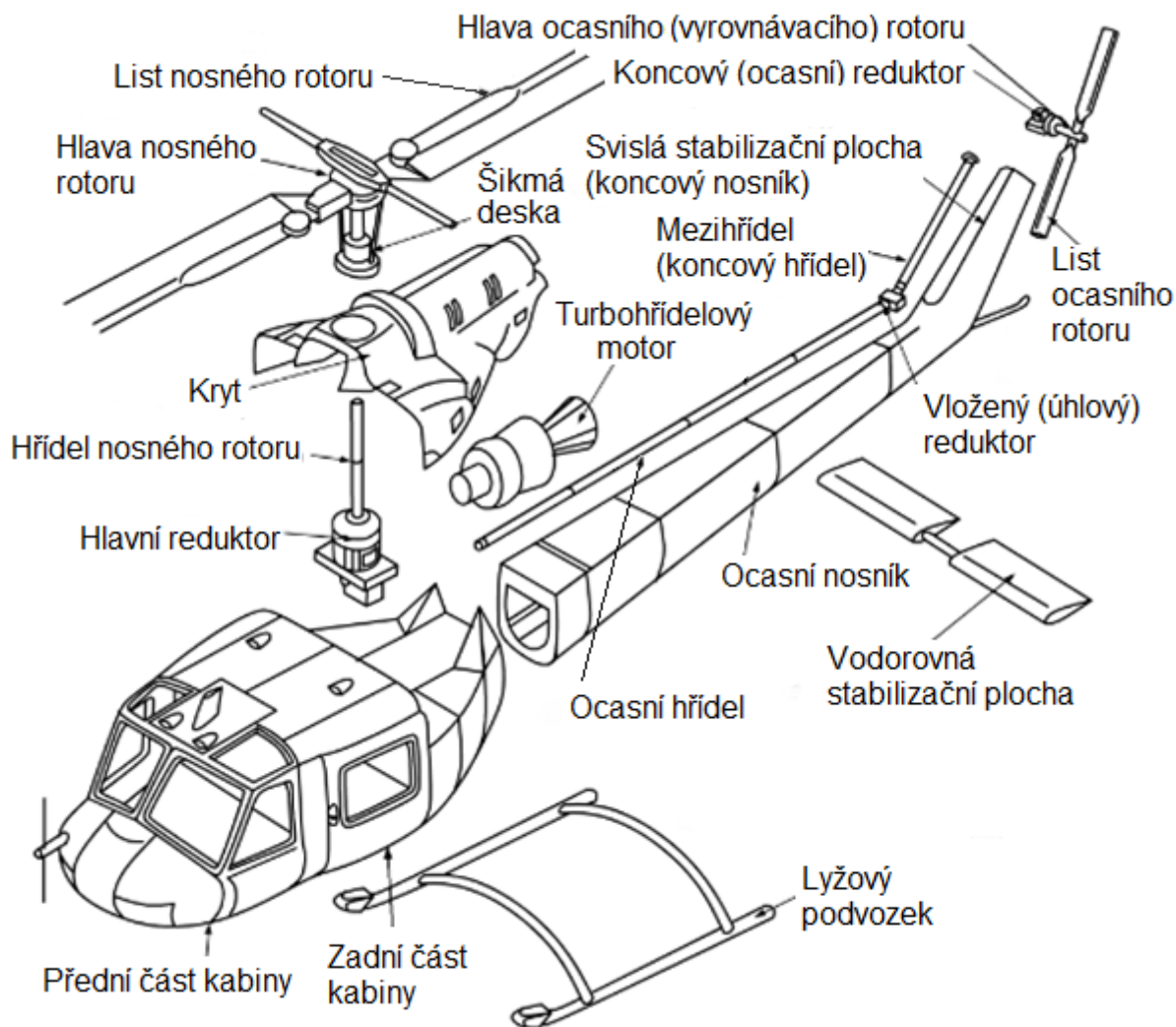
▪ Přistávací zařízení

Slouží jako opora při stání, případně při pojíždění vrtulníku po zemi. U vrtulníků se používá buď lyžový podvozek, nebo kolové podvozky. Mezi výhody lyží patří jednodušší, tím pádem i lehčí konstrukce. Lyže lze modifikovat přídatnými panely, kterými se sníží tlak na podloží při přistání do rozbahněného či zasněženého terénu. K lyžím lze připevnit i plováky pro přistání na vodě. Nevýhodou je obtížnější manipulace s vrtulníkem na zemi a odpor během letu. Lepší manipulaci na zemi dovoluje kolový podvozek. Některé typy vrtulníků mají i zatahovací podvozek, čímž se sníží odpor vrtulníku. Uspořádání je zpravidla třínohé, kdy vrtulník má jednu nohu vpředu a dvě hlavní podvozkové nohy vzadu. Vrtulník s kolovým podvozkem může vzlétat a přistávat při dopředném letu, ovšem s výrazně omezenou hodnotou maximální pojížděcí rychlosti. Lyžový i kolový podvozek musí zajistit dostatečnou stabilitu spolu s omezováním jevu známého jako pozemní rezonance.

▪ Systém řízení

Systém řízení převádí povely od pilota k listům rotorů. Řízení v počátcích bylo mechanické. Dnes se nejvíce používá hydraulické, přičemž moderní vojenské vrtulníky začínají využívat systémy elektroimpulzivního řízení (Fly by wire). Systém řízení vrtulníku se skládá z kolektivního řízení, zkráceně kolektivu, z cyklického řízení, často označovaného jako cyklika, a směrového řízení. Kolektivní řízení je ovládané takzvanou pákou kolektivu, umístěnou vlevo vedle pilotního sedadla. Mění

úhly náběhu na všech listech stejně, čímž vrtulník stoupá, nebo klesá. Na konci této páky je otočná rukojeť pro regulaci výkonu motorů. Cyklické řízení je na páce před pilotem. Páka připomíná knipl v letadle. Jejím vychýlením z neutrální polohy se mění úhly nastavení listů nosného rotoru individuálně, během jeho otáčení kolem osy rotoru. Pákou cyklicky se ovládá klonění a klopení vrtulníku. Směrové řízení se ovládá přes pedály. Jejich vyšlápnutím se kolektivně změní úhly náběhu na listech vyrovnávacího rotoru, čímž se změní síla vyvazovaná ocasním rotorem



Obr. 3.2 Hlavní části jednorotorového vrtulníku [116]

3.2.2 Hnací soustava

Do hnací soustavy se zahrnují veškeré dynamické části, uvedené níže.

▪ Nosný rotor

Hlavním účelem nosného rotoru je přeměna výkonu motorů na tah pro let, či visení. Zároveň, jako součást systému řízení, převádí pilotovy povely na aerodynamické síly, které následně pohybují s vrtulníkem. Jednotlivé části jsou rozebrány v kapitole 4.

▪ **Vyrovnávací rotor**

Kompenzuje reakční moment od motorů a od rotace nosného rotoru. Je součástí směrového ovládání vrtulníku. Vyrovnávací rotory a další způsoby kompenzace reakčního momentu jsou uvedeny v kapitole 4.

▪ **Motory**

V dnešní době se používají turbohřídelové motory, nebo benzínové spalovací motory. Nevýhodou turbohřídelových motorů je jejich vyšší pořizovací cena, vyšší provozní náklady a vyšší spotřeba paliva. Výhodou je vyšší výkon při zachování nízké hmotnosti. Pro představu u pístového motoru Lycoming IO 720-B je poměr výkonu k suché hmotnosti 1,1 kW/kg. Turbohřídelový motor Arrius 2B2 má tento poměr 4,14 kW/kg.

▪ **Transmisní soustava**

Transmisní soustava spojuje motory a rotory v jeden celek a přenáší mezi nimi výkon v podobě krouticího momentu a otáček. Tvoří 10 – 15 % celkové hmotnosti vrtulníku. Dalším úkolem transmise je redukce otáček motorů a rozvod výkonu k jednotlivým rotorům. Pro představu otáčky pístových motorů se pohybují kolem 2500 ot./min. (Lycoming IO 720-B točí až 2650 ot./min). Provozní otáčky turbohřídelových motorů se pohybují přibližně od 5 000 ot./min. (Motor Turbomeca Arrius 2F má trvalý výkon 336 kW a otáčky se pohybují kolem 6000 za minutu). Otáčky nosných rotorů se podle jejich velikosti pohybují v rozmezí 120 – 400 ot./min. Z výše uvedených skutečností vyplývá, že je nutné navrhnout vhodnou konstrukci transmise v závislosti na druhu pohonu a velikosti rotoru. Základními komponentami všech transmisí jsou:

- **Reduktory**
- **Spojky**
- **Hřídele transmise**
- **Rotorová brzda**

Reduktory

Jak již z názvu vyplývá, jde o zařízení redukcující otáčky. Je dobré si uvědomit, že při snížení otáček se zvyšuje krouticí moment. Vrtulník má několik reduktorů. Hlavní reduktor snižuje velkým převodovým poměrem výstupní otáčky motoru či motorů na vhodné otáčky nosného rotoru a ocasního rotoru. Dále slouží jako pohon hydraulických a olejových čerpadel, generátorů, případně kompresorů či ventilátorů. Tyto reduktory jsou až čtyřstupňové. Využívají se v nich převody čelními ozubenými koly, kuželovými ozubenými koly a planetové převody. Převodové poměry mezi turbohřídelovým motorem a nosným rotorem se pohybují až kolem 80 a pro vyrovnávací rotor kolem 6. Odlišný směr os otáčení vyrovnávacího rotoru a ocasního hřídele nutí k použití koncového (ocasního) reduktoru, jehož převod je tvořen kuželovými ozubenými koly. Některé typy vrtulníků mají navíc vložené (úhlové) reduktory. Jsou umístěny mezi ocasním nosníkem a koncovým nosníkem, opět kvůli nesouhlasným směrům os ocasního hřídele a mezihřídele. Převodové poměry vložených a koncových reduktorů bývají malé, případně rovny 1. Některé motory mají i reduktor zabudovaný přímo v sobě. Výstupní hřídel se poté připojuje k hlavnímu reduktoru.

Spojky

Vrtulníky jak s pístovým, tak i s turbohřídelovým motorem jsou vybaveny volnoběžnými spojkami. Pokud motory pohání transmisní soustavu, je spojka sepnutá. V případě přenosu výkonu v obráceném směru dojde k jejímu rozpojení. Obrácený přenos výkonu nastává v případě autorotace, kdy je rotor roztáčen aerodynamickými silami. Kdyby v soustavě nebyla zařazena volnoběžná spojka, motory by byly roztáčeny a fungovaly by jako brzdy rotorů. U vícemotorových vrtulníků má každý motor volnoběžnou spojku. Nejčastější typy jsou válečkové spojky nebo Borg - Warnerovy spojky. Kromě volnoběžných spojek se u vrtulníků s pístovými motory a turbohřídelovými motory bez volné turbíny používají automatické spojky, několika konstrukcí. Nejčastěji jsou založeny na principu odstředivých sil, jmenovitě odstředivá čelistová spojka, či odstředivá segmentová spojka. Tyto spojky se rozpojují v průběhu startu motorů, čímž se sníží potřebný výkon pro roztočení.

Hřídele transmise

Výkon od motorů je rozváděn pomocí hřídelí. Hřídel nosného rotoru je součástí hlavního reduktoru. Vyrovnávací rotor je poháněn ocasním hřídelem. V případě použití vloženého reduktoru je mezi ním a koncovým reduktorem ještě mezihřídel (koncový hřídel). Další hřídele se například používají pro náhon ventilátorů chladičů oleje.

Rotorová brzda

S její pomocí se zkracuje dotáčení rotorů vrtulníku po vypnutí motorů. Při stání vrtulníku na otevřené ploše také zabraňuje nechtěnému roztáčení rotorů vlivem větru. Používají se kotoučové nebo čelistové brzdy. U turbohřídelového pohonu jsou umístěné na ocasním hřídeli mezi motory, či pod nimi.

3.2.3 Výstroj

Účelem výstroje je přizpůsobit vrtulník plněným úkolům a posádce.

▪ Draková výstroj

Do této kategorie se řadí sedadla, bezpečnostní pásy, palubní desky, ovládací panely s ovladači, větrání, vytápění, klimatizace, zařízení pro upevnění nákladu apod.

▪ Elektrická výstroj

Do elektrické výstroje patří zdroje energie jako akumulátory, generátory a pomocné energetické jednotky, dále rozvody, transformátory, usměrňovače, měniče, osvětlení atd.

▪ Přístrojová a rádiová výstroj

Do této skupiny patří letové přístroje, rádia, radary, radionavigační přístroje, či různé multifunkční displeje.

▪ Nouzová výstroj

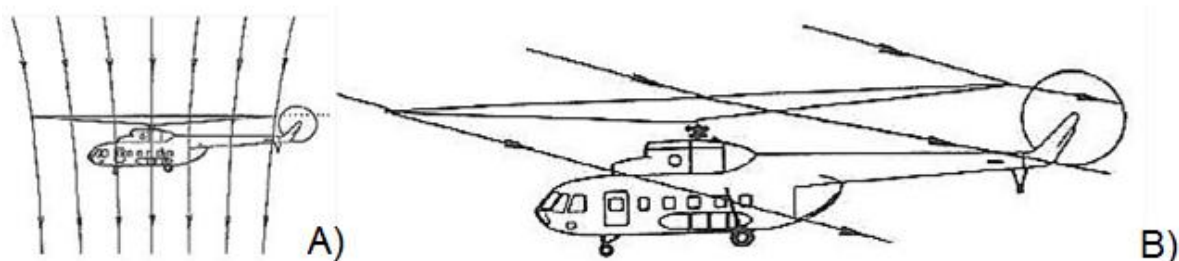
Mezi nouzovou výstroj patří lékárnička, hasicí přístroj, při operacích nad vodní hladinou nouzový plovákový systém, různé světlice, signální rakety, čluny apod.

▪ Speciální výstroj

Zahrnuje například lékařské vybavení v záchranných vrtulnících, dále palubní jeřáby, zařízení pro vodní zásahy (např. podtrupové nádrže, Bambi vaky), reflektory, termovize, ampliony, slaňovací zařízení a u vojenských vrtulníků střelecké radary, infračervené zaměřovací systémy a pylony.

4 Úvod do aerodynamiky nosného rotoru

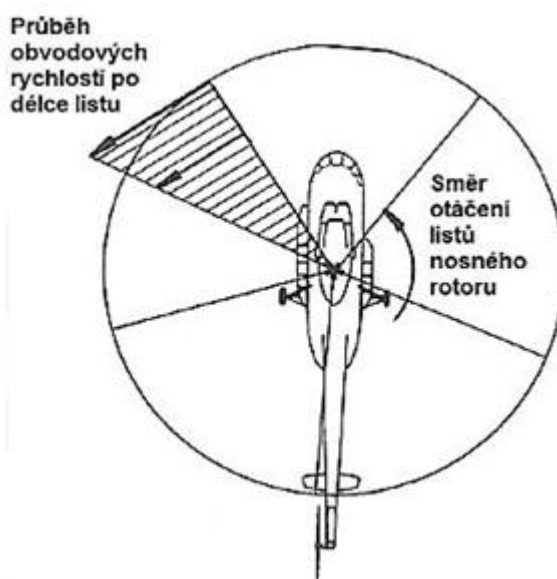
Existuje několik různých teorií vysvětlujících let vrtulníku. Základní vysvětlení vzniku tahu na nosném rotoru je, že nosný rotor vytvoří proud vzduchu. Rotor nasává vzduch nad rovinou rotorového disku a vyfukuje pod rovinu disku nosného rotoru. Tah následně vznikne jako reakce nosného rotoru na změnu hybnosti vzduchu procházející skrz rotorový disk.



Obr. 4.1 Proud vzduchu vytvářený rotorem [117]
(A) při svislých režimech letu; B) při horizontálních režimech letu

Proud vzduchu vzniká otáčením nosného rotoru, kdy se listy pohybují vůči vzduchovému prostředí. Díky profilům na listu je rychlost proudění nad listem vyšší a pod ním nižší. Tím vzniká rozdíl tlaků, kdy nad listem je nižší tlak prostředí a pod listem je vyšší. Rozdíl tlaku na ploše rotorového listu vytvoří sílu.

Při otáčení rotoru jsou jednotlivé řezy listu (profily) obtékány různou rychlostí v závislosti na vzdálenosti od středu otáčení. Z konstrukčního hlediska je pak nutné, měnit profily a úhly nastavení po délce listu. Dosáhne se vyšší tahu a oddálí se odtržení proudění při vyšších úhlech náběhu. Největší rychlost je na vnějším konci listu, přičemž se hodnota Machova čísla má pohybovat v rozsahu 0,5 až 0,7.

