

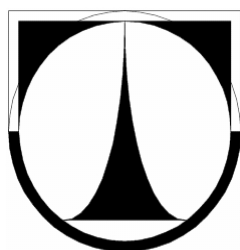
30. Setkání kateder mechaniky tekutin a termomechaniky



22.-24.6. 2011

Špindlerův Mlýn

Jednotlivý příspěvek ze sborníku



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Analýza nestabilnej práce voľnej plynovej turbíny turbokompresorových motorov

Marián HOCKO¹

¹ Ing. Marián Hocko, PhD., Letecká fakulta, Technická univerzita v Košiciach, Rampová 7, 042 21 Košice, Slovenská republika

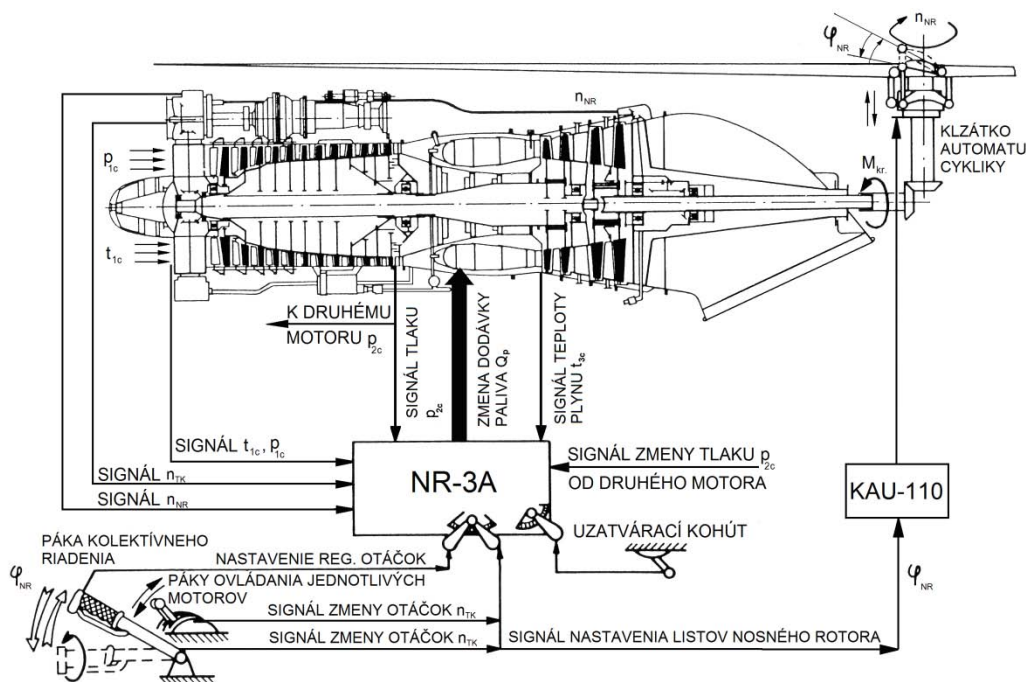
Abstrakt: V príspevku je vykonaná analýza nestabilnej práce voľnej plynovej turbíny turbohriadeľového vrtuľníkového motora TV3-117. Analýza je zameraná na podmienky vzniku tohto javu a možnosti jeho riešenia u turbohriadeľového vrtuľníkového motora a priemyselného turbokompresorového motora s voľnou plynovou turbínou.

1. Úvod

V priebehu prevádzky leteckého turbohriadeľového vrtuľníkového motora pracuje jeho voľná plynová turbína motora aj v nestabilných (nevýpočtových) režimoch, najmä pri prudkých zmenách otáčok nosného rotora, otáčok turbokompresora motora a pri zmenách prietoku plynov cez jednotlivé časti motora. Za stabilné (výpočtové) režimy práce motora sú považované také, pri ktorých nedochádza k nestabilnej práci motora. Na základe výsledkov výskumov je možné konštatovať, že pri nestabilných režimoch dochádza

k odtrhávaniu prúdu plynov pri obtekaní lopatiek voľnej plynovej turbíny, čo spôsobuje značné neproduktívne straty energie prúdiacich plynov, prudký pokles účinnosti voľnej plynovej turbíny, a tým aj pokles výsledného efektívneho výkonu, ktorý je prenášaný cez hlavný reduktor na nosný a vyrovnávací rotor vrtuľníka. K podobným javom dochádza aj u priemyselných turbokompresorových motorov, ktoré majú voľnú (výkonovú) plynovú turbínu nerovnomerne zaťažovanú.

