

Berényi Péter zls. hallgató

RAKETA-KORMANYGEP IRANYITASTECHNIKAI VIZSGALATA

A cikk a XX. OTDK Hadtudományi Szekcióján I. díjat és az SZRMF parancsnokának különdíját elnyert pályamunka alapján készült

Konzulens: Kónya László mk. százados

A harci rakéták a különböző fegyvernemek alapvető csapásmérő eszközei. Ezek a rakéták lényegesen különböznek egymástól, mivel más és más a rendeltetésük, harci alkalmazásuk módszere, irányító rendszerük típusa, a harci részek megsemmisítő hatása ... stb. Így felosztásuk különböző jellemzőket figyelembe véve sokféle lehet.

Attól függően, hogy lehetséges-e a rakéták röppályájának a megváltoztatása indításuk után, irányítható (IR) és nem irányítható (NIR) rakétákról beszélhetünk.

A nem irányítható rakétáknak a célzás - hasonlóan a csöves tűzfegyverekhez - az indítóberendezés megfelelő térbeli helyzetbe állításával hajtható végre. A lövésett eredménye nagymértékben függ a célzás pontosságától, a szerkezeti elemek gyártási szórásértékeitől, a légkör változásaitól és a cél mozgásától.

Az irányítható rakéták ezzel szembenspeciólis berendezésekkel rendelkeznek, amelyek lehetővé teszik a rakéták irányított mozgását a cél megközelítése során. A rakéták irányíthatósága a röppályán lényegesen megnövelte találati pontosságukat a nem irányítható megsemmisítő eszközökhöz képest és lehetővé tette széleskörű elterjedésüket a II. világháború után. Napjainkra a rakéták a légierő főfegyverzetét alkotják.

Milyen speciális berendezésekkel rendelkeznek az irányítható rakéták? Fedélzeti irányító rendszerekkel, kormány-művekkel, aerodinamikai kormányfelületekkel, szárnyakkal, amelyek segítségével biztosított repülés közben a kívánt térbeli irányváltoztatásuk.

1. RAKETÁK KORMÁNYGÉPEI

A kormányokat működtető berendezéseket kormánygépeknek nevezzük. Ezek a rakéták vezérlő berendezéseinek részeségei. Feladatuk a kormányok kitérítése, a rakéta célra vezetésének folyamán mért rávezetési hibák alapján kidolgozott vezérlési jelek segítségével.

A kormánygépekkel szemben támasztott legfontosabb követelmények:

- a jó manőverezőképeséget biztosító gyors működés;
- magasfokú megbízhatósággal rendelkezzenek. Hosszú tá-
lás, szállítás után és a szélsőséges környezeti viszonyok
(magasság, hőmérséklet, nedvesség stb.) között is hiba nél-
kül működjenek;
- Üzemképeségük egyszerűen és gyorsan ellenőrizhető
legyen, vagy egyáltalán ne igényeljen műszeresellenőrzést!;
- kis tömegűek és geometriai méretűek legyenek;
- egyszerű és olcsó gyárthatóság.

A felhasznált energia típusától függően megkülönböztetünk gáz-, hidraulikus- és elektromos működtetésű kormánygé-
peket.

A gáz-működtetésű kormánygépek szerkezeti kialakítása
szerint a következő főbb típusai ismeretesek:

- FOJTÓSZELEPES (torlólemez):

a.) egy dugattyús,

b.) két dugattyús: - osztatlan vezérlésső;

- osztott vezérlésső;

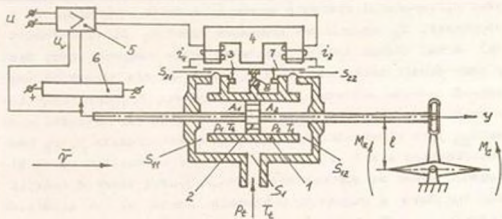
- FUVÓCSÖVES:

a.) álló dugattyús,

b.) mozgó dugattyús.

A repülőgépek rakétáiban alapvetően a gázok energiáját felhasználó kormánygépeket alkalmazták, ezért vizsgálataimat is e típuson végeztem el. Ezen belül is az egy dugattyús fojtószelepes kormánygépet elemeztem, amely mintaként szolgálhat a többi megoldásra is.

