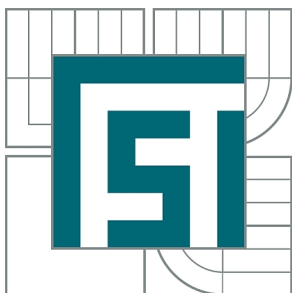


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
LETECKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

SOUSTAVY ŘÍZENÍ VRTULNÍKŮ

HELICOPTER CONTROL SYSTEM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MAREK PUKL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ ZABLATZKÝ

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Letecký ústav

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Marek Pukl

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:

Soustavy řízení vrtulníků

v anglickém jazyce:

Helicopter Control System

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Systémy řízení vrtulníku jsou velmi složitá zařízení pracující na několika principech.

Cíle bakalářské práce:

Popsat principy systémů řízení vrtulníku a vytvořit jejich ucelený přehled.

Seznam odborné literatury:

- [1] NEŠTRÁK, D., PIL'Á, J.: Aerodynamika, konštrukcia a systémy vrtulníkov, CERM, 2006

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jiří Zablatzký

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 26.11.2010

L.S.

prof. Ing. Antonín Pištěk, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je vytvoření rešerše zkoumající situaci v oblasti soustav řízení vrtulníku. První část se týká cyklického a kolektivního řízení. Druhá část zahrnuje směrové řízení a kompenzaci točivého momentu. Konec práce obsahuje zhodnocení získaných informací.

Klíčová slova

Vrtulník, cyklické řízení, kolektivní řízení, směrové řízení, NOTAR, souosé rotory, vyrovnávací rotor

Abstract

The object of the bachelor thesis is to create a research in field of helicopter control systems. First part focuses on cyclic and collective control. Second part contains yaw control and anti – torque control. The end includes a review of the acquired information.

Key words

Helicopter, cyclic control, collective control, yaw control, NOTAR, coaxial rotor, tail rotor

Bibliografická citace

PUKL, M. *Soustavy řízení vrtulníku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 25s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Zablatzký.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a internetových zdrojů, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 22. května 2011

Marek Pukl

Poděkování

Děkuji Ing. Jiřímu Zablatzkému za vedení, potřebné rady a připomínky při zpracování této práce.

Obsah

1	Úvod.....	8
2	Systémy řízení vrtulníku	9
2.1	Nosný rotor	9
2.1.1	Charakteristiky nosného rotoru	11
2.1.2	Tuhý rotor	12
2.1.3	Polotuhý rotor	13
2.1.4	Kloubový rotor	13
2.1.5	Rotorová hlava	13
2.1.6	Dorazy	14
2.1.7	Tlumiče kývání	14
2.2	Cyklické řízení.....	15
2.2.1	Automat cyklického řízení	15
2.2.2	Úhel předstihu	17
2.2.3	Podélné a příčné řízení	18
2.3	Kolektivní řízení	18
2.4	Pohony systému řízení	18
2.5	Směrové řízení, vyrovnávání točivého momentu	19
2.5.1	Vyrovnávací rotor	19
2.5.2	Vrtule v prstenci.....	20
2.5.3	NOTAR.....	21
2.5.4	Koaxiální koncepce.....	21
2.6	Stabilizátory.....	22
3	Závěr	23
4	Použité zdroje.....	24
5	Seznam zkratek	25

1 Úvod

Touha člověka létat je stará patrně jako lidstvo samo a jen o něco mladší je myšlenka vrtulníku, která se datuje již od starověké Číny, kde si děti hrály s hračkou, která sestávala z několika natočených ptačích per přidělaných k tyčince. Tato tyčinka byla následně rychle roztočena a na krátký okamžik se vznesla. K praktické realizaci bylo ovšem stále velmi daleko. První návrh létajícího stroje v Evropě nevytvořil nikdo jiný než slavný italský myslitel a vynálezce Leonardo da Vinci. Jím navrhovaný stroj se měl skládat z Archimédova šroubu otáčejícího se vlivem lidské síly kolem svislé osy a z plošiny pro osádku. Bylo to sice již v roce 1475, ale jeho dílo bylo publikováno až téměř o tři století později, a tak se nedá říci, že by následující vývoj nějak ovlivnilo. V některých případech tedy bylo třeba jeho myšlenky znovu objevit.



Obr. 1.1 Da Vinciho vize vrtulníku [5]

Další zmínky pocházejí z Ruska, kde roku 1754 vědec Michail Vasiljevič Lomonosov předvedl model vrtulníku se souosými rotory poháněnými pružinou. Chystal se svůj vynález použít k dopravě meteorologických zařízení do odpovídajících výšek. V roce 1768 jako jeden z prvních Evropanů popsal francouzský matematik J. P. Paucton stroj skládající se ze dvou vrtulí, nosné a tažné. Z dalších vynálezců, zabývajících se mimo jiné vrtulníky, můžeme jmenovat například Angličany George Cayleyho, W. H. Phillipse či Francouze d'Amércourta. Často pak byly k vidění i projekty a patenty, které byly pouhým opakováním již vynalezeného.

Velký skok znamenal přelom 18. a 19. století a vynález spalovacího motoru. Za zmínku stojí například jeden z prvních „funkčních“ strojů se spalovacím motorem o výkonu 24 koňských sil, který sestavil Francouz Paul Cornu a který se roku 1907 vznesl do výše 1,5 m, nebo vůbec první říditelný vrtulník v dnešním smyslu slova vytvořený ruským inženýrem Nicolasem Florinem v Belgii v roce 1933. Za první plně funkční vrtulník, jak jej známe dnes, je pak považován Focke-Wulf Fw 61, který byl postaven a vzlétl roku 1936. Jednalo se o dvurotorový stroj s třílistými rotory o průměru 7 m poháněný motorem BMW Bramo 314 o výkonu 160 koňských sil.



Obr. 1.2 Focke-Wulf Fw 61 [4]

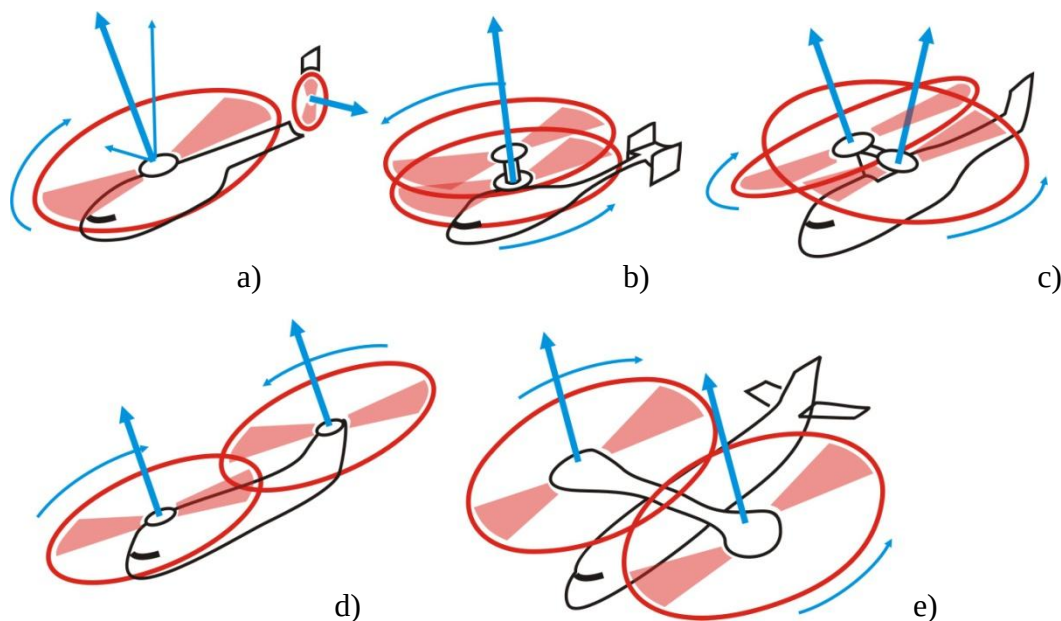
Dalších více či méně významných průkopníků a jejich projektů bylo mnoho, ale jejich jmenování přesahuje rozsah tohoto úvodníku.

