



ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ



KATEDRA ENERGETICKÝCH STROJŮ A ZAŘÍZENÍ

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI



JEDNOTLIVÝ PŘÍSPĚVEK ZE SBORNÍKU



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

JEDNOPRÚDOVÝ JEDNOROTOROVÝ MOTOR S PREMENNOU VÝSTUPNOU TRYSKOU AKO REGULOVANÝ OBJEKT

POVAŽAN Jozef, FŐZŐ Ladislav, ANDOGA Rudolf, JUDIČÁK Jozef

Advances in control the aircraft engines achieve state, in those dominating factors are the demands for safety, quality and efficiency. Among the growing complexity of present systems, it is necessary to project such systems, as well as progressive methods of control, which increase effectiveness of their operation, increase safety and at the same time reducing their cost.

Kľúčové slová: zložitý systém, malý prúdový motor, premenlivý výstupný prierez, ovládanie

Úvod

V súčasnosti pojem zložitého systému (ZS) označuje veľmi široké spektrum riadených objektov. Pojem ZS sa vzťahuje na systém, ktorý sa skladá z veľkého počtu častí (elementov, podsystémov, subsystémov) a tieto sú medzi sebou prepojené nelineárnymi väzbami. Z pozorovaného rozvoja ZS (najmä rozsiahlych dopravných zariadení, lietajúcich aparátov, ...) vyplýva, že pre optimálnu funkciu takýchto systémov je potrebné využiť a implementovať najnovšie poznatky z oblastí riadiacej techniky a umelej inteligencie (UI). Súčasné riadiace systémy sú často obmedzené len na riadenie ZS za istých podmienok. V praxi sa však tieto systémy často nachádzajú v časovo kritickom stave, t.j. dochádza k požiadavke zrealizovať potrebné výpočty, rozhodnutia (rozhodovacie procesy, ktoré vždy predchádzajú riadiacim zásahom) rýchlo a správne a väčšinou „on-line“ spôsobom pri možnosti použitia obmedzeného množstva zdrojov a s garantovaným časom odozvy, pričom môže dôjsť aj k zmene prevádzkových podmienok (dostupný čas, zdroje a informácie). Pre správne rozhodnutie je potrebné vytvoriť dobrý model situácie v reálnom čase (čo vyžaduje určitý čas), naopak potreba rýchleho rozhodnutia je v priamom protiklade k časovo náročnému procesu vytvorenia tohto modelu vzniknutej situácie. Práve preto sa uplatňujú zložité rozhodovacie algoritmy, ktoré je však možné pre potreby rýchleho rozhodovania nahradiť zjednodušenými modelmi danej situácie, ktoré zahŕňajú len podstatné javy. [1]

Uvedený príspevok sa zaoberá rozšírením malého prúdového motora MPM-20 s konštantnou geometriou na jednoprúdový jednorotorový motor s premennou výstupnou tryskou, ako regulovaný objekt s dvoma stupňami voľnosti, laboratória inteligentných riadiacich systémov leteckých motorov (LIRSLM).

1. Jednoprúdový jednorotorový motor s premennou tryskou ako regulovaný objekt

Rozšírenie (prestavba) malého prúdového motora MPM-20 s konštantnou geometriou na motor s premennou tryskou (regulovateľným výstupným prierezom) vytvorila požiadavku pre návrh ovládania výstupnej trysky a preskúmanie správania sa použitia takéhoto systému (objektu riadenia). Ovládanie (zmena) prierezu výstupnej trysky A_5 sa najčastejšie používa na:

- skracovanie doby potrebnej k spusteniu a rozbehu motora,

- k skráteniu doby akcelerácie na maximálne otáčky,
- k dosiahnutiu čo najmenšej spotreby paliva, a
- k získaniu maximálneho ťahu.