A kormánygép működése az egyszerűsített szerkezeti vázlat alapján könnyen követhető.



A kormánygépbe az S_{11} nyíláson át bevezetett gáz az S_{11} és S_{12} nyílásokon keresztül a henger (1) munkatereibe jut, ahonnan az S_{21} és az S_{22} kimenő fojtásokon keresztül távozik. A gáz kiáramlását szelep (3) szabályozza, amelyet elektromágnes (4) vezérel. Az i_1 és az i_2 vezérlőtekercsek ára-

mát az erősítő (5) határozza meg, melynek bemenő jelei a célkoordinátor által kidolgozott hibajellel arányos U feszültség, illetve a kormány helyzete szerinti visszacsatolást megvalósító potencióméterről (6) leosztott U_v feszültség. A dugattyú mechanikus kapcsolatban van a kormányokkal.

A kormánygép működését először olyan esetben vizsgáljuk, amikor nem repülést végző rakétában működik és potencióméter segítségével sem valósítunk meg visszacsatolást. Fogadjuk el kiindulós helyzetként, hogy $U = 0$, így $i_1 = i_2 = 0$, tehát a szelep a szabályzó rugók segítségével bedlított semleges helyzetet foglalja el. Vagyis távolsága a kimenő fojtásoktól egyformán x_0 . Ily módon S_{21} és S_{22} nyílásokon keresztül azonos mennyiségű gáz távozik, tehát a munkateretek p_1 és p_2 gáznyomása megegyezik, a dugattyú középső helyzetében mozdulatlan marad.

Ha az erősítő bemenetére $U > 0$ feszültséget adunk, a vezérlő tekercsekben $i_1 > i_2$ áram folyik (a feszültség kettőzések differenciál fokozatú mágneses erősítő kimenetén, ha i_1 növekszik, i_2 ugyanilyen arányban csökken, illetve fordítva). A bal oldali tekercs mágneses ereje nagyobb lesz, mint a jobb oldali tekercsé, tehát a szelep az óra járásával megegyező irányba elfordul. Az S_{21} kimeneti fojtónyíláson keresztül időegység alatt nagyobb mennyiségű gáz távozik, mint az S_{22} jobb oldaliból. Így a dugattyú két oldalán $p_1 - p_2$ nyomáskülönbség alakul ki, aminek hatására a dugattyú balra elmozdul. Ebben az esetben bármilyen nagyságú vezérlő feszültség hatására a dugattyú uttközésig mozdul el. A kitérítés irányát a vezérlő feszültség polaritása határozza meg. Ha terhelt állapotban vizsgáljuk a kormánygép működését, akkor a kormányok kitérítésének folyamata az előzőeknek megfelelően indul meg. Ugyanakkor a kormányok szögkitérítésével arányos csuklónyomaték keletkezik, ami a kitérítő nyomatékkal ellentétesen hat. A dugattyú abban az esetben áll meg, ha a két nyomaték kiegyensúlyozza egymást.

2. A KORMANYGEP MUKODESERE JELLEMZO EGYENLETEK

A következokben a kormánygép automatikai vizsgálathoz alapot adó, fizikai működésére jellemző egyenleteket irtam fel.

2.1. A fojtószelep mozgásegyenlete

A szelep egyensúlyi helyzetét három nyomaték kölcsönhatása határozza meg:

- az elektromágnes nyomatéka:

$$M_{EM} = k_1 (i_2 - i_1)^2 a = a \cdot k_1 \cdot k_a \cdot U$$

ahol: a - a szelep forgástengelyének távolsága az elektromágnes által kifejtett erő hatásvonalától m ;
 k_a - az erősítő áramerősítési tényezője A/V ;
 k_1 - az elektromechanikus átalakító áram szerinti érzékenysége N/A .

