

MAGYAR HONVÉDSÉG
SZOLNOKI
REPÜLŐTISZTI FŐISKOLA



REPÜLÉSTUDOMÁNYI

ÉS

KIKÉPZÉSI

KÖZLEMÉNYEK

(TUDOMÁNYOS KIKÉPZÉSI
KÖZLEMÉNYEK)



REPÜLÉSTUDOMÁNYI ÉS KIKÉPZÉSI
KÖZLEMÉNYEK

A Magyar Honvédség
Szolnoki Repülőtiszti Főiskola
belső terjesztésű időszaki folyóirata

SZERKESZTŐ BIZOTTSÁG:

Elnök: Békési László mk. ezredes

Főszerkesztő: Dr. Szabolcsi Róbert mk. százados

TAGJAI:

Dr. Lantos Éva közalkalmazott
Svehlik János mk. alezredes
Dr. Ludányi Lajos mk. alezredes
Verdes István alezredes
Szurmay Zoltán százados
Szekeres Bálint közalkalmazott
Szilágyi Sándor közalkalmazott

FELELŐS KIADÓ:

Nagy Szilveszter mk. vezérőrnagy

KÉSZÜLT:

A Szolnoki Repülőtiszti Főiskola házi nyomdájában

T A R T A L O M J E G Y Z É K

Békési László: A túlterhelés szerinti kis stabilitással rendelkező merevszárnyú repülőgépek néhány jellemző tulajdonsága	1
Békési Bertold: A repülőgép irányításának automatizálása lezálláskor	13
Fehér András: A digitális térképek alkalmazásának lehetőségei a Szolnoki Repülőtisztai Főiskola képzési rendszerében	25
Kovács József: Ismeretlen jellemzők értékének becslése a legkisebb négyzetek módszerével	41
Körmendi Géza-Dr. Szabó László: Helikopter hajtóművek automatikus szabályozó rendszerei	51
Horváth Dezső: A helikopter dinamikai tulajdonságai. A helikopter stabilitása és kormányozhatósága	61
Ifj. Horváth Dezső: A repülőgép stabilitása és kormányozhatósága	79
Horváth Dezső: Önműködő szabályozások vizsgálata analóg számítógép segítségével: a robotpilóta iránystabilizálását leíró linearizált differenciálegyenlet-rendszer programozása	103
Dr. Pokorádi László: Repülőgépek pneumatikus rendszereinek matematikai modellezésére épülő diagnosztikája	131

Békési László mk. ezredes
Főiskola parancsnok I. helyettes

A TÚLTERHELÉS SZERINTI KIS STABILITÁSSAL RENDELKEZŐ MEREVSZÁRNYÚ REPÜLŐGÉPEK NÉHÁNY JELLEMZŐ TULAJDONSÁGA

Bevezetés

A repülőgép tervezőket az utóbbi években egyre jobban foglalkoztatja a túlterhelés szerinti kis stabilitási tartalékkal rendelkező esetleg instabil gépek tervezése. Tekintet nélkül az ilyen repülőgépek egy sor repülési tulajdonságára és kormányozhatóságára sok országban ma is foglalkoznak a tervezésükkel. A fő ok, amely e tekintetben a tervezőket foglalkoztatja, a kis stabilitással rendelkező gépek létrehozásában az a törekvés, hogy a lehető legjobb repülési jellemzőkkel és főleg nagyon jó manőverező képességgel rendelkezzen a repülőgép.

1. A túlterhelés szerinti stabilitás vizsgálata

Számos kísérlet bizonyítja, hogy a túlterhelés szerinti stabilitás és a bevezetőben említett tulajdonságok között meghatározott kapcsolat van. A lényeg megértéséhez vegyük a következő modellt.

A repülőgép hosszirányú kiegyensúlyozása olyan, hogy az a túlterhelés szerint stabil, vagyis az aerodinamikai centrum (AC) vagy másképpen a fókuszpont a súlypont mögött helyezkedik el. A vizsgálat további egyszerűsítéseként tételezzük fel, hogy a hajtómű tolóerő vektorának hatásvonala átmegy a repülőgép súlypontján, a szárnymetszet és annak aerodinamikai kialakítása úgy van megválasztva, hogy a nyomásközéppont egybeesik a fókusz (AC) ponttal.

Ebben az esetben, ha a stabilizátor semleges helyzetben van a repülőgép felhajtóerő \vec{F}_n vektorának hatásvonala (1. ábra) a fókuszponton megy át és a súlypont körül egy olyan nyomatékot hoz létre, amely a repülőgépnek az állásszögét csökkenti.

E nyomaték kiegyensúlyozása céljából a stabilizátort úgy kell kitéríteni, hogy a rajta keletkező felhajtóerő növekmény $\overline{\Delta F_{y_{\text{a}}}}$ által létrehozott nyomaték nagysága megegyezzen az $\overline{F_{y_0}}$ erő nyomatékával, iránya pedig ellentétes legyen.[3.,7.]

A stabilizátoron létrehozandó szükséges felhajtóerő növekményt $\overline{\Delta F_{y_{\text{a}}}}$ nagyságát a következő egyensúlyi feltételből állapíthatjuk meg (lásd 1.ábrát):

$$\overline{\Delta F_{y_{\text{a}}}} \cdot L = -F_{y_0} (x_F - x_{sp}) \quad (1)$$

ahonnan

$$\overline{\Delta F_{y_{\text{a}}}} = \frac{F_{y_0}}{L} (x_{sp} - x_F) \quad (2)$$

Ez utóbbi egyenlet jobb oldalát megszorozva és elosztva a közepes aerodinamikai húrral h , kapjuk

$$\overline{\Delta F_{y_{\text{a}}}} = F_{y_0} \frac{h}{L} (\bar{x}_{sp} - \bar{x}_F) \quad (3)$$

ahol:

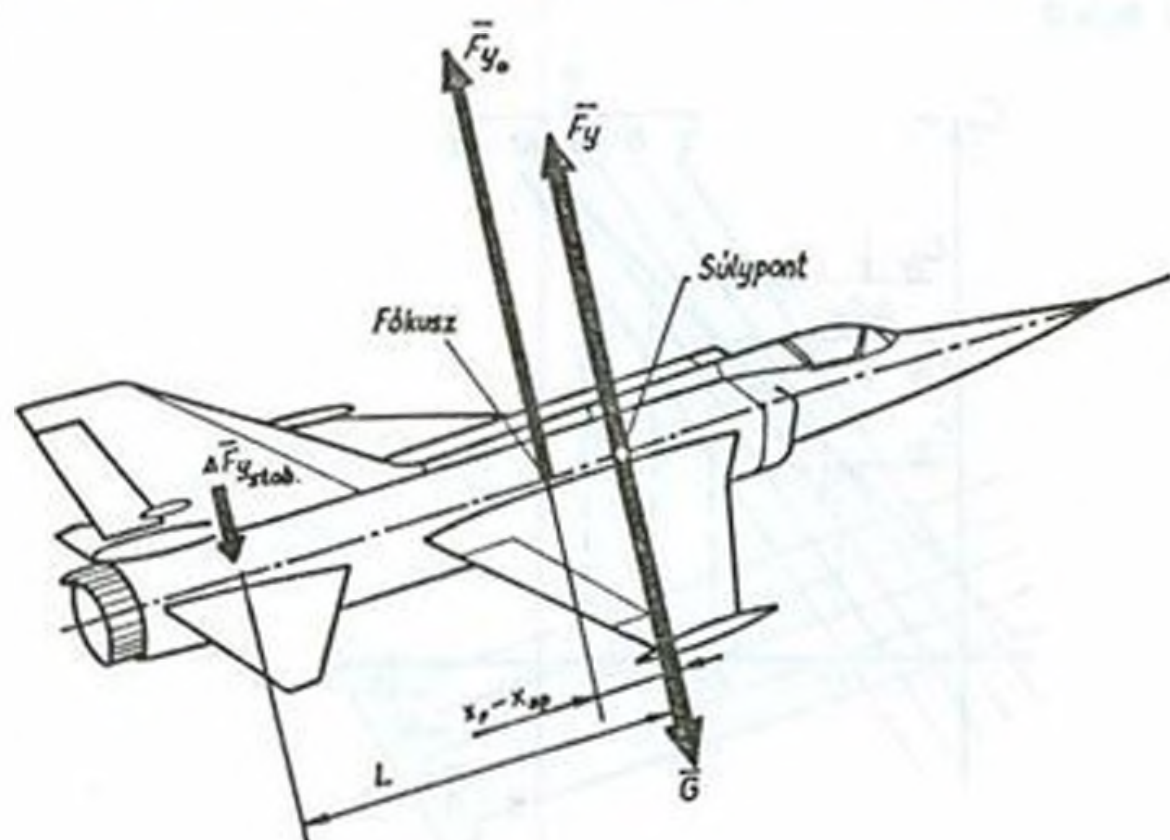
$$\bar{x}_{sp} - \bar{x}_F = \frac{x_{sp}}{h} - \frac{x_F}{h} \quad - \text{ a súlypont és a fókuszpont közötti}$$

viszonyított távolság, amely egyúttal a túlterhelés szerinti statikus stabilitást jellemzi.

Mivel a túlterhelés szerint stabil repülőgépnél az $\overline{F_{y_0}}$ és $\overline{\Delta F_{y_{\text{a}}}}$ erők irányai ellentétesek az eredőjük nagysága F_y , a különbségükből adódik

$$F_y = F_{y_0} - \overline{\Delta F_{y_{\text{a}}}} \quad (4)$$

Kiegyensúlyozottság esetén az $\overline{F_y}$ hatásvonala (kielégítve a (3) egyenlettel leírt feltételt) átmegy a repülőgép súlypontján (lásd 1.ábrát). Ilyenképpen a túlterhelés szerint stabil repülőgép hosszirányú kiegyensúlyozottsága a létrejövő eredő felhajtóerő nagyságának csökkenését eredményezi.



1. ábra
A repülőgépre ható erők

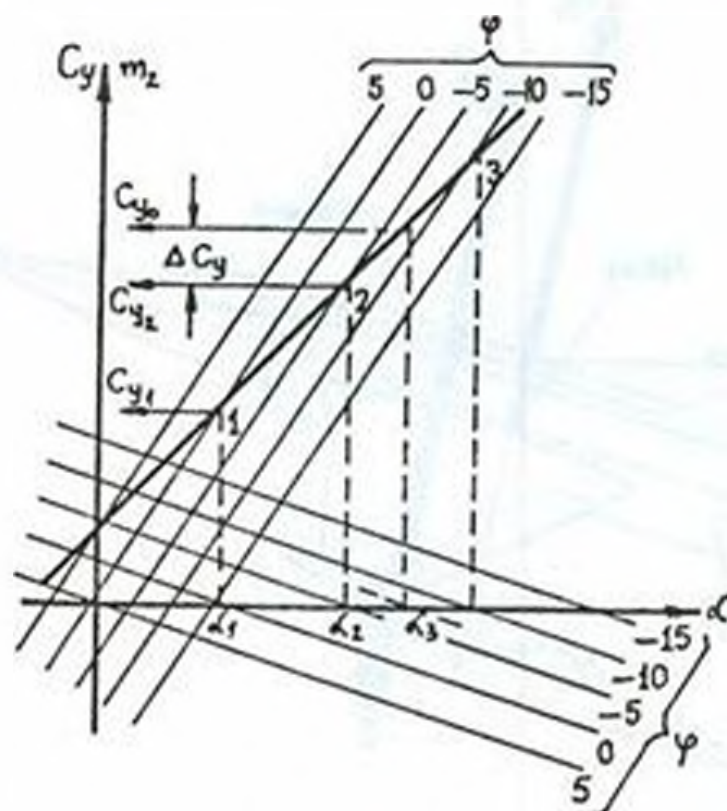
A gép súlyerejével egyensúlyt tartó felhajtóerő \vec{F}_y nagyságának létrehozása céljából tehát növelni kell a repülőgép állásszögét, mely a stabilizátor további kitérésével érhető el.[1.,4.]

Ez utóbbiakból következik, hogy a repülőgép hosszirányú kiegyensúlyozottságát két jelenség kíséri. Egyrészt csökken az erő felhajtóerő \vec{F}_y , másrészt a stabilizátor kitérésének szükséges mértéke növekszik. Mindez a 2. ábrából egyértelműen kiolvasható.

A 2. ábrán a stabilizátor különböző φ szöggel való kitérésékor a repülőgép felhajtóerő tényezőjének C_L változása és a hosszirányú nyomatéki tényező m_x változása látható az állásszög α függvényében.

Ha a repülőgép a keresztengely körüli (hosszirányú) nyomatékok tekintetében kiegyensúlyozott akkor $m_x = 0$ kell, hogy legyen.[2]

A 2.ábrából leolvasható a stabilizátor különböző kitéritési szögeihez φ tartozó repülőgép állásszög és az ehhez tartozó felhajtóerő tényezők, melyeknél $m_x = 0$.



2.ábra
A felhajtóerő tényező és a nyomatéki tényező változása az állásszög függvényében

Igy, ha a stabilizátor nincs kitérítve ($\varphi = 0$) az ehhez tartozó és a kiegyensúlyozást biztosító állásszög α_1 ez utóbbihoz tartozó felhajtóerő tényező pedig C_{y_1} . Hasonlóképpen a $\varphi = -5^\circ$ (emelkedés) esetén, a hozzátartozó állásszög és felhajtóerő tényező legyen α_2 illetve C_{y_2} . Az így megkeresett C_y értéket jelöljük 1, illetve 2 ponttal.

E két ponton átmenő egyenes ábrázolja a felhajtóerő tényező változását az állásszög függvényében, figyelembe véve a hosszirányú kiegyensúlyozottságot. Mint a 2.ábrából látható a repülőgép hosszirányú kiegyensúlyozottságának feltételei a $C_y = f(\alpha)$ egyenes iránytangensének csökkenését vonja maga után. Ez utóbbi azt jelenti, hogy a repülőgép keresztengely körüli kiegyensúlyozottságát a felhajtóerő csökkenése követi, amely a manőverező képesség jellemzőit rontja. A felhajtóerő tényező C_y annál jobban csökken minél nagyobb a repülés állásszöge.

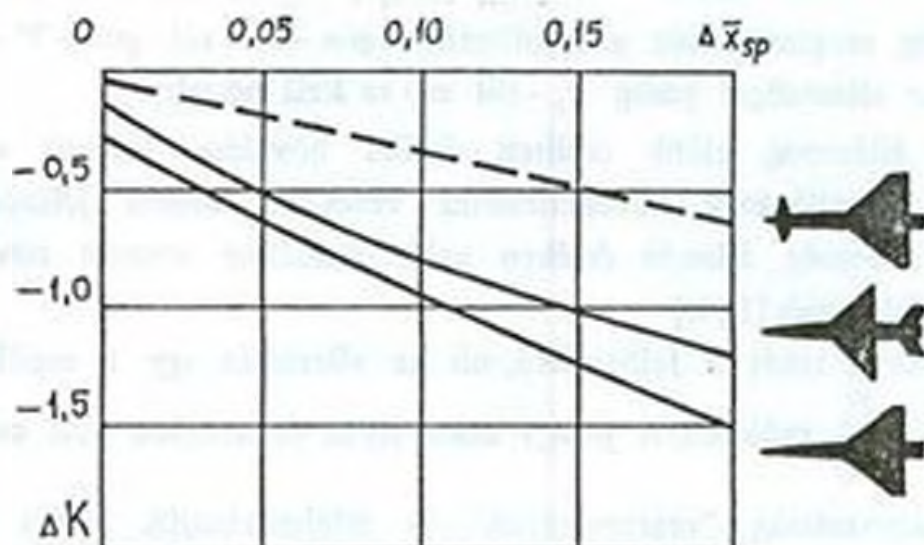
Adott túlterheléssel történő manőver végrehajtásakor a $C_y = C_{y_0}$ egyenlőség megtartásához a stabilizátort $\varphi = -5^\circ$ - ról $\varphi = -7^\circ$ - ig ki kell téríteni, az állásszöget pedig α_2 - ról α_1 - ra kell növelni.

Az állásszög előbb említett értékű növelése viszont a repülőgép homlok ellenállásának növekedéséhez vezet. Ez utóbbi jelenség miatt a repülési sebesség állandó értéken való tartásához viszont növelni kell a hajtómű tolóerejét.[1.,4.]

Csökken tehát a felhajtóerő, nő az ellenállás így a repülőgép jósági száma $K = \frac{F_y}{F_x}$ csökken. A jósági szám ilyen értelemben vett csökkenését a kiegyensúlyozottság "veszteségének" is értelmezhetjük. Minél nagyobb a túlterhelés szerinti stabilitás, azaz minél nagyobb a távolság a fókuszpont és a súlypont között annál nagyobb negatív irányú felhajtóerőt kell létrehozni a stabilizátoron a hosszirányú kiegyensúlyozottság létrehozása érdekében. E folyamat oda vezet, hogy romlanak a repülőgép olyan fontos repülési jellemzői, mint a manőverező képesség, a repülési távolság és a repülési időtartam. Különösen nagyok a kiegyensúlyozottság "veszteségei" a csúszárny repülőgépeknél, melyeknél a hosszirányú kormányzást a csűrőkormányok segítségével valósítják meg, melyek viszonylag kicsi $\frac{L}{h}$ viszonytal (1) rendelkeznek.

Példaként a különböző kialakítású repülőgépek esetében a 3. ábrán látható a túlterhelés szerinti stabilitás növekedése, hogyan hat a kiegyensúlyozottság "veszteségeire" ΔK .

Azonos feltételek mellett a ΔK legnagyobb értékei a hangsebesség feletti repülési sebességek esetén várhatók, ahol is a hangsebesség alatti repülési sebesség hangsebesség felettivé válik. A szárny körüláramlása átrendeződik, az aerodinamikai centrum (fókusz) hátrábbra helyeződik és a túlterhelés szerinti stabilitás megnő. A ΔK értékét a szerkezeti kialakítás kedvezőbb megválasztásával (a szárny felülnézeti alakjának helyes kiválasztásával, úgynevezett destabilizátor alkalmazásával, a tüzelőanyag kifogyasztás sorrendjének szabályozásával) csökkenteni lehet. Így a hangsebesség alatti és a hangsebesség feletti repülési sebességek esetén lehetséges körülbelül állandó, azonban viszonylag nem nagy értékű túlterhelés szerinti stabilitási tartalékot létrehozni. [5]



3.ábra

Aerodinamika jósági tényező változása
a hosszirányú kiegyensúlyozottság függvényében
különböző repülőgép kialakításoknál

Ugyanakkor a gyakorlati megvalósítás során számos nehézség adódhat, melyeket megoldani nem mindig lehet sikeresen.

Ilyenkor a tervezők a megoldáshoz az egyszerűbb utat választják, vagyis nagyobb stabilitási tartalékokat terveznek a fókuszpont hátrább helyezésével a hangsebesség feletti repülési sebességeken, ami persze maga után vonhatja a nem megfelelő túlterhelés szerinti stabilitást a transzszónikus zónában és természetesen a kormányzásban is egy sor sajátosság figyelembe vételét eredményezheti.

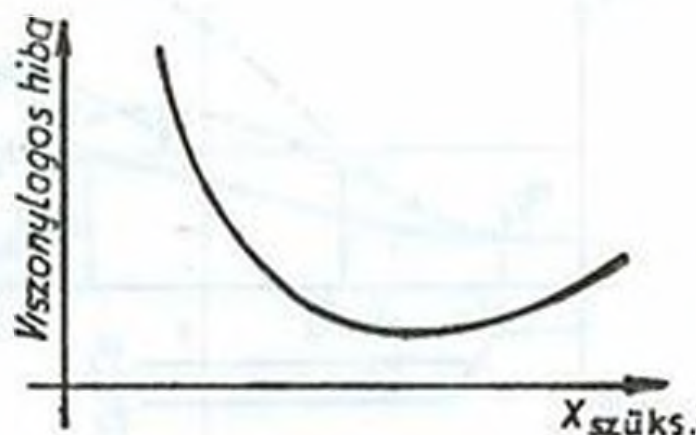
Mivel a kormányzás érzékenysége megnő, a stabilizátor kitérítése nagyobb figyelmet követel a repülőgépvezetőtől.

A 4.ábrán az látható, hogy a repülőgépvezető által a viszonylagosan megengedhető hiba $\frac{x - x_{stb.}}{x_{stb.}}$ hogyan függ a szükséges $x_{stb.}$ botkormány

elmozdítás függvényében.

Kis $x_{stb.}$ botkormány kitérítések esetén a viszonylagos hiba meredeken növekszik. Vagyis a stabilizátor viszonylag kis kitérítéseit a repülőgépvezető nehezen tudja megbecsülni, összehasonlítani a szükséges mértékkel, azaz arra kényszerül hogy többször egymás után mozgassa a

botkormányt kis mértékben egyik majd a másik irányba. Ez pedig a repülőgép lengését eredményezheti.



4. ábra

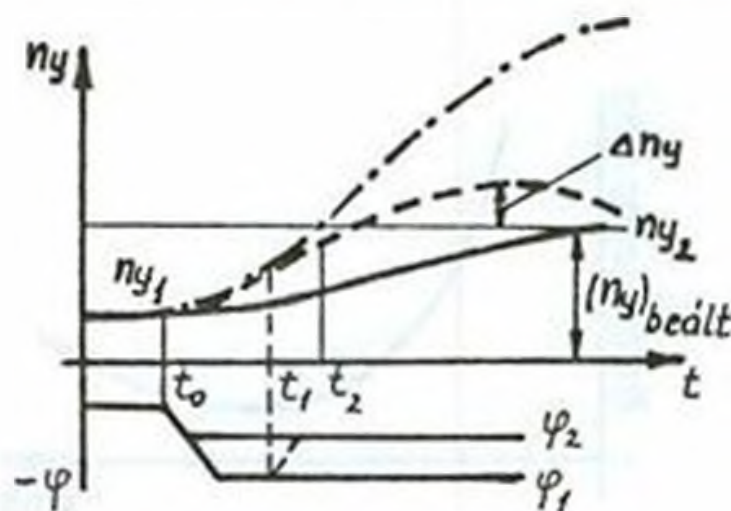
A repülőgépvezető viszonylagos hibájának a szükséges botkormány kitérítés függvényében

Természetesen a stabilizátor kitérítésére - amely egy másik repülési üzemmódra való áttéréshez szükséges - a repülőgép nem azonnal reagál, hanem csak egy meghatározott idő elteltével. A késés annál nagyobb, minél kisebb a hosszirányú túlterhelés szerinti stabilitás. [5., 6.]

Tételezzük fel, hogy repülés közben a gép hosszirányú kiegyensúlyozásához n_1 túlterhelés esetén a stabilizátort φ_1 szöggel való kitérített helyzetben kell tartani. Egy másik n_2 túlterhelésre való áttéréshez a t_0 időpillanatban a repülőgépvezető kitéríti a stabilizátort φ_2 helyzetbe (5. ábra).

Kis stabilitással rendelkező gép esetében az idő függvényében a túlterhelés az 5. ábrán a folyamatos vonallal ábrázolt módon fog változni. Az n_1 -ről n_2 -re való áttérés gyorsítása érdekében a repülőgépvezető φ_2 helyzetben kell, hogy kitérítse a stabilizátort ($\varphi_2 > \varphi_1$). Ekkor a túlterhelés a pont - vonal szerint változik. Látható, hogy a t_2 időpillanatban a túlterhelés eléri a kívánt n_2 értéket. Ahhoz, hogy ez ne növekedjen tovább a repülőgépvezetőnek pontosan a t_1 időpillanatban a stabilizátort vissza kell állítania φ_2 helyzetbe. Ekkor a túlterhelés a szaggatott vonallal ábrázolt módon változna. Látható tehát, hogy az átmeneti folyamatban túllendülés jön

létre. E túllendülés elkerülése érdekében a botkormányt újból ki kell téríteni majd legvégül a φ_2 helyzetbe állítani a stabilizátort.



5. ábra

A túlterhelés változása a stabilizátor kitérítésének függvényében kis stabilitású gépnél

Az elmondottakból következik, hogy a túlterhelés szerinti kis stabilitási tartalékkal rendelkező repülőgépeknél nehéz a botkormány kis kitérítéseit és a repülőgép erre való gyors reagálását nem is olyan könnyű megvalósítani, ráadásul hol az egyik, hol a másik irányba kénytelen a repülőgépvezető a botkormányt mozgatni.

Sőt a repülőgép véletlenszerű túllendülésének feltételei is bekövetkeznek, amely a kis stabilitással rendelkező repülőgépek egyik jellemzője. Így a szuperszónikus repülőgépeknél a hangsebesség alatti repülési sebességek esetén, különböző függesztmények felhelyezésekor a túlterhelés szerinti stabilitás csökkenhet, sőt adott esetben indifferenssé válhat.

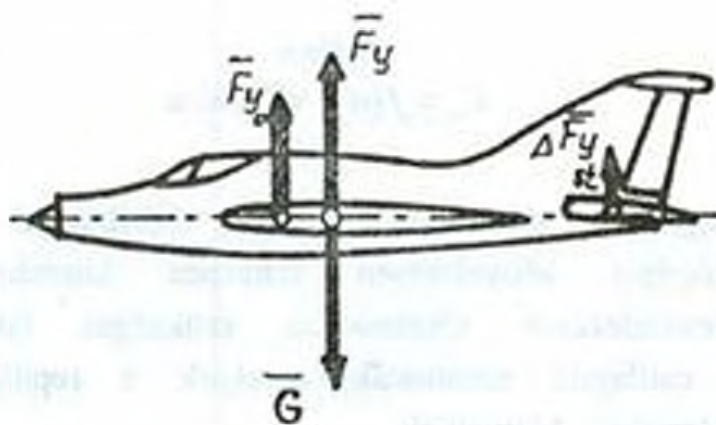
2. Túlterhelés szerinti instabilitás

A túlterhelés szerint stabil repülőgépeknél az állásszög növekedésével a felhajtóerő és ezzel a stabilizáló nyomaték is növekszik, amely az állásszögnövekedés ellen hat. Ennek következtében a stabilizátor kitérítésekor a repülőgép szinte saját maga megtalálja a

kiegyensúlyozottsághoz szükséges állásszöget, amely a korábbi stabilizátor kitérítéséhez tartozik.

Teljesen másképp viselkedik a túlterhelés szerint instabil repülőgép, amelynél a súlypont a fókuszpont mögött helyezkedik el. Ilyen esetben állásszögnövekedés esetén a megnövekedett felhajtóerő nyomatéka a kereszt tengely körül úgy fordítja el a repülőgépet, hogy az állásszög tovább nő. [5., 7.]

Ezért a túlterhelés szerint instabil repülőgépek kormányzásánál a repülőgép vezetőnek kettős mozgást kell elvégeznie a botkormányval. Először elmozdítja az állásszögváltozásnak megfelelően (maga felé állásszög növeléshez, előre pedig állásszög csökkenéshez), ezután ahogy az állásszög közeledik a kívánt értékhez nem csak az eredeti (kiindulási) helyzetbe kell állítania a botkormányt, hanem a kiegyensúlyozottsági helyzet eléréséhez az ellentétes irányba kell elmozdítania.



6. ábra

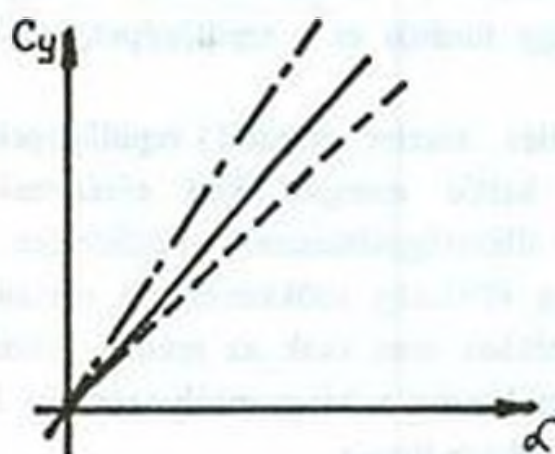
Az instabil repülőgépre ható erők

A kormányzás bonyolultságától eltekintve az ilyen instabil repülőgépnek van azonban egy fontos előnye a stabil géphez viszonyítva. A kiegyensúlyozás elérése érdekében a stabilizátoron létrehozott $\Delta F_{y_{st}}$ felhajtóerő vektorának iránya megegyezik a szárny felhajtóerejének irányával (6. ábra).

Ennek köszönhetően a hosszirányú kiegyensúlyozottság a repülőgép felhajtóerejének növekedéséhez vezet.

$$F_y = F_{y_0} + \Delta F_{y_{st}} \quad (5)$$

Amennyiben a felhajtóerő tényező az állásszögváltozás függvényében kitérítetlen stabilizátor esetén a folyamatos vonallal ábrázolt módon változik (7.ábra), akkor a hosszirányú kiegyensúlyozottság figyelembe vételével stabil gép esetén a szaggatott vonallal, az instabil gép esetén pedig a pontvonallal ábrázolt törvényszerűség szerint változik.



7.ábra
 $C_y = f(\alpha)$ változása

Ahhoz, hogy kis túlterhelés szerinti stabilitással rendelkező vagy instabil repülőgépet kényelmesen lehessen kormányozni különböző automatikus berendezések alkalmazása szükséges (stabilitást biztosító automaták és csillapító automaták), amelyek a repülőgépek megkívánt dinamikai tulajdonságát biztosítják.

Ekkor kézi kormányzás esetén bekapcsolódnak az automatikus vezérlési rendszer elemei, amelyek javítják a repülőgép dinamikai tulajdonságait.

Felhasznált irodalom

- [1] - Pricker D. M., Szaharov G. I., Aerodinamika, Masinosztrójnyie, Moszkva, 1968.
- [2] - Dr. Rác Elemér, Repülőgépek, Tankönyvkiadó, Budapest, 1968.
- [3] - Tudkov A. I., Lesakov P. Sz., Vnyesnyije nagruzki i procsnoszty letatyelnih apparatov, Masinosztrójnyie, Moszkva, 1968.

- [4] - Liszenko N. M., Praktyicseszskaja aerodinamika manyovrennih szamoljotov, Voennoe izdatyelysztvo, Moszkva, 1977.
- [5] - Kotik M. G., Krityicseszskije rezsimi szverhzvukovovo szamoljota, Masinosztrojnyije, Moszkva, 1967.
- [6] - Mihaljov I. A., Okoemov B. I., Pavlina I. G., Csikulajev M. Sz., Kisziljov J. F., Sziszyemi avtomatyicseszskovo i direktornovo upravlenyija szamoljotom, Masinosztrojnyije, Moszkva, 1974.
- [7] - Liszenko N. M., Eszli szamoljot malousztojcsiv, Aviacija i koszmonavtyika, Voenizdat, Moszkva, 1975. N^o.1.

Békési Bertold mk. főhadnagy
főiskolai oktató
Repülő szakág tanszék

A REPÜLŐGÉP IRÁNYÍTÁSÁNAK AUTOMATIZÁLÁSA LESZÁLLÁSKOR

Bevezetés

Leszállás alatt a repülőgép 350 - 400m magasságról a földetérésig és a teljes megállásig való mozgását értjük.

Ezt a mozgást a repülőgép végezheti kötött¹ vagy kötetlen térbeli pályán, melyet siklopályának nevezünk.

A kötött siklopálya a földön elhelyezett berendezések segítségével a repülőgép tömegközéppontjának eltérése a siklopályától pedig a fedélzeti műszerek segítségével adható meg.

Kötetlen siklopálya esetén a repülőgép a földetérés pontjához viszonyított helyzetéről a fedélzeti műszerek segítségével kap információt, néha pedig a földi berendezésektől.

Különbséget kell tenni a leszálláshoz történő bejövétel, amikor a repülőgép a siklopályán mozog 20 - 30m magasságig és a konkrét leszállás között, amikor a repülőgép a függőleges síkban manővert hajt végre, amely a földetéréssel és a kifutópályán történő kigurulással ér véget a teljes megállásig.

Amennyiben a repülőgép fedélzetén van információ a siklopályához vagy a földetérési ponthoz viszonyított helyzetéről, akkor a leszállás irányítása automatizálható.

I. Leszálláskor az irányítás automatizálásának lehetséges módjai

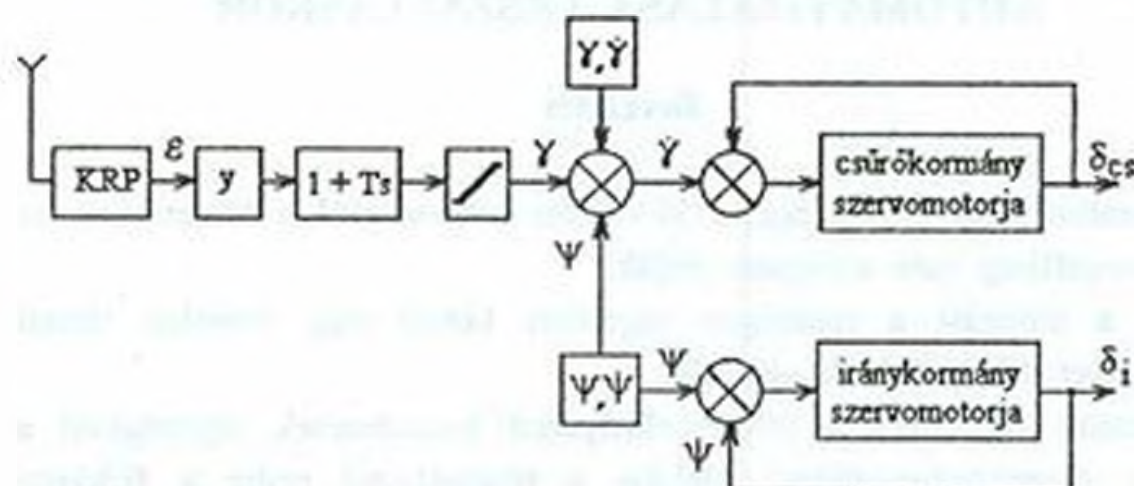
A repülőgép automatikus irányításához leszálláskor az irány és a siklopálya vevők kimeneti jeleire van szükség, amelyeket egyenáramú jelek formájában

¹Kötött siklopálya - trajektória, a földhöz képest változatlan.

A kötetlen siklopálya felépíthető a repülőgép helyzetétől függően minden időpillanatban.

képzeltünk el. Ezek a jelek erősítés után a robotpilóta megfelelő csatornájának bemeneti jelei lehetnek.

Ha az irányszögvevő (KRP) jelét a robotpilóta bemenetére kötjük, akkor a repülőgép fordulót fog végrehajtani a leszállópálya középvonalának iránya felé és a szögsebesség arányos lesz a jel nagyságával.



1.ábra
A repülőgép oldalirányú mozgásának automatizálása

Hasonló módon, ha a siklópálya vevőjének jelét a robotpilóta hosszirányú csatornájának bemenetére kötjük, akkor a repülőgép a siklópálya irányában a bólintási szög sebességével fog mozgást végezni, amely arányos lesz szintén a jel nagyságával.

A repülőgép oldalirányú mozgásának automatizálása az 1.ábrán látható. Az irányszög vevőjelei ε erősítés után a gyorsító tagra (y) kerül, hogy az ε deriváltját megkapjuk.

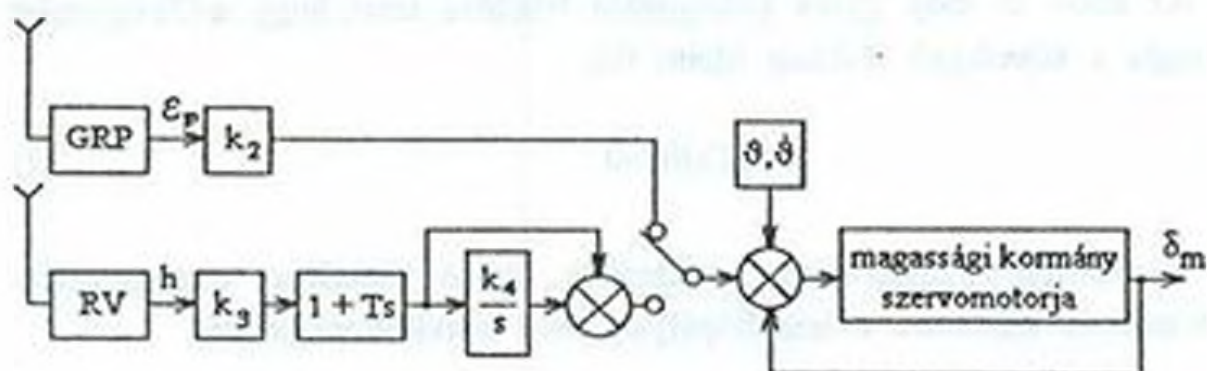
A gyorsító tag kimenetén a szükséges γ dőlési szög jelenik meg.

$$\gamma = k_1(1 + Ts)\varepsilon \quad (1)$$

A γ szükséges bedőlési szög jelét átvezetjük egy határolón, azért hogy elkerüljük leszálláskor a veszélyes dőlési szögek megjelenését. Ez a jel a robotpilóta dőlési csatornájába kerül. Ugyanebbe a csatornába kerül a repülőgép dőlési szög γ ; irányszög ψ ; és a dőlés szögsebességének jele.

Az oldalkormány csatornáját az irányszög lengésének megszüntetésére használják.

A repülőgép függőleges síkban történő automatikus irányítását a leszálló sikló pályán a 2. ábrán bemutatott módon lehet megvalósítani.



2. ábra
Irányítási rendszer a sikló pályára fényjelző zónájában

30m magasságig a vezérlési törvény

$$\vartheta = k_2 \varepsilon_p \quad (2)$$

ahol ϑ - a szükséges bólintási szög;
 ε_p - a sikló pályától való eltérés szöge;

A leszállás utolsó fázisában a sikló pályára jelének nem egyenletes mezője miatt a függőleges síkban az irányítás a rádió magasságmérővel oldható meg. Erre a célra kis időállandójú (kis csillapítású) rádió magasságmérőt (RV) használnak, amelynek segítségével exponenciális pályát lehet felépíteni, amely összeköti a sikló pályát a leszállópályára középvonalával.

A rádió magasságmérő alkalmazásakor a vezérlési törvény a 2. ábra alapján a következő alakban írható fel:

$$\vartheta = k_3(1 + Ts)h + \frac{k_4}{s}(1 + Ts)h \quad (3)$$

ahol: h - a repülés viszonyított magassága ;
 k_1, k_2 - áttételi viszonyszámok ;

A (3) egyenletben szereplő integráló tag biztosítja a bólintási szög folyamatos változását a repülőgép kilebegtetésekor.