2. Regulačná sústava turbohriadeľového vrtuľníkového motora



Obr. 1 Princípálna schéma regulačnej sústavy kolektívneho riadenia s automatickým udržiavaním otáčok nosného rotora a ovládania kolektívneho riadenia nosného rotora vrtuľníka

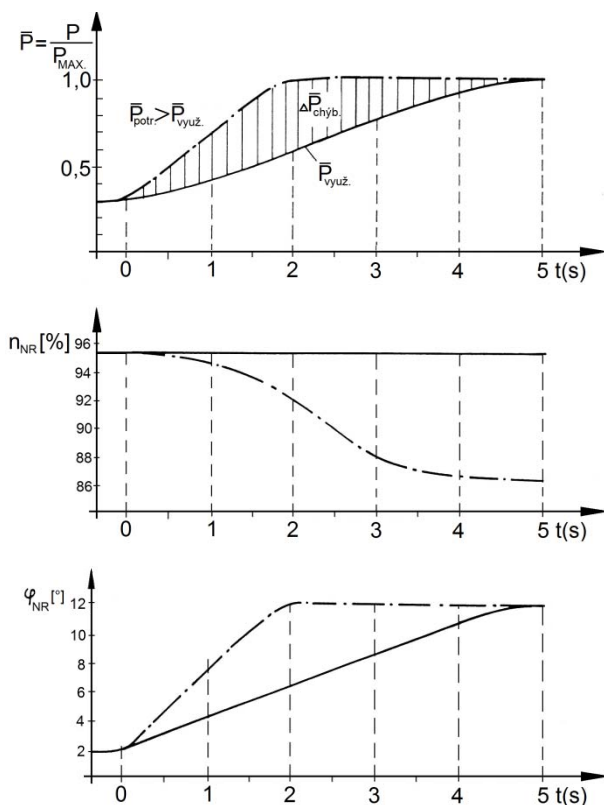
Hlavnou úlohou pohonnej jednotky vrtuľníka, ktorú v súčasnej dobe zvyčajne tvoria dva turbohriadeľové motory (Mi-2, Mi-17, Mi-24, Aérospatiale SA 330 Puma, NH-90 a pod.), je zabezpečenie pohonu nosného rotora vrtuľníka počas jeho letu v ľubovoľnom režime a manévroch, ako aj pri spúšťaní motorov, roztáčaní a zastavovaní nosného rotora vrtuľníka. Pri ustálených režimoch chodu turbohriadeľových motorov zabezpečuje automatika pohonnej jednotky udržiavanie nastavených otáčok nosného rotora. Pri prechode na znížený výkon motorov (zmenšenie uhla nastavenia listov nosného rotora, alebo pri nastavovaní rukoväte korekcie doľava) vzniká na voľnej turbíne turbohriadeľového motora nedostatočný krútiaci moment (nedostatočný výkon) a otáčky nosného rotora sa znižujú. Pri premiestňovaní páky kolektívneho riadenia vrtuľníka pri pracujúcich turbohriadeľových motoroch na ustálených režimoch (cestovnom, nominálnom alebo vzletovom) pilot prostredníctvom páky kolektívneho riadenia ovláda zmenu uhla nastavenia listov nosného rotora. Jednotka riadenia upravuje dodávku paliva (Q_p) do hlavnej spaľovacej komory motorov a zabezpečuje udržiavanie zvolených otáčok.