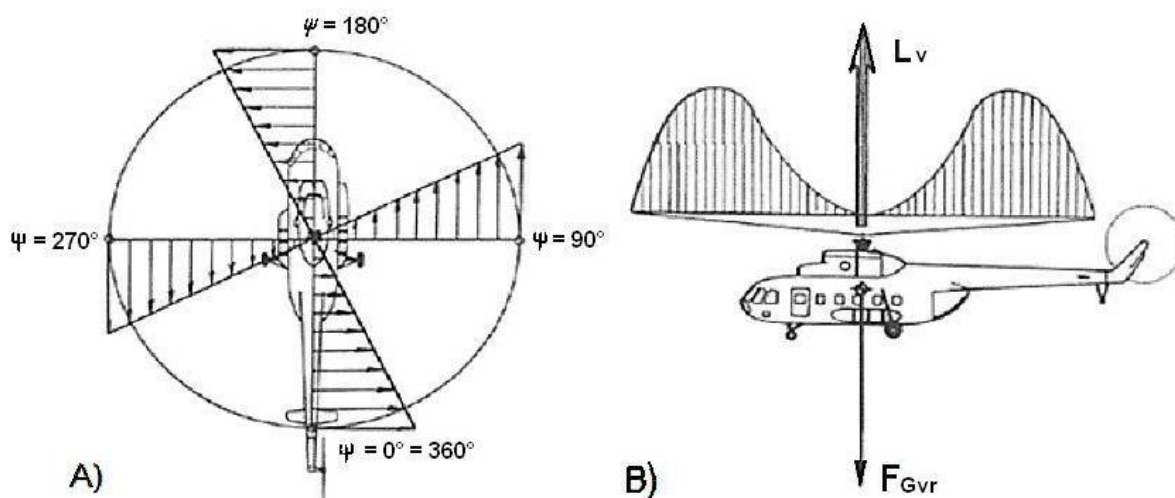


Obr. 4.2 Velikosti obvodové rychlosti po délce jednoho listu [118]

4.1 Nosný rotor při svislých letových režimech

Pro všechny tyto režimy je charakteristické, že nosný rotor je obtékán souměrně. V reálu toto platí při malých rychlostech větru. Souměrné obtékání znamená, že všechny průřezy každého listu v různých azimutálních polohách jsou obtékány stejným způsobem.

Azimetální poloha listu je definována azimetálním úhlem ψ viz obr. 4.3, kde $\psi = 0^\circ$ je poloha listu nad ocasním nosníkem.



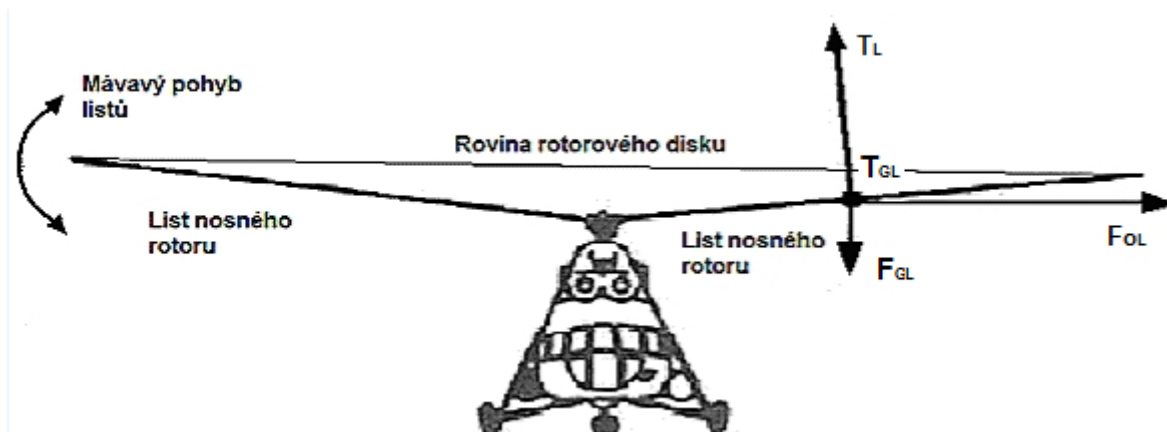
Obr. 4.3 Nosný rotor při svislých letových režimech [118]

(A) Zobrazení souměrného obtékání;

B) Výsledná tíhová síla F_{Gvr} vrtulníku a výsledná vztlaková síla L_V působící na vrtulník s grafickým znázorněním rozložení vztlakových sil po řezu rovinou rotorového disku)

Nosný rotor nasává vzduch z horní strany zhruba o ploše nosného rotoru a vyfukuje jej pod sebe, přičemž proud je kolmý na rovinu rotorového disku. Když vzduch projde rotorovým diskem, má přibližně dvojnásobnou rychlost. Dle zákona spojitosti proudění dojde ke zmenšení průřezu proudu pod rotorem v důsledku jeho vyšší rychlosti. Rychlost proudu vzduchu je daná indukovanými rychlostmi proudu. Nejvyšší indukované rychlosti proudu jsou v okolí obvodu rotorového disku. To z hlediska stability vzduchového proudu není dobré. Se stabilitou proudu přímo souvisí i stabilita vrtulníku. Je proto nutné zajistit co nejrovnoměrnější rozložení vektorů rychlostí proudu vzduchu po celé ploše rotorového disku. V proudu vzduchu lze určit tři složky vektorů indukovaného proudu vzduchu. Největší jsou složky axiální a tangenciální. Axiální složky vyjadřují pohyb proudu vzduchu ve směru osy hřídele nosného rotoru. Tangenciální složky leží v rovinách rovnoběžných s rovinou disku nosného rotoru. Jejich následkem proud vzduchu rotuje. Působením radiálních složek dochází k zúžení proudu vzduchu pod rotorem. Jejich velikosti jsou malé a v praktickém řešení se zanedbávají. Velké rychlosti proudu vzduchu urychleného rotorem však negativně působí na činnosti vrtulníku v přízemních výškách.

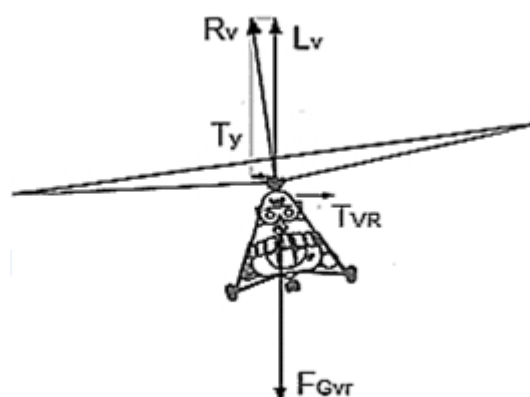
Listy nosného rotoru jsou na koncích upevněny k rotorové hlavě. Toto uložení přenáší veškeré síly a momenty působící na list. Provede-li se rozbor sil v rovině rovnoběžné s osou otáčení nosného rotoru, zjistí se, že na každý list působí tíhová síla F_{GL} , tahová síla T_L a odstředivá síla F_{OL} . Na obr. 4.4 jsou znázorněny v těžišti listu T_{GL} . Vztlaková síla během roztáčení rotoru převyšuje tíhovou sílu. List se přemístí nahoru a zaujme novou rovnovážnou polohu. Pohyb listu nahoru a dolů se nazývá mávání. Rotor už netvoří rovinu, ale kužel se středem v ose rotorové hlavy. Velikost kuželu je ovlivněna hmotností listu, otáčkami nosného rotoru, aerodynamickými silami a také geometrií listů. Za rotorový disk (rovinu rotorového disku) se pak považuje myšlený kruh opsaný koncům listů nosného rotoru.



Obr. 4.4 Mávací pohyb listů, rovina rotorového disku a síly působící na list [18]

4.1.1 Vliv vyrovnávacího rotoru

Vyrovnávací rotor na konci vrtulníku vytváří boční tahovou sílu T_{VR} . Pro zajištění rovnovážného stavu je nutné tuto sílu vykompenzovat nosným rotorem, který vytvoří boční složku tahu T_y orientovanou proti tahu vyrovnávacího rotoru. Síla od vyrovnávacího rotoru T_{VR} a boční složka tahu nosného rotoru T_y vytvářejí silovou dvojici. Následkem této silové dvojice dojde k mírnému natočení vrtulníku kolem podélné osy. Natočením vznikne další silová dvojice F_{Gvr} a L_v , jež působí proti silové dvojici T_y a T_{VR} . Takto je dosažen rovnovážný stav kolem podélné osy.

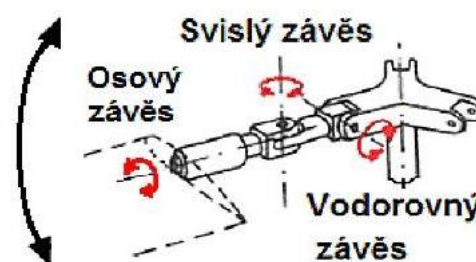


Obr. 4.5 Vliv vyrovnávacího rotoru na vrtulník při svislých letových režimech [18]

4.1.2 Svislé stoupání

Svislé stoupání je energeticky nejnáročnější fází letu. Tah rotoru musí kompenzovat hmotnost vrtulníku a navíc musí vytvořit dostatečně velký přebytek pro požadovanou rychlost stoupání. S narůstající výškou letu se rychlost stoupání snižuje. Prakticky se stoupání docílí zvýšením úhlu náběhu na všech listech současně kolektivním řízením. Tento pohyb je spolu s cyklickým pohybem listů, jež bude vysvětlen v části nosný rotor při horizontálním letu, součástí pojmu křídélkování listu. Křídélkování je pohyb, při kterém se mění úhel nastavení listu. Aby list mohl měnit úhel nastavení dle řídicího mechanismu, je uložen v osovém závěsu (osovém čepu). Když se listy nastaví na velký úhel, vzroste odpor prostředí proti otáčení nosného rotoru. Aby neklesly otáčky nosného rotoru, je potřeba zvýšit výkon motorů. Zvýšení výkonu motorů vyvolá nárůst reakčního momentu, jež je nutné kompenzovat. Vrtulník drží směr tím, že pilot vyšlápne pedál, kolektivně změní úhly náběhu na ocasním rotoru. Tímto zásahem se vyrovná reakční

Křídélkování listu



Obr. 4.6 Křídélkování listu [18]

moment. Prostředí klade dále odpor proti stoupání celého vrtulníku. Konstantní rychlost stoupání se dosáhne po ustavení rovnováhy mezi tahem nosného rotoru a celkovým odporem vrtulníku. Termín statický dostup pak určuje dosažitelnou výšku při nulové vodorovné rychlosti, kdy je vrtulník stále schopen stoupat minimálně rychlostí 0,5 m/s. Letový režim svislé stoupání se nejčastěji používá při vzletu, případně při záchranných činnostech.

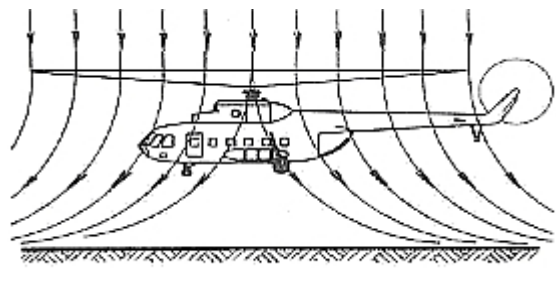
4.1.3 Visení

Visení je režim letu, kdy je tah nosného rotoru a tíhová síla v rovnováze. Vrtulník ve vzduchu obrazně řečeno stojí na místě.

Je vhodné zde objasnit termíny svislý dostup s vlivem země a bez vlivu země.

▪ Vysvětlení pojmu vliv země

Zemský povrch významně ovlivňuje proudění vzduchu od rotoru, pokud se vrtulník nachází do výšky rovnající se průměru rotoru. V těchto výškách nosný rotor produkuje větší tah, než by měl ve volném prostředí. Proud vzduchu vytvořený rotorem nemůže kvůli zemi proudit pod vrtulník, ale je donucen se zakřivit do horizontálního směru. Výsledkem je nárůst tlaku vzduchu pod vrtulníkem.



Obr. 4.7 Ovlivnění proudu vzduchu vytvořeného rotorem u země [17]

▪ Svislý dostup s vlivem země

Svislý dostup s vlivem země je mezní výška, ve které je vrtulník schopen režimu visení při využití vlivu země. Jedná se o důležitý údaj při operacích vrtulníků v horských oblastech. V anglické literatuře se označuje jako Hover ceiling IGE. IGE je zkratka z anglického výrazu In Ground Effect.

▪ Svislý dostup bez vlivu země

Opět je to mezní výška, do které je vrtulník schopen vystoupat bez vlivu země. V anglické literatuře je označován jako Hover ceiling OGE. OGE je zkratka z anglického výrazu Out of Ground Effect.

4.1.4 Svislé klesání

Režim svislé klesání obsahuje tři druhy. Prvním je režim svislého klesání s pracujícími motory, který je jako jediný z nich normálním standardním režimem letu vrtulníku. Druhým režimem je svislé klesání s pracujícími motory při vysokých rychlostech klesání. Třetím režimem je svislé klesání bez pracujících motorů.

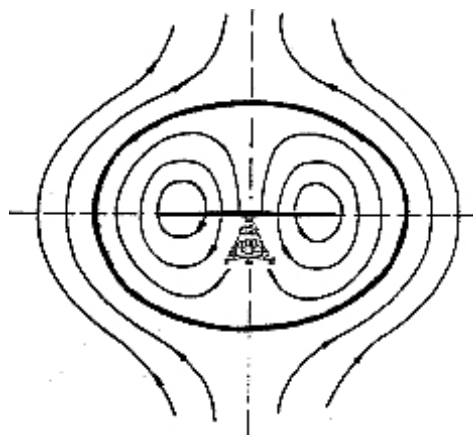
▪ Svislé klesání s pracujícími motory

Při svislém klesání působí stejné druhy sil, odporů a momentů jako při svislém vzletu. Vrtulník se do režimu svislého klesání dostane v případě, kdy je horizontální rychlost nulová a kolektivním řízením se sníží úhly nastavení všech listů na nosném rotoru, sníží se výkon motorů a pedály se koriguje úbytek reakčního momentu. Svislé klesání se používá v případech, kdy je plocha pro přistání ohraničena členitým

okolím a při záchranných operacích. Při běžném létání se pak vyskytuje převážně těsně před dosednutím.

▪ Svislé klesání s pracujícími motory při vysoké klesací rychlosti

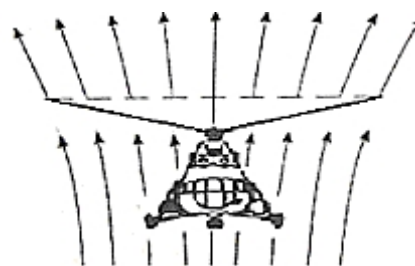
Důvodem, proč se svislé klesání s pracujícími motory používá jenom v nejnútnejších případech, je aerodynamický jev nazývaný vírový prstenec. Vírový prstenec (vírový kroužek) je zvláštní druh obtékání nosného rotoru. Nastane, pokud rychlost svislého klesání dosáhne 6 až 8 metrů za sekundu. Proud vzduchu vzniklý otáčením rotoru se pohybuje proti proudu vzduchu vytvořenému pohybem celého vrtulníku. Pod rotorem vzniká složité turbulentní proudění, jehož následkem začne vzduch cirkulovat okolo konců listů nosného rotoru. Tím se vytvoří se vír ve tvaru prstence. Jde o velmi nebezpečný jev! Rotor neposkytuje tah, musel by neustále urychlovat vzduch v tomto prstencovém víru. Vrtulník se stává nestabilním a neovladatelným. Jevu lze zabránit získáním dopředné rychlosti.



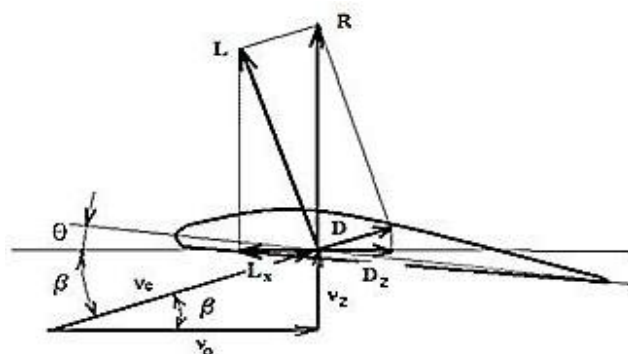
Obr. 4.8 Vírový prstenec [I19]

▪ Svislé klesání bez pracujících motorů – autorotace

Režim svislého klesání bez pracujících motorů, zkráceně nazývaný autorotace, je nouzovým letovým režimem v případě výpadku motorů, či dojde-li k poruše na vyrovnávacím rotoru. Nosný rotor je roztáčen aerodynamickými silami, jinak řečeno prouděním vzduchu. Za to se však platí ztrátou výšky. Rotor takto získává energii pro otáčení a produkuje tak tah. Do režimu autorotace je nutné vrtulník převést. Při všech standardních režimech letu, včetně horizontálního letu, proudí vzduch skrz rotor z horní strany. Pro autorotaci je však nutné, aby vzduch proudil ze spodní strany. Znamená to úplně změnit obtékání rotoru. To vyžaduje správný pilotní zásah do řízení, čas a výšku. Nejvíce výšky se ztratí při přechodu z visení do režimu svislé autorotace. Přechod do autorotace významně ovlivňuje hmotnost listů s rotorovou hlavou a s tím spojený moment setrvačnosti. Pro přechod do autorotace je výhodou velký moment setrvačnosti rotoru, protože zabrání nadměrnému poklesu otáček odporovými silami do doby, kdy energii pro otáčení rotoru začnou produkovat aerodynamické síly. Z pilotního ohledu je nutné co nejvíce snížit úhly náběhů listů nosného rotoru. Pro představu se úhly nastavené pohybují v rozmezí 1° až 3°. Kolektivním řízením se pak otáčky rotoru udržují v provozních mezích. Pedály se sníží tah vyrovnávacího rotoru, kompenzujícího v normálních režimech kroutící momenty motorů. Vrtulník je však stále ovlivňován momenty, jež jsou důsledkem tření v uložení a v převodové soustavě.



