

MAGYAR HONVÉDSÉG
SZOLNOKI
REPÜLŐTISZTI FŐISKOLA

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. Pokorádi László mk. őrnagy

TAGJAI:

dr. Lantos Éva közalkalmazott
Ribárszki István alezredes
Svehlik János mk. alezredes
Ludányi Lajos mk. alezredes
Verdes István alezredes
Szurmay Zoltán százados
Szekeres Bálint közalkalmazott
Szilágyi Sándor közalkalmazott
Gépelés, szövegszerkesztés: Dömök Jánosné ka.

FELELŐS KIADÓ:

Nagy Szilveszter mk. vezérőrnagy

KÉSZÜLT:

A Szolnoki Repülőtiszti Főiskola házi nyomdájában

TARTALOM

	Oldal
<i>Békési László: A helikopterek bedőlésének lehetséges okai guruláskor és felszálláskor</i>	1
<i>Horváth Dezső: A repülőgép hosszirányú mozgásának felosztása, mozgásegyenletek, átviteli függvények</i>	13
<i>Szabolcsi Róbert: Automatikus sebességstabilizáló rendszer analízise és szintézise</i>	31
<i>Dr. Martinkó József: A Magyar Honvédség által alapított Szakközépiskolák története (1976-1996)</i>	51
<i>Dr. Pokorádi László: A repülőgépek üzemeltetése mint Markov-folyamat (sorbanállási modell)</i>	61
<i>Békési Bertold: A repülőgép hosszirányú mozgásának matematikai modellje</i>	75
<i>Dr. Szabó László: A "VERÉB" felsőszárnyas motoros könnyűrepülőgép - számítógéppel segített - repülésmechanikai elemzése III. rész</i>	89
<i>íj. Horváth Dezső: A repülőgép térbeli pályájának számítása a fedélzeti adatrögzítők adatai alapján: a Vetcsinkin-féle grafikus módszer</i>	109

Békési László mk. ezredes
Főiskola parancsnok I. helyettes

A HELIKOPTEREK BEDÖLÉSÉNEK LEHETSÉGES OKAI GURULÁSKOR ÉS FELSZÁLLÁSKOR

Bevezetés

A helikopter földön való gurulásakor és felszálláskor a címbe szereplő szituáció alapvetően két ok miatt jöhet létre. Az egyik a keresztirányú vezérlőrendszerben történő meghibásodás, a másik a helikoptervezető helytelen vezérlési tevékenysége.

A helikopter bedőlése, sőt felborulásának valószínűsége különösen a hárompontos futóművekkel rendelkező egyforgószárnyas faroklégcsavaros helikoptereknél nagy. Ilyen esemény bekövetkezhet a földön való nagy sebességű gurulás és forduló végrehajtásakor, felszálláskor, amennyiben a talaj nem vízszintes és egyenetlen, azaz a helikopter eleve bizonyos dőlésszöggel rendelkezik a felszállás pillanatában.

1. A helikopter bedőlésének vizsgálata

Az egyszerűsítés végett további vizsgálatunknál tételezzük fel, hogy a talaj egyenletes. A helikopter típusául válasszuk a MI - 8 - at.

Az 1. ábrán a helikopter a földön kiinduló helyzetben látható, a vezérlő automata síkja vízszintesen áll.

Tételezzük fel, hogy a forgószárny vonóereje azonos hatásvonalon van a helikopter súlyerejével, a faroklégcsavar vonóereje pedig zérus.

Ekkor a kerekre ható talaj reakcióerő az

$$F_1 = F_2 = \frac{(G - T) l_1}{2l} \quad (1)$$

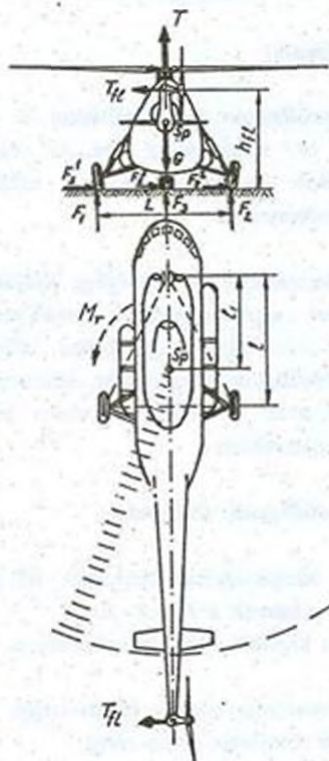
összefüggéssel határozható meg, ahol:

T - a forgószárny vonóereje a légpárnahatás figyelembe vételével;

G - a helikopter felszálló súlya;

l - a futóművek tengelytávja;

l_1 - az orrfutó és a forgószárny tengelyei közötti vízszintes távolság;



I.ábra

A helikopterre ható erők és nyomatékok álló helyzetben

Továbbá tételezzük fel, hogy a helikoptervezető a lábkormány jobb oldali pedálját elmozdítja előre, növelve ezzel a faroklégcsavar vonóerejét, melynek következtében létrejövő nyomaték a helikoptert igyekszik balra elfordítani.

A jobb kerékre ható talaj reakcióerő zérus lesz ($F_2 = 0$) abban az esetben, ha a főfutókerekek és a talaj közötti súrlódási tényező jelentős értékű ($\mu = 0.4$), így a helikopter nem fog balra elfordulni.

Tehát:

$$T_H h_H = \frac{(G - T) l_1 l}{2l} \quad (2)$$

ahol:

T_p - a faroklégszár vonóereje;

h_p - a faroklégszár tengelyének függőleges távolsága a talajtól;

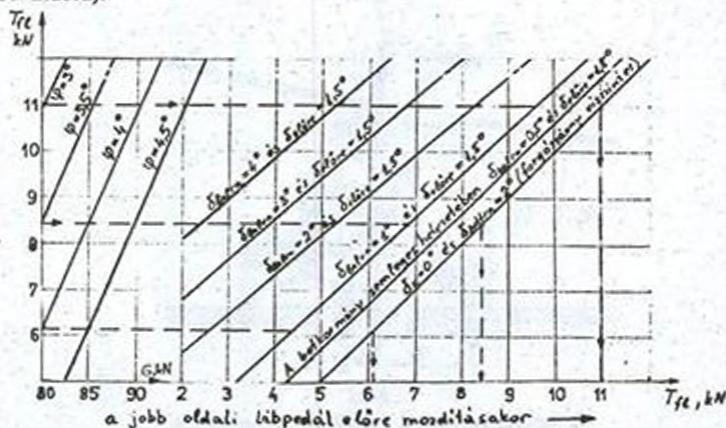
L - a főfutómű nyomtávja;

A nyomatok egyenlőségéből meghatározható a faroklégszár vonóerejének (T_p) nagysága, melynél a helikopter a bal kerék talajjal való érintkezési pontja körül kezd elfordulni.

Azaz:

$$T_p \geq \frac{(G - T)l_1 L}{2lh_p} \quad (3)$$

A számítások azt mutatják, hogy (MI - 8 típusú gép adatait felhasználva: $l_1 = 3.28m$; $L = 4.5m$; $h_p = 3.7m$; $l = 4.26m$) a jobb kerék a forgószárnylapátok $\varphi = 3^\circ$ közös beállítási szögénél van maximálisan terhelve, 80000N felszálló súly és a faroklégszár $T_p = 11000N$ vonóereje mellett. Ha $\varphi = 3.5^\circ$, akkor $T_p \geq 8500N$, $\varphi = 4^\circ$ mellett pedig $T_p = 6200N$ (lásd 2.ábra).



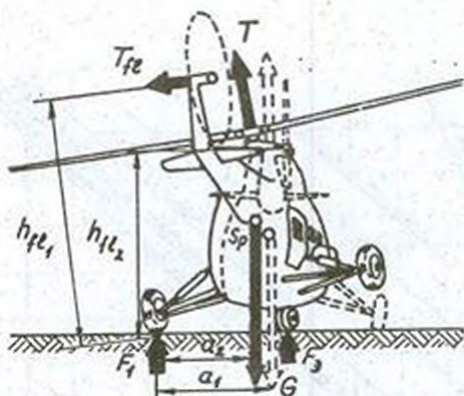
2.ábra

Nomogram a faroklégszár teljes vonóerejének meghatározására amelynél a bal kerék elszakadhat a talajtól álló helyzetben, guruláskor a felszálló súly, a forgószárny közös beállítási szöge és a vezérlő automata balra való bedöntésekor ($H=0$, NEL viszonyai között)

A nomogrammból látható, hogy minél kisebb a helikopter felszálló súlya és minél nagyobb a forgószárnylapátok közös beállási szöge (φ), annál nagyobb hajlamot mutat a helikopter a balra való bedőlésre, ha a faroklégcsavar vonóerejét 5000N - tól 10000N -ig változtatjuk.

Ha a helikoptervezető idejében nem téríti ki a botkormányt (a vezérlő automatát), akkor a helikopter bedőlési szögének növekedésével növekszik a bedöntő nyomaték és a továbbiakban már csak a botkormány kitérítése nem elegendő a helikopter bedőlésének megszüntetésére.

A balra - előre való bedőlés folyamatában (lásd 3.ábrát) a forgószárny vonóerejének bedöntő nyomatéka (változatlan botkormány kitérés mellett) majdnem állandó marad, a faroklégcsavar vonóerejéből származó bedöntő nyomaték viszont növekszik ($h_{f_2} > h_{f_1}$). A helikopter súlyerejéből származó nyomaték, - mely ellentétes irányú az előbbi két nyomatékkal - csökken annak következtében, hogy az erő karja csökken ($a_2 < a_1$).



3.ábra

A helikopterre ható erők és nyomatékok
balra - előre való bedőlés estén

Amennyiben, ekkor a forgószárny vonóereje (a vezérlő automata bedöntött helyzetéből adódóan) meg van dőlve balra, az eredmény az lesz (2.ábra), hogy a helikopter bedőlési szöge növekszik. A faroklégcsavar vonóereje pedig -melynél a jobb futókerék elszakadhat a földtől - csökken.

Ezen kívül a helikopter balra - előre történő bedőlésének kedvez, ha a helikoptervezető a botkormányt balra illetve előre elmozdítja, valamint a balra elfordult orrkerék, puha vagy csúszós talaj, jobboldali oldalszél, a talaj balra való lejtése. Ilyen esetekben a helikopter még erősebben bedőlhet, sőt a jobb kerék a talajról felemelkedhet.[1.,2.]

A MI - 8 típusú helikopter egyenletes és vízszintes talajon, gurulás és felszállás közben akkor is bedőlhet, ha helytelenül kapcsoljuk be a robotpilótát.

Itt a következő hibák fordulhatnak elő:

a.) A bal oldali helikoptervezető AGB - 3K műhorizontjának és az AP - 34B robotpilótának helytelen bekapcsolási sorrendje. A helikoptervezetőtől megkövetelik, hogy a hajtómű beindítása és a forgószárny felpörgetése után először a műhorizontot kapcsolja be, majd ezután a robotpilótát. Amennyiben ezt a sorrendet szigorúan betartjuk, úgy a fentebb említett bedőlést kiküszöbölhetjük.

Néha azonban esetleg sietés és figyelmetlenségből adódóan a hibás bekapcsolási sorrend előfordulhat.

Vegyük például: a helikoptervezető úgy véli, hogy a műhorizont AZSZ kapcsolója a bal felső kezelőpulton bekapcsolt állapotban van, majd az egyeztető gomb benyomása után a bal oldalon bekapcsolja a műhorizont kapcsolóját és ezt követően rögtön a robotpilótát, annak dőlés és bólintási csatornáját.

Mivel ilyen esetben még a műhorizont girofüggőlegese még nincs függőleges helyzetben (a botkormány semleges illetve közel semleges helyzetében) olyan jelet ad a robotpilótának, ami hamis bedőlésnek felel meg. A robotpilóta így igyekszik ezt a hamis bedőlését a helikopternek kiküszöbölni és kitéríti a vezérlő automatát. Ekkor a műhorizont mutatói is elmozdulnak általában egészen az ütközőig.

Általában a műhorizont AZSZ kapcsolójának bekapcsolása után az AGB girofüggőlegese körülbelül 1 perc múlva foglalja el függőleges helyzetét és a műszer mutatói a semleges helyzetet felvesszik.

Ha ez idő alatt nem növeljük a közös beállítási szögét a forgószárnylapátoknak, akkor sem gurulásnál sem felszállásnál veszélyes bedőlése a helikopternak nem lesz.

Más szóval az említett példa analóg azzal, ha kikapcsolt műhorizontnál a robotpilótát bekapcsoljuk, vagy ha a műhorizont meghibásodott. Ebben az esetben a kikapcsolt illetve meghibásodott AGB - től a robotpilóta olyan jelet kap, amelynek eredményeképpen az a vezérlő automatát igyekszik kitéríteni függetlenül a botkormány helyzetétől.

b.) A másik előfordulható hiba az, hogy a robotpilóta bekapcsolásának pillanatában a botkormány a semleges helyzetétől 50 mm - nél jobban ki van térítve. Bár a helikoptervezető számára ez szigorúan a rá vonatkozó utasításban nincs előírva, azonban mégis ügyelnie kell ilyenkor a botkormány semleges helyzetére.

Ez a hiba mégis bekövetkezhet ha még nincs megfelelő gyakorlata a helikoptervezetőnek a botkormány semlegesben tartására és ilyenkor észre sem veszi, hogy a semlegestől a botkormányt elmozdította (kezdő helikoptervezetőknél).

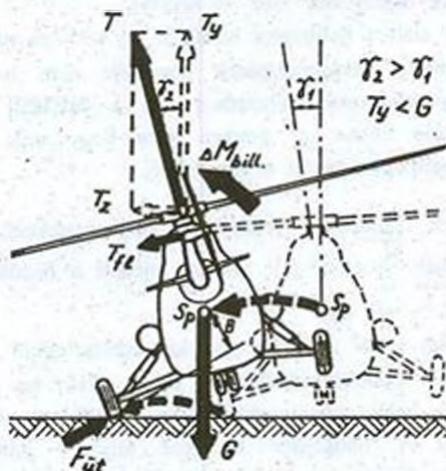
Ezen kívül ismert az a tény, hogy a begyakorlott mozdulatokat a helikoptervezető átviheti egyik helikopterről a másikra, átképzések alkalmával (pl. MI - 1 - ről vagy MI - 4 - ről MI - 8 - ra).[3.,5.]