- a központosító rugó nyomatéka:

$$M_r = a \cdot k_2 \cdot x$$

ahol: k_2 - rugóállandó: $\frac{N}{m}$

- a kiáramló gázok szelepre gyakorolt hatásából eredő nyomaték:

$$M_p = - \left[p_1 \frac{d_c^2 \pi}{4} a - p_2 \frac{d_c^2 \pi}{4} a \right] = - S_e \cdot (p_1 - p_2) a = - S_e \cdot p \cdot a$$

ahol: $p = p_1 - p_2$ - a munkaterekben uralkodó nyomások különbsége Pa ;

$$S_e = \frac{d_c^2 \pi}{4} \quad - \text{ a gázok reakcióereje szempontjából fi-} \\ \text{gyelemben vehető effektív szelepfelü-} \\ \text{let } m^2.$$

Az utóbbi esetekben a negatív előjel arra utal, hogy a nyomaték az elektromágnes nyomatéka ellen hatnak. Állandósult állapotban a nyomatékok összege zérus. Kifejezve a szelep elmozdulását, majd pedig figyelembe véve azt, hogy a szelep viszonylagos elmozdulása $\bar{x} = \frac{x}{x_0}$, az alábbi kifejezést kapjuk:

$$\bar{x} = \frac{ka \cdot k_1}{k_2 \cdot x_0} u - \frac{S_e}{k_2 \cdot x_0} p$$

Bevezetve az

$$a_u = \frac{ka \cdot k_1}{k_2 \cdot x_0} \quad \text{és} \quad a_p = \frac{S_e}{k_2 \cdot x_0}$$

jelöléseket, a következő egyenlethez jutunk:

$$\bar{x} = a_u \cdot p - a_p \cdot p$$

2.2. A munkahenger energiamérlege

A munkahenger energiamérlegének felírásánál a lényegesen hosszabb számítások elkerülése végett csak a végeredmény közlésére szorítkozom.

$$\frac{dy}{dt} = \frac{1}{A} \left[Q_0 (\bar{x} - \frac{\beta}{2p_t} p) - \frac{\beta V_0}{2k p_t} \frac{dp}{dt} \right]$$

A szelep viszonylagos elmozdulása és a dugattyú mozgása között kerestem kapcsolatot. Lineáris differenciálegyenletet kaptam, ahol a bal oldalon a mozgó dugattyú sebessége szerepel. A jobb oldalon lévő első tag a dugattyú sebességét fejezi ki a szelep elmozdulása, illetve a nyomáskülönbség

függvényében, a gázok összenyomhatóságának figyelembevétele nélkül, a második tag pedig ezeket is figyelembe veszi.

2.3. A dugattyú mozgásának egyenlete

A dugattyú mozgása és a nyomásviszonyok közötti kapcsolatot irtam fel

$$p = \frac{1}{A} \left(m \frac{d^2 y}{dt^2} + a_{\sigma} y + F_s \right)$$

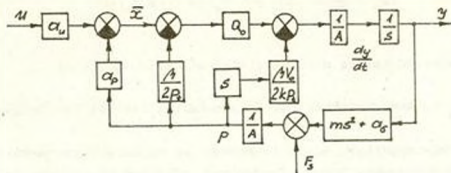
ahol a_{σ} - terhelési együttható

m - a dugattyú és a hozzá kapcsolódó mozgó elemek koncentrált tömege

F_s - súrlódási erő, amelyet alapvetően a dugattyú és a henger közötti tömítés határoz meg.

3. A KORMÁNYGÉP HATÁSVÁZLATA

A dugattyú mozgásegyenletének, valamint a munkahenger energiamérlegének Laplace-transzformáltját véve, olyan egyenletrendszerhez jutunk, amely a terhelt kormánygép működését írja le.



$$s y = \frac{1}{A} \left[Q_0 (\bar{x} - \frac{\beta}{2p_t} p) - \frac{\beta V_0}{2kp_t} sp \right] ;$$

$$\bar{x} = a_u u - a_p p$$

$$p = \frac{1}{A} [c_m s^2 + a_\sigma y + F_s]$$

A negatív előjelek mutatják, hogy a kormánygép három belső negatív visszacsatolást tartalmaz. A terhelést az aerodinamikai csuklónyomaték jelenti, amely szerint a negatív visszacsatolás megvalósul.