Az adott ϑ szög gyors kidolgozása lehetővé teszi, hogy a (3) egyenlet első tagja a következő alakban írható fel:

$$(1 + Ts)h = 0 \quad (4)$$

azaz a repülőgép magassága a leszállás utolsó fázisában exponenciális görbe mentén változzon a leszállópályára való lesiklásakor (3.ábra).

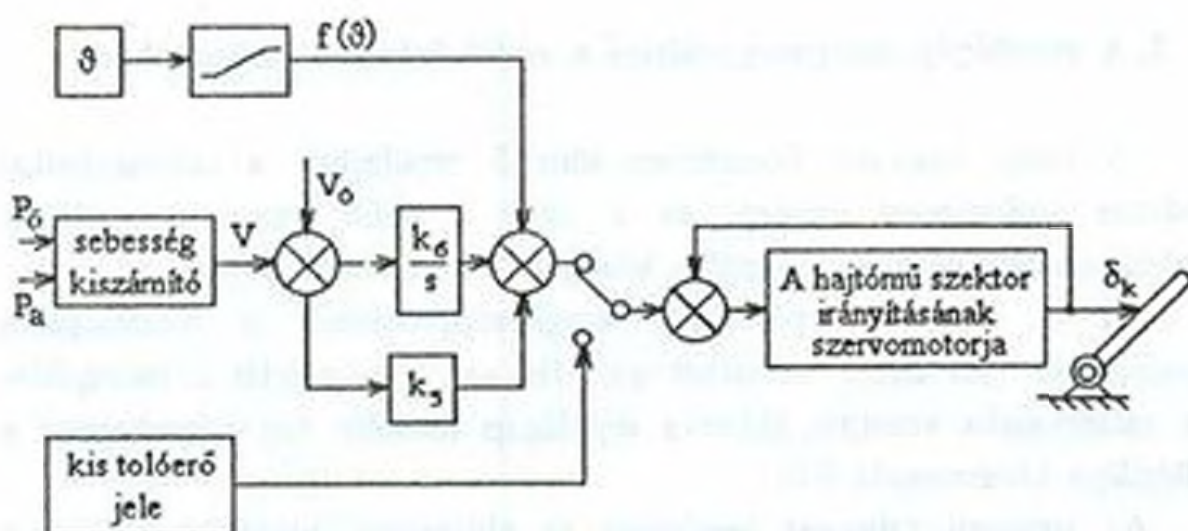


3.ábra

A földetérés exponenciális törvényszerűség szerint

A sikeres leszállás végrehajtásához a repülőgép sebességét a siklopályán először állandó értéken kell tartani, majd 80 - 90m - ről kezdve csökkenteni kell. A sebesség vezérlését a hajtómű tolóerejének szabályozásával valósítják meg. Az erre a célra használatos sebességautomata magába foglalja az összenyomás p_o és a statikus nyomás p_s mérésén alapuló sebességmérőt, $\frac{k_s}{s}$ átviteli függvényű integrátort, $f(\vartheta)$ funkcionális átalakítót, melynek bemenetére kerül a ϑ bólintási szög, kis tolóerő jele (melynek kialakítását egy erre a célra szolgáló berendezés adja) és a hajtómű szabályozására szolgáló szervomotor.[1.,2.,3]

Földetérés előtt a repülés adott V sebessége olyan törvényszerűség szerint változik, amely lehetővé teszi a hajtómű leállítását.



4. ábra
A sebesség automata hatásvázlata

A repülési sebesség vezérlési törvénye, mint ahogy a 4. ábrán látható a következő alakban írható fel:

$$\delta = k_3 \Delta V + \frac{k_0}{s} \Delta V + f(\vartheta) \quad (5)$$

ahol δ - a szervomotor rúdjának elmozdulása ;

$f(\vartheta)$ - a bólintási szög függvénye ;

$$\Delta V = V_0 - V$$

V_0 - az adott program szerint változó repülési sebesség ;

Az (5) egyenletben lévő integráló tag lehetővé teszi, hogy figyelembe vegyük a rendszer kezdeti feltételeit ; az $f(\vartheta)$ tag pedig lehetővé teszi a vezérlési program betartását.

A kis tolóerőre mint bemeneti jelre való átkapcsolást a rádió magasságmérő jelével biztosítható.

A sebesség vezérlése lehetővé teszi, hogy csökkentsük a földetérés pontjainak szórását, azaz növelhető a leszállás pontossága.

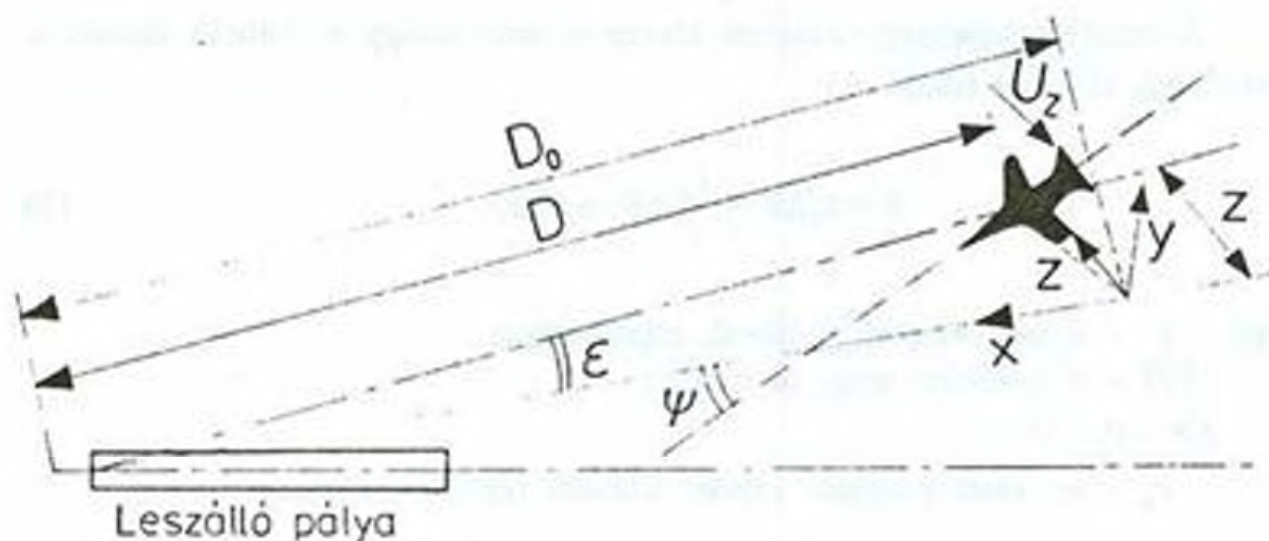
A fentebb említett vezérléseken kívül a leszállás automatikus irányítása kiegészül indikátorokkal, melyek alapján a pilóta ellenőrizheti leszálláskor a manőverek végrehajtásának helyességét.

2. A repülőgép mozgásegyenletei a rádió irányadó körzetében

A rádió irányadó körzetében történő repüléskor a rádiótechnikai berendezés segítségével mérhető az ε szög a rádió irány - a repülőgép tömegközéppontja és a leszállópálya középvonala között (3. ábra).

Ez a szög a repülőgép tömegközéppontjának a leszállópálya középvonalától való eltérés mértékét adja. Ha az ε szög jelét a robotpilóta dőlési csatornájába vezetjük, akkor a repülőgép fordulót fog végrehajtani a leszállópálya középvonala felé.

Az átmeneti folyamat minőségét az elfogadott irányítási törvény, a repülőgép dinamikai tulajdonságai, az irányítási rendszer és a rendszerre ható zavarások határozzák meg.



5. ábra

A mozgásegyenletek levezetéséhez

A rendszer viselkedésének leírásához válasszuk az $Oxyz$ földhöz rögzített koordinátarendszert. A koordináta rendszer kezdőpontját helyezzük a sikló pályára D_0 távolságba a rádió irányadótól, az Ox tengely a sikló pályával essen egybe és pozitív iránya mutasson a leszállópálya felé, az Oy tengely az oldalirányú eltérés síkjára legyen merőleges. Az irányyszöveget tekintjük pozitívnak, ha a sebesség vektora a sikló pályára irányától balra tér el.

Az ε szög pozitív, ha a siklópályától a repülőgép jobbra tér el. Ha z - a repülőgép tömegközéppontjának oldalirányú eltérése a leszállópálya középvonalától, akkor

$$\frac{dz}{dt} = -V\psi + u_x \quad (6)$$

ahol V - a repülés sebessége, melyet állandónak veszünk;
 u_x - a szél sebességének oldalirányú összetevője;

Kis ε szögek esetén

$$z = D\varepsilon \quad (7)$$

ahol D - a rádióirányadótól mért változó távolság;

A (6) egyenlet a (7) összefüggés figyelembevételével a következő alakban írható fel

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{D}{V} \varepsilon \right) = -\psi + v_x \quad (8)$$

ahol $v_x = \frac{u_x}{V}$

Alakítsuk át a (8) egyenletet, figyelembe véve, hogy

$$D = D_0 - Vt \quad (9)$$

ahol t - a repülőgépnek a koordináta rendszer kezdőpontjától számított repülési ideje

A (8) egyenletbe a (9) egyenletet behelyettesítve kapjuk

$$(t_0 - t) \frac{d\varepsilon}{dt} - \varepsilon = -\psi + v_x \quad (10)$$

ahol $t_0 = \frac{D_0}{V}$

A (10) kinematikai egyenletet ki kell egészíteni a repülőgép dinamikai, az irányítási rendszer, a vezérlést megvalósító és a rádió irányadó jelének egyenleteivel.[3]

Tételezzük fel, hogy a tömegközéppont oldalirányú mozgása a repülőgép bedőlésével valósul meg, ekkor a következő egyenletrendszert kapjuk:

$$\gamma = W(s)\delta_{\alpha} \quad (11)$$

$$s\psi = n_{14}\gamma \quad (12)$$

$$\delta_{\alpha} = W_{\alpha}(s)(u - k_{\psi}\psi - k_{\gamma}\gamma) \quad (13)$$

$$u = W_1(s)(u_1 - u_2) \quad (14)$$

$$u_1 = W_R(s)\varepsilon \quad (15)$$

ahol $W(s)$ - a repülőgép átviteli függvénye;

$W_{\alpha}(s)$ - a szervomotor átviteli függvénye;

$W_1(s)$ - a vezérlőjel képzés átviteli függvénye;

$W_R(s)$ - a rádióirányadó átviteli függvénye;

u_1 - a rádióvevő kimeneti jele;

u - a vezérlő jel;

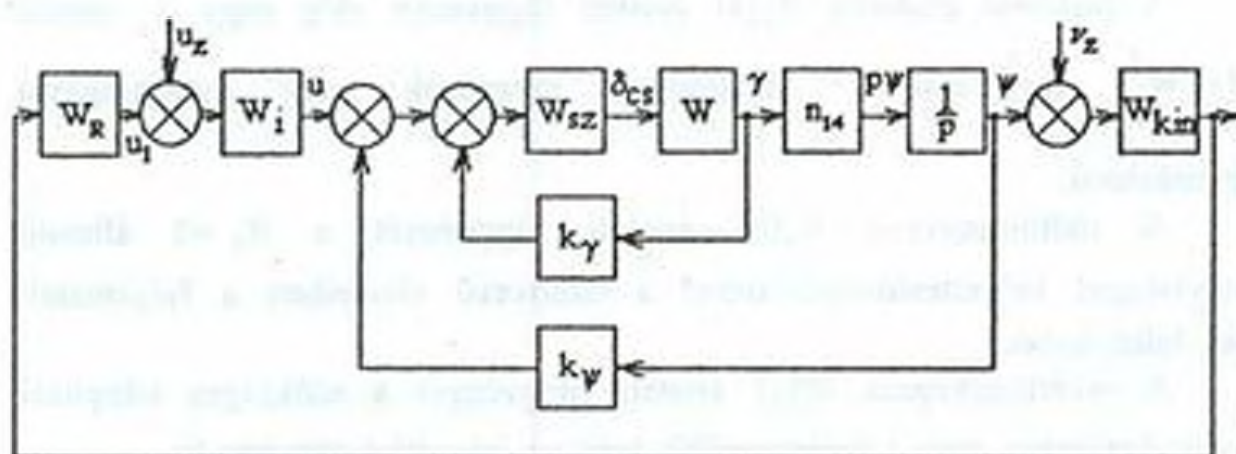
u_2 - zavaró jel;

A (6) ábrán látható irányítási rendszer a (10) - (15) egyenletrendszernek felel meg, amely a rádióirányadó körzetében való oldalirányú mozgás irányítási rendszerének dinamikáját tükrözi.

A zárt irányítási körhöz hozzátartozik a

$$W_{\alpha}(s) = \frac{V}{D} \frac{1}{s} \quad (16)$$

kinetikai tag átviteli függvénye, amelynek csak $D = \text{const}$ esetén van értelme.



6. ábra
Az irányítási rendszer hatásvázlata

A repülőgépnek a leszállópályához való közeledésekor a $\frac{V}{D}$ együttható növekszik, amely a rendszer hatásosságának növekedéséhez és következésképpen az instabilitás fellépéséhez vezet. [2]

Az irányítási rendszer állandó hatásosságának megőrzése érdekében változtatni kell az áttételi viszonzyszámot, például a W_i - t a $\frac{V}{D}$ együttható változtatásával.

Ha a D - t állandóra vesszük minden esetben, akkor a 6. ábrából a következőt kapjuk:

$$\varepsilon = W_u u_z + W_v v_z \quad (17)$$

ahol

$$W_u(s) = \frac{W_{km}(s + n_{14} k_\gamma W_D)}{s + n_{14} W_D (k_\gamma + W_{km} W_i W_R)} \quad (18)$$

$$W_v(s) = \frac{n_{14} W_D W_i W_{km}}{s + n_{14} W_D (k_\gamma + W_{km} W_i W_R)} \quad (19)$$

$$W_D(s) = \frac{W W_\pi}{1 + k_\gamma W W_\pi} \quad (20)$$

A bedőlési csatorna $W_D(s)$ átviteli függvénye elég nagy k_γ esetén $W_D(s) \approx \frac{1}{k_\gamma}$ lesz, ami az oldalirányú mozgások nagy gyorsaságával magyarázható.

A rádióirányvevő $W_R(s)$ átviteli függvényét a $W_R = 1$ állandó mennyiséggel helyettesíthetjük, mivel a rádióvevő elemeiben a folyamatok gyors lefolyásúak.

A vezérlőjelképzés $W_I(s)$ átviteli függvényét a szükséges irányítási törvény határozza meg. Legegyszerűbb lesz az irányítási törvény, ha

$$W_I(s) = k_1 \quad (21)$$

Ha figyelembe vesszük, hogy $W_D(s) = \frac{1}{k_\gamma}$ és $W_R(s) = 1$, akkor a dőlési szög (feltételezve, hogy $k_* = 0$) arányos lesz a repülőgép tömegközéppontjának a sikló pályától való elhajlásával, azaz

$$\gamma = \frac{k_1}{k_\gamma} (\varepsilon + u_1) \quad (22)$$

Felhasználva a (12) és a (22) egyenleteket a forduló szögsebességének kifejezését kapjuk

$$\frac{d\psi}{dt} = k(\varepsilon + u_1) \quad (23)$$

ahol $k = \frac{k_1}{k_\gamma} n_{1\psi}$

A (23) irányítási törvénnyel leírt rendszer azonban a nagy lengések miatt nem kielégítő. A lengések elkerülése érdekében az irányítási törvénybe az $\dot{\varepsilon}$ szögsebességet vezetjük, úgy hogy ε jelet egy gyorsító tagon keresztül engedjük (1. ábra). Ebben az esetben a $W_I(s)$ átviteli függvény

$$W_I(s) = k_1(1 + Ts) \quad (24)$$

és az irányítási törvény a $k_{\psi} = 0$ figyelembevételével

$$\frac{d\psi}{dt} = k_1(1 + Ts)(\varepsilon + u_1) \quad (25)$$

Ez utóbbi irányítási törvénynek az a hiányossága, hogy az u_1 zavaró jel is átmegy a gyorsító tagon. Az ε jel helyett néha a ψ irányyszög jelét vezetik be, amely ugyanúgy biztosítja a tömegközéppont mozgásának csillapítását.

Az irányítási törvény ebben az esetben a következő lesz

$$\frac{d\psi}{dt} = k_1(\varepsilon + u_1) - k'_1\psi \quad (26)$$

ahol $k'_1 = \frac{k_{\psi}}{k_1} n_{1\psi}$

Az irányítási rendszer $v_z = \text{const}$ állandó szélesség esetén a (26) irányítási törvény alkalmazásakor statikus hibával rendelkezik, amelyet az irányítási törvénybe a jel integráljának bevezetésével küszöbölhetünk ki, azaz

$$\frac{d\psi}{dt} = k_1(\varepsilon + u_1) - k'_1\psi + \eta \int_0^t (\varepsilon + u_1) dt \quad (27)$$

Azokat az irányítási rendszereket amelyek a (25), (26) és (27) irányítási törvényeket valósítják meg sebességi, statikai és integrális csatolásnak nevezzük.

Felhasznált irodalom

- [1] - Bodner V. A. Szisztyemi upravlenyija letatyelnimi apparatami, Masinosztroenyije, Moszkva, 1973.
- [2] - Dr. Csáki Frigyes - Bars Ruth Automatika, Tankönyvkiadó, Budapest, 1972.
- [3] - Belogorodszkij Sz. L. Automatizacija upravlenyija poszadkoj szamoljota, Transzport, Moszkva, 1972.

Fehér András
főiskolai adjunktus
Általános katonai tanszék, oktató

A DIGITÁLIS TÉRKÉPEK ALKALMAZÁSÁNAK LEHETŐSÉGEI A SZOLNOKI REPÜLŐTISZTI FŐISKOLA KÉPZÉSI RENDSZERÉBEN

A cikk rövid áttekintést nyújt a térinformatikai rendszerekről, a digitális térképekről, azok általános alkalmazásáról, egy konkrét adatbázis (DTA-200) bemutatásával vázolja alkalmazásának lehetőségeit a főiskolai képzésben.

Bevezetés

A MH Tóth Ágoston Térképészeti és Katonaföldrajzi Intézet¹ 1996. január 30-án főiskolánk részére átadta az Intézet által elkészített DTA-200 adatbázist² (Digitális Térképészeti Adatbázis) a főiskolai képzés korszerűsítése, az oktatás színvonalának emelése céljából. A DTA-200 Magyarország kétdimenziós, 1:200 000 méretarányú digitális térképe. Az adatbázist a TÁKTI megfelelő előkészítő munka után, további hasonló jellegű munkái előtanulmányaként hozta létre.

A munka során szerzett tapasztalatok felhasználásával, a technikai háttér bővítésével 1995. december hónapban elkészült Magyarország 1:50 000 méretarányú térképe (DTA-50), amely méretében, minőségében, felhasználhatóságának lehetőségeiben jelentősen eltér elődjétől. A Magyar Honvédségben e két adatbázison kívül mások is elkészültek, többek között a BP-15, Budapest 1:15 000 méretarányú térképe, a DDM-50 és a DDM-10 Digitális Domborzati Modellek és más térinformatikai adatbázisok.

1. Mi is a térinformatika ?

A térinformatika * az informatikának egy speciális ága, amelyben az információk tárolásának, kezelésének, vizsgálatának alapvető rendező elve a térbeli elhelyezkedés és a valós térbeli viszonyok.* (Kollányi-Prajczner 8. o.)

¹ A továbbiakban TÁTKFI.

² Adatbázis: káros és szükségtelen redundancia nélkül együtt tárolt, egymással kapcsolatban levő adatok együttese.

A térinformatikai rendszer *speciális informatikai rendszer, amelyben az egyes objektumok és a hozzájuk tartozó információk a valós térbeli viszonyoknak megfelelően azonosíthatók, kezelhetők és vizsgálhatók különböző relációk és szelekciós szempontok szerint. Az információk és térbeli kapcsolataik sokoldalúan analizálhatók, szintetizálhatók, generálhatók és az összefüggések alapján automatikusan új információk állíthatók elő.* (Kollányi-Prajczner 9. o.)

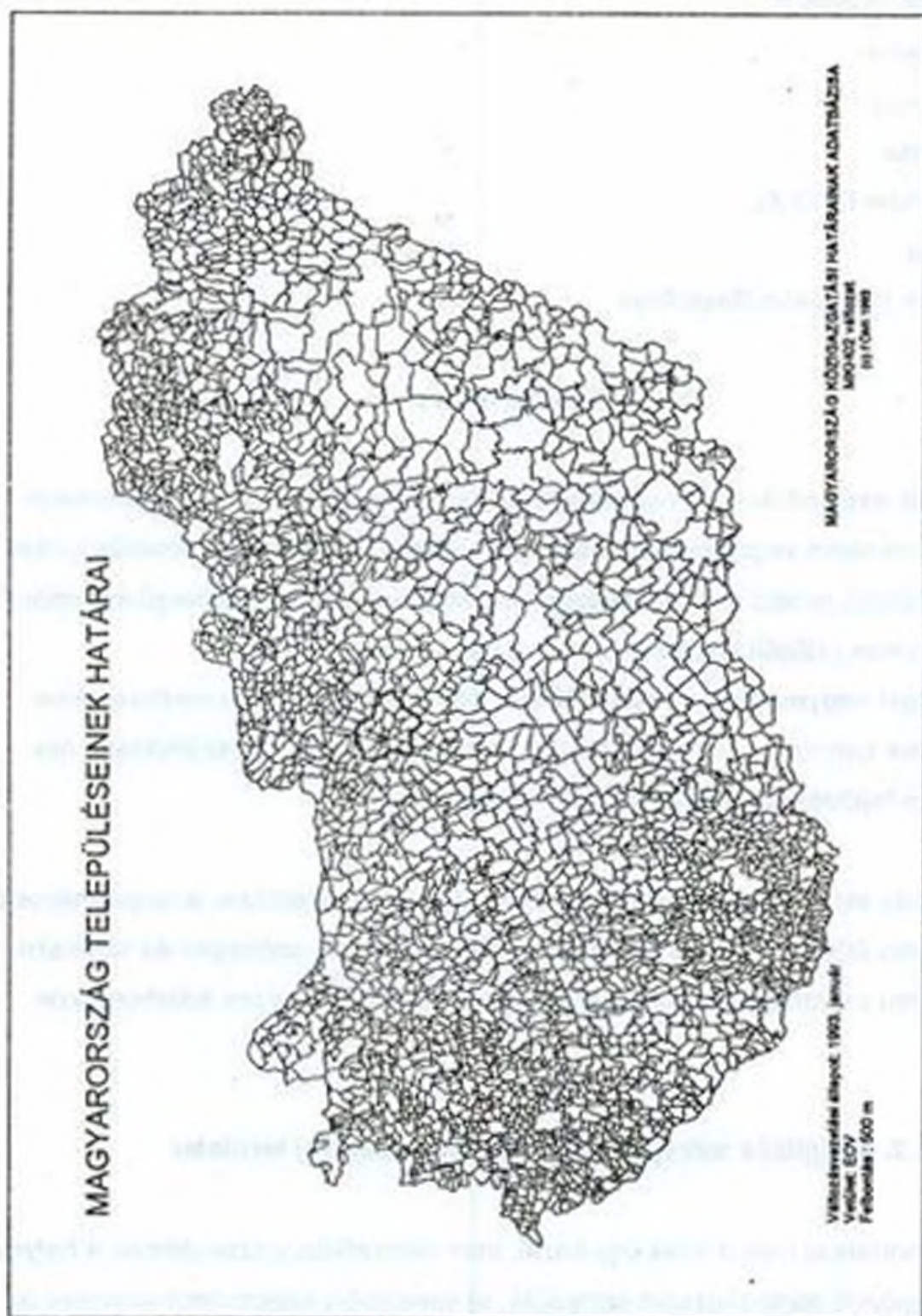
Napjainkban a közigazgatásban, a környezetvédelemben, a vízgazdálkodásban, a közlekedésben, a robottechnikában és számos más területen elterjedten alkalmazzák a digitális térképeket, a különböző igényeket kiszolgáló adatbázisokat, szoftvereket, hardvereket. Néhány konkrét ezek közül:

Adatbázisok:

- MKH02 Magyarország Közigazgatási Határainak adatbázisa (1. számú ábra),
- Budapest-4000 Budapest 1:4 000 méretarányú digitális tömbhatáros térképe,
- BP-500 Budapest 1:500 méretarányú digitális tömbhatáros térképe,
- BDA-2000 Budapest Digitális Alaptérképe,
- OTAB Országos Térinformatikai Alapadatbázis,
- CORINE Felszínborítási Adatbázis,
- Magyarország Digitális Földrajzinév-tára,
- TISZA Területkezelő Informatikai és Számítástechnikai Alaprendszer.

Szoftverek:

- Alliance
- AutoCAD
- ArcCAD
- ARC/INFO
- ArcView 2.0
- ERDAS IMAGINE Vista
- IDRISI for Windows
- MapInfo 3.0
- TransCAD 2.1
- Win MAP



1. számú ábra
Az MKH 02 adatbázis (részlet)

Hardverek:

- Decimeter Processor
- Geo-PC
- GeoExplorer
- Graphic Master II.
- GridMaster
- Intergraph
- Mantissa
- Pathfinder PRO XL
- Pfínder
- Trimble Pathfinder Basic Plus

1.1. A digitális térkép

Az elmúlt esztendőkbén a technikai fejlődés - elsősorban a számítástechnikai eszközök fejlesztése terén végbement robbanásszerű haladás - igen nagy lehetőségeket kínált fel az információs rendszerek alkalmazóinak. Lehetővé vált nagy tömegű információ gyors, pontos kezelése (előállítás, tárolás, továbbítása, módosítása).

A fejlődést nagymértékben elősegítette, hogy a térinformatikai rendszerekkel kapcsolatos igények tömeges megjelenése az ezen igényeket kielégítő számítástechnikai eszközök gyors fejlődésével párhuzamosan ment végbe.

A digitális térkép lényegét tekintve egy strukturált adatbázis, a hagyományos térkép számítógépes feldolgozása, amely annak grafikus elemeit, szöveges és számszerű adatait valamilyen számítástechnikai adattípus formájában mágneses adathordozón rögzíti.

1.2. A digitális térképek általános felhasználási területei

A térinformatikai fejlesztések úgy hazai, mint nemzetközi viszonylatban a helyes és kellően megalapozott döntéshozatalt szolgálják, új dimenziójú kapcsolatot teremtve az ember és környezete között.

Az alábbiakban felsorolt alkalmazási területei, lehetőségei csak mintaként tekintendők, hiszen az ember - idő - tér kapcsolatban a megfelelő információs rendszerek ki-

dolgozása, e rendszerek közvetlen gyakorlati alkalmazása, felhasználása már széles körben elterjedt. Néhány felhasználási területe:

Az önkormányzati munkában:

- ingatlanok nyilvántartása,
- területfejlesztés, városrendezés,
- közműhálózatok nyilvántartása, fejlesztése,
- útnyilvántartás,
- közlekedési rendszerek fejlesztése (pl. tömegközlekedés),
- népszámlálások, választások előkészítése stb.

Környezetvédelem, vízgazdálkodás területén:

- szennyeződések tér- és időbeni alakulásának nyomkövetése,
- veszélyes hulladék szállítása, tárolása, a tárolóhely kiválasztása,
- folyószabályozás,
- vízrendezés,
- árvízvédelem,
- vízkészletgazdálkodás,
- mezőgazdasági vízhasznosítás,
- ökológia (ökológiai szempontból fontos növényzettel borított területek, kialakítandó védőterületek, beépített területek növényellátottsága, meglévő és tervezett ökológiai folyosók),
- talajveszélyeztetettség (talajdegradációk, veszélyeztetettség mutatók),
- relatív zajveszély (zajterhelés, veszélyeztetett zónák, zajvédő objektumok),
- levegőszennyezettségi források (emissziós helyek, immissziós mérések, terjedés),
- ipari és mezőgazdasági üzemek, létesítmények létrehozása (esetleges hatásmechanizmusok vizsgálata) stb.

Részletezés nélkül további alkalmazási területek:

- mezőgazdaság,
- ipar,
- közlekedés, hírközlés,
- honvédelem,

- piackutatás,
- geológia,
- régészet,
- oktatás.

Az említett területek jó részén az információs rendszerek hazai felhasználása már jelentős eredményekkel szolgált, a további fejlesztések egy része az európai információs rendszerekbe való bekapcsolódás lehetőségeinek kutatására irányul.

A nemzetközi szervezetek fogadókészsége nyilvánul meg e téren a különböző programok, projektek meghirdetésében, többek között:

- az oktatás és képzés (TEMPUS, SOCRATES, PHARE stb),
- intézmények hálózatszerű együttműködésében (pl. WELL-GIS),
- európai szervezetekben (CERCO, CENTC287).

2. A digitális térképek katonai alkalmazása

A korszerű összefegyveremi harc egyik jellemzője - támadó és védelmi jellegű harctevékenység esetén egyaránt - a harc helyzetek gyors és éles változásai.

A katonai vezetés számára ez komoly kihívást jelent, hiszen a hadműveleti és harcászati szintű tervezéshez, a megfelelő elemzések elvégzéséhez, a helyes döntések meghozatalához, a csapatok vezetéséhez szükséges idő adott helyzetben igen rövid lehet.

Ezen feladatok gyors és pontos elvégzésére jelentek meg a hadseregekben a korszerű automatizált vezetési rendszerek, amelyek az adott harc helyzetben - figyelembe véve a harctevékenységre ható tényezőket, az erők, eszközök mennyisége, minősége, a terepviszonyok stb. hatását - az optimális döntés meghozatalát segítik elő.

A számítástechnikai eszközök elterjedése nem egyedül a parancsnoki (törzs) munkában vált napjainkban gyakorlattá, hanem az egyes fegyverek, fegyverrendszerek működtetése, üzemeltetése terén is, például:

- a hadászati-, hadműveleti felderítésben,
- a rakéta- és űrtechnikai eszközök alkalmazásában,

- a korszerű tüzérségi eszközöknél (lőelemképzés),
- a repülésirányításban,
- a korszerű repülőgépek földi üzemeltetésében, javításában,
- a lokátortechnikában,
- a modern rádióelektronikai, rádiótechnikai eszközökben stb.

Hasonló ütemű fejlődés történt a csapatok ellátó (logisztikai) rendszerében, a kiképzés, oktatás, a hadkiegészítés területén is.

Annak ismeretében, hogy a terep minden harchelyzetnek állandóan ható, mindig jelen lévő eleme, a terep hatását a harctevékenységre nem hagyhatja figyelmen kívül a hadműveletet tervező, vezető tábormok, de a tüzelőállását kiválasztó katona sem, szinte törvényszerű volt a katonaföldrajzi információs rendszerek létrehozását szorgalmazó igény.

A katonai vezetés részéről megfogalmazott igényeket csak a földrajzi információs rendszer (a nemzetközi szakirodalomban GIS, Geographic Information Systems) képes teljesíteni. A katonaföldrajzi információs rendszer alapját a digitális térképi alap képezi de kapcsolhatók a rendszerhez egyéb, például légi- és űrfelvételek, video- és fényképfelvételek is az adott igényeknek megfelelően. Kiválasztható a feladatnak legjobban megfelelő dimenzió (2D, 3D) is.

A továbbiakban a kétdimenziós digitális térképek néhány jellemzőjét említem meg, ezek a következők:

- nagy mennyiségű földrajzi információ tárolása, biztosítása a felhasználók részére,
- megoldható az információk szelektív megjelenítése (a felhasználó részére a térképen csak a számára szükséges információ jelenik meg),
- az adatbázis frissítésével naprakész információk jeleníthetők meg,
- megfelelő szabvány bevezetésével lehetőség nyílik a különböző adatbázisok közötti adatcserére, az adatok lekérdezésére ezáltal széleskörű alkalmazásra,
- nyomtató, illetve plotter segítségével lehetőség van az információk megjelenítésére, hagyományos papír térkép előállítására, a nyomtató megfelelő felbon-

tóképessége esetén (300 dpi.) nyomdai minőségben,

- a térképszelvények méretaránya változtatható, lehetőség van különböző méretarányú szelvények előállítására.

A digitális térképek nagy lehetőséget kínálnak azok oktatási célú felhasználására, a továbbiakban a DTA-200 adatbázis ezen lehetőségeivel foglalkozom - szándékosan - nem törekedve a lehetőségek teljeskörű részletezésére.

- Az oktatásban való alkalmazás alapvető formáit tekintve a térképi információk
- közvetlenül megjeleníthetők a monitorról, vagy
 - közvetve, hagyományos papír térképek előállítása útján jelennek meg.

A továbbiakban az utóbbival foglalkozom részletesebben.

3. A hagyományos papír térkép előállítása a DTA-200 adatbázis felhasználásával

Hardver feltételek:

- IBM-PC AT, vagy ezzel kompatibilis számítógép,
- a számítógéphez kapcsolt nyomtató, vagy plotter (színes ajánlott),
- billentyűzet,
- monitor,

Szoftver követelmények:

- MS-DOS 3.3, vagy későbbi verzió,
- az AutoCAD program Release 10 (későbbi változat esetén matematikai co-processor szükséges),
- a DTA-200 adatbázis³.

Egyéb feltételek:

- Az autoCAD program használatának alapfokú ismerete (rétegek létrehozása, ki- és bekapcsolása, rajzok nagyítása, kicsinyítése, egyszerű rajzok készítése).

³ A főiskola Általános katonai tanszékén található.

Ezenkívül a programok futtatásához 20 MB szabad merevlemez terület szükséges, amely a bemásolásra kerülő állományok függvényében kevesebb is lehet.

A CONFYG.SYS állományban az egyidejűleg megnyitható állományok számát legalább 20-ra kell állítani (FILES=20).

3.1. A DTA-200 telepítése

Az adatbázis telepítése előtt célszerű az AutoCAD programot telepíteni, a program használatát elsajátítani.

Az DTA-200 adatbázist a TÁTKFI tömörített formában biztosította .dxf és .dwg file-okban, a szükséges .arj-t az adatbázis tartalmazza.

Az adatbázis file-okat célszerű telepítéskor külön könyvtárban elhelyezni, majd az AutoCAD könyvtárba bemásolni.

3.2 A DTA-200 műszaki adatai

Alapanyag:

A katonai autótérkép 1:200 000 méretarányú alapanyagai alapján készült, AutoCAD alapú vektoros formában, kézi digitalizálással.

Adattartalom:

- vízrajz, víznévjajz,
- úthálózat a kilométer megírásokkal, a főközlekedési utak számozásával,
- vasúthálózat
- települések kontúrral, névjajz,
- egyéb jelek⁴.

Vetületi rendszere:

Gauss-Krüger, vagy EOY vetületi rendszer.

Rétegekiosztás:

Az állomány 61 rétegre van osztva⁴.

⁴ A részletes rétegekiosztás táblázata tartalmazza.

Adatformátum:

.dwg, vagy .dxf (AutoCAD).

Az adatállomány mérete:

A teljes adatállomány Magyarország területére 7,2 MB, egy szelvény mérete 300-400 KB.

3.3. A DTA-200 részletes rétegekiosztása

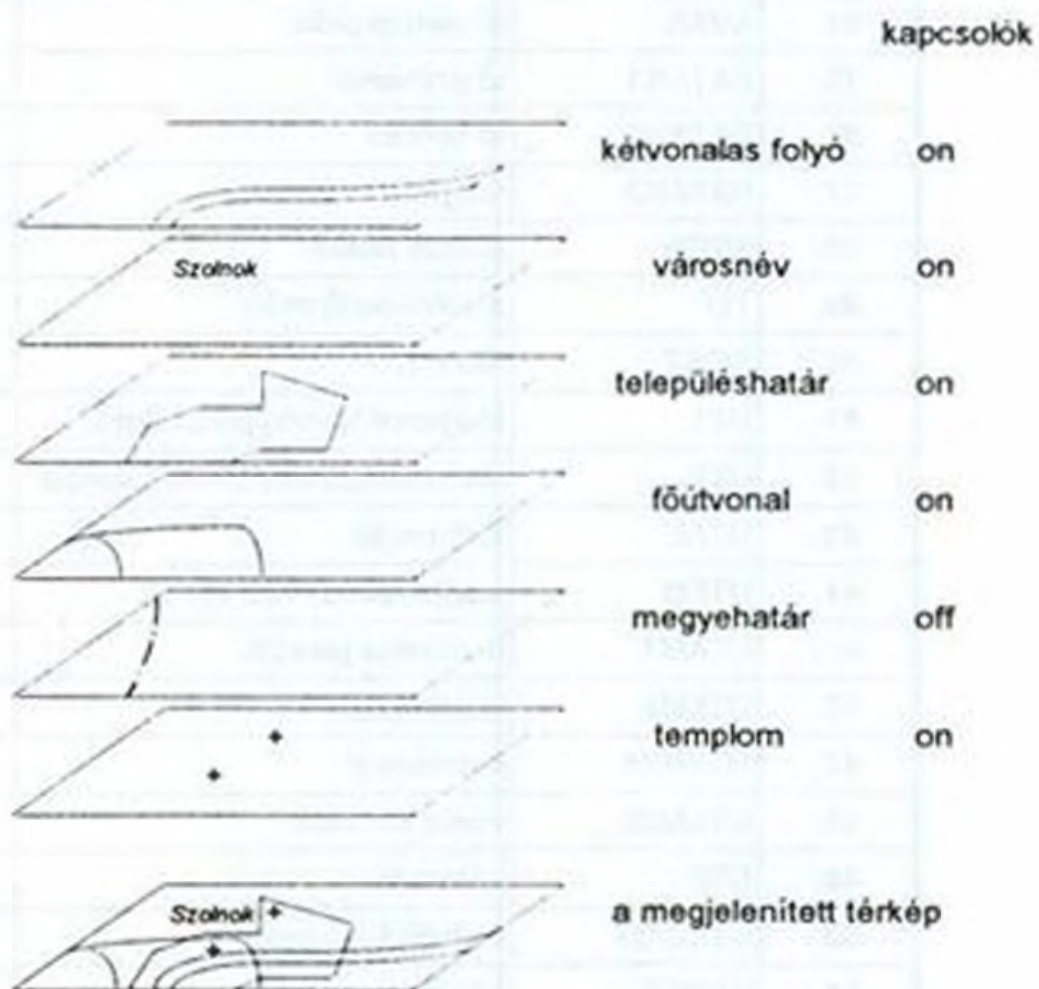
Sorszám	Rétegnév	Tartalom	Jelleg
1.	AUTO	autópálya	vonal
2.	AUTO2	tervezett autópálya	vonal
3.	AUTOU	autóút	vonal
4.	AUTOCS	autópálya csomójel	jel
5.	AUTOCSN	autópálya csomójel megírás	szöveg
6.	AUTOE	épülő autópálya	vonal
7.	AUTOF	félautópálya	vonal
8.	FALUB	falu kitöltés	vonal
9.	FALUH	település határ	zárt vonal
10.	FALUN	település név	szöveg
11.	FOLYO	folyó partvonala	vonal
12.	FOLYOB	folyó kitöltése	vonal
13.	GKHALO	szelvényhatár	vonal
14.	HAT	határátkelőhely	jel
15.	HATAR	országhatár	vonal
16.	HATARM	megyehatár	vonal
17.	HEGYN	hegytető megírás	szöveg
18.	JADO	TV-rádió adó	jel
19.	JANT	TV antenna	jel
20.	JBAR	barlang	jel
21.	JEMEL	6%-nál meredekebb emelkedő	jel
22.	JKIKO	kikötő	jel

23.	JKOM	templom	jel
24.	JMAG	torony	jel+szöveg
25.	JREP1	üzem	jel
26.	JREP2	benzinkút	jel
27.	JTEMP	autójavító	jel
28.	JTOR	üzem neve	jel
29.	JUZEM	keret	jel
30.	JUZEMA	kisvasút	jel
31.	JUZEMJ	kétvonalas patak	jel
32.	JUZEMN	egyvonalas patak, vastag	szöveg
33.	KERET	egyvonalas patak, vékony	zárt vonal
34.	KVAS	területmegírás	vonal
35.	PATAK1	tó partvonal	vonal
36.	PATAK2	tó kitöltés	vonal
37.	PATAK3	talajút	vonal
38.	TERN	javított talajút	szöveg
39.	TO	alsóbbrendű műút	vonal
40.	TOSZ	főútvonal	vonal
41.	UT1	főútvonal távolságadat (km)	vonal
42.	UT2	alsóbbrendű műút távolságadat	vonal
43.	UTAL	főút km-jel	vonal
44.	UTFO	alsóbbrendű műút km-jel	vonal
45.	UTKM1	autópálya parkoló	szöveg
46.	UTKM2	útszámozás	szöveg
47.	UTKMJ1	városhatár	jel
48.	UTKMJ2	város kitöltése	jel
49.	UTP	városnév	jel
50.	UTSZÁM	egyvágányú vasút	szöveg
51.	VAROS	kétvágányú vasút	zárt vonal
52.	VAROSB	villamosított egyvágányú vasút	szöveg
53.	VAROSN	városnév	szöveg
54.	VAS1	egyvágányú vasút	vonal
55.	VAS2	kétvágányú vasút	vonal
56.	VASV1	villamosított egyvágányú vasút	vonal

57.	VASV2	villamosított kétvágányú vasút	vonal
58.	VIZN1	PATAK1 megírás	szöveg
59.	VIZN2	FOLYO megírás	szöveg
60.	VIZNEV	PATAK2-3 megírás	szöveg
61.	VIZNF	vízvonal megírás	szöveg

3.4. A rétegek felépítése

Az egyes rétegeket azonos tartalmú térképi információkkal látták el, a rétegeket, mint különálló "síkfilmeket" tekinthetjük (2. számú ábra).