2. Silový rozbor pri zmene uhla nábehu listu nosného rotora vrtuľníka

Pri spúšťaní motorov a zvyšovaní otáčok voľnej turbíny (pri otáčaní rukoväte korekcie doprava od voľnobežného režimu po cestovný režim a pri nastavovaní páky kolektívneho riadenia hore) dochádza na voľnej turbíne turbohriadeľového motora k vzniku prebytku krútiaceho momentu (prebytok výkonu), ktorý sa udržiava až do dosiahnutia stanoveného režimu motorov. Pri ustálených režimoch chodu turbohriadeľových motorov zabezpečuje automatika pohonnej jednotky udržiavanie nastavených otáčok nosného rotora. Otáčky rotora turbokompresora turbohriadeľového motora sa však v tomto prípade menia v dôsledku zaťaženia voľnej plynovej turbíny potrebným krútiacim momentom (potrebným

výkonom), ako aj v dôsledku zmeny teploty vzduchu na vstupe do motorov T_{1c} . Pri prechode na znížený výkon motorov (pri zmenšení uhla nastavenia listov nosného rotora a pri nastavovaní rukoväte korekcie doľava na voľnobežný režim) vzniká na voľnej plynovej turbíne turbohriadeľového motora nedostatočný krútiaci moment (nedostatočný výkon) a otáčky nosného rotora sa znižujú.

Pri premiestňovaní páky kolektívneho riadenia vrtuľníka pri pracujúcich turbohriadeľových motoroch na ustálených režimoch (cestovnom, nominálnom a vzletovom) pilot prostredníctvom páky kolektívneho riadenia (jej plynulým nastavovaním a úplným otočením korekcie doľava) ovláda nastavenie uhla nastavenia listov nosného rotora (obr. 2). Palivoregulačnou sústavou turbohriadeľových motorov sapritom príslušným spôsobom upravuje dodávku paliva do hlavnej spaľovacej komory motorov Q_p a sú udržiavané zvolené otáčky nosného rotora vrtuľníka. Keď pilot prestane premiestňovať páku kolektívneho riadenia smerom hore (zastaví ju), regulátor bude udržiavať konštantné otáčky nosného rotora vrtuľníka pri trocha vyšších otáčkach rotorov turbokompresorových motorov, a teda aj pri vyrovnanom krútiacom momente, ktorý je väčší ako pred zmenou polohy páky kolektívneho riadenia (napr. pri cestovnom režime turbohriadeľových motorov). Pri vzletovom režime sú v závislosti na veľkosti uhla nastavenia listov nosného rotora vrtuľníka, a teda v závislosti na potrebnom krútiacom momente, rovnovážne otáčky nosného rotora vrtuľníka trocha nižšie ako pri cestovnom alebo nominálnom režime. Časť zväčšeného potrebného krútiaceho momentu je kompenzovaná zväčšením uhla nábehu prúdu plynov na lopatkách voľných plynových turbín turbohriadeľových motorov v dôsledku určitého zníženia ich otáčok oproti otáčkam pri cestovnom alebo nominálnom režime. Uhol nábehu prúdu plynov na nábehovej hrane rotorových lopatiek voľnej plynovej turbíny turbohriadeľových motorov zvyčajne zostane trocha menší, ako je jeho kritická hodnota, takže k odtrhnutiu prúdu plynov z povrchu rotorových lopatiek nedochádza.



Obr. 2 - Zmeny pomerného potrebného výkonu $\bar{P}_{potr.}$, využiteľného výkonu $\bar{P}_{vyu.}$ a otáčok nosného rotora n_{NR} v závislosti na čase t pri rôznych rýchlostiach zväčšovania uhla nastavenia listov nosného rotora φ_{NR} (plná čiara zodpovedá rýchlosti nastavovania páky kolektívneho riadenia v súlade s predpisom pre používanie a techniku pilotovania, bodkočiarkovaná čiara zodpovedá veľkej rýchlosti nastavovania páky kolektívneho riadenia nosného rotora vrtuľníka).