Pro objasnění pojmu „vrtulník“, respektive „helikoptéra“, je třeba zaměřit do řečtiny. Slovo „helicos“ znamená řecky „šroub“, slovo „pteron“ potom „křídlo“. Jedná se tedy o jakési šroubokřídle letadlo využívající ke svému letu rotující nosnou plochu, která je jediným zdrojem nosné a propulzní síly. V současnosti se pro vrtulníky vžila definice „letadlo s rotujícím křídlem“, jelikož rotorový list má ve svém řezu klasický nosný profil křídla.

Výhodou vrtulníku je bezesporu jeho všestrannost. Začíná se uplatňovat tam, kde již nestačí automobily a pozemní prostředky vůbec, a končí tam, kde ho klasický letoun převyšuje vyšší rychlostí, nosností či doletem. Jeho největší výhodou je kolmý start a přistání, nepotřebuje proto pro svůj provoz letiště a nákladné pozemní zabezpečení. Další výhodou je

možnost visení nad určeným bodem v terénu. Naopak za nevýhodu může být považována třeba nižší maximální rychlost v porovnání s klasickými letouny, obtížnější pilotáž nebo nižší hospodárnost. Právě jeho všestrannost ho předurčuje pro použití například v armádě, v letecké záchranné službě, při výškových stavebních pracích a v mnoha dalších odvětvích.

Vrtulníky rozdělujeme podle mnoha kritérií. Podle hmotnosti na střední, těžké či lehké; podle způsobu vyrovnávání reakčního momentu; podle způsobu řízení či podle počtu nosných rotorů a jejich uspořádání.



Obr. 1.3 Různé koncepce vrtulníků [1]

Se specifickým principem pohybu vrtulníku souvisí i relativní složitost mechaniky nosného, případně i vyrovnávacího, rotoru a náročnost jeho řízení. Na tuto problematiku se v této práci zaměřím. [2, 5, 6]

2 Systémy řízení vrtulníku

2.1 Nosný rotor

Rotorová soustava vrtulníku zahrnuje všechny části vrtulníku, jejichž funkce je nezbytná pro vyvození nosné síly, propulzní síly a řídícího momentu. Základní částí soustavy je nosný rotor, který svým rotačním pohybem vyvozuje tah a umožňuje řízení stroje. Vznik tahu vysvětluje 3. Newtonův zákon. Otáčením nosného rotoru se z prostoru nad ním nasává vzduch a protlačuje se pod rotor. Protékající hmota vzduchu zvyšuje práci nosného rotoru svou hybností a v opačném směru vzniká stejně velká reakční síla – tah.

Nosný rotor je soustava několika rotorových listů uchycených radiálně k rotorové hlavě, která je spojena s hřídelem motoru. Ten je součástí



Obr. 2.1.1 Bö – 102 s rotorem s protizávažím [11]

pohonného systému a je uložen otočně ve svislé rovině v trupu. Rotor mívá zpravidla dva až šest listů, ale jsou známy i odlišné konstrukce, např. Bö – 102 s jediným listem a protizávažím. Vzhledem ke své funkci musí nosný rotor splňovat následující požadavky

- Aerodynamické požadavky
 - Vysoká účinnost ve všech letových režimech
 - Machovo číslo na konci listu nesmí překročit kritickou hodnotu
 - Nesmí docházet k odtrhování proudu na koncích listů
 - Minimální deformace listů
- Dynamické požadavky
 - Žádná část rotoru nesmí být v rezonanci s budícími silami
 - V žádném letovém režimu nesmí na listech vznikat aeroelastický jev
 - Rotor musí být dynamicky vyvážený
- Pevnostní požadavky
 - Listy musí mít minimální torzní deformace
 - Povrch listů musí mít dostatečnou odolnost proti povětrnostním vlivům, erozivním vlivům a mechanickému poškození
- Provozní požadavky
 - Co nejjednodušší spojení listů s rotorovou hlavou
 - Co nejjednodušší seřizování
 - Účinná ochrana listů proti atmosférickým vlivům po dobu skladování



Obr. 2.1.2 Rotorová hlava vrtulníku Mi – 17 [10]

V současnosti existují tři typy rotorů, které se odlišují způsobem zavěšení listů k rotorové hlavě. Hlavním rozdílem těchto tří konfigurací je přítomnost, respektive nepřítomnost vodorovného (vztlakového) či svislého (odporového) čepu. Podle uchycení k rotorové hlavě rozeznáváme [1, 2, 3]

- Tuhý rotor
- Polotuhý rotor
- Kloubový rotor

2.1.1 Charakteristiky nosného rotoru

Průměr nosného rotoru D je určen kružnicí, po které se pohybují konce listů nosného rotoru bez zatížení. Často se také používá poloměr R .

Charakteristický poloměr nosného rotoru r je poloměr, na němž se určuje úhel nastavení listu φ a je to údaj, který je indikovaný přístrojem na palubní desce.

$$r = 0,7 \cdot R [m]$$

Plocha nosného rotoru S_{NR} je plocha, kterou opisují konce listů nosného rotoru.

$$S_{NR} = \pi R^2 [m^2]$$

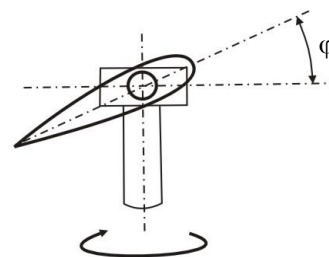
Obvodová rychlost listů nosného rotoru v_o

$$v_o = \omega_{NR} \cdot R [m \cdot s^{-1}]$$

kde ω_{NR} je úhlová rychlost nosného rotoru při n otáčkách za minutu

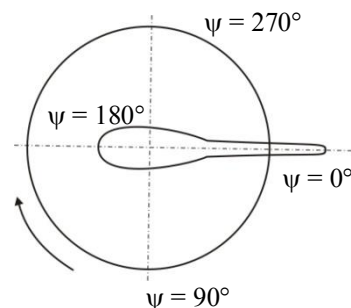
$$\omega_{NR} = 2\pi \frac{n}{60} [rad \cdot s^{-1}]$$

Úhel nastavení listů nosného rotoru φ je úhel, který svírá těživa profilu listu s konstrukční rovinou otáčení nosného rotoru (tj. rovinou kolmou na geometrickou osu otáčení). Jedná se o geometrickou veličinu, která se měří na charakteristickém poloměru listu. Po délce listu dochází k postupnému zmenšování úhlu nastavení, hovoříme o tzv. geometrickém zkroucení listu.



Obr. 2.1.1.1 Křídélkování [2]

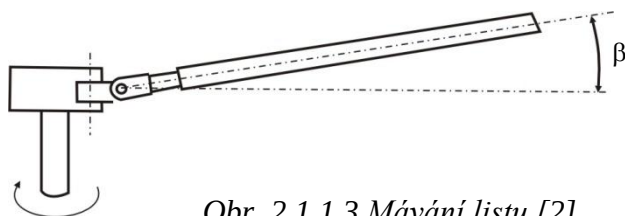
Azimutální poloha listu nosného rotoru ψ je úhel, který určuje okamžitou polohu listu v rovině otáčení. Měří se ve směru otáčení rotoru. Výchozí bod je vzadu nad ocasním nosníkem. List, který se nachází v okolí azimutu 90° , je listem postupujícím, list v okolí azimutu 270° je listem ustupujícím.



Obr. 2.1.1.2 Azimut

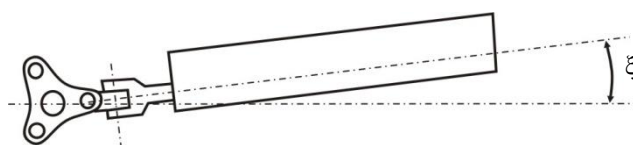
Úhel náběhu listů nosného rotoru α je úhel, který svírá těživa profilu listu s vektorem rychlosti proudu vzduchu.

Úhel náběhu nosného rotoru α_{NR} je úhel, který svírá vektor rychlosti proudu vzduchu s rovinou otáčení nosného rotoru.



Obr. 2.1.1.3 Mávání listu [2]

Úhel vymávnutí listu β je úhel přemístění listu kolem osy vodorovného závěsu. Za kladný ho považujeme při vymávnutí nad rovinu otáčení nosného rotoru.



Obr. 2.1.1.4 Kývání listu [2]

Úhel kývání listu ξ je úhel přemístění listu kolem osy svislého závěsu. Za kladný ho považujeme při kývnutí proti směru otáčení nosného rotoru.

Křídélkováním listů nosného rotoru se rozumí změna úhlu nastavení listů, a tím i změna úhlu vymávnutí v průběhu jedné otáčky nosného rotoru.