2. számú ábra
A rétegek elhelyezkedése

Az egyes rétegek egymástól függetlenül ki/be kapcsolhatók, így lehetséges a térképi információk szelektív megjelenítése.

3.5. Az adatbázis használata

Az adatbázis telepítése után az AutoCAD programban megszokott parancsok kiadásával az adatbázis a felhasználó részéről könnyen kezelhető. A parancsok kiadhatók a képernyő menüből, a legördülő menüből, vagy a parancsok parancssorba történő begépelésével.

Az adatbázis Magyarország területét összesen 32 db térképszelvényen tartalmazza, a szelvényfile-ok elnevezése annyiban tér el a katonai térképek szelvényezési rendszerétől, hogy az 1:200 000 méretarányú szelvényeken alkalmazott római számok helyett arab számok lettek feltüntetve, kötőjel nélkül, például L-34-IX helyett I349.

Az adatbázis a TÁTKFI jogvédelme alatt áll, használatára vonatkozóan figyelembe kell venni a MH Informatikai Szabályzata (Ált/210) az információk védelmére vonatkozó előírásait.

4. A DTA-200 adatbázis felhasználásának lehetőségei a főiskolai képzésben.

4.1. A Légítájékoztató tantárgy oktatásában.

- a digitális térkép szelektív megjelenítési lehetőségét kihasználva a megfelelő réteg(ek) kikapcsolásával feladatlapok, térképek elkészítése, amelyekről "hiányzik" pl. a vízrajz, településnevek, útvonalhálózat stb.;
- a hallgatók által a térképre szerkesztendő feladatok, egyezményes jelek a digitális térképre digitalizáló tábla, vagy az előre elkészített típus rajzfile kiválasztásával egyszerűen berajzolhatók;
- az oktató megfelelő vetítő eszközzel a szükséges térképszelvényt, vagy szelvényeket kivetítheti a foglalkozás során, így oktatási segédeszközként alkalmazható az egyes repülési feladatok előkészítésekor.

4.2. A Katonai tereptan tantárgy oktatásában

- a 2. Tárgykör oktatásában (a térképek fajtái...) a digitális térkép bemutatására;
- méretarányszámítási feladatok megoldására;
- távolságok mérésére egyenes és görbe vonal mentén;
- irányok meghatározására, irányszögek felszerkesztésére;

4.3. Egyéb alkalmazási lehetőségei

- a téma lehetőséget kínál a hallgatók számára az Országos Tudományos Diákköri Konferencia munkájába való bekapcsolódásra,
- erősítheti azon felsőoktatási intézményekkel való kapcsolatokat, amelyeknél a Térinformatika tantárgy oktatása már hagyományokkal rendelkezik (BME, DATE, EFE, ELTE, JATE, KÉE),
- segítséget jelenthet a parancsnokok (törzs) munkájában a szükséges tartalmú és méretarányú papír térképek előállításával,
- a digitális térkép egy változata a laktanya objektumainak, közműhálózati rendszereinek nyilvántartásával⁵ a katonai objektumok elhelyezési szolgálatainak nyújt megfelelő információt.

Befejezés

Megállapítható, hogy napjainkban a hagyományos úton előállított papír térképekre még hosszú távon is szükség lesz, jelenlétüket az államigazgatási, a gazdálkodási, honvédelmi és egyéb felhasználói területek nem nélkülözhetik.

Ugyanakkor korunk igényei olyan mennyiségű és minőségű információ kezelést követelnek meg, amelyet csak megfelelő számítógépes háttérrel rendelkező információs rendszerek képesek megoldani.

A földrajzi információk feldolgozására vonatkozóan jelenleg tehát egyfajta kettősség érvényes, a felhasználó feladata annak eldöntése, hogy az adott probléma megoldása érdekében melyik utat választja.

⁵ Jelenleg a Pannonterv Kft. a főiskola közmű rendszereinek digitalizálását végzi.

A cikk megírásával nem volt céлом a térinformatikai rendszerek mélyebb elemzése, mindössze egy konkrét adatbázis alkalmazásának lehetőségén keresztül gondolatokat ébreszteni a leendő felhasználók körében a főiskolai oktatás eredményesebbé tétele érdekében.

A téma külön aktualitását adja, hogy Szolnok város idén ősszel hatodik alkalommal ad otthont az Országos Térinformatikai Konferenciának, ahol a térinformatika hazai szakemberei, fejlesztői és felhasználói számolnak be eredményeikről, cserélik ki tapasztalataikat.

Felhasznált irodalom

- [1] - Bak Antal László: Térkép-digitális térkép, földrajzi információs rendszer. Térképész és Katonaföldrajzi Közlemények. 1994. 1.évf.1.szám. Magyar Hadtudományi Társaság Térképész és Katonaföldrajzi Szakosztálya. 7-9. old.
- [2] - Kollányi László-Prajczner Tamás: Térinformatika a gyakorlatban. GeoGroup Bt. Budapest. 1995.
- [3] - Dr. Remetey-Fülöpp Gábor: Az európai térinformatikai infrastruktúra fejlesztés stratégiája és üzenete. V. Országos Térinformatikai Konferencia jegyzőkönyve. A konferencia szervezőbizottsága. Szolnok. 1995. 37-39. old.
- [4] - A Magyar Honvédség szárazföldi haderőnemének harcszabályzata (Ált/211). A Honvédelmi Minisztérium kiadványa. Budapest. 1993.
- [5] - A DTA-200 műszaki adatai és részletes rétegekiosztása.

... ..
... ..
... ..

... ..
... ..
... ..

... ..

... ..	10
... ..	15
... ..	20
... ..	25
... ..	30
... ..	35

Kovács József mérnök százados
főiskolai adjunktus
Repülő Szakág Tanszék, oktató

ISMERETLEN JELLEMZŐK ÉRTÉKÉNEK BECSLÉSE
A LEGKISEBB NÉGYZETEK MÓDSZERÉVEL

A cikkben a szerző a matematikai statisztikából ismert becslés feladatát közvetett mérések esetére alkalmazza. A feladatot a legkisebb négyzetek módszerével oldja meg, determinisztikus és statisztikus megközelítésben. A determinisztikus megközelítés arra az esetre vonatkozik, amikor a mért és a meghatározni kívánt jellemzők közötti kapcsolat nem pontosan ismert, míg a statisztikus megközelítés a véletlen mérési hibákat és az egyes mérések eltérő mérési pontosságát veszi figyelembe.

Sok gyakorlati esetben van szükség ismeretlen jellemzők összességének meghatározására olyan mérések eredményei alapján, amelyek általában hibákat tartalmaznak. Az ismeretlen jellemzők így meghatározott közelítő értékeit becsült értéknek vagy becslésnek, a becslés meghatározásának folyamatát pedig becslési feladatnak nevezzük. A becslési feladat megoldása a mérési eredmények és adatok feldolgozásának egyik formája [1].

Legyen X_1, X_2, \dots, X_n - ismeretlen jellemzők összessége, amelyek becslésének meghatározására van szükség. Magukat a becsült értékeket jelöljük x_1, x_2, \dots, x_n . Műszaki feladatok megoldása során gyakran fordulnak elő közvetett mérések, amikor nem közvetlenül X_1, X_2, \dots, X_n értékeket, hanem azokkal valamilyen függvénykapcsolatban álló, y_1, y_2, \dots, y_k jellemzőket mérünk, vagyis:

$$\begin{aligned} y_1 &= f_1 (X_1, X_2, \dots, X_n), \\ y_2 &= f_2 (X_1, X_2, \dots, X_n), \\ &\cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ &\cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ &\cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ y_k &= f_k (X_1, X_2, \dots, X_n). \end{aligned} \tag{1}$$

A továbbiakban csak azt az esetet vizsgáljuk, amikor a mért jellemzők az ismeretlen jellemzőkkel lineáris függvénykapcsolatban vannak. Ekkor az (1) egyenlet a következő formában írható fel:

$$\begin{aligned} h_{11}X_1 + h_{12}X_2 + \dots + h_{1n}X_n &= y_1, \\ h_{21}X_1 + h_{22}X_2 + \dots + h_{2n}X_n &= y_2, \\ \cdot & \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \\ \cdot & \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \\ h_{k1}X_1 + h_{k2}X_2 + \dots + h_{kn}X_n &= y_k, \end{aligned} \quad (2)$$

ahol h_{ij} - ismert együtthatók.

A (2) kifejezéseket mint k lineáris algebrai egyenletből álló, n ismeretlenes egyenletrendszert vizsgálhatjuk, amelyben az ismeretlenek X_j , $j=1, n$ értékek lesznek. A továbbiakban azt az esetet vizsgáljuk, amikor $k > n$, vagyis az egyenletek száma meghaladja az ismeretlenek számát, és a rendszer matematikailag nem rendelkezik megoldással (ha létezne pontos, egyértelmű megoldás, akkor a becslésre nem lenne szükség, mert az ismeretlenek a méréssel pontosan meghatározhatók lennének). Az, hogy az egyenletrendszernek matematikailag nincs pontos megoldása, fizikailag a következő okokra vezethető vissza [1]:

- az X_j és y_i közötti fizikai kapcsolatokat csak közelítően írja le az egyenletrendszer (például a h_{ij} együtthatók nem pontosan ismertek),

- y_i , $i=1, k$ értékei hibákkal kerülnek meghatározásra.

Akkor az ismeretlen értékek becslésének feladatát vizsgálhatjuk úgy is, mint a (2) egyenletrendszer közelítő megoldásainak meghatározását feltételezve, hogy y_i , $i=1, k$ értékeit mérések sorozatával megállapítottuk. A közelítő megoldást tekinthetjük a becslési feladat megoldásának, tehát a becsült értékeknek.

Az összes lehetséges közelítő megoldás közül célszerű a va-

valamilyen értelemben legjobb megoldás kiválasztása. Ilyen megoldás megkeresésének egyik útja a legkisebb négyzetek módszerének alkalmazása (a módszer bemutatása a [2], [3] és [4] irodalmakban is megtalálható). A módszeren belül megkülönböztethetünk determinisztikus és statisztikus megközelítést. A determinisztikus megközelítést akkor alkalmazhatjuk, ha véletlen mérési hibák nincsenek, vagy az ilyen hibák statisztikai jellemzőit nem ismerjük. A statisztikus megközelítésnél a véletlen hibák statisztikai jellemzőit ismerteknek tételezzük fel. Az adatfeldolgozáshoz használt matematikai apparátus ebben az esetben lehetővé teszi a mérések eltérő pontosságának figyelembe vételét és a kapott eredmények pontosságának értékelését is [1].

A (2) egyenletrendszernek a legkisebb négyzetek módszerével meghatározott közelítő megoldásait jelöljük a fentieknek megfelelően x_1, x_2, \dots, x_n . Mivel ezek a megoldások közelítőek, így behelyettesítésük az eredeti egyenletbe nem eredményezi az egyenlőség teljesülését. X_j értékeinek x_j értékekkel való helyettesítése után ahhoz hogy az egyenlőségek valóban teljesüljenek az egyenletek bal oldalát ki kell egészíteni valamilyen $b_i, i=1, k$ értékekkel. Így az egyenletrendszerünk most:

$$\begin{aligned} h_{11}x_1 + h_{12}x_2 + \dots + h_{1n}x_n + b_1 &= y_1, \\ h_{21}x_1 + h_{22}x_2 + \dots + h_{2n}x_n + b_2 &= y_2, \\ \cdot & \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \\ \cdot & \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \\ h_{k1}x_1 + h_{k2}x_2 + \dots + h_{kn}x_n + b_k &= y_k. \end{aligned} \quad (3)$$

Vezessük be a megoldás minőségi jellemzőjét a b_i "egyeztetlenségi" érték skaláris függvényeként:

$$J = f(b_1, b_2, \dots, b_k).$$

A legkisebb négyzetek módszerében olyan négyzetes minőségi

jellemzőt használunk, amely a b értékek négyzetösszege (1):

$$J_1 = \sum_{i=1}^k b_i^2 = \sum_{i=1}^k \left[y_i - \sum_{j=1}^n h_{ij} x_j \right]^2. \quad (4)$$

Az eredeti egyenletrendszer optimális megoldása a legkisebb négyzetek módszerével olyan x_j , $j=1, n$ érték, amely biztosítja a J_1 minőségi jellemző minimális értékét, vagyis a (4) négyzetösszegek minimumát.

$$J_1 = \sum_{i=1}^k \left[y_i - \sum_{j=1}^n h_{ij} x_j \right]^2 = \min. \quad (5)$$

Ebből a kritériumból ered a módszer elnevezése is. Mivel a J_1 függvényt minimalizálni kell, így azt költségfüggvénynek is tekinthetjük [2], [3].

Mivel a minőségi jellemző az x_j , $j=1, n$ becsült értékek függvénye, így az (5) kritérium teljesülésének feltétele a következő egyenletrendszerrel írható le:

$$\delta J_1 / \delta x_j = 0, \quad j = \overline{1, n}. \quad (6)$$

Ezek az egyenletek szolgálnak alapul a keresett x_j becslések meghatározásához. A parciális deriváltakat kifejtve:

$$\frac{\delta J_1}{\delta x_j} = -2 \sum_{i=1}^k h_{ij} y_i + 2 \sum_{i=1}^k h_{ij} \sum_{j=1}^n h_{ij} x_j,$$

és $j = \overline{1, n}$ esetre sorban egyenlővé téve zérussal a következő egyenletrendszerhez jutunk:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^k h_{i1} \sum_{j=1}^n h_{ij} x_j &= \sum_{i=1}^k h_{i1} y_i \\ \sum_{i=1}^k h_{i2} \sum_{j=1}^n h_{ij} x_j &= \sum_{i=1}^k h_{i2} y_i \\ \cdot & \cdot \cdot \cdot \\ \cdot & \cdot \cdot \cdot \cdot \\ \sum_{i=1}^k h_{in} \sum_{j=1}^n h_{ij} x_j &= \sum_{i=1}^k h_{in} y_i \end{aligned} \quad (7)$$

A (7) egyenletrendszer n egyenletből áll és n ismeretlent tartalmaz. Bizonyítható, hogy a rendszer egyenleteinek együtthatóival felírt determináns nem zérus értékű, tehát a (6) egyenletrendszer x_1, x_2, \dots, x_n változókra egyetlen megoldást ad. Ez a megoldás egyidejűleg az eredeti (2) egyenletrendszer megoldása a legkisebb négyzetek módszerével, determinisztikus megközelítésben.

Legyen adott az ismeretlen $X_j, j=1, n$, és a mért $y_i, i=1, k$, értékek közötti összefüggés továbbra is a (2) egyenletrendszerrel, ahol $k \geq n$. Az előző esettől eltérően az egyenletrendszer most rendelkezzen zérustól eltérő értékű, pontos megoldással; de y_i értékeket hibákkal határozzuk meg, tehát a mérések eredményei nem y_i , hanem azoktól eltérő, de értékekben közeli jellemzők:

$$z_i = y_i + \nu_i, \quad i=1, k, \quad (8)$$

ahol ν - véletlen mérési hibák.

Mivel ν_i véletlen értékek, így z_i szintén véletlen értékű lesz.

Az elmondottak figyelembevételével a (2) egyenletrendszert most így írhatjuk fel:

$$\begin{aligned} h_{11}X_1 + h_{12}X_2 + \dots + h_{1n}X_n &= z_1, \\ h_{21}X_1 + h_{22}X_2 + \dots + h_{2n}X_n &= z_2, \\ \vdots & \\ h_{k1}X_1 + h_{k2}X_2 + \dots + h_{kn}X_n &= z_k. \end{aligned} \quad (9)$$

A (9) egyenletrendszerben $k \geq n$ és az egyenletrendszernek nincs pontos megoldása. Ha a z_i véletlen értékek statisztikai jellemzői nem ismertek, akkor a (9) egyenletrendszer megoldható z_i értékeire a legkisebb négyzetek módszerével determinisztikus megközelítésben is, a (7) egyenletek segítségével. Ha a statisztikai jellemzők ismertek, akkor a statisztikus megközelítést kell al-

kalkulálnunk. Ennek segítségével olyan pontosabb megoldást kapunk, amely figyelembe veszi a mérések eltérő pontosságát is [1].

Legyen a ν_i véletlen mérési hibák várható értéke zérus:

$$M[\nu_i] = 0, \quad i=1, k;$$

szórásnégyzetük pedig általános esetben eltérő:

$$D[\nu_i] = M[\nu_i^2] = \sigma_i^2, \quad i=1, k;$$

és legyenek a hibák egymástól függetlenek, vagyis:

$$M[\nu_i \nu_j] = 0, \quad \text{ha } i \neq j \text{ és } i, j=1, k.$$

Fogadjuk el továbbá, hogy a véletlen értékek normál eloszlásúak:

$$f_{\nu_i}(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_i} \exp\left(-\frac{\alpha^2}{2\sigma_i^2}\right), \quad i=1, k.$$

Ennek megfelelően a z_i véletlen értékekre is felírhatjuk:

$$\begin{aligned} M[z_i] &= M[y_i + \nu_i] = y_i, \\ D[z_i] &= D[\nu_i] = \sigma_i^2, \end{aligned} \quad (10)$$

$$f_{z_i}(\beta_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_i} \exp\left(-\frac{(\beta_i - y_i)^2}{2\sigma_i^2}\right).$$

Az x_j becslések meghatározásához a (2) egyenleteket felhasználva helyettesítsük az $f_{z_i}(\beta_i)$ kifejezésében y_i értékeket mint $\sum_{j=1}^n h_{ij} x_j$:

$$f_{z_i}(\beta_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_i} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_i^2} \left(\beta_i - \sum_{j=1}^n h_{ij} x_j\right)^2\right].$$

Legyen A_i véletlen esemény z_i véletlen értékeknek a β_i -től $\beta_i + d\beta_i$ -ig terjedő intervallumba esése, amelynek valószínűsége:

$$P[A_i] = P[\beta_i \leq z_i \leq \beta_i + d\beta_i] = f_{z_i}(\beta_i) d\beta_i.$$

Legyen továbbá A véletlen esemény valamennyi z_i , $i=1, k$ értékeknek a megfelelő $\beta_i \div (\beta_i + d\beta_i)$ intervallumba esése, vagyis

$A = A_1 A_2 \dots A_k$. Az elfogadott kikötések értelmében z_i véletlen értékek egymástól függetlenek, ezért A_i események szintén egymástól függetlenek lesznek. Akkor:

$$\begin{aligned} P[A] &= P[A_1] P[A_2] \dots P[A_k] = \\ &= f_{z_1}(\beta_1) f_{z_2}(\beta_2) \dots f_{z_k}(\beta_k) d\beta_1 d\beta_2 \dots d\beta_k = \\ &= f_{z_1, z_2, \dots, z_k}(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k) d\beta_1 d\beta_2 \dots d\beta_k, \end{aligned} \quad (11)$$

ahol

$$f_{z_1, z_2, \dots, z_k} = (2\pi)^{-k/2} \prod_{i=1}^k \sigma_i^{-1} \exp \left[-\sum_{i=1}^k \frac{1}{2\sigma_i^2} \left(\beta_i - \sum_{j=1}^n h_{ij} X_j \right)^2 \right]$$

Ha $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ értékeit rögzítjük, akkor f_{z_1, z_2, \dots, z_k} függvény $L(X_1, X_2, \dots, X_n; \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k)$ likelihood-függvénné válik, ami lehetővé teszi x_1, x_2, \dots, x_n becslések meghatározásában a maximum-likelihood-módszer alkalmazását [2], [3].

Végezzünk véletlen próbát, amely kimeneteleinek valószínűsége nem ismert. A próbák során a nagyobb valószínűségű eredmények gyakrabban fognak előfordulni mint azok, amelyek kisebb valószínűséggel rendelkeznek, ezért az eredmény valószínűségének értékelésekor egyszeri próba esetén a bekövetkező eredmény "a priori" valószínűségét maximálisnak lehet venni.

A maximum-likelihood-módszert a vizsgált feladatra alkalmazva, tegyük fel, hogy $P[A] = \max$, vagyis A esemény valószínűsége maximális. A (11) kifejezésből látszik, hogy ez a követelmény akkor teljesül, ha $X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n$, amely esetben biztosítva van a likelihood-függvény maximuma:

$$L(X_1, X_2, \dots, X_n; \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k) = \text{const} \exp \left[-\sum_{i=1}^k \frac{1}{\sigma_i^2} \left(\beta_i - \sum_{j=1}^n h_{ij} X_j \right)^2 \right] \quad (12)$$

A felírt kifejezésből következik, hogy a likelihood-függvény maximuma a hatványkitevőben álló kifejezés abszolút értékének minimuma esetén következik be. Ebből írhatjuk fel a (9) egyenletrendszer x_1, x_2, \dots, x_n megoldásainak optimumkritériumát a következő alakban:

$$J_2 = \sum_{i=1}^k \frac{1}{\sigma_i^2} \left(z_i - \sum_{j=1}^n h_{ij} x_j \right)^2 = \min. \quad (13)$$

A kritériumból következő egyenletrendszerünk ekkor:

$$\frac{\delta J_2(x_j)}{\delta x_j} = 0, \quad j=1, n \quad (14)$$

6. A parciális deriváltakat meghatározva:

$$\frac{\partial J_2(x_j)}{\partial (x_j)} = -2 \sum_{i=1}^k \frac{1}{\sigma_i^2} h_{ij} z_i + 2 \sum_{i=1}^k \frac{1}{\sigma_i^2} h_{ij} \sum_{j=1}^n h_{ij} x_j.$$

Ezt a kifejezést $j=1, 2, \dots, n$ értékekre sorban egyenlővé téve zérussal a következő egyenletrendszert írhatjuk fel:

$$\sum_{i=1}^k \frac{1}{\sigma_i^2} h_{ij} \sum_{j=1}^n h_{ij} x_j = \sum_{i=1}^k \frac{1}{\sigma_i^2} h_{ij} z_i; \quad j=1, n. \quad (15)$$

A (15) egyenletrendszer megoldása egyidejűleg a vizsgált (9) rendszernek a legkisebb négyzetek módszerével meghatározott megoldása is.

A (13), (5) optimumkritériumokat és a (15), (7) egyenleteket összehasonlítva látjuk, hogy statisztikus megközelítésnél az y_i értékek mérési pontosságát a mérési hibák σ_i^2 szórásnégyzetével vesszük figyelembe. Azonos pontosságú méréseknél $\sigma_i = \sigma$ és a (13), (15) egyenletek megegyeznek az (5), (7) egyenletekkel. A (15) egyenleteket értelmezhetjük lineáris kapcsolatok rendszereként a z_1, z_2, \dots, z_k mért értékek és az X_1, X_2, \dots, X_n jellemzők között.

Mivel $z_i, i=1, k$ véletlen értékek, így az $x_j, j=1, n$ becslések is véletlen jellemzők lesznek. A becslések statisztikai jellemzői a következők [1]:

- az x_j becslések torzítatlanok az ismeretlen X_j értékekhez képest, vagyis

$$M[x_j] = X_j, \quad j=1, n;$$

- a becslések hibáinak szórásnégyzete minimális. A becslés hibája alatt itt az $x_j - X_j, j=1, n$ különbséget értjük;

- ha a mérési hibák normál eloszlásúak, akkor a becslések is normál eloszlásúak lesznek.

Gyakran nem a fő X_1, X_2, \dots, X_n jellemzőket, hanem azok lineáris függvényét kell becsülnünk:

$$S = a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_n X_n. \quad (16)$$

Ezt a függvényt lineáris alaknak, S értékének becslését pedig a fő paraméter lineáris alakja becslésének hívjuk. Az S jellemző optimális becslése ebben az esetben:

$$s = a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n,$$

ahol $x_1, x_2, \dots, x_n = X_1, X_2, \dots, X_n$ értékeknek a legkisebb négyzetek módszerével meghatározott optimális becslései. Az s becslés optimalitása abban áll, hogy az torzítatlan, hibája pedig minimális szórásnégyzettel rendelkezik, vagyis:

$$M [s] = S, D [s - S] = \min.$$

Felhasznált irodalom

- [1] - V. G. Taraszov: Obrabotka informacii v avtomatyizirovannih szisztyemah upravlenyija (VVIA im. prof. N.E. Zsukovszkogo, Moszkva, 1974).
- [2] - Granino A.Korn-Theresa M.Korn: Matematikai kézikönyv műszakiaknak (Műszaki Könyvkiadó, Bp., 1975).
- [3] - I.N. Bronstejn-K.A. Szemengyajev: Matematikai zsebkönyv (Műszaki Könyvkiadó, Bp., 1987).
- [4] - Edwin F. Beckenbach: Modern matematika mérnököknek II. kötet (Műszaki Könyvkiadó, Bp., 1965).

Das ist die erste Seite des Dokuments. Es enthält die
Angaben zu den verschiedenen Punkten des Dokuments.

Die ersten drei Punkte sind die wichtigsten Punkte
des Dokuments. Sie sind die Punkte, die die
Angaben zu den verschiedenen Punkten des Dokuments
enthalten.

Die folgenden Punkte sind die weiteren Punkte
des Dokuments. Sie sind die Punkte, die die
Angaben zu den verschiedenen Punkten des Dokuments
enthalten.

Körmendi Géza	Dr. Szabó László
főiskolai adjunktus	főiskolai docens
Repülő Sárkány-Hajtómű Tanszék	
tanszékvezető helyettes	szakcsoportvezető

Helikopter hajtóművek automatikus szabályozó rendszerrel

A helikoptereket üzemeltető szakemberek körében sokszor vita tárgya, hogy a helikopter hajtóművek különböző üzemmódjain ml tekintünk szabályozott jellemzőnek, valamint az, hogy ezt, milyen szabályozó szervekkel tartják meghatározott értéken. Cikkünk ezen kérdés tisztázására igyekszik eligazítást adni.

A világon a legelterjedtebb konstrukciós megoldás az, amikor a helikopterre két hajtóművet építenek be, amelyek biztosítják a forgószármeghajtásához szükséges teljesítményt egy közös reduktoron keresztül.

A helikopter hajtóművek általában 2 -3 forgórészesek, *szabadturbinával* (nevezik *munkaturbinának* is) felszereltek, amely transzmisszió keresztül hajtja meg a forgószármeghajtást. A szabadturbina (munkaturbina) semmi féle mechanikus kapcsolatban nincs a kompresszort hajtó turbinával (ezentúl: *kompresszorturbina*), a kapcsolat közöttük csak gázdinamikai.

A helikopter hajtóművek kompresszorai viszonylag nagy sűrítési viszonytal, igen fejlett mechanizációval készülnek és saját meghajtó turbinával rendelkeznek (kompresszorturbina). Gázsugár fokozó (GSF) helyett gázkivezető csövet alkalmaznak, amely biztosítja a szabadturbinát elhagyó gáz stabil expanzióját.

Amiatt, hogy az alapvető üzemmódokon a szabadturbina első fokozat állóterelő lapátkoszorújában (ÁTLK) az expanzióviszony kritikushoz közeli, a szabadturbina fordulatszám változása gyakorlatilag nem gyakorol hatást a turbókompresszor üzemmódjára.

A közös és a ciklikus beállítási szög változtatása kizárólag a helikopter kormányzását szolgálja a helikoptervezető vagy a robotpilóta parancsai alapján. (Megjegyzés: A pilóta utasításai egyidejűleg a hajtóművek vezérlését is szolgálhatják.)

A hajtómű szabályozási rendszerében a forgószárny lapátok beállítási szöge -ellentétben a légcsavaros hajtóműveknél alkalmazott megoldással- beavatkozó jellemzőként *nem* kerül alkalmazásra. Így a helikopter hajtómű szabályozó rendszerében egyetlen beavatkozó jellemző lehetséges csak; ez az égőtérbe beadagolt tüzelőanyag mennyiség (\dot{m}_t). Ennek megfelelően a szabályozási program megalkotásakor egyetlen szabályozott jellemző lehetséges csak, amely meghatározza a hajtómű üzemmódját.

Szabályozott jellemzőként (a hajtómű üzemmódjától függően) vagy a *szabadturbina-* (és természetesen vele arányos forgószárny fordulát), vagy a *turbókompresszor fordulatszámát* választják.

Megjegyzés: A *turbókompresszor fordulatszáma helyett választható a kompresszor sűrítési viszonya is* (π_k^*).

Az utazó és névleges üzemmódokon (amelyek a hajtómű *alapvető üzemmódjai*) *szabályozott jellemzőül* - a zárt hatásláncú szabályozórendszer ellenőrzése alatt álló- *szabadturbina fordulatszámát* választják, amelyre \dot{m}_t értékének változtatásával gyakorolnak hatást. Ekkor a n_{SZT} automatikus szabályozó rendszere a teljes magassági (H) és sebességi (V) tartományokon biztosítja a szabadturbina fordulatszámának állandó értéken tartását, és így teljesül:

$$n_{SZT} = n_{SZT p} = \text{const.}$$

Ahol:

- n_{SZT} -szabadturbina (valós) fordulatszáma \Rightarrow ellenőrzött jel,
 $n_{SZT p}$ -szabadturbina parancsolt fordulatszáma \Rightarrow alapjel.

A helikopter forgószárny fordulatszám állandósítása az alábbiak miatt célszerű:

- Lehetővé teszi a forgószárny aerodinamikai jellemzőinek optimális értéken tartását;
- A lapátok geometriai formája nem változik az állandó centrifugális erő miatt;

- Célszerű a forgószárnyra és a transzmisszióra ható terhelések korlátozása végett;
- Egyszerűvé válik a helikopter kormányzása és a hajtómű vezérlése is.

A helikoptervezető vagy a botkormányal, vagy a egyesített vezérlőkarral (EVK) hidraulikus erősítőn (és rendszeren) keresztül változtathatja a lapátok beállítási szögét, ezzel a forgószárny terhelését is. A zárt n_{SZT} szabályozó rendszer az $n_{SZT} = \text{const.}$ program miatt hatást gyakorol m_t -re. Így realizálódik az egyidejű repülés irányítás és a hajtómű belső folyamatának irányítása.

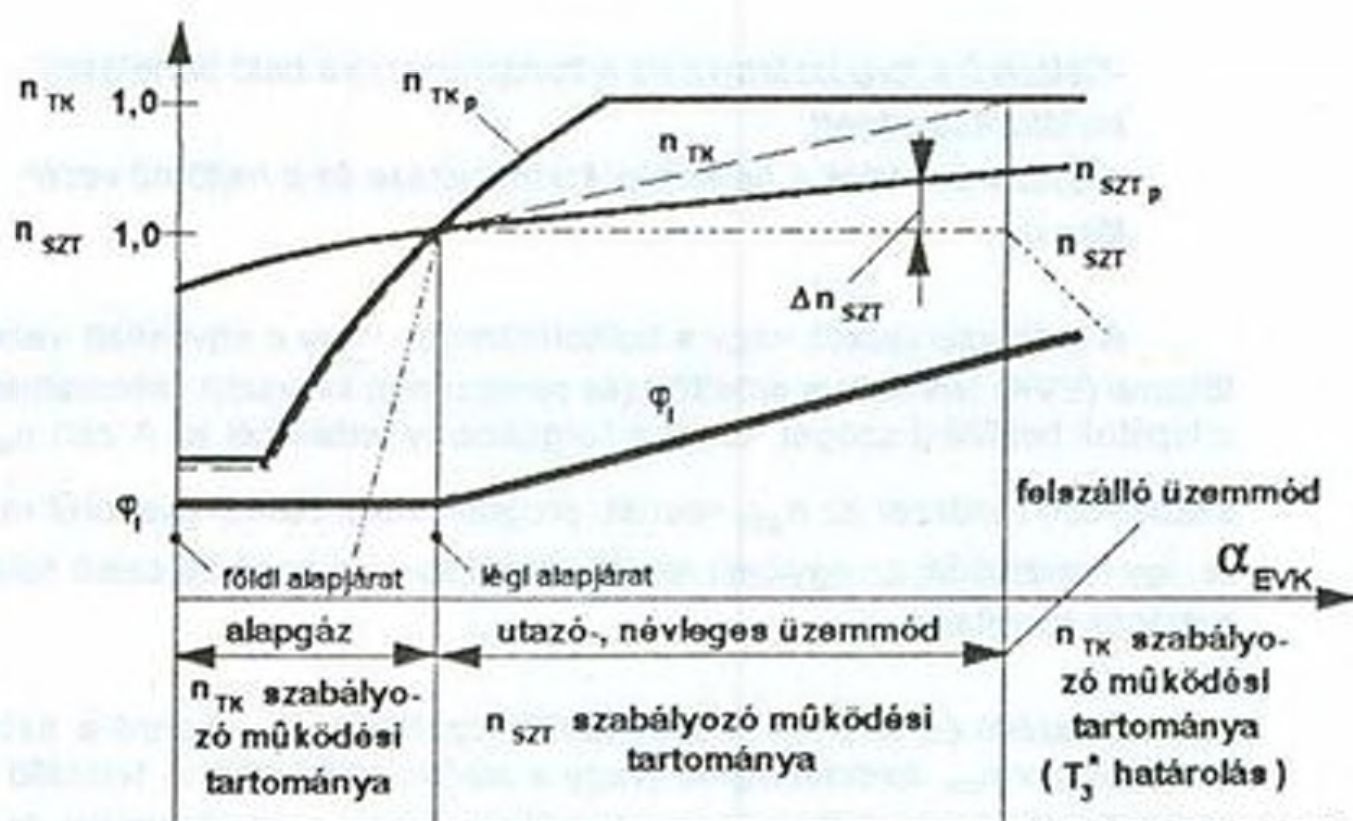
Felszálló és alapgáz üzemmódokon szabályozott jellemző a turbókompresszor n_{TK} fordulatszáma (vagy a sűrítési viszonya). A felszálló üzemmódon n_{TK} szabályozása, a turbókompresszor gázdinamikai és a hőterheléseinek korlátozása miatt célszerű. Gyakran a felszálló üzemmódon a nem szabályozott paraméterek határolása is történik.

Alapgázon azért célszerű a n_{TK} szabályozása, mert így biztosítható a stabil égés az égőtérben, és ez által tartható fent az előírt forgószárnyra átadódó teljesítmény.

Az 1. ábra mutatja be azokat a függvényeket, amelyek az egyes hajtómű üzemmódokon egyértelműen mutatják az egyes szabályozott jellemzők prioritását.

Az ábra jelölései:

n_{SZT}	-szabadturbina (valós) fordulatszáma \Rightarrow ellenőrzött jel,
n_{SZTp}	-szabadturbina parancsolt fordulatszáma \Rightarrow alapjel,
n_{TK}	-turbókompresszor (valós) fordulatszáma \Rightarrow ellenőrzött jel,
n_{TKp}	-turbókompresszor parancsolt fordulatszáma \Rightarrow alapjel,
φ_l	-forgószárny lapát beállítási szög,
T_3	-Kompresszorturbina előtti gázhőmérséklet,
α_{EVK}	-EVK helyzete (beállítási szöge).