Účelom výstupného ústrojenstva na leteckých motoroch je odvod plynov z motora do atmosféry, ich usmernenie do požadovaného smeru a zároveň premieňať tepelnú a tlakovú energiu plynu na kinetickú energiu plynu. Vo výstupnom ústrojenstve sa tak získava ťah F – sila, ktorá poháňa lietadlo vpred. [2]

Zmena prierezu A_5 má vplyv na veľkosť celkového tlaku plynov za turbínou p_{4c} . Z podmienok spoločnej práce turbokompresorovej časti motora a výstupnej trysky vyplýva, že pri zväčšení prierezu A_5 , tlak plynu p_{4c} za turbínou klesá. Pre celkový expanzný tlakový spád plynov v turbíne platí:

$$\pi_{TC} = \frac{p_{3c}}{p_{4c}},$$

kde p_{3c} – je celkový tlak plynu pred turbínou a
 p_{4c} – celkový tlak plynov za turbínou.

Zmena A_5 ovplyvňuje hodnotu p_{4c} , ktorá sa oproti hodnote p_{3c} mení výrazne. To má za následok, že zväčšovaním A_5 nám tlakový spád turbíny π_{TC} rastie a naopak zmenšením A_5 sa tlakový spád turbíny π_{TC} zmenší. Práca turbíny W_{Tc} jednorúrdového, jednohriadeľového leteckého turbokompresorového motora sa určí vzťahom:

$$W_{TC} = c_{p,pl} \cdot T_{3c} \left[1 - \frac{1}{\pi_{TC}^{\frac{\kappa'}{\kappa'-1}}} \right] \cdot \eta_{TC},$$

kde $c_{p,pl}$ – je merná tepelná kapacita plynu pri stálom ťahu,
 T_{3c} – celková teplota plynu pred plynovou turbínou,
 κ' – poisonová konštanta plynu a
 η_{Tc} – celková účinnosť turbíny.

Podľa uvedeného vzťahu merná práca turbíny W_{Tc} priamo závisí na π_{TC} , a ten závisí na A_5 . Tento vzťah vysvetľuje dopad regulovania prierezu výstupnej trysky na chod motora. Zmena W_{Tc} má vplyv na hodnoty parametrov tepelného obehu motora, ako ťah F a mernú spotrebu c_m .

Pre rovnovážny chod motora musí byť splnená podmienka:

$$W_{TC} \cdot \eta_m = W_{Kc},$$

kde W_{Tc} – je celková práca turbíny,
 η_m – mechanická účinnosť motora a
 W_{Kc} – celková práca kompresora.

Z uvedenej podmienky vyplýva, že:

- motor začne akcelerovať ak sa celková práca turbíny W_{Tc} zväčší:

$$W_{TC} \cdot \eta_m > W_{Kc},$$

- motor bude decelerovať ak sa celková práca turbíny W_{Tc} zmenší:

$$W_{TC} \cdot \eta_m < W_{Kc}.$$

2. Návrh ovládania výstupného ústrojenstva s meniteľnou geometriou v laboratórnych podmienkach

Pri návrhu ovládania sme vychádzali zo základných vstupných požiadaviek:

- sila minimálne potrebná k ovládaniu – zmene prierezu výstupnej trysky 25 kg
- dráha páky potrebná na zmenu prierezu z A_{5min} na A_{5max} (vyplýva z konštrukcie výstupného ústrojenstva s meniteľným prierezom, viď obr. 1) 40 mm
- maximálny čas zmeny prierezu 1sec.



Obr. 1 LIRSLM + výstupné ústrojenstvo malého prúdového motora MPM-20 s plynule meniteľným výstupným prierezom.

Pri návrhu ovládania prierezu výstupnej trysky sme vychádzali z existujúcich výkonných orgánov. Ako prvý je elektromotor, ktorého výstupný pohyb je posuvný a jeho označenie je MP-100M. Ako druhú variantu sme uvažovali modelárske servo HV DS8921.

Ovládanie pomocou HV DS8921

Modelárske servo - motor HV DS8921 je vlastne miniatúrny elektromotor s prevodovkou. Parametre:

- krútiaci moment až $36,5 \text{ kg.cm} = 3,569 \text{ Nm}$ pri 8,5 V,
- maximálna rýchlosť otáčania $60^\circ/0,13\text{sec.}$,
- rozsah napájacieho napätia $U=6,0 \text{ V}$ až 8,5 V.