Disk nosného rotoru je kuželová plocha tvořená otáčejícími se listy nosného rotoru vychýlenými o úhel vymávnutí β

Rovina disku nosného rotoru je rovina proložená dráhou opisovanou konci listů nosného rotoru

Součinitel plnosti σ popisuje zaplnění plochy nosného rotoru jeho listy

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

kde k je počet listů rotoru a b je hloubka listu

Postupový poměr μ je poměr složky rychlosti rovnoběžné s rovinou disku a obvodové rychlosti konců listů a vyjadřuje tak velikost asymetrie rychlostního pole

$$\mu = \frac{v \cdot \cos \alpha_{NR}}{\omega_{NR} \cdot R}$$

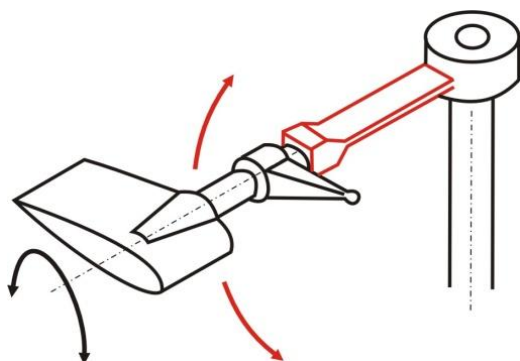
Průtokový poměr λ je poměr výsledné průtokové rychlosti rovinou rotorového disku a obvodové rychlosti nosného rotoru

$$\lambda = \frac{v \cdot \sin \alpha_{NR} - v_i}{\omega_{NR} \cdot R}$$

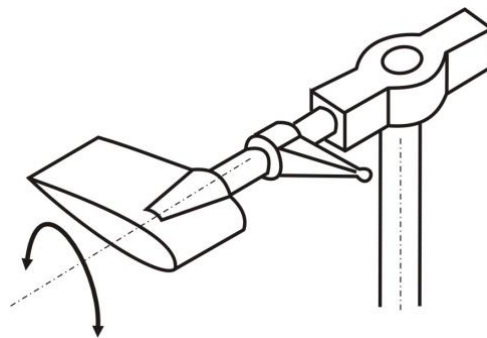
kde v_i je indukovaná rychlost proudění vzduchu nosným rotorem. [1, 2]

2.1.2 Tuhý rotor

Původní tuhé rotory se dnes již nepoužívají, protože na těchto rotorech vznikala vlivem rozdílných rychlostí obtékání postupujícího a ustupujícího listu asymetrický tah způsobující klonivý moment, což vedlo po dosažení určité dopředné rychlosti k haváriím. Tuhý rotor soudobé konstrukce má listy štíhlého profilu u kořene zúžené a značně pružné, hlavně v rovině mávání.



Obr. 2.1.2.2 Tuhý rotor [1]



Obr. 2.1.2.1 Tuhý rotor [1]

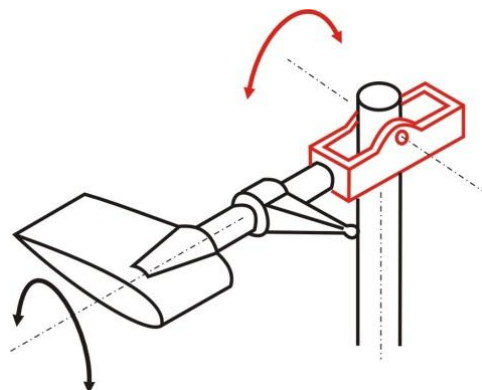
Tato ohybová pružnost nahrazuje oba závěsné čepy, vztlakový i odporový. Tuhý rotor má tedy pouze osový závěs umožňující křídélkování listu. Sklonu disku pro cyklické řízení je dosaženo ohybem listů.

Výhodou této koncepce je její jednoduchost v porovnání s ostatními typy rotorů a menší citlivost stroje na změnu polohy těžiště. Vrtulník s tuhým rotorem je schopen i letu na zádech. [1]

2.1.3 Polotuhý rotor

Tyto rotory mají listy připojeny k rotorové hlavě, která je zavěšena vodorovným čepem na hřídel motoru, čímž umožňuje mávavý pohyb listů společně s hlavou. O co jedna strana mávne dolů, o to druhá strana mávne nahoru. Listy se mohou natáčet kolem osy křídélkovacího závěsu, nemají ale odporový čep, a proto ani tlumič kývání, takže síly od jejich pohybu jsou přenášeny pouze pružným kořenem listu.

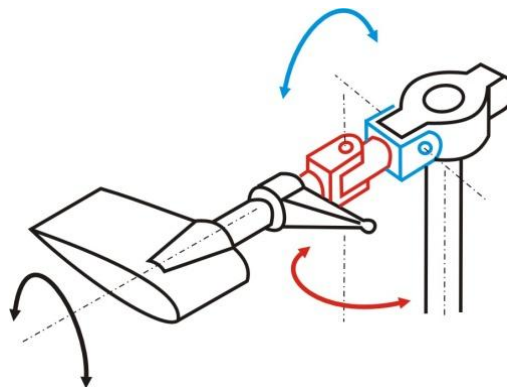
Tento typ rotoru je tedy konstrukčně jednodušší. Rotory bývají většinou dvoulisté a používají se u lehčích vrtulníků. Nejsou vhodné pro těžší vrtulníky, protože jejich listy by musely mít velkou hloubku pro dosažení potřebné plochy.[1, 2]



Obr. 2.1.3.1 Polotuhý rotor [1]

2.1.4 Kloubový rotor

U většiny dnešních rotorů jsou listy s rotorovým hřídelem spojeny tak, že nosník je připevněn jedním osovým závěsem a dvěma kolmými závěsnými čepy k rotorové hlavě, která je napevno spojena s hřídelem motoru, jak je vidět na obrázku. Toto uspořádání nazýváme kloubové. Funkcí vodorovného a svislého čepu je redukce zatížení nosného rotoru, momenty v těchto závěsech jsou totiž nulové. Vodorovný závěs umožňuje mávání listu a svislý závěs jeho kývání. Toto kývání způsobují Coriolisovy síly vznikající při mávavém pohybu. [1, 2, 3]

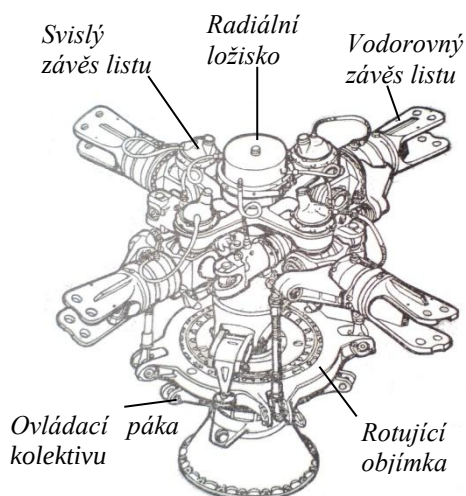


Obr. 2.1.4.1 Kloubový rotor [1]

2.1.5 Rotorová hlava

Rotorová hlava je základní částí nosného rotoru, připojuje rotorové listy k jeho hřídeli a umožňuje všechny požadované pohyby listů, tj. mávání, kývání a křídélkování. První vrtulníky ztroskotaly na tom, že měly rotorové listy spojené pevně s hřídelem motoru. Teprve kloubové zavěšení, které použil španělský průkopník Juan de la Cierva, umožnilo bezpečně letět ve všech letových režimech.