4. A KORMÁNYGÉP ÁTVITELI FÜGGVÉNYÉNEK MEGHATÁROZÁSA

A 2. pontban a kormánygép működését leíró egyenleteket ismertük meg. Az átviteli függvény meghatározásához induljunk ki az ismert egyenletrendszerből. Helyettesítsük be a munkahenger energiamérlegébe \bar{x} és p értéket:

$$\frac{\beta V_0}{2kp_t} m \frac{d^3 y}{dt^3} + Q_0 (a_p + \frac{\beta}{2p_t}) = \frac{d^2 y}{dt^2} + (\frac{\beta V_0}{2kp_t} a_\sigma + A^2) \frac{dy}{dt} + Q_0$$

$$(a_p + \frac{\beta}{2p_t}) (Q_0 y + F_s) = Q_0 \cdot A \cdot a_u \cdot u$$

Haramadrendű teljes differenciálegyenlethez jutottunk.

4.1. Aerodinamikai csuklónyomatékkal terhelt kormánygép

Megvizsgáltam, van-e lehetőség az egyenlet egyszerűsítésére oly módon, hogy a kormánygép működésének fizikai lényege ne változzon! Mivel a munkaterekben uralkodó nyomás

több MPa nagyságrendű, ezért a dugattyú és a hozzá kapcsolódó elemek tömegétől eltekinthetünk, valamint kis elmozdulásokat tételezünk fel, ezenkívül a dugattyú és a henger közötti tömítésből eredő súrlódás is csekély:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} \approx 0, \quad F_s \approx 0$$

Az első feltételezésből értelemszerűen következik az is, hogy

$$m \frac{d^3 y}{dt^3} \approx 0.$$

Az egyszerűsítések figyelembevételével:

$$\left(\frac{\beta V_0}{2k p_t} a_\sigma + A^2 \right) \frac{dy}{dt} + Q_0 \left(a_p + \frac{\beta}{2p_t} \right) a_\sigma y = Q_0 A a_u u$$

elsőrendű differenciál egyenlethez jutunk, amely az egytárolós tagokra jellemző általános formulához közel áll. Az egyenletet a következő alakra hozva:

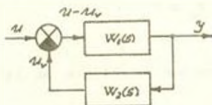
$$\left(\frac{\beta V_0}{2k p_t} a_\sigma + A^2 \right) \frac{dy}{dt} + y = \frac{A a_u u}{\left(a_p + \frac{\beta}{2p_t} \right) a_\sigma}$$

$$\tau = \frac{\beta V_0}{2k p_t} a_\sigma + A^2 \quad A_p = \frac{A a_u u}{\left(a_p + \frac{\beta}{2p_t} \right) a_\sigma}$$

Az aerodinamikai csuklónyomatékkal terhelt, mesterséges visszacsatolás nélküli kormánygép átviteli függvénye:

$$W_1(s) = \frac{A_p}{1 + \tau s}$$

4.2. Aerodinamikai csuklónyomatékkal terhelt kormánygép
potenciométeres negatív visszacsatolással



$$\text{ahol: } W_1(s) = \frac{A_p}{1 + \tau s}$$

$$W_2(s) = A_y$$

$$U_v = A_y y$$

A_y = a potenciométeres kapcsolat erősítési tényezője.

A rendszer átviteli függvénye a következő alakban írható fel:

$$W(s) = \frac{W_1(s)}{1 + W_1(s) W_2(s)} = \frac{\frac{A_p}{1 + \tau s}}{1 + \frac{A_p A_y}{1 + \tau s}} = \frac{A_p}{1 + A_y A_p + \tau s}$$

$$= \frac{\frac{A_p}{1 + A_p A_y}}{1 + \frac{\tau}{1 + A_p A_y} s} = \frac{K^M}{1 + T s}$$

ahol: $K^M = \frac{A_p}{1 + A_p A_y}$ - a kormánygép erősítési tényezője;

$T = \frac{\tau}{1 + A_p A_y}$ - a kormánygép időállandója.