Ha a botkormány kitérített helyzetében az automatikus trimmer nyomógombját benyomjuk, a botkormányon kormányerő nem lesz és ebben a helyzetben marad. A robotpilóta ilyenkor bekapcsolása esetén a botkormány helyzetét semlegesnek tekinti. Sőt a robotpilóta indikátorai semleges helyzetet mutatnak mind a dőlés mind a bólintás szerint.

A botkormány ebből a helyzetéből semleges helyzetbe való visszaállítása a vezérlő automata további kitérítését eredményezi és a robotpilóta indikátorai egészen vészhelyzetig kitérnek a dőlés és a bólintás szerint is.

Ilyenképpen a helikoptervezetői hibák és a műhorizont meghibásodása a vezérlő automata kitérítését eredményezheti, amely főleg az egyforgószárnyas faroklégcsváros helikoptereknél veszélyes lehet.

A forgószármlyapátok közös beállítási szögének növelése már $\varphi = 4^\circ$ - ig az előbb felsorolt esetekben a helikopter jelentős bedőlését okozza arra az oldalra amelyre a vezérlő automata síkja meg van dőlve (4.ábra)



4.ábra
A helikopterre ható erők és nyomatékok
a bal kerék hozzáütődésekor

Ez a bedőlés intenzív lefolyású, ha a közös beállítási szöget energikusan növeljük, valamint hirtelen történő botkormány és lábpedál elmozdításnál.

A számítások azt mutatják, hogy a helikoptert balra - előre bedöntő eredő nyomaték nem túlságosan nagy és a szögsebessége sem több $2-3 \frac{1}{s}$ -nál. A helikoptervezető így bármely pillanatban megszüntetheti a helikopter bedőlését a botkormány elmozdításával, amennyiben a dőlésszög még a $\gamma = 6^\circ$ - ot nem haladta meg.

Képzeljük el, hogy a helikopter bedőlésének kezdetekor a helikoptervezető mindössze 1 sec. időtartamra figyelmét valami más köti le. Ezalatt az idő alatt a dőlésszög $\gamma = 6^\circ$ - ig növekedett (5.ábra 12sec.). Ezután veszi észre, hogy a helikopter folyamatosan egyre jobban bedől. A helikopter helyzetének megállításához szükséges átlagos idő 1.0 - 1.35sec. (a továbbiakban vegyünk kereken 1sec -ot). Ha ehhez hozzáadjuk a

cselekvés eldöntésének idejét 0.1sec - ot, a reakció időt 0.1sec - ot, a botkormány elmozdításához szükséges időt 0.5sec., a helikopter reakció idejét 0.3sec., mindez összegében 2sec - ot tesz ki.

Ezalatt az idő alatt a helikopter bedőlése $\gamma = 9^\circ$ - ra növekszik. Ezen kívül, ha a robotpilóta bekapcsolásának sorrendje nem helyes (sőt, ha meghibásodott vagy kikapcsolt helyzetben van a baloldali műhorizont) növekszik ez az idő. Ebben az esetben nem hogy nem segít, hanem fordítva, zavarja a helikoptervezetőt a vezetésben.

Hárompontos futóművel rendelkező helikoptereknél, mint ezt a számítások is mutatják $\frac{T}{G} = 0.5 - 0.9$ viszony mellett a bedőlés határértéke nem haladja meg a $\gamma = 6^\circ$ - ot.

Ha a bedőlés $\gamma > 6^\circ$, a helikoptert kimozdítani ebből a helyzetből csupán a botkormány elmozdításával lehet. Főleg akkor, ha a bedőlésnek szögsebessége is van balra, ugyanis ekkor még a helikopter tehetetlenségét is le kell győzni. A helikopter bedőlése teljesen jobbra kitérített botkormányánál olyan érzetet kelt a helikoptervezetőben mintha a vezérlő rendszer meghibásodott volna.

Ebben a szituációban az sem segít, ha kikapcsoljuk a robotpilótát, sőt még jobban be fog dőlni a helikopter balra - előre. Ugyanis a robotpilóta kikapcsolásának pillanatában a helikopter helyzete dőlésszög és bólintási szög szerint, valamint a botkormány helyzete és a vezérlő automata helyzete nem felelnek meg egymásnak. Így egy plusz impulzust kap a forgószárnykúp, mégjobban megdőlni és vele együtt a forgószárny vonóerejének hatásvonalára is ($\Delta M_{ba} = F_{u, B}$).

Ez tovább növeli a helikopter dőlésszögét. Ha el is emeljük újból a helikoptert - a közös beállási szög további gyors növelésével másodszor is a talajhoz ütdőhet a bal kerék (4. ábra), ez azonban már a helikopter kb. $\gamma = 20^\circ$ bedőlt helyzetben történik és a helikopter energikusan tovább dől, leereszti a törzs orr részét és a dőlés irányába el is fordul.

További ismételt talajhoz ütdődéskor a bal kerék a lengéscsillapító működése következtében elemelkedhet a földtől, azonban a helikopter ekkor

már kormányozhatatlanná válik és a felborulását gyakorlatilag alig lehet megakadályozni.

Tehát világos, hogy bedőlt helikopterrel nem érdemes a repülést megkezdeni.

A másik lehetőség (azaz a közös beállási szög csökkentése) kevésbé veszélyes. Azonban itt is néhány sajátosságot mindig figyelembe kell venni. Az egyforgószárnyas helikoptereknél a bedőlés elleni harc a közös beállási szög csökkentésével körülbelül 22° -os bedőlési szög értékig eredményes. Ennél a bedőlési szög értéknél a forgószárny lapátok végei a Föld felszínével érintkezhetnek.

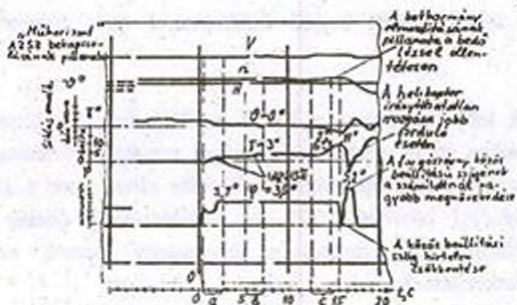
Az azonnali és gyors csökkentése a közös beállítási szögnek (5. ábra 15. sec.) $\gamma > 10^\circ$ -nál azt eredményezi, hogy a helikopter hirtelen a jobb kerékre ereszkedik.[4.]

Ilyen esetben a fülkében ülő helikoptervezető meginogva, akaratán kívül beléphet a jobb pedállal előre és ismételten növelheti a közös beállítási szöget (5. ábra 16. sec.), ha az egyesített gázkar nincs rögzítve.

Ennek eredményeképpen a helikopter el kezd fordulni jobbra. Amikor működni kezd a jobb futó lengéscsillapítója, a helikopter újból balra bedől, az elfordulás pedig a helikopter felborulását segítheti elő.

A gép jobb kerékre való hirtelen leeresztése esetén megszűnhet a forgószárny kiegyensúlyozottsága, következésképpen kialakulhat a talajrezonancia típusú lengése a helikopternek. Innen pedig az következik, hogy a közös beállítási szög hirtelen csökkentése nem ajánlatos. Ezen kívül a közös beállítási szög egyidejű csökkentésével a lábpedálokkal balra be is kell lépni.

Azokban az esetekben, amikor a helikopter gurulás közben kezd bedőlni valamelyik oldalra, azért hogy felborulását megakadályozzuk célszerű a bedőlés irányába a lábpedállal belépni, azaz a helikopter balra dőlésénél a bal pedált előre, jobbra dőléskor a jobb pedállal belépni.



5. ábra
A helikopter mozgásának paraméter értékei a SZARPP - 12D alapján

A helikoptervezetők tevékenységének elemzése és a tapasztalat azt mutatja, hogy a helikopter gurulásakor a bedőlés megakadályozása céljából még mielőtt a közös beállítási szöget növelnénk, meg kell győződni a robotpilóta üzemképességéről a botkormány semleges helyzetében (vagy ahhoz közeli helyzetben), a műszerrel a mutatók szintén semleges helyzetben kell hogy legyenek, és a műhorizont bekapcsolásától számítva legalább 1 perc elteltjen.

A forgószárnyalápok közös beállítási szögének növelésekor 4° -ig figyelemmel kell kísérni a helikopter földhöz viszonyított helyzetét.

Amennyiben a helikopter valamelyik oldalra igyekezne bedőlni, ezt a törekvést rögtön korigálni kell a botkormány kitérítésével, úgy hogy a bedőlési szög $\gamma = 5^\circ$ -nál nagyobb értékre ne tudjon megnövekedni.

A bedőlés helyesbítését célszerűbb impulzusszerű trimmeléssel megoldani. Ez a módszer a leghatásosabb, mivel ebben az esetben a robotpilóta szinte segít a helikoptervezetőnek és ami még nagyon fontos, hogy a robotpilóta hatása ebben az esetben a legkisebb még akkor is, ha meghibásodott volna.

Abban az esetben ha a helikoptervezető késlekedik a bedőlést helyesbíteni és a helikopter teljesen kitérített botkormány állásnál is folytatja a bedőlést, a kigurulást és felszállást abba kell hagyni. E célból

azonnal, de nem hirtelen csökkenteni kell forgószárnylapátok közös beállítási szögét, főleg akkor ha a bedőlés a $\gamma = 10^\circ$ -ot meghaladja.

Ilyenképpen a helikopter bedőlése guruláskor és felszálláskor akkor nem jelent különösebb veszélyt, ha a helikoptervezető ismeri az általa üzemeltetett gép aerodinamikai sajátosságait és időben és helyesen működteti a vezérlő szerveket.

Felhasznált irodalom

- [1] - Bodner B. A., Szisztyemi upravlenija letatelynimi apparatami, Masinosztrojenye, Moszkva, 1973.
- [2] - Martinov A. K., Ekszperimentálnije iszledovánija po aerodinámike vertoljota, Masinosztrojenye, Moszkva, 1972.
- [3] - Romaszevics V. F., Szamoljov G. A., Praktzicsesykaja aerodinámika ve.toljotov, Voennoe izdátjelsztvo minyisztjersztva oboroni, Moszkva, 1980.
- [4] - Szamoljov G. A., Nakrenyenyie vertoljota pri viruliványiji, Aviacija i kozsmonavtyika, Voenizdat, 1975/5 26 - 28 oldal.
- [5] - Szelestey Gy., Helikopter aerodinámika, főiskolai jegyzet, MN. KGYRMF, Szolnok, 1974.

Horváth Dezső
főiskolai docens

Repülő Szakág Tanszék, szakcsoportvezető

**A REPÜLŐGÉP HOSSZIRÁNYÚ MOZGÁSÁNAK FELOSZTÁSA,
MOZGÁSEGYLETEK, ÁTVETELI FÜGGVÉNYEK**

Az esetek többségében jellegzetes sajátosságként jelentkezik a repülőgépnek azon képessége, hogy jelentős mértékben gyorsabban változtatja az állásszöget, mint a sebességet. Az állásszög kétszeres értékre történő megváltoztatásához másodpercek, néha a másodperc törtrészei szükségesek, a sebesség kétszeres értékre történő változtatásához, pedig több tíz másodperc szükséges. Ezért közelítően a hosszirányú mozgásban két mozgásforma választható ki: a kis (rövidperiódusú) hosszirányú mozgás, főképpen az állásszög gyors változtatásával jellemezhető és gyors mozgás és a nagy (hosszúperiódusú) hosszirányú mozgás, ami főleg a repülőgép sebességének változtatásával jellemezhető és gyors mozgás. [1, 2, 3, 4, 5, 6]

Bevezetés

A repülőgép stabilitását és kormányozhatóságát hossz- és oldalirányúra oszthatjuk fel. A felosztás alapját a repülőgép szimmetrikus formája teszi lehetővé, annak függőleges síkjához (a szimmetriasíkhöz) viszonyítva. A szimmetriasíkban ható zavarok rendszerint elég kis mértékben befolyásolják a repülőgép oldalirányú mozgását. Ez lehetővé teszi azt, hogy bizonyos esetekben az oldalirányú mozgástól különválasztva vizsgáljuk a repülőgép hosszirányú egyenetlen (perturbált) mozgását.

Valamennyi repülőgépre jellemző - a hosszirányú mozgás tranziens folyamata idején - két fajta lengőmozgás: rövidperiodusú, rövid periódussal és viszonylag nagy csillapítással, valamint a hosszúperiodusú, hosszú periódussal és kis csillapítással.

A mozgás felosztása rövid- és hosszúperiodusú mozgásra nem mindig lehetséges. A repülőgép kis sebességénél, ami különösen a függőlegesen fel- és leszálló repülőgépeknél jellemző, a repülőgép állásszögének és sebességének egyforma viszonyított változásához szükséges idők egymáshoz közeli értékűek lesznek, így a fenti felosztás nem lehetséges.

Rövidperiodusú mozgás. [5, 6]

Azokat a kisperiodusú rezgéseket ($T \approx 1-5$ s), amelyek a repülőgép súlypont körüli elfordulásával kapcsolatosak és a túlterhelés gyors változásával járnak együtt, rövidperiodusú mozgásnak nevezzük. A rövidperiodusú mozgásban lévő repülőgép stabilitásától nagymértékben függ a repülés biztonsága és a repülőgépvezető által történő általános értékelése. A repülési magasság növekedésével növekszik az adott rezgések periodusa és azok csillapodási ideje.

Hosszúperiodusú mozgás. [5, 6]

Azokat a rezgéseket, amelyeknek 20-30 s-nél nagyobb a periodusa hosszúperiodusos vagy fugoid mozgásnak nevezzük. Ezek a rezgések főleg a repülőgép súlypontjának térbeli mozgásával kapcsolatosak és a repülési pálya dőlésszögének lassú, periodusos változásával járnak együtt. A repülőgép fugoid rezgései gyakran nem okoznak komoly rezgéseket a repülőgép vezetése közben. Az egyenetlen (perturbált) mozgás ezen formája eléggé lassan fejlődik ki és a repülőgépvezetőnek van elég ideje arra, hogy a repülőgépet a kiegyensúlyozási alap üzemmódra térítse vissza.