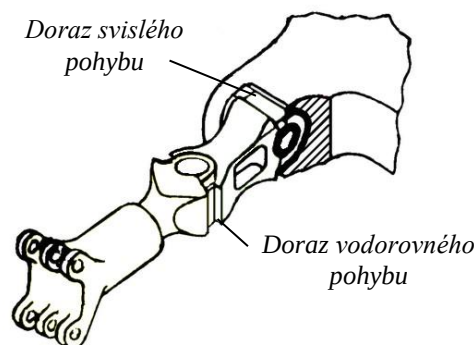
Rotorové hlavy s kloubovým zavěšením jsou uspořádány s různými vzdálenostmi vztahového závěsu od osy otáčení. Tato vzdálenost má totiž vliv na letové vlastnosti stroje. Čím je vzdálenost vodorovného závěsu větší, tím je větší i účinnost řízení. Neméně důležitá je také vzdálenost svislého závěsu, na níž závisí frekvence kývání listů a velikost amplitudy těchto výkyvů. Příliš velká vzdálenost obou čepů od osy rotorového hřídele může také způsobovat vibrace. [1, 2]



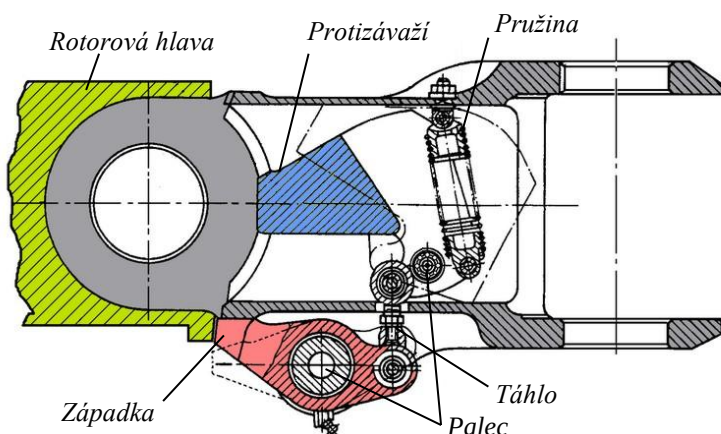
Obr. 2.1.5.1 Schéma čtyřlísté rotorové hlavy [2]

2.1.6 Dorazy

Na kloubovém rotoru je z provozních důvodů mávání i kývání mechanicky omezeno. Konstrukce těchto mechanických dorazů nesmí za letu omezovat pohyby rotoru. Pro mávání rozlišujeme dva druhy dorazů. O spodní doraz se listy opírají za klidu rotoru nebo při malých otáčkách, kdy listy vlivem vlastní hmotnosti klesají. Kromě toho také zajišťují, aby za větrného počasí nedošlo k nárazu listu na trup, a zvyšují bezpečnost obsluhy. Horní dorazy se používají pro omezení mávání nahoru například vlivem větrného poryvu při nízkých otáčkách a nejsou u všech typů vrtulníků. Zatímco malé vrtulníky s poměrně tuhými listy rotoru používají pevné dorazy, u větších vrtulníků s rotory o větším průměru je třeba toto vyřešit tak, aby



Obr. 2.1.6.1 Pevné dorazy [1]

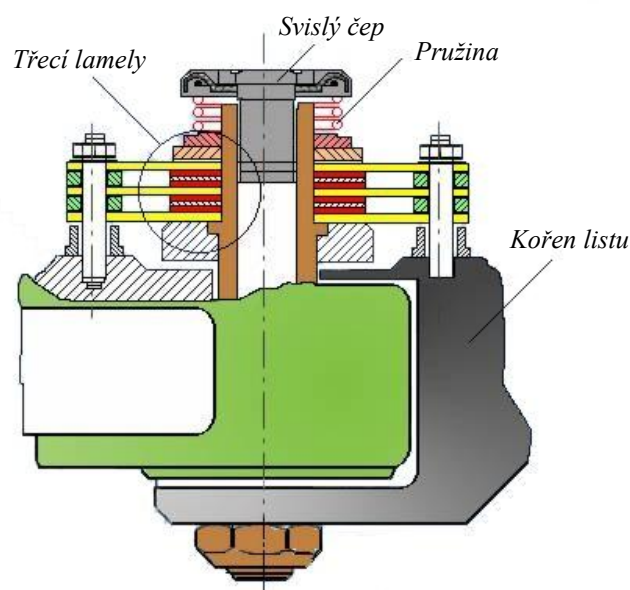


Obr. 2.1.6.2 Odstředivý omezovač svěšení listu [1]

za letu bylo možné větší mávání, a aby na zemi při zastavení rotoru bylo omezeno jeho svěšení. Proto se využívají **odstředivé stavitelné dorazy**. Pro svou funkci využívají setrvačné odstředivé síly, jejímž vlivem se posunuje závaží ovládající mechanismus pohyblivého dorazu. [1]

2.1.7 Tlumiče kývání

Za ustáleného dopředného letu se listy točí v podstatě stejnou úhlovou rychlostí a svou setrvačností překonávají změny rozkmitu, ale při přistání a pohybu vrtulníku po nerovnostech může dojít k rezonanci listů a celé konstrukce stroje. Dojde k nestejnému vykývnutí listů kolem svislých závěsů a rotor se stane nevyváženým, protože těžiště se posune mimo vlastní osu otáčení. Vzniklá odstředivá síla způsobuje kmitání, a když se frekvence tohoto kmitání přiblíží k frekvenci kmitání vrtulníku na podvozku, nastává nebezpečný jev označovaný jako „přízemní rezonance“. K potlačení tohoto nežádoucího jevu se používají tlumiče kývání (tlumiče odtahování). Tyto tlumiče musí mít stejnou



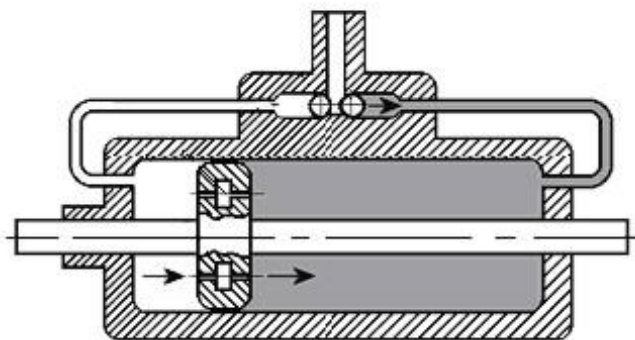
Obr. 2.1.7.1 Třecí tlumič [1]

charakteristiku, která by se neměla měnit ani opotřebením.

Třecí tlumič je konstrukčně jednodušší. Tlumení je založeno na tření pohyblivých třecích disků a nepohyblivých ocelových desek přitlačovaných pružinou. Je nutné je často seřizovat a chránit je proti nečistotám, které snižují třecí moment, a tím mění charakteristiku tlumiče.

Hydraulický tlumič pracuje na principu hydraulického odporu, který vzniká při pohybu pístu, kdy kapalina protéká škrticím ventilem v pístu. Přes složitější konstrukci má tento tlumič lepší vlastnosti i ve ztížených pracovních podmínkách.

V současné době se u polotuhých a kloubových rotorů využívají také elastomerové tlumiče kývání. [1]



Obr. 2.1.7.2 Hydraulický tlumič [1]

2.2 Cyklické řízení

Systém řízení je jedním ze základních systémů vrtulníků. Je to soubor mechanických, hydraulických a elektronických zařízení, která určují dráhu letu vrtulníku, zajišťují jeho stabilitu a umožňují také jeho řízení při pohybu po zemi.

Změny směru letu se dosahuje změnou aerodynamických poměrů na nosném rotoru, vyrovnávacím rotoru a ocasních plochách. Nosný rotor tedy kromě vztlakové a propulzní síly vytváří také řídicí momenty při otáčení stroje, a je tak i prostředkem podélného a příčného řízení.