5. STABILITASVIZSGALAT

Minden szabályozás alapvető követelménye, hogy a szabályozási folyamat stabil működésű legyen. Az átviteli függvény mindkét esetben arányos egytárolós jellegűt mutat. Jellegükéből adódóan a rendszer strukturálisan stabilis, vagyis bármilyen paraméter megváltozása esetén a szabályozási folyamat stabilis működésű marad.

6. MINŐSÉGVIZSGALAT

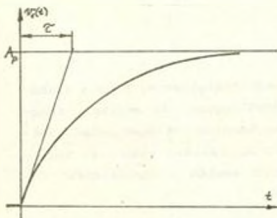
A stabilis működésen kívül azonban a szabályozásnak több más követelményt is ki kell elégítenie. A szabályozás jószágára jellemző az átmeneti (tranzien) jelenségek lefolyása. A műszaki előírások és a szabályozás átmeneti viselkedése között az összhangot a minőségi jellemzők betartása biztosítja. Igen fontos, hogy miután meggyőződünk a stabilis működésről minőségi képet kapjunk a szabályozás átmeneti viselkedéséről, így a szabályozási időről, a szabályozott folyamat lengéshajlamáról, az esetleges túllendülésekről.

Csuklónyomatékkal terhelt és potenciométeres visszacsatolással kialakított kormánygépre hajtottam végre minőségvizsgálatot.

Az átviteli függvények segítségével meghatároztam az átmeneti függvényeket, majd a kezdeti és végérték tétel segítségével felrajzoltam a szabályozott jellemző időbeni lefolyását. Mindkét esetben meghatároztam a szabályozás dinamikus pontosságát, valamint a szabályozási időt.

6.1. Aerodinamikai csuklónyomatékkal terhelve

Az átmeneti függvény:
$$v_1(t) = A_p - A_p e^{-\frac{t}{T}}$$



A szabályozás dinamikus pontossága (Δ):

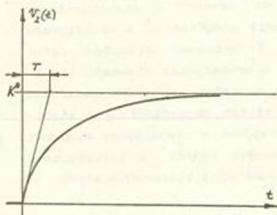
$$\Delta \geq -e^{-\frac{t}{T}}$$

A szabályozási idő (T_s):

$$T_s = 3\tau$$

6.2. Potenciométeres visszacsatolással megvalósítva

az átmeneti függvény: $V_2(t) = K^M - K^M e^{-\frac{t}{T}}$



A szabályozás dinamikus pontossága (Δ):

$$\Delta \geq -e^{-\frac{t}{T}}$$

A szabályozási idő (T_s):

$$T_s = 3T$$

Az átmeneti függvény lefolyásából látható, hogy nincs túllendülés, így a szabályozott jellemző maximális túllendülése meghatározásának nincs értelme.

7. A KORMÁNYGÉP FÖLDI ELLENŐRZÉSÉNEK MEGVALÓSÍTÁSA

Eddigi vizsgálataim arra az esetre vonatkoztak, amikor a rakéta repülést végez, vagyis terhelt állapotban van a kormánygép.

A földön történő ellenőrzés, a csuklónyomaték megteremtése bonyolult és nehéz feladatot jelent. E feladat egyszerűsítésére kerestem a választ, amikor megvizsgáltam a kor-

mánygép működését terheletlen állapotban, valamint potenciométeres visszacsatolással. Első esetben azt az eredményt kaptam, hogy a rendszer automatikailag szempontból integráló tagként fog viselkedni, vagyis bármilyen kis vezérlő feszültség hatására a dugattyú ütközésig tér ki, így az ellenőrzés megvalósítása nem lehetséges.

Ha a kormánygép stabilis működését terheletlen állapotban is biztosítani kívánjuk, mesterségesen megvalósított potenciométeres visszacsatolást alkalmazhatunk. Ezáltal a kormánygép elveszti integráló jellegét, így a földi ellenőrzés egyszerűen megvalósítható.

8. A VIZSGÁLATOK ERTEKELESE

A vizsgálatok sorrendjének megfelelően kezdjük az összehasonlítást az átviteli függvényekkel. A függvények arányos egytárolós jellegét mutattak mindkét esetben, de az időállandó és az átviteli tényező értéke a potenciométeres negatív visszacsatolással megvalósított kormánygépnél csökkent.