1. A rövid- és hosszúperiódusú mozgások létrejöttének fizikai magyarázata. [1, 5, 6]

Tételezzük fel, hogy a repülőgép vertikális, felfelé áramló levegőáramlásba kerül. Hatására megváltozik az állásszög, amely a repülőgépre ható erők és nyomatékok megváltoztatásához vezet. A keletkező szöggyorsulások sokkal nagyobbak a lineáris gyorsulásoknál, ezért a statikusan stabil repülőgép kezdi visszaállítani a korábbi állásszöveget, azaz elfordul az OZ_1 tengely körül az óramutató járásával azonos irányba, miközben a repülőgép sebessége és a pályaszög csupán kismértékben változik, értékük elhanyagolható.

A rövidperiódusú mozgás végén a nyomatékok egyensúlya helyreáll, ugyanakkor az állás- és bólintási szögek csökkenésének következtében a súlyerő OX_1 tengelyre eső vetülete nő, ami a repülőgép sebességének növekedéséhez vezet. A sebesség növekedése, a felhajtóerő növekedését vonja maga után, ami viszont a pályaszög növekedését eredményezi. Állandó állásszögnél a pályaszög növekedését a bólintási szög növekedése kíséri, azaz a repülőgép ellenkező irányú forgása jön létre. Ezután a sebesség csökkenni fog a pályaszög pedig növekedni, és így tovább. Ezt a mozgást hosszúperiódusú mozgásnak nevezzük.

A dinamikai vizsgálat feltétele:

1. A rövidperiódusú mozgás vizsgálatakor figyelembe vesszük azt a körülményt, hogy az állásszög változásának rövid időtartama alatt a repülőgép sebességének abszolút értéke nem tud jelentősen megváltozni, ezért értéke állandónak vehető.

2. A rövidperiódusú mozgás esetén a kezdeti zavarásként az állásszögnél bekövetkező zavarást, a vezérlő behatás mi-

nőségében a magassági kormány kitérését vesszük figyelembe.

3. A rövid- és hosszúperiódusú mozgásnál egyrészt a repülőgép saját tulajdonságait vizsgálják, melyek a külső zavarás hatására jelentkeznek, másrészt a vezérlő behatások által előidézett dinamikai tulajdonságokat.

4. A saját dinamikai tulajdonságok vizsgálatakor feltételezik, hogy a magassági kormány (stabilizátor) és a hajtómű vezérlőkar (HVK) abban a helyzetben marad, ahol a zavarás előtérbe volt, azaz nincs kiegészítő kitérés, illetve elmozdulás ($\delta \Delta \delta_{VV} = 0, \Delta \delta_{HVK} = 0$).

2. Mozgásegyenletek. [1, 4, 5, 6]

A hosszirányú mozgás linearizált egyenlete: [1, 5, 6]

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta v}{dt} - a_{11}\Delta v - a_{13}\Delta\delta - a_{14}\Delta\alpha &= a_{15}\Delta\delta_{VV} + a_{16}X_{VV} \\ -a_{21}\Delta v + \frac{d^2\Delta v}{dt^2} - a_{22}\frac{d\Delta\delta}{dt} - a_{24}\Delta\alpha - a_{24}\frac{d\Delta\alpha}{dt} &= a_{25}\Delta\delta_{VV} + a_{25}\frac{d\Delta\delta_{VV}}{dt} + \\ &+ a_{26}M_{z_{VV}} \end{aligned} \quad (1)$$

$$-a_{31}\Delta v - a_{33}\Delta\delta + \frac{d\Delta\delta}{dt} + \frac{d\Delta\delta}{dt} - a_{34}\Delta\alpha = a_{35}\Delta\delta_{VV} + a_{36}Y_{VV}$$

ahol:

$$-\Delta\delta + \Delta\theta + \Delta\alpha = 0 \quad (2)$$

$$\frac{d\Delta\delta}{dt} = \Delta\omega_z \quad (3)$$

az (1) egyenletrendszerben a

- bemenő változók $\Delta v, \Delta \theta, \Delta \delta$ és $\Delta \alpha$;
- kimenő változók $\Delta \delta_{vv}$;
- zavaró hatások $X_{vv}, Y_{vv}, N_{z_{vv}}$

Az (1) egyenletrendszer megoldása:

$$\begin{aligned} \Delta v = \Delta v^{(0)} = 0; & \quad \Delta \theta = \Delta \theta^{(0)} = 0 \\ \Delta \theta = \Delta \theta^{(0)} = 0; & \quad \Delta \alpha = \Delta \alpha^{(0)} = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

valamint $\Delta \delta_{vv} = 0, X_{vv} = Y_{vv} = 0, N_{z_{vv}} = 0$ -nál meghatározza a repü-

lőgép zavarmentes hosszirányú mozgását.

Az (1) egyenletrendszert átalakítva és behelyettesítve kapjuk a hosszirányú mozgás determinánsát:

$$D = \begin{vmatrix} s - a_{11} & 0 & -a_{13} & a_{14} \\ -a_{21} & s(-a_{22}) & 0 & -a_{24} - a_{24}s \\ -a_{31} & 0 & s - a_{33} & -a_{34} \\ 0 & -1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \quad (5)$$

A determinánst megoldva kapjuk a következő polinomot:

$$\begin{aligned} N(s) &= s^4 + A_1 s^3 + A_2 s^2 + A_3 s + A_4 \\ A_1 &= -a_{33} + a_{34} - a_{22} - a_{24} - a_{11}; \\ A_2 &= a_{31} a_{14} - a_{31} a_{13} + a_{22} a_{33} - a_{22} a_{34} - a_{24} a_{33} a_{24} + a_{33} a_{24} + a_{33} a_{11} - \\ &\quad - a_{34} a_{11} + a_{22} a_{11} + a_{24} a_{11}; \\ A_3 &= -a_{21} a_{14} - a_{31} a_{22} a_{14} + a_{22} a_{31} a_{13} + a_{24} a_{31} a_{13} + a_{24} a_{33} - \\ &\quad - a_{22} a_{33} a_{11} + a_{22} a_{34} a_{11} + a_{24} a_{11} - a_{33} a_{11} a_{24}; \end{aligned} \quad (6)$$

$$A_4 = a_{21} a_{33} a_{14} - a_{13} a_{21} a_{34} + a_{24} a_{31} a_{13} - a_{14} a_{33} a_{11}$$

A determinánst nullával egyenlővé téve megkapjuk a hosszirányú mozgás karakterisztikus egyenletét:

$$s^4 + A_1 s^3 + A_2 s^2 + A_3 s + A_4 = 0 \quad (7)$$

Általános esetben az $M(s)$ polinomot a következő formában lehet felírni:

$$M(s) = A_4 (T^2 s^2 + 2T\zeta s + 1) (\tau^2 s^2 + 2\tau\eta s + 1) \quad (8)$$

A hosszirányú mozgás karakterisztikus egyenlet $M(s) = 0$ gyökei közül: két pár komplex gyök, amelyek csak abszolút értékben különböznek egymástól, az egyik pár abszolút értékben nagyobb, a másik pár az abszolút értékben kisebb gyökpárt alkotja.

A (8) egyenlet első másodfokú tagja $(T^2 s^2 + 2T\zeta s + 1)$, amely megfelel az abszolút értékben nagyobb gyökpárnak, a rövidperiódusú mozgás teljes gyorslefordulású összetevőjét határozza meg. A második tag $(\tau^2 s^2 + 2\tau\eta s + 1)$, amely megfelel az abszolút értékben kisebb gyökpárnak, meghatározza a hosszúperiódusú mozgás teljes lassú lefordulású összetevőjét.

A karakterisztikus egyenlet gyökeinek meghatározására többféle közelítő megoldás létezik. A legegyszerűbb módszer az abszolút értékben különböző gyökpárok kiszámítása, amely megfelel a következő egyenletnek:

$$s^2 + (a_{34} - a_{22} - a_{24})s + (-a_{24} - a_{22} a_{34}) = 0$$

$$A_2 s^2 + A_3 s + A_4 = 0 \quad (9)$$

3. Rövidperiódusú mozgás. [1,5,6]

A rövidperiódusú mozgás vizsgálatánál, el lehet fogadni azt, hogy a repülőgép sebességértéke nem változik, vagyis $v = \text{const}$ és $\Delta v = 0$, valamint azt, hogy $\Delta \alpha = \text{var}$; $\Delta \delta = \text{var}$ tekinthető.

A hosszirányú mozgás következő egyenletét

$$(s+a_{11})\Delta v + a_{12}\Delta \alpha + a_{13}\Delta \delta = c_{11}\Delta U_x - c_{11}\Delta U_x - c_{12}\alpha_T + c_{13}\Delta \delta_{HVK}$$

$$-a_{21}\Delta v - (s+a_{22})\Delta \alpha + (s+a_{32})\Delta \delta = c_{21}\Delta U_x + c_{22}\alpha_T$$

$$-a_{31}\Delta v - (a_{30}s + a_{32})\Delta \alpha + (s^2 - a_{33}s)\Delta \delta = c_{31}\Delta U_x + (c_{30}s + c_{32})\alpha_T + c_{34}\Delta \delta_{vv} + c_{36}M_{Bz}$$

(10)

$$-a_{41}\Delta v + a_{42}\Delta \alpha - a_{43}\Delta \delta + p\Delta H = 0$$

ahol: a_{ij} - együtthatók jelölik a változókat a hosszirányú mozgás dinamikai linearizált egyenlet baloldalaán lévő változó paraméterekre;

c_{ij} - együtthatók jelölik a változókat a külső zavarásokra - aerodinamikai erők és nyomatékok, valamint kormányhatások - vonatkozóan.

Megoldva, a felsorolt feltételek mellett és feltételezve azt, hogy a kezdeti időpillanatban $\Delta \alpha = \Delta \delta$; $|v| = \text{const}$; $a_{23} \rightarrow 0$. ($|v|$ - a föld feletti sebesség abszolút értéke) Mivel elfogadtuk, hogy $v = \text{const}$, ezért az (10) egyenletrendszer első egyenlete, ami a repülőgép sebességének változását írja le, a vizsgálatból kiesik. A többi egyenlet azon összetevői, amelyek Δv -t tartalmaznak nullával egyelők.)

Ily módon a rövidperiódusú hosszirányú mozgás egyenletei

a következők lesznek:

$$\begin{aligned} -(s+a_{22})\Delta\alpha+s\Delta\theta-c_{21}\Delta U_x+c_{22}\alpha_T-(a_{30}s+a_{32})\Delta\alpha+(s^2-a_{33}s)\Delta\theta = \\ =c_{31}\Delta U_x+(c_{30}s+c_{32})\alpha_T+c_{34}\Delta\delta_{vv} \end{aligned} \quad (11)$$

Ennek a rendszernek a jobboldalán a vezérlő behatások állnak, vagyis azok az értékek, amelyek a HVK és a magassági kormány kiegészítő elmozdításával előidézett erőkkel és nyomatékokkal arányosak.

A determinánst megoldva kapjuk a rövidperiódusú mozgás karakterisztikus egyenletét:

$$D_K(s) = \begin{vmatrix} -(s+a_{22}) & s \\ -(a_{30}s+a_{32}) & s^2-a_{33}s \end{vmatrix} = 0 \quad (12)$$

a karakterisztikus egyenlet:

$$s(s^2 + K_1s + K_2) = 0 \quad (13)$$

ahol: $K_1 = a_{22} - a_{33} - a_{30}$;

$$K_2 = -(a_{22}a_{33} - a_{32}).$$

A karakterisztikus egyenlet (13) megoldása három gyököt ad. Az egyik gyök közül egyik egyenlő nullával, a másik két gyök λ_1, λ_2 komplex konjugált. A nulla értékű gyök abból adódik, hogy a súlyerő hatását nem vettük figyelembe a rövidperiódusú mozgásra (feltételezve, hogy egyenletes repülés esetén $G_{x0} = -mg \sin\theta = 0$).

3.1. A repülőgép rövidperiódusú mozgásának dinamikai jellemzői. Átviteli függvények. [1, 4, 5, 6, 7]

A kormányozható repülőgép átviteli tulajdonságait a következő átviteli függvény határozza meg:

$$V_{\theta}^{\delta_{VV}}(s) = \frac{D_{\theta}^{\delta_{VV}}(s)}{D(s)} = \frac{s^2 + B_1 s + B_2}{s(s^4 + A_1 s^3 + A_2 s^2 + A_3 s + A_4)} \quad (14)$$

ahol: $A_1 = a_{11} + a_{22} - a_{33} - a_{30}$;

$A_2 = a_{11} a_{22} - (a_{11} + a_{22}) a_{33} - a_{32} - a_{30} a_{11} - a_{12} a_{21}$;

$A_3 = -a_{11} a_{22} a_{33} - a_{33} a_{11} + a_{21} a_{12} a_{33} + a_{21} a_{13} a_{30}$;

$A_4 = a_{13} a_{21} a_{32}$;

$B_1; B_2 \dots$ - a bólintás szerinti együtthatók.

Az (14) egyenlet, a vízszintes vezérsík kitérése esetén létrejövő bólintási szög változását jellemzi.

A determinánst kifejtve

$$V_{\theta}^{\delta_{VV}}(s) = \frac{\Delta\theta(s)}{\Delta\delta_{VV}(s)} = \frac{\begin{vmatrix} -(s+a_{22}) & 0 \\ -(a_{30}s+a_{32}) & c_{34} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -(s+a_{22}) & s \\ -(a_{30}s+a_{32}) & s^2 - a_{33}s \end{vmatrix}} = \frac{\delta_{VV}}{D_{\theta}(s)} = \frac{\delta_{VV}}{D_K(s)} \quad (15)$$

a következőt kapjuk:

$$\vartheta_{\theta} \frac{\delta_{vv}}{(s)} = \frac{c_{3d}(s+a_{22})}{(s^2+\zeta_K s+K_2)s};$$

$$\vartheta_{\theta} \frac{\delta_{vv}}{(s)} = \frac{K_{\theta} \delta_{vv} (T_1 s+1)}{s(T_K^2 s^2+2\zeta_K T_K s+1)} \quad (16)$$

ahol: $K_{\theta} \frac{\delta_{vv}}{(s)} = \frac{c_{3d} a_{22}}{K_2}$ - az együttható negatív, mivel $c_{3d} < 0$ (pozitív kormánykitérés iránya, lefelé);

$\zeta_K = \frac{K_1}{2\sqrt{K_2}}$ - lengések viszonyított csillapítási tényezője;

$T_K = \frac{1}{\sqrt{K_2}}$;

$T_1 = \frac{1}{a_{22}}$

A (16) átviteli függvény kéttárolós lengő

$\frac{K_{\theta} \delta_{vv}}{T_K^2 s^2+2\zeta_K T_K s+1}$, integráló $\frac{1}{s}$ és egy egytárolós

differenciáló $(T_1 s+1)$ tagokból áll.