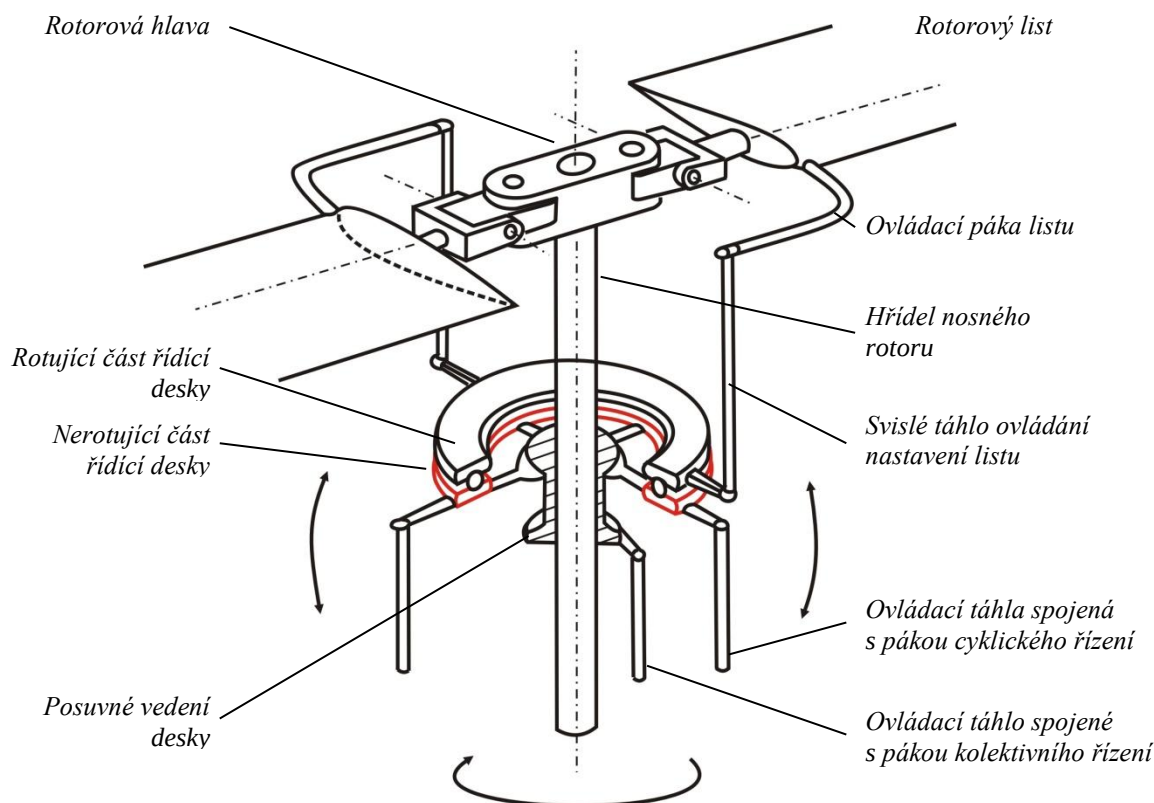
Cyklickým řízením se rozumí změna úhlu nastavení listu nosného rotoru v průběhu jedné otáčky. Rotor otáčející se v režimu osového obtékání (při visezení) vytváří tah, přičemž všechny listy mají stejný úhel nastavení a stejný úhel vymávnutí. Pokud chceme naklonit vektor tahu směrem dopředu, je třeba naklonit i rotující disk nosného rotoru dopředu tak, aby všechny listy procházející azimutem 180° měly minimální úhel vymávnutí a listy procházející azimutem 360° naopak maximální. Toho lze docílit natočením listu kolem jeho osového závěsu, čímž se změní úhel nastavení listu, a tedy i velikost jeho tahu. Mezi úhlem nastavení listu a úhlem vymávnutí listu je přímá závislost; čím větší je úhel nastavení, tím větší je úhel vymávnutí. Změna těchto úhlů ale neprobíhá současně, nejprve se list natočí a až potom se změní úhel vymávnutí. Je tedy třeba měnit nastavení listu s určitým předstihem, jak bude řečeno dále. [1, 2, 3]

2.2.1 Automat cyklického řízení

Automat cyklického řízení je zařízení, které bylo poprvé předvedeno B. N. Jurjevem v roce 1911 a které umožňuje měnit úhel nastavení listů nosného rotoru, a to buď kolektivně, tj. u všech listů současně, nebo cyklicky, tj. v závislosti na jeho azimutální poloze.

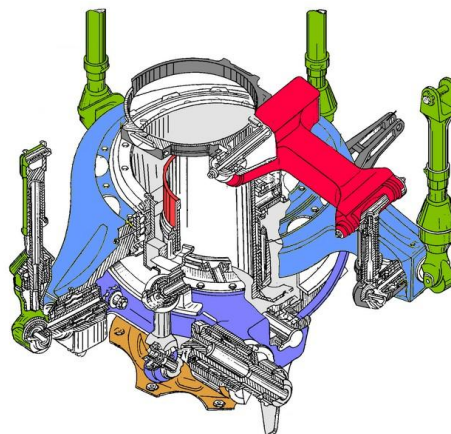
Konstrukční uspořádání může být různé. Mezi nejznámější patří

- Šikmá deska
- Pavouk
- Výstředníková deska



Obr. 2.2.1.1 Základní schéma systému řízení [2]

Šikmá deska (talíř cyklického řízení) je nejstarším a dnes nejrozšířenějším systémem. Je uložena na vodícím pouzdře těsně pod rotorovou hlavou se středem na ose rotorového hřídele. Má dvě navzájem rovnoběžné části. Jednu pohyblivou, která se otáčí s rotorovou hlavou a je spojena svislými táhly s ovládacími pákami listů, a druhou, která je pevná, neotáčí se a je soustavou táhel a pák spojena s řídicími pákami v kabině. Obě desky tvoří spolu s valivými elementy ložisko, které umožňuje přenášet řídicí impulzy z nepohyblivé části



Obr. 2.2.1.2 Šikmá deska [1]



Obr. 2.2.1.3 Rotorová hlava Bristol 171 Sycamore se systémem pavouk [10]

systému řízení na rotující nosný rotor.

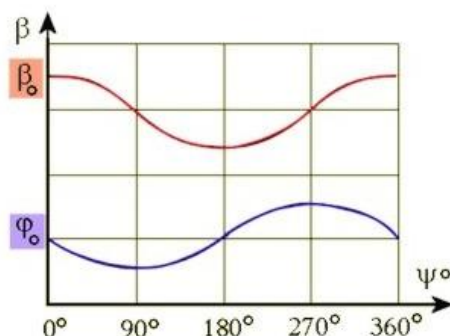
Jiným typem ústrojí k ovládání rotoru je tzv. **pavouk**. Princip řízení spočívá v tom, že cyklické změny úhlu nastavení rotorových listů se dosáhne nakloněním v kloubu umístěném v rovině ovládacích pák listu v dutině hřídele.

Pozornost si zaslouží i takzvaná **výstředníková deska**, která je vynálezem československého konstruktéra Ing. Jaroslava Šlechty. Cyklické změny úhlu nastavení listu se dosahuje vystředěním výstředníkové desky. Kolektivní změny je pak dosaženo natočením výstředníkové desky proti rotorové hlavě.

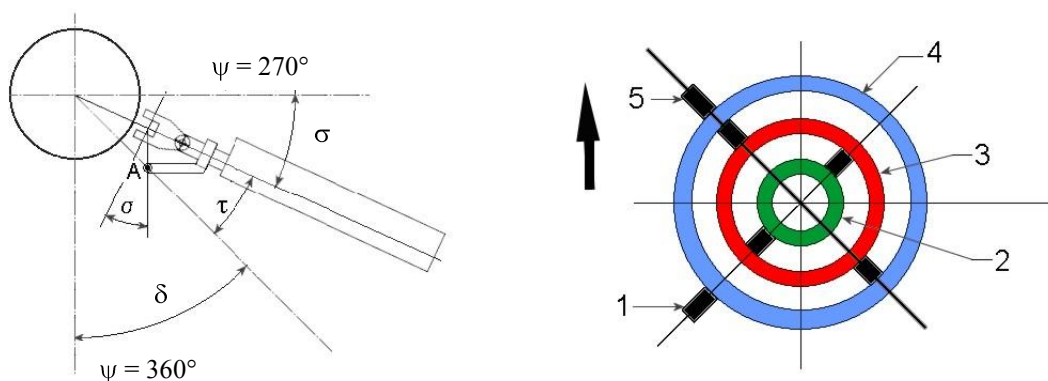
Vystřed'ování je umožněno křížovou spojkou. Deska se natáčí tím, že se celá posouvá na hřídeli nahoru a dolů po šroubové ploše působením matice se strmým závitem navlečené na rotorové hřídeli. [1, 2, 3, 7]

2.2.2 Úhel předstihu

Jak již bylo řečeno, mezi úhlem nastavení listu a úhlem jeho vymávnutí existuje závislost. Čím větší je úhel nastavení, tím větší je úhel vymávnutí. Jejich změna ale neprobíhá současně, protože samotné mávání trvá určitý čas. List mává nahoru, dokud je úhel nastavení kladný a naopak. Z toho vyplývá, že úhel nastavení je třeba změnit s určitým předstihem. U nosného rotoru bez kompenzátoru mávání je úhel předstihu roven 90° . Má-li tedy být maximální úhel vymávnutí v azimutu 360° , pak úhel nastavení musí být maximální již v azimutální poloze 270° . Takže při cyklické změně dochází v azimutu $0^\circ - 180^\circ$ ke zmenšení úhlu nastavení a v azimutu $180^\circ - 360^\circ$ k jeho zvětšení. Současně se bude měnit tah listu způsobující jeho vymávnutí.