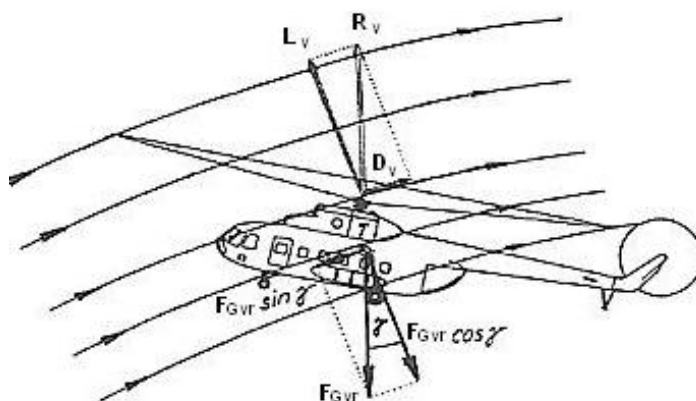
Obr 4.9 Proudění vzduchu skrz nosný rotor [I20]



- R - výsledná aerodynamická síla působící na list
- L - vztlačová síla na list
- D - odporová síla působící na list
- L_x - složka L do směru x
- D_x - složka D do směru x
- V_0 - rychlost obtékání listu od otáčení rotoru
- V_c - výsledná rychlost obtékání listu
- V_z - rychlost obtékání listu od klesání vrtulníku
- θ - úhel nastavení listu
- β - úhel nabíhajícího proudu vzduchu

Obr. 4.10 Rozložení výslednic sil na listu při svislém autorotačním klesání [I15]

Svislé autorotační klesání je příliš velké. Rychlost se pohybuje v rozmezí 20 až 30 metrů za sekundu. V reálu se vrtulník cyklickým ovládáním potlačí a převede se do autorotačního šikmého klesání. Od svislé autorotace se liší nesymetrickým obtékáním listů nosného rotoru. Nesymetrické obtékání bude probráno v kapitole nosný rotor při horizontálním letu. I v případě šikmého autorotačního klesání je ale sestupová rychlost příliš vysoká. Proto se v blízkosti země provede razantní přitažením kolektivu, zvýší se úhly nastavení na všech listech. Dojde k významnému zbrzdění vrtulníku. Otáčky rotoru poklesnou, to už ale ničemu nevádí, protože vrtulník je nízko nad zemí a dosedne. Tento manévr je piloty pravidelně nacvičován.



Obr. 4.11 Vrtulník při šikmé autorotaci [I18]

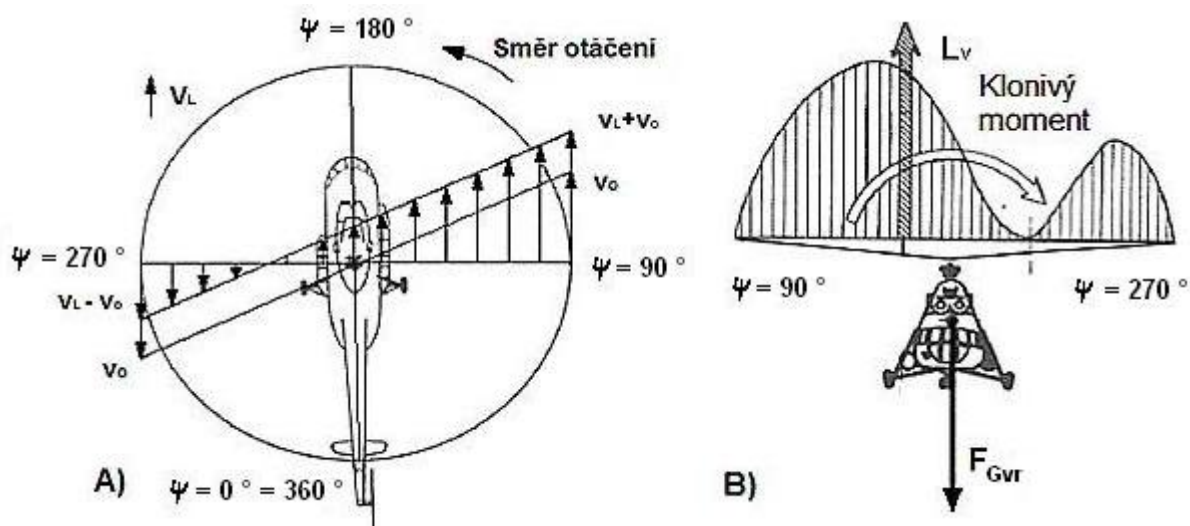
4.2 Nosný rotor při horizontálních letových režimech

Přejde-li vrtulník do horizontálního letu, vzduch stále prochází rotorem z horní strany rotorového disku dolů, ale změní se svislé obtékání rotoru na šikmé. Obtékání stejných průřezů listu bude významně závislé na azimutální poloze listu. Vznikne nesouměrné obtékání a tím vzniknou i nesymetrické tahové (vztlačové) síly.

Horizontální letové režimy potřebují nižší motorový výkon než při svislých letových režimech, protože se využívá proudění vzduchu vzniklé horizontálním pohybem.

4.2.1 Pohyby a obtékání listu nosného rotoru v závislosti na azimutálním úhlu

Popis je pro pravotočivý rotor při dopředném letu. Pokud je azimutální úhel listu v rozmezí 0° až 180° , list je postupující. Vektory rychlostí proudu vzduchu od horizontálního letu se přičtou k vektorům rychlostí od otáčení listu okolo osy nosného rotoru. Maximální tahová síla, a tedy i maximální výsledná rychlost obtékání listu, bude při azimutálním úhlu rovným 90° . List s azimutálními úhly v rozmezí 180° až 360° je ustupující. Vektory rychlostí obtékání listu vzniknou rozdílem vektorů rychlostí



Obr. 4.12 Nosný rotor při horizontálních letových režimech [118]

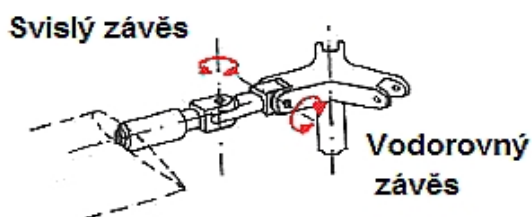
(A) Zobrazení nesouměrného obtékání; B) Výsledná tíhová síla F_{Gvr} vrtulníku a výsledná vztlaková síla L_v působící na vrtulník s grafickým znázorněním rozložení vztlakových sil po řezu rovinou rotorového disku)

od otáčení listu okolo osy nosného rotoru a vektorů rychlostí proudu vzduchu od horizontálního letu. Na listu s azimutálním úhlem 270° , bude rychlost obtékání listu nejmenší. Jinými slovy v této poloze bude list produkovat nejmenší tah.

U dvoulístého rotoru, kdy jeden list bude v poloze 90° a druhý list v poloze 270° bude postupující list mít maximální tah a ustupující bude mít minimální tah. Vznikne tak moment, který se bude snažit přetočit vrtulník kolem podélné osy.

Všechny vrtulníky, bez ohledu na počet listů, se s tímto jevem musejí potýkat. Pro vývoj praktických stabilních vrtulníků schopných dopředného letu a i svislého letu při silnějším větru bylo nezbytné vyřešit problém nesymetrického tahu. První úspěšné konstrukční řešení vymyslel Juan de la Cierva, jež aplikoval na své vírníky. Listy rotoru neupevnil napevno přímo k rotorové hlavě, ale použil dva závěsy. Jeden byl vodorovný a druhý svislý.

Vodorovný závěs (vztlakový čep) umožnil listu mávání. Funkci vodorovného závěsu lze vysvětlit dvěma způsoby. Vodorovný závěs není schopen přenést momenty těchto sil na rotorovou hlavu. Navíc tím, že umožňuje mávání, dovoluje listu zaujmout takovou polohu, při které nastane momentová rovnováha. Mávací pohyb ovlivňuje i úhly náběhu listu.

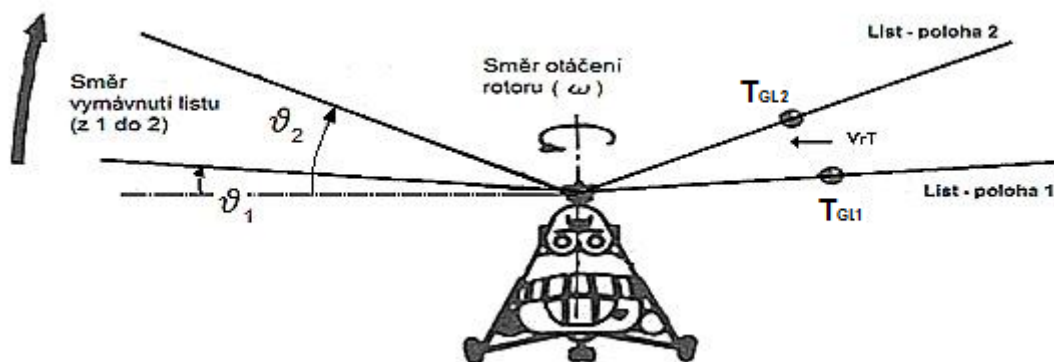


Obr. 4.13 Závěsy na rotorové hlavě [118]

Pohyb listů nahoru a dolů však vyvolá další pohyb. Vymávine-li list nahoru, nebo dolů, dojde ke zmenšení poloměru těžiště listu. Těžiště listu tak koná složený pohyb. U tohoto pohybu se vyskytuje Coriolisovo zrychlení, pro nějž platí obecný vztah:

$$a_{Cor} = 2 \cdot (\omega_{un} \times v_{rel})$$

V našem případě je $\omega_{un} = \omega$ a $v_{rel} = v_{rT}$, kde v_{rT} je rychlost změny poloměru těžiště listu. Toto zrychlení způsobí pohyb listu v horizontální rovině, tedy kývavý pohyb, zkráceně kývání.

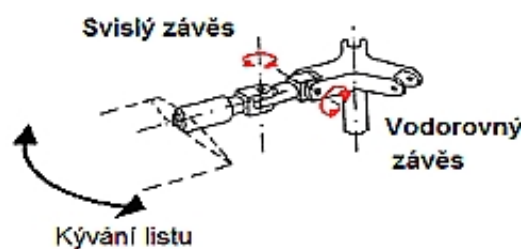


Obr. 4.14 Změna polohy těžiště listu při jeho vymávnutí směrem nahoru [118]

(v_{rT} – rychlost změny poloměru těžiště; ϑ_1 – úhel vymávnutí listu v poloze 1;

T_{GL1} – těžiště listu v poloze 1; ϑ_2 – úhel vymávnutí listu v poloze 2; T_{GL2} – těžiště listu v poloze 2)

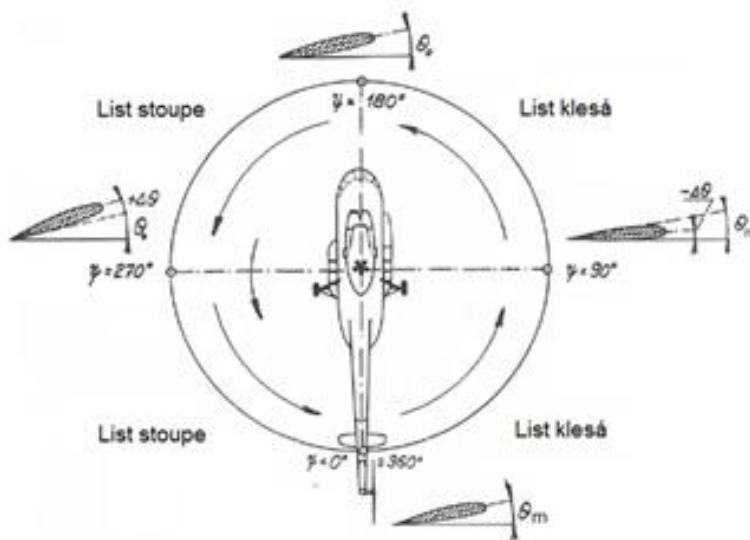
Kývání listu umožňuje svislý závěs (odporový čep). Kývavý pohyb dále způsobuje nekonzantní odporová síla prostředí, závislá nejen na velikosti rychlosti horizontálního pohybu, ale také na azimutální poloze listu. Její velikost se při otáčení listu kolem osy rotoru periodicky mění.



Obr. 4.15 Kývavý pohyb listu (kývání) [118]

Kompensaci nesymetrického tahu je také možné dosáhnout cyklickou změnou úhlu nastavení listů. Toto řešení je omezeno maximálním úhlem náběhu v azimutálním místě minimální rychlosti obtékání listu, při kterém dojde k odtržení proudnic, čímž se ztratí tah. Odtrhávání proudnic vyvolává nárůst vibrací.

Nesymetrie tahu má i jedno pozitivum. Využívá se pro řízení vrtulníků kolem příčné osy (klopení) a kolem podélné osy (klonění). Cyklické řízení zajišťuje, že list v každém azimutálním místě má jiný úhel nastavení, čímž se mění i velikost tahu v různých azimutálních polohách listu. Cyklickou změnou úhlu nastavení listů se také ovlivňuje mávání listů.

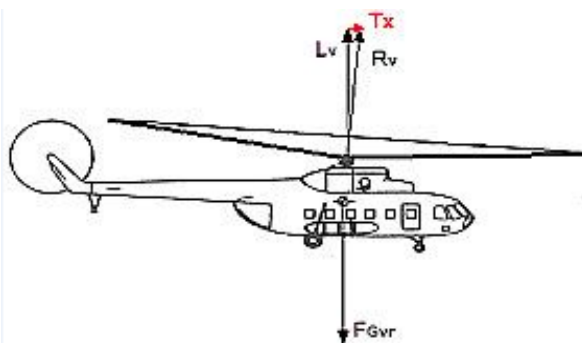


Obr. 4.16 Cyklická změna nastavení listu v průběhu otáčení, pro dopředný let [18]

(θ_0 – počáteční úhel nastavení listu; $\Delta\theta$ – změna úhlu nastavení listu;

θ_m – maximální úhel nastavení listu)

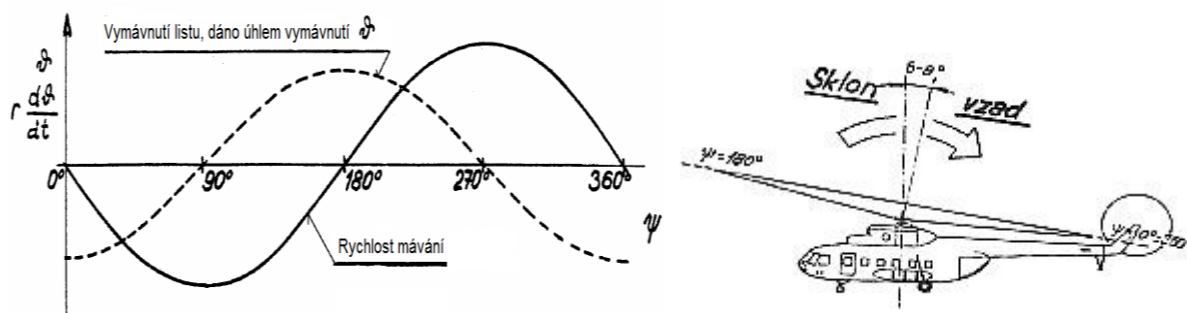
Rovina rotorového disku mění sklon vůči horizontální rovině. Výsledný vektor tahu nosného rotoru R_v , jenž je součtem všech elementárních vektorů tahových sil vytvářejících se na elementárních ploškách listů, je možné umístit do středu nosného rotoru, přičemž je kolmý na rovinu rotorového disku. Z obrázku 4.17 je pak patrné jednoduché znázornění vzniku tahové složky do požadovaného směru letu vrtulníku.