Az integráló tulajdonság azt jelenti, hogy állandó kitérített vízszintes vezérsík esetén a bólintási szög változik, végtelenhez tart, azaz a repülőgép bukfenec végrehajtására törekszik:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \vartheta(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p \frac{K_{\theta} \delta_{vv} (T_1 s+1)s}{s(T_K^2 s^2+2\zeta_K T_K s+1)} = -\infty \quad (17)$$

A valóságban ez nem megy végbe, mivel θ változásakor változik a sebesség is, ami viszont a korábbi feltételek szerint állandónak tekinthető ($\Delta v = 0$).

Általában a rövidperiódusú mozgás csillapítási együtthatóját 0,5-nél nagyobb értékűnek tekintik.

A vízszintes vezérsík kitérése esetén létrejövő állásszögváltozást jellemző átviteli függvény:

$$V_{\alpha}^{\delta_{VV}}(s) = \frac{\kappa_{\alpha} \delta_{VV}}{s^2 + 2\zeta_{\alpha} \omega_{\alpha} s + \omega_{\alpha}^2} \quad (18)$$

Az átviteli függvények (16,18) elemzése.

1./ A repülőgép tulajdonságainak vizsgálatakor a vezérlőkarok helyzete a kiinduló, s ez zavarás nélküli repülési üzemmódnak felel meg, így $\Delta \delta_{VV} = 0$ és $\Delta \delta_{HVK} = 0$.

A (11) egyenletrendszer jobboldalát nullával egyenlőnek tételezve fel, megkapjuk a repülőgép tulajdonságait a rövidperiódusú mozgásban leíró egyenleteket:

$$-(s+a_{22})\Delta\alpha + s\Delta\theta = 0;$$

$$-(a_{30}s + a_{32})\Delta\alpha + (s^2 - a_{23}s)\Delta\theta = 0.$$

Az olyan algebrai egyenletek rendszerét, amelyekbe több ismeretlen tartozik, úgy lehet megoldani, hogy vagy kizárjuk az ismeretlent helyettesítés útján, vagy pedig determinánsok módszerét alkalmazzuk. A két egyenlet két ismeretlent tartalmaz: a $\Delta\alpha$ állásszög és a $\Delta\theta$ bólintási szög változást, megoldva az egyenleteket megkapjuk az állásszög és bólintási szög változásának törvényét az idő függvényében.

2./ Az állásszög változásának törvényét a rövidperiódusú hosszirányú mozgásban meghatározó egyenlet egy állandó együtthatós másodrendű lineáris homogén differenciálegyenlet. A karakterisztikus egyenletet megoldva és gyökeit meghatározva kapjuk, hogy ha a karakterisztikus egyenlet gyökei komplexek, ($\zeta_\alpha < 1$) akkor lengő folyamat keletkezik, ha pedig valós ($\zeta_\alpha > 1$) akkor aperiódikus. Ezek között a folyamatok között a határt az aerodinamikai erők és nyomatékok közötti viszony képezi.

3./ A mozgás stabilitását a karakterisztikus egyenlet gyökei alapján lehet megítélni.

A dinamikai stabilitáshoz szükséges és elégséges, hogy a karakterisztikus egyenlet valós gyökei negatívak legyenek, ha pedig a gyökök komplexek, akkor a gyökök valós részének kell negatívnak lenni. A feltétel kielégítéséhez, Hurwitz algebrai kritériuma alapján, a karakterisztikus egyenlet valamennyi tényezőjének pozitívnak kell lenni.

4./ A bólintási szög változásának vizsgálata azonos az állásszög változásának vizsgálatával. A bólintási szögre vonatkoztatott mozgásegyenlet harmadrendű, ezért a karakterisztikus egyenlet harmadfokú (13). A nulla értékű gyök adja a bólintási szög c_2 állandó összetevőjét.

A bólintási szög változása:

$$\Delta\delta = c_2 e^{-K_1 t} \sin(\omega_\alpha t + \varphi_\delta) + c_2.$$

A bólintási szög lengéseinek periódusa és csillapodása megegyezik az állásszög lengéseinek periódusával és csillapodásával, mivel a K_1 és K_2 tényezők erre a két mozgásra egyformák.

Mivel a φ_δ és φ_α nem egyenlő értékű, a lengések általános esetben fázisban el vannak tolva. Az állásszög és bólintási

szög értékei is különböznek a lengőmozgás végén. Stabíl repülőgépeknél az átmeneti folyamat végén az állásszögnövekményének értéke a nullához tart.

Általános esetben a bólintási szög nem veszi fel a kiinduló értéket. Ez azzal magyarázható, hogy a repülőgép a mozgás folyamatában $\Delta\theta$ szögre elgörbíti a pályát. Így a mozgás végén $\Delta\alpha=0$, viszont $\Delta\theta=\Delta\theta+\Delta\alpha=\Delta\theta\neq 0$.

3.2. Aperiódikus mozgás elemzése.

Ha $K_1 > K_2 > 0$, vagyis ha $\zeta_\alpha > 1$, akkor a (13) karakterisztikus egyenlet gyökei valósak, ugyanakkor abszolút érték szerint az egyik gyök nagy, a másik pedig kicsi. Ebben az esetben a bólintási és állásszög változása aperiódikus lesz és a következő kifejezésekkel határozható meg:

$$\Delta\alpha = \Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2 = B_1 e^{K_1 t} + B_2 e^{K_2 t};$$

$$d\theta = c_1 e^{K_1 t} + c_2 e^{K_2 t} + c_3.$$

A csillapító nyomaték növekedése aperiódikus mozgás esetében (a lengő folyamattól eltérően) a $\Delta\alpha$ növekmény kiinduló értékhez való visszatérése idejének növekedéséhez vezet.

Ha a súlypontot a semleges súlyponthelyzet mögé helyezzük, akkor a σ_n^1 tényező (a túlterhelés szerinti stabilitás foka) pozitívvá válik és ebből következik, hogy $K_2 < 0$. Így egy gyök abszolút értéke nagyobb lesz a K_1 tényezőnél. Ekkor a gyökök valósak lesznek, az egyik gyök (az abszolút érték szerint kisebb) pozitív, a másik (az abszolút érték szerint a nagyobb) negatív.

1

$$\sigma_n = m_z^c y + \frac{m_z^{\bar{\alpha}_z}}{\mu} \quad - \text{értéke és előjele más feltételek egyenlősége esetén a súlypont helyzetétől függ;}$$

$$\mu = \frac{2m}{\rho S b_A} \quad - \text{a repülőgép viszonyított sűrűsége.}$$

Positív gyökök esetében az állásszög változás egyik összetevője az idő függvényében növekedni fog és az állásszög változásának törvénye olyan lesz, hogy a repülőgép az állásszög szerint dinamikailag INSTABIL lesz.

4. Hosszúperiódusú mozgás.

A hosszúperiódusú mozgásban a repülőgép sebességváltozása a meghatározó. A hosszúperiódusú mozgás vizsgálatakor a magasságkormány (stabilizátor) helyzete rögzített és a kiinduló, kiegyensúlyozott helyzetnek felel meg, azaz $\Delta\delta_{yy}=0$. Ebben az esetben a hangsebesség alatti sebesség tartományban, ahol a repülési M szám nem gyakorol jelentős hatást a nyomatéki jellemzőkre, az állásszög a zavarás hatásaként körülbelül általános értékű lesz. Ezért a hosszúperiódusú mozgást állandó állásszög ($\Delta\alpha=0$) mellett vizsgáljuk. Eközben úgy tekintjük, hogy a repülőgép állásszög szerint statikusan stabil.

Határozzuk meg az átviteli függvényt, ha $v=\text{var}$; $\theta=\text{var}$; $\alpha=\text{const}$. A nem kormányzott repülőgép hosszirányú mozgásának dinamikáját leíró egyenlet, zavarmentes atmoszférában:

$$D(s) = \begin{vmatrix} s+a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 \\ -a_{21} & -(s+a_{22}) & (s+a_{23}) & 0 \\ -a_{31} & -(a_{30}s+a_{32}) & (s^2-a_{33})s & 0 \\ -a_{41} & a_{42} & -a_{43} & s \end{vmatrix} = 0 \quad (19)$$

A (19) determináns kifejtve és átalakítva a következő egyenletet kapjuk:

$$s(s^2+2\zeta_{\theta}\omega_{\theta}s+\omega_{\theta}^2)(s^2+2\zeta_{\alpha}\omega_{\alpha}s+\omega_{\alpha}^2) = 0 \quad (20)$$

Az első másodfokú tag a hosszúperiódusú, a második a rövid-

periódusú mozgást írja le.

ahol: ξ_ϕ, ξ_X - a repülőgép hosszúperiódusú és rövidperiódusú mozgás csillapítási együtthatói;

ω_ϕ, ω_X - a repülőgép hosszúperiódusú és rövidperiódusú mozgás körfrekvenciái.

A hosszúperiódusú mozgás étviteli függvényei a δ_{HVK} kitérése esetén ($\Delta\alpha=0$) mellett:

$$V_\theta \delta_{HVK}(s) = \frac{D_\theta \delta_{HVK}(s)}{D_\phi(s)} \quad (21)$$

$$V_V \delta_{VV}(s) = \frac{D_V \delta_{VV}(s)}{D_\phi(s)} \quad (22)$$

ahol:

$$D_\phi \delta_{HVK}(s) = \begin{vmatrix} s+a_{11} & a_{13} \\ -a_{21} & s \end{vmatrix} ;$$

$$D_\theta \delta_{HVK}(s) = \begin{vmatrix} s+a_{11} & c_{13} \\ -a_{21} & 0 \end{vmatrix} ;$$

$$D_V \delta_{HVK}(s) = \begin{vmatrix} c_{13} & a_{13} \\ 0 & s \end{vmatrix} ;$$

Az állásszög változását a következő átviteli függvény írja le:

$$W_{\theta}^{\delta_{\text{HVK}}}(s) = \frac{K_{\theta}^{\delta_{\text{HVK}}}}{s^2 + 2\zeta_{\phi}\omega_{\phi}s + \omega_{\phi}^2} \quad (23)$$

ahol: $K_{\theta}^{\delta_{\text{HVK}}} = \frac{c_{13}}{a_{13}} ;$

Abban az esetben ha nő a vonóerő ($K_{\theta}^{\text{HVK}} > 0$ esetén), nő a bólintási szög (θ), amely a pályaszög (Θ) növekedését vonja maga után ($\Theta = \theta - \alpha$, a feltétel $\alpha = 0$).

A sebesség változását leíró átviteli függvény:

$$W_v^{\delta_{\text{HVK}}}(s) = \frac{\begin{vmatrix} c_{13} & a_{13} \\ 0 & s \end{vmatrix}}{D_{\phi}(s)} \quad (24)$$

$$W_v^{\delta_{\text{HVK}}}(s) = \frac{K_v^{\delta_{\text{HVK}}} s}{s^2 + 2\zeta_{\phi}\omega_{\phi}s + \omega_{\phi}^2} \quad (25)$$

A (25) átviteli függvény kéttárolós lengőtagjának csillapítási együtthatója kicsi ($\zeta_{\phi} = 0,05-0,1$).

A repülőgép sebessége lengéseinek periódusa a hosszúperiódusú hosszirányú mozgásban (a sebesség függvényében) tíz másodperceket tesz ki, vagyis jelentős mértékben nagyobb az állásszög lengések periódusánál a rövidperiódusú hosszirányú mozgásban. Ezért nevezik hosszúperiódusú mozgásnak.

Ha a repülőgép sebesség szerint statikusan instabil, ami általában a hangsebesség körüli sebességeken fordul elő, akkor a hosszúperiódusú hosszirányú mozgás aperiódikusan instabil lesz.

A repülőgép vezérlésében különösen fontos szerepet játszik a rövidperiódusú mozgás. Az esetek többségében célszerű a teljes hosszirányú mozgástól különválasztva vizsgálni. A rövidperiódusú mozgás vizsgálatánál az (1) egyenletben a sebességváltozást elhagyhatjuk, ami a karakterisztikus egyenlet, egy fokkal történő csökkenéséhez vezet. Ha a vonóerő hatását is elhanyagoljuk akkor a karakterisztikus egyenlet másodfokú lesz.

Felhasznált irodalom

- [1] - С. А. Горбатенко, Э. М. Макашов, В. Ф. Полушкин, Л. В. Шефтель: Расчёт и анализ движения летательных аппаратов
Инженерный справочник, Москва, 1971. "Машиностроение"
- [2] - Г. Ф. Зайцев, В. И. Койук, Л. И. Чинаев: Основы автоматического управления и регулирования
Киев, 1975. "Техніка"
- [3] - В. С. Пугачев: Основы автоматического управления
Москва, 1968. Наука
- [4] - Horváth Dezső: A repülőgép dinamikai tulajdonságainak vizsgálata hosszirányú mozgás esetén
SZRF, Repüléstudományi és Kiképzési Közlemények, 1995/
1. szám.

- [5] - A. M. Taraszenkov és mások: Dinamika paljota i bojevovo manyovrovanyija letatyelnih apparatov
Moszkva, 1984. Zsukovszkij Akadémia
- [6] - A. A. Krasovskij: Системы автоматического управления полетом пилотируемых летательных аппаратов
Moskva, 1971. В. В. И. А имени проф. Н. Е. Жуковского
- [7] - Szabolcsi Róbert: Légijárművek nemlineáris mozgásegyenleteinek linearizálása
SZRF, Tudományos Kiképzési Közlemények 1992/2-3. szám

Szabolcsi Róbert mérnök százados
főiskolai adjunktus, oktató

AUTOMATIKUS SEBESSÉGSTABILIZÁLÓ RENDSZER ANALÍZISE ÉS SZINTÉZISE

Az automatikus sebességstabilizáló rendszer az automatikus repülésvezérlő rendszer elengedhetetlen részét képezi, alapvető feladata a repülési sebesség (M-szám) stabilizálása. A sebességstabilizáló rendszert úgy a katonai mint a polgári repülés területén széles körben alkalmazzák. Az egyik leggyakrabban alkalmazott sebesség szabályozási elv a hajtóművek tolóerejének megváltoztatása. A tolóerő szabályozására szolgáló rendszert tolóerő automatának is szokás nevezni. Ezen cikkben az automatikus sebességstabilizáló rendszer zavarelhárítási képességével és követési tulajdonságaival kívánok foglalkozni. Az idő és a frekvencia tartományban számítógépes analízist mutatok be, majd a szabályozó optimális beállítását végzem el a rendszerben lévő korlátozásokat is figyelembe vevő *LAGRANGE* multiplikátor módszer alkalmazásával.