Obr. 2.2.2.1 Závislost φ a β na azimutální poloze listu [1]



Obr. 2.2.2.2 Úhel předstihu automatu cyklického řízení [1]

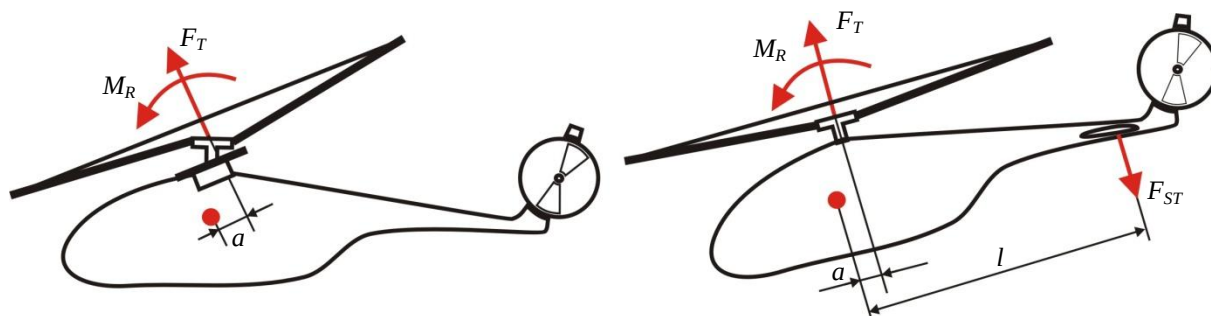
Úhel předstihu u skutečných rotorů bude menší, protože kompenzátor mávání (v podstatě kinematická vazba mezi osovým závěsem listu a otočnou částí automatu cyklického řízení) při vymávnutí listu směrem vzhůru zmenší jeho úhel nastavení, čímž se zmenší maximální úhel vymávnutí a nastává tak dříve. Zmenšení úhlu předstihu je přibližně rovno úhlu kompenzátoru mávání σ . Rozdíl azimutů je tedy roven $90^\circ - \sigma$, takže pro náklon dopředu musí být maximální úhel nastavení v azimutu $270^\circ + \sigma$. Toho dosáhneme nakloněním talíře cyklického řízení. Křídélkování listu je realizováno pomocí táhla spojujícího talíř cyklického řízení s pákou ovládání listu, která je umístěná v rovině otáčení rotoru o úhel τ před listem, takže nejnižší bod talíře cyklického řízení se bude nacházet v azimutu $270^\circ + \sigma + \tau$. Hodnotu azimutu 360° doplňuje hledaný úhel δ , což je hodnota, o kterou musí náklon cyklického řízení předběhnout náklon rotorového kužele. Tento úhel se nazývá úhel předstihu automatu cyklického řízení. [1]

2.2.3 Podélné a příčné řízení

Při potlačení páky cyklického řízení od sebe se vnější otočný kroužek nakloní dopředu, což způsobí naklonění nosného rotoru a výsledného vektoru tahu směrem vpřed, a vznikne řídicí moment

$$M_R = F_T \cdot a - M_{ST}$$

kde M_{ST} je tlumící moment stabilizátoru.



Obr. 2.2.3.1 Podélné řízení [1]

Klopením vrtulníku se řídicí moment v důsledku zmenšení vzdálenosti a zmenšuje, a navíc vzniká tlumící moment od síly na stabilizátoru. V momentě, kdy se řídicí a tlumící moment vyrovnají, bude vrtulník stabilizovaný v nové poloze.

Při klonění kolem podélné osy je situace obdobná. Nosný rotor se nakloní do strany a řídicí moment začne vrtulník naklánět. Stabilizující moment v tomto směru je ovšem minimální, takže klonění bude pokračovat, dokud pilot nevrátí páku cyklického řízení zpět do neutrální polohy. [1]

2.3 Kolektivní řízení

Systém kolektivního řízení zahrnuje páku kolektivu, automat cyklického řízení, převodů a nosného rotoru. Páka kolektivu se nachází zpravidla vlevo od pilota a může se pohybovat nahoru a dolů. Při jejím přitáhnutí se vodící pouzdro a s ním i celý automat cyklického řízení posune nahoru, čímž se změní úhel nastavení všech listů a tah nosného rotoru roste. Změní se také aerodynamický odpor listů, a pro zachování konstantních otáček je tedy potřeba přizpůsobit výkon motoru. Proto je tato změna kinematicky spjatá se změnou ovládání regulátoru dodávky paliva do motoru tak, že při zvednutí páky kolektivu, kdy se úhel nastavení zvětšuje, motory zvýší svůj výkon a naopak.

Turbohřídelové motory jsou vybaveny automatickou regulací množství paliva v závislosti na otáčkách rotoru, ale pro jemné doladění otáček je páka kolektivu vybavena plynovou rukojetí. Pro kontrolu práce stroje na zemi jsou zde navíc samostatné páky ovládání motoru.

U lehkých vrtulníků se používá přímé řízení, kdy pilot přímo ovládá rotorovou soustavu, u těžších strojů řízení nepřímé, které zahrnuje hydraulické posilovače, vyvažovací mechanismy a další zařízení, která usnadňují řízení. [1, 2, 3]

2.4 Pohony systému řízení

Nejjednodušším a nejstarším systémem řízení je řízení manuální. Obsahuje pouze mechanické převody mezi pákami řízení a řídicími prvky vrtulníku. Jeho velkou výhodou je fakt, že přenáší aerodynamické síly působící na vrtulník na páku řízení pilota, čímž zajišťuje potřebnou zpětnou vazbu, která umožní pilotovi posoudit správnost svého počínání. Tento

mechanický převod se v současnosti používá jen u lehkých vrtulníků, kde síla pilota stačí na překonání aerodynamických sil, popřípadě se využívá jako nouzový.

U těžších strojů je třeba použít hydraulický systém, respektive systém obsahující hydraulické výkonové členy. Jeho výhody jsou poměrně malé rozměry a hmotnosti, vysoká rychlost, přesnost, vysoká účinnost a možnost pracovat při vysokých okolních teplotách bez nutnosti chlazení.

Nejmodernějším systémem řízení je elektroimpulzní řízení, tzv. „fly-by-wire“. V tomto systému je řízení realizováno pomocí počítače, který vysílá signály (spojité nebo diskrétní) přímo do výkonových členů řídicího systému. Hydraulické členy jsou podobné jako u mechanického řízení, v takovém případě je ale mechanické ovládání ventilů nahrazeno elektrickým. Celý mechanický převod je tedy nahrazen elektrickými vodiči. Existuje také varianta „power-by-wire“, kde jsou i hydraulické výkonové členy nahrazeny elektrickými. Přínosem této varianty je snížení hmotnosti a snazší údržba systému. [1]

2.5 Směrové řízení, vyrovnavání točivého momentu

Při práci nosného rotoru působí na jeho listy aerodynamický odpor, který se projevuje momentem vzhledem k ose otáčení, M_{ODP} . Za letu musí být otáčky nosného rotoru konstantní, což platí, pokud se odporový moment rovná točivému momentu od motorů vrtulníku, $M_{ODP} = M_{KR}$. Podle třetího Newtonova zákona vyvolává M_{KR} stejně velkou reakci opačného směru, tzv. reakční moment nosného rotoru, M_{RNR} .

Směrové řízení vrtulníku tedy slouží nejen ke změně směru jeho letu, k nastavení podélné osy jeho trupu do libovolného směru, ale navíc zajišťuje i kompenzaci reakčního momentu nosného rotoru. V současnosti existuje několik základních koncepcí směrového řízení. [1]

2.5.1 Vyrovnávací rotor

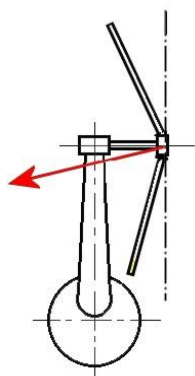
V současnosti nejrozšířenější je směrové řízení pomocí ocasního rotoru. Ten je v podstatě analogií stavitelné vrtule. Tah vyrovnávacího rotoru T_{VR} na rameni l vytváří moment, který vyrovnává reakční moment nosného rotoru. Momentová rovnováha je tedy $M_{RNR} = T_{VR} \cdot l$. Z konstrukčního hlediska se jedná o obdobné ústrojí jako u rotoru nosného, je ovšem o něco málo jednodušší, neboť nevyžaduje cyklickou změnu úhlu nastavení. Ten se mění kolektivně pomocí pedálů nožního řízení v kabině pilota, které jsou soustavou táhel spojeny s ovládacím mechanismem. Současně s úhlem nastavení dochází ke změně tahu vyrovnávacího rotoru, tím k narušení momentové rovnováhy a vlastní změně směru. Tento tah musí být také vyrovnán odpovídající složkou tahu nosného rotoru, což v praxi znamená vychýlení trupu stroje o přibližně 2 až 3°.