1. ábra

A beavatkozó jellemzők korlátozott száma teszi szükségessé egy sor hajtómű-paraméter korlátozását;

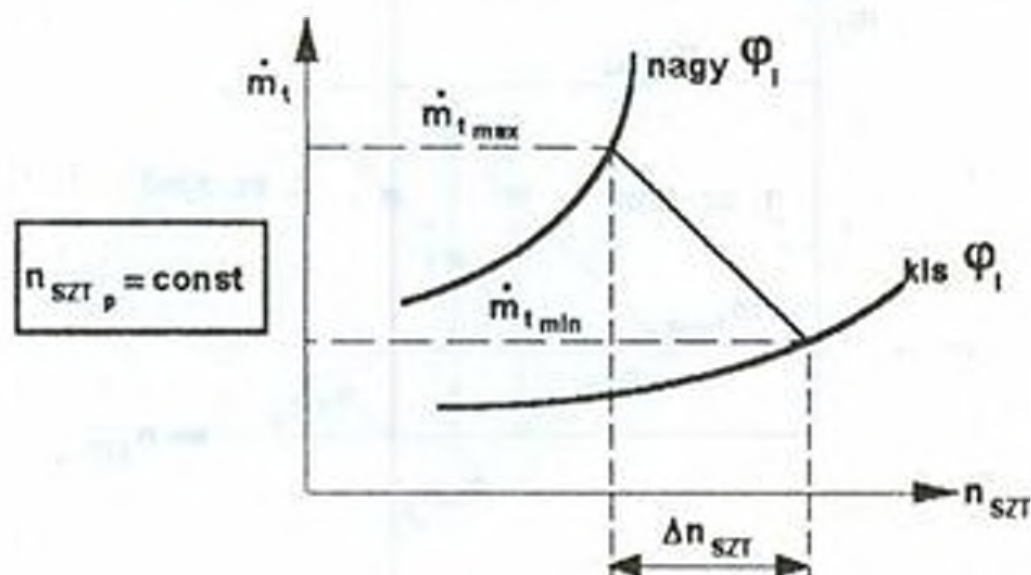
Például: $T_{3\max}$; $n_{TK\text{átsz.max.}}$; $P_{fsz\max}$; $\pi_{k\max}^*$, azaz a kompresszorturbina előtti gázhőmérséklet-, átszámított fordulatszám-, forgószámy teljesítmény-, kompresszor sűrítési viszonyának maximális értéke. A korlátozások szintén az m_t -ra gyakorolt hatással valósulnak meg.

Kéthajtóműves helikoptereknél szükséges a hajtóművek (teljesítményének) üzemmódjának szinkronizálása is (ezt ún. "n_{SZT} szinkronizátor" valósítja meg), amit az azonos leterhelés elérése tesz szükségessé. A szinkronizátor biztosítja az üzemi idő azonos ütemű ledolgozását, valamint a transzmisszió elemein az egyenletes terhelés eloszlást. Bármely határoló működésekor az üzemmód szinkronizátor az m_t -re hatva egyidejűleg blokkolja az n_{SZT} szabályozót.

Helikopter hajtóműveknél nagy figyelmet fordítanak a jó gyorsuló képességre, ami feltétele a biztonságos repülésnek, valamint a magasság szerinti jó kormányozhatóságnak.

Magas követelményeket támasztanak a szabályozó rendszer dinamikai tulajdonságaival szemben (különösen az n_{SZT} esetére), ami lényegében meghatározza a helikopter repülési üzemmódját. Lengéses folyamatok megjelenése a szabályozó rendszerben nem kívánatos, mert az a forgószárny fordulatszámának lengését, és így a forgószárny felhajtóerő periodikus változását eredményezi. (Megjegyzés: Például az n_{SZT} 1% -os változása a felhajtóerő 2% -os változását vonja maga után.)

A szabályozó rendszer dinamikai tulajdonságai javításának egyik módja az n_{SZT} szabályozó statikussá tétele jelentős nagyságú statikus hibával. A hiba nagysága elérheti $\Delta n_{SZT} = 3 - 6 \%$ -ot (2. ábra).



2. ábra

A statikus hibával bíró n_{SZT} szabályozó hasznos abból a szempontból is, hogy így biztosítható két hajtómű alkalmazása egy reduktor meghajtására.

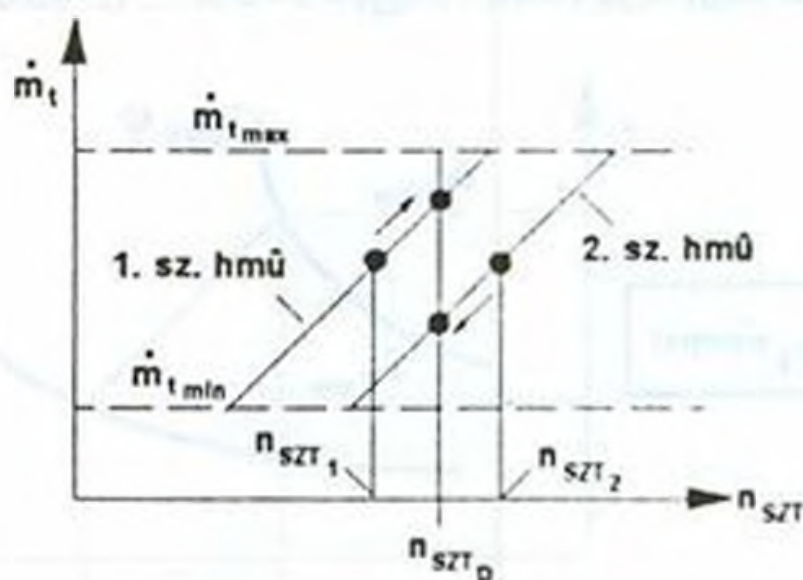
Megjegyzés: A statikus n_{SZT} szabályozóval nem lehetséges egy reduktor meghajtása két hajtóműről.

A két hajtómű szabadturbinája a reduktoron keresztül kinematikai kapcsolatban van egymással, így $n_{SZT_1} = n_{SZT_2}$. A statikus szabályozónál,

illetve szabályozásnál a parancsolt (alapérték) és a valós (ellenőrzött érték) n_{SZT} fordulatszámnak pontosan meg kell egyeznie, azaz: $n_{SZT} = n_{SZT p}$.

Ha a két hajtóműnél kismértékű beállítási eltérés van ($n_{SZT p_1} \neq n_{SZT p_2}$), úgy a két szabad turbina fordulatszám stabilizálása gyakorlatilag nem oldható meg. Ebben az esetben az astatikus szabályozók az egyik hajtóművet a maximális, a másikat pedig a minimális teljesítményre szabályozzák be.

A statikus hibával rendelkező n_{SZT} szabályozók alkalmazása lehetővé teszi az n_{SZT_1} és n_{SZT_2} állandó értéken tartását a tüzelőanyag fogyasztások közötti különbség miatt (3. ábra).



3. ábra

A statikai jelleggörbék lefutásából következik, hogy a statikai hiba növelése célszerű a tüzelőanyag fogyasztások kiegyenlítése és a hajtóművek üzemmódjának szinkronizálása szempontjából is.

A helikopter hajtóműveknek ún. "rendkívüli üzemmódon" is megfelelő működési idővel kell bírnia, ami tulajdonképpen egyhajtóműves repülést jelent. Ezt azt jelenti, hogy a helikopterek repülőképesnek kell maradnia az egyik hajtómű leállása esetén is.

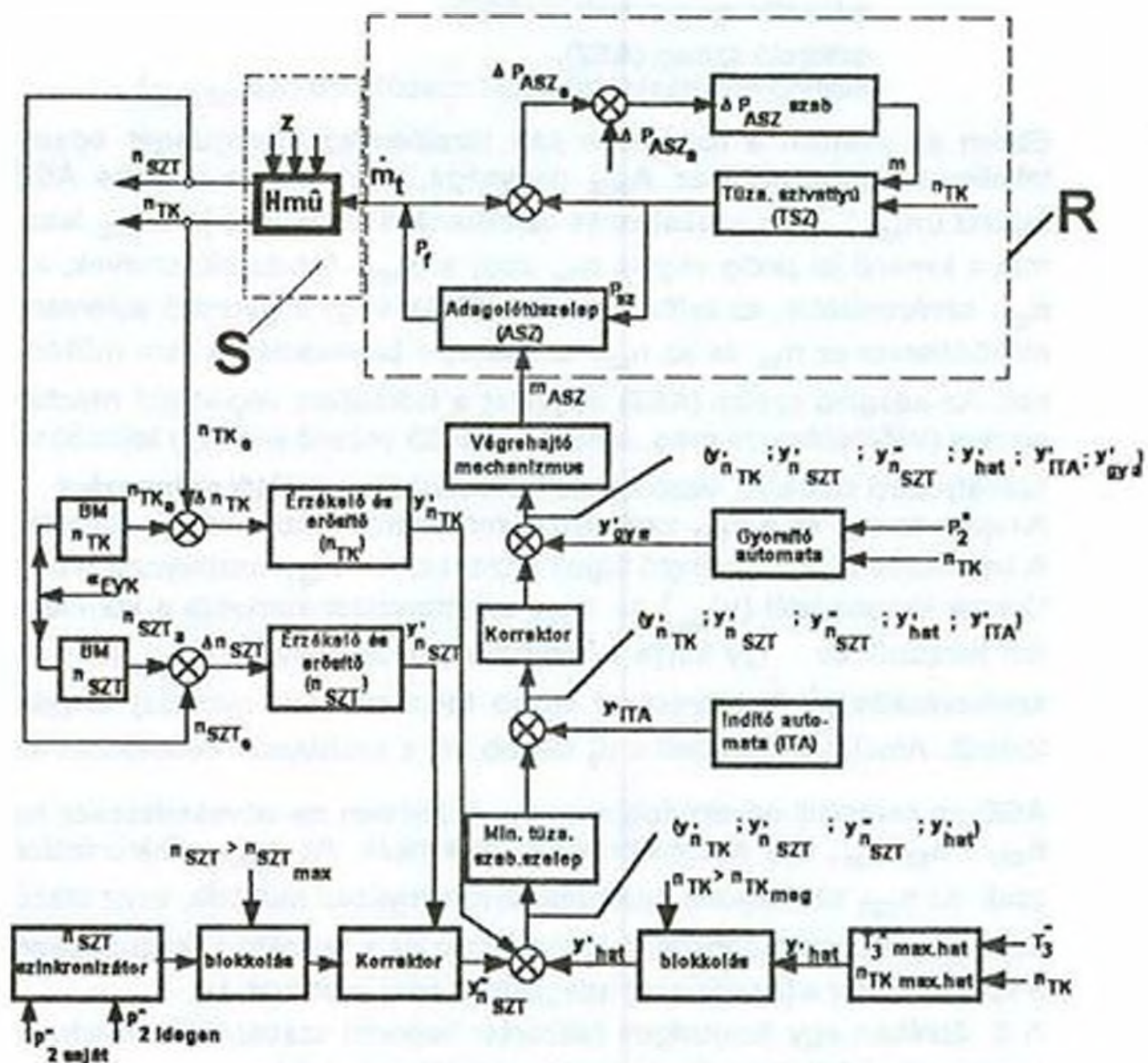
A 4. ábra egy lehetséges, helikopter hajtómű szabályozó rendszer hatásvázlatát szemlélteti. A rajzon egy egységben látható a hajtómű és a

tüzelőanyagellátó rendszer, amelyek együtt képezik -a szabályozott szakasz (S) és a (fő) szabályozó (R) egységgel- a szabályozás objektumát. Ebbe tartozik;

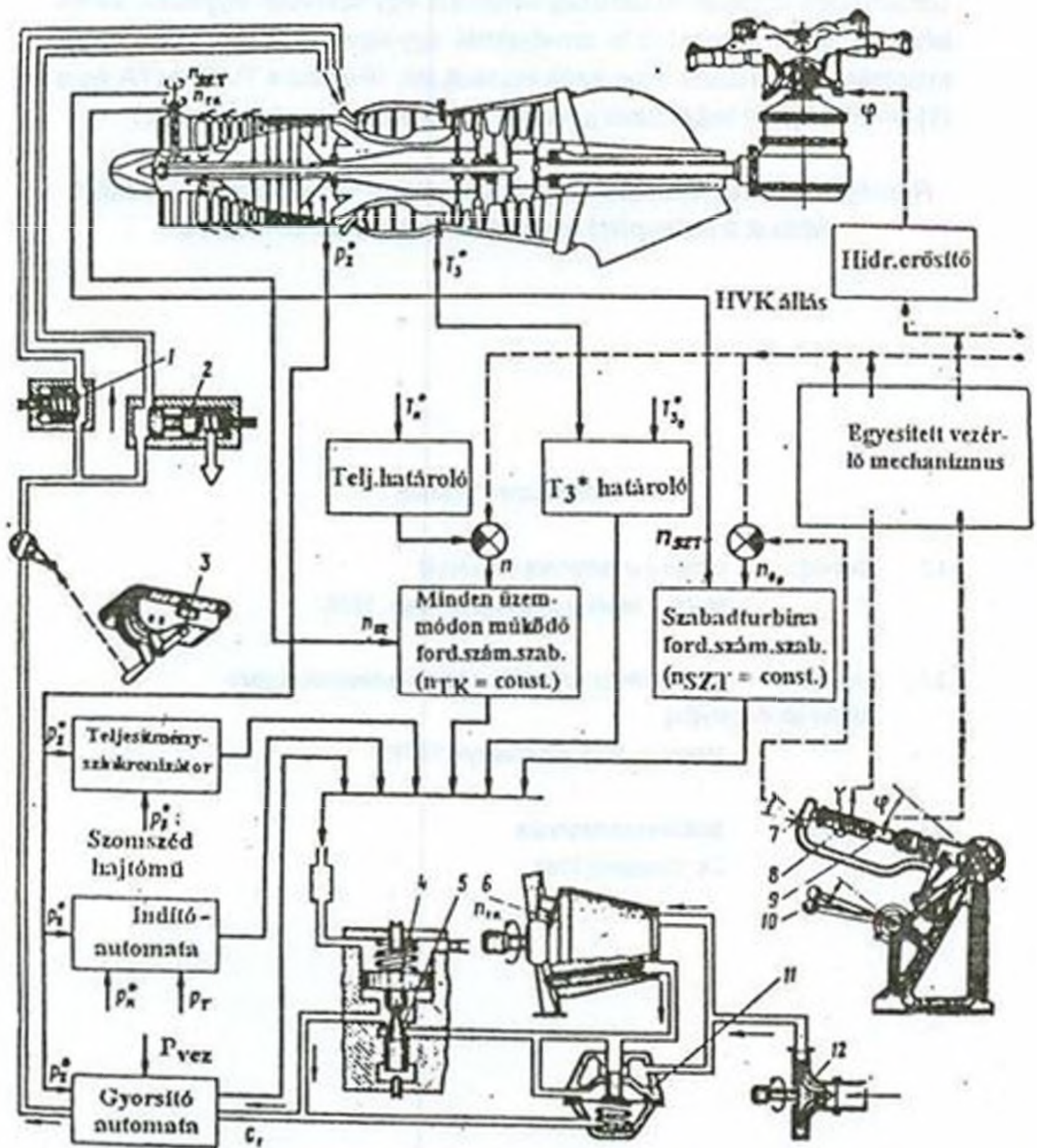
- a hajtómű (HmŰ),
- a tüzelőanyag szivattyú (TSZ),
- adagoló szelep (ASZ),
- állandó nyomáskülönbséget szabályozó ($\Delta p_{ASZ\ szab}$).

Ebben az esetben a hajtóműbe jutó tüzelőanyag mennyiségét egyértelműen meghatározza az A_{ASZ} nagysága, vagy a vele arányos ASZ helyzet (m_{ASZ}). Így a szabályozás objektumánál a bemenő jel m_{ASZ} lesz, míg a kimenő jel pedig vagy a n_{TK} vagy a n_{SZT} . A határoló szervek, az n_{SZT} szinkronizátor, az indító automata (ITA), vagy a gyorsító automata működésekor az n_{TK} és az n_{SZT} szabályozó berendezések nem működnek. Az adagoló szelep (ASZ) helyzetét a hidraulikus végrehajtó mechanizmus (VM) határozza meg, amelynek eredő vezérlő jele (y_1') különböző szabályozási körökből, vezérlési és határolási egységektől származhat. A rajzon az n_{TK} és a n_{SZT} szabályozó rendszerek főbb elemei is láthatók. A korrekciós és a végrehajtó tagok közösek. Az n_{SZT} szabályozó erősítőjének kimenő jelét ($y'_{n_{SZT}}$) az n_{SZT} szinkronizátor korigálja a korrekcion keresztül és így kapja a rendszer a már korigált $y''_{n_{SZT}}$ jelet. A szinkronizálás p_2^* (kompresszor utolsó fokozata utáni nyomás) alapján történik. Amelyik hajtóműnél a p_2^* kisebb, ott a szabályozó berendezés az ASZ -en keresztül növelni fogja az m_t -t. Hirtelen m_t növekedésekor ha $n_{SZT} > n_{SZT\ max}$, úgy a szinkronizátort blokkolják. Az n_{SZT} szinkronizátor csak az n_{SZT} szabályozó működési tartományában működik, azaz utazó és névleges üzemmódokon, míg a alapgáz és a felszálló üzemmódokon a szinkronizátor a tüzelőanyag adagolásba nem avatkozik be. A 5. ábrában egy lehetséges helikopter hajtómű szabályozási rendszer szerkezeti vázlattal kiegészített hatásvázlatát mutatjuk be.

(Számokkal jelzett szervek: 1, 2: nyomástbővítő- és elzárószelep, 3: gyorsleállító csap a karral, 4, 5: szervodugattyú az adagoló tőszelleppel, 6: tüzelőanyag szivattyú, 7, 8, 9: EVK és rendszerrel, 10: OVK (osztott vezérlőkar), 11: állandó nyomáskülönbséget szabályozó, 12: tüzelőanyag beszállító szivattyú.)



4. ábra



5. ábra

A 4. és az 5. ábrán bemutatott rendszer csak egy megoldást mutat be a gyakorlatban üzemelő változatok közül. Természetesen vannak olyan konstrukciók amelyeknél több tag funkcióját egy szervben egyesítik, illetve lehetnek olyan változatok is amelyeknél egy-egy tag illetve szerv alkalmazását nem tartották a tervezők indokoltnak. (Például a TV 2 -117A és a GTD - 350 típusú hajtóműnél gyorsító automatát nem alkalmaznak.)

Reméljük ezzel a cikkel sikerült a bevezetőben leírt kérdésre eligazítást adnunk a helikoptert üzemeltető szakemberek részére.

A felhasznált irodalom

- 1/ Gaevkij: Osznovi aviaclonnoj avtomatiki
M VVA. Imeni N.E. Zsukovszkogo. 1976.
- 2/ Horonyin: Konsztrukcija i proektyirovannie aviaclonnüh gezo-
turbinnüh dvigatelyej
Moszkva, Masinosztroenyle 1989.
- 3/ Kurucz: Szabályozástechnika
Tk. Budapest 1981.

Horváth Dezső
főiskolai docens

Repülő Szakág Tanszék, Műszertechnikai szakcsoportvezető

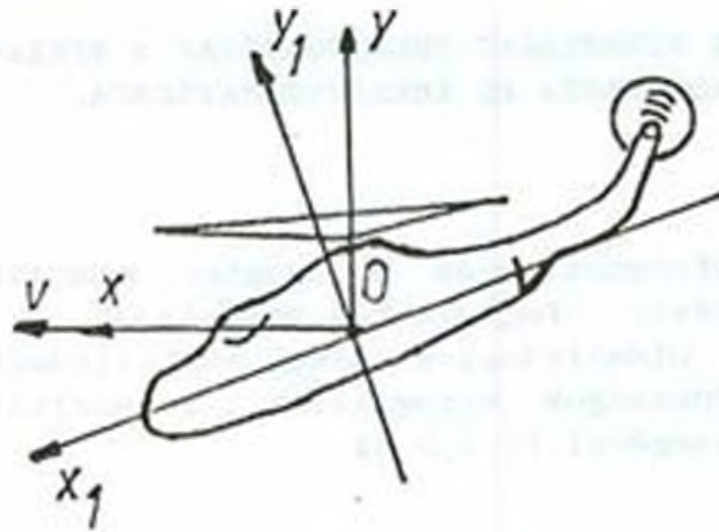
A HELIKOPTER DINAMIAIKAI TULAJDONSÁGAI. A HELIKOPTER
STABILITÁSA ÉS KORMÁNYOZHATÓSÁGA.

A cikk az egyforgószárnyas helikopter stabilitásával és kormányozhatóságával foglalkozik. Vizsgálja a helikopter hosszirányú és oldalirányú statikus stabilitását. Elvégzi a dinamikai tulajdonságok vizsgálatát a linearizált mozgásegyenletek segítségével. [1,2,3,4]

Bevezetés

A helikopterek repülési jellemzőinek és dinamikai tulajdonságainak sajátosságai a forgószárny¹ alkalmazásával függenek össze. A helikopter repülési tulajdonság elemzéseinél ugyanazok a koordináta rendszerek használatosak, mint a repülőgépeknél. A sebességi és a pálya szerinti koordináta rendszert alkalmazzák, a tömegközéppont mozgásának elemzésénél. A kapcsolt koordináta rendszert, a helikopter mozgásának (nyomatékok hatására bekövetkező tömegközépponthez viszonyított forgását figyelembevevő) elemzésekor. A sebességi és kapcsolt koordináta rendszerek kölcsönös helyzete a 1. ábrán látható.

¹A forgószárny egy olyan rendszer, ami létrehozza a repülés különböző üzemmódon történő végrehajtásához szükséges felhajtóerőt.



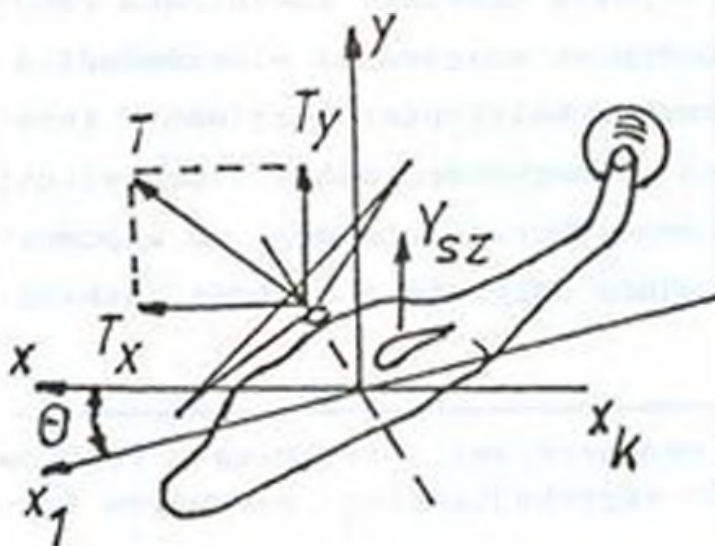
1. ábra

A helikopterre ható erők.

A helikopterre ható erők a 2. ábrán láthatók. A ható

erők [1,2,3,4]:

- a helikopter részei által létrehozott homlokellenállás erő (X_k) (kizárva a forgószárnyat);



2. ábra

- a forgószárny teljes aerodinamikai ereje (T) - T_x és T_y vetületei az Ox és Oy tengelyekre. (T_x - propulziós erő, T_y - fel-

tei az Ox és Oy tengelyekre. (T_x - propulziós erő, T_y - fel-

hajtóerő);

- szárny felhajtóereje (Y_{sz});
- súlyerő (G).

A helikopter mozgásegyenletei.

A helikopter mozgásegyenletei a függőleges síkban [1,2,3]:

$$m \frac{dv}{dt} = T_x - X_k - G \sin \theta \quad (1)$$

$$mv \frac{d\theta}{dt} = T_y + Y_{sz} - G \cos \theta \quad (2)$$

A következő dinamikai egyenletek pedig lehetővé teszik a magasságváltozás és a megtett út meghatározását a földi koordináta rendszerhez viszonyítva:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{dH}{dt} = v \sin \theta \quad (3)$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{dL}{dt} = v \cos \theta \quad (4)$$

A (3),(4) egyenleteket használják a helikopter függőleges síkban történő manőverezésének számításához.

Stabilitás.

Dinamikai stabilitás. [1,2,3,4,5]

A helikopter viselkedésének a vizsgálata - a zavarás hatása után a helikopter megzavart mozgása során keletkező valamennyi erő és nyomaték figyelembevételével - az idő szerint lehetővé teszi a helikopter törekvésének kimutatását

a kiinduló kiegyensúlyozott helyzet megőrzésére, valamint a mozgás jellegének meghatározását.

Ha a vizsgált helikopter, amely lengéseket végez a kiindulási egyensúlyi helyzethez viszonyítva, a továbbiakban mind jobban és jobban eltér egyensúlyi helyzetétől, növelve például szögsebességét, akkor ez a helikopter dinamikus instabil.

Statikus stabilitás. [1, 2, 3, 4, 5]

A statikus stabilitás a kiinduló helyzethez történő visszatérésre való törekvést vizsgálja, a megzavart mozgás jellegének vizsgálata nélkül. Ezt a stabilitást azért nevezük statikusnak, mert ez csupán a helikopter azon hajlamát veszi figyelembe, hogy visszatérjen a kiindulási üzemre, de nem veszi figyelembe a helikopterre a tehetetlenségi erők és nyomatékok hatását és a helikopter további mozgásának jellegét.

A helikopter stabilitása alatt azon tulajdonságokat értjük, hogy képes önállóan, a helikoptervezető beavatkozása nélkül visszatérni a kiindulási repülési üzemre a zavarás hatásának megszűnte után. Egyezményesen a helikopter stabilitását statikus és dinamikus stabilitásra bontjuk fel.

A helikopter repülését az egyensúly folyamatos megbomlása kíséri, ami mozgása jellegének megváltozását idézi elő. Repülés közben a helikopterre kiegyensúlyozatlan erők és nyomatékok gyakorolnak hatást, amiket összefoglalva zavarásnak nevezünk.

Kormányozhatóság. [1, 2, 3, 4]

Kormányozhatóságnak nevezzük azt a tulajdonságot, hogy a helikopter a vezető akarata szerint megváltoztatja a repülési üzemét és a levegőben elfoglalt helyzetét. A helikopter kormányzása jelenti a megbomlott egyensúly helyreállítását.

sát, vagy annak éppen megbontását, más repülési üzemre való áttérésnél. A kormányozhatóság három nemét különböztetjük meg: hosszanti-, kereszt- és útirányú kormányozhatóságot.

A hosszanti és keresztirányú kormányzás a botkormánnyal történik, amelynek segítségével a helikoptervezetőnek lehetősége van a forgószárny vonóerő döntésének megváltoztatására. A botkormányt hasra húzva, vagy előre tolva, a helikoptervezető megvalósíthatja a helikopter hosszanti kormányzását.

A helikopter útirányú kormányzása a lábormánnyal biztosítható.

A függőleges sebesség megváltoztatása céljából meg kell változtatni a forgószárny vonóerejének nagyságát. E célra a vezetőfülkében egyesített gázkar található amelynek, segítségével egyidejűen megváltoztatható a forgószárny valamennyi lapátjának állásszöge és a hajtómű teljesítménye. A helikopter kormányzásának megvalósítása céljából meg kell változtatni a forgószárny vonóerejének nagyságát és irányát. A forgószárny vezérlésének legjobban elterjedt módja a vezérlő automata segítségével megvalósított vezérlés.

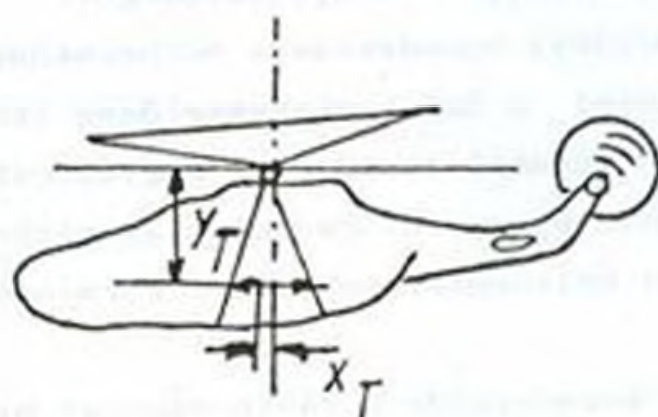
1. Egyforgószárnyas helikopter statikus stabilitása.

1.1. A helikopter súlypont-helyzete. (1,2)

A helikopter X_T hosszirányú és Z_T keresztirányú súlypont-helyzete alatt a tömegközéppont távolságát értjük a forgószárny forgástengelyétől mérve. A helikopter Y_T függőleges súlypont-helyzetet, a tömegközéppont és a forgószárny szerkezeti síkja közötti távolság jellemzi.

A szerkezeti forgássík (3. ábra) keresztülhalad a for-

gószárny agyon és merőleges a forgástengelyre. A keresztirányú súlypont-helyzet normázva van a helikopter O_y ten-



3. ábra

gelynez viszonyított szimmetrikus terhelése útján. Normális terhelési változat mellett a keresztirányú súlypont-helyzet koordináta nulla-hoz közeli értékű. A függőleges súlypont-helyzetet a gyakorlatban nem normázzák. A hosszirányú súlypont-helyzetet normázzák (az M_2 bólintási nyomatékot határozza meg mert a forgószárny forgási síkja kitérésének szerkezeti szöge, következésképpen a hosszirányú vezérlésre szolgáló botkormány kitérése korlátozott).

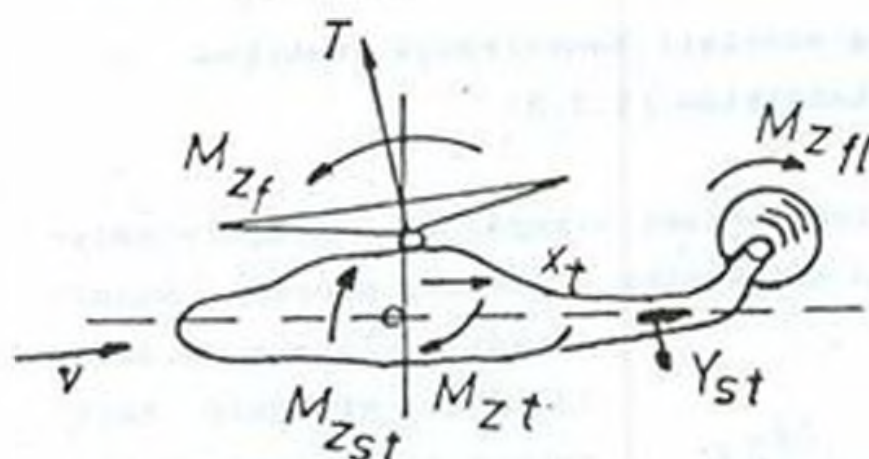
Mellső határ súlypont-helyzetet a hosszirányú vezérlés elégséges tartaléka határozza meg a hátsó ütközőig függés mellett és maximálisan megengedett sebességű hátszél esetén függőleges üzemmódon.

Hátsó határ súlypont-helyzet korlátját a hosszirányú vezérlés tartaléka határozza meg a melső ütközőig földetéréskor, a nagy bólintási szögek miatt.

A helikopter súlypont-helyzetek tartománya a 3. ábrán látható.

2.A helikopter hosszirányú statikus stabilitása. [1,2,3,4]

A helikopter hosszirányú kiegyensúlyozásának vázlata a 4. ábrán látható.



4. ábra

A hosszirányú statikus stabilitás elemzésekor meg kell vizsgálni a helikopterre ható nyomatékokat, és azok függését a repülési üzemmódtól.

A vízszintes repülés-

ben az eredő nyomatékok:

$$M_z = M_{zf} + M_{zt} + M_{zfl} + M_{zst} \quad (5)$$

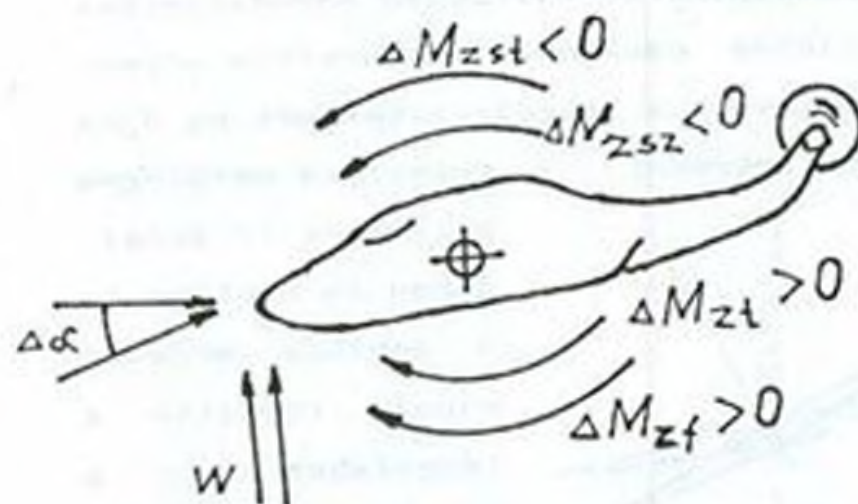
ahol: M_{zf} - a forgószárny nyomatéka;

M_{zt} - a törzs nyomatéka;

M_{zfl} - a faroklégcsavar nyomatéka;

M_{zst} - a stabilizátor nyomatéka.

A kiegészítő nyomatékok iránya az állásszög növekedésekor az 5. ábrán



5. ábra

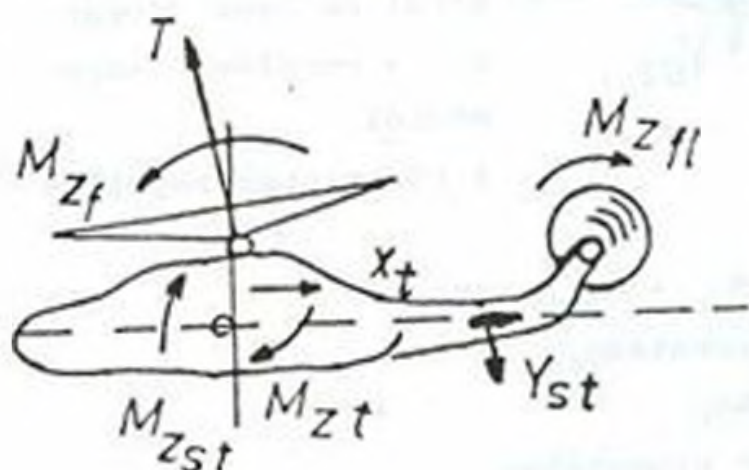
látható. Az állásszög növekedésekor a forgószárny aerodinamikai ereje T , hátrafelé dől és kiegészítő emelkedési nyomatékokat ΔM_{zf} ad, ami elősegíti az állásszög további

növekedését. A törzs kiegyesztő nyomatéka ΔM_{z1} , az állásszög növekedésekor szintén emelkedési nyomaték, ami az állásszöget növelni igyekszik.

A szárny és a stabilizátor kiegyesztő összegzett nyomatéka negatív.

2.1. Az állásszög szerinti hosszirányú statikus stabilitás. (1, 2, 3)

A forgószárny viselkedését vizsgáljuk a tengely helyzetének változásakor. A helikopter állásszög szerinti stabilitási vázlat a 6. ábrán látható. A kiinduló helyzetben a forgószárny tengelye merőleges a forgás síkjára. A tengely kitérése a kiinduló helyzetből bizonyos szögre, a forgószárny lapátok állásszögének ciklikus változásához vezet. Eredményeként a



6. ábra

lapátok csapkodó mozgást végeznek (a változó aerodinamikai erők hatására) a vízszintes csuklóhoz viszonyítva olymódon, hogy a forgás síkja követi a tengely kitérését és újra elfoglalja (bizonyos késleltetéssel) a tengelyre merőleges

helyzetét (7. ábra). Abban az esetben ha a lapátok mereven vannak rögzítve a tengelyhez, akkor a forgás síkja késés nélkül követi a



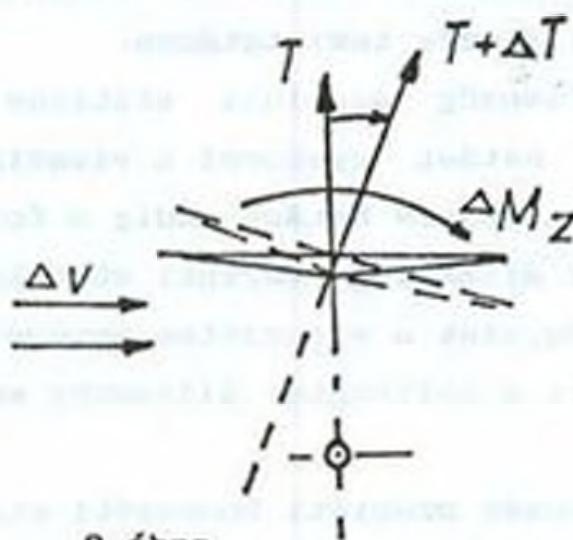
7. ábra

helyzetét (7. ábra). Abban az esetben ha a lapátok mereven vannak rögzítve a tengelyhez, akkor a forgás síkja késés nélkül követi a

tengelyt, mivel a forgószárny és a tengely mereven van összekapcsolva.

2.2.A sebesség szerinti hosszirányú stabilitás. [1,2,3]

Vizsgáljuk meg a forgószárny viselkedését a repülési sebesség (vízszintes sebesség összetevő) változásakor. Tételezzük fel, hogy a sebesség Δv értékkel megnövekedett (8. ábra). A sebesség növekedése az előrehaladó lapáton a körüláramlási sebesség megnövekedéséhez vezet és megfordítva, a



8. ábra

sebesség csökkenéséhez a hátrahaladón.

sebesség csökkenéséhez a hátrahaladón.

A lapátok körüláramlási sebességének a változása a felhajtóerők változásához vezet, vagyis a felhajtóerő az előrehaladó lapáton növekszik, a hátrahaladón pedig csökken. A megnövekedett felhajtóerő hatására az előrehaladó lapát felfelé csapódik, a hátrahaladón pedig lefelé. Mivel a csapódás amplitudójának maximális értékét ebben az esetben a helikopter szimmetria síkjában érjük el, ezért a forgószárny forgási síkja hátrafelé dől. A forgószárny dőlésszöge a sebesség növekedésekor növekszik.

2.3.A hosszirányú statikus stabilitás vízszintes repülésben. [1,2,3,4]

A statikus stabilitás a forgószárny stabilitásából, valamint a vízszintes vezérsíkkal ellátott törzs stabilitásából tevődik össze. A fenti főrészek mindegyikének különböző statikus stabilitása van a sebességtől és az állásszögtől függően.

A vízszintes vezérsíkkal ellátott helikopter törzse statikusan stabil az állásszög tekintetében.

A helikopter állásszög szerinti statikus hosszanti stabilitására pozitív hatást gyakorol a vízszintes vezérsíkkal ellátott törzs, negatív hatást pedig a forgószárny. A forgószárny hatása az állásszög szerinti statikus stabilitásra kevésbé jelentős, mint a vízszintes vezérsíkkal ellátott törzs hatása, ezért a helikopter állásszög szerint stabil.

A helikopter sebesség szerinti hosszanti statikus stabilitására pozitív befolyást gyakorol a forgószárny és negatív hatást a törzs. A sebesség szerinti stabilitás foka növekszik a forgószárny fordulatszámának csökkenésével, mivel a fordulatszám csökkenésével növekszik a forgószárny lapátok csapkodó mozgásának foka.

A súlypont helyzete kevés befolyást gyakorol a vízszintes repülésben a hosszanti statikus stabilitásra.