1. Bevezetés.

A repülőgép pályavezérlésének szempontjából az egyik nagyon fontos repülési paraméter a repülési sebesség (M-szám). A repülési sebesség automatikus stabilizálása a következő okokra vezethető vissza :

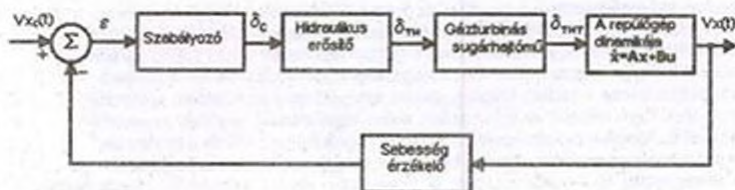
- hosszú ideig tartó útvonalrepülések esetén a sebesség kézi stabilizálása a repülőgép személyzetének gyors fáradását eredményezi,
- modern repülőgépek esetében, amelyek a repülési sebesség tekintetében instabil kialakításúak, az automatikus sebességstabilizáló rendszer alkalmazása elengedhetetlenül szükséges.

A repülési sebesség stabilizálására többféle módszer ismeretes. Hagyományos repülőgépek esetében a magassági kormány kitérítésével valamint a hajtómű üzemének megváltoztatásával elérhető a sebesség változása. Ha például állandó tolóerő esetén a repülőgép emelkedését eredményezi a magassági kormány kitérése, akkor a légellenállás növekedése miatt csökken a repülési sebesség. Ezt a módszert a repülési magasság változása jellemzi.

Abban az esetben, ha megengedhetetlen a repülési magasság változása, a sebesség megváltoztatását tolóerő automata biztosítja a hajtóműbe szállított tüzelőanyag mennyiségének megváltoztatásával. Ezen cikkben a tolóerő automatára épülő sebességstabilizáló rendszerrel kívánok foglalkozni.

2. A sebesség stabilizáló rendszer hatásvázlata.

A sebesség stabilizáló rendszer (SSR) hatásvázlata az 1. ábrán látható [2,10].



1. ábra

Az automatikus sebesség stabilizáló rendszer hatásvázlata

A továbbiakban röviden jellemezzük a rendszer egyes részeinek matematikai modelljét.

2.1. Az SSR szabályozója.

A gyakorlatban egyszerű esetben P-típusú szabályozót alkalmaznak. A minőségi jellemzők javítása (zavarelhárítás, stabilitás) érdekében azonban elterjedt a PI, vagy PID-szabályozó felhasználása [3,4,8]. A repülési sebesség stabilizáló rendszerében a következő vezérlési törvényeket alkalmazzák:

- arányos szabályozó esetében:

$$\delta_c(s) = K_c \varepsilon(s) \quad (2.1)$$

- arányos-integráló szabályozó esetében:

$$\delta_c(s) = K_0 \left(1 + \frac{K_1}{s}\right) \varepsilon(s) \quad (2.2)$$

- PID-szabályozó esetében:

$$\delta_c(s) = K_0 \left(1 + \frac{K_1}{s} + sT_d\right) \varepsilon(s) \quad (2.3)$$

2.2. A hidraulikus erősítő matematikai modellje.

A [10,14] irodalmak a hidraulikus erősítő átviteli függvényét arányos egytárolós taggal adják meg:

$$Y_1(s) = \frac{\delta_{TH}(s)}{\delta_c(s)} = \frac{1}{1+T_{acr} s} \quad (2.4)$$

- ahol:
- T_{acr} - a hidraulikus erősítő időállandója,
 - $\delta_{TH}(s)$ - a hajtómű vezérlő kar szög helyzetének megváltozása,
 - $\delta_c(s)$ - a hidraulikus erősítő bemeneti jele.

2.3. A gázturbinás sugárhajtómű matematikai modellje.

A műszaki szakirodalom a gázturbinás sugárhajtómű átviteli függvényét arányos, fázissiettető, egytárolós, holtidős tagként adja meg [5,10]:

$$Y_2(s) = \frac{\delta_{TH}(s)}{\delta_{TH}(s)} = K_E \frac{1+sT}{1+T_E s} e^{-\tau s} \quad (2.5)$$

- ahol:
- $\delta_{TH}(s)$ - a hajtómű tolóerejének megváltozása;
 - T_E - a hajtómű időállandója;
 - T - a fázissiettető tag időállandója;
 - K_E - a hajtómű erősítési tényezője;
 - τ - holtidő.

A gyakorlatban elterjedt az alábbi egyszerűsített matematikai modell alkalmazása [10]:

$$Y_2(s) = \frac{\delta_{TH}(s)}{\delta_{TH}(s)} = \frac{K_E}{1+T_E s} \quad (2.6)$$

Hagyományos építésű, egyhajtóműves vadászpilóta repülőgép tolóereje utánégetés nélkül a [2,5,9,10] irodalmak alapján:

$$\delta_{TH} = 60 \text{ kN} \quad (2.7)$$

Feltételezzük, hogy az SSR beavatkozó szerve a maximális tolóerőt 10 %-al

képes megváltoztatni, valamint a gázkar szögkitérése 110° (1,047 rad). Ezért a hajtómű erősítési tényezőjét az alábbi módon lehet meghatározni:

$$K_E = \frac{0,11 \text{ mN}}{s \cdot \text{mm}} = 5,73 \text{ kN/rad} \quad (2.8)$$

A hajtómű időállandója függ a repülési paramétereiktől, a hajtómű beállítástól és (0,3 - 1,5) sec időintervallumban vehet fel értéket [2,5,9,10].

2.4. A repülőgép átviteli függvénye és hatásvázlata.

A repülőgép repülési sebességének állandó magasságon ($\Theta = 0^\circ$) történő stabilizálásakor a repülőgép átviteli függvényét a hosszirányú mozgás egyenlet-rendszerének elemzésével hajthatjuk végre. Az úgynevezett egy szabadságfokú matematikai modell a hossz tengely mentén az egyenes vonalú mozgást a következő egyenlettel írja le [1,2,5,6,7,9,10,11,12,13]:

$$\frac{dV_x}{dt} + a_1 V_x + a_2 \Theta + a_3 \alpha = h_1 \delta_{THR} + \frac{dW_x}{dt} \quad (2.9)$$

ahol: - V_x - a repülőgép sebessége, Θ - pályaszög, α - állásszög.

- W_x - a légköri turbulencia sebességvektorának a repülőgép hossz tengelyére eső komponense,

- a_1, a_2, a_3, h_1 - a repülési üzemmódtól függő állandó együtthatók.

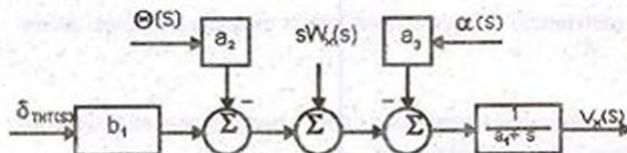
Képezzük az (1.9) egyenlet Laplace transzformáltját zérus kezdeti feltételek mellett. A következő egyenletet kapjuk:

$$sV_x(s) + a_1 V_x(s) + a_2 \Theta(s) + a_3 \alpha(s) = h_1 \delta_{THR}(s) + sW_x(s) \quad (2.10)$$

vagy a (2.10) egyenlet rendezése után:

$$V_x(s) = \frac{h_1 \delta_{THR}(s) + sW_x(s) - a_2 \Theta(s) - a_3 \alpha(s)}{a_1 + s} \quad (2.11)$$

A (2.11) egyenlet alapján megrajzolható a repülőgép dinamikus viselkedését jellemző hatásvázlat (2. ábra).



2. ábra
A repülőgép dinamikája

Ha a sebesség stabilizálása állandó magasságon történik ($\Theta = 0^\circ$), valamint $\alpha = 0^\circ$ esetén a (2.11) egyenletből a repülőgép átviteli függvénye az alábbi módon írható fel (a szél sebességének elhanyagolásával):

$$Y_3(s) = \frac{V_v(s)}{\delta_{THR}(s)} = \frac{h_1}{a_1 + s} = \frac{K_A}{1 + sT_A} \quad (2.12)$$

ahol: $-K_A = \frac{h_1}{a_1}$ - a repülőgép erősítési tényezője,
 $-T_A = \frac{1}{a_1}$ - a repülőgép időállandója.

2.5. A sebességérzékelő matematikai modellje.

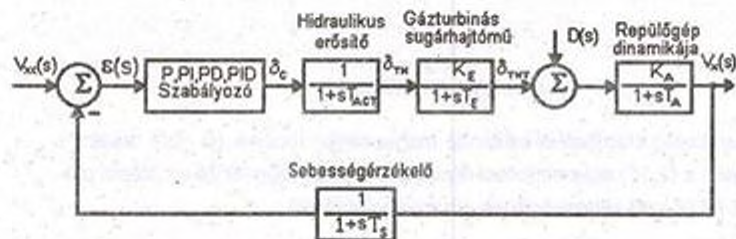
Az SSR rendszer működését a magasságérzékelő alapvetően befolyásolja. Hagyományos építésű repülőgépeken a repülési sebesség érzékelése gyakran barometrikus műszerrel történik. A műszer átviteli függvényét nagyon sokszor arányos, egytárolós taggal definiálják [10]:

$$Y_4(s) = \frac{1}{1 + sT_s} \quad (2.13)$$

A modern repülőgépek döntő többségén ma már elektro-mechanikus vagy digitális légijel-rendszert alkalmaznak a repülési sebesség, illetve az M-szám mérésére és kijelzésére. A repülési sebesség mérésére kínálkozó másik módszer

lineáris gyorsulásmérő alkalmazása. A gyorsulásmérő kimeneti villamos jelének integrálása a kezdeti feltételek figyelembevételével megadja a repülési sebességet [10].

Figyelembevéve a második fejezetben eddig elhangzottakat az SSR rendszer hatásvázlata a 3. ábrán látható.



3. ábra
Az SSR rendszer hatásvázlata

3. Az SSR rendszer analízise az időtartományban.

A repülőgép térbeli mozgását a repülőgépvezetőtől vagy az SSR-től érkező parancsjelek, a légköri jelenségek, valamint az érzékelők hibái befolyásolják. A repülőgépre ható külső és belső zavarások miatt annak repülési paraméterei aztochasztikusan (véletlenszerűen) változnak. Az SSR rendszer alapvető feladata ebben az esetben a zavarások káros következményeinek csökkentése, ideális esetben teljes kiküszöbölése. Ha a repülőgép turbulens áramlásban halad, akkor az állásszög α változását figyelhetjük meg. Hasonló jelenség játszódik le abban az esetben is, amikor a repülőgépvezető véletlenül kitéríti a magassági kormányt. Az időtartományban lefolytatandó analízis során a légköri turbulencia sebességvektorának a hossz tengelyre eső $D(s)$ komponensét vesszük csak figyelembe (3. ábra).

3.1. Az SSR rendszer zavarelhárítási képességének analízise.

Ezen fejezetben az SSR rendszer zavarelhárítási képességét fogjuk vizsgálni. A zavarelhárítási képesség és a maradék hibák analízisét a Laplace

transzformáció végérték tételének felhasználásával lehet végrehajtani [3,4]. Abban az esetben, ha az SSR rendszer a (2.1) egyenlettel megadott P-típusú szabályozóval működik, a zárt rendszer átviteli függvénye $D(s)$ bemeneti jelre a következő módon írható fel ($N(s) = V_{xc}(s) = 0$). A 3. ábra alapján:

$$W(s) = \frac{V_x(s)}{D(s)} = \frac{\frac{K_A}{1+sT_A}}{1 + \frac{K_C K_E K_A}{(1+sT_S)(1+sT_E)(1+sT_A)(1+sT_{ACT})}} \quad (3.1)$$

A (3.1) egyenlet egyszerűsítése után a repülési sebesség Laplace transzformáltját a következő alakban írhatjuk fel:

$$V_x(s) = \frac{K_A(1+sT_S)(1+sT_{ACT})(1+sT_E)}{(1+sT_S)(1+sT_{ACT})(1+sT_E)(1+sT_A) + K_C K_E K_A} D(s) \quad (3.2)$$

A Laplace transzformáció végérték tételének felhasználásával [3,4] alapján a repülési sebesség értéke $t \rightarrow \infty$ esetén ($s=0$) az alábbi módon határozható meg:

$$V_x(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} V_x(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s V_x(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s W(s) D(s) \quad (3.3)$$

Abban az esetben, ha a $D(s)$ zavarás determinisztikus és ugrásfüggvény jelleggel változik ($D(s)=1$), a repülési sebesség végértéke a (3.2) és a (3.3) egyenletekből $s=0$ helyettesítéssel a következő lesz:

$$V_x(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{K_A(1+sT_S)(1+sT_{ACT})(1+sT_E)}{(1+sT_S)(1+sT_{ACT})(1+sT_E)(1+sT_A) + K_C K_E K_A} = 0 \quad (3.4)$$

Ha a rendszer zérus bemeneti jellel rendelkezik, akkor a maradék hiba értékét az alábbi módon lehet számítani:

$$\varepsilon(\infty) = V_{xc}(\infty) - V_x(\infty) = 0 - 0 = 0 \quad (3.5)$$

Mint az a (3.5) egyenletből is jól látható, az SSR rendszer P-típusú szabályozója a rendszerre ható $D(s)$ impulzus jellegű zavarás esetén 1-típusú szabályo-

zóként működik, a külső zavarás káros következményeit teljesen megszünteti.