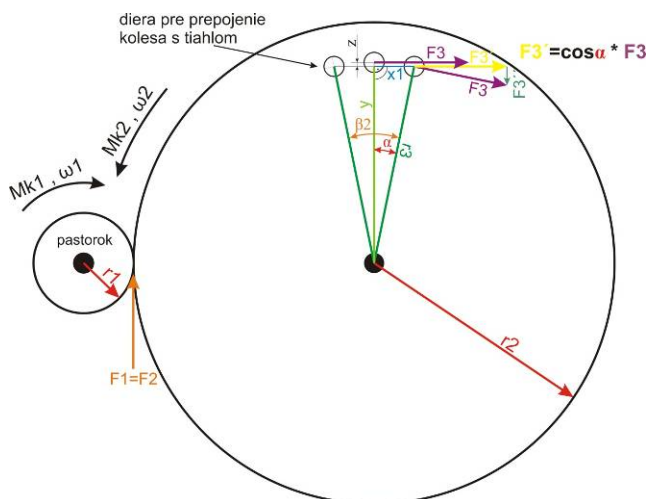


Obr. 2 Servo HV DS8921

Výhodou serva HV DS8921 je, že poskytuje možnosť polohovania jeho otočného hriadeľa, pričom jeho poloha výstupného hriadeľa je snímaná spätnoväzobným členom (väčšinou potenciometrom), ktorý vysiela údaje o polohe späť do riadiacej jednotky vstavanej v serve. Táto elektronika zabezpečuje rýchle ovládanie smeru a polohy otáčania motorčeka. Požadovaná poloha výstupného hriadeľa je do riadiacej elektroniky zadávaná pulzne – šírkoovo modulovaným signálom alebo tiež nazývaný PWM signál (Pulse - Width Modulated).

Pri návrhu ovládania výstupnej trysky pomocou serva HV DS8921 za pomoci pákového systému (pomocou pák) sme zohľadňovali jeho výstupné parametre voči požiadavkám kladeným na výstupné ústrojenstvo. Po viacerých výpočtoch, uvážení rôznych možnosti prenesenia pohybu z modelárskeho serva na výstupnú trysku pomocou pák, sme došli k negatívnemu záveru (výstup z pákového mechanizmu k páke ovládania výstupnej trysky mal vždy nesprávny pomer sily a dráhy - výchylky). Pri dostatočnej výchylke bola veľmi mala sila a opačne.

Ďalším z možnosti je na servo nasadiť ozubené koleso - pastorok, ktorý bude poháňať veľké ozubené koleso. Veľké ozubené koleso by bolo priamo prepojené s výstupným ústrojenstvom prostredníctvom tiahla. Výstupný hriadeľ serva sme osadili malým ozubeným kolesom, ktorého priemer bol $d_p=30\text{mm}$, polomer $r_1=15\text{mm}$. Druhé ozubené koleso sme použili s priemerom rozstupovej kružnice $d_p=180\text{mm}$, polomerom $r_2=90\text{mm}$. Pri takejto kombinácii súkolesia s prevodovým pomerom $i=6$ som vyrátal, že otáčaním malého ozubeného kolesa o $\beta_1=174^\circ$ sa veľké ozubené koleso bude otáčať o uhol $\beta_2=29^\circ$. Bod prepojenia veľkého ozubeného kolesa s tiahlom je na polomere $r_3=80\text{mm}$. Sila na tiahle by bola $F_3'=259,17\text{ N} - 26,4\text{ kg}$.



Obr. 3 Grafický náčrt k výpočtu

Z obr. 3 je zrejme, že malé ozubené koleso by svoju silu (ktorej veľkosť je určená z krútiaceho momentu Mk_1 serva) prenáša na veľké ozubené koleso na rozstupovej kružnici. Preto $F_1=F_2$ pričom je známe, že $Mk_1 = 3,569\text{ Nm}$ a $r_1 = 15\text{ mm}$. Potom

$$Mk_1 = F_1 \cdot r_1 \text{ a}$$

$$F_1 = F_2 = \frac{Mk_1}{r_1}.$$

Pre zistenie hodnoty F_3 bude platiť:

$$Mk_2 = Mk_3,$$

$$F_2 \cdot r_2 = F_3 \cdot r_3,$$

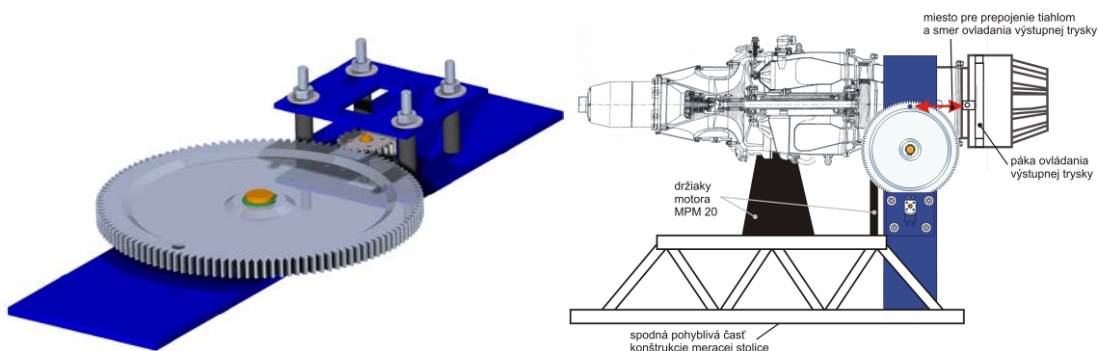
$$F_3 = \frac{F_2 \cdot r_2}{r_3}.$$

Použitím goniometrickej funkcie sínus môžeme vyrátať uhol α nasledovne:

$$\sin \alpha = \frac{r_3}{x_1}.$$

Uhol α je len pre hodnotu x_1 ktorá je $\frac{1}{2}$ požadovanej dĺžky pohybu. Po získaní hodnoty uhlu α môžeme vyrátať hodnotu F_3'

$$F_3' = \cos \alpha \cdot F_3.$$



Obr. 4 Konštrukcia pre ovládanie výstupnej trysky za pomoci serva a ozubeného kola a jeho upevnenie priamo v laboratórnych podmienkach

Dvojnásobok uhlu α je rovný hodnote β_2 . β_2 je celkový uhol natočenia veľkého ozubeného kola potrebný pre splnenie požadovanej dĺžky rovnej 40mm, pre posunutie páky ovládajúcej prierez výstupného ústrojenstva A_5 . Ak uhol β_2 vynásobíme prevodovým pomerom $i=6$ tak dostaneme hodnotu uhla β_1 ktorý vyjadruje o aký veľký uhol sa bude natáčať malé ozubené koleso, ktoré je spojené s motorom. Uhol β_1 musí byť menší ako 180° , pretože táto hodnota je pre servo motor maximálna výchylka. V prípade tohto návrhu je vypočítaná hodnota uhla $\beta_1 = 173,7^\circ$. Motorček sa otáča rýchlosťou $60^\circ/0,13\text{sec}$. potom čas t potrebný na zmenu výstupného prierezu trysky z $A_{5\min}$ na $A_{5\max}$ vyrátame vzorcom:

$$\frac{t}{\beta_1} = \frac{0,13}{60},$$

$$t = 0.3764\text{sec}.$$

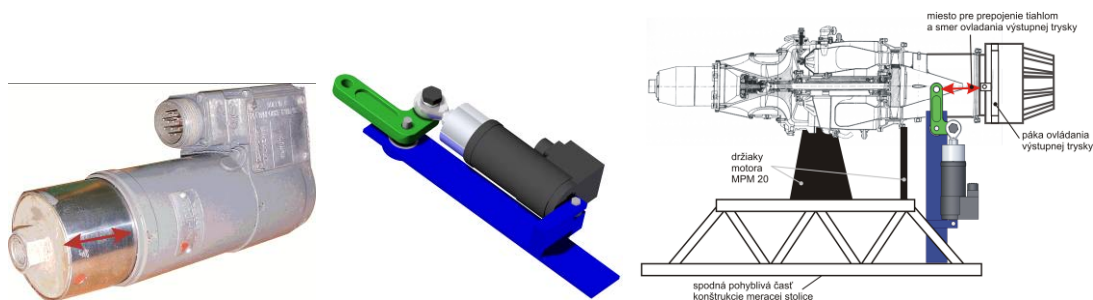
Navrhnutým riešením sme dosiahli výsledky času, výchylky - dráhy a sily v požadovaných hodnotách. Nevýhodou je hmotnosť, a rozmer ozubeného kola, ktoré po implementovaní a pozitívnom odskúšaní mohlo vyriešiť.