Obr 4.17 Vznik tahové složky T_x nakloněním roviny rotorového disku pro dopředný let [118]

4.2.2 Náklon roviny rotorového disku

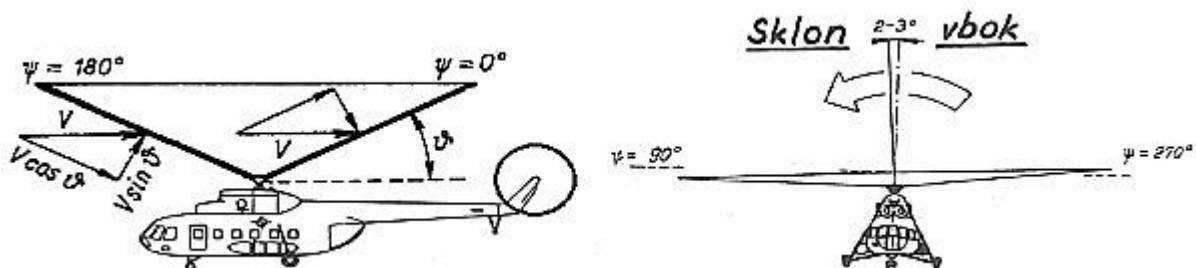
Při dopředném letu mávání přirozeně vyvolává nepříznivý náklon roviny rotorového disku dozadu. Náklon negativně působí na říditelnost a není vhodný pro dopředný let. Velikost náklonu rotorového disku je závislá na geometrii listu a rychlosti dopředného letu. Vznik náklonu způsobuje nesymetrický tah a setrvačnost listu. Maximální tahová síla působí na list v poloze 90° . List se začne pohybovat směrem nahoru. Maximální vymávnutí listu bude ale vlivem setrvačnosti až v poloze 180° . Tahové síly na listu od polohy 90° do 270° stále klesají, přičemž minimální tahová síla působící na list je právě v poloze 270° . Minimální vymávnutí listu je následně v poloze 360° .



Obr 4.18 Průběh rychlosti mávání a velikosti vymávnutí listu v závislosti na azimutálním úhlu spolu s výsledným sklonem roviny rotorového disku vzad [115; 117]

Náklon roviny rotorového disku dozadu se kompenzuje konstrukčním nakloněním hřídele nosného rotoru i s hlavním reduktorem dopředu o 3° až 8° .

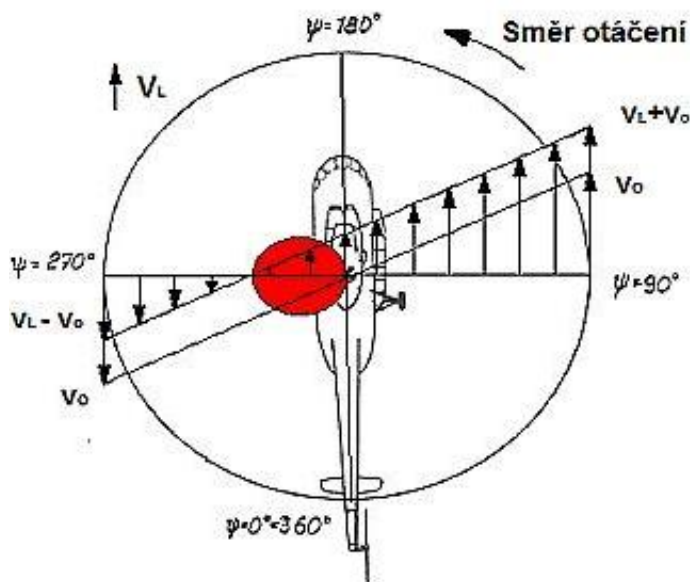
Rovina nosného rotoru je zároveň skloněna na stranu postupujícího listu. Na list v polohách od 90° do 270° působí složka rychlosti proudu $v \cdot \sin \vartheta$, jež zvyšuje úhel náběhu. V polohách 270° až 90° tato složka naopak snižuje úhel náběhu. Maximálních účinky jsou v polohách 180° a 360° . Listy dosáhnou maximálních zamávnutí způsobených touto složkou v polohách 90° a 270° . Stranový náklon rotorového disku se kompenzuje vyosením hřídele nosného rotoru a reduktoru zpravidla o 1° až 3° .



Obr. 4.19 Sklonění roviny rotorového disku na stranu postupujícího listu [119; 118]

4.2.3 Zpětné obtékání listů

Škodlivým jevem při horizontálních letových režimech je zpětné obtékání listů nosného rotoru. Ve vybarvené oblasti na obrázku, na straně ustupujícího listu, vzduch obtéká list od odtokové hrany k náběžné hraně. Zpětné obtékání snižuje efektivní plochu listů a navíc je doprovázeno poměrně silnými vibracemi. Cílem při konstrukci nosného rotoru je tuto oblast co nejvíce zmenšit, buď zvýšením otáček, nebo upravením tvaru kořenové části listu u rotorové hlavy.



Obr. 4.20 Zobrazení zpětného obtékání listů při dopředném letu vrtulníků [118]

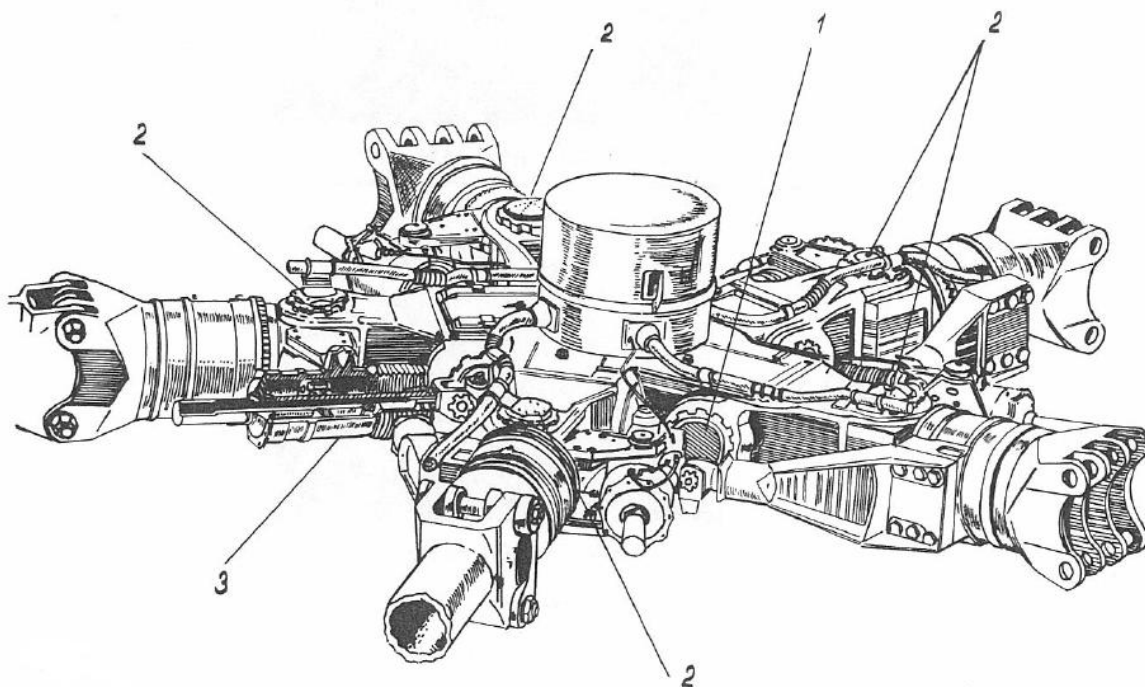
5 Základní přehled rotorů, rotorových hlav

Nosné rotory jsou jednou z nejdůležitějších částí vrtulníků. Současně plní několik funkcí. V první řadě lze považovat za nosné plochy. Zároveň jsou součástí pohonné soustavy, kdy zajišťují pohonné síly nutné pro let. Navíc jsou součástí podélného a příčného řízení. Z toho vyplývají značně vysoké aerodynamické, dynamické a pevnostní požadavky, které musí splňovat. Při konstrukci je zároveň kladen důraz na co možná nejjednodušší údržbu a seřizování během provozu při zachování dobrých letových vlastností.

V průběhu historie vzniklo mnoho různých konstrukcí rotorových hlav. V dnešní době se používají především ty konstrukce, jež lze zařadit do jedné ze čtyř následujících skupin. Skupiny určují způsoby, jakým rotorová hlava dovoluje listu mávat, kývat, křídélkovat a jaké síly a momenty přenáší.

5.1 Kloubové rotory

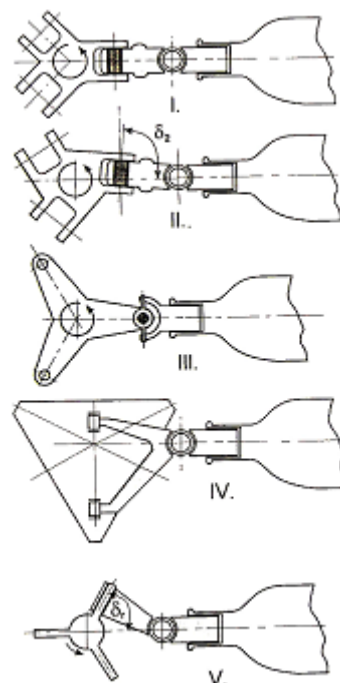
Představují základní a nejstarší prakticky funkční konstrukční řešení rotorové hlavy. Základní návrh pochází od Juana de la Ciervy. V dnešní době čistě kloubové rotorové hlavy můžeme nalézt například na vrtulnících značky Mil a Schweizer.



Obr. 5.1 Kloubová rotorová hlava Mil Mi – 6 [I17]
(1 – vztlakový závěs; 2 – odporový závěs; 3 – hydraulický tlumič)

Kloubové rotorové hlavy jsou charakteristické třemi závěsy. Vodorovný závěs dovoluje listu mávat, svislý závěs dovoluje listu kývavý pohyb a osový závěs dovoluje listu křídélkovat. Závěsy jsou konstrukčně tvořeny ložisky s valivými členy a umožňují pouze přenos sil. Snižují tak namáhání nejen listů rotoru, ale i namáhání hřídele nosného rotoru a její uložení v hlavním reduktoru.

Dnešní kloubové rotorové hlavy se vyznačují určitou vzdáleností vodorovného závěsu od osy otáčení rotoru, viz obr. 5.2, kde je zobrazeno pět uspořádání označených římskými čísly I. až V. První tři uspořádání se používají z důvodů menších výchylek cyklického řízení pro dosažení požadované reakce, zvýšení tlumení kývání při současném zvýšení stability vrtulníku. Vzdálenost svislého závěsu by měla být co nejmenší, protože přímo ovlivňuje frekvenci a amplitudu kývání. Nejrozšířenější jsou uspořádání I. a II. Rozdíl mezi uspořádáním I. a II. je v úhlu δ mezi osou vztlakového čepu a osou listu, který je menší než 90° . Výhodou uspořádání II. je rovnoměrnější namáhání obou uložení vztlakového závěsu během motorového letu. Oproti uspořádání I. je ale výrobně složitější. Používají ho převážně vrtulníky sovětské a ruské konstrukce. Vrtulníky západních konstrukcí převážně používají jednodušší uspořádání I. Uspořádání IV. a V. se



Obr. 5.2 Uspořádání závěsů kloubových rotorových hlav [I22]

dnes vůbec nepoužívají, protože vynikají sníženou řiditelností a horší stabilitou vrtulníku.

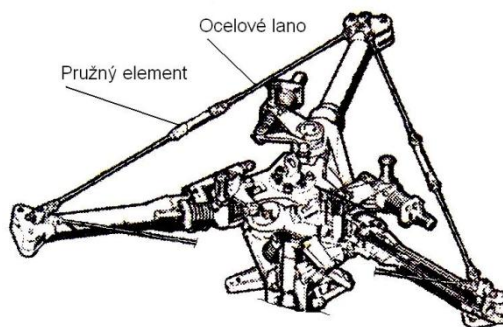
Pro kloubové rotorové hlavy jsou typické tlumiče kývání a dorazy.

5.1.1 Tlumiče kývání

Každé uchycení listu je vybavené tlumičem kývání. Jak už název napovídá, pomáhají tlumit kývavé pohyby listů. Nejdůležitější úlohu plní během přistání, při pojíždění, či při roztáčení nosného rotoru. Tlumiče mají zajistit, aby listy nezaujaly takové azimutální rozložení, při kterém by došlo ke stavu, kdy se těžiště nosného rotoru nebude nacházet na ose otáčení nosného rotoru. Pokud by se tak stalo, vznikla by nevyváženost způsobující kmitání. Pokud by se frekvence budícího kmitání rovnala frekvenci kmitání vrtulníku, nastane rezonanční stav a vrtulník bude zničen. Jev se nazývá pozemní rezonance. Nejvýznamněji se projevuje hlavně u rotorů s kloubovými rotorovými hlavami v kombinaci s kolovým podvozkem. Při eliminaci tohoto jevu také záleží na tlumičích podvozku a na nahuštění kol. Z konstrukčního hlediska se používají následující metody tlumení kývání listů.

▪ Vyvázání listů rotoru

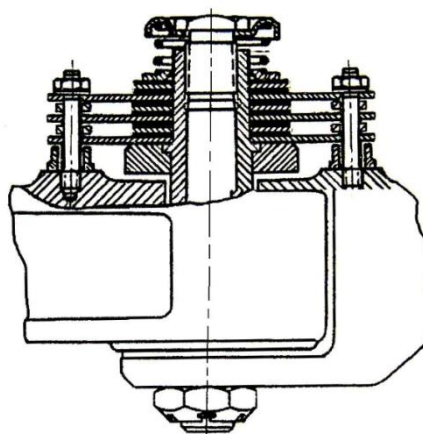
Listy jsou nejčastěji vzájemně spojeny ocelovými lany, někdy doplněné o pružné elementy. Používaly se i pružné vzpěry. Pokud má jeden nebo více listů snahu zaujmout azimutální polohy (vůči ostatním listům), které by mohly vyvolat nevyváženost, ostatní listy jim v tom působením přes lana (vzpěry) zabrání. Vyvázání listů rotoru ocelovými lany je názorně vidět na obrázku 5.3. Vyvázání listů ocelovými lany se používalo například na typech HC – 2, HC – 102 a ze zahraničních typů například na vrtulníku Alouette II.



Obr. 5.3 Vyvázání listů rotoru ocelovými lany s pružnými elementy [124]

▪ Třecí tlumiče

Skládají se z pohyblivých desek a pevných desek. Tření mezi deskami je vyvoláno pružinou. Přítláčnou sílu pružiny je možné regulovat změnou její délky pomocí šroubu. Přes jejich konstrukční jednoduchost je velkým nedostatkem potřeba pravidelného nastavování a přesného seřízení na všech listech. Další velkou nevýhodou je výrazné ovlivnění tlumicích parametrů nečistotami, vlhkostí a mastnotou. Navíc velikost tření je nepříznivě ovlivňována závislostí součinitele tření na rychlosti kývání listu. Třecí tlumiče se používaly například na vrtulnících Mi – 4.



Obr. 5.4 Třecí tlumič [123]

▪ **Hydraulické tlumiče**

Využívají hydraulického odporu při průtoku kapaliny skrz kalibrované otvory. Píst je spojen s listem a těleso tlumiče je spojeno s rotorovou hlavou. V případě, kdy jsou výchylky a rychlosti vykývnutí listu malé, tlumení zajišťují kalibrované otvory v pístu. Když jsou rychlosti a výchylky vykývnutí velké, hydraulická kapalina přeteče jednosměrným kalibrovaným ventilem. Otvory a ventily tvoří tlumicí charakteristiku tlumiče. Pohybem pístu, nebo při změně okolní teploty dochází ke změně teploty hydraulické kapaliny, čímž se mění její objem, proto jsou vybaveny termoventily a kompenzační nádrží.



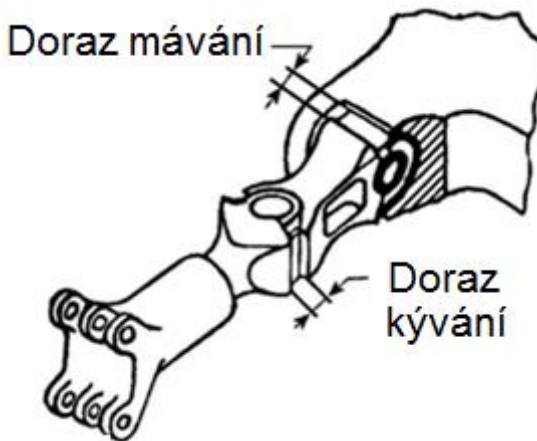
Obr. 5.5 Hydraulický tlumič [122]

▪ **Elastomerické tlumiče**

Tento typ tlumičů se používá nejen na kloubových rotorových hlavách, ale i na rotorových hlavách s pružnými členy, kde zároveň fungují i jako závěsy. Základem tlumiče je pryžový materiál. Deformací tohoto materiálu vzniká tlumicí efekt. Jsou případy, kdy se požadují lepší tlumicí vlastnosti, než jsou elastomerické tlumiče schopné samy dosáhnout. Proto se kombinují s hydraulickými tlumiči. Nazývají se Fluidlastic. Elastomerické tlumiče jsou oproti hydraulickým tlumičům méně náročné na výrobu a jsou lehčí. Údržba na nich není potřeba, pouze je třeba kontrolovat, jestli nedošlo k jejich poškození. Navíc jsou odolné vůči nečistotám.