Vizsgáljuk meg az SSR rendszer zavarelhárítási képességét, ha a rendszerben alkalmazott szabályozó P-típusú és a $D(s)$ zavarás determinisztikus jelleggel, ugrásfüggvény szerint változik. A repülési sebesség értéke ebben az esetben a következő módon határozható meg:

$$V_x(\infty) = \frac{K_d}{1 + K_c K_d K_E} \quad (3.6)$$

Mivel a gyakorlatban $K_c K_d K_E \gg 1$, ezért a maradó hiba értéke [2, 10, 14]:

$$\varepsilon(\infty) = V_x(\infty) - V_x(\infty) = -(K_c K_E)^{-1} \quad (3.7)$$

A P-szabályozóval működő SSR rendszer tehát ugrásfüggvény jelleggel változó $D(s)$ zavarás esetében 0-típusú szabályozóként működik, tehát a zérus bemeneti jelet nem tartja meg. A rendszer pontos működését PI-szabályozó biztosítja, melynek vezérlési törvényét a (2.2) egyenlet adja meg. A 3. ábra alapján a zárt rendszer átviteli függvénye a következő:

$$W(s) = \frac{V_x(s)}{D(s)} = \frac{\frac{K_d}{1+sT_d}}{1 + \frac{K_c(K_{C_2}+s)K_E K_d}{s(1+sT_{ACT})(1+sT_E)(1+sT_A)(1+sT_S)}} \quad (3.8)$$

Néhány egyszerű matematikai átalakítás után a zárt rendszer átviteli függvénye:

$$W(s) = \frac{sK_d(1+sT_{ACT})(1+sT_E)(1+sT_S)}{s(1+sT_{ACT})(1+sT_E)(1+sT_A)(1+sT_S) + K_c(K_{C_2}+s)K_E K_d} \quad (3.9)$$

Az SSR rendszer $V_x(s)$ kimeneti jelét a (3.8) egyenlet alapján a következő alakban írhatjuk fel:

$$V_x(s) = W(s)D(s) \quad (3.10)$$

A (3.3) egyenlettel definiált végérték tétel felhasználásával és a (3.9), valamint a (3.10) egyenletek figyelembevételével a repülési sebesség állandósult állapotban a következő lesz :

$$V_x(\infty) = \frac{0}{K_C K_G K_E K_A} = 0 \quad (3.11)$$

Zérus alapjel esetén a szabályozási hiba értéke :

$$\varepsilon(\infty) = V_x(\infty) - V_x(\infty) = 0 - 0 = 0 \quad (3.12)$$

Az eddig elhangzottak alapján tehát megállapíthatjuk, hogy ugrásfüggvény jellegű zavarások káros következményeinek teljes elhárítása csak PI-típusú szabályozó alkalmazásával lehetséges.

Az [1,2,5,6,10,11,13] irodalmak részletesen tárgyalják a légköri turbulencia jellemzőit, annak viselkedését, matematikai leírását, valamint a repülőgépre ható egyéb más külső zavarásokat. A légköri turbulencia számítógépes modellezésében a Dryden-féle matematikai modell alkalmazása terjedt el. Ez a matematikai modell ugyan pontosabb mint a Kármán-féle modell, de sokkal könnyebben programozható [10].

3.2. Az SSR rendszer követési tulajdonságainak analízise

A 3.1 fejezetben alkalmazott metodikát követve $V_x(s)$ bemeneti jelre zavarásmentes esetben a zárt rendszer eredő átviteli függvénye a következő [3,4] :

$$W(s) = \frac{V_x(s)}{V_x(s)} = \frac{\frac{K_C K_E K_A}{(1+sT_E)(1+sT_A)(1+sT_{ACT})}}{1 + \frac{K_C K_E K_A}{(1+sT_S)(1+sT_{ACT})(1+sT_E)(1+sT_A)}} \quad (3.13)$$

Néhány egyszerű matematikai átalakítás után kapjuk, hogy

$$W(s) = \frac{K_E K_C K_A (1+sT_E)}{(1+sT_S)(1+sT_{ACT})(1+sT_E)(1+sT_A) + K_E K_A K_C} \quad (3.14)$$

A Laplace traszformáció végérték tétele ebben az esetben a következő lesz :

$$V_x(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s V_x(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s W(s) V_{uc}(s) \quad (3.15)$$

Legyen a rendszer bemeneti jele $V_{uc}(s)$ 1 m/s amplitúdójú determinisztikus ugrásfüggvény. Ekkor a (3.14) és a (3.15) egyenletek alapján a repülési sebesség értéke $t \rightarrow \infty$ esetén :

$$V_x(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{K_A K_C K_E (1 + s T_E)}{(1 + s T_S)(1 + s T_{ACT})(1 + s T_E)(1 + s T_A) + K_C K_A K_E} \frac{1}{s} = \frac{K_A K_C K_E}{1 + K_A K_C K_E} \quad (3.16)$$

Mivel a gyakorlatban $K_A K_C K_E \gg 1$, ezért az alapjel követésének hibája :

$$\varepsilon(\infty) = V_{uc}(\infty) - V_x(\infty) = 1 - 1 = 0 \quad (3.17)$$

A (3.17) egyenlet alapján azt mondhatjuk, hogy az SSR rendszer zavarásmentes esetben még az egyszerű P-típusú szabályozó alkalmazásával is 1-típusúként viselkedik.

Ha az alapjel impulzus függvényként fogható fel, akkor a (3.15) végérték tétel alkalmazásával a repülési sebesség $t \rightarrow \infty$ esetén a következő lesz :

$$V_x(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{K_A K_C K_E (1 + s T_E)}{(1 + s T_S)(1 + s T_{ACT})(1 + s T_E)(1 + s T_A) + K_C K_A K_E} = 0 \quad (3.18)$$

Az alapjel követési hibája :

$$\varepsilon(\infty) = V_{uc}(\infty) - V_x(\infty) = 0 - 0 = 0 \quad (3.19)$$

A szabályozások egyéb minőségi jellemzőit (túlszabályozás, szabályozási idő lengésszám) tanulmányom 4. fejezetében vizsgálom.

4. A számítógépes analízis eredménye.

4.1. Az SSR rendszer zavarelhárítási képességének analízise.

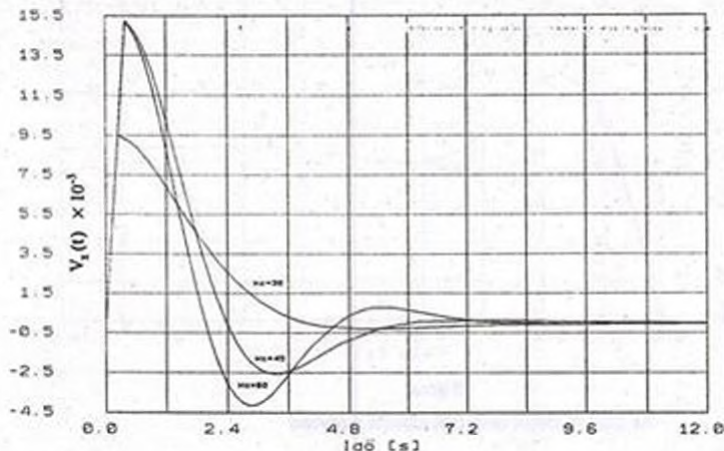
A számítógépes analízishez a paramétereket a [2,5,10] irodalmak alapján a következő értékekre választottam :

$$T_{acr}=0,1 \text{ s}; K_g=5,73 \text{ kN/rad}; T_r=0,5 \text{ s}; T_d=50 \text{ s}; K_d=0,2 \text{ mS}^{-1}/\text{kN} \quad (4.1)$$

A szabályozó K_c erősítése a számítógépes analízis során diszkrét értéket vesz fel, mely 30, 45 és 60 lehet.

4.1.1. Zavarelhárítási képesség vizsgálata impulzus jellegű D(s) esetén.

A 3. fejezetben levezettük, hogy a rendszerre ható determinisztikus külső zavarás D(s) esetén a repülési sebesség értékét $t \rightarrow \infty$ esetén a (3.4) egyenlet, míg az állandósult állapotbeli hibát a (3.5) egyenlet definiálja. A számítógépes analízis során az egyváltozós rendszer bemeneti jele a D(t) külső zavarás, míg a kimeneti jel a repülési sebesség $V_x(t)$. A bemeneti jel D(t) amplitúdója 10 m/s, a pulzusszélesség 0,25 s. A számítógépes analízis eredménye a 4. ábrán látható. A 4. ábrán jól látható, hogy állandósult állapotban $V_x(t) = 0$. Így tehát a zérus értékű alapjel $V_{xc}(t) = 0$ értékének megtartása maradó hiba nélkül történik. A maradó hibát a (3.5) egyenlet alapján számíthatjuk. A 4. ábrán látható görbesereg a szabályozó erősítési tényezőjében paraméterezett.



4. ábra

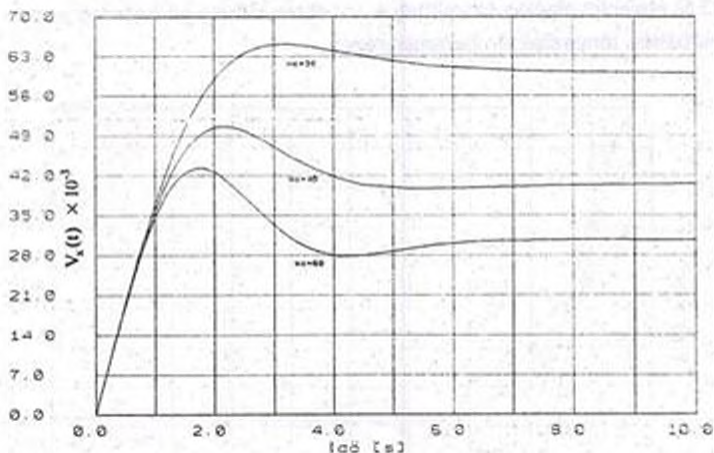
Az SSR rendszer analízise időtartományban

4.1.2. Zavarelhárítási képesség vizsgálata ugrásfüggvény jellegű $D(s)$ esetén.

Korábbi ismeretes, hogy az SSR rendszerre ható ugrásfüggvény jellegű $D(s)$ esetén a repülési sebesség értékét állandósult állapotban a (3.6) egyenlet, míg a szabályozási hibát a (3.7) képlet alapján lehet meghatározni. A számítógépes analízis eredménye az 5. ábrán látható.

Az analízis során a $D(t)$ külső zavarás ugrásfüggvény jelleggel változik, amplitúdója 10 m/s . Ha az SSR rendszerben alkalmazott szabályozó P-típusú, ekkor a zérus alapjel tartása maradó hibával történik. A szabályozási hiba értékei $60,19 \times 10^{-3} \text{ m/s}$, $40,58 \times 10^{-3} \text{ m/s}$, $30,45 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ a szabályozó egyes erősítéseinek megfelelően.

A (3.7) egyenlet alapján a szabályozási hiba csökkenthető a K_c erősítési tényező növelésével. Az erősítés növelése azonban növeli a hurokerősítést is, így lényegesen megváltoztatja a szabályozás minőségi jellemzőit (pl. stabilitás).



5. ábra

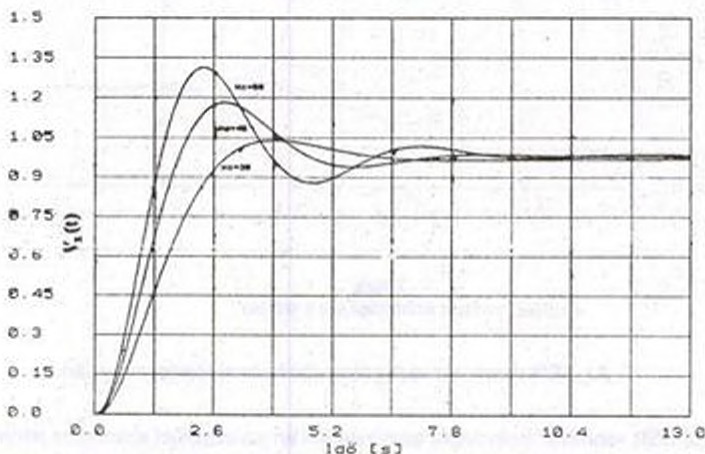
Az SSR rendszer analízise időtartományban

4.2. Az SSR rendszer követési tulajdonságainak analízise.

4.2.1. Az SSR rendszer átmeneti függvénye.

Korábbról ismeretes, hogy zavarásmentes esetben a P-típusú szabályozóval ellátott SSR rendszer az ugrásfüggvény jellegű $V_{xc}(t)$ bemeneti jelet ledolgozza. A szabályozó tehát 1-típusúként viselkedik. $V_{xc}(t) = 1 \frac{m}{s}$ esetén a szabályozás átmeneti függvénye a 6. ábrán látható.

Mint az a 6. ábrán jól látható, állandósult állapotban a $V_x(t)$ ki meneti jel tart a $V_{xc}(t)$ alapjelhez, tehát a szabályozó valóban hiba leköveti az alapjelet. A szabályozó változó erősítései közül a legmegfelelőbb: $K_x = 45$.



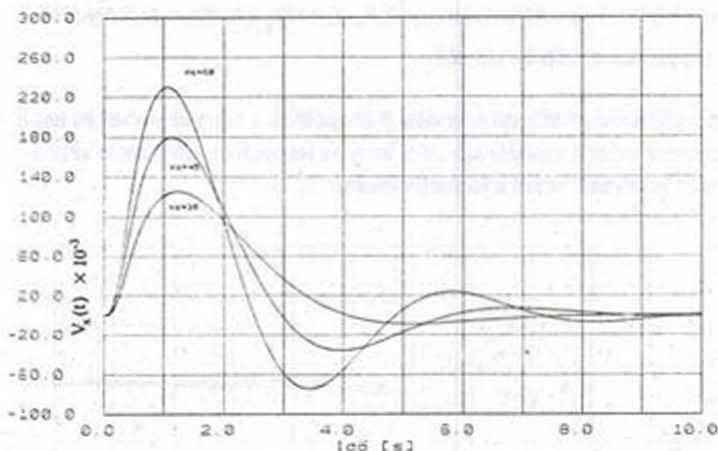
6. ábra
Az SSR rendszer átmeneti függvénye

4.2.2. Az SSR rendszer válasza az impulzus jellegű alapjelre.

A 3. fejezetben bizonyítást nyert, hogy determinisztikus és impulzus jellegű alapjel esetén az állandósult állapotbeli hiba zérus értékű. Legyen a bemeneti jel $V_{xc}(t) = 1 \frac{m}{s}$ amplitúdójú négyszögfüggvény $t=0,4$ s pulzusidővel. Az SSR

rendszer válasza a bemeneti jelre a 7. ábrán látható.