Dinamikus szempontból: azokon az üzemmódokon, ahol a helikopter statikusan stabil, enyhe nem csillapodó lengések jelennek meg, mert a helikopternek hosszanti viszonylatban kis dinamikus instabilitása van. Ezek a lengések a helikoptervezető részéről könnyen kiküszöbölhetők.

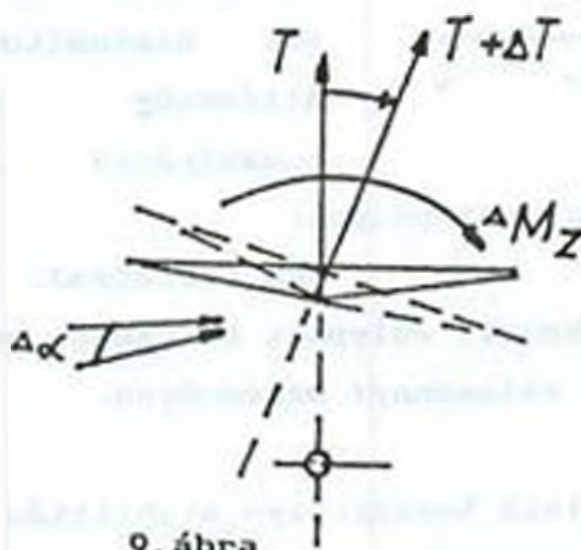
Oldalirányú viszonylatban a helikopter dinamikailag instabil.

2.3.1. Állásszög szerinti statikus stabilitás. [1, 2, 3]

Az állásszög szerinti statikus stabilitás feltétele

$$M_x^\alpha < 0 \quad \text{vagy} \quad m_x^\alpha < 0.$$

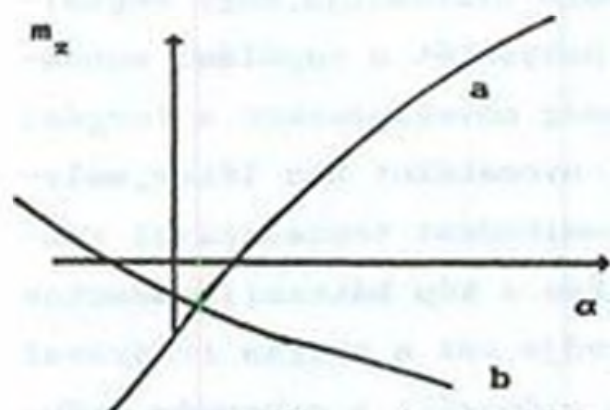
Ha van haladási sebesség, akkor az állásszög változása a forgószárny hátrabilenéséhez vezet, a T erő egyidejű növekedése mellett (9. ábra),



9. ábra

ami kiegészítő emelkedési nyomatékok megjelenését idézi elő. Ez a nyomaték igyekszik az állásszöget növelni. Ilymódon a forgószárny nem rendelkezik állásszög szerinti statikus stabilitással.

A helikopter törzse szintén instabil az állásszög szerint.



- a - szárny és stabilizátor nélkül;
- b - szárnyal és stabilizátorral

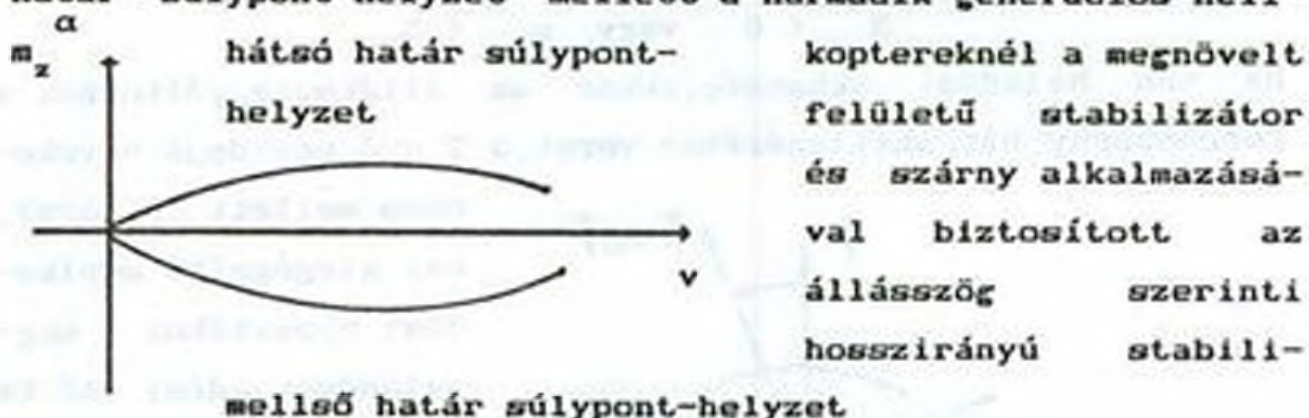
10. ábra

A szárny és stabilizátor, mivel negatív nyomaték növekményeket hoznak létre, elősegítik a stabilitás növekedését (10. ábra).

2.3.2. A súlypont helyzet hatása az állásszög szerinti stabilitás fokára.

[1,2,3,4]

Hátsó súlypont helyzet mellett gyakorlatilag az összes helikopter instabil az állásszög szerint: $M_x^\alpha > 0$. Mellső



harmadik generációs helikoptereknel a megnövelt felületű stabilizátor és szárny alkalmazásával biztosított az állásszög szerinti hosszirányú stabilitás (11. ábra).

11. ábra

tás (11. ábra).

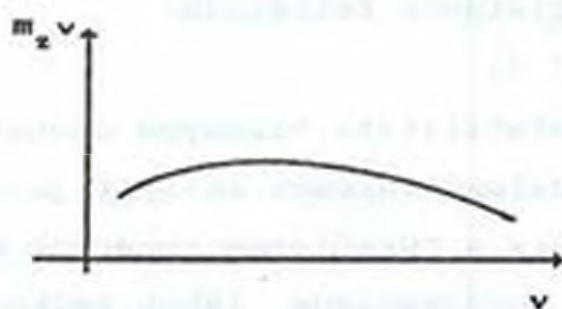
Közepes és semlegeshez közeli súlypont helyzetek mellett a helikopter semleges marad valamennyi sebességen.

2.4. A sebesség szerinti hosszirányú stabilitás.

[1,2,3]

A helikopter sebesség szerinti hosszirányú stabilitását a forgószárnyak az a tulajdonsága biztosítja, hogy megváltoztatja a kúp forgási síkjának helyzetét a repülési sebesség változásakor. Ezáltal, a sebesség növekedésekor a forgási kúp, hátrafelé billenve emelkedési nyomatékot hoz létre, melynek hatása alatt a helikopter emelkedési tendenciával rendelkezik és így a sebessége csökken. A kúp hátrabillenésekor megnövekszik a vonóerő T_x összetevője, ami a mozgás irányával ellentétesen hat és így szintén elősegíti a sebesség csökkenését. Ily módon, vízszintes repülés üzemmódon a helikopter rendelkezik sebesség szerinti stabilitással. Feltétele a kö-

vetkező:



12. ábra

$$M_x^v > 0 \quad \text{vagy} \quad m_x^v > 0$$

Az m_x^v derivált sebesség függvényében történő változása a 12. ábrán látható. A helikopter szárnya bizonyos mértékben csökkenti a

sebesség szerinti stabilitást, mivel a súlypontok mögött helyezkedik el és így zuhanási nyomatékot hoz létre, ami növekszik a repülési sebesség növekedésekor.

3.A helikopter oldalirányú statikus stabilitása.

3.1. Az útirányú statikus stabilitás. [1,2,3]

Az útirányú statikus stabilitást a megjelenő csúszási szög megszüntetésére irányuló tendencia jellemzi. Az összegzett legyező nyomaték a helikopter egyes részeinek nyomatékából tevődik össze (a csúszási szög megjelenésekor).

A helikopter törzse destabilizáló nyomatékot hoz létre, mivel oldalirányú fókuszpontja a tömegközéppont előtt helyezkedik el. A faroklégcsavar stabilizáló nyomatékot hoz létre. Jobb irányú csúszás esetén a vonóereje növekszik, ami a β csúszási szög csökkentésére irányuló nyomatékot hoz létre. A függőleges vezérsík szintén stabilizáló útirányú nyomatékot hoz létre.

Függés üzemmódon (oldalirányú szélleőkésék mellett) a helikopter igyekszik befordulni a szél irányába, csökkentve a csúszási szöget.

Ha a helikopter haladó sebességgel rendelkezik, akkor útirányú viszonylatban stabil, a függőleges vezérsík és a

faroklégcsavar nyomatékának hatása következtében.

Az útirányú stabilitás meglétének feltétele:

$$m_y^{\beta} < 0.$$

A helikopter útirányú instabilitása bizonyos esetekben kis sebességeken, jelentős oldalszéllökések mellett jelentkezik. Az instabilitás oka az, hogy a függőleges vezérsík és a faroklégcsavar körüláramlása leszakadásos lehet, amikor a függőleges vezérsík és a faroklégcsavar leárnyékolódik.

3.2. A keresztirányú statikus stabilitás. [1,2,3]

A keresztirányú statikus stabilitás a bedöntési nyomaték keletkezésével kapcsolatos, a csúszási szög megléte esetén.

Abban az esetben, ha a jobb irányú csúszás bal bedöntést idéz elő, akkor a helikopter keresztirányban statikusan stabil, azaz teljesül a következő feltétel:

$$m_x^{\beta} < 0.$$

Ebben az esetben, ha a helikopter önkényesen bedől, akkor csúszás jön létre a bedőlés oldalára és eközben olyan nyomaték keletkezik, ami a bedőlés likvidálására irányul.

A keresztirányú stabilitás biztosításában a fő szerepet a forgószárny és a szárny nyomatéka játsza. A túlzottan nagy keresztirányú stabilitás nem kívánatos. Előidézhetheti a helikopter keresztirányú lengéseit, amit a helikoptervezető nehezen tud parirozni.

4. A helikopter dinamikai tulajdonságai. [1,2,3]

A helikopter dinamikai tulajdonságainak vizsgálata a linearizált mozgásegyenletek segítségével végezhető el. Az

egyenletek megoldása bonyolultabb feladat, mint a repülőgépek esetében. A helikoptereknél a megzavart mozgásban feltétlenül figyelembe kell venni a forgószárny forgási kúpja helyzetének változását, ami az általa létrehozott erők és nyomatékok megváltozásához vezet.

4.1. A helikopter hosszirányú megzavart mozgása. [1,2]

A hosszirányú megzavart mozgás közelítő egyenletrendszere:

$$m \frac{d\Delta v}{dt} = -G \Delta \theta \quad (6)$$

$$m \cdot v \frac{d\Delta \theta}{dt} = T_y^\alpha \Delta \alpha \quad (7)$$

$$I_z \frac{d^2 \Delta \theta}{dt^2} = M_z^\alpha \Delta \alpha + M_z^v \Delta v + M_z^{\omega_x} \frac{d\Delta \theta}{dt} \quad (8)$$

A helikopter megzavart mozgása aperiódikus és lengő mozgásból tevődik össze.

A hosszirányú mozgás periódusa:

$$T \approx 2\pi \sqrt{\frac{M_z^{\omega_x} + \frac{G \cdot v \cdot M_z^\alpha}{\epsilon \cdot T_y^\alpha}}{\epsilon M_z^v}} \quad (9)$$

Függés üzemmódon a lengések periódusa $v=0$ esetnek felel meg.

$$T_{fugg} \approx 2\pi \sqrt{\frac{M_z^{\omega_x}}{\epsilon M_z^v}} \quad (10)$$

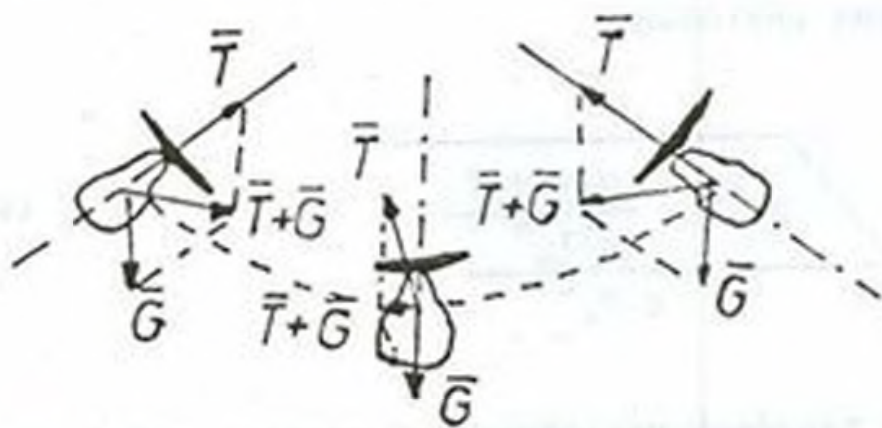
A helikopter hosszirányú lengőmozgása a 13. ábrán látható.



13. ábra

4.2. a helikopter oldalirányú megzavart mozgása. [1,2,3]

A helikopter oldalirányú lengései a 14. ábrán láthatók. A bedöntési szög függés üzemmódon történő véletlen megváltozásakor a nyomatékok egyensúlya nem bomlik fel és a helikopter a bedőlés likvidálására irányuló tendenciával bír.



14. ábra

Tételezzük fel, hogy a bedőlés jobb irányú: ez a $\bar{T} + \bar{G}$ értékű kiegyensúlyozatlan erő megjelenéséhez vezet, melynek ha-

tására jobb irányú elmozdulás jön létre. A sebesség növekedésének mértékében viszont a forgószárny kúpja balra kezd elhajolni, olyan keresztirányú nyomatékot hoz létre, ami csökkenti a jobb irányú bedőlést és átviszi bal irányba. Az $\bar{T} + \bar{G}$ erő eközben lecsökkenti az oldalirányú elmozdulás sebességét.

nulláig, azután a mozgás ellenkező irányba ismétlődik meg.

A helikopter mozgása az amplitudó növekedésével megy végbe, ami a mozgás instabilitására utal. A lengések periódusa eléri a 10-15 másodpercet (elég nagy értékű), ami lehetővé teszi a lengések parirozását a kormánysszervek kitérítésével.

Felhasznált irodalom

- [1] - O. M. Алаян, В. Ф. Ромасевич: Аэродинамика и динамика полёта вертолёта
Москва, 1973, Министерство Обороны СССР
- [2] - А. А. Красовский: Системы автоматического управления полётом пилотируемых летательных аппаратов
В. В. И. А Жуковского, Москва, 1971
- [3] - А. С. Шаталов, В. И. Толчеев, В. С. Кондратьев: Летательные аппараты как объекты управления
"Машиностроение", Москва, 1972
- [4] - Dr. Csáki Frigyes - Bars Ruth: Automatika
Tankönyvkiadó, Budapest, 1969

HORVÁTH DEZSŐ

1977-ben végeztem a Zsukovszkij Repülőmérnöki Akadémián, 1983-ban a BME mérnök-tanári szakán. Az oktatásban 1965 óta veszek részt. Jelenleg a műszertechnikai ágazat szakcsoportvezetője vagyok. 1989-ben neveztek ki főiskolai docenssé. Több főiskolai jegyzet, tanulmány szerzője vagyok. Számos cikkem jelent meg. Az OTDK-án a főiskolai hallgatókkal rendszeresen résztveszek konzulensi minőségben. A főiskolai hallgatók szakdolgozatainak kidolgozását évek óta irányítom. Fő kutatási területem a légi járművek dinamikai tulajdonságainak a vizsgálata.

Horváth Dezső

repülést gyakorló állomásparancsnok
59. Szentgyörgyi Dezső Harcászati Repülőezred

A REPÜLŐGÉP STABILITÁSA ÉS KORMÁNYOZHATÓSÁGA.

A cikk a repülőgépek stabilitásával és kormányozhatóságával foglalkozik. Megadja a statikus és dinamikus stabilitás jellemzőit. Elvégzi a hosszirányú statikus stabilitás és kormányozhatóság elemzését. Tárgyalja a kicsi és a nagy hosszirányú mozgás fejlődését. Röviden foglalkozik az oldalirányú stabilitással és kormányozhatósággal. [1,2,3,4,5,6]

Bevezetés

A korszerű repülőgépek repülési sebesség és magasság tartományának jelentős működését stabilitásuk és kormányozhatóságuk jellemzik.

A magasság növekedésével csökkenek a csillapító nyomatékok, ami az egyensúly megbomlásakor úgy a hossz- mint a keresztirányú mozgások gyengén csillapodó ingadozásával jár együtt. Nagy magasságokon az egyik repülési üzemmódról a másikra való áttérés a mozgás paramétereinek erős ugrásaival jár együtt. Ez megnehezíti a repülőgép pontos kormányzását, valamint néhány esetben veszélyes is lehet (a hullámozgás, vagy a megengedett üzemmódok elérésének lehetősége miatt). Néhány repülési üzemmódon a repülőgép instabillá válhat (pl. az $M = 1$ -hez közel eső M -szám¹ tartományban történő repüléskor a repülőgép sebesség szerinti stabilitással nem rendelkezik, némelykor még a keresztstabilitását is elveszítheti).

¹ Mach, Ernst (1838-1916): osztrák fizikus és szubjektív idealista filozófus; akusztikával, optikával és mechanikával foglalkozott. Mach-szám: áramlási jelenségekre jellemző viszony-szám.

Nagy hangsebesség feletti sebességeken lényegesen csökken az útirány szerinti stabilitás, ami a repülőgép aerodinamikai különlegességeivel párosulva a hossz- és keresztirányú mozgás kedvezőtlen összefüggéseinek korábbi és erős megjelenését, tehát a repülőgép dinamikus tulajdonságainak romlását segíti elő.

Hangsebesség feletti sebességről hangsebesség alattira történő áttéréskor hirtelen csökken a túlterhelés szerinti stabilitás (ez a jelenség némely repülőgépnél nagy állásszögek létrehozásakor is megfigyelhető).

A repülőgép stabilitási és kormányozhatósági jellemzőinek repülés közbeni változása azt követeli, hogy a repülőgépvezető pontosan ismerje a változás jellegét és azokat figyelembe tudja venni a kormányzás megvalósításában.

1. Egyensúly, stabilitás, kormányozhatóság.

[1, 2, 3, 4]

Az egyenesvonalú, egyenletes repülés végrehajtásának első és alapfeltétele a repülőgép egyensúlyának vagy kiegyensúlyozatlanságának biztosítása, amit a repülőgépvezető a kormánysszervek segítségével valósít meg. A repülési üzemmódot a sebesség (v), a magasság (H), az állásszög (α), a csúszási szög (β), a bedöntési szög (γ), a bólintási szög (θ), stb. jellemzi.

Hosszantartó repülések esetén kevés csak a repülőgép egyensúlyát létrehozni, a stabilitást is biztosítani kell (pl. a légkör nyugtalanságának hatására a repülőgépvezető által létrehozott egyensúly megbomolhat).

A repülőgép stabilitása. [4, 5, 6]

A repülőgépnek azt a tulajdonságát, amikor valamilyen külső ok hatására megbomlott egyensúlyát kiinduló helyzetbe való visszatéréssel korrigálja - a repülőgép stabilitásának nevezzük.

A stabilitás vizsgálatához a következőket kell megállapítani; a repülőgépre ható erők és nyomatékok változását a külső behatásokra. A repülőgép stabil, ha ezek az erők és nyomatékok úgy változnak, hogy a repülőgép a repülőgépvezető által beállított üzemmódra tér vissza. A stabilitást a stabilitási jelleggörbékkel jellemezzük. A repülőgép annál jobb stabilitás jelleggörbékkel rendelkezik, minél kevéssé tér el a megadott pályától és minél gyorsabban tér vissza ahhoz, külső zavarás hatására (a repülőgépvezetők mondják - "a repülőgép jobban fekszik a levegőben").

A stabilitás vizsgálatokor a következőket feltételezzük: először létre kell hozni az egyensúlyt (a stabilitás jellemzője az egyensúly); másodsor számolni kell a repülőgépvezető tevékenységével. Általában feltételezzük, hogy a repülőgépvezető az egyensúly megbomlásakor nem avatkozik be a kormányzásba (reális repülésben ez a feltétel nincs betartva, mivel a repülőgépvezető időnként beavatkozik a kormányzásba és helyesbítéseket alkalmaz, így gyorsabban visszatér a kiindulási helyzetbe).

Az instabil repülőgépeken a repülőgépvezetőnek állandóan be kell avatkoznia a kormányzásba, korrekciókat végrehajtani.

Kormányozhatóság. [2, 3, 4]

A repülőgép reagálási képességét a kormányszervek mozgására a repülőgép kormányozhatóságának nevezzük.

A kormányozhatóság a repülőgép repülésének lehetőségét meghatározó legfontosabb jellemző. Kormányozhatatlan repülőgéppel repülni lehetetlen. A jól kormányozható repülőgépről a repülőgépvezetők azt mondják, hogy "jól megy a bot után".

A repülőgépvezetőnek egyszerű kormányozdulatokat kell végrehajtani a szükséges manőverek elvégzéséhez. A kormány-

szervekre nem nagy, de pontosan érezhető erőket kell kifejteni. Ezekre a repülőgép térbeli helyzetének felesleges késedelem nélküli változtatásával felel.

Következtetés. A repülőgép stabilitása és kormányozhatósága egymással ismert mértékben ellentétesek. A stabilitás a repülőgép azon tulajdonsága, hogy megtartja a megadott repülési üzemmódot, a kormányozhatóság pedig igyekszik megváltoztatni azt. Ezzel együtt a két jellemző között a legszorosabb kapcsolat van.

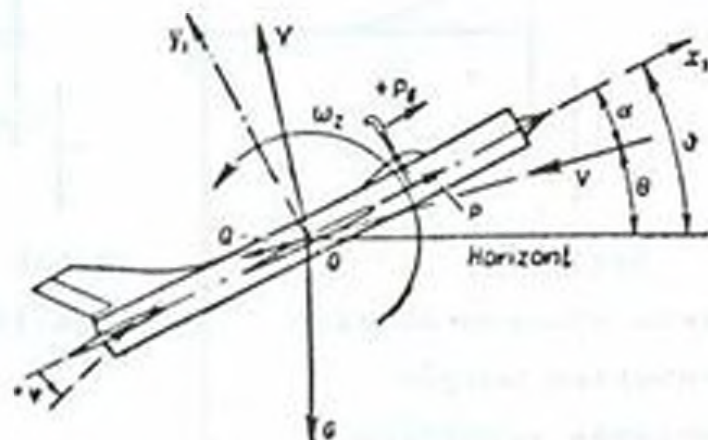
A stabilitás és kormányozhatóság közötti szoros kapcsolat a következőkben nyilvánul meg: a repülőgép stabilitásának növelésével, egyéb változatlan feltételek mellett a repülési üzemmód megváltoztatásához szükséges kormánykitérítési szögek nőnek. Így a kormányzókat nagyobb mértékben kell elmozdítani és nagyobb erőt kell kifejteni rájuk.

Ha ezek az erők nagyok, akkor a repülőgépvezető hamar kifárad, az ilyen repülőgépekre azt mondják, hogy "nehéz a vezetése". Akkor is nehéz kormányozni ha a kormánykitéréshez szükséges erők túl kicsik, az ilyen repülőgépről mondják, hogy "szigorú a kormányzásban".

A kis stabilitású, különösen az instabil repülőgépeken a repülési üzemmódot kettős kormányozdulatokkal kell változtatni (a botkormányt először a kívánt üzemmód változtatás irányába, majd a kis stabilitású repülőgépeken kissé visszafelé mozgatják az új üzemmód rögzítés céljából, az instabil repülőgépeken pedig még a kezdeti helyzeten túlra is elmozdítják).

A repülőgép stabilitásának csökkenését egyik oldalról a szükséges kormánykitérések és az ehhez szükséges erők csökkenése, másfelől a repülőgépvezetés bonyolódása kíséri.

A repülőgép stabilitásának és kormányozhatóságának vizsgálatakor célszerű az $Ox_1y_1z_1$ szárnyhúrral (1.sz. ábra) kapcsolatos koordináta rendszert alkalmazni.



1.sz. ábra

2.A repülőgép stabilitásának elemzése.

A stabilitás lényegében a repülőgép egyenetlen² (perturbált) mozgásának jellegében mutatkozik meg.

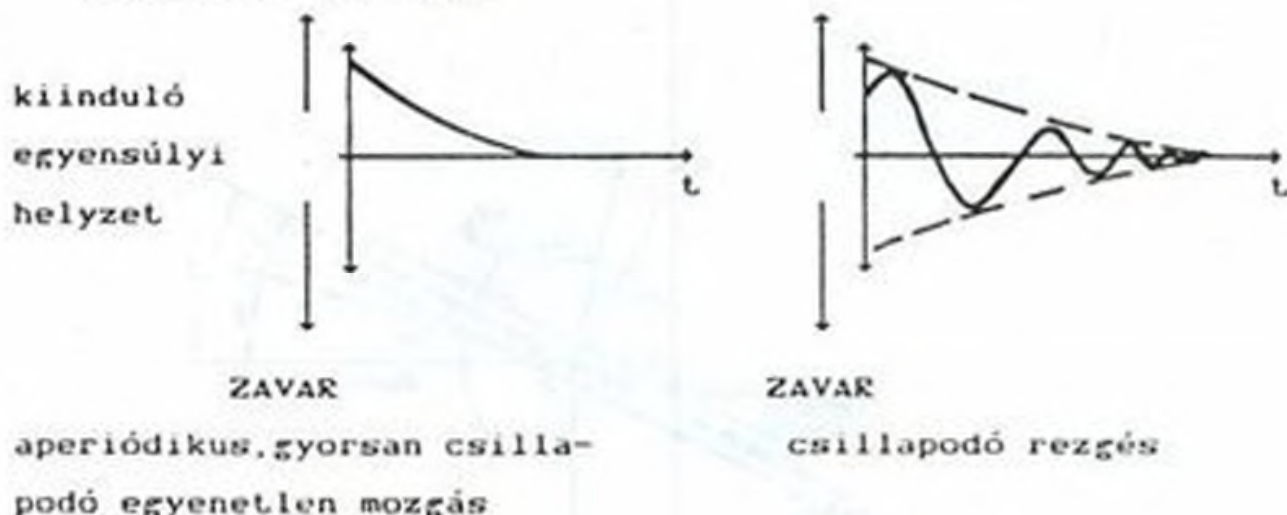
A stabil repülőgépeknél az egyenetlen mozgásnak csillapodónak (aperiódikusnak vagy periódikusnak) kell lennie.

Az erőhatásokra közömbös repülőgépek jellemző vonása, hogy nem reagálnak a csillapodásra vagy a zavarok időbeni növekedésére való törekvés a jellemző.

²Az egyenetlen mozgás, mind a repülőgépvezető tevékenységével (kormánysszervek kitérítése, gázkar kezelése, törzsféklapok alkalmazása, lovészet, rakéta indítás, stb), mind pedig a légkör állapotával (turbulenciájával) magyarázható.

A különböző stabilitási fokú repülőgép egyenetlen mozgásának lehetséges változatai a 2.sz. ábrán látható.

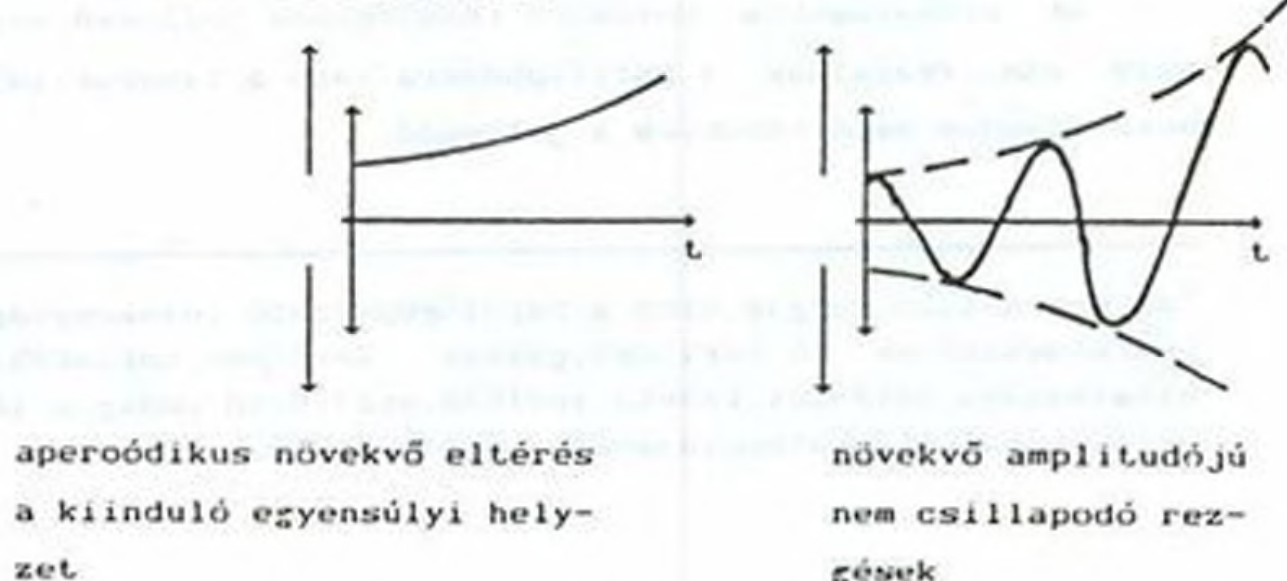
a. Stabil repülőgép.



b. Semleges repülőgép.



c. Instabil repülőgép.



2. sz. ábra

A repülőgép stabilitásának foka határozza meg a repülőgép egyenetlen mozgásának dinamikáját és a kiegyensúlyozási alapüzem módra való visszatérés jellegét. Ezért a repülőgép stabilitását néha dinamikai stabilitásnak is nevezik. A repülőgép stabilitása attól függően változik, hogy az egyenetlen mozgás folyamán rögzített vagy szabad helyzetben lesznek-e a repülőgép kormányzervei. A kormányok felengedésekor³ általában kissé csökken a repülőgépek stabilitása.

A stabilitás elméleti elemzésekor rendszerint a repülőgépvezető és a kormányzás között két lehetséges kapcsolati formát vizsgálnak: a kormány rögzített és felengedett helyzetben való esetét. Így beszélünk a repülőgép stabilitásáról rögzített és felengedett kormányhelyzetben⁴.

A repülőgép stabilitását hossz- és oldalirányú stabilitásra oszthatjuk fel. Hasonlóan, beszélhetünk a repülőgép hossz- és oldalirányú kormányozhatóságáról is. A felosztás alapját a repülőgép szimmetrikus formája képezi, annak függőleges síkjához (a szimmetriasíkhöz) viszonyítva.

A repülőgépnek mindhárom tengelyéhez viszonyítva stabilnak kell lennie.

A stabilitás a repülőgép jobb kormányozhatóságához szükséges, ami a repülőgépvezetés folyamán leegyszerűsíti a

³A kormányzervekre ható aerodinamikai erők és nyomatékok rendszerint arra törekcszenek, hogy megváltoztassák a kiegyensúlyozási alapszöget a kormányzervek kitérésekor és negatív irányban befolyásolják a repülőgép aerodinamikai visszaállító nyomatékát.

⁴Reális repülési viszonyok között a repülőgépvezető természetesen nem rögzíti a kormányokat állandóan, azonban rendszerint teljesen sem engedi el azokat, hanem valamilyen közbenső kapcsolati forma van a repülőgépvezető és a kormányzervek között.

bot és lábkormány mozgatósi jellegét.

A repülőgép stabilitása és kormányozhatósága biztosítja: a repülőgép manőverezési lehetőségeinek jobb kihasználását; a repülőgép vezetésének pontosságát és egyszerűségét.

A stabilitás és kormányozhatóság a biztonságos repülés növelésének legfontosabb feltétele.

3. Statikus stabilitás. (1, 2, 3)

A statikus stabilitás, nem jellemzi teljes egészében a tényleges stabilitást, mégis elengedhetetlen feltétele annak, mivel meghatározza a repülőgép kiegyensúlyozási alaphelyzetétől való eltérésekkel keletkező aerodinamikai helyreállító nyomatékok előjelét és nagyságát.

A statikus stabilitás biztosítja a repülőgép érzéketlenségét a kis zavarokkal szemben és gyorsan visszatér a repülés alaphelyzetére. A statikus stabilitás rögtön a repülőgépre ható zavarás pillanatában lép fel (széllökés pillanatában), így megakadályozza a repülőgép önkényes eltérését a számára beállított sebességi, túlterhelési és szögkiegyensúlyozási alaphelyzettől már a repülőgép egyenetlen mozgásának kezdeti fázisában, amikor a csillapító és tehetetlenségi erők még nem nagyok.

A repülőgép statikus stabilitására azért van szükség, mert ez elengedhetetlen, bár nem mindig elegendő feltétele a tényleges stabilitásnak.

A statikus stabilitás vizsgálatánál rendszerint külön vizsgálják a hossz- és oldalstabilitást. Az oldalstabilitást kereszt- és útirányú stabilitásra lehet felosztani.

A statikus stabilitás jellemzőinek ninőségében: a statikus stabilitási tényezőket alkalmazzuk.

A statikus stabilitás mértéke (a stabilitási tényező értéke) a következő feltételekkel van megadva:

- a repülőgép szükséges "repülési stabilitásából";
- a kormányok elfogadott hatásosságából;
- a repülés biztonságából.

4. Dinamikai stabilitás. [3,4]

A dinamikai stabilitást általában a repülőgép egyenetlen mozgásának jellege alapján ítélik meg. A dinamikai stabilitás elengedhetetlen feltétele a repülőgép egyenetlen mozgásának gyors csillapodása, amely leggyakrabban rezgőmozgás lehet.

A dinamikai mozgás jellemzőiként a repülőgép egyenetlen mozgásának csillapodási fokát és e mozgásperiódusát veszik. Az alábbi viszonytal jellemezzük:

$$m_{csill} = \frac{A_t}{A_{t+T}} \quad (1)$$

ahol: A_t és A_{t+T} - rezgésamplitudók az egy periódusra eltért időpillanatokban.

A rezgések gyenge csillapodása és túlságosan nagy periódusa a repülőgép rossz stabilitásának jellemzője. A periódus növekedésével, a repülőgép kormányának kitérése által előidézett egyenetlen mozgás időben mintha "megnyúlna", nagyságát tekintve nagyobb időközig tart. Rosszabodik a repülőgép "kormánykövetési képessége". A repülőgépvezető nehezebben tudja meghatározni az egyenetlen mozgás jellegét és értékelni annak csillapodását.

B.A hosszirányú statikus stabilitás és kormányozhatóság. [1,2,3]

A repülőgépre ható aerodinamikai erők és nyomatékok tényezőikkel és a torlónyomással arányosak (például a c_y tényezővel arányos a $Y = c_y S \cdot \rho v^2 / 2$ torlónyomás). E tényező nagyságát alapvetően az állásszög (α) határozza meg. A $\rho v^2 / 2$ torlónyomás nagysága ugyanakkor adott magasságon csak a repülés sebességétől (v) függ. Ezért a repülőgép egyensúlyának megbomlásakor létrejövő aerodinamikai erő és nyomaték változások értékeléséhez tudni kell, hogyan változik az α és a v .

A repülőgép azzal a sajátossággal rendelkezik, hogy viszonylag gyorsan képes változtatni az állásszöget (α) és lassan a sebességet (v). A repülőgép ezen tulajdonsága a hosszirányú stabilitás két fajtájára osztásához vezetett: stabilitás állandó sebességen, melyet túllerhelés szerinti stabilitásnak és stabilitás változó sebességen, melyet sebesség szerinti stabilitásnak nevezünk.

A repülőgép hosszirányú vagy bólintási nyomatéka (M_x): a repülőgép súlypontján áthaladó kereszt tengelyhez viszonyított M_x aerodinamikai erők nyomatéka.

A hosszirányú nyomaték az állásszög, a repülési sebesség és a Mach-szám változásakor változik meg.

A repülőgép hosszirányú nyomatékára hatást gyakorol:

- a hajtómű üzemmódja;
- a repülőgép kormányszervek rögzítése és felengedése;
- a fékszárnyak és a törzsféklapok kiengedése;
- a futómű kiengedése;
- a külső tüzelőanyagtartály felfüggesztése, stb.

Hosszirányú szempontból statikusan stabil repülőgépek nevezzük, azt a repülőgépet, amelynél az állásszög vagy a repülési sebesség és a Mach-szám megváltozásakor a hosszirányú nyomaték a kiinduló repülési üzemmódhoz való visszatérés irányában változik meg.

A hosszirányú nyomaték tényező (dimenzió nélküli mennyiség):

$$m_z = \frac{M_y}{q S b_A} \quad (2)$$

ahol: S - a szárny felülete;

b_A - a szárny aerodinamikai közép húrja;

$q = \rho v^2 / 2$ - torlónyomás.

A repülőgép hosszirányú statikus stabilitásának fokát ekkor a hosszirányú nyomaték tényező változási értéke alapján értékelik, amely a felhajtóerő tényező változási egységére esik, azaz az $m_z = f(c_y)$ görbe dőlése alapján lehet értékelni.

Túlterhelés szerinti stabilitás.

A repülőgépet akkor nevezzük túlterhelés szerinti stabilnak, ha önállóan, a repülőgépvezető beavatkozása nélkül, igyekszik megtartani a kiindulás repülés üzemmód terhelését. Azért adták ezt a megnevezést mert állandó sebességen az állásszög növelése vagy csökkenése, a felhajtóerő, következőképpen az $n_y = Y/G$ túlterhelés változása kíséri.

Túlterhelési stabilitásról akkor beszélünk, ha egy görbe vonalon olyan túlterheléssel repülünk, amely állandó sebesség és megadott Mach-szám mellett lép fel.

Sebesség szerinti stabilitás.

A repülőgépet akkor tekintjük sebesség szerint stabilnak, ha önállóan, a repülőgépvezető beavatkozása nélkül igyek-

szik megtartani a kiindulási üzemmód sebességét.

A sebességi stabilitás a repülőgép hosszirányú stabilitását jellemzi állandó túlterhelés, de változó repülési sebesség vagy Mach-szám érték mellett. (Általában az $n_y > 1$ esetet, a megadott magasságon történő vízszintes repülést vizsgálják.)

Az $m_x = f(c_y)$ függvényt nem lehet egy görbének elképzelni, mivel a repülőgép hosszirányú kiegyensúlyozását és a hosszirányú nyomaték tényezőjét lényegesen befolyásolja:

- a levegő összenyomhatósága;
- a szerkezet rugalmas deformálódása;
- a hajtóművek üzemmódja;
- fékszárnyak és törzsféklapok helyzete, stb.