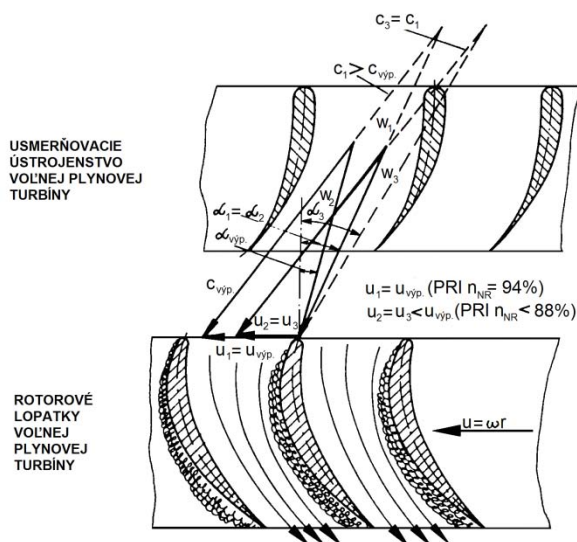
Prudká zmena polohy páky kolektívneho riadenia pilotom sa neodporúča. Pri rýchlych pohyboch páky kolektívneho riadenia nosného rotora vrtuľníka môže dôjsť k odtrhnutiu prúdu plynov z povrchu lopatiek voľnej plynovej turbíny turbohriadeľového motora a v dôsledku toho k zníženiu jej efektívneho výkonu a k poklesu otáčok nosného rotora vrtuľníka.

3. Nestabilné prúdenie na voľnej plynovej turbíne turbohriadeľového vrtuľníkového motora

Na obr. 3 je znázornené nestabilné obtekanie rotorových lopatiek jedného zo stupňov voľnej plynovej turbíny turbohriadeľového vrtuľníkového motora.

Odtrhnutie prúdu plynov na chrbte rotorovej lopatky voľnej plynovej turbíny turbohriadeľového motora môže nastať pri zväčšení uhla nábehu prúdiaceho plynu na nábehovej hrane rotorovej lopatky nad kritickú hodnotu (obr. 3), ku ktorému dochádza:

- pri prudkom zvýšení absolútnej výstupnej rýchlosti prúdu plynov, ktoré vystupujú z usmerňovacích lopatiek voľnej plynovej turbíny ($c_1 > c_{výp.}$), a pri konštantných otáčkach voľnej plynovej turbíny turbohriadeľového motora a konštantnej, výpočtovej obvodovej rýchlosti ($u_1 = u_{výp.}$);
- pri prudkom znížení otáčok voľnej plynovej turbíny turbohriadeľového motora, pri ktorom obvodová rýchlosť klesá ($u_2 < u_{výp.}$), a konštantnej absolútnej výstupnej rýchlosti prúdu plynov z usmerňovacích lopatiek voľnej plynovej turbíny ($c_2 = c_{výp.}$);
- pri súčasnom zvýšení absolútnej výstupnej rýchlosti prúdu plynov z usmerňovacích lopatiek voľnej plynovej turbíny turbohriadeľového motora ($c_3 = c_1$) a znížení otáčok voľnej plynovej turbíny turbohriadeľového motora ($u_3 = u_2 < u_{výp.}$).



Obr. 3 - Odtiahnutie prúdu plynov na chrbte rotorovej lopatky voľnej plynovej turbíny turbohriadeľového motora môže nastať pri zväčšení uhla nábehu prúdiaceho plynu na nábehovej hrane rotorovej lopatky nad kritickú hodnotu

Kde:

$c_{vyp.}$ – absolútna výpočtová rýchlosť prúdu plynov na výstupe z usmerňovacích lopatiek voľnej plynovej turbíny turbohriadeľového motora [ms^{-1}];

w – relatívna rýchlosť prúdu plynov na vstupe do rotorových lopatiek voľnej plynovej turbíny turbohriadeľového motora [ms^{-1}];

$u_{vyp.}$ – výpočtová obvodová rýchlosť rotora prvého stupňa voľnej plynovej turbíny turbohriadeľového motora [ms^{-1}];

u_1 – obvodová rýchlosť prvého stupňa voľnej plynovej turbíny turbohriadeľového motora pri výpočtových otáčkach nosného rotora $n_{NR} = 94\%$ [ms^{-1}];