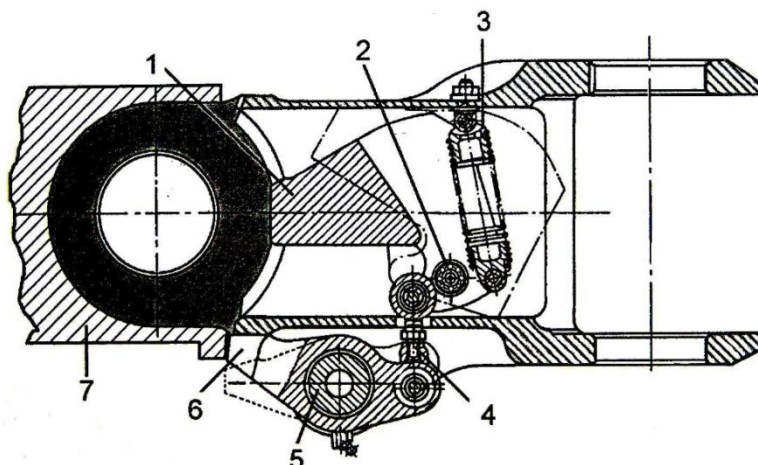
5.1.2 Dorazy

Kloubové rotorové hlavy jsou vybaveny dorazy mávání a kývání. Dorazy plní několik funkcí. Jednak omezují maximální výchylky vymávnutí a vykývnutí listů během výjimečných případů vzniklých během letu. Dále omezují výchylky vymávnutí při roztáčení a dotáčení nosného rotoru, fouká-li silný vítr. Další funkcí je omezení svěšení listů nosného rotoru během roztáčení a dotáčení, kdy by se listy mohly střetnout s ocasním nosníkem, případně by mohly ohrozit pozemní obsluhu pohybuující se v okolí vrtulníku.



Obr. 5.6 Dorazy na ramenu kloubového rotoru [122]

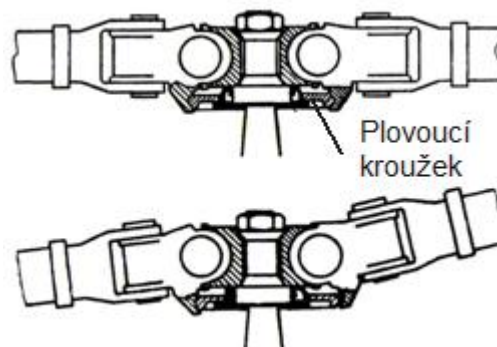
Větší vrtulníky s delšími a ohebnějšími listy mají kromě pevných spodních dorazů, které při letu dovolí velké mávání listů, navíc další spodní omezovače mávání, omezující svěšení listů během roztáčení a dotáčení nosného rotoru. Tyto omezovače jsou často založeny na působení odstředivých sil, působících na závaží, jež je mechanismem spojené se západkou.



Obr. 5.7 Odstředivý omezovač svěšení listu [I21]

(1 – závaží; 2 – čep; 3 – pružina; 4 – táhlo; 5 – čep; 6 – konec ramena sloužící jako západka; 7 – rotorová hlava)

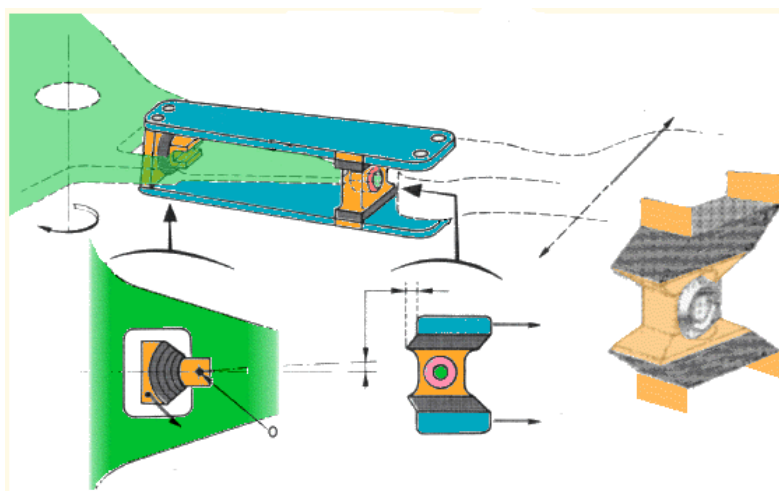
Vrtulníky Schweizer mají zvláštní konstrukční řešení dorazů mávání ve formě plovoucího kroužku. Uložení každého listu je opatřeno ramínkem, jehož konec je v otvoru plovoucího kroužku. Celý kroužek se může posouvat vodorovně kolem hřídele nosného rotoru. Při malých otáčkách se ramínka opřou o vnitřní strany otvorů, čímž se zabrání nadměrnému svěšení listů.



Obr. 5.8 Kloubová rotorová hlava s plovoucím kroužkem [I22]

5.2 Rotory s pružnými členy

Kloubové rotorové hlavy z bodu 4.1 jsou výrobně složité, náročné na údržbu a oproti jiným konstrukcím poměrně těžké. Cílem vývoje bylo jejich vylepšení tak, aby se výše zmíněné nedostatky eliminovaly. Díky novým materiálům, pokroku v konstrukci a výrobních technologiích bylo možné závěsy kloubových rotorových hlav, tvořených valivými ložisky, nahradit speciálně tvarovanými elastomerickými členy. Typickým příkladem použití této konstrukce je rotorová hlava typu Starflex na typu Eurocopter AS 355.



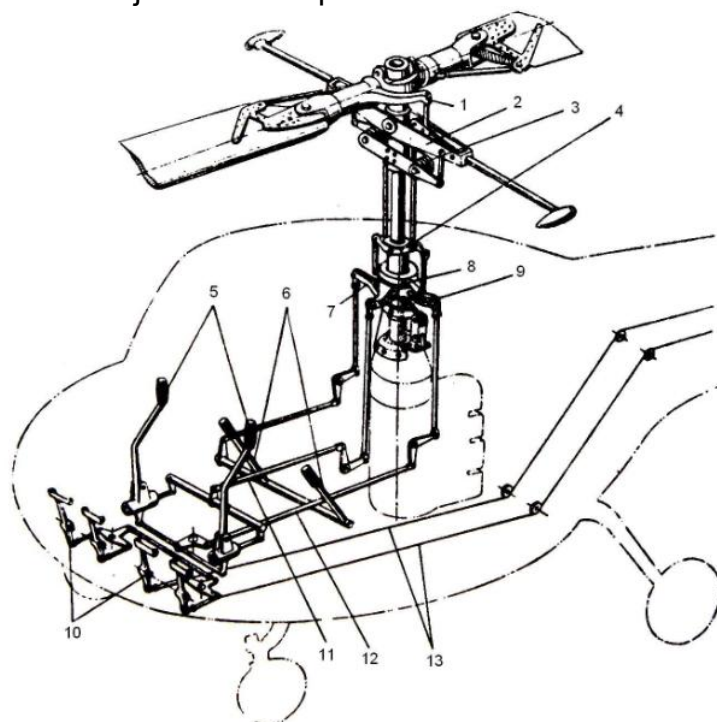
Obr. 5.9 Zobrazení jednoho ramena rotorové hlavy typu Starflex [I25]
(Pružné elementy na obrázku mají černou barvu.)

5.3 Polotuhé rotory

Do této kategorie patří dvoulisté rotory. Rotorová hlava je vybavena pouze osovými závěsy, aby listy mohly měnit úhly nastavení. Celá rotorová hlava je k hřídeli nosného rotoru připevněna přes společný vodorovný závěs, který prochází hřídeli nosného rotoru, kolmo na její osu. Tento závěs dovoluje mávání listů, tím způsobem, že se celá rotorová hlava natáčí okolo tohoto společného vodorovného závěsu. Velikost natočení kolem společného vodorovného závěsu je omezena jeho konstrukcí. Listy jsou upevněny k rotorové hlavě napevno. Kořenová část listu přenáší síly od kývavého pohybu. V přenosu sil pomáhá odporové táhlo, spojující odtokovou hranu listu s rotorovou hlavou. Odporovým táhlem se při ustavování listů do rotorové hlavy nastavuje osa listu tak, aby procházela osou otáčení nosného rotoru. Největší výhodou polotuhých rotorů je jednoduchost a nízká hmotnost.

5.3.1 Rotor firmy Bell

Základem je polotuhý rotor, který je navíc vybaven stabilizačním vahadlem, tvořeného tyčí. Na koncích tyče jsou umístěna závaží. Vahadlo funguje podobně jako gyroskop. Tento typ rotorové hlavy byl použit na vrtulnících Bell 47, nebo UH – 1 Iroquois. Stabilizační vahadlo je propojeno s listy rotoru a s deskou cyklicky. Pomáhá stabilizovat vrtulník a snižuje náročnost pilotáže.



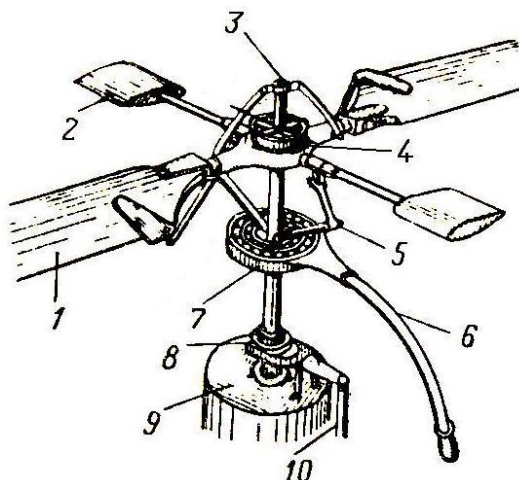
Obr. 5.10 Rotor firmy Bell [123]

(1 – ovládací páka listu; 2 – vahadlo; 3 – tlumič vahadla; 4 – diferenciální mechanismus; 5 – páky cyklického řízení; 6 – páky kolektivního řízení; 7 – vodící páka ovládání kolektivu; 8 – šikmá deska; 9 – pevná objímka šikmé desky; 10 – pedály nožního řízení; 11 – táhlo podélného řízení; 12 – táhlo příčného řízení; 13 – lanový převod nožního řízení)

5.3.2 Rotor Hiller

Je podobné konstrukce jako rotor firmy Bell. Místo stabilizační tyče se závažími je u rotoru Hiller dvojice pomocných listů – pádel na společné tyči. Tyč pádel je spojena s listy nosného rotoru a s deskou cyklicky. Páidla nejen stabilizují vrtulník, ale zmenšují síly potřebné pro ovládání úhlů nastavení listů nosného rotoru. Nakloněním

desky cyklicky dojde k natočení tyče s pádly. Tím se změní úhly nastavení pádel. Rovina tyče s pádly se natočí. Protože je spojena s listy nosného rotoru, změní jejich úhly nastavení. Rovina rotorového disku se následně nakloní (naklopí) do požadovaného směru daného vychýlením páky cyklického řízení.

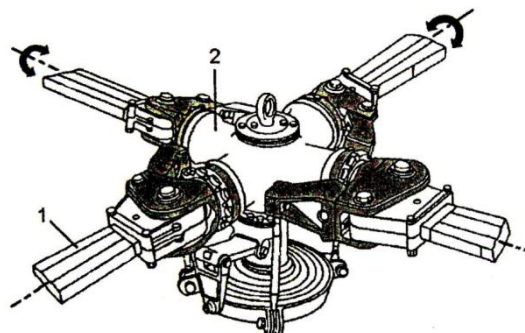


Obr 5.11 Rotor Hiller [123]

(1 – list nosného rotoru; 2 – pádlo; 3 – vahadlo řízení; 4 – objímka univerzálního kloubu; 5 – nůžky; 6 – řídicí páka cyklicky; 7 – šikmá deska; 8 – objímka kolektivního řízení; 9 – reduktor; 10 – táhlo kolektivního řízení)

5.4 Tuhé rotory

Tuhé rotory vynikají nad ostatními jednoduchostí. Rotorové hlavy jsou vybaveny pouze osovým závěsem. Mávání a kývání listů probíhá na základě deformace štíhlých pružných kořenových částí listů. Kořenové části slouží zároveň i jako tlumiče kývání. Vrtulník je značně citlivý na řízení. Mezi nevýhody patří citlivost na turbulenci a poryvy větru, kdy se změny sil působící na rotor přímo přenášejí na konstrukci vrtulníku, čímž se let stává méně pohodlným, než například s kloubovým rotorem. Dalším značným omezením je velikost namáhání působící na hřídel nosného rotoru při prudkých manévrech a změnách polohy vrtulníku, protože se otáčející rotor chová jako setrvačnick. Již první průkopníci používali na svých strojích tuhé rotory. Bohužel v té době neměli potřebné znalosti o tom, co způsobuje nestabilitu vrtulníků. Po zjištění příčin nebyly k dispozici materiály, umožňující vytvořit funkční tuhý rotor. Tuhý rotor byl například použit na vrtulníku MBB Bö – 105.



Obr 5.12 Rotorová hlava vrtulníku Bö - 105 [122]

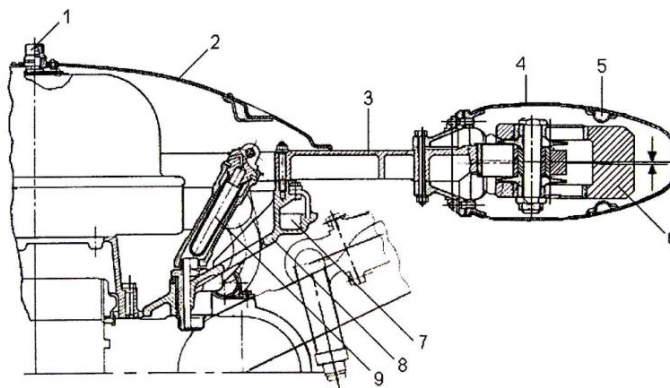
(1 – list; 2 – osový závěs)

5.5 Tlumiče vibrací

U některých konstrukčních řešení nosných rotorů je možné se setkat s tlumiči vibrací. Vibrace jsou způsobeny buď mechanickými důvody, nebo aerodynamickými důvody. Vibrace je pak možné rozdělit na vibrace nízkých frekvencí, středních frekvencí a vysokých frekvencí. Vibrace je možné snížit co nejlepším vyvážením všech rotujících prvků, vyššími otáčkami nosného rotoru, vyšším počtem listů, nebo i větší vzdáleností mezi nosným rotorem a drakem.

▪ Tlumič torzních kmitů celého rotoru

Tento typ tlumiče je možné spatřit například na typu Mil Mi – 171. Nejviditelnější částí tlumiče je pět žlutých krytů nad rotorovou hlavou. Uvnitř každého pouzdra je závaží, které je otočně uloženo na koncích ramen. Osy otáčení závaží jsou rovnoběžné s osou otáčení nosného rotoru. Ramena spojují závaží s rotorovou hlavou. Závaží při vibrování rotorové hlavy kmitají s opačnou fází, tím ruší původní vibrace rotoru.



Obr. 5.13 Tlumič torzních kmitů celého rotoru [I21]

(1 – matice; 2 – kryt; 3 – rameno; 4 – kryt (na Mi – 171 žluté barvy); 5 – doraz; 6 – závaží; 7 – kompenzační nádržka hydraulických tlumičů; 8 – nosník; 9 – plnicí hrdlo)

▪ Hmotové tlumiče vibrací

Tento typ tlumičů je například na rotorové hlavě vrtulníku EC 145. Tlumiče jsou opět závaží, otočné kolem horizontální osy. Při vzniku vibrací závaží opět kmitají s opačnou fází, čímž ruší původní vibrace.



Obr. 5.14 Hmotové tlumiče vibrací [I26]

5.6 Rotorové listy

Rotorové listy je možné považovat za křídla o vysoké štíhlosti pohybující se vůči vzduchu otáčením nosného rotoru. Rotorové listy, podobně jako křídla letadel, mají různé půdorysné tvary, profily a konstrukci. Půdorysný tvar listů je často obdélníkový s různými tvary špiček listů pro dosažení lepších aerodynamických vlastností a speciálně tvarovanými kořenovými částmi pro omezení nepříznivých účinků zpětného obtékání.