Mint az a 7. ábrán látható, a szabályozó erősítési tényezőjének K_c növelése a lengési hajlam növekedését eredményezi.



7. ábra
Az SSR rendszer számítógépes analízise

5. Az SSR rendszer vizsgálata frekvenciatartományban.

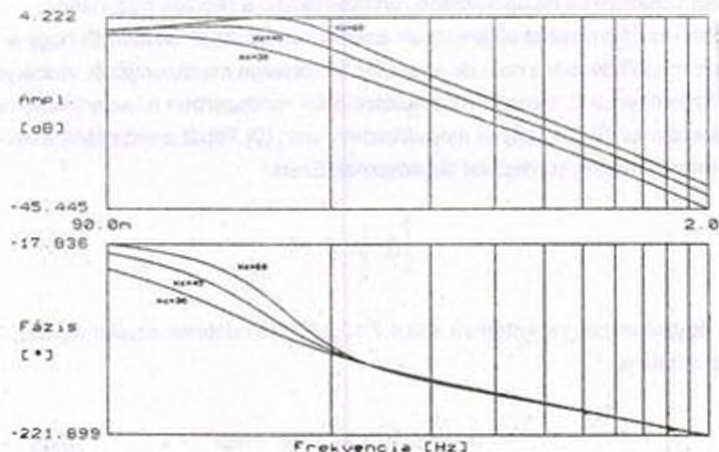
Az SSR rendszer frekvencia analízise során az alapjelet szinuszos jelnek tekintjük, amelynek frekvenciája bizonyos tartományban változik. A frekvenciatartományban végrehajtott stabilitásvizsgálat lényege a következő: a zárt szabályozási kör stabilitása eldönthető a felnyitott szabályozási kör viselkedése alapján [2,3,4,5,6,8,10,13,14]. A felnyitott kör frekvencia függvényét megkaphatjuk az átviteli függvényből is az $s=j\omega$ formális helyettesítéssel [3,4,10].

A 3. ábra alapján a felnyitott szabályozási kör átviteli függvénye a következő:

$$Y(s) = \frac{K_c K_E K_A}{(1+sT_{ACT})(1+sT_E)(1+sT_A)(1+sT_S)} \quad (5.1)$$

5.1. Az SSR rendszer Bode diagramja.

Az amplitúdó- és fázis-frekvencia görbék a 8. ábrán láthatók.



8. ábra
Az SSR rendszer Bode diagramja

A 8. ábra alapján megállapítható az amplitúdó görbék meredeksége az ω_c metszési körfrekvencián. A görbesereg a szabályozó erősítési tényezője szerint paraméterezett. A számítógépes analízis eredményeit elemezve azt mondhatjuk, hogy a rendszer stabil működésű, a fázis és az amplitúdó tartalék eleget tesz a rendszerrel szemben támasztott minőségi követelményeknek. Igényes szabályozásokra az amplitúdó tartalék $\kappa \geq 6\text{dB}$, míg a fázistartalék $\varphi_c \geq 30^\circ$. Az általunk vizsgált rendszerben az egyes fázistartalékok a következők: 144° , $74,88^\circ$, $50,96^\circ$ a szabályozó $K_C = 30, 45, 60$ erősítéseinek megfelelően, míg az amplitúdó tartalékok a következők: $24,78\text{ dB}$; $20,72\text{ dB}$; és $17,82\text{ dB}$.

A [3,4] irodalmak részletesen tárgyalják a szabályozások frekvencia analízisét. Így a mélyebb ismeretekre vágyók bőségesen találhatnak szakirodalmat a témával kapcsolatban, tudásukat igényük szerint tökéletesíthetik.

6. Az SSR rendszer optimális beállítása a Lagrange multiplikátor alkalmazásával.

Az automatikus repülésvezérlő rendszerekben a repülés biztonsága érdekében korlátozásokat alkalmaznak. Ezek a korlátozások biztosítják, hogy a rendszer meghibásodása nem jár a repülés biztonsága szempontjából veszélyes következménnyel. A 2. fejezetben bemutatott SSR rendszerben a tolóerő automata a tolóerő max. 10 %-ig képes megváltoztatni azt [10]. Tehát a sebesség stabilizáló rendszerben is korlátozást alkalmaznak. Ezért

$$\int_0^{\infty} \delta^2 dt \leq \delta \quad (6.1)$$

A négyzetes integrál kritérium a [3,4,7,10,12,14] irodalmak szerint az alábbi alakban írható fel :

$$J = \int_0^{\infty} (\varepsilon^2 + \lambda \delta^2) dt = \min \quad (6.2)$$

ahol : - λ - Lagrange multiplikátor, skalár mennyiség.

Az SSR rendszer - melynek hatásvázlata a 3. ábrán látható - szabályozója legyen PD-típusú a gyors működés érdekében. A rendszer vezérlési törvénye:

$$\delta_c(s) = K_c(1 + sT_D)\varepsilon(s) \quad (6.3)$$

Az alapjel $V_{xc}(t)$ legyen egységnyi amplitúdójú ugrásfüggvény. Határozzuk meg a szabályozó K_c erősítési tényezőjét, valamint a differenciáló tag T_D időállandóját oly módon, hogy a (6.1) korlátozással rendelkező SSR rendszer $\varepsilon(t)$ hibájának négyzetes integrálja minimális értékű legyen. Az optimális paraméterek megállapításához válasszuk ki a következő repülési paramétereket [2,10] : $H=12000\text{m}$ és $M=0,9$ esetén a repülőgép időállandója : $T_s = 100\text{ s}$. Feltételezzük, hogy a hidraulikus erősítő és a sebességérzékelő nagyon gyors működésű, így időállandójuk elhanyagolhatóan kicsi. Ezen feltételek figyelembevételével a hibajelre megállapított átviteli függvény a következő alakban írható fel :

$$W(s) = \frac{\varepsilon(s)}{V_{xc}(s)} = \frac{1}{1 + \frac{K_C(1+sT_D)K_E K_A}{sT_A(1+sT_E)}} \quad (6.4)$$

A hibajel Laplace transzformáltja a (6.4) egyenlet alapján :

$$\varepsilon(s) = \frac{(1+sT_E)T_A}{sT_A(1+sT_E) + K_C(1+sT_D)K_E K_A} \quad (6.5)$$

Tekintsük kimeneti jelnek a $\delta_{mtr}(s)$ jelet és határozzuk meg a zárt rendszer átviteli függvényét :

$$W(s) = \frac{\delta_{mtr}(s)}{V_{xc}(s)} = \frac{K_C(1+sT_D) \frac{K_E}{1+sT_E}}{1 + \frac{K_C(1+sT_D)K_E K_A}{sT_A(1+sT_E)}} \quad (6.6)$$

Figyelembe véve, hogy $V_{xc}(s) = \frac{1}{s}$, ezért a tolóerő változása a (6.6) egyenletből :

$$\delta_{mtr}(s) = \frac{(1+sT_D)T_A K_C K_E}{sT_A(1+sT_E) + K_C(1+sT_D)K_E K_A} \quad (6.7)$$

A (6.5) és a (6.7) egyenletekben elvégezve a kijelölt műveleteket a következő egyenleteket kapjuk :

$$\varepsilon(s) = \frac{T_A + sT_A T_E}{K_C K_E K_A + s(T_A + K_C K_E K_A T_D) + T_A T_E s^2} \quad (6.8)$$

vagy

$$\varepsilon(s) = \frac{a_0 + a_1 s}{b_0 + b_1 s + b_2 s^2} \quad (6.9)$$

ahol : $a_0 = T_A$; $a_1 = T_A T_E$

$$b_0 = K_C K_E K_A; b_1 = T_A + K_C K_E K_A T_D; b_2 = T_A T_E \quad (6.10)$$

és

$$\delta_{MIT}(s) = \frac{T_A K_C K_E + s T_A T_D K_C K_E}{K_C K_E K_A + s(T_A + K_C K_E K_A T_D) + s^2 T_A T_E} \quad (6.11)$$

vagy

$$\delta_{MIT}(s) = \frac{c_0 + c_1 s}{b_0 + b_1 s + b_2 s^2} \quad (6.12)$$

$$\text{ahol: } c_0 = T_A K_C K_E; c_1 = T_A T_D K_C K_E \quad (6.13)$$

Mivel a hibajel négyzetes integrálja - melyet a mi esetünkben a (6.2) egyenlet definiál - az időtartományban sokszor meglehetősen nehezen számítható, ezért gyakran a komplex frekvencia tartományban - az "s" síkon - határozzák meg az integrál értékét. A Parseval tétel értelmében, ha az $\varepsilon(s)$ hibajel racionális törtfüggvénye az "s" komplex frekvenciának és a (6.9) egyenlet alapján a hibajelnek csak baloldali pólusai vannak, akkor a hibajel négyzetes integrálja a (6.9) törtkifejezés számlálójának és nevezőjének együtthatói alapján könnyen kiszámítható az együtthatókból képzett algebrai egyenletek segítségével. Különböző fokszámú polinomokra az eredményeket táblázatba foglalják. A Phillips integrál táblázat felhasználásával a másodfokú $\varepsilon(s)$ hibajelre a következő egyenletet kapjuk [3,4,10]:

$$I_{1,E} = \frac{a_1^2 b_0 + a_0^2 b_1}{2b_0 b_1} = \frac{K_C K_E K_A (T_A T_E)^2 + T_E T_A^3}{2K_C K_E K_A T_A T_E (T_A + K_C K_E K_A T_D)} \quad (6.14)$$

A tolóerő megváltozására szintén írhatjuk, hogy:

$$I_{1,Q} = \frac{c_1^2 b_0 + c_0^2 b_1}{2b_0 b_1} = \frac{(T_A T_D K_C K_E)^2 K_C K_E K_A + (T_A K_C K_E)^2 T_A T_E}{2K_C K_E K_A T_E T_A (T_A + K_C K_E K_A T_D)} = 6 \quad (6.15)$$

A (6.14) és a (6.15) egyenletek figyelembevételével a (6.2) integrál kritériumot az alábbi módon írhatjuk fel:

$$J = J_{3E} + \lambda J_{3Q} = \frac{K_c K_E K_A (T_A T_E)^3 + T_E T_A^3 + \lambda [(T_A T_D K_C K_E)^2 K_C K_E K_A + (T_A K_C K_E)^2 T_A T_E]}{2K_C K_E K_A T_A T_E (T_A + K_C K_E K_A T_D)} \quad (6.16)$$

A szabályozó optimális beállításának feltételei a következők [3,4,10] :

$$\frac{\partial J}{\partial K_c} = 0; \quad \frac{\partial J}{\partial T_D} = 0; \quad \lambda J_{3Q} = 6 \quad (6.17)$$

A (6.16) egyenletben az ismeretlenek száma három, így tehát a (6.17) egyenletek alapján meghatározhatók a keresett K_c , T_D és a λ ismeretlenek.

Felhasznált irodalom

- [1] Bjugens, G.S., Studnev, R.V.: Dinamika szamoleta - Prostranstvennoe Dvizsenije, Masinosztroenije, Moskva, 1983.
- [2] Blakelock, J.H.: Automatic Control of Aircraft and Missiles, John Wiley & Sons. New York, London, Sydney, 1965.
- [3] Brogan, W.L.: Modern Control Theory, Prentice-Hall International, Inc., 1991.
- [4] Dr. Csáki Frigyes szerk.: Irányítástechnikai kézikönyv, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1977.
- [5] Dickinson, B.: Aircraft Stability and Control for Pilots and Engineers, Sir Isaac Pitman & Sons Ltd., London, 1968.
- [6] Duncan, W.J.: The Principles of the Control and Stability of Aircraft, University Press, Cambridge, 1952.
- [7] Hacker, T.: Flight Stability and Control, American Elsevier Publishing Company, Inc., 1970.

- [8] Kuo, B.C.: Automatic Control Systems, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, USA, 1982.
- [9] McCormick, B.W.: Aerodynamics, Aeronautics and Flight Mechanics, John Wiley & Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, 1979.
- [10] McLean, D.: Automatic Flight Control Systems, New York, London, Toronto, Sydney, Tokyo, Singapore, 1990.
- [11] Mhitarjan, A.M.: Dinamika poleta, Masinstroenije, Moskva, 1971.
- [12] Seckel, E.: Stability and Control of Airplanes and Helicopters, Academic Press, New York, London, 1964.
- [13] Snesko, Ju.I.: Issledovanja v polete ustoichivosti i upravlaemosti samoleta, Masinstroinije, Moskva, 1971.
- [14] Towill, D.R.: Coefficient Plane Models for Control System Analysis and Design, Research Studies Press, Chichester, New York, Brisbane, Toronto, 1981.

dr. Martinkó József alezredes:

**A Magyar Honvédség által alapított Szakközépiskolák története.
/1976-1996/.**

Több ok van arra hogy a honvéd szakközépiskolák történetével most foglalkozunk: egyik ok kézenfekvő ebben az évben ünnepli fennállásának 30-ik évfordulóját a nyolc iskolából felállított szakközépiskolai hálózat. A másik ok átfogóbb megemlékezésre sarkal, szintén ebben az évben - a honfoglalás millicentenáriumi évében- ezer éves a magyar iskola. A Géza fejedelem által hazánkba hívott bencés barátok 996-ban Szent Márton hegyén -a mai Pannonhalmán- megalapítják az első szerzetes iskolájukat, ettől eseménytől számítjuk a magyar iskoláztatás kezdetét. Az intézményes katonai iskolák - mint a magyar közoktatás történetének fejezetei- jóval fiatalabb múltra tekinthetnek vissza, 1856- tól a községi alreáliskola megnyitásától - mintegy 140 évvel ezelőttől - számíthatjuk kezdetüket. Az eltelt majdnem másfélszáz esztendő alatt 26 katonai középiskolát alapítottak Magyarországon területén, ezek között vannak a legújabb korban létesített katonai szakközépiskolák.