ω – uhlová rýchlosť rotorových lopatiek voľnej plynovej turbíny turbohriadeľového motora pri výpočtových otáčkach nosného rotora [rad];

r – polomer disku rotora prvého stupňa voľnej plynovej turbíny turbohriadeľového motora [m];

α – uhol nábehu prúdu plynov na nábehovej hrane rotorových lopatiek prvého stupňa voľnej plynovej turbíny turbohriadeľového motora [$^\circ$];

$\alpha_{vyp.}$ – výpočtový uhol nábehu prúdu plynov na nábehovej hrane rotorových lopatiek prvého stupňa voľnej plynovej turbíny turbohriadeľového motora pri výpočtových otáčkach nosného rotora [$^\circ$];

c_1 – absolútna rýchlosť prúdu plynov na výstupe z usmerňovacích lopatiek voľnej plynovej turbíny turbohriadeľového motora, ktorá zodpovedá otáčkam nosného rotora $n_{NR} = 94\%$ [ms^{-1}];

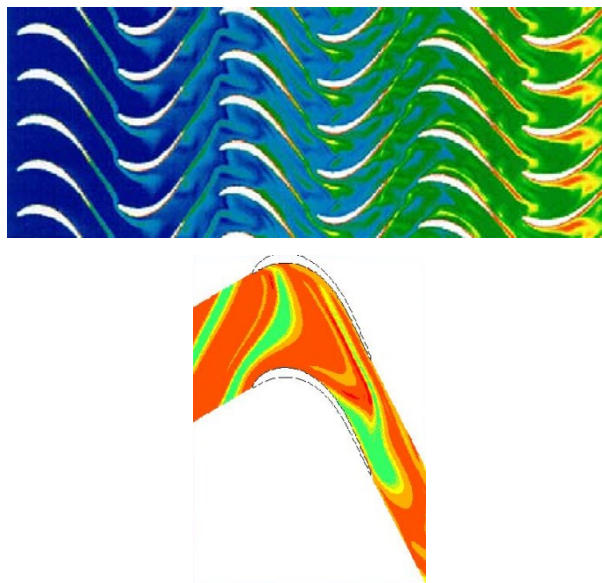
α_1 – uhol nábehu prúdu plynov na nábehovej hrane rotorových lopatiek prvého stupňa voľnej plynovej turbíny turbohriadeľového motora, ktorý zodpovedá otáčkam nosného rotora $n_{NR} = 94\%$ [ms^{-1}];

w_1 – relatívna rýchlosť prúdu plynov na vstupe do rotorových lopatiek voľnej plynovej turbíny turbohriadeľového motora, ktorá zodpovedá otáčkam nosného rotora $n_{NR} = 94\%$ [ms^{-1}];

u_2 – obvodová rýchlosť prvého stupňa voľnej plynovej turbíny turbohriadeľového motora pri otáčkach nosného rotora $n_{NR} < 88\%$ [ms^{-1}];

c_2 – absolútna rýchlosť prúdu plynov na výstupe z usmerňovacích lopatiek voľnej plynovej turbíny turbohriadeľového motora, ktorá zodpovedá otáčkam nosného rotora $n_{NR} < 88\%$ [ms^{-1}];

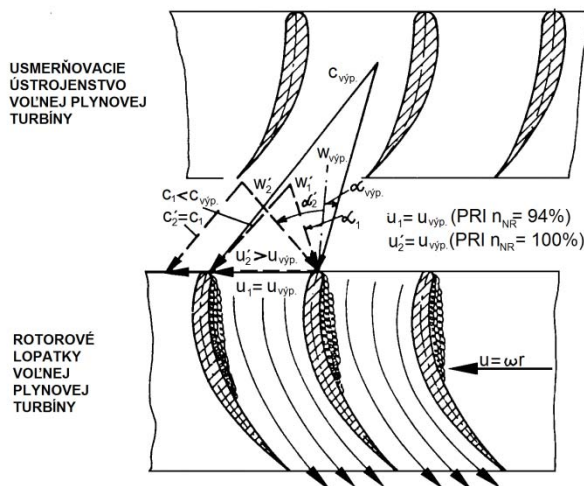
α_2 – uhol nábehu prúdu plynov na nábehovej hrane rotorových lopatiek prvého stupňa voľnej plynovej turbíny turbohriadeľového motora, ktorý zodpovedá otáčkam nosného rotora $n_{NR} = 94\%$ [$^\circ$];