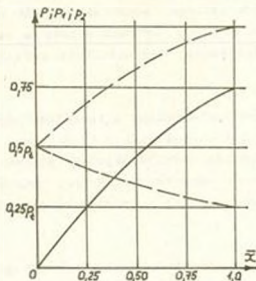
A kifejezések tartalmazzák a terhelési együtthatót, ami a repülés változó feltételeitől (V ; H) függ, és értékét a torlónyomás jelentősen befolyásolja. Ez egyben azt is jelenti, hogy ugyanazon vezérlő feszültség esetén (a repülés változó feltételei mellett) a kormány különböző szögekre tér ki.

Ha a potenciométerrel visszacsatolt kormánygépre vezérlő jelet adunk, akkor a dugattyú nem abban az esetben megállni, amikor a vezérlő feszültség és a potenciométerről leosztott feszültség egyenlő lesz, hanem egy meghatározott feszültség értéknek megfelelően. Ennek oka, hogy a dugattyúra a csuklónyomaték által létrehozott erő is hat. A feszültségkülönbség egy meghatározott áramkülönbséget is ad, ami miatt a szelep nem a középső (semleges) helyzetét foglalja

el. A henger munkatereiben uralkodó nyomáskülönbség kompenzálja a csuklónyomaték által létrehozott erőt.

A minőségvizsgálat eredményei közül a szabályozási időket emelném ki. Láthattuk, hogy a szabályozási idők az időállandók függvényei. Az átviteli függvények meghatározásánál azt az eredményt kaptam, hogy a potenciométerrel visszacsatolt kormánygép időállandója csökkent. Ebből az következik, hogy a csuklónyomatékkal terhelt potenciométeres visszacsatolással megvalósított kormánygép gyorsabb, mint a visszacsatolás nélküli rendszer.

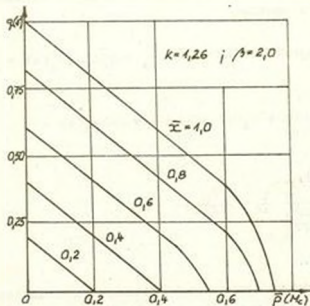
Vizsgálataimat kiegészítettem a statikus karakterisztikák felrajzolásával, melyek a kormánygép működésének jobb megértéséhez nyújtanak segítséget.



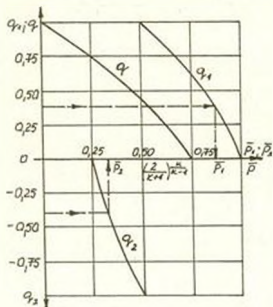
Az első karakterisztikából a munkaterekben uralkodó nyomásváltozás mértékét határozhatjuk meg a szelep elmozdulásának a függvényében.

A második karakterisztikából jól látható, hogy a hengerbe beáramló gáz, tehát a dugattyú mozgásának sebessége függ

a szelep elmozdulásától és a dugattyún lévő nyomáskülönbségtől.



A harmadik karakterisztika a gázfogyasztás mértékét mutatja meg adott nyomásértékeknek megfelelően.



Követési tulajdonság vizsgálatát végeztem el csuklónyomatékkal terhelt, potenciométeres negatív visszacsatolással megvalósított esetben.

Egységugrás bemenőjelre: $x_A = 1(t)$, $x_A(s) = \frac{1}{s}$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x_s(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s x_s(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s W(s) x_A(s) =$$

$$= \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{\frac{A_p}{1 + \tau s}}{1 + \frac{A_p A_y}{1 + \tau s}} \frac{1}{s} = \frac{A_p}{1 + A_p A_y}$$

Az egységimpulzus alakú változást a szabályozás $A_p / (1 + K)$ állandósult hibával követi, és látható, hogy ez az állandósult hiba annál kisebb, minél nagyobb a hurokerősítés (K) értéke. A szabályozás az egység-sebességugrás, illetve az egységgyorsulás alakú bemenőjel változást nem képes követni.