Počet listů závisí nejvíce na účelu použití vrtulníku, požadovaných letových vlastnostech, počtu otáček nosného rotoru a na vzletové hmotnosti. Matematicky se vyjadřuje součinitelem plnosti rotoru σ . Je to poměr mezi plochou všech rotorových listů a plochou rotorového disku. Tento poměr by se měl pohybovat v rozmezí 0,03 až 0,09.

$$\sigma = \frac{k \cdot b}{\pi \cdot R_R}$$

Na rotorové listy jsou kladeny značné nároky. Během výroby je nutné zajistit vysokou jakost a míru shody mezi jednotlivými listy. Listy musí vydržet velká namáhání způsobená odstředivými, setrvačnými a aerodynamickými silami při co nejnížší vlastní hmotnosti. Nejvíce namáhané jsou kořenové části listů, protože přenášejí veškeré namáhání mezi listy a rotorovou hlavou. Spolu s nízkou hmotností rotorových listů je potřeba dodržet vhodné hmotové rozložení, aby list měl dobré aeroelastické vlastnosti, nebyl náchylný ke vzniku třepotání (ohybové torzní kmitání) a vyžadoval přiměřené síly pro řízení.

Třepotání je nejvíce ovlivněno vzájemnou polohou aerodynamické osy (AO), hmotové osy (HO) a elastické osy listu (EO), viz obr. 5.15.

Pro minimalizaci řídících sil je nejvýhodnější, když jsou aerodynamická osa, hmotová osa a osa křídélkování totožné. Pokud totožné nejsou, projevuje se to periodickými silami, jež mohou značně ovlivňovat síly potřebné pro řízení.

Listy se vyvažují staticky a dynamicky. Během statického vyvažování se zjišťuje kromě celkové hmotnosti listu i její rozložení po délce listu a těživě profilu. Pro vzájemnou zaměnitelnost listů je nejdůležitější dodržet rozložení hmotnosti po délce listu. Je-li potřeba korigovat délkové rozložení hmotnosti, používají se závaží umístěná poblíž náběžné hrany nejčastěji v koncových částech listu, ale je možné je umístit i v kořenových částech. Při statickém vyvážení listu po těživě listu se zjišťuje poloha hmotové osy. Aby se nacházela ve vhodném místě těživy profilu, přidávají se k náběžným hranám listů závaží. Do dynamického vyvažování se řadí změna úhlu nastavení listů, nastavování vyvažovacích plošek a hmotové vyvážení rotoru. Během montáže listů může dojít k odchylkám v úhlech nastavení listů. Tím vznikají odchylky tahových sil na jednotlivých listech. Korekce úhlů nastavení jednotlivých listů je možné provést regulováním délky táhla cyklického řízení. Při vyšších rychlostech obtékání listů nosného rotoru může vzniknout nevyváženost, způsobená posunutím působíště tahové síly. Tím dojde ke zkroucení listu a ke změně úhlu nastavení. Zábрана tohoto jevu spočívá v použití různě ohnutých vyvažovacích plošek na odtokové straně listu. Hmotovým závažím umístěným v blízkosti hřídelle nosného rotoru, případně přímo na hřídeli, se vyrovnávají odchylky od ideálního hmotového rozložení hlavy a hřídelle nosného rotoru, vzniklé během výroby, nebo vlivem provozního opotřebení.

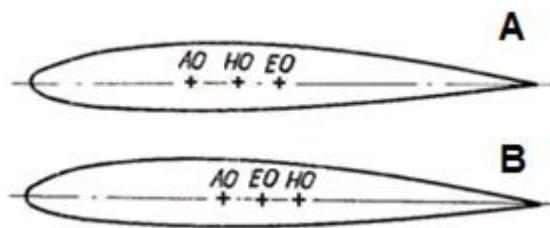
Po připevnění listů se dále kontroluje nastavení výšky konců listů nosného rotoru. Cílem je, aby konce všech listů ležely při otáčení nosného rotoru ve stejné rovině. Pokud tomu tak není, vznikají škodlivé vibrace. U tuhých a polotuhých rotorů se navíc kontroluje nastavení listů nosného rotoru v horizontální rovině. Snahou je zajistit, aby podélná osa listu procházela osou otáčení nosného rotoru. Při velké odchylce by vznikly silné vibrace a nestabilita.

Listy se liší použitými materiály.

▪ Dřevěné

Dřevěné listy se dnes nepoužívají. Příklady typů vrtulníků s dřevěnými listy jsou HC – 2, HC – 102, či Mil Mi – 1. Dřevěné listy se poměrně jednoduše vyráběly, přičemž dřevo jako stavební materiál mělo dobré mechanické vlastnosti při přiměřené hmotnosti. Vždy se kombinovalo několik druhů dřeva.

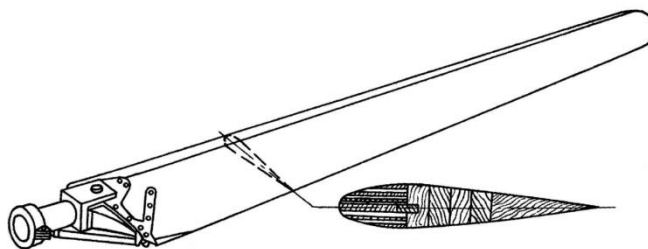
Jako ochrana vůči špatnému počasí se povrch potahoval skelným plátnem a prováděly se speciální nátěry. Více namáhaná místa, jako kořenové části a náběžné hrany, se opatřovaly kovovými díly. Za hlavní nevýhodu lze považovat vyšší rozdíly tuhostí jednotlivých listů a udržování ochranných nátěrů.



Obr. 5.15 Polohy os po těživě listu [124]

(A) Třepotání není možné;

(B) Třepotání je možné)



Obr. 5.16 Plný dřevěný list nosného rotoru [123]

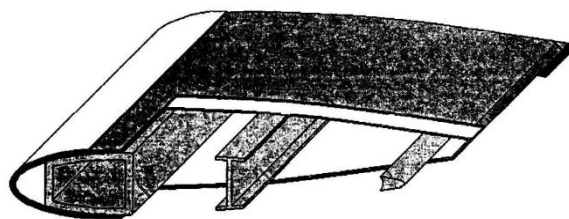
▪ Kovové

Kovové listy odstranily nedostatky dřevěných. Bohužel kovové listy mají jiné nevýhody. Prvním problémem je spojování jednotlivých částí do jednoho celku. Původně se používalo nýtování, později se přešlo k lepení. Druhou komplikací je omezená životnost kovových konstrukcí při extrémním proměnlivém zatížení. Z konstrukčního hlediska existuje několik řešení kovových listů.

- **Žebro – nosníková konstrukce**
- **Voštino – nosníková konstrukce**
- **Nosníkovo – dělená konstrukce**

Žebro – nosníková konstrukce

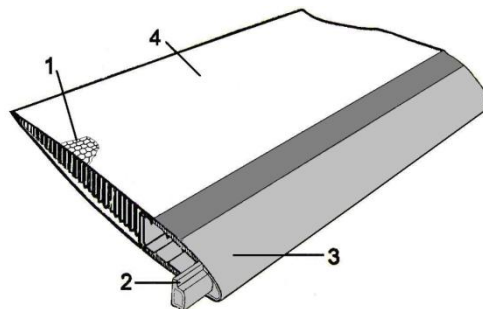
Vyznačuje se skříňovým nosníkem po celé délce listu. Náběžnou hranu tvoří nerezový plech připájený k hlavnímu nosníku. Duralový potah zadní části vyztužuje další nosník profilu I. Profil listu je zakončen pomocnou lištou, tvarující a zpevňující odtokovou hranu.



Obr. 5.17 Žebro – nosníková konstrukce [I22]

Voštino – nosníková konstrukce

Je tvořena dutým duralovým nosníkem po celé délce listu, jenž tvoří přední část listu. Tato část zároveň slouží jako nosník přenášející veškeré zatížení. Zadní část je potažena tenkým duralovým plechem, který obaluje hliníkovou voštinu, případně polyuretanovou pěnu.

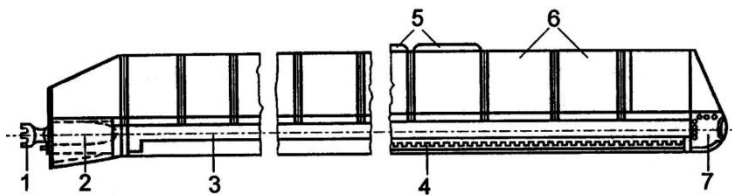


Obr. 5.18 Voštino – nosníková konstrukce [I21]

(1 – voštinová výplň; 2 – závaží;
3 – nosník; 4 – potah)

Nosníkovo – dělená konstrukce

Oproti předchozímu řešení se liší konstrukcí zadní části listu. Ta je rozdělena na sekce o délce 400 mm až 600 mm slepené z elektronových, duralových plechů, či vyplněné polyuretanovou pěnou. Sekce jsou mezi sebou odděleny žebry. Tato konstrukce je výhodná na bojových strojích. Při poškození zadních částí listů nepřátelskou palbou se opraví, případně vymění, poškozené sekce listů.



Obr. 5.19 Nosníkovo – dělená konstrukce [I21]

(1 – vidlice pro připojení k rotorové hlavě;
2 – ocelová manžeta; 3 – nosník; 4 – plech z nerezavějící oceli; 5 – závaží; 6 – sekce; 7 – kapkovitý tvar špičky listu)

▪ Kompozitové

Kompozitové listy jsou tvořeny hlavně uhlíkovými kompozity, kevlarovými kompozity, nebo kompozity se skelnými vlákny. Mezi kladné vlastnosti patří odolnost proti korozi, dlouhá životnost, vysoká odolnost vůči únavě při výhodné hmotnosti. Navíc je lze vyrobit velmi přesně. Největší nevýhodou je vysoká cena. Kompozitové listy jsou zpravidla dvojího konstrukčního řešení.

Kompozitové listy ze skelných vláken

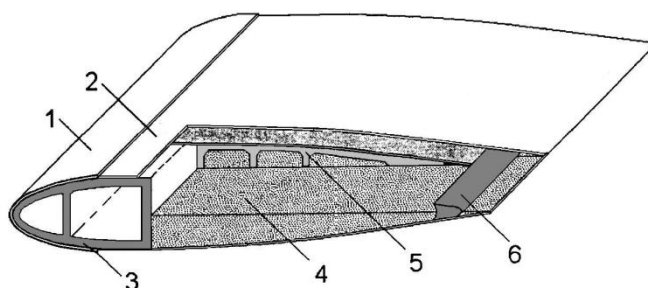
Nosník, tvořící přední část listu, je vyroben ze skelného laminátu vyplněného pěnou. Náběžná hrana je chráněna ocelovým plechem nebo pryžovým materiálem. Vnitřní prostor střední části listu je vyplněn polyuretanovou pěnou. Odtokovou část tvaruje a vyztužuje laminátová lišta. Potah listu je z impregnovaného plátna ze skelných vláken.

▪ Smíšené

V dnešní době do této kategorie patří listy kombinující kovové a kompozitní materiály. Při pohledu do historie můžeme za smíšené rotorové listy považovat dřevěné listy vybavené kovovými díly.

Kompozitové listy s kovovým nosníkem

Základ tvoří dutý ocelový nosník formující náběžnou část listu. Náběžnou hranu chrání ocelový plech nebo pryžový materiál. Střední část tvarují a vyztužují hliníková žebra. Prostor mezi nimi je vyplněn polyuretanovou pěnou či hliníkovou voštinou. Zadní část tvoří ocelová lišta, jež spojuje a vyztužuje horní a spodní konec laminátového impregnovaného plátna ze skelných vláken, tvořícího potah listu.



Obr. 5.20 Kompozitový list s kovovým nosníkem [I21]

(1 – ochrana z nerezové oceli či pryže;
2 – potah ze skelných vláken; 3 – ocelový nosník;
4 – polyuretanová pěna; 5 – hliníkové žebro;
6 – ocelová lišta)

5.7 Mechanismy ovládání cyklického a kolektivního řízení nosných rotorů

Součástí nosných rotorů jsou i mechanismy, s jejichž pomocí se zajišťuje cyklické a kolektivní nastavování listů nosného rotoru.

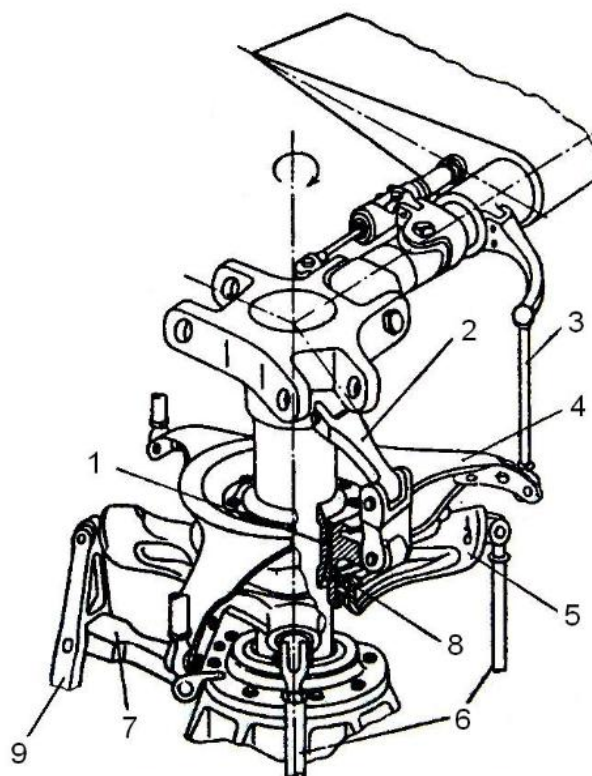
5.7.1 Šikmá deska

Součástí nosných rotorů je i mechanismus ovládající listy rotoru dle povelů pilota. V dnešní době se nejčastěji používají různá konstrukční řešení využívající šikmých desek. Příklad jednoho z nich je na obr. 5.21.

Listy jsou spojeny táhly 3 s rotující objímkou 4. Rotující objímka se může naklánět kolem kulového kloubu 1 a vyvolávat tak cyklický pohyb listů. Nerotující

objímka 5 je umístěna pod rotující objímkou 4. Mezi nimi je ložisko 8. Nerotující objímka je dále spojena s táhly podélného a příčného řízení 6.

Pákou 7 se obě objímky mohou posouvat podél osy hřídele nosného rotoru, čímž se mění úhly nastavení listů kolektivně.

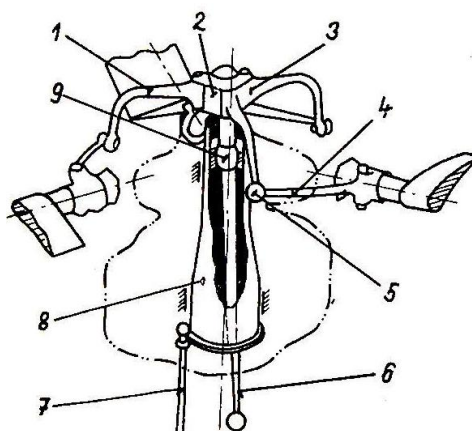


Obr. 5.21 Šikmá deska [124]

(1 – kulový kloub; 2 – nůžky pro přenos krouticího momentu; 3 – táhla; 4 – rotující objímka; 5 – pevná objímka; 6 – táhlo příčného a podélného řízení; 7 – pomocné uložení táhla kolektivu; 8 – ložisko; 9 – táhlo kolektivu)

5.7.2 Systém pavouk

Jde o konstrukční řešení, které se neujalo. Vychylováním páky řízení 6 v kloubu 9 se vyvolává cyklický pohyb listů. Posuvem celého mechanismu táhlem 7 se dosáhne kolektivní změny úhlů nastavení listů.