A hosszirányú statikus stabilitás tényező:

$$m_x^{c_y} = \frac{\Delta m_x}{\Delta c_y} = \operatorname{tg} \zeta \quad (3)$$

- általában a repülőgép statikus stabilitási fokát az $m_x = 0$ pontban az $m_x = f(c_y)$ görbe érintője dőlésszöge tangensének értéke alapján határozzák meg;
- stabil repülőgépeknél ez a tényező negatív;
- az $m_x^{c_y}$ túlterhelés szerinti stabilitás növekedésével nő a visszaállító nyomaték, melynek eredményeként ugyanekkora állásszög változásával nagyobb szöggyorsulás jön létre. Eközben nő a forgás szögsebessége és ennek megfelelően a T_p lengésperiódus csökken.

Túlterhelés szerinti stabilitási tényező: állandó repülési sebesség és Mach-szám érték esetén történő görbevonaltú repülés közben kialakult összstatikus stabilitási fok:

$$\sigma_n = m_x^{c_y} + \frac{m_x \omega_z}{\mu} \quad (4)$$

ahol: m_z^C - a hosszirányú statikus stabilitás tényezője;

$m_z^{\omega_x}$ - a repülőgép hosszirányú csillapodás tényezője;

$$\mu = \frac{2m}{\rho S b_A}$$
 - a repülőgép viszonylagos tömegsűrűség tényezője, amely a repülési magasságtól függ;

ρ - a levegő sűrűsége;

$m = G / g$ - a repülőgép tömege;

S - a szárny felülete;

b_A - a szárny aerodinamikai középhúrja.

A viszonylag nagy tömegsűrűségű repülőgépnél a valóságos csillapítás a túlterhelés szerinti stabilitásra gyakorolt hatása jelentéktelen, különösen nagy magasságokon, ahol megfoghatatlanul kicsivé válik. A túlterhelés szerinti stabilitást tehát alapvetően a súlypont és a fókuszpont kölcsönös helyzete határozza meg. A fókuszpont és a súlypont közötti távolságot stabilitási tartaléknak nevezik. A túlterhelés szerinti stabilitás a repülőgép súlypontja vagy fókuszpontja helyzetének változásakor változhat.

A túlterhelés szerinti stabilitás jellemzi a repülőgép hosszirányú stabilitását az állásszög megváltozásával kapcsolatos manőver végrehajtásakor. A repülés biztonsága szempontjából igen fontos feltétel a repülőgép túlterhelés szerinti stabilitása.

A sebesség szerinti stabilitási tényezővel vannak kapcsolatban a repülőgép hosszirányú kormányozhatóságának jellemzői egyenesvonalú repülés közben. A sebesség szerinti stabil repülőgép megkönnyíti a repülőgépvezető számára a repülőgép pontos kormányzási feltételeit, valamint a megadott repülési sebesség betartását. A sebesség szerint stabil re-

pülőgép nem törekszik önkényesen eltérni a repülőgépvezető által beállított, megadott sebesség szerinti kiegyensúlyozási értéktől.

A sebesség szerinti stabilitási tényező:

$$\sigma_v = m_z^{c_y} + m_z^M \frac{\Delta M}{\Delta c_y} \quad \text{vagy} \quad (5)$$
$$\sigma_v = m_z^{c_y} + m_z^v \frac{\Delta v}{\Delta c_y}$$

ahol: $m_z^{c_y}$ - hosszirányú statikus stabilitási tényező;

m_z^M - a hosszirányú nyomaték tényező változási foka a Mach-szám függvényében jellemző tényező;

m_z^v - a hosszirányú nyomaték tényező változási foka a sebesség függvényében jellemző tényező.

KÖVETKEZTETÉS.

Ha a repülőgép sebesség szerint stabil, akkor a repülőgépre ható erők és nyomatékok a sebesség változásakor úgy fognak alakulni, hogy a repülőgépet a kiindulási helyzetbe térítik vissza, akadályozzák az attól való eltérést. Tehát a repülési sebesség megváltozásához a repülőgépvezetőnek a kormányservek segítségével le kell győznie a repülőgép sebességtartó tulajdonságát. Ekkor a sebesség növelésére ($\Delta v > 0$) és ezen a megnőtt sebességen a repülőgép kiegyensúlyozására a botkormányt (rajta nyomóerőt kifejtve $\Delta P_m > 0$) előre kell mozgatni ($\Delta \delta_m > 0$); a sebesség csökkentésére húzóerő létrehozásával ($\Delta P_m < 0$) a botkormányt magunk felé kell húzni ($\Delta \delta_m < 0$).

A repülőgép sebesség szerinti stabilitásának biztosítására a következő két feltétel közül az egyiknek feltétlen

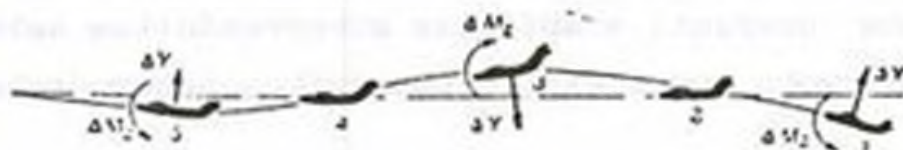
érvényesülnie kell:

$$\frac{\Delta \delta_m}{\Delta v} > 0 \quad \text{vagy} \quad \frac{\Delta P_m}{\Delta v} > 0 \quad (6)$$

Sebesség szerint minél stabilabb a repülőgép, annál nagyobb szögre kell a magassági kormányt kitéríteni és nagyobb erőt kifejteni a botkormányra a repülési üzemmód megváltoztatásához. Ha a repülőgép sebesség szerint nem stabil az egyik üzemmódról a másikra történő áttéréshez a repülőgépvezetőnek a botkormánnyal kettős mozgást kell végeznie (az első mozgás az egyensúly megbontásához szükséges, a másik mozdulat a repülőgép kiegyensúlyozására). A sebesség szerinti stabilitás szorosan összefügg a kormánykitérítési és egyensúlyi diagramokkal.

5.1. A kicsi (rövidperiódusú) hosszirányú mozgás fejlődése.

A 3.sz. ábrán vizsgált esetben valamilyen zavaró ok miatti állásszög növekedés esetén (1.pont) a repülőgép pályáját felfelé hajlítva, lefogja engedni orrát és az állásszöget csökkenteni fogja.



3.sz. ábra

A 2.pontban a kiindulási állásszöghöz ($\Delta \alpha = 0$) tér vissza, kö-

vetkezésképpen, a ΔY felhajtóerő növekedés is nulla lesz. Ebben a pontban még bizonyos függőleges sebességgel és forgási szögsebességgel rendelkezik, felfelé fog mozogni és forogni, csökkentve az állásszöget, aminek következtében a ΔY felhajtóerő növekedés ellenkező irányban (lefelé) jön létre. Ez először a szögsebesség csökkenését fogja elősegíteni (3. pont) majd a repülőgép másik irányba történő forgását okozza, stb. A forgást akadályozó csillapítónyomatékok megléte teszi lehetővé kis magasságokon a fellépő lengések viszonylagos gyors gyengülését.

A hosszirányú nyomaték változás az α állásszög 1° -kkal történő növelésekor (csökkenésekor):

$$M_z^\alpha = m_z^\alpha \frac{\rho v^2}{2} \quad b = m_z^{c_y} c_y^\alpha \frac{\rho v^2}{2} \quad S B \quad (7)$$

A (7) képletből látható, hogy a sebesség növekedésével, a magasság csökkenésével és a fókuszpont-súlypont közötti távolság ($m_x^{c_y}$) növekedésével a lengések periódusa csökken. A korszerű repülőgépeknél a lengések periódusa viszonylag nem nagy és közepes értéke $T_p \approx 1-5$ s. Ezért ezt a mozgásformát rövidperiódusú (rövid idejű) vagy kicsi hosszirányú mozgásnak nevezzük.

A repülőgép fókuszpontjának helyzete alapvetően a repülési üzemmódtól függ. Hangsebesség átlépésekor a repülőgép fókuszpontja nagymértékben hátravándorol. Ebből kifolyólag a túlterhelés szerinti stabilitás szuperszónikus sebességeken 4-6-szor nagyobb lehet, mint szubszónikus sebességeken.

5.2. A nagy hosszirányú mozgás fejlődése.

Tételezzük fel, hogy a repülőgép sebessége Δv értékkel

nőtt (1.pont) valamilyen zavaró ok hatásaként. A sebesség változásakor az erők egyensúlya a röppályához érintőlegesen és normálisan is megbomlik. Ezen kívül felbomolhat a hosszirányú nyomatékok egyensúlya is, ami az állásszög viszonylag gyors változásához vezet.



4. sz. ábra

Tételezzük fel, hogy a sebesség növekedésekor és a vele kapcsolatos állásszög változásakor a homlokellenállás nagyobb lesz a hajtómű tolóerejénél, a felhajtóerő pedig a repülőgép súlyánál. Ekkor a repülőgép sebessége mind a homlokellenállás növekedése, mind pedig a felhajtóerő többlet által kiváltott röppálya elhajlás és a repülőgép emelkedésbe történő átállása következtében csökkenni fog. Bizonyos repülési magasságokon (2.pont) a repülőgép eléri a kiindulási sebességet, és a felhajtóerő többlet, valamint a homlokellenállás nulla lesz, a függőleges sebesség meglétének következtében azonban tovább fog emelkedni ebben a pontban, sebessége pedig csökkenni fog. A sebesség csökkenése lehetővé teszi egyrészt a negatív felhajtóerő növekedést (3.pont), másrészt a hajtómű tolóerő többlet létrejöttét. A felhajtóerő csökkenés a röppályát lefelé kezdi hajlítani, a tolóerő többlet pedig akadályozni fogja a sebesség csökke-

nését. Mind a két hatás a kiindulási repülési üzemmód sebességét igyekszik visszaállítani. A repülőgép kiindulási üzemmódhoz történő visszatérését a repülőgép lengő mozgása fogja kísérni, melynek periódusa a repülési sebességgel arányos $T_p \approx (0,2-0,4) v$. (Pl. $v=900$ km/ó sebesség esetén a lengés periódusa 60-100 s lehet). Ezt a mozgási formát hosszúperiódusú vagy hosszirányú mozgásnak nevezik.

Következtetés, a sebesség szerinti stabilitás az erők röppályához érintőleges $\Delta X=P-Q$ és a normál $\Delta Y=Y-G\cos\theta$ változásának jellegétől függ.

6. Az oldalirányú stabilitás és kormányozhatóság.

[3,4,5,6]

A repülőgép súlypontján áthaladó függőleges tengelyhez viszonyított M_y aerodinamikai erők nyomatékát legyező nyomatéknak nevezzük. A legyező nyomaték a repülőgép csúszásakor lép fel a törzs és a függőleges vezérsík asszimmetrikus oldalirányú körüláramlása következtében és vagy csökkenteni, vagy növelni igyekszik a csúszási szöget.

a.) Azokat a repülőgépeket, amelyeknél a csúszási szög csökkentésére irányuló legyező nyomaték lép fel útirányú stabilitású, statikusan stabil repülőgépnek nevezzük. A repülőgép útirányú stabilitása és legyező nyomatéka annál nagyobb lesz, minél nagyobb a függőleges vezérsík felülete és minél nagyobb az erő karja a repülőgép súlypontjáig.

Legyező nyomaték tényező:

$$m_y = \frac{M_y}{S q l} \quad (8)$$

ahol: S - szárnyfelület;

$q = \rho v^2 / 2$ - torlónyomás;

l - a szárnyfesztáv.

A repülőgép útirányú stabilitásának fokát a $\beta=0$ pontban az $m_y = f(\beta)$ görbe érintő dőlésszög tangens értékével határozzuk meg:

$$m_y^{\beta} = \frac{\Delta m_y}{\Delta \beta} = \operatorname{tg} \xi \quad (9)$$

Az m_y értékét statikus útirányú stabilitás tényezőnek vagy vitorlázó stabilitás tényezőnek nevezzük. Az útirányú stabilitású repülőgépeknél ez a tényező negatív.

Bedöntési nyomaték: a repülőgép hossz tengelyéhez viszonyítva a repülőgépre ható M_x aerodinamikai erők nyomatéka. A bedöntési nyomaték a repülőgép csúszásakor keletkezik, a szárny és a függőleges vezérsík ferde körüláramlása következtében. Ez a repülőgépet oly módon igyekszik bedönteni, hogy csökkenjen a keletkezett csúszás vagy fordítva, még jobban növelje azt.

b.) Keresztirányban statikusan stabil repülőgép: azt a repülőgépet, amelynél csúszás alatt a repülőgépet a csúszással ellentétes irányba bedönteni törekvő bedöntési nyomaték keletkezik.

A bedöntési és a csúszási szögek között teljes egészében meghatározott azonos előjelű kapcsolat van. Kis csúszás és bedőlés esetén ezt a kapcsolatot kifejezhetjük a következő képlettel:

$$\beta \approx \frac{c_y}{c_x} \gamma \quad (10)$$

ahol: c_y -- a repülőgép felhajtóerő tényezője;

c_x^β - a csúszási szög változás egy fokára eső oldali-rányú tényező változása (ez a tényező csak a hangsebesség körüli és a hangsebesség feletti repülési sebesség tartományban változtatja meg észrevehetően értékét).

A bedöntés növekedésének függvényében növekszik a csúszás, következésképpen a bedöntési nyomaték is.

Bedöntési nyomaték tényező:

$$m_x = \frac{M_x}{S q l} \quad (11)$$

Az $m_x = f(\beta)$ görbe dőlése jellemzi a repülőgép keresztirányú statikus stabilitásának fokát. A keresztirányú statikus stabilitás fokát a $\beta=0$ pontban az $m_x = f(\beta)$ görbe érintője dőlésszögének tangensével értékeljük:

$$m_x^\beta = \frac{\Delta m_x}{\Delta \beta} = \operatorname{tg} \eta \quad (12)$$

ahol: m_x^β - keresztirányú statikus stabilitás tényező.

Korszerű repülőgép keresztirányú statikus stabilitása észrevehetően változik mind az állásszög, mind a repülési sebesség függvényében. A leglényegesebb változások nagy állásszögeken, valamint hangsebesség körüli és hangsebesség feletti repülési sebességeken figyelhető meg.

A repülőgép oldalirányú mozgásának dinamikáját a külső zavarok hatására és a repülőgép viselkedését a repülőgép vezetés nemcsak az m_y^β és m_x^β tényezők előjele és nagysága, hanem ezek között meglévő meghatározott arány is meghatározza:

$$\frac{m_x^\beta}{m_y^\beta} = \chi \quad (13)$$

- ezzel a paraméterrel megfelelően jellemezhető a repülőgép oldalirányú egyenetlen mozgása, értéke könnyen meghatározható a berepülés alatt vagy szélcsatornában.

A repülőgép keresztirányú és útirányú kormányozhatóságának elemzésekor rendszerint a repülőgép kétféle kormányozható mozgását vizsgálják: a harmonikus csúszás és beállított forgás a hossz- és függőleges tengely körül, a megfelelő kormány kitérése következtében.

A keresztirányú kormányozhatóság jellemzői:

$$P_{cs}^{\omega} = \frac{\Delta P_{cs}}{\Delta \omega_x} \quad (14)$$

$$P_{cs}^{\gamma} = \frac{\Delta P_{cs}}{\Delta \gamma} \quad \text{vagy} \quad P_{cs}^{\beta} = \frac{\Delta P_{cs}}{\Delta \beta} \quad (15)$$

$$X_{cs}^{\omega} = \frac{\Delta X}{\Delta \gamma} \quad (16)$$

$$X_{cs}^{\gamma} = \frac{\Delta X_{cs}}{\Delta \gamma} \quad \text{vagy} \quad X_{cs}^{\beta} = \frac{\Delta X_{cs}}{\Delta \beta} \quad (17)$$

Az útirányú kormányozhatóság jellemzői:

$$P_{ok}^{\omega} = \frac{\Delta P_{ok}}{\Delta \omega_y} \quad (18)$$

$$P_{ok}^{\gamma} = \frac{\Delta P_{ok}}{\Delta \gamma} \quad \text{vagy} \quad P_{ok}^{\beta} = \frac{\Delta P_{ok}}{\Delta \beta} \quad (19)$$

$$X_{ok}^{\omega} = \frac{\Delta X_{ok}}{\Delta \omega_y} \quad (20)$$

$$X_{ok}^{\gamma} = \frac{\Delta X_{ok}}{\Delta \gamma} \quad \text{vagy} \quad X_{ok}^{\beta} = \frac{\Delta X_{ok}}{\Delta \beta} \quad (21)$$

A repülőgép keresztirányú és útirányú kormányozhatóságának jellemzői magukban foglalják:

- a botkormányon és a láb kormányon lévő erőket és a kitérítésükhöz szükséges mozdulatokat a repülőgép olyan paramétereivel együtt, mint a β csúszási szög, az ω_x bedöntési és ω_y legyezési szögsebesség.

Felhasznált irodalom.

- [1] - J. A. Mihajlov és mások: Szisztyémi avtomaticheskovo i direktivno upravlenijá szamaljotom. Masinosztroenyije, 1971. Moszkva.
- [2] - J. A. Mihajlov és mások: Szisztyémi avtomaticheskovo upravlenijá szamaljotom. Masinosztroenyije, 1971. Moszkva.
- [3] - Под ред. д-ра техн. наук, проф. А. М. Мхитаряна: Динамика полёта. Издательство "Машиностроение", Москва, 1971
- [4] - Под общей редакцией профессора: Н. Ф. Краснова: Прикладная аэродинамика, Москва "Высшая школа" 1974
- [5] - Dr. Csáki Frigyes-Bars Ruth: Automatika Tankönyvkiadó, Budapest, 1969

- [6] - А. С. Шаталов, Д. И. Топчеев, В. С. Кондратъев: Летательные аппараты как объекты управления, Машиностроение, Москва, 1972

IFJ. HORVÁTH DEZSŐ

1988-ban végeztem a Kijevi Repülőmérnöki Főiskolán, 1993-ban a BME mérnök-tanári szakán. A főiskolai oktatásban 1988-tól 1995-ig vettem részt. 1995 augusztus 1-től az 59. Szentgyörgyi Dezső Harcászati Repülőezred repülést gyakorló állomásparancsnoka vagyok. A főiskolai hallgatók szakdolgozatainak kidolgozását irányítottam. Főiskolai jegyzet társszerzője, cikkek szerzője illetve társszerzője vagyok.

Horváth Dezső

főiskolai docens

Repülő Szakág Tanszék, műszertechnikai szakcsoportvezető

**ÖNMŰKÖDŐ SZABÁLYOZÁSOK VIZSGÁLATA ANALÓG SZÁMÍTÓGÉP
SEGÍTSÉGÉVEL: A ROBOTPILÓTA IRÁNYSTABILIZÁLÁSÁT LEÍRÓ
LINEARIZÁLT DIFFERENCIÁLEGYENLET-RENDSZER PROGRAMOZÁSA.**

A cikk a Repülő Szakág Tanszéken található MEDA 40TA analóg számítógép alkalmazására tesz javaslatot az "Automatika", "A villamos gépek" és az "Automatikus vezérlőrendszerek" tantárgy oktatása során. A matematikai modellezés két irányával foglalkozik az analógia és a műveleti elemekből összeállított modellekkel. Vizsgálja a repülőgép semleges tengelyének dőlését egyenáramú motor segítségével. Bemutatja a robotpilóta segítségével végzett iránystabilizálás folyamatát.

Bevezetés

Az analóg számítógépek a matematikai gépek külön osztályát képezik. A feladatok kiinduló adatait fizikai mennyiségekkel fejezik ki (pl. hosszúság, feszültség, szögelfordulás, nyomás, stb) és amelyeket méréssel értékelnek ki. Az analóg számítógépek (folytonos működésű matematikai gépek) alkalmasak a folytonos bemenőmennyiségekkel meghatározott feladatok megoldására. [1, 2, 3, 5, 6, 7, 9, 10]

Az analóg típusú számolóberendezés legegyszerűbb példájának a logarlécet tekinthetjük. A számok logaritmusainak az osztáshosszak felelnek meg. (A digitális berendezések legegyszerűbb példái a golyós számológépek és az asztali számológépek.)

Az analóg számítógépek felhasználhatók lineáris és nemlineáris, állandó és változó együtthatójú differenciálegyenletek és -egyenletrendszerek megoldására, de megoldhatók a parciális differenciálegyenletek és az algebrai egyenletek

is. A szimulálandó rendszer matematikai modellje az esetek többségében differenciálegyenlet. Megfelelő programozással a differenciálegyenletek megoldása a sorozatos integrálásra vezethető vissza, így a differenciálandó egységek mellőzhetőek. A differenciálás művelete zajkiemelő hatása miatt általában kerülendő. [1, 4, 5, 7, 9, 11]

1. A matematikai modellezés.

A matematikai modellezés két irányával foglalkozom. Az első alapján ismert rendszerek analógia alapján, a második alapján külön műveleti elemekből összeállítva építenek modelleket. [7, 9, 10]

a.) Modellezés analógia alapján.

A modellek építésében a rendszerek különböző fizikai természetű jelenségei közti analógiát használják fel. Így az eredeti rendszer viselkedése a fizikai sajátosságaiban tőle különböző modellen vizsgálható.

Szabályozási rendszerek analógia alapján végzett modellezése: a repülőgép semleges tengelye dőlésének vizsgálata egyenáramú motor segítségével.

A repülőgép dőlésének mozgásegyenlete:

$$J_x \frac{d^2 \gamma}{dt^2} = M_x \left(v, \frac{d\gamma}{dt}, \delta_k \right) \quad (1)$$

ahol: γ - a dőlés szöge;

δ_k - a kormány kitérése.

Ha a repülőgép repülési sebessége állandó, és a repülőgépnek az egyensúlyi helyzettől való eltérését vizsgáljuk (az az állapot, amikor a repülőgép mozgását jellemző összes paraméter éppen a beállított értékű), akkor a dőlés lefolyá-

sának lineáris differenciálegyenlete:

$$J_x \frac{d^2 \gamma}{dt^2} + \left(\frac{\partial M_x}{\partial \gamma} \right)_0 \frac{d\gamma}{dt} = - \left(\frac{\partial M_x}{\partial \delta_k} \right)_0 \delta_k \quad (2)$$

ahol: J_x - a repülőgép hossz tengelyre vonatkozó tehetetlenségi nyomatéka;

$\left(\frac{\partial M_x}{\partial \delta} \right)_0$ - a légellenállás nyomatéka;

$\left(\frac{\partial M_x}{\partial \delta_k} \right)_0$ - a botkormány aerodinamikai hatásosságát meghatározó tényező.

A repülőgép izolált mozgásának modellezése.

Használjuk fel az egyenáramú motort a repülőgép dőlés izolált mozgásának modellezésére (1. ábra). Az egyenáramú motor mozgásegyenlete a tengelyre ható terhelés nélkül, a vasvesztés és armatúravisszahatás elhanyagolásával:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_m ; \quad M_m = f(\omega, U_r) \quad (3)$$

ahol: J - a motor tehetetlenségi nyomatéka.

Ha a motor nyomatéki jelleggörbét egyenessel közelítjük, állandó mágneses fluxus mellett (az armatúrakör inductívitasát elhanyagoljuk) a következőt kapjuk:

$$M_m = c_n \phi I_r ; \quad I_r = \frac{U_r - c_e \phi \omega}{R_r} \quad (4)$$

A mozgásegyenlet:

$$J \frac{d\omega}{dt} + \frac{c_e^2 c_M \phi^2}{R_r} \omega = \frac{c_M \phi}{R_r} U_r ; \quad (5)$$

vagy

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \frac{1}{T_p} \frac{d\alpha}{dt} = \frac{c_M \phi}{i R_r J} U_r \quad (6)$$

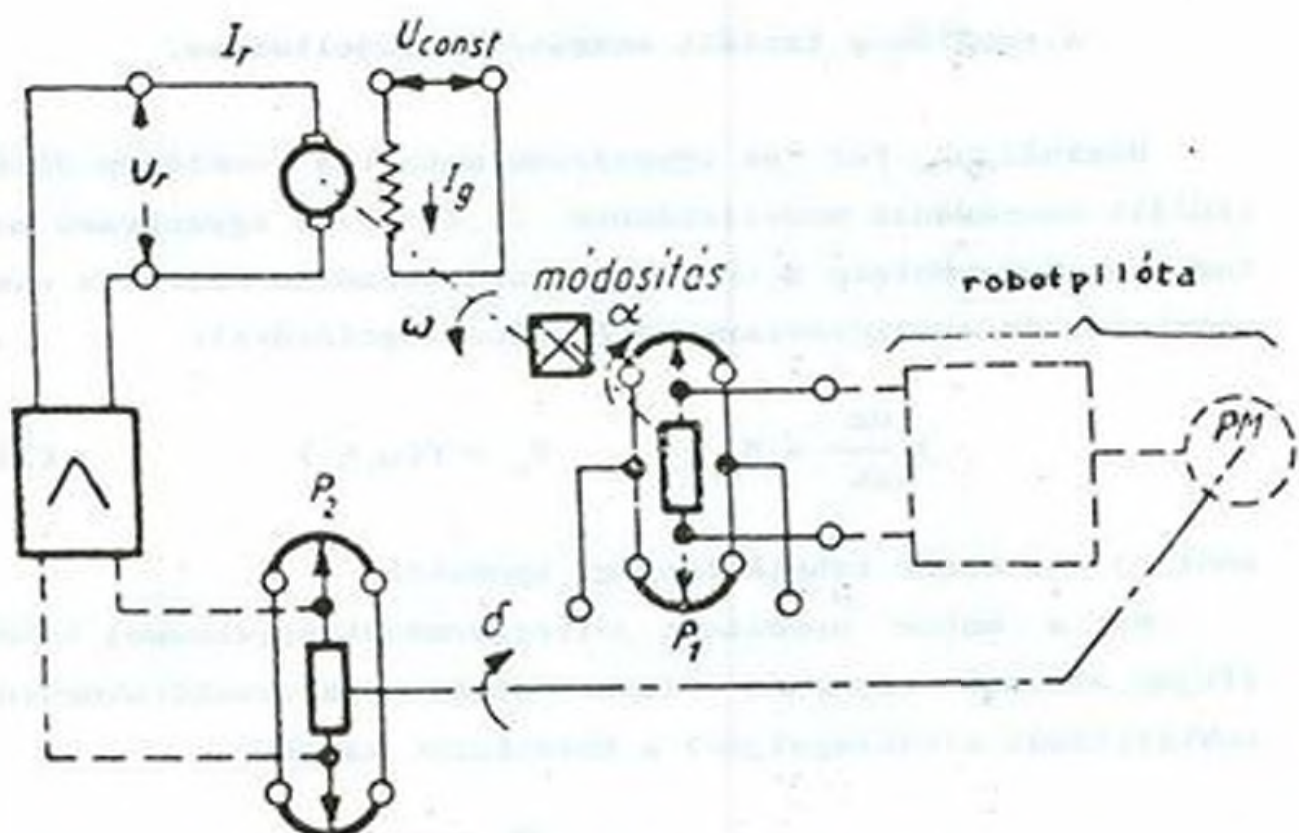
ahol: ϕ - a gerjesztés fluxusa;

$\omega = i \frac{d\alpha}{dt}$ - a motor szögsebessége;

i - fogaskerékátvitel;

$T_p = \frac{R_r I}{c_M c_M \phi^2}$ - a motor felfutási időállandója;

α - a potenciométer elfordulási szöge.



1. ábra

Átrendezve a repülőgép izolált mozgásának egyenletét:

$$\frac{d^2\gamma}{dt^2} + \left(\frac{\partial M_x}{\partial \gamma} \right)_0 \frac{1}{J_x} \frac{d\gamma}{dt} = - \left(\frac{\partial M_x}{\partial \delta_x} \right)_0 \frac{1}{J_x} \delta_x \quad (7)$$

Ha a motor jellemzőit úgy választjuk meg, hogy az

$$\frac{1}{T_p} = \frac{1}{J_x} \left(\frac{\partial M_x}{\partial \gamma} \right)_0 ; \quad \frac{c_M \phi}{R_r J} K_M = \left(\frac{\partial M_x}{\partial \delta_k} \right)_0 \cdot \frac{1}{J_x} ; \quad U_r = - k_M \delta_k ; \quad (8)$$

egyenlőtlenséget elégítsük ki, a P_1 potenciométer csúszkájának elfordulási szöge a dőlés szöget ábrázolja. Így a repülőgép dőlés szögének alakulása és a potenciométer tengelyének elfordulási szögváltozása időben azonos módon folyik le. A modell általános kapcsolása az 1. ábrán látható.

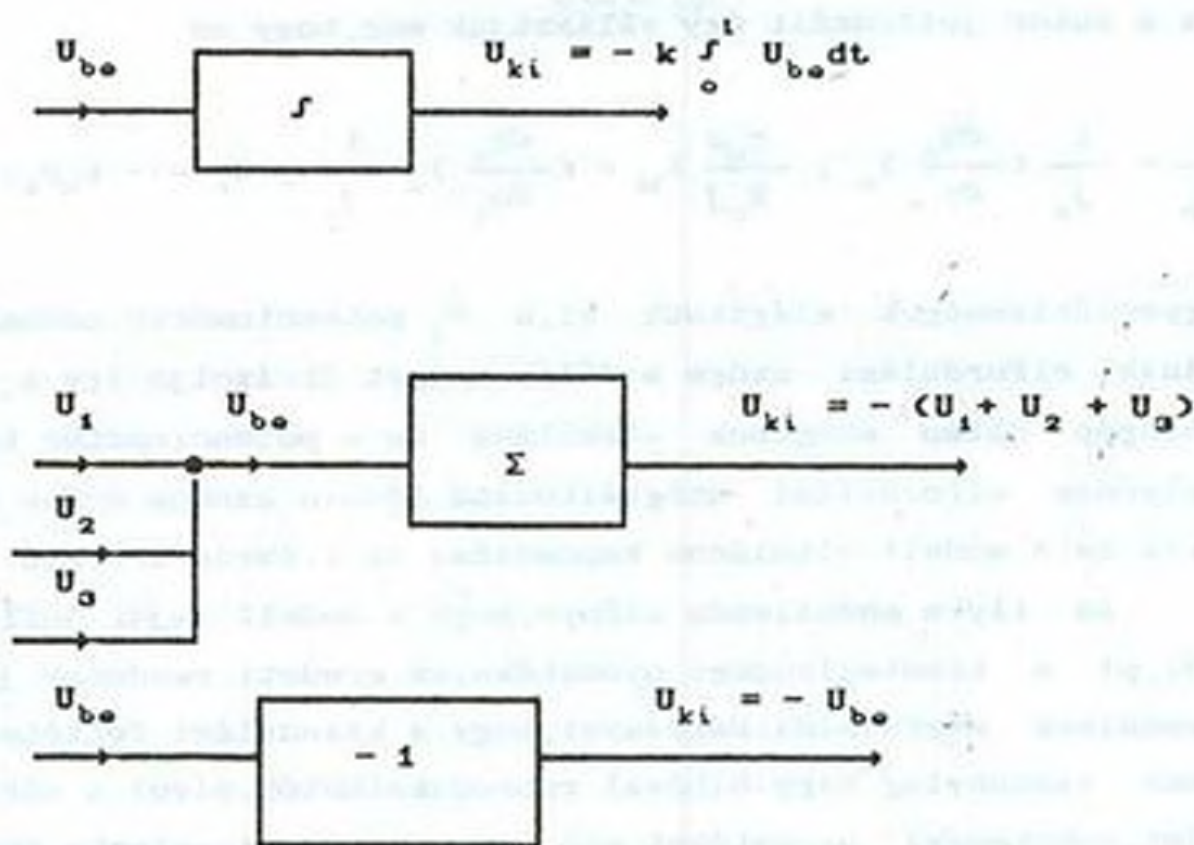
Az ilyen modellezés előnye, hogy a modell saját jellemzői, pl a tehetetlenségi nyomatéka, az eredeti rendszer jellemzőinek megfelelői. Hátrányai, hogy a kiindulási feltételek csak viszonylag nagy hibával reprodukálhatók, mivel a súrlódást, veszteségi nyomatékot stb. nem vesszük figyelembe. Ezzel az analóg modellel legfeljebb másodrendű egyenletet lehet leképezni.

b.) Modellezés számítógépekkel.

Számítógépekkel felépített modellek az olyan elemi matematikai műveletek folytonos megvalósításán alapulnak, mint az összeadás, kivonás, szorzás, osztás, differenciálás és integrálás. Az analógai alapján megvalósított modellektől abban különböznek, hogy hiányzik az egyenes fizikai analógia a vizsgált jelenségeket jellemző értékek, és az egyes matematikai műveletek eredményeül kapott értékek között. Ilyen analógia nincs a megvizsgált fizikai rendszerek jellemzői és a modellezőberendezés jellemzői között sem.

Az állandó együtthatójú lineáris differenciálegyenlet megoldási módszere.

A modell a következő műveleti elemeket foglalja magába (2. ábra):



2. ábra

A műveleti elemekkel végzett számításokra oldjuk meg a repülőgép dőlésének mozgásegyenletét (7). A (7) egyenlet a következő alakban írható fel:

$$\frac{d^2 \gamma}{dt^2} = -B_1 \frac{d\gamma}{dt} - B_2 \delta_k \quad (9)$$

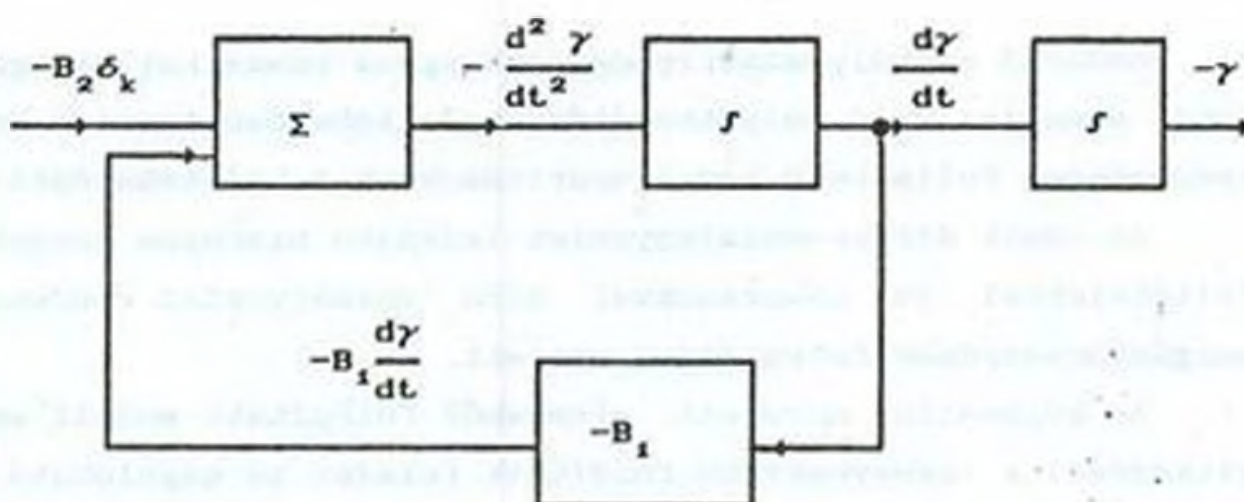
ahol: $\delta_k(t)$, B_1 és B_2 - adott értékek;

$\gamma(t)$ - a keresett függő változó.

A (9) egyenletből következik, hogy a $\gamma(t)$ megkereséséhez kétszer el kell végezni a

$$-(B_1 \frac{d\gamma}{dt} + B_2 \delta_k) \text{ összeg integrálását. A } B_1 \frac{d\gamma}{dt} \text{ ismeretlen összeadandót az első integrálás után kapott érték és}$$

a $-B_1$ együttható szorzataként lehet előállítani. Ez a tag a visszacsatolás segítségével összegződik (3. ábra).

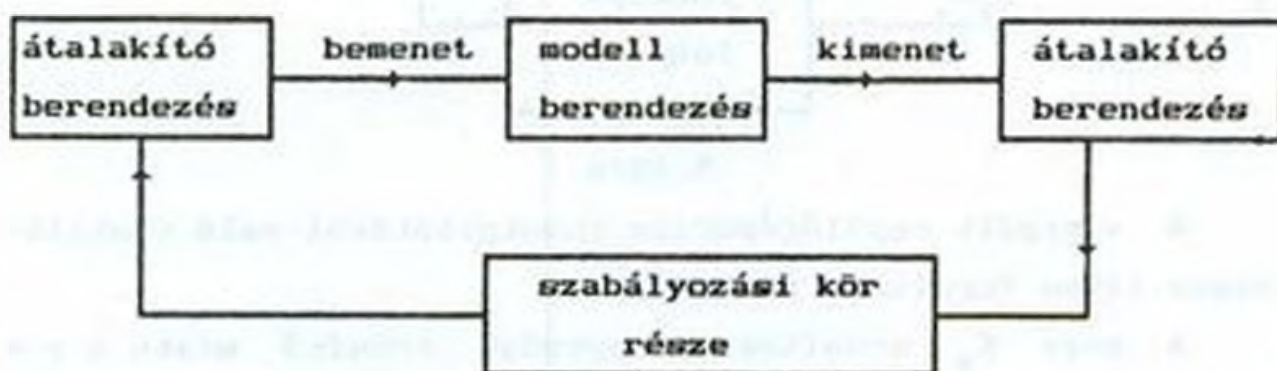


3. ábra

c.) Szabályozóköri elemeket is felhasználó modell (4. ábra).

A szabályozási folyamatok modellezése különálló analóg számítógépelemekkel a differenciálegyenlet numerikus integrálási módszere egy különleges válfajának tekinthető.

A numerikus integrálás elvégezhető az egész zárt szabályozási kör viselkedését leíró teljes differenciálegyenlet rendszerre, valamint a szabályozási körnek csak egy részét jellemző részlet-differenciálegyenletekre. Ekkor a szabályozás zárt körét úgy hozzuk létre, hogy a szabályozási kör hiányzó részeit a modellel helyettesítjük, így a modell és a szabályozóköri elemek együtt alkotnak szabályozási kört.