Vyrovnávací rotor sestává z listů, rotorové hlavy a mechanismu pro změnu úhlu nastavení listů. Jeho listy jsou spojené s hlavou pomocí vztlačových závěsů, které umožňují mávání, a zajišťují tak, že vektor tahu prochází středem hlavy. Existuje též varianta s jedním společným vztlačovým čepem. V současnosti je naprostá většina vyrovnávacích rotorů v tlačném uspořádání.

Rozlišujeme několik druhů vyrovnávacích rotorů.

- S tuhým zavěšením listů
- S kloubovým zavěšením listů
- S kardanovým zavěšením

U vyrovnávacích rotorů s tuhým upevněním listů dochází vlivem asymetrie jeho rychlostního pole k posunutí působíště tahu směrem k azimutu 90° , čímž vzniká moment, který dále zatěžuje reduktor a ocasní nosník.



Obr. 2.5.1.2
Kloubový VR [1]

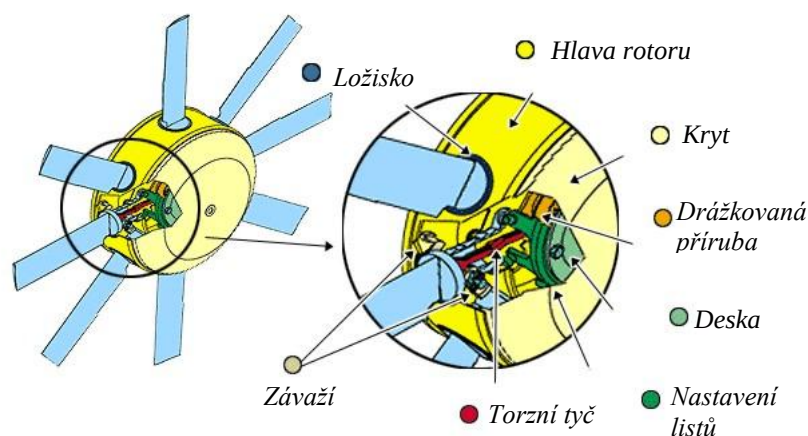
Rotory s kloubovým zavěšením listů mají osový a vztlakový závěs, což umožňuje mávání listů, a tedy vychýlení vektoru tahu. Ohybový moment zatěžující reduktor tak bude menší než u vyrovnávacího rotoru s tuhým upevněním. Kývací závěs se nepoužívá, protože Coriolisovy síly, vznikající v důsledku mávání, jsou minimální.

Hlavu vyrovnávacího rotoru může tvořit i kardanový závěs. V takovém případě se rotor naklání jako celek, ale listy se otáčejí v jedné rovině. Varianta pro dvoulistý kardanový rotor je jednodušší, má jen jednu osu otáčení a jedná se o tzv. neúplný kardan. V případě více listů je užito úplného kardanu s vnitřním i vnějším kroužkem. Zvláštností tohoto zavěšení je fakt, že při jedné otáčce nemá konstantní převodový poměr, tedy ani konstantní úhlovou rychlost. V důsledku toho vzniká torzní kmitání, které lze do jisté míry kompenzovat úpravou charakteristiky kompenzátoru mávání.

Výhody tohoto klasického uspořádání jsou spolehlivost, jednoduché řízení a v porovnání s ostatními menší provozní náklady. Za nevýhody je naopak považována ztráta výkonu odebraného vyrovnávacím rotorem (při vzletu až 20 %), malý přípustný rozsah posuvu těžiště a horší řiditelnost v určitých letových režimech. [1, 3, 7]

2.5.2 Vrtule v prstenci

Jedná se o zcela uzavřené dmychadlo umístěné v prstenci, které bylo poprvé použito koncem šedesátých let na vrtulníku Aérospatiale SA 341 Gazelle. V současnosti jej využívá například vrtulník Dauphin a některé další stroje společnosti Eurocopter, s jeho využitím se také počítalo u průzkumného vrtulníku Boeing/Sikorsky RAH 66 Comanche, jehož projekt byl ovšem roku 2004 zrušen.



Obr. 2.5.2.1 Detail ventilátoru vrtulníku Eurocopter EC 120B [9]



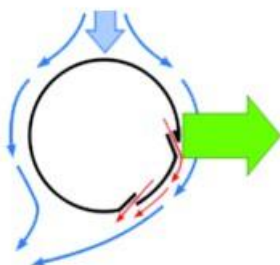
Toto uspořádání omezuje riziko kontaktu vyrovnávacího rotoru se zemí a zvyšuje bezpečnost pozemního personálu. Široká kýlová plocha navíc zlepšuje vlastnosti stroje při autorotaci a za letu přispívá k vyrovnání reakčního momentu od nosného rotoru. Oproti klasické koncepci také nevyžaduje tak velký výkon a je tišší. Na druhou stranu je jeho zástavba dražší a hmotnost konstrukce vyšší. [1, 3, 9]

Obr. 2.5.2.2 13lopatkový ocasní rotor vrtulníku Aérospatiale SA 342 Gazelle [10]

2.5.3 NOTAR

V této zkratce jsou schována slova „no tail rotor“, jedná se tedy o stroj bez ocasního rotoru. Jde o vynález firmy Hughes helicopters (později převzatá firmou McDonnell Douglas).

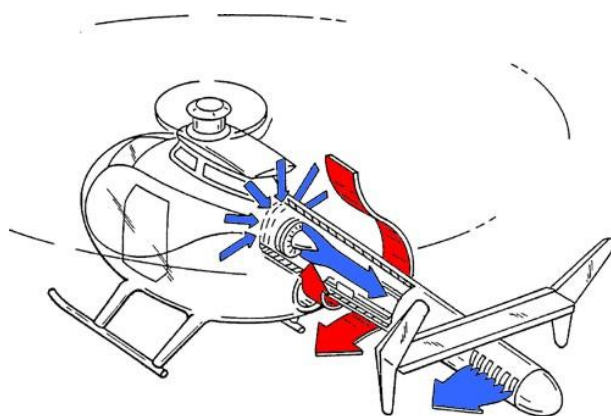
Princip jeho práce není na první pohled zřejmý. V zadní části trupu je umístěn nastavitelný ventilátor. Tento ventilátor žene vzduch ocasní částí do vzduchové dýzy, která je ovládaná pedály z kabiny, a vzniklý tah přispívá k



Obr. 2.5.3.2 Princip NOTAR [8]

vyrovnání točivého momentu a umožňuje směrové řízení stroje. Ventilátor dále žene vzduch tangenciálně skrz dva otvory na pravé straně ocasního nosníku, tím dojde k zvýšení rychlosti (a tedy snížení tlaku) na pravé straně a ke snížení rychlosti (a tedy zvýšení tlaku) na straně levé, kde vzduch vlivem tzv. Coandova jevu proudí proti indukovanému proudu od nosného rotoru. Vzniklá aerodynamická síla vyrovnává točivý moment.

Výhodou tohoto systému je minimum rotujících částí, a tedy minimální vibrace, bezpečnost obsluhy, nižší hmotnost a v neposlední řadě i nižší hlučnost. Naopak mezi nevýhody patří nižší účinnost (a tedy vyšší odebíraný výkon) a horší ovladatelnost stroje. [1, 8]



Obr. 2.5.3.1 Princip NOTAR [8]

2.5.4 Koaxiální koncepce

Spočívá v použití dvou protiběžných nosných rotorů umístěných nad sebou na dvou souosých hřídelích (a tedy se společnou osou rotace). Pokud dochází k úpravě úhlu nastavení u obou rotorů současně, jsou jejich reakční momenty v rovnováze. Princip směrového řízení spočívá v narušení této rovnováhy rozdílným nastavením listů obou rotorů. O co se úhel nastavení na jednom rotoru zvětší, o to se na druhém zmenší. Se změnou úhlu nastavení se změní i aerodynamický odpor listů, a tak je pro udržení konstantních otáček upraven výkon (změnou množství dodávaného paliva), což vede ke změně točivého momentu rotoru a tedy i



*Obr. 2.5.4.1 Rotorová hlava
vrtulníku Kamov Ka – 26 [10]*

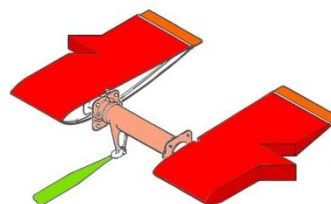
momentu reakčního. Celkový tah tedy zůstává konstantní, ale vznikají rozdílné reakční momenty na rotoru s větším a menším úhlem nastavení a tato nerovnováha umožňuje směrové řízení stroje.