Obr. 4 Vizualizovaný charakter prúdenia plynov u viacstupňovej plynovej turbíny a na chrbte statrovej lopatky voľnej plynovej turbíny turbohriadeľového motora

K odtrhnutiu prúdu plynov môže tiež dôjsť v koryte rotorovej lopatky voľnej plynovej turbíny turbohriadeľového motora (obr. 5) pri značnom zmenšení uhla nábehu prúdiaceho plynu na nábehovej hrane rotorovej lopatky pod kritickú hodnotu:

- pri prudkom znížení absolútnej výstupnej rýchlosti prúdu plynov z usmerňovacích lopatiek voľnej plynovej turbíny ($c_1 < c_{vyp.}$) a konštantných otáčkach voľnej plynovej turbíny motora konštantnej, výpočtovej obvodovej rýchlosti ($u_1 = u_{vyp.}$);
- pri súčasnem znížení absolútnej výstupnej rýchlosti prúdu plynov z usmerňovacích lopatiek voľnej plynovej turbíny ($c_2' = c_{vyp.}$) a zvýšení otáčok voľnej plynovej turbíny ($u_2' < u_{vyp.}$).



Obr. 5 Odtrhnutie prúdu plynov v koryte rotorovej lopatky voľnej plynovej turbíny turbohriadeľového motora môže nastať pri zmenšení uhla nábehu prúdiaceho plynu na nábehovej hrane rotorovej lopatky nad kritickú hodnotu

Kde:

u_2' – obvodová rýchlosť prvého stupňa voľnej plynovej turbíny turbohriadeľového motora pri otáčkach nosného rotora $n_{NR} = 100 \%$ [ms^{-1}];

w_2' – relatívna rýchlosť prúdu plynov na vstupe do rotorových lopatiek voľnej plynovej turbíny turbohriadeľového motora, ktorá zodpovedá otáčkam nosného rotora $n_{NR} = 100 \%$ [ms^{-1}];

α_2' – uhol nábehu prúdu plynov na nábehovej hrane rotorových lopatiek prvého stupňa voľnej plynovej turbíny turbohriadeľového motora, ktorý zodpovedá otáčkam nosného rotora $n_{NR} = 100 \%$ [$^\circ$].

V prevádzke dochádza k odtrhnutiu prúdu plynov na chrbte rotorových lopatiek voľnej plynovej turbíny turbohriadeľového motora najčastejšie pri náhodnom poklese otáčok nosného rotora pod hodnotu $n_{NR} = 88 \%$, bez ohľadu na to, v akom režime pracuje turbokompresor turbohriadeľového motora (vzletový, nominálny, cestovný). V takomto prípade bude regulátor otáčok voľnej plynovej turbíny zvyšovať dodávku paliva do hlavnej spaľovacej komory motora, aby došlo k zvýšeniu výkonu voľnej plynovej turbíny a k úprave otáčok nosného rotora na požadovanú hodnotu. Pretože v tomto okamihu uhol nábehu prúdiaceho plynu na nábehových hranách rotorových lopatiek voľnej plynovej turbíny dosiahol kritickú hodnotu, nedochádza k zvýšeniu krútiaceho momentu ani výkonu na výstupnom hriadeľi voľnej plynovej turbíny. Pri predstave, že sa okrem toho v tomto okamžiku ešte viac zvýši výtoková rýchlosť plynov z usmerňovacích lopatiek voľnej plynovej turbíny turbohriadeľového motora, potom bude uhol nábehu prúdiaceho plynu na nábehovej hrane rotorových lopatiek ešte viac nadkritický, takže k očakávanému zvýšeniu krútiaceho momentu v dôsledku zvýšenia rýchlosti prúdiaceho plynu nedôjde. To je dané tým, že odtrhnutím prúdu plynov sa pohltí prírastok energie, získaný zvýšením výtokovej rýchlosti plynov, a otáčky voľnej plynovej turbíny turbohriadeľového motora ďalej klesajú. V prevádzke sa môže voľná plynová turbína turbohriadeľového motora dostať do takého režimu odtrhnutia prúdu plynov na rotorových lopatkách voľnej plynovej turbíny v prípade, ak sa počas letu prudko (podstatne rýchlejšie, ako je to povolené) nastaví páka kolektívneho riadenia z voľnobežnej polohy do polohy, ktorá zodpovedá vzletovej polohe. Pri prudkej zmene polohy listov nosného rotora na veľký uhol nábehu dochádza rovnako rýchlo k zaťaženiu voľnej plynovej turbíny zvýšeným krútiacim momentom, avšak turbokompresor motora nestačí zabezpečiť takú dodávku prúdu plynov, ktorá by na voľnej plynovej turbíne turbohriadeľového motora vytvorila potrebný výkon