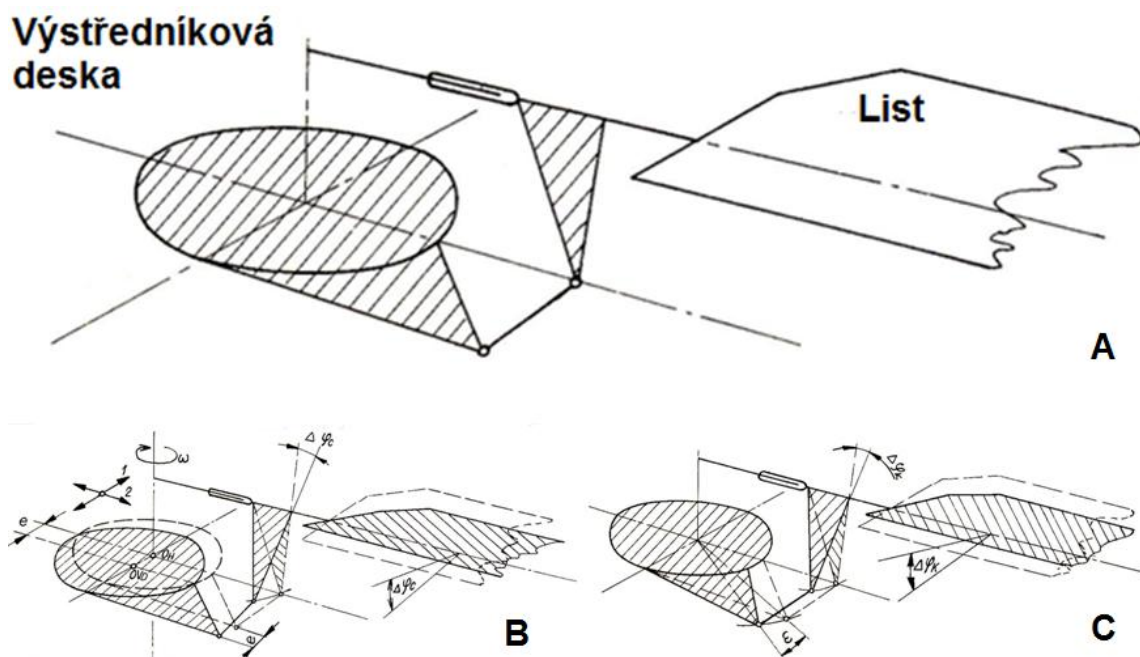


Obr. 5.22 Pavouk [123]

(1 – ohnutá páka; 2 – objímka; 3 – ohnutá páka; 4 – páka listu; 5 – kulový závěs; 6 – páka řízení; 7 – táhlo řízení kolektivu; 8 – pouzdro; 9 – kulový kloub)

5.7.3 Výstředníková deska

Tento systém byl vynalezen a patentován Ing. Jaroslavem Šlechtou, který ho aplikoval na vrtulnicích vlastní konstrukce, z nichž nejznámější jsou typy HC – 2, HC – 102 a HC – 3. Na tehdejší dobu se jednalo o revoluční řešení, které bylo oproti jiným návrhům jednoduché, lehké a funkční. Cyklického nastavování listů nosného rotoru se dosáhlo vystředěním výstředníkové desky, jak je vidět na obrázku 5.23. Posouváním desky podél osy hřídele po závitu se strmým stoupáním se docílilo natáčení desky. Tímto způsobem se ovládalo kolektivní nastavení listů.



Obr. 5.23 Výstředníková deska [124]

(A – základní uskupení; B – cyklická změna nastavení listů posouváním výstředníkové desky v naznačených směrech 1 a 2; C – kolektivní nastavování listů natáčením výstředníkové desky)

5.8 Vybraná netradiční konstrukční řešení nosných rotorů

5.8.1 Rotory vrtulníků Enstrom

Rotory firmy Enstrom jsou třílisté, kloubového typu. Zajímavostí je způsob ovládání. Táhla cyklického a kolektivního řízení jsou uvnitř dutého hřídele nosného rotoru. Šikmá deska je umístěna pod hlavním reduktorem.



Obr. 5.24 Enstrom 480B [127]

5.8.2 Rotor Eurocopteru EC 135

Čtyřlístý nosný rotor typu EC 135 se těžko zařazuje do některé z výše uvedených skupin. Lze o něm říci, že je bez ložisek a bez závěsů. Zvláštností je, že není vybaven rotorovou hlavou, k níž se připojují listy nosného rotoru, tak jako u naprosté většiny vrtulníků. Rotorová hlava je prakticky integrována do vnitřních částí listů. Hřídel nosného rotoru je pouze opatřena čtyřmi vidlicemi. Do těchto vidlic se upevňují kořeny listů nosného rotoru, ze kterých je vidět pouze výstupní část. Kořen každého listu přenáší veškeré síly a momenty působící z listu na hřídel nosného rotoru. Táhlá pro ovládání úhlu nastavení listu jsou uchycena k vnějšímu povrchu dutého aerodynamického krytu. Na horní a dolní straně krytu jsou vidět dvě hnědá válcová tělesa. Jsou to elastomerické tlumiče. Tyto tlumiče jsou spojeny tyčí uloženou v kulovém ložisku, nacházejícího se na kořeni listu. Uložení tak dovoluje měnit úhly nastavení a zároveň slouží jako opora pro tlumení kývání.



Obr. 5.25 Rotorová hlava EC 135 [128]

5.8.3 Rotor firmy Lockheed

Firma Lockheed na svých typech vrtulníků použila čtyřlístý tuhý rotor stabilizovaný gyroskopem. Použit byl například u typu AH – 56 Cheyenne. Základ tvořila tuhá titanová rotorová hlava vybavená pouze osovým závěsem. Nad rotorovou hlavou se nacházel gyroskop tvořený čtyřmi tyčemi, na jejichž koncích byla závaží. Gyroskop byl propojen jak s řízením, tak i s nastavováním rotorových listů. Poskytoval vrtulníku neuvěřitelnou stabilitu, výhodnou pro zaměřovací systémy a jednodušší pilotáž.



Obr. 5.26 AH – 56 Cheyenne [129]

5.8.4 Jednolistý rotor

Tento typ rotoru se vyskytl na typech Bölkow Bö – 102 a Bö – 103. Jak již název napovídá, byl nosný rotor vybaven pouze jediným listem. Kvůli vyvážení rotoru bylo proti listu použito rameno, na jehož konci bylo umístěno závaží. Typ Bö – 103 byl schopen letu na rozdíl od Bö – 102, který dovoľoval pouze vísání. Podle pádel je vysoce pravděpodobné, že list byl ovládán a stabilizován podobně jako u rotoru firmy Hiller.



Obr. 5.27 Vrtulník Bö - 102 [I30]

5.8.5 Rotory pro vysoké rychlosti

- Rotor Derschmidt

Problémy při letu vrtulníku vysokými rychlostmi tento typ rotoru řešil tím, že každý list pětistého rotoru mohl vykývnout až o 40° od neutrální polohy. Listy byly mezi sebou propojeny speciálním mechanismem, aby kývání bylo kontrolované a synchronizované. Vykývnutím postupujícího listu po směru letu došlo ke snížení rychlosti obtékání. Ustupující list měl být naopak vykývnutím urychlen. Vývoj rotoru probíhal mezi 50. a 60. lety 20. století. Koncepce následně byla testována na vrtulníku Bö – 46. K rozšíření tohoto konstrukčního řešení nedošlo, protože bylo konstrukčně složité a trpělo vibracemi.



Obr. 5.28 Bölkow Bö - 46 [I31]

- Rotory typu ABC (Advanced Blade Concept rotor)

Tento typ rotorů je vhodné zmínit, protože firma Sikorsky v nedávné době představila svůj demonstrátor X2, který 26. července 2010 dosažením rychlosti 416,7 km/h překonal rychlostní rekord ve 3,5 tunové třídě vrtulníků. Firma Sikorsky s uspořádáním rotorů jako na typu X2 experimentovala již na typu Sikorsky XH – 59A v 70. letech. Nosnou soustavu tvoří dva koaxiální rotory



Obr. 5.29 Sikorsky X2 [I32]

s tuhými rotorovými hlavami. Tím, že se každý rotor otáčí na opačnou stranu, se kompenzuje nesymetrie tahu na každém rotoru. Při zvyšující se rychlosti letu se většina tahu produkuje na postupujících listech. Ustupující listy jsou nastaveny tak, aby produkovaly co nejmenší tah.

6 Vyrovnávací konfigurace – směrové řízení

Na otáčející se nosný rotor působí odpor vzduchového prostředí. Velikost odporu je především ovlivněna úhlem nastavení listů, rychlostí letu a hustotou vzduchu. Aby otáčky rotoru neklesaly, je potřeba dodávat výkon z motorů. V důsledku třetího Newtonova zákona akce a reakce však vzniká nepříznivý reakční moment. Každý vrtulník s jedním nosným rotorem musí mít určitým způsobem vyřešenu kompenzaci reakčního momentu. Základním principem všech vyrovnávacích konfigurací je vytvoření síly na co nejdelším rameni, které má na vrtulnicích podobu ocasního nosníku. Zároveň tyto vyrovnávací konfigurace zastávají úlohu výkonných členů směrového řízení, kdy je možné změnou produkovaného tahu vrtulník otáčet kolem svislé osy. Pokud je potřeba otočit vrtulníkem ve směru otáčení nosného rotoru, musí vyrovnávací konfigurace nejen kompenzovat reakční moment, ale navíc musí navýšit svůj tah pro dosažení požadované rychlosti otáčení. Nárůst potřebného tahu ocasního rotoru vyžaduje navýšení dodávaného výkonu. Pokud se má vrtulník otáčet na druhou stranu, vyrovnávací konfigurace musí snížit produkovaný tah. Z toho je patrné, že transmisní soustava spolu s ocasním nosníkem je značně namáhaná. V dnešní době se používají tři typy vyrovnávacích konfigurací.

6.1 Ocasní rotory

Patří mezi nejčastěji používané. Někdy se nazývají vyrovnávací rotory. Základ opět tvoří rotorová hlava, na kterou je připevněno zpravidla dva až osm rotorových listů. Konstrukčně jsou velmi podobné listům nosných rotorů. Na ocasní rotory jsou kladeny také téměř stejné požadavky jako na nosné rotory. V porovnání s nosnými rotory mívají přibližně pětinový průměr a pětinasobné otáčky. Celkově jsou konstrukčně jednodušší, protože není požadována cyklická změna úhlů nastavení listů.

Většinou ocasní rotory fungují jako tlačné, ale mohou být i tažné. Tlačná verze díky vyšší účinnosti snižuje namáhání ocasního nosníku. Kvůli proudění od nosného rotoru je otáčení ocasních rotorů zpravidla takové, že listy procházející spodními polohami se pohybují směrem dopředu. Velikost tahu se mění kolektivní změnou úhlů nastavení listů uložených v osových závěsech. Rozmezí změny úhlů nastavení dosahuje až 30° . Aby nedošlo k překročení povoleného zatížení prudkým vyšlápnutím pedálů řízení, je do soustavy zabudován omezovač. Změna úhlů nastavení je konstrukčně například docílena šroubovým mechanismem s velkým stoupáním. Šroubový mechanismus je ovládán řetězovým převodem. U některých vrtulníků s nízkou vzletovou hmotností je šroubový mechanismus nahrazen pákovým mechanismem s táhly.

Mezi výhody ocasních rotorů se řadí vysoká spolehlivost a konstrukční jednoduchost, hlavně u dvoulistého ocasního rotoru. Výhodou je i snadné ovládání a oproti dalším konfiguracím jsou energeticky efektivní při zachování nízké hmotnosti. To se projevuje hlavně u středně těžkých a těžkých



**Obr. 6.1 Ocasní rotor
AH - 64 Apache [I33]**

vrtulníků. Nevýhodou je poměrně velký hluk kvůli vzájemnému ovlivňování proudu vzduchu vytvořeného nosným rotorem a vyrovnávacím rotorem. Jednou z možností, jak snížit hluk, je uspořádat listy do tvaru X. Toto řešení je například u typu AH – 64 Apache.

Konstrukčně se ocasní rotory dělí podobně jako nosné rotory.

- **Tuhé ocasní rotory**

Vynikají konstrukční jednoduchostí. Tato jednoduchost je vykoupena značným namáháním hřídelů ocasních rotorů a ocasních nosníků, kvůli vzniku nesymetrického tahu během letu vrtulníku. Nesymetrický tah při dopředném letu posunuje výsledný tahový vektor směrem dolů, pokud je otáčení ocasního rotoru takové, že listy se ve spodních polohách pohybují směrem dopředu. Vzniká tak velký ohybový moment. Tuhé ocasní rotory se používají minimálně.



Obr. 6.2 Příklad vrtulníků se čtyřlístým tuhým ocasním rotorem - AH - 56 Cheyenne [I34]

Následující typy ocasních rotorů svým konstrukčním řešením již omezují nepříznivý vliv nesymetrie tahu.

- **Ocasní rotory s kloubovým zavěšením listů**

Rotorová hlava ocasního rotoru je vybavena osovým a vztakovým závěsem. Svislé závěsy se zpravidla nepoužívají, protože vliv Coriolisovy síly je malý. Použitím kloubového zavěšení se snižuje vliv nesymetrie tahu a tím i namáhání listů, hřídele vyrovnávacího rotoru a reduktoru.



Obr. 6.3 Kloubový ocasní rotor Mi - 17 [I35]

- **Ocasní rotory s průběžným nosníkem**

Toto uspořádání se používá na dvoulistých ocasních rotorech. Dvoulistý ocasní rotor má podobnou konstrukci rotorové hlavy jako u polotuhého nosného rotoru, kde je rotorová hlava s rotorovými listy přichycena k hřídeli pomocí společného čepu. Nesymetrický tah je eliminován nakloněním celé roviny ocasního rotoru kolem společného čepu.



Obr. 6.4 Dvoulistý ocasní rotor Schweizeru 300 CB [136]

- **Ocasní rotory s pružnými členy**

U některých konstrukčních řešení ocasních rotorů, podobně jako u nosných rotorů, se také používají pružné členy. Příkladem může být ocasní rotor vrtulníku AS 355 F2, kde je mávání listů dovoleno přes pružné elementy upevněné na základní desce tvořící hlavu ocasního rotoru.



Obr. 6.5 Ocasní rotor s pružnými členy vrtulníku AS 355 F2 [136]

6.2 Fenestron

Fenestrony dnes výhradně používá evropský výrobce vrtulníků, společnost Eurocopter. Jedná se o druh ventilátoru, tvořeného vícelistým rotorem a statorem v prstenci na konci ocasního nosníku. Poprvé se tato konfigurace použila v 60. letech na typu Aerospatiale SA – 341 Gazelle.

Mezi výhody tohoto řešení patří vysoká bezpečnost pozemní obsluhy spojená s eliminací potenciálního střetu se zemí. Proud vzduchu vytvořený fenestronem není na rozdíl od klasických koncepcí zastíněn svislým stabilizátorem. Díky své konstrukci je Fenestron méně ovlivňován vnějším prouděním a prouděním od nosného rotoru. Fenestron tedy disponuje spolu s vyšší účinností řízení také nižším potřebným výkonem pro jeho provoz. Příkladem může být typ SA – 341, u něhož se udává 20% úspora výkonu při rychlosti 250 km/h oproti konfiguraci s vyrovnávacím rotorem. Nemalou výhodou je také snížení hluku. Největší nevýhodou je vyšší složitost.

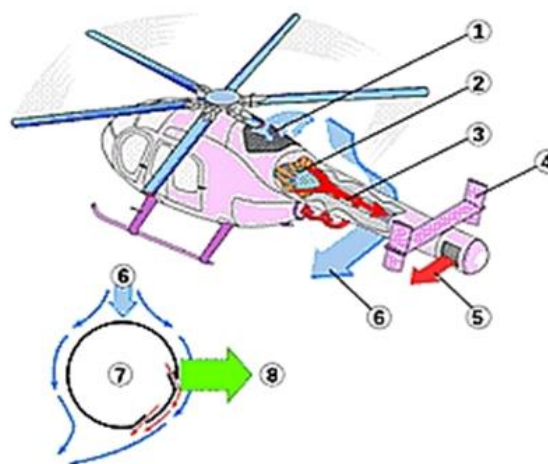


Obr. 6.6 Fenestron EC 120 [136]

6.3 NOTAR

Jde o zkratku No Tail Rotor. Systém je používán na vrtulnících značky MD Helicopters, která je dnes součástí koncernu Boeing. Nejvýznamnějším přínosem tohoto systému je snížení hluku. NOTAR poskytuje nejvyšší bezpečnost pozemní obsluhy z výše uvedených konfigurací, protože nepotřebuje žádné vnější otáčející se prvky, které by mohly způsobit poranění.

Základem je dmychadlo s variabilním nastavením lopatek, umístěné v zadní části trupu, jenž vhání vzduch do dutého ocasního nosníku. Po délce ocasního nosníku na pravé straně jsou otvory, vhánějící vzduch pod nosník. Tím dochází k urychlení proudu vzduchu od nosného rotoru obtékající nosník na pravé straně, čímž vzniká tah. Tento tah po délce ocasního nosníku tvoří téměř 60% celkového kompenzačního momentu, nutného v režimu visení. Zbytek je vytvářen otočnou tryskou na konci nosníku. Natáčením trysky kolem podélné osy ocasního nosníku se vrtulník i směrově řídí. Výhodami systému jsou absence reduktorů, transmisních hřídelí, jejich uložení, vysoká životnost, nenáročná údržba a velmi nízké hlukové emise. Nevýhodou je vyšší hmotnost oproti ostatním koncepcím, větší prodleva při řízení oproti jiným konfiguracím a vyšší výkon potřebný pro správnou funkci.