Ovládanie elektromotorom MP-100M

Daný elektromotor MP-100M (obr. 7) vykonáva pohyb piestnice vpred i vzad.

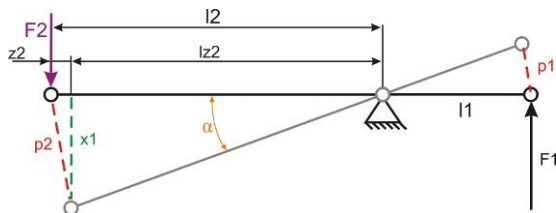
Parametre:

- Menovité – 100 kg,
- Maximálne – 150 kg,
- Statické – 400 kg,
- Napájacie napätie – $U=27\text{ V}$,
- Prúd – $I=2\text{ A}$,
- Rýchlosť – 2,29 až 3,1 (mm/s),
- Pracovný zdvih 10-80 mm.



Obr. 7 Elektromotor MP-100M a pákový systém ovládania výstupného ústrojenstva v laboratórnych podmienkach

Pri použití MP-100M sme uvažovali jeho pohyb zrýchliť jednou pákou. Prepočet za pomoci jednej páky ukázal že motor nevyhovuje.



Obr. 8 Grafický náčrt riešenia ovládania výstupnej trysky pákou a MP-100M

F1 je sila od motora. Postup výpočtu spočíva v:

$$Mk1 = Mk2,$$

$$F1.l1 = F2.l2.$$

Jedna z možností je že páky budú dlhé $l1=30\text{mm}$ a $l2=80\text{mm}$, potom $F2=56,25\text{ kg}$, ale celkový čas pohybu bude 6,5sec.. V tomto prípade je čas a sila na sebe priamo závislé, zväčšovaním sily F2 sa nám zväčšuje aj čas potrebný k posúvaniu.

Záver

Laboratórium inteligentných riadiacich systémov sa dostáva do novej dimenzie, rozšírením objektu riadenia malého prúdového motora MPM-20 z jedného stupňa voľnosti (regulačný parameter dodávka paliva) na objekt s dvoma stupňami voľnosti (pribúda zmena prierezu výstupnej trysky). Veľmi dôležité je u praktických a reálne fungujúcich zložitých systémoch snímanie a ovládanie ich jednotlivých častí – výkonových prvkov. Práve pri rozšírení MPM-20 na motor s meniteľnou geometriou okrem zložitého postupu výroby, od výberu materiálu až po výrobcu výstupného ústrojenstva s meniteľným prierezom sa dostávame k ďalšiemu problému (výzve), a ten sme sa snažili v tomto článku priblížiť, akým je ovládanie prierezu výstupnej trysky. Existujú aj ďalšie možnosti (krokové motory a pod.) ovládania, ktoré budeme dôkladne analyzovať a vhodný prístup implementovať do laboratórnych podmienok LIRSLM.

Literatúra

- [1] LAZÁR, Tobiáš – MADARÁSZ, Ladislav (Eds.): Inovatívne výstupy z transformovaného experimentálneho pracoviska s malým prúdovým motorom (Inovative Outputs from the Transformed Experimental Laboratory with a Small Turbojet Engine). elfa, s.r.o. Košice, 348pp. ISBN 978-80-8086-170-4 (2011).
- [2] ŽELEZNÝ, Zdeněk: Řízení výstupných soustav leteckých proudových motorů. Brno, VA Brno, 1997. 80s.
- [3] ŠTROMPF, Viliam: Malý prúdový motor MPM-20 s premennou výstupnou tryskou, Diplomová práca, KLI LF TUKE, Košice, 2012, str.52

PodĎakovanie

The work presented in this paper was supported by ESPOSA –“*Efficient Systems And Propulsion For Small Aircraft*”, funded by the European commission in the seventh frame work programme under grant agreement no ACP1-GA-2011-284859-ESPOSA.