pre pohon nosného rotora vrtuľníka na danom režime. Otáčky nosného rotora vrtuľníka sa začnú rýchlo znižovať a môžu klesnúť až pod hodnotu $n_{NR} = 88 \%$. Aj napriek tomu, že v ďalšom priebehu činnosti motora bude kompresor turbohriadeľového motora pracovať s maximálnym výkonom, budú mať uhly nábehu prúdiaceho plynu na nábehových hranách rotorových lopatiek voľnej plynovej turbíny nadkritickú hodnotu. Ak bude v tomto okamihu ešte viac zväčšovaný uhol nábehu listov nosného rotora vrtuľníka, potom to bude ešte viac komplikovať existujúcu situáciu. Nosný rotor vrtuľníka sa ocitne v preťažení a nebude schopný vyvinúť potrebný ťah pre let vrtuľníka pri danom režime letu vrtuľníka. Časť a dlhodobý chod voľnej plynovej turbíny turbohriadeľového motora pri takom alebo podobných režimoch prispieva k predčasnému zníženiu efektívneho výkonu a nie je vylúčené ani poškodenie turbohriadeľového motora. Z tohto dôvodu nesmie rýchlosť zmeny polohy páky kolektívneho riadenia prekročiť stanovené hodnoty uvedené v predpise pre používanie daného typu vrtuľníka.

4. Záver

Ako bolo v článku uvedené, charakter prúdenia na lopatkách rotora voľnej plynovej turbíny priamo ovplyvňuje efektívnosť premeny tepelnej energie na mechanický výkon voľnej plynovej turbíny turbohriadeľového vrtuľníkového motora, čo má priamy vplyv na bezpečnosť letu vrtuľníka. Z uvedeného dôvodu má pochopenie uvedených procesov mimoriadny význam pre pilotov vrtuľníkov.

K analogickým procesom dochádza aj u priemyselných turbohriadeľových motorov s voľnou plynovou turbínou, ktoré zabezpečujú pohon elektrických generátorov v energetických zariadeniach, alebo pohon kompresorov v kompresorových staniciach plynovodov. U týchto turbokompresorových motoroch dochádza k vyššie uvedeným procesom v dôsledku prudkej zmeny záťaže elektrického generátora alebo kompresora.

5. Literatúra

- [1] HOCKO M.: ÚVOD DO KONŠTRUKCIE MOTORA TV3-117, VSŠL KOŠICE, 2001
- [2] HOCKO M.: KONŠTRUKCIA MOTORA TV3-117, VSŠL KOŠICE, 2002
- [3] HOCKO M.: MOTOR TV3-117, POMÔCKA PRE NASTAVOVANIE MOTORA, VSŠL KOŠICE 2000
- [4] NEŠTRÁK D., PILA J.: STUDIJNÍ MODUL 12, AERODYNAMIKA, KONSTRUKCE A SYSTÉMY VRTULNÍKU, CERM 2009
- [5] HOWELL R. J.: UNSTEADY TURBINE AERODYNAMICS – FROM THE LABORATORY TO THE ENGINE, WHITTE LABORATORY CAMBRIDGE UNIVERSITY DEPARTMENT OF ENGINEERING