- 1 - Vstup vzduchu k dmychadlu
- 2 - Dmychadlo
- 3 - Ocasní nosník
- 4 - Svislý a vodorovný stabilizátor
- 5 - Proud vzduchu z otočné trysky
- 6 - Proud vzduchu od nosného rotoru
- 7 - Řez ocasním nosníkem se znázorněnými drážkami na pravé straně
- 8 - Výsledný tah pro vyrovnávání reakčního momentu

Obr. 6.7 NOTAR [137]

7 Závěr

Naprostá většina dnes vyráběných typů vrtulníků je jednorotorového uspořádání, lišící se způsobem kompenzace reakčního momentu. Jistě zajímavá je univerzálnost tohoto uspořádání. Uplatnilo se nejen na malých vrtulnících, jako například CH – 7 Kompress, ale i na velmi těžkých strojích. Příkladem Mil Mi – 6 a Mi – 26. V mnohem menší míře se pak vyskytují koaxiální uspořádání rotorů. Dva typy vrtulníků používají také tandemové uspořádání rotorů, některými považované za zastaralé. Dnes zcela výjimečné je uspořádání s prolínajícími se rotory. Společnost Kaman má ve své nabídce jediný typ vrtulníku s tímto uspořádáním na světě. Je jím typ K – MAX.

Dle mého názoru se bude nejbližší vrtulníkový vývoj ubírat dvěma směry. Předně se stále se budou vyvíjet nové vrtulníky s jednorotorovým uspořádáním, na nichž se budou uplatňovat nejnovější poznatky z aerodynamiky, inženýrských a materiálových věd. Konstrukční řešení nosných rotorů budou založena na rotorech s pružnými členy a na tuhých rotorech. V druhém směru vývoje bude cílem dosáhnout co nejvyšší letové rychlosti. Již dnes je tento trend patrný například na experimentálních typech Sikorsky X2 a Eurocopter X3. Na nich jsou zároveň viditelné výrazně odlišné přístupy. Sikorsky X2 dává přednost koaxiálnímu uspořádání nosných rotorů s tlačnou vrtulí na konci trupu. Eurocopter X3 se drží klasičtější koncepce. Je vybaven jedním nosným rotorem a dvěma vrtulemi na koncích pomocného křídla. Křídlo dovoluje při vysokých rychlostech snížit zatížení nosného rotoru a tím omezit nepříznivé aerodynamické jevy. Vrtule, kromě vyvozování síly pro dopředný let, navíc plní stejné funkce jako ocasní rotory. Cílem rychlých vrtulníků bude konkurovat konvertoplánům a překonat jejich nedostatky.

8 Seznam použitých zdrojů

8.1 Seznam použité literatury

- [1] PETRÁSEK, Miloslav. *Základy letu - vrtulník: Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů vrtulníků dle předpisu JAR-FCL* 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2008. ISBN 978-80-7204-588-4.
- [2] NEŠTRÁK, Dušan a PIL'Á Ján. *Aerodynamika, konstrukce a systémy vrtulníků: Učební texty dle nařízení komise (ES) 2042/2003 Part 66 Studijní modul 12*. 1. vyd. Olomučany: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o. Brno, 2006. ISBN 80-7204-484-2.
- [3] BENEŠ, Ladislav. *Učebnice pro piloty vrtulníků*. Bratislava: Alfa, 1985.
- [4] CAITHAML, Roman. *Konstrukce vrtulníků*. 1. vyd. VAAZ Brno, 1971.
- [5] HRUŠKA, Zbyněk, SVITÁK, Pavel. ČSN 31 0001 aneb O leteckém názvosloví. *Letectví+Kosmonautika*. Náchod: Aeromedia a.s.. 2006, roč. 82, č. 2, s. 76 – 77. ISSN 0024-1156
- [6] HRUŠKA, Zbyněk, SVITÁK, Pavel. ČSN 31 0001 aneb O leteckém názvosloví. *Letectví+Kosmonautika*. Náchod: Aeromedia a.s.. 2006, roč. 82, č. 7, s. 32 – 33. ISSN 0024-1156
- [7] ODEHNAL, Zdeněk. X 2 Technology. *Letectví+Kosmonautika*. Náchod: Aeromedia a.s.. 2009, roč. 85, č. 9, s. 46 – 47. ISSN 0024-1156
- [8] ODEHNAL, Zdeněk. Rychlostní rekordman. *Letectví+Kosmonautika*. Náchod: Aeromedia a.s.. 2010, roč. 86, č. 11, s. 82 – 83. ISSN 0024-1156
- [9] *Helicopter* [online]. c 2012-5-18 [cit. 2012 - 1 - 15].
Dostupné z: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Helicopter>>
- [10] *History of the helicopter (early helicopter technology)* [online].
[cit. 2012 - 1 - 14].
Dostupné z: <<http://www.century-of-flight.net/Aviation%20history/helicopter%20history/Early%20Helicopter%20Technology.htm>>
- [11] *History of the helicopter (helicopter development in the early 20th century)* [online]. [cit. 2012 - 1 - 15].
Dostupné z: <<http://www.century-of-flight.net/Aviation%20history/helicopter%20history/Helicopter%20Development%20in%20the%20Early%20Twentieth%20Century.htm>>

- [12] *History of the helicopter (contribution of the autogyro)* [online].
[cit. 2012 - 1 - 15].
Dostupné z: <<http://www.century-of-flight.net/Aviation%20history/helicopter%20history/The%20Contributions%20of%20the%20Autogyro.htm>>
- [13] *History of the helicopter (Soviet and Russian helicopters)* [online].
[cit. 2012 - 1 - 16].
Dostupné z: <<http://www.century-of-flight.net/Aviation%20history/helicopter%20history/Soviet%20and%20Russian%20Helicopters.htm>>
- [14] *History of the helicopter (Piasecki - The Dogship and the Flying Banana)* [online]. [cit. 2012 - 1 - 16].
Dostupné z: <<http://www.century-of-flight.net/Aviation%20history/helicopter%20history/Piasecki.htm>>
- [15] *History of the helicopter (Heinrich Focke Fa 61)* [online]. [cit. 2012 - 1 - 16].
Dostupné z: <<http://www.century-of-flight.net/Aviation%20history/helicopter%20history/Focke.htm>>
- [16] *History of the helicopter (Anton Flettner Kolibri)* [online]. [cit. 2012 - 1 - 18].
Dostupné z: <<http://www.century-of-flight.net/Aviation%20history/helicopter%20history/Flettner.htm>>
- [17] *History of the helicopter (Igor Sikorsky VS 300)* [online]. [cit. 2012 - 1 - 18].
Dostupné z: <<http://www.century-of-flight.net/Aviation%20history/helicopter%20history/Igor%20Sikorsky.htm>>
- [18] *Aerospatiale SE-313B/SA-318C "Alouette II"* [online]. [cit. 2012 - 1 - 19].
Dostupné z: <http://www.aviastar.org/helicopters_eng/snias_alu2.php>
- [19] *Flettner Fl.265* [online]. [cit. 2012 - 1 - 19].
Dostupné z: <http://www.aviastar.org/helicopters_eng/flettner-265.php>
- [20] *Boelkow Bo-102 "Heli-Trainer"* [online]. [cit. 2012 - 1 - 20].
Dostupné z: <http://www.aviastar.org/helicopters_eng/bo-102.php>
- [21] *Boelkow Bo-103* [online]. [cit. 2012 - 1 - 20].
Dostupné z: <http://www.aviastar.org/helicopters_eng/bo-103.php>
- [22] *Kaman K-225* [online]. [cit. 2012 - 1 - 20]
Dostupné z: <<http://airandspace.si.edu/collections/artifact.cfm?id=A19571016000>>
- [23] *Boelkow Bo-46* [online]. [cit. 2012 - 2 - 1].
Dostupné z: <http://www.aviastar.org/helicopters_eng/bo-46.php>

- [24] Arrius 2F [online]. [cit. 2012 - 2 - 1].
Dostupné z: < <http://www.turbomeca.com/english/our-products/helicopter-engines/arrius-44/arrius-2f-10.html>>
- [25] PPRuNe (AS 350 hover question) [online]. [cit. 2012 - 3 - 5]
Dostupné z: < <http://www.pprune.org/rotorheads/356360-350-hover-question-2.html>>
- [26] PPRuNe (Enstrom Corner) [online]. slowrotor c 2007-6-2 [cit. 2012 - 2 - 8]
Dostupné z: < <http://www.pprune.org/rotorheads/190595-enstrom-corner-10.html>>
- [27] COLONGES, Monique. *History of the fenestron* [online]. [cit. 2012 - 4 - 7]
Dostupné z: < <http://www.eurocopter.com/w1/jrotor/72/story57.html>>
- [28] *Notar Technology* [online]. [cit. 2012 - 4 - 8]
Dostupné z: < <http://www.mdhelicopters.com/v2/notar.php>>

8.2 Seznam zdrojů ilustrací

- [I1] Dostupné z: < <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/54/Taketombo.JPG>>
[online]. [cit. 2012 - 4 - 10]
- [I2] Dostupné z: < <http://www.always hobbies.com/Craft-Kits/Leonardo-Da-Vinci-Working-Models/Da-Vinci's-Aerial-Screw-Kit.ice>>
[online]. [cit. 2012 - 4 - 10]
- [I3] Dostupné z: < <http://www.sciencemuseum.org.uk/images/I004/10216053.aspx>>
[online]. [cit. 2012 - 4 - 10]
- [I4] Dostupné z: < http://www.aviastar.org/helicopters_eng/cornu.php>
[online]. [cit. 2012 - 4 - 10]
- [I5] Dostupné z: < http://www.aviastar.org/helicopters_eng/cierva_c-30.php>
[online]. [cit. 2012 - 4 - 10]
- [I6] Dostupné z: < <http://www.fiddlersgreen.net/models/aircraft/FockeAchgelis-Fa61.html>>
[online]. [cit. 2012 - 4 - 11]
- [I7] Dostupné z: < <http://www.aviationtrivia.info/Sikorsky-R-4.php>>
[online]. [cit. 2012 - 4 - 11]
- [I8] Dostupné z: < http://www.aviastar.org/foto/gallery/mil/mi-1_1.jpg>
[online]. [cit. 2012 - 4 - 19]
- [I9] Dostupné z: < <http://rc.runryder.com/helicopter/t376874p1/>>
[online]. [cit. 2012 - 4 - 11]

- [I10] Dostupné z: < <http://forum.valka.cz/viewtopic.php/t/17450>>
[online]. [cit. 2012 - 4 - 12]
- [I11] Dostupné z: < http://www.aviastar.org/helicopters_eng/bell_204.php>
[online]. [cit. 2012 - 4 - 12]
- [I12] Dostupné z: < http://www.aviastar.org/helicopters_eng/snias_alu2.php>
[online]. [cit. 2012 - 4 - 12]
- [I13] Dostupné z: < http://www.aviastar.org/foto/gallery/mil/v-12_14.jpg>
[online]. [cit. 2012 - 2 - 12]
- [I14] Dostupné z: < http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c9/AH-1G_Cobra_Vietnam.jpg>
[online]. [cit. 2012 - 2 - 12]
- [I15] Zdroj ilustrace [1]; upraveno autorem
- [I16] Dostupné z: < http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/20/Helicopter_Anatomy.png>
[online]. [cit. 2012 - 2 - 14]; upraveno autorem
- [I17] Zdroj ilustrace [3]
- [I18] Zdroj ilustrace [3]; upraveno autorem
- [I19] Zdroj ilustrace [1] a [3]; upraveno autorem
- [I20] Zdroj ilustrace [2] a [3]; upraveno autorem
- [I21] Zdroj ilustrace [2]
- [I22] Zdroj ilustrace [2]; upraveno autorem
- [I23] Zdroj ilustrace [4]
- [I24] Zdroj ilustrace [4]; upraveno autorem
- [I25] Dostupné z: < <http://www.pprune.org/rotorheads/356360-350-hover-question-2.html>>
[online]. [cit. 2012 - 3 - 10]
- [I26] Dostupné z: < <http://www.b-domke.de/AviationImages/Rotorhead/2698.html>>
[online]. [cit. 2012 - 3 - 11]
- [I27] Dostupné z: < <http://www.enstromhelicopter.com/helicopters/turbine-480b/>>
[online]. [cit. 2012 - 4 - 15]
- [I28] Dostupné z: < <http://www.pprune.org/rotorheads/262307-explain-lead-lag-rigid-rotor-me.html>>
[online]. [cit. 2012 - 4 - 15]
- [I29] Dostupné z: < <http://www.pprune.org/rotorheads/148566-ah-56-cheyenne.html>>
[online]. [cit. 2012 - 4 - 15]

- [I30] Dostupné z: < <http://www.abpic.co.uk/photo/1045282/>>
[cit. 2012 - 2 - 19]
- [I31] Dostupné z: < <http://internetage.ws/rotorcrafter/bolkow46.htm>>
[online]. [cit. 2012 - 5 - 3]
- [I32] Dostupné z: < <http://www.designmagazin.cz/technika/20753-sikorsky-x2-je-nove-nejrychlejsi-vrtulnik-na-svete.html>>
[online]. [cit. 2012 - 4 - 28]
- [I33] Dostupné z: < http://www.aviastar.org/helicopters_eng/mcdonnel_apache.php>
[online]. [cit. 2012 - 3 - 27]; upraveno autorem
- [I34] Dostupné z: < <http://plane-wallpaper.blogspot.com/2011/09/ah-56-cheyenne-attack-helicopter.html>>
[online]. [cit. 2012 - 2 - 30]
- [I35] Dostupné z: < <http://www.b-domke.de/AviationImages/Rotorhead/3975.html>>
[online]. [cit. 2012 - 3 - 5]
- [I36] Zdroj ilustrace: vlastní sbírka autora
- [I37] Dostupné z: < http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/35/NOTAR_System.svg>
[online]. [cit. 2012 - 4 - 12]

9 Seznam použitých zkratk a symbolů

OGE		Out of Ground Effect
IGE		In Ground Effect
AO		aerodynamická osa listu
EO		elastická osa listu
HO		hmotová osa listu
T_{GL}		těžiště listu
T_{GL1}		těžiště listu v poloze 1
T_{GL2}		těžiště listu v poloze 2
D	[N]	odporová síla listu
D_x	[N]	složka odporové síly do směru x
D_v	[N]	výsledná odporová síla nosného rotoru
L	[N]	vztlaková síla listu
F_{GL}	[N]	tíhová síla působící na list
F_{Gvr}	[N]	výsledná tíhová síla vrtulníku
F_{OL}	[N]	odstředivá síla působící na list
L_v	[N]	výsledná vztlaková síla působící na vrtulník
L_x	[N]	složka vztlakové síly do směru x
R	[N]	výsledná aerodynamická síla působící na list
R_v	[N]	výsledný vektor tahu nosného rotoru

T_L	[N]	tahová síla listu
T_{VR}	[N]	tahová síla vyrovnávacího rotoru
T_x	[N]	x složka tahu nosného rotoru
T_y	[N]	y složka tahu nosného rotoru
π	[rad]	Ludolfovo číslo
β	[°]	úhel nabíhajícího proudu
γ	[°]	úhel mezi F_{Gvr} a jejími složkami
δ	[°]	úhel mezi osou vztlačového čepu a osou listu
θ_O	[°]	počáteční úhel nastavení listu
$\Delta\theta$	[°]	změna úhlu nastavení
θ_m	[°]	maximální úhel nastavení listu
ϑ	[°]	úhel vymávnutí listu
ϑ_1	[°]	úhel vymávnutí listu v poloze 1
ϑ_2	[°]	úhel vymávnutí listu v poloze 2
ψ	[°]	azimutální úhel listu
b	[m]	šířka listu
r	[m]	vzdálenost od osy otáčení (poloměr)
R_R	[m]	poloměr rotoru
ω	[rad·s ⁻¹]	úhlová rychlost otáčení rotoru
ω_{un}	[rad·s ⁻¹]	unášivá (úhlová) rychlost
$\frac{d\vartheta}{dt}$	[rad·s ⁻¹]	rychlost mávání
v	[m·s ⁻¹]	rychlost proudění vzduchu
v_C	[m·s ⁻¹]	výsledná rychlost obtékání listu
V_L	[m·s ⁻¹]	rychlost letu vrtulníku
v_L	[m·s ⁻¹]	složka rychlosti pohybu listu od pohybu vrtulníku
v_O	[m·s ⁻¹]	složka rychlosti pohybu listu od otáčení rotoru
v_{rel}	[m·s ⁻¹]	relativní rychlost
v_{rT}	[m·s ⁻¹]	rychlost změny poloměru těžiště
v_z	[m·s ⁻¹]	rychlost obtékání listu od klesání vrtulníku
v_0	[m·s ⁻¹]	rychlost obtékání listu od otáčení rotoru
a_{Cor}	[m·s ⁻²]	Coriolisovo zrychlení
σ	[-]	součinitel plnosti rotoru
k	[-]	počet listů rotoru