Dnes toto uspořádání používá téměř výhradně ruská konstrukční kancelář Kamov. Byl to právě Nikolaj Iljič Kamov, kdo je už v roce 1947 úspěšně uplatnil na stroji Ka – 8 a od té doby se další Kamovovy návrhy nesou právě v duchu dvourotorové koncepce. Od lehkého víceúčelového Ka – 26, přes námořní Ka – 31 až po po zuby ozbrojený Ka – 50. U ostatních výrobců se tyto stroje vyskytují maximálně ve stádiu prototypů, například Sikorskyho S – 69. Dalším příkladem může být například francouzský Breguet G.IIE z roku 1949.

Výhodou tohoto uspořádání je vyšší užitečné zatížení. Je to dáno tím, že na rozdíl od koncepce s vyrovnávacím rotorem je zde veškerý výkon spotřebováván pro vyvození vztlaku. Mezi další výhody patří například tišší provoz, kompaktnější rozměry, vyšší bezpečnost vzhledem k absenci vyrovnávacího rotoru a v neposlední řadě také redukce vlivu asymetrie tahu nosného rotoru při dopředném letu. Naopak mezi nevýhody můžeme zařadit například náročnější konstrukci rotorové hlavy. [1, 11]

2.6 Stabilizátory

Stabilizátory jsou vodorovné ocasní plochy umístěné na ocasním nosníku co nejdál od těžiště pod určitým úhlem nastavení. Používají se pro zlepšení podélné stability a říditelnosti vrtulníku, přičemž se využívají stabilizátory pevné, jejichž nastavení lze měnit pouze na zemi, a stabilizátory pohyblivé, které je možné nastavovat i za letu, a tak měnit jejich klopivý moment. Jejich nastavení je přitom úzce spjato s kolektivní změnou úhlu nastavení listů nosného rotoru, aby byla zaručena stabilita při všech ustálených i přechodových letových režimech. Stabilizátor se nastavuje do kladných i záporných úhlů. Jeho profil bývá souměrný. Z konstrukčního hlediska se jedná o poloskořepinu nebo nosníkovou poloskořepinu. [1, 3]



Obr. 2.6.1 Pohyblivé stabilizátory [1]

3 Závěr

Současné vrtulníky jdou velmi rychle kupředu a s nimi se vyvíjí i systémy jejich řízení. Samotnou mechaniku je již z principu těžké nahradit, a tak se jedná spíše o zdokonalování jejího pohonu systémy jako „fly-by-wire“ nebo „power-by-wire“ s elektrickými výkonovými členy.

Naprostá většina současných výrobců vrtulníků se drží nejklassičtější koncepce těchto složitých strojů, používá kombinaci jednoho nosného a jednoho vyrovnávacího rotoru (Obr 1.3 a). Vrtulníky takto uspořádané najdeme ve všech kategoriích, od nejlehčího Robinsona R22 až po mamutí Mi – 26. Ale i zde se dá uplatnit inovativní přístup. Ať už se jedná o ventilátor v prstenci, který využívají hlavně stroje společnosti Eurocopter (AS 365 Dauphin či AS 565 Panther), nebo o tzv. „NOTAR“, který je vynálezem společnosti McDonnell Douglas helicopter, jejíž stroje (například MD 600N nebo MD 900 Explorer) ho také používají. V případě vrtulníků pro přepravu těžšího a rozměrnějšího nákladu se uplatňuje tzv. tandemové uspořádání (Obr. 1.3 d), přičemž výhodou je, že reakční momenty obou rotorů se vyruší. Mezi nejznámější představitele těchto strojů patří například Boeing CH – 47 Chinook či Boeing Vertol CH – 46 Sea knight, ale najdeme i mnoho starších případů. Zvláštní kapitolou je koaxiální uspořádání, které, jak již bylo řečeno, dnes užívá ruský Kamov. Ostatní koncepce jsou spíše ojedinělé.

Vrtulníková technika urazila za poměrně krátkou dobu vývoje dlouhou cestu. Otázkou tak zůstává, zda bude i budoucnost těmto strojům stejně nakloněna. Je sice pravděpodobné, že i vrtulníky narazí na vyšší ceny paliva nebo ekologická omezení, ale vzhledem k jejich nezastupitelné funkci je jistě čeká zářná budoucnost.

4 Použité zdroje

- [1] NEŠTRÁK, Dušan; PILA, Ján. *Aerodynamika, konstrukce a systémy vrtulníků*. 1. vyd. Brno: CERM 2006. 456 s. ISBN 80 – 7204 – 484 – 2
- [2] SVOBODA, Václav. *Vrtulníky*. 1. vyd. Praha: Naše vojsko 1979. 324 s. 505/21/857
- [3] KULČÁK, Ludvík. *Učebnice pilota vrtulníku*. Brno: CERM 2009. 452 s. ISBN 978 – 80 – 7204 – 627 – 0
- [4] Aeroweb [online]. [cit. 2011 – 5 – 20] dostupné z www: <http://www.aeroweb.cz/clanek.asp?ID=2587&kategorie=15>>
- [5] Centennial of flight commission [online]. [cit. 2011 – 5 – 20] dostupné z www: http://www.centennialofflight.gov/essay/Rotary/early_helicopters/HE1.htm>
- [6] Vrtulníky v Česku [online]. [cit. 2011 – 5 – 20] dostupné z www: <http://www.vrtulnik.cz/cojeto.htm>>
- [7] Letecký ústav FSI [online]. [cit. 2011 – 5 – 20] dostupné z www: <http://lu.fme.vutbr.cz/ucebnice/opory/stress.php#13.2>>
- [8] Wikipedia [online]. [cit. 2011 – 5 – 20] dostupné z www: <http://en.wikipedia.org/wiki/NOTAR>>
- [9] Eurocopter [online]. [cit. 2011 – 5 – 20] dostupné z www: <http://www.eurocopter.ca/asp/pEC120Bfenestron.asp>>
- [10] DOMKE, Burkhard. *Rotorhead gallery* [online]. [cit. 2011 – 5 – 20] dostupné z www: <http://www.b-domke.de/AviationImages/Rotorhead.html>>
- [11] AviaStar [online]. [cit. 2011 – 5 – 20] dostupné z www: <http://www.aviaStar.org/helicopters.html>>

5 Seznam zkratek

D	[m]	průměr nosného rotoru
r	[m]	charakteristický poloměr nosného rotoru
S_{NR}	[m ²]	plocha nosného rotoru
v_O	[m.s ⁻¹]	obvodová rychlost listů
v_i	[m.s ⁻¹]	indukovaná rychlost
ω_{NR}	[rad.s ⁻¹]	úhlová rychlost nosného rotoru
n	[min ⁻¹]	otáčky
α	[°]	úhel náběhu listu
α_{NR}	[°]	úhel náběhu rotoru
φ	[°]	úhel nastavení listu
ξ	[°]	úhel kývání listu
β	[°]	úhel mávání listu
σ	[-]	součinitel plnosti
	[°]	úhel kompenzátoru mávání
μ	[-]	postupový poměr
λ	[-]	průtokový poměr
ψ	[°]	azimutální poloha listu
τ	[°]	úhel mezi osou listu a táhlem řízení
δ	[°]	úhel předstihu
M_R	[N.m]	řídící moment
M_{ST}	[N.m]	tlumící moment stabilizátoru
F_T	[N]	tah nosného rotoru
M_{ODP}	[N.m]	odporový moment
M_{KR}	[N.m]	točivý moment motoru
M_{RNR}	[N.m]	reakční moment
T_{VR}	[N]	tah vyrovnávacího rotoru