4. ábra

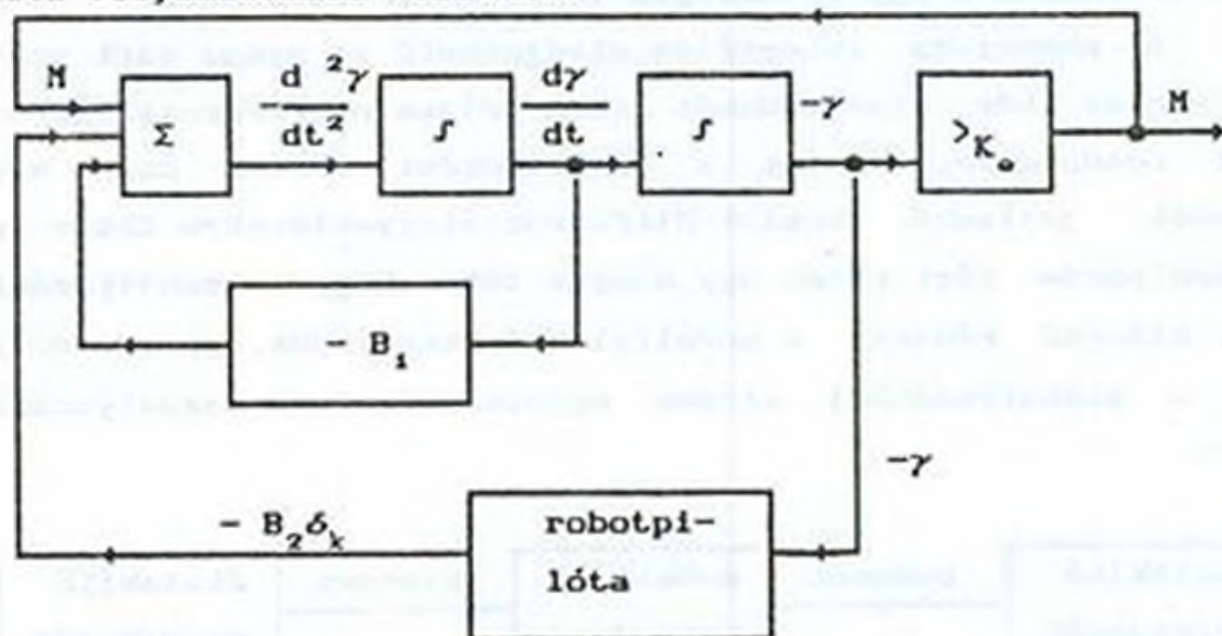
Az önműködő szabályozási rendszerek egyes részeinek vizsgálata modellel való helyettesítés útján, lehetővé teszi a berendezésben fellelhető nem linearitásoknak a kiértékelését.

Az adott differenciálegyenlet leírható bizonyos kezdeti feltételekkel és zavarásokkal bíró szabályozási rendszer mozgástörvényének felkutatása mellett.

A különálló műveleti elemekből felépített modell segítségével a legegyszerűbb fordított feladat is megoldható.

d.) Fordított feladat analóg számítógépen való megoldása (5. ábra).

A fordított feladat lényege azon zavarások jellegének meghatározása, amelyek az adott differenciálegyenletek és kezdeti feltételek esetén a rendszerben meghatározott átmeneti folyamatokhoz vezetnek.



5. ábra

A vizsgált repülőgépdőlés robotpilótával való stabilizálása ilyen fordított feladat.

A nagy K_0 erősítésű tényezőjű erősítő miatt a $\gamma = \gamma_{ki_0}(t)$ egyenlőségnek feltétlenül fenn kell állnia. $\gamma_{ki_0}(t)$

a vizsgált repülőgép valódi körülmények között mért koordinátáinak alakulása/.

Az erősítő kimenő feszültsége a választott léptékben a tárgyra ható zavarási reprodukálja. Megállapítható a különböző szabályozott szakaszokban fellépő, már megengedhetetlen túlterhelések nagysága is.

A modellezés módszerei, különösen a zárt szabályozási kör tényleges elemeit is felhasználó modellezés, az önműködő szabályozási rendszer egy sajátos vizsgálati módszerének tekinthető.

2. Lineáris differenciálegyenlet megoldása.

Az önműködő szabályozási rendszer mozgását leíró differenciálegyenlet az analóg számítógépre felírható:

a.) a keresett koordinátát leíró egyetlen egyenlet alakjában (rendszerint a szabályozott jellemzőt):

$$a_0 \frac{d^n x}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x}{dt} + \dots + a_{n-1} \frac{dx}{dt} + a_n x = b_0 \frac{d^m y}{dt} + b_1 \frac{d^{m-1} y}{dt^{m-1}} + \dots + b_{m-1} \frac{dy}{dt} + b_m y, \quad y = F(t) \quad (10)$$

ahol: $a_0, a_1, \dots, a_n; b_0, b_1, \dots, b_m$ - együtthatók;

x - szabályozott jellemző;

$F(t)$ - a külső zavarás.

b.) elsőrendű differenciálegyenlet alakjában:

$$b_i \frac{dx_i}{dt} + \sum_{k=1}^n a_{ik} x_k + F_i(t) = 0 \quad (11)$$

ahol: $b_i; a_{ik}$ - együtthatók;

$x_1, x_2, \dots, x_l, \dots, x_n$ - a rendszer koordinátái;

$F_l(t)$ - a rendszerre ható zavarások.

c.) a szabályozott szakasz és szabályozó egyenletére különválasztott egyenletrendszerek alakjában.

A szabályozott szakaszra:

$$a_0 \frac{d^n \gamma}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} \gamma}{dt^{n-1}} + \dots + a_n \gamma + k \mu = b_0 \frac{d^m y}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} y}{dt^{m-1}} + \dots + b_m y, \quad y = F(t) \quad (12)$$

A sztatikus szabályozó egyenlete:

$$c_0 \frac{d^a \mu}{dt^a} + c_1 \frac{d^{a-1} \mu}{dt^{a-1}} + \dots + c_{a-1} \frac{d\mu}{dt} + \mu = \epsilon_n \gamma + \epsilon_{n-1} \frac{d\gamma}{dt} + \epsilon_{n-2} \frac{d^2 \gamma}{dt^2} + \dots + \epsilon_1 \frac{d^{n-1} \gamma}{dt^{n-1}} \quad (13)$$

Asztatikus szabályozóra:

$$c_0 \frac{d^a \mu}{dt^a} + c_1 \frac{d^{a-1} \mu}{dt^{a-1}} + \dots + c_{a-1} \frac{d\mu}{dt} = \epsilon_n^* \gamma + \epsilon_{n-1}^* \frac{d\gamma}{dt} + \dots + \epsilon_1^* \frac{d^{n-1} \gamma}{dt^{n-1}} \quad (14)$$

ahol: γ - a szabályozott jellemző;

μ - a szabályozó kimenőjele;

$F(t)$ - a szabályozott szakaszra ható zavarójel;

$a_0, a_1, \dots, a_n; b_0, b_1, \dots, b_m; c_0, c_1, \dots, c_n; \epsilon_1, \dots, \epsilon_n;$

$\epsilon_1^*, \dots, \epsilon_n^*$

$\epsilon_1, \dots, \epsilon_n$ - együtthatók;

ϵ_n - a szabályozó sztatikus erősítési tényezője.
 d.) a dinamikai egyenletek formájában.

Egyhurkos önműködő szabályozási rendszer (6. ábra) mozgásegyenleteinek alakja:

$$T_1 \frac{dx_2}{dt} + x_2 = K_1 x_1;$$

$$T_2 \frac{dx_3}{dt} + x_3 = K_2 x_2;$$

$$T_3 T_4 \frac{d^2 x_4}{dt^2} + T_4 \frac{dx_4}{dt} + x_4 = K_3 x_3; \quad \} (15)$$

$$\frac{dx_5}{dt} = K_4 x_4$$

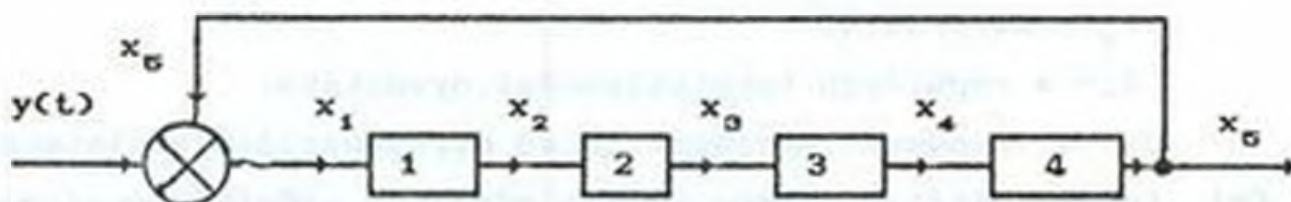
$$x_1 = y(t) - x_5$$

ahol: x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 - a rendszer koordinátái;

$y(t)$ - a külső szabályozó hatás;

T_1, T_2, T_3, T_4 - időállandók;

K_1, K_2, K_3, K_4 - az egyes tagok erősítési tényezői.



$$\text{ahol: } 1 - \frac{K_1}{T_1 s + 1} ; 2 - \frac{K_2}{T_2 s + 1} ; 3 - \frac{K_3}{T_3 T_4 s^2 + T_4 s + 1} ;$$

$$4 - \frac{K_4}{s}$$

6. ábra

e.) a vizsgált fizikai objektum kiindulási differenciálegyenlet-rendszerének alakjában.

A repülőgép iránystabilitásának linearizált¹ egyenlet-rendszere.

A szabályozott szakasz egyenletei:

$$\begin{aligned} \frac{d\theta}{dt} &= A_1\beta + A_2\delta + \frac{F_z}{m \cdot v} ; \\ \frac{d^2\psi}{dt^2} + A_3 \frac{d\psi}{dt} + A_4\beta + A_5\delta &= \frac{M_z}{I_y} ; \\ \theta &= \psi - \beta \end{aligned} \quad \} \quad (16)$$

A robotpilóta egyenlete:

$$T_p \frac{d^2\delta}{dt^2} + h \frac{d\delta}{dt} + \delta = i(\psi + T_1 \frac{d\psi}{dt} + T_2 \frac{d^2\psi}{dt^2}) \quad (17)$$

ahol: ψ - a repülőgép irányszöge;

β - a csúszás szöge;

δ - a botkormány kitérése;

$A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6$ - a repülőgép időállandói;

T_p, h, i, T_1, T_2 - a robotpilóta időállandói;

M_z - zavarónyomaték;

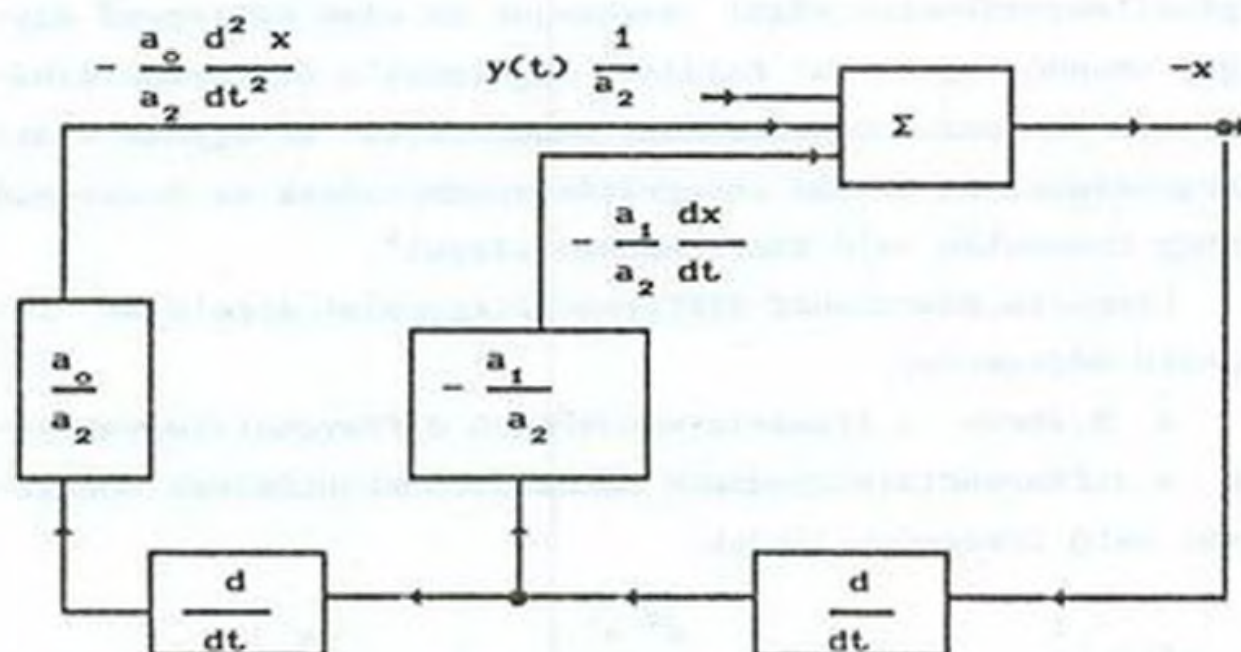
F_z - zavaróerő;

I - a repülőgép tehetetlenségi nyomatéka.

Ha a rendszer mozgását leíró differenciálegyenleteket fel tudjuk állítani, akkor azok a műveleti erősítők segítségével vagy a differenciálhányadosok rendszámának sorozatos növelése vagy csökkentése útján megoldhatók (differenciáló, ill. integráló módszer).

¹ feltételezzük, hogy az irány szerinti mozgás izolált, azaz nem vesszük figyelembe a dőlésnek a repülőgép irány szerinti mozgásra gyakorolt hatását.

Lineáris, másodrendű differenciálegyenlet megoldása differenciáló módszerrel.



7. ábra

A műveleti elemekből úgy építjük fel a kapcsolást, hogy azok sorozatosan differenciálnak, és minden differenciálás után kapott eredmény az első egység bemenetén összegződik (7. ábra). A 7. ábrán a következő másodrendű differenciálegyenletet leképező kapcsolat vázlatja látható:

$$a_0 \frac{d^2 x}{dt^2} + a_1 \frac{dx}{dt} + a_2 x = y(t) \quad (18)$$

a (18) egyenletet x koordinátára rendezve:

$$x = - \frac{a_0}{a_2} \frac{d^2 x}{dt^2} - \frac{a_1}{a_2} \frac{dx}{dt} + \frac{1}{a_2} y(t) \quad (19)$$

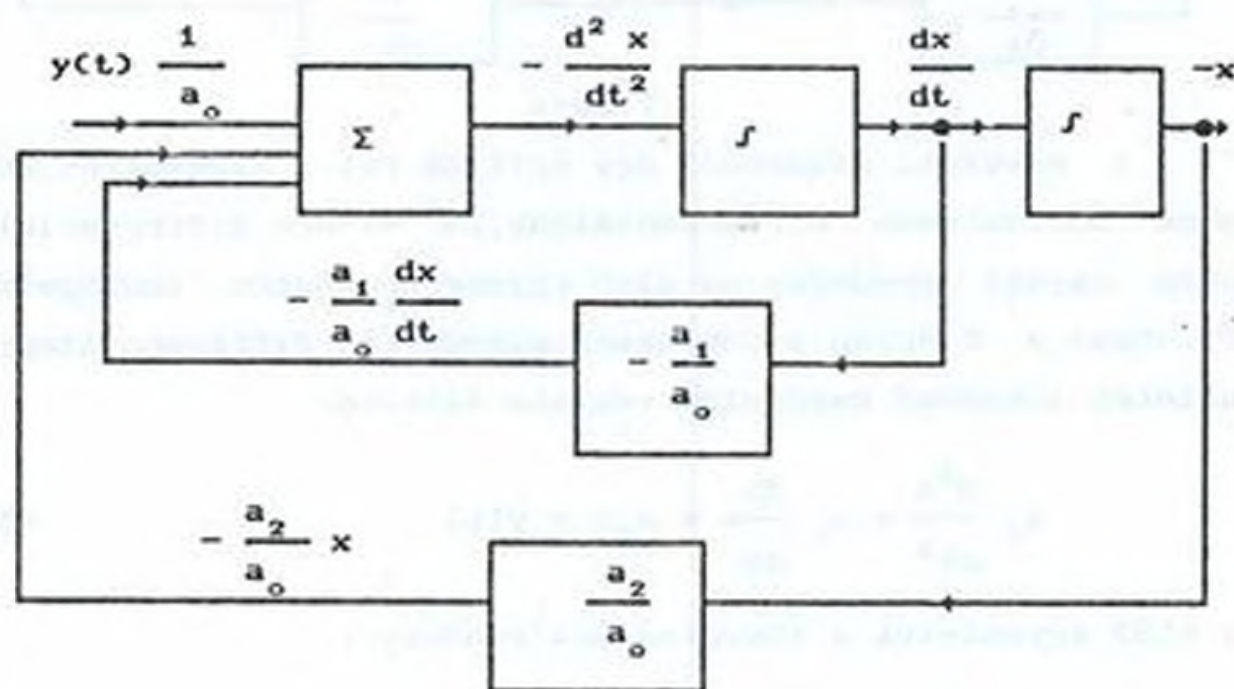
Ha a (19) egyenlet jobb oldalának minden összeadandóját az összegező egységre visszük, akkor az egység kimenetén megkapjuk az x értékét. Ezt az értéket kétszer differenciál-

juk, minden differenciálás eredményét a megfelelő állandó együtthatók $(- \frac{a_0}{a_2}$ és $- \frac{a_1}{a_2}$) szorzó egységeinek segít-

ségével megszorozzuk, végül megkapjuk az első összegező egységre adandó tagokat. A feladat megoldása a differenciálhányadosok rendszámcsökkentésének módszerével az egymás utáni integráláson és minden integrálás eredményének az összegező egység bemenetén való összegezésén alapul².

Lineáris, másodrendű differenciálegyenlet megoldása integráló módszerrel.

A 8. ábrán a lineáris, másodrendű differenciálegyenletnek a differenciálhányadosok rendszámcsökkentésének módszerével való leképezést látjuk.



8. ábra

²a feladat megoldásának ez a módja nem praktikus, mivel soros differenciálás esetén a bemenőjelben mindig jelen lévő hibák megengedhetetlen mértékben nőnek

A kapcsolási vázlat összeállításához a megoldandó egyenletet át kell rendezni; a viszonylag legmagasabb differenciálhányadost az egyik oldalra, a többi összeadandót a jobboldalra rendezzük, és a független változókat a visszacsatolásokon keresztül az összeadandó egységre vezetjük. A feladat leképzésének alapegységei az integráló műveleti elemek.

3. A feladat programozása, megoldása.

Az analóg számítógép segítségével megoldandó differenciálegyenletek megadhatók:

- egy magas rendszámú egyenlettel;
- különféle rendszámú differenciálegyenletekből álló rendszerrel;
- és egy elsőrendű differenciálegyenlet-rendszerrel.

Elvileg a feladatok programozása végezhető a differenciálhányados rendszámnövelés ill. csökkentés módszerével. A rendszámnövelés esetén a keresett függvényből kiindulva oldjuk meg a feladatot, és az egyes műveleti elemeket úgy kapcsoljuk össze, hogy a sorozatos differenciálást és az egyes differenciálhányadosok összeadását valósítjuk meg. A rendszámcsökkentés esetén a keresett függvény legmagasabb rendszámú differenciálhányadosából kiindulva történik a megoldás.

3.1. Programozás a differenciálhányados rendszámcsökkentésével.

A repülőgép robotpilóta segítségével végzett iránystabilizálási folyamatát leíró differenciálegyenlet-rendszer szerkezeti vázlatának összeállítása.

A következő kezdeti feltételekből induljunk ki: a dőlést figyelmen kívül hagyjuk, feltételezzük, hogy a repülőgép $v = \text{const}$ sebességgel mozog, a robotpilóta merev visszacsatolású, valamint csak az első és második differenciálhányadost vesszük figyelembe.

A felírható egyenletek [1, 2, 3, 4, 9]:

$$T_1 \ddot{\psi} + \dot{\psi} = -K_1 \delta - K_2 \beta + f_1(t) \quad (20)$$

$$T_2 \dot{\beta} + \beta = T_2 \dot{\psi} + f_2(t) \quad (21)$$

$$T_2 \ddot{\delta} + \dot{\delta} = K_3 I \quad (22)$$

$$T_3 \dot{I} + I = K_\psi \psi + K_\psi \dot{\psi} + K_\psi \ddot{\psi} - K_4 \delta \quad (23)$$

A (20) egyenlet az Y tengelyre vonatkozó nyomaték egyenlete, a (21) a Z tengelyre vetített összes erő egyenlete, a (22) a kormánymű egyenlete, a (23) az erősítő és érzékelőszerv egyenlete.

ahol: $T_1 = \frac{J}{M_c \dot{\psi}}$

} a repülőgép időállandói;

$$T_2 = \frac{m \cdot v}{2\beta}$$

$$K_1 = \frac{M_p \delta}{M_c \dot{\psi}}$$

} a repülőgép erősítési tényezői;

$$K_2 = \frac{M_c \beta}{M_c \dot{\psi}}$$

$$f_1(t) = \frac{M_b(t) - M_b^0}{M} \quad - \text{zavarónyomaték növekménye;}$$

$$f_2(t) = \frac{z_b(t) - z_b^0}{z^\beta} \quad \text{a zavaróerő növekménye;}$$

T_4 - a kormányberendezés gyorsulásának időállandója;

T_9 - az erősítő időállandója;

K_3 - a kormánymű sztatikus átviteli tényezője;

K_4 - a merev visszacsatolást meghatározó tényező;

$K_\psi, K_{\psi'}, K_{\psi''}$ - az első és második differenciálhányadosok végleges értéktől való eltérésének hatását reprezentáló tényezők;

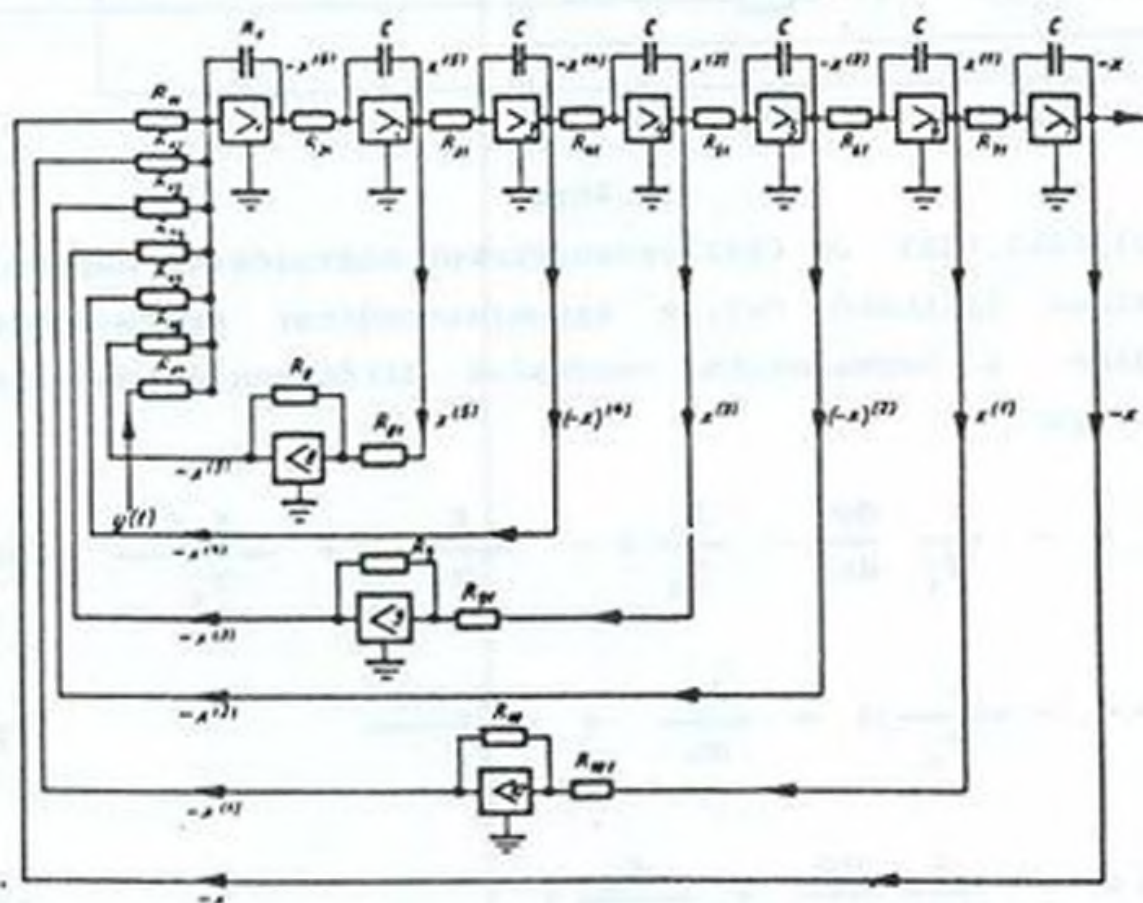
ψ - irányszög eltérése;

β - a siklás szögének eltérése;

δ - a kormány kitérése;

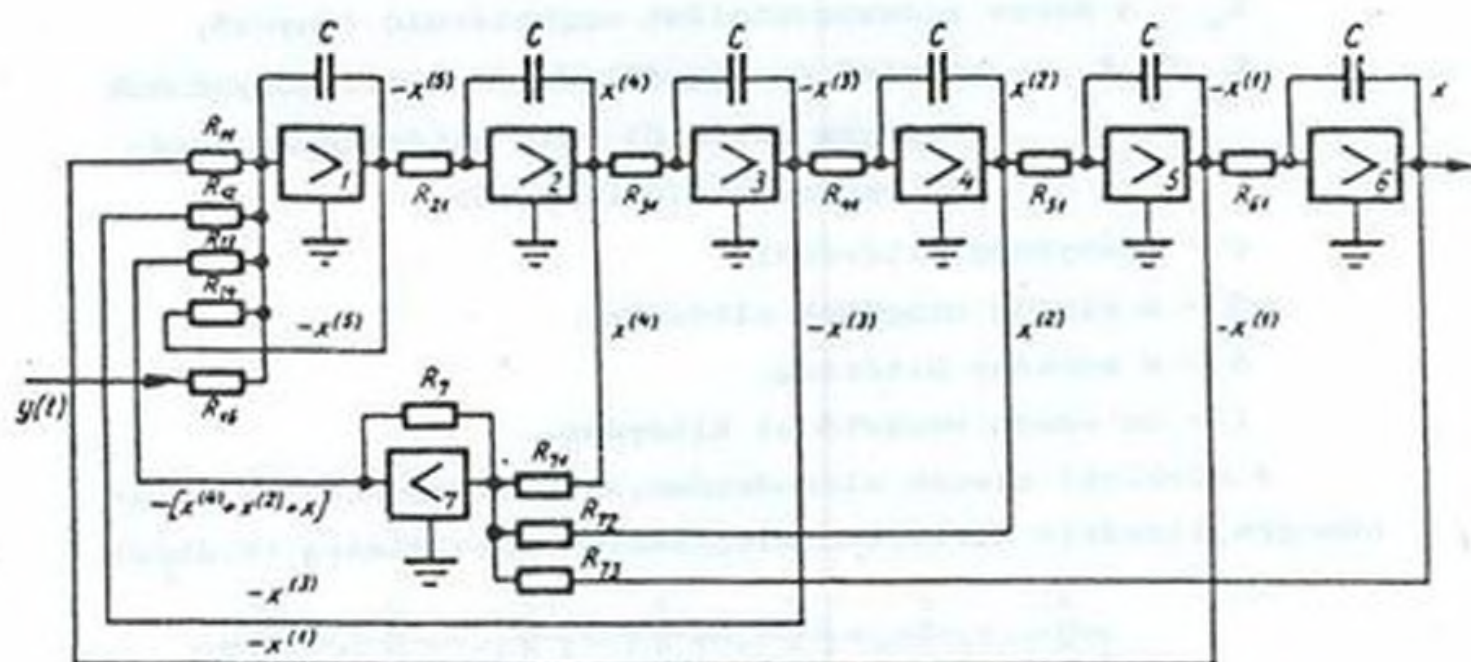
I - az eredő vezérlőjel kitérése.

A műveleti elemek elrendezése, állandó együtthatójú, inhomogén, lineáris differenciálegyenlet megoldására (9. ábra).



9. ábra

A kapcsolás egyszerűsíthető, ha az összegzés és integrálás műveletét az első fokozattal végeztetjük, és egyetlen segédösszegzővel helyettesítjük az eredeti kapcsolás jel fordító műveleti elemeit (8,9 és 10 elem). Az átalakított kapcsolás, a 10. ábrán látható.



10. ábra

A (20), (21), (22) és (23) egyenleteket megvalósító kapcsolás hasonlóan építhető fel, az egyenletrendszer egyes elemeit előzőleg a legmagasabb rendszámú differenciálhányadosra megoldjuk:

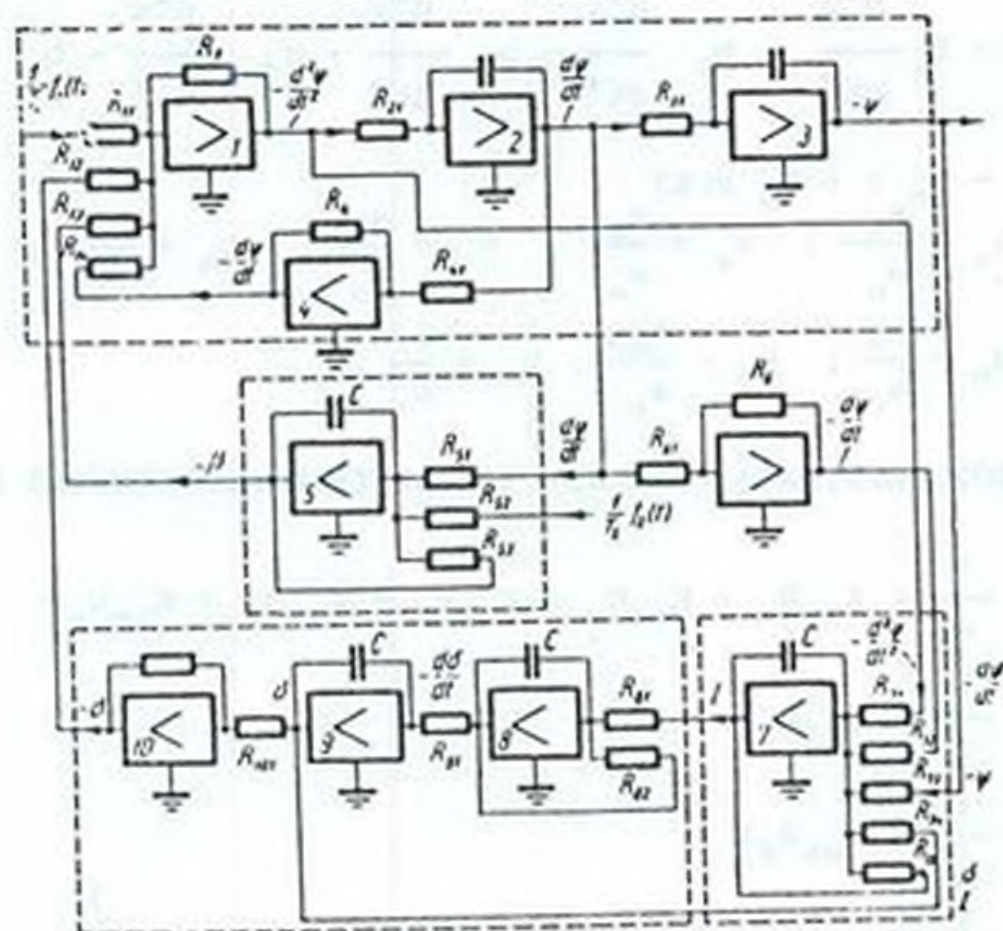
$$\frac{d^2 \psi}{dt^2} = - \frac{1}{T_1} \frac{d\psi}{dt} - \frac{K_1}{T_1} \delta - \frac{K_2}{T_1} \beta + \frac{f_1(t)}{T_1} \quad (24)$$

$$\frac{d^2 \beta}{dt^2} = - \frac{1}{T_2} \beta + \frac{d\psi}{dt} + \frac{f_2(t)}{T_2} \quad (25)$$

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = - \frac{1}{T_4} \frac{d\delta}{dt} + \frac{K_3}{T_4} I \quad (26)$$

$$\frac{dI}{dt} = -\frac{I}{T_3} + \frac{K_\psi}{T_3} \psi + \frac{K_{\dot{\psi}}}{T_3} \frac{d\psi}{dt} + \frac{K_{\ddot{\psi}}}{T_3} \frac{d^2\psi}{dt^2} + \frac{K_\delta}{T_3} \delta \quad (27)$$

A teljes kapcsolási vázlat a 11. ábrán látható.



11. ábra

A szaggatott vonalakkal körülhatárolt részek az egyenletrendszer egyes kiinduló egyenleteinek felelnek meg.

A műveleti elemek kimenő és bemenőjelei közötti összefüggések (a 9. ábra alapján):

A szükséges ellenállásértékek a következő egyenletekből számíthatók ki:

integrátorra: $K_{ij} = \frac{1}{R_{ij}c}$;

differenciátorra: $K_{ij} = R_2 c_{ij}$;

erősítőre: $K_{ij} = \frac{R_2}{R_{ij}}$.

A kimenőjel és bemenőjel közötti összefüggéseket a

$$\frac{d^6 x}{dt^6} = -b_1 \frac{d^5 x}{dt^5} - b_2 \frac{d^4 x}{dt^4} - b_3 \frac{d^3 x}{dt^3} - b_4 \frac{d^2 x}{dt^2} - b_5 \frac{dx}{dt} - b_6 x + b_0 y(t) \quad (28)$$

ahol: $b_1 = \frac{a_1}{a_0}$; $b_2 = \frac{a_2}{a_0}$; $b_3 = \frac{a_3}{a_0}$; $b_4 = \frac{a_4}{a_0}$;

$b_5 = \frac{a_5}{a_0}$; $b_6 = \frac{a_6}{a_0}$; $b_0 = \frac{1}{a_0}$.

és a (20), (21), (22), (23) egyenletek felhasználásával kapjuk:

$$\begin{aligned} U_1 &= -\frac{1}{s} (K_{11} U_5 + K_{12} U_3 + K_{13} U_7 + K_{14} U_1 + K_{15} U_0) \\ U_2 &= -\frac{1}{s} (K_{21} U_1) \\ U_3 &= -\frac{1}{s} (K_{31} U_2) \\ U_4 &= -\frac{1}{s} (K_{41} U_3) \\ U_5 &= -\frac{1}{s} (K_{51} U_4) \\ U_6 &= -\frac{1}{s} (K_{61} U_5) \\ U_7 &= - (K_{71} U_2 + K_{72} U_4 + K_{73} U_6) \end{aligned} \quad (29)$$

ahol: $s = \frac{d}{dt_m}$;

t_m - a berendezés független változója, az idő.

A (29) egyenletekben az U_0 feszültség adja a keresett x változót. Az egyenletrendszert U_0 -ra megoldva:

$$U_0 [s^6 + K_{14}s^5 + K_{13}K_{12}s^4 + K_{12}K_{21}K_{31}s^3 + K_{13}K_{21}K_{31}K_{41}K_{72}s^2 + K_{11}K_{21}K_{31}K_{41}K_{61}s + K_{13}K_{21}K_{31}K_{41}K_{61}K_{73}] = K_{61}K_{51}K_{41}K_{31}K_{21}K_{15}U_0 \quad (30)$$

Az U_0 a kiindulóváltozót bizonyos léptékben adja meg. A változók transzformációs egyenletei:

$$\left. \begin{aligned} x &= M_x U_0 \\ y &= M_y U_0 \\ t &= M_t t_m \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

ahol: M_x - az x értéket és a berendezés U_0 feszültség értékét összekapcsoló lépték;

M_y - az y értékhez tartozó lépték;

M_t - időlépték.

Helyettesítsük a (31) egyenletet a (30) egyenletbe. Ekkor a számítógép átviteli tényezői, léptékei és a kiinduló változók közötti egyenletet kapjuk:

$$\begin{aligned} \frac{d^6 x}{dt^6} + \frac{K_{14}}{M_t} \frac{d^5 x}{dt^5} + \frac{K_{13}K_{21}K_{71}}{M_t^2} \frac{d^4 x}{dt^4} + \frac{K_{12}K_{21}K_{31}}{M_t^3} \frac{d^3 x}{dt^3} + \\ + \frac{K_{13}K_{21}K_{31}K_{41}K_{72}}{M_t^4} \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{K_{11}K_{21}K_{31}K_{41}K_{61}}{M_t^5} \frac{dx}{dt} + \\ + \frac{K_{13}K_{21}K_{31}K_{41}K_{61}K_{73}}{M_t^6} x = \frac{M_x}{M_y M_t^6} K_{15}K_{31}K_{41}K_{51}K_{61}y(t) \end{aligned} \quad (32)$$

A (32) egyenlet együtthatóinak a (28) kiindulóegyenlet együtthatóival meg kell egyezniük. A (28) és (32) egyenletek megfelelő differenciálhányadosainak és jobboldalainak együtthatóit egymással egyenlővé téve:

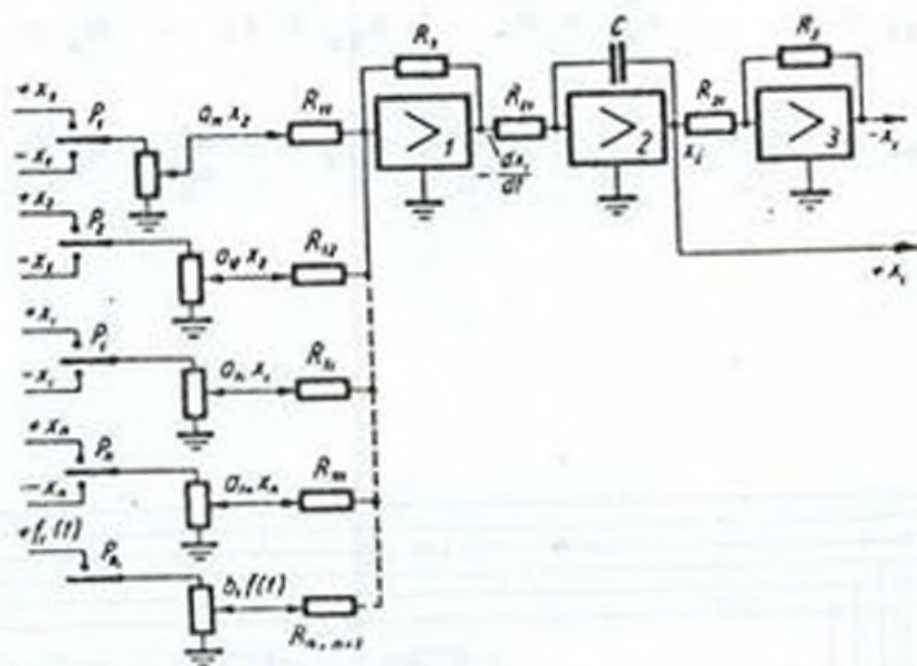
$$\begin{aligned} \frac{K_{14}}{H_t} = b_1; \quad \frac{K_{13}K_{21}K_{71}}{H_t^2} = b_2; \quad \frac{K_{12}K_{21}K_{31}}{H_t^3} = b_3; \\ \frac{K_{13}K_{21}K_{31}K_{41}K_{72}}{H_t^4} = b_4; \quad \frac{K_{11}K_{21}K_{31}K_{41}K_{51}}{H_t^5} = b_5; \quad \} (33) \\ \frac{K_{13}K_{21}K_{31}K_{41}K_{51}K_{61}K_{73}}{H_t^6} = b_6; \quad \frac{K_{13}K_{21}K_{31}K_{41}K_{51}K_{61}}{H_y H_t^6} M_x = b_0. \end{aligned}$$

A kapott összefüggésekből látható, hogy az átviteli tényezők és a léptékek meghatározásában bizonyos önkényesség van, mivel az egyenletek száma kisebb az ismeretlenek számánál. A (32) kifejezések alapján a műveleti elemek átviteli tényezői és léptékei, valamint a kiinduló lineáris differenciálegyenletek együtthatói között közvetlen szabályt lehet megfogalmazni, amelynek alapján ezek az összefüggések a programként elkészített kapcsolási vázlat alapján közvetlenül felírhatók.

3.2. Mátrix-elrendezésű számítógépek. [1, 2, 3, 4, 8]

$$\text{Ha a rendszert } \frac{dx_i}{dt} = - \sum a_{ij} x_j + b_j f(t) \quad (34)$$

alakú elsőrendű differenciálegyenlet-rendszer írja le, az összes egyenletet azonos elrendezésű kapcsolat reprodukálja (12. ábra).



12. ábra

Ez lehetővé teszi, hogy a számítógépeken a műveleti elemeket egyszer s mindenkorra összekapcsolják és így a feladat programozása, a 13. ábrán az

$$a_0 \frac{d^3 x_1}{dt^3} + a_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + a_2 \frac{dx_1}{dt} + a_3 x_1 = f_3(t) \quad (35)$$

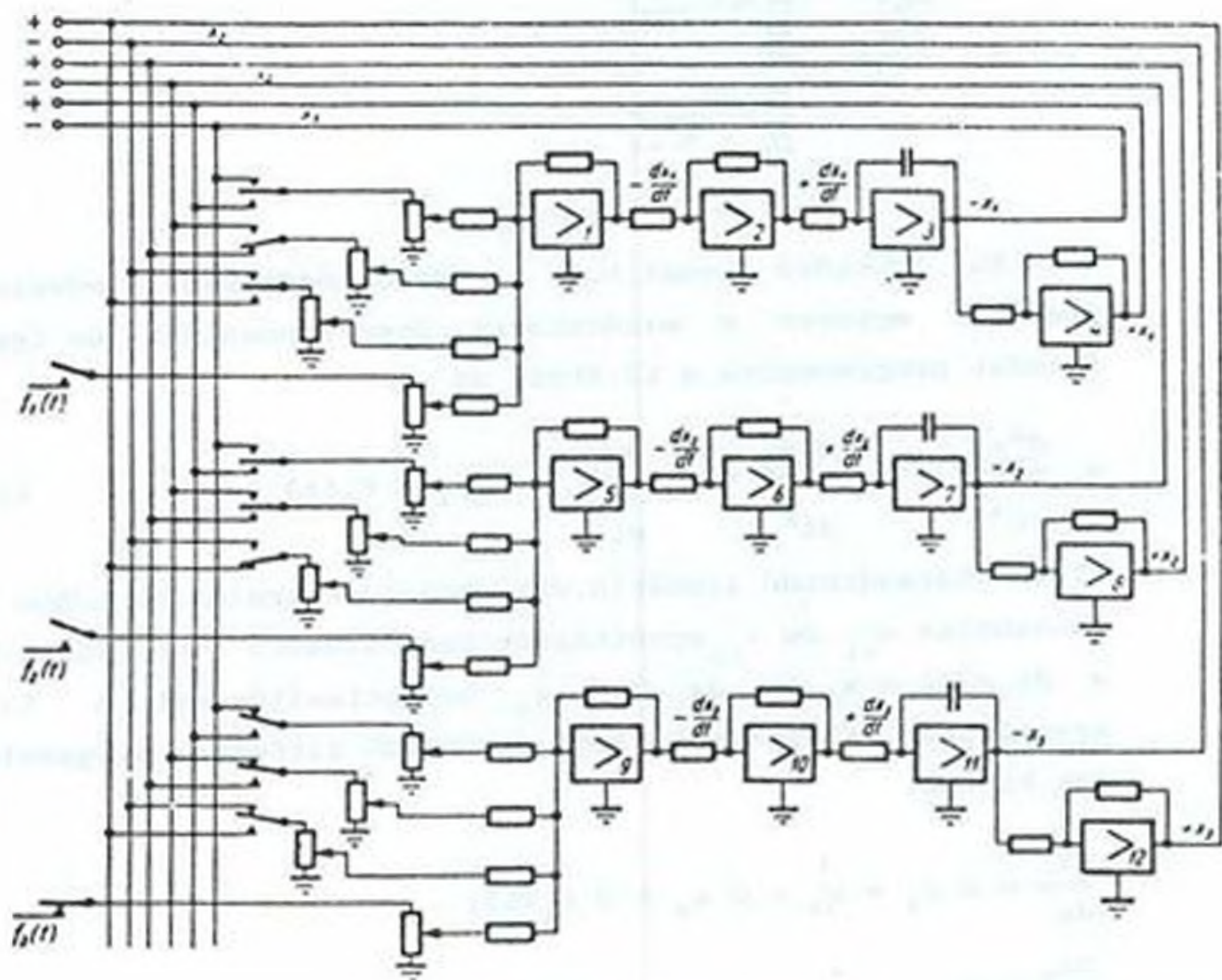
alakú harmadrendű, lineáris, differenciálegyenlet esetében is látható, az a_{ij} és b_{ij} együtthatók beállítására redukálódik. Ha a $dx_1/dt = x_2$ és $dx_2/dt = x_3$ helyettesítéseket a (34) egyenletben elvégezzük, három elsőrendű differenciálegyenletet kapunk:

$$\frac{dx_1}{dt} = 0 x_1 + x_2 + 0 x_3 + 0 f_1(t);$$

$$\frac{dx_2}{dt} = 0 x_1 + 0 x_2 + x_3 + 0 f_2(t);$$

$$\frac{dx_3}{dt} = -\frac{a_3}{a_0} x_1 - \frac{a_2}{a_0} x_2 - \frac{a_1}{a_0} x_3 + \frac{1}{a_0} f_3(t).$$

ahol: $a_{11} = 0; \quad a_{12} = 1; \quad a_{13} = 0; \quad b_1 = 0;$
 $a_{21} = 0; \quad a_{22} = 0; \quad a_{23} = 1; \quad b_2 = 1;$
 $a_{31} = -\frac{a_3}{a_0}; \quad a_{32} = -\frac{a_2}{a_0}; \quad a_{33} = -\frac{a_1}{a_0}; \quad b_3 = \frac{1}{a_0};$



13. ábra

A feladat programozásakor nem kell a tömbvázlatot elkészíteni, elegendő csak az a_{ij} és b_i együtthatók értékeit meghatározni és ezeket a megfelelő potenciométerek segítségével beállítani.

Mátrix-programozás. [3,4,5,8]

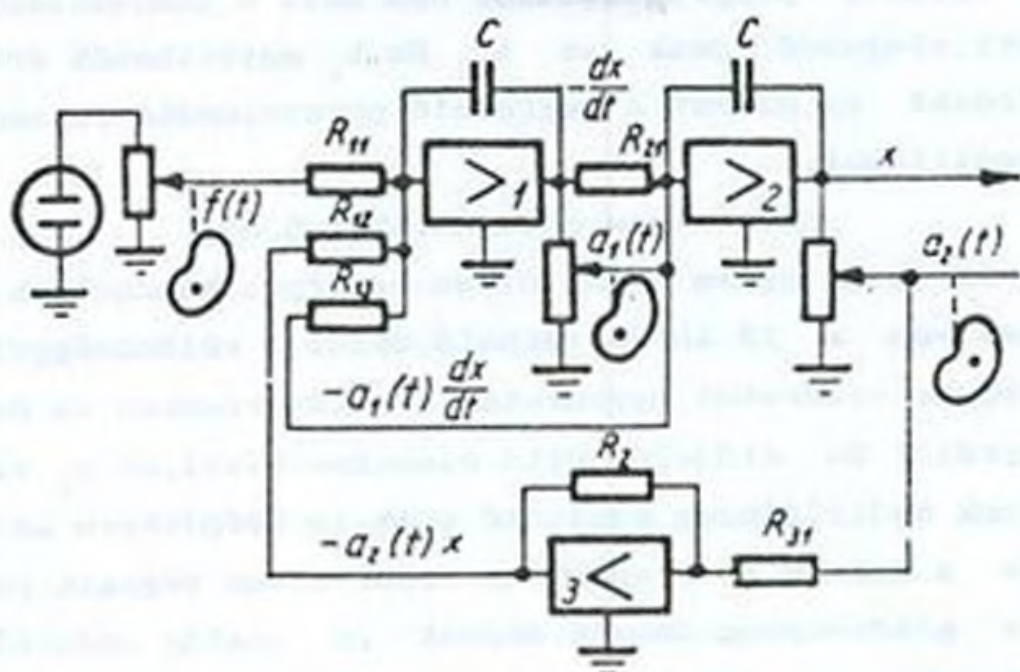
A 13. ábrán három darab olyan egységet kapcsoltak össze mint amilyen a 12. ábrán látható, azzal a különbséggel, hogy minden egyes elsőrendű egyenletet megoldó részben az összegző, integráló és előjelfordító elemeken kívül, az x_i változó léptékének beállítására szolgáló elem is beépítésre kerül (a 13. ábrán a 2, 6 és 10 elemek). Az ilyen elven végzett programozás a mátrix-programozás. Azokat az analóg számítógépeket, amelyekben a műveleti elemeket előre, elsőrendű differenciálegyenleteket megoldó elemekké egyesítik, mátrix-elrendezésű gépekként nevezik.

A mátrix-elven végzett programozás biztosítja, hogy az egyes műveleti elemeket önműködően helyes sorrendben kapcsolják egymáshoz, és kijelöli az egyenletek átalakításának azt az útját, amelyen haladva a műveleti elemek egyes jellemzői nem rontják a teljes berendezés stabil működését. A mátrix-elven végzett programozás a berendezésben szükséges műveleti elemek számát megnöveli.

3.3. Műveleti elemek elrendezése lineáris, változó együtthatójú differenciálegyenlet megoldására.

[1,2,3,4,8,10,11]

A változó együtthatójú differenciálegyenleteket megoldó, műveleti elemekből felépített kapcsolás a 14. ábrán látható. Ebben az esetben gondoskodni kell arról, hogy a megfelelő elemek kimenetére vezérelt potenciométereket lehessen kapcsolni. A vezérlést variátorokkal³ oldják meg.



14. ábra

Felhasznált irodalom

- [1] - Dr. Szabó Imre: Rendszer- és irányítástechnika
Tankönyvkiadó, Budapest, 1985.
- [2] - Dr. Csáki Frigyes: Irányítástechnikai kézikönyv
Műszaki Könyvkiadó, Budapest 1977.
- [3] - A. A. Красовский: Системы автоматического управления
полетом пилотируемых летательных аппаратов
Издание В. В. И. А. Ж. Е. Жуковского, Москва, 1971.

³Adott időfüggvény szerint változó együtthatókat előállító berendezéseket együttható-variátoroknak nevezzük. Elektromechanikus és elektronikus együttható-variátorokat különböztetünk meg. A legegyszerűbb elektromechanikus együttható-variátorok a lineáris potenciométerek, amelyek csúszkáját szalag és megfelelő profilú excenter mozgatja. Az excenter profilja az adott időfüggvényt reprodukálja. Az excenter-variátor, ha az excenter profil elkészítési pontossága $\pm 0,1 \dots 0,5 \text{ mm}$ közé tehető, és az excenter legnagyobb sugara 60 mm , akkor $\pm 0,16 \dots 0,33 \%$ hibával működik.

- [4] - В. Я. Коган: Электрические моделирующие устройства и их применение для исследования систем автоматического регулирования
Москва, 1959, Государственное Издательство Физико-математической Литературы
- [5] - Справочник по аналоговой вычислительной технике
Издательство "Техника", Киев, 1975.
- [6] - Programmierung und Lösung von Aufgaben auf den Transistorisierten Analogrechnern MEDAT
Bratislava, 1967.
- [7] - Dipl. ing K. Kabes: Die Modelleinheiten AAT und ihre Anwendung zum Aufbau von Einzweck-Analogrechnern
Bratislava, 1968.
- [8] - Gábrriel László: MEDA T analóg számítógépcsalád
FÜTI Rotaüzem, 1969.
- [9] - Dr. Csáki F. - Bras R: Automatika
Tankönyvkiadó, Budapest, 1969.
- [10] - Somló J. - Pham Thuong Cat: Lineáris és nemlineáris szabályozási rendszerek számítógépes tervezése
Akadémia Kiadó, Budapest, 1983.
- [11] - Francis H. Raven: Az önműködő szabályozás
Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1965.

Dr. Pokorádi László
Zrinyi Miklós Katonai Akadémia
Haditechnikai Tanszék

REPÜLŐGÉPEK PNEUMATIKUS RENDSZEREINEK
MATEMATIKAI MODELLEZÉSÉRE ÉPÜLŐ
DIAGNOSZTIKÁJA

a szerző

AIRDIAG'95
6-7 December 1995, Warsaw

konferencián tartott

DIAGNOSTICS OF THE AIRCRAFT PNEUMATIC SYSTEM
BASED ON MATHEMATICAL MODELLING

előadása anyagának magyar nyelvű változata

A tanulmány a repülőgép levegőrendszer matematikai modelljének felállítását és diagnosztikai alkalmazásának lehetőségeit mutatja be a Mi-8 típusú helikopter fék-levegőrendszer vizsgálatán keresztül.

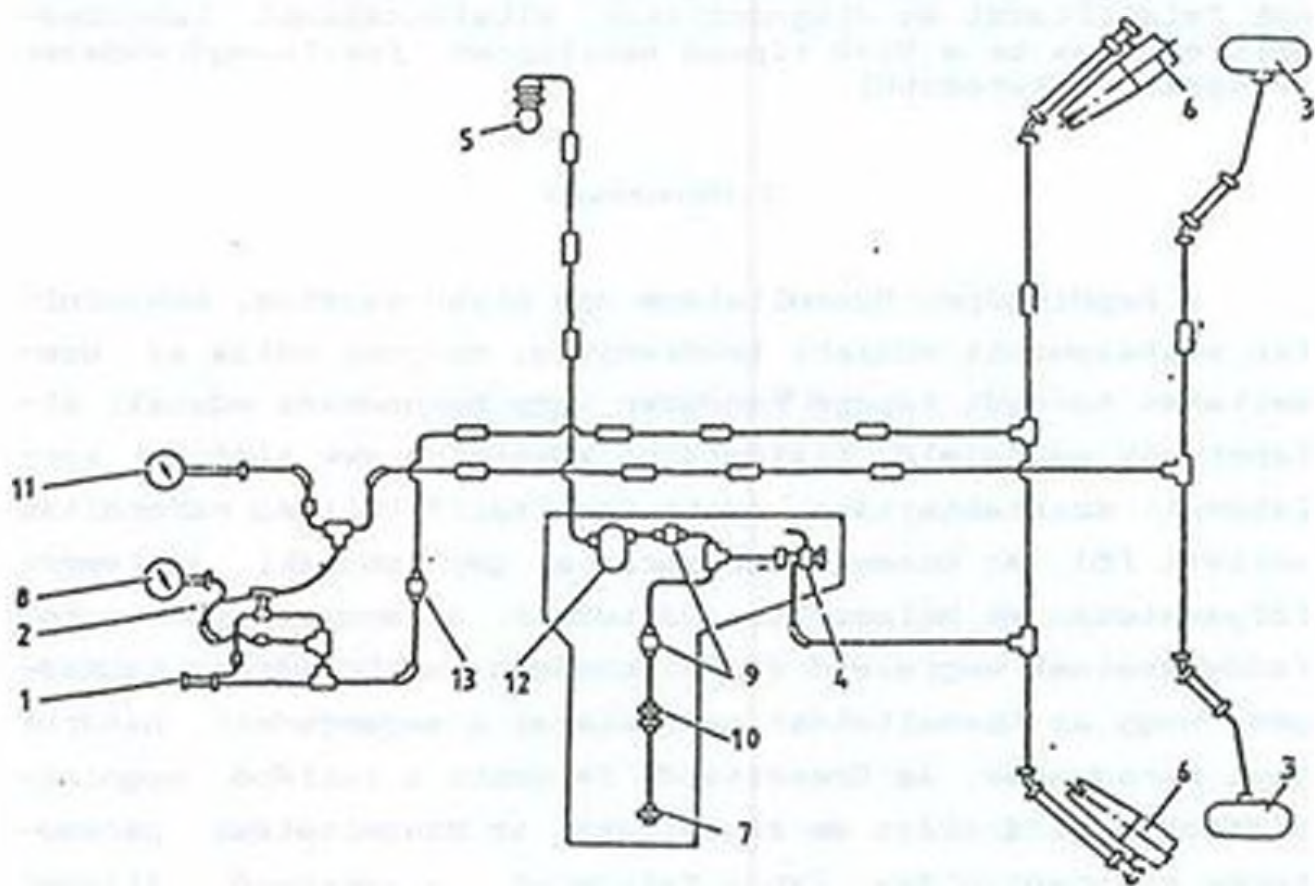
1. Bevezetés

A repülőgépek üzemeltetése egy olyan sajátos, bonyolult szabályozott műszaki tevékenység, melynek célja az üzemeltetés tárgyát képező rendszer vagy berendezés műszaki állapotának megfelelő, biztonságos követelmények alapján korlátozott szintentartása, adott (maximált) költség ráfordítás mellett [6]. Az üzemeltetés során a gép műszaki jellemzői folyamatosan és halmozottan változnak. A rendszereinek, berendezéseinek megfelelő és biztonságos működéséhez szükséges, hogy az üzemeltetési paraméterek a megengedett határok közt maradjanak. Az üzemeltetők feladata a fellépő meghibásodások behatárolása és kijavítása, az üzemeltetési paraméterek szintentartása. Ezt a feladatot - a korszerű, állapot szerinti üzemeltetési stratégia megvalósításakor - az adott rendszer műszaki állapotának periódikus ellenőrzésére épülő

optimális irányításával lehet megoldani. Ennek megoldásához - a rendszer, berendezés üzemi állapotának minél pontosabb meghatározásához - szükséges az üzemeltetési jellemzők mérése, a mért adatok rögzítése, valamint értékelése. Napjainkban a matematikai diagnosztikai, identifikációs módszerek kidolgozása és alkalmazása szükséges gyakorlati feladattá vált [4].

Munkánk során célul tűztük ki a gázturbinás hajtóművek-nél (például [1]) alkalmazott diagnosztikai módszerek átültetését a hidraulikus és pneumatikus rendszerek vizsgálatára. Ezt a Mi-8 helikopter féklevégőrendszer matematikai diagnosztikai vizsgálatán keresztül mutatjuk meg.

2. A Mi-8 helikopter levegőrendszere



1. ábra

A Mi-8 helikopter levegőrendszere

A Mi-8 közepes helikopter levegőrendszerének feladata a főfutóművek kerekeinek fékezése. A rendszer elvi rajzát az 1. ábra mutatja be [2].

A baloldali helikoptervezető botkormányán elhelyezett fékkar sodronyhuzalon keresztül működteti az "1"-jelű PU-7 vezérlő berendezést. Ez a nyomáscsökkentő szelep a tartályban lévő nagynyomású levegőt leredukálva biztosítja a vezérlő nyomást a "2"-jelű UPO-3/2 redukciós gyorsító számára, a fékkar állás függvényében. A redukciós gyorsító biztosítja - a vezérlő nyomás függvényében - a fékmunkahengerekben a féklevegő nyomás kialakulását, valamint - a vezérlő nyomás megszűnésekor - a gyors kifizékezést. A főfutóművek "3"-jelű fékberendezései kétfékpofások, kétmunkahengeres dobrendszerek, fékrések állíthatóak.

3. A matematikai modell felállítása

A matematikai modell a vizsgált rendszerben lejátszódó fizikai folyamatok matematikai egyenletekkel való leírását és az egyenletek megoldását jelenti.

A matematikai modell felállítását az adott rendszer funkcionális egységekre való felbontásával kell kezdeni. Az így kapott önálló egységeknél meg kell határozni a be-, illetve a kimenő jellemzőket, fel kell tárni a közöttük lévő kapcsolatokat és azt leírni matematikailag [8]. Pneumatikus rendszerek esetén ezek az egyenletek alapvetően:

- a szabályozást, vezérlést végző berendezések elemire ható erők vagy nyomatékok egyensúlyát - (1) - (3) egyenletek;
- tároló elemek esetén pedig az anyagmegmaradást - (4) egyenlet

fejezik ki [3].

PU-7 vezérlőberendezés:

$$p_v = \frac{F_{r1} - F_{r2} + A_d p_H - A_k (p_t - \Delta p)}{A_d} \quad (1)$$

UPO-3/2 redukciós gyorsító:

$$p_f = \frac{p_v A_1 - p_H A_2 - F_{rgy}}{A_3} \quad (2)$$

fékberendezések:

$$F_j = \left[(p_f - p_H) A_f i_{fj} - \left(\frac{i_{rj}}{i_{rj}} \right)^2 z_j s_j - \frac{i_{rj}}{i_{rj}} F_{roj} \right] \mu_j \quad (3)$$

levegőtartály:

$$\Delta p = p_t - \left[p_t V_t - (p_v - p_H) V_v - \sum_{j=1}^4 i_{fj} z_j A_{fj} + \right. \\ \left. + V_{cs\sigma} (p_f - p_H) \right]^x p_t^{1-x} V_t^x \quad (4)$$

ahol:

- p_v - vezérlő nyomás;
- p_f - féklevegő nyomás;
- p_H - környezeti nyomás;
- p_t - tartálynomás a fékezés előtt;
- p_2 - tartálynomás a fékezés után;
- F_{r1} - nyomáscsökkentő redukciós rugójának ereje;
- F_{r2} - nyomáscsökkentő "2" rugójának ereje;
- F_{rgy} - redukciós gyorsító rugójának ereje;
- F_{roj} - a j -edik fékpofa visszatérítő rugójának előfe-
- sztítése;

- s_j - a j -edik fékpofa visszatérítő rugójának merevsége;
- A_d - nyomáscsökkentő dugattyú felülete;
- A_k - nyomáscsökkentő kis beeresztő szelepének felülete;
- A_j - redukciós gyorsító j -edik dugattyú felülete;
- z_j - a j -edik fékpofa rése;
- i_{fj} - a j -edik fékpofa "dugattyú-fékpofa" áttétele;
- i_{rj} - a j -edik fékpofa "dugattyú-rugó" áttétele;
- μ_j - a j -edik fékpofa súrlódási tényezője;
- V_t - a tartály térfogata;
- V_v - vezérlőnyomású rendszer rész térfogata;
- $V_{cső}$ - csővezeték térfogata;
- x - a levegő adiabatikus kitevője.

Az így kapott egyenletek a diagnosztikai modell felállításához linearizálni kell [5]. Ekkor egy olyan lineáris egyenletet, illetve egyenletrendszert kapunk, amely a különböző változók relatív változásai közti kapcsolatot írja le a

$$\delta x_i = \frac{dx_i}{x_{i0}} \quad (5)$$

módon, ahol:

- x_{i0} - az i -edik (jelen esetben független) változó vizsgált munkaponthoz tartozó névleges értéke.

A változókat ezután szétválasztjuk független (δx) és függő (δy) változókra. Az átalakított egyenletrendszer röviden az alábbi mátrix alakban írható fel:

$$A \delta x = B \delta y \quad (6)$$

Az egyenletet δy -ra átrendezve kapjuk, hogy

$$\delta y = A^{-1} B \delta x = D \delta x \quad (7)$$

ahol:

- A - a független változók együttható mátrixa;
- =
- B - a függő változók együttható mátrixa;
- =
- D - a rendszer diagnosztikai mátrixa.
- =

Az előzőekben felállított lineáris matematikai modell alkalmazásához szükséges az egyenletekben használt változók értékeinek meghatározása. Ezért a vizsgálatunk során a paraméterértékek meghatározása érdekében a berendezéseket szét szereltük és az alkatrészein méréseket végeztünk. Meghatároztuk a működés szempontjából lényeges geometriai méreteket. A rendszerben szereplő rugók rugómerevségeit - húzó vagy nyomó - méréssel állapítottuk meg. Ezzel egy időben a független változók szórásait a fent említett mérések eredményeinek kiértékelésével határoztuk meg. Az eloszlásokat az általános mérnöki gyakorlat és a mérések tapasztalatai alapján vettük fel.

A felállított matematikai modell alkalmazása előtt ellenőrzés céljából, a még nem linearizált modell segítségével számításokat végeztünk. A számításoknál kiinduló adatként a vizsgálat során elvégzett mérések adatai lettek felhasználva. Ezeket a méréseket a matematikai modell ellenőrzésére, illetve az állapotbecsléshez - rendszerben lévő helikoptereken - hajtottuk végre. Mivel a matematikai modell egy többismeretlenes implicit függvény, ezért megoldása iterációval történt.

Figyelembe véve a felhasznált - a Mi-8 helikopteren alkalmazott - műszerek pontosságát és érzékenységét az eredmények elfogadhatóak, mivel 4% maximális relatív eltérést tapasztaltunk.

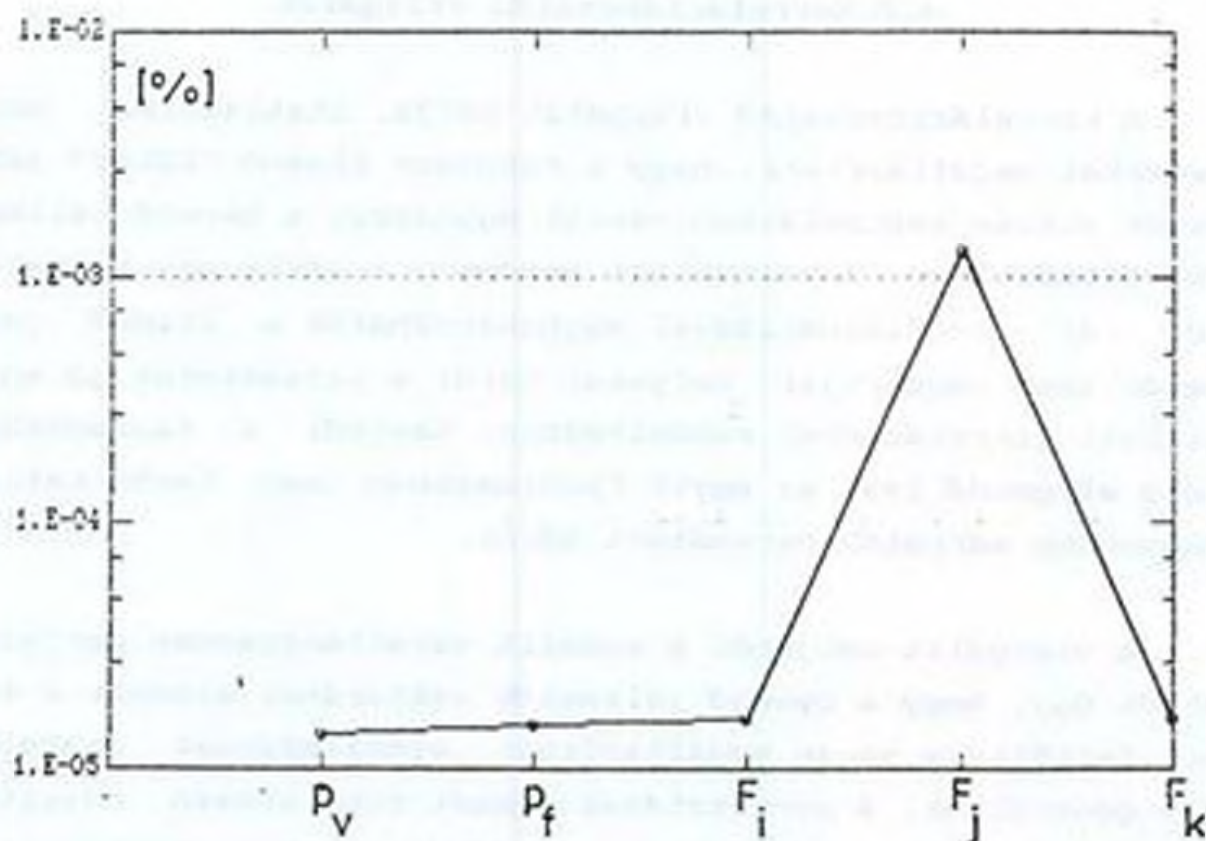
4. Modellvizsgálat

Az felállított és feltöltött matematikai modell felhasználható:

- érzékenység vizsgálat
(szimulált anomáliák hatásainak vizsgálata);
- korrelációs család vizsgálat
(méréndő paraméter kiválasztása);
- paraméter identifikáció
(a rendszer műszaki állapotának becslése)

elvégzésére, valamint - ezeken keresztül - az optimális üzemeltetési stratégia kiválasztására.

4.1. Érzékenységvizsgálat



2. ábra
Érzékenységi grafikon

Az érzékenységvizsgálat lényege, hogy a független változók értékeinek megváltoztatásával szimuláljuk az adott részegység vagy alkatrész meghibásodását, üzemi elhasználódását [7]. A (7) egyenlet alapján meghatározható, hogy miként fog változni a függő változók vektora, azaz a szimulált változásra mennyire érzékenyek a függő változók, illetve a rendszer. Példaként a 2. ábra az egyik pofa fékrésének 1%-os csökkenésének hatását szemlélteti. Itt fontos megjegyezni, hogy a fékrés 1%-os eltérése a gyakorlatban $4\mu\text{m}$ -t jelent, ami az általunk végzett mérések eltéréseinek töredéke.

A vizsgálat alapján kijelenthető, hogy a rendszer nagyon érzéketlen az üzemeltetési paraméterek eltéréseire. Ez az üzemeltetés szempontjából jó, mivel a belső jellemzők nagy eltérései engedhetők meg, azaz hosszabb javítás, karbantartások közti üzemidőket lehet megállapítani.

4.2. Korrelációs család vizsgálat

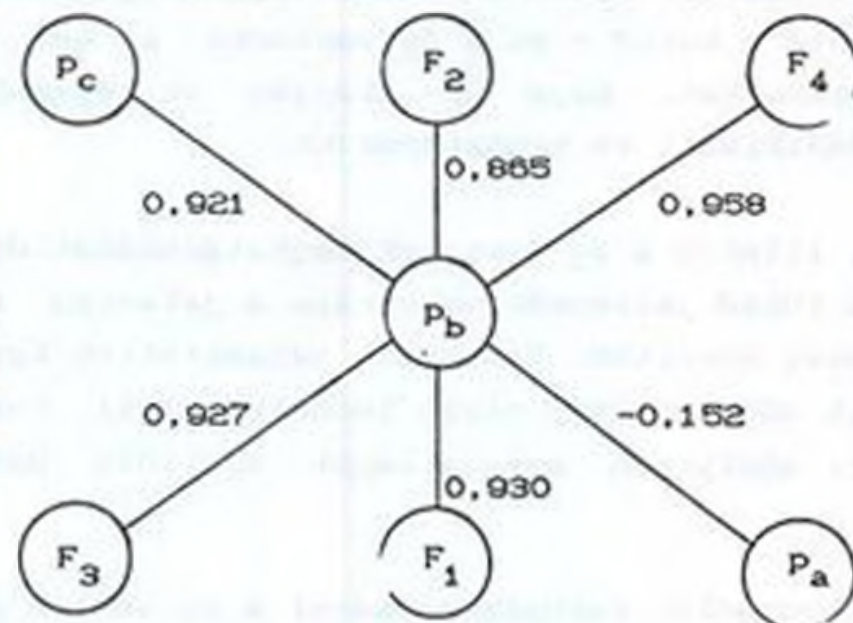
A korrelációs család vizsgálat célja statisztikai módszerekkel megállapítani, hogy a rendszer kimenő "külső" jellemzői milyen kapcsolatban vannak egymással a bemenő jellemzők változásakor. A vizsgálati eredmény - amely egy korrelációs grafikon felhasználásával meghatározható a kimenő jellemzők azon csoportjai, melyeken belül a paraméterek jó egymásközi korrelációval rendelkeznek. Ezekből a családokból pedig elegendő csak az egyik (pontosabban vagy technikailag könnyebben mérhető) paramétert mérni.

A vizsgálat céljából a modellt véletlenszerűen gerjesztettük úgy, hogy a bemenő jellemzők vektorának elemeit a modell feltöltése során megállapított eloszlásoknak megfelelően generáltuk. A gerjesztések számát fokozatosan növeltük addig míg az előző mintaszámhoz képest a korrelációmátrix azonos elemei közt a legnagyobb eltérés nem csökkent az 0,01 érték alá. A korrelációmátrixból - (8) egyenlet - megszer-

kesztve a gráfot, határoztuk meg a vizsgált levegőrendszer kimenő jellemzőinek korrelációs családjait.

$$R = \begin{bmatrix} P_v & P_f & F_1 & F_2 & F_3 & F_4 & P_2 \\ 1 & & & & & & \\ 0,921 & 1 & & & & & \\ 0,854 & 0,930 & 1 & & & & \\ 0,785 & 0,865 & 0,802 & 1 & & & \\ 0,851 & 0,927 & 0,860 & 0,812 & 1 & & \\ 0,914 & 0,958 & 0,926 & 0,865 & 0,928 & 1 & \\ -0,154 & -0,152 & -0,147 & -0,119 & -0,156 & -0,153 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

A 3. ábra a rendszer korrelációs gráfját mutatja.



3. ábra

A vizsgálat alapján levonható főbb következtetések:

- a fékezés utáni p_2 tartálynyomást kivéve a kimenő jellemzők erős pozitív korrelációval kapcsolódnak egymáshoz;
- az üzemeltetés során két paraméter mérése célszerű, ezek:
 - a fékezés utáni p_2 tartálynyomás;

Ennek a mérése - mivel a műszer nem csak a fékezés utáni

tartólynyomást méri - a csap előtti rendszer ellenőrzéséhez is szükséges.

- a p_f féklevégő nyomás;

A család többi tagjával való erős korrelációs kapcsolat, valamint a jó mérhetőség miatt ajánlott a mérése.

- A Mi-8 helikopterem rendszeresített műszerek a fent említett paramétereket mérik, tehát a tervezés során történt választás helyesnek bizonyult.

4.3. Állapotbecslés

A matematikai modell felhasználható a rendszer műszaki állapotának meghatározására is [9]. Ehhez a vizsgálathoz úgy kell szétválasztani a jellemzőket, hogy a δy vektorba rendezük a mérhető - külső - és a δx vektorba a nem mérhető - belső jellemzőket. Majd ez alapján az egyenletrendszer együtthatómátrixait is meghatározzuk.

A δy , illetve a δx vektorok meghatározását úgy végeztük el, hogy a külső jellemzők vektorába a jelenleg is mérhető paramétereket soroltuk. Ezt azért választottuk így, mert a kidolgozott módszert egy olyan technikán kell (vagy lehet) alkalmazni, amelyiken nem állapot szerinti üzemeltetésre terveztek.

A (7) egyenlet felhasználásával a δy vektor és a D mátrix ismeretében valamely módon meg kell becsülni azt a δx vektort, amely a lehető legkisebb eltéréssel teljesíti az egyenlet által leírt egyenlőséget. A feladat megoldása során problémát okozott az, hogy az A mátrix nem négyzetes és így azt nem lehet invertálni. Ezért módosítva az irodalomban általában ismert módszert a (6) egyenlet alapján az

$$\underline{u} = A \delta x \quad (9)$$

egyenlőséget bevezetve kell megbecsülni azt a δx vektort,

amely a legkisebb eltéréssel teljesíti az

$$\underline{u} - B \underline{\delta x} = \underline{0} \quad (10)$$

egyenlőséget. A $\underline{\delta x}$ vektor keresésére a gradinens módszert választottuk. A $\underline{\delta x}$ vektor - azaz a belső jellemzők - változásának ismeretében pedig meg tudjuk becsülni a vizsgált rendszer műszaki állapotát.

Az elkészített állapotbecslő eljáráshoz nem szükséges az ellenőrzött rendszer megbontása, a szükséges információk az érvényes technológia által megengedett módon beszerezhetők.

5. Összefoglalás

Munkánk során valamely konkrét repülőgép levegőrendszerét vizsgáltuk rendszerelméleti szempontból. A hajtómű diagnosztikában már jól bevált módszereket, eljárásokat alkalmaztuk a levegőrendszerek vizsgálatához. Felállítottuk a Mi-8 típusú helikopter levegőrendszerének matematikai modelljét. Bevezetésre alkalmas állapotbecslő eljárást dolgoztunk ki a matematikai modell felhasználásával. A fellelhető szakirodalom csak az ilyen modellek általános felépítésére utalnak.

Felhasznált irodalom:

- [1] - Abdel-Fattah Amjad, Engine Maintenance Cost Management, TU. of Budapest, Budapest 1995.
- [2] - Данилов, Вертолет Ми-8 устройство и техническое обслуживание, Транспорт, Москва, 1988.
- [3] - Герц Е. В., Пневматика и гидравлика, Машиностроение, Москва, 1973.
- [4] - Pokorádi László, Study of Influences of Deviation in Operational Parameters by Using the Mathematical Model of the Aircraft Pneumatic System, Proceeding of

1st Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Budapest, 1988, 421-429 pp.

- [5] - Pokorádi László, Repülőeszközök hidro-pneumatikus rendszereinek modellezése az Üzemi paraméter eltérések hatásainak vizsgálata céljából, IX. Magyar Repüléstudományi Napok, Budapest, 1988, 119-128.
- [6] - Rohács József, Repülőgép Üzemi jellemzők változásainak vizsgálata (feladatok, módszerek), IX. Magyar Repüléstudományi Napok, Budapest, 1988, 130-144.
- [7] - Sánta Imre, A repülőgéphaajtóművek matematikai modellezése és a modell alkalmazása a diagnosztikában, VIII. Magyar Repüléstudományi Napok, Budapest, 1984, 147-160.
- [8] - Синдеев И. М., Диагностирование и прогнозирование технического состояния авиационного оборудования, Транспорт, Москва, 1984.
- [9] - Сиротин Н. Н., Коровник Ю. М., Техническая диагностика авиационных двигателей, Машиностроение, Москва, 1979.