A képzés profiljának a Magyar Honvédség tiszthelyettesképzését kell tekinteni, hiszen a szakközépiskolák létrehozásának célja első időben ez volt, később 1992-től lett a tisztképzés bázisa is. Az első központi tiszthelyettesképző iskola 1963.-ban Békéscsabán alakult, két éves rendszerű katonai képzés volt. Képzést - a mennyiség növelése céljából- szétdarabolták 1973-1976 között kihelyezték a csapatokhoz, nagyszámú különböző időtartamú fegyvernemi tiszthelyettesképző iskolák alakultak. Majd látva ennek a rendszernél a tarthatatlanságát 1975.-től fokozatosan egy egy bázisra vonták össze az azonos fegyvernemhez tartozó képzőintézményeket és ahol ez kívánatos volt szakmunkásképzéssel kötötték össze. A katonai felső vezetés a tiszthelyettesképzés stabil, minőségfelé mutató képzés megvalósítására 1976.-tól kezdve fokozatosan nyolc szakközépiskolát hozott létre.^{1/2} A szakközépiskolák állami tanterv alapján működtek. A tanulók állományviszonya sajátosan alakult míg I-III. évfolyamban középiskolás növendékek - azonos státusban a honvéd kollégistákkal- a befejező IV. évfolyamban már katonai esküt tett katonák, akik számára konkrét katonai kiképzés is folyik a tanulmányok mellett. A középiskolában végzők őrmesteri / a kiválóké törzsőrmesteri / rendfokozattal kerültek a csapatokhoz. A katonai főiskolára eleinte elvétve kerültek - bár erre az érettségi után törvényadta joguk volt- a katonai vezetés gyakorlatilag adminisztratív megakadályozta a főiskolára jutásukat, kellett a tiszthelyettes. Ez a helyzet a rendszerváltás óta megváltozott, azóta a honvéd kollégistával- gimnazistával azonos jogon jelentkezhet, felvételizhet a főiskolára a szakközépiskolában érettségizett növendék, ezt a tényt az iskolák nevének megváltoztatásával is demonstrálták 1992. óta kikerült a névből a tiszthelyettesképző jelző.

**1-2. A szolnoki Repülőműszaki Honvéd Szakközépiskola és Gimnázium. /1985-
és a debreceni Elektroműszerész Tiszthelyettesképző Szakközépiskola /1987-
1991/.**

A szolnoki szakközépiskola amely befogadta a kollégistákat hosszú múltra tekinthet vissza. Az iskola jogelődje 1961.-ben kezdte meg a működését mint egyéves tiszthelyettesképző iskola, ez az intézmény később áttért a két éves képzésre, repülőgépszerelőket képzett. Az iskola a kedvező tapasztalatok miatt 1985.-ben önálló Repülőgépszerelő és Repülőgépműszerész Tiszthelyettesképző Szakközépiskolává alakult. 1991.-ben a megszünt debreceni Elektroműszerész Tiszthelyettesképző Szakközépiskola I-III. évfolyamát átvette²⁾ a neve MH. Repülőműszaki és Légvédelmi Honvéd szakközépiskolára alakult. Nagy létszámú iskola volt 3+2 osztály járt / 3 repülőműszaki és 2 légvédelmi / évfolyamonként, ez 1992/93.-ban 356 növendéket jelentett. Az iskola az 1993/94. tanévben választás elé került, a 4+1 éves technikusképzésre történő áttéréskor. A főiskola már nem tudott további helyeket biztosítani az így még tovább növekedő szakközépiskolának. A légvédelmi szak átkerült Tápószecsőre. A szakközépiskola átköltözött az üresen álló 10.sz. kollégium épületeibe, újból berendezték, a közismereti tárgyak oktatása ott folyik, a gyakorlati képzés a repülőfőiskolán a jól kiépített tanműhelyekben, laborokban történik, a növendékek hetente egy nap busszal utaznak a helyszínre. Az 1994/95. tanévben - figyelembe véve az új oktatási és szakképzési törvényt - a gimnáziumot ismét beindították komplex bentlakásos /iskola-kollégium / formában, Repülőműszaki honvéd szakközépiskola és gimnázium néven. A szakközépiskolai részben a képzés, egyedi tanterv - a csepeli Kossuth Lajos Szakközépiskola programja adaptációja - szerint folyik. A gimnázium újból indította a repülőképzést, a Tiszavidéki Sportrepülő Egyesületben repülhetnek a növendékek / nem kötelező / bizonyos mértékű saját pénz befizetése ellenében. A szakközépiskolában érettségi-képesítő vizsga /SZÉV előírás / után a növendék vagy felvételizik a főiskolára és ott tanul tovább, vagy folytatta az V. évfolyamot és technikus minősítővizsgát tett /ez ma már nem járható mert ezt plusz 2-3 évben szabták meg az új szabályzatban /. Aki nem tanul tovább az tiszthelyettesessé avatják. A szakközépiskolai képzés így ellehetetlenült, az 1995/96. tanévben már csak gimnáziumi osztály indult. Ezen túl a gimnázium a szakmunkás képzettséggel rendelkező tiszthelyetteseknek egyéves érettségire felkészítő tanfolyamot is indít. A szakközépiskolába 1985-1994 között 669 tanulót vettek fel, az első érettségi 1989.-ben volt, azóta 343 tanuló érettségizett le, ebből 303 választotta a katonai pályát / a többi szerződést bontott / a megosztás; 195 került tiszthelyettes avatásra, 108 fő továbbtanult / jelenleg belőlük a katonai pályán maradt 215 fő / ez kb. harmada a szakközépiskolát elkezdőknek.³⁾ Végül itt kell szólni a - főleg politikai indíttatású, a hátrányos helyzetet kompenzálni igyekvő- Katonai Főiskolai Előkészítő Tanfolyamról a KET.-ről, amelyet 1975-1988 között működött Szolnokon. A szakmunkás képesítéssel rendelkező fizikai dolgozó fiatalok főiskolai felkészítő tanfolyama óriási lemorzsolódás /90%/ mellett igazi lehetőséget nem adott a továbbtanulásra, mert ha ritkán fel is vették a KET.-est a főiskolára - a szükséges alapok hiánya miatt- alig volt esélye hogy végig tudja csinálni, így mennyiségről nem is lehet beszélni akiből így tiszt lett, inkább egyedi esetekről.

3.A szabadszállási Gépjárműtechnikai Honvéd Szakközépiskola. /1985.-

A szakközépiskolák sorában az egyik legrégebbi, hosszú múltra visszatekintő intézmény a szabadszállási. Az iskola elődje - a Szabadszálláson 1962. óta működő MN. Páncélos és Gépjárműtechnikai Kiképző Központ helyén és részben szervezetéből- alakult meg 1975.-ben. Az iskola neve; MN. Gépjárműtechnikai Tiszthelyettes és Szakmunkásképző Iskola, a polgári nyilvántartás szerint a 650. számú Szakmunkásképző Iskola. A képzési rend 3+1 éves volt, 3 év a szakmunkásképzés /a szakmunkásképzők képzési terve szerint /, 1 év tiszthelyettes képzés- katonai állományviszonyban. Az iskola minden évfolyama egy osztályos volt az összlétszám 130-150 fő. Az iskola nagyon jól, hatékonyan működött, kis létszámú lemorzsolódás mellett. Tanulói többször szerepeltek kiválóan az országos szakmai versenyeken. Az iskola szakmunkásképzés 10 éve alatt kb. 300 jól képzett tiszthelyestest adott a hadseregnek. Az iskola 1984/85. tanévben megkezdte az átalakulást szakközépiskolává az iskola neve; MN. Gépjárműtechnikai Tiszthelyettesképző Szakközépiskola, a képzés 1995. szeptember 1.-én indult.⁶⁴ A képzést a polgári azonos profilú 4 évfolyamos szakközépiskolák tanterve alapján szervezték, minden évfolyamban két osztály tanult. Egyik osztály gépjárműtechnikai, a másik osztály páncélostechnikai szakirányt vett fel, a „civil tantárgyak „ mindkét osztálynál azonosak voltak. A képzési feltételek jók voltak, a képzés egy kiemelkedő színvonalú, összeszkott tanári és szakoktatói állományra alapozódott. A nevelésben sokkal markánsabban kidomborodott a katonai jelleg mint a honvéd kollégiumokban, itt kezdettől fogva az osztályok élén nevelőtisztek álltak, a civilek főleg a közművelődési tárgyakat tanító tanárok voltak, a szakmai tárgyakat is mérnök-tanári végzettséggel rendelkező tisztek oktatták, így a katonai környezet és hatás eleve adott volt. Az utolsó években katonák voltak itt a nevelő hatás közvetlenül, közvetlenül érvényesült. Igaz az érettségít-avatást követően ők rögtön szolgálatba álltak, tehát konkrét katonai tudás birtokában kellett lenniük. Az ellátást az iskolával egy objektumban /aktanyában/ lévő katonai szervezet -az MH. 52. javítóezred- biztosította. 1992-ben a névből és a profilból a közvetlen tiszthelyettesképzés kikerült. A szakközépiskola - vele együtt a megmaradt öt ilyen intézmény is- az MH. Középiszkolai és Kollégiumi Főigazgatóság /MH.KKF. / alárendeltségébe került, így egy kézbe jutott a teljes középfokú iskolai képzés. A Művelődésügyi Minisztérium szakmai felügyelete is érvényesült, többször ellenőrizték a szakközépiskolát az MM. munkatársai, több esetben érettségi elnökként szereztek közvetlen tapasztalatot az itt folyó képzésről. Az 1992/93. évben a szakközépiskola áttért a 4+1 éves technikus képzésre, ez a képzés a képzési idő növekedése miatt jelenleg már nem továbbvihető. Az iskolán évfolyamonként 1991/92.-től 3 osztály van, alacsony 12-19 létszámokkal, a visszaesett jelentkezési szám, a felvételi követelmények és a kb. 30%-os lemorzsolódás következtében. Ez a helyzet nagyon jó az oktatás hatékonysága, de nagyon rossz az egy főre jutó képzési költségek oldaláról. Eddig 1988-1995 között 270 növendék érettségizett le a szakközépiskolában, ebből felavattak tiszthelyettesé 177 főt 66%-ot, főiskolára bekerült 39 fő 15%, ez is bizonyítja hogy az iskola - a névváltozás ellenére- főleg a tiszthelyettesképzésre predesztinált intézmény.⁶⁵

4. A tápiószecsői Fegyverzettechnikai Honvéd Szakközépiskola. /1984.-

Az elsőként 1984. szeptember 1.-én szakközépiskolává alakult intézmény a tápiószecsői Elektroműszerész és Mechanikaműszerész Tiszthelyettesképző Szakközépiskola. ^{4/} Az iskola elődjének tekinthető az 1976.-tól működő fegyvernemi kiképző központ, amely a szakközépiskolán kívüli 2 éves tiszthelyettesképzést szolgálta 1990.-ig. ^{7/} Az iskola a tápiószecsői laktanyában kezdte meg működését alberletben az MN. 7215 /14. Fegyverbázis / alakulattal amely szervezetében működött egy fegyvernemi kiképző központ. A képzést a civil azonos profilú szakközépiskolák tanterve alapján végezték. ^{8/} Az iskolába első évben 36 tanuló jelentkezett ebből 25 tanulót vettek fel, ehhez még a katonai kollégiumokból átirányítottak 9 tanulót, végezetül a visszalépések következtében 30 fővel indították az első évfolyamot. A kollégiumi és tantermi épületet 100 főre tervezték amely kicsinek bizonyult -az előjáró közben felemelte az iskolázási létszámot- a tanműhely korszerű elvek szerint épült két kabinetből és öt kisegítő műhelyből állt, tornatermet nem építettek /azóta sem /. A képzés bonyolódott a szolnoki szakközépiskola egy részének / a hányattott sorsú debreceni iskola profilja továbbvándorolt / Tápiószecsőre kerülése következtében maradt a két alapszak; csak besorolt alá a rádiólokátor és a rakéatechnika, a másik ágon fegyvertechnika és a optika és infratechnika ágazat. A negyedik év végén SZÉV alapján érettségi képesítő vizsgát, ezt követően - hathetes kiképzés után- katonai kibocsátó vizsgát tesznek. Ennek az eredménye alapján tiszthelyetessé avatták őket. Jó rendű érettségi átlag felett felvételizhettek a főiskolára, őket nem avatták tiszthelyetessé. ^{9/} A növendékek a szakközépiskolai tárgyakon túl - igaz egy némely nem nagy óraszámúban oktatott- 14 katonai tárgyat is tanultak, ez jelentős időbeni kötöttséget és leterhelést okozott. / ezt váltotta volna meg a 4+1 éves technikusképzés /. A szakközépiskola az alapprofil mellett két jelentős vállalkozásba is beszállt: 1986.-tól a Dolgozók Szakközépiskoláját működtette, a II. évfolyamos sima tiszthelyettesképzésben résztvevő szakmunkások jártak ide egy évig a tiszthelyettes iskolával párhuzamosan /délután, este / egy évig csak ezt végezték. A másik vállalkozás a polgári tanulók képzése 1990.-tól mindkét szakon, a megyei és városi szakigazgatással kötött szerződés alapján végezték, /ez plusz pénz jelenthetett az iskolának és a tanároknak is / a kis létszámú osztályok ezeket az anyagi megfontolásokat nem igazolták, a normatívából élő vállalkozás veszteséges lett, ezért az 1994/95. tanév végén megszűnt. Újabb vállalkozásuk a kétéves Speciális szakiskola, a 8. osztály után továbbtanul nem tudó, vagy lemorzsolódott fiatalok számára hegesztői, alapfokú számítógéppkezelői szakmákban. Az összegzése az 1994-1995 közötti időszaknak hasonló képet mutat mint a többi szakközépiskoláé a beiskolázott 431 tanuló 30%-a lemorzsolódott, eddig leérettségizett 149 tanuló, melyből 117 főt tiszthelyettesnek avattak és 23.-at felvettek a felsőoktatásba.

5. A váci Híradástechnikai Honvéd Szakközépiskola. /1988.-

A váci szakközépiskola elődjének szintén egy fegyvernemi tiszthelyettesképző iskola számít, az 1973-1991 között működött váci Sallai Imre Híradó Kiképző Központ. A szakközépiskola a váci híradó laktanyában kapott helyet, ellátás szempontjából utalták az ott lévő 15. Önálló Híradóezredhez. A szakközépiskolát 1988 szeptember 1-i hatállyal alapították. ^{10/} az iskola neve Híradásipari Műszerész Tiszthelyettesképző

Szakközépiskola. A képzés négyéves rendszerben az MKM. által kiadott nevelési és oktatási terv alapján folyik, első két évben évfolyamonként egy, attól kezdve két párhuzamos osztályban. Az iskola tanulói kapacitása 176 fő. A képzés legfőbb összetevői: a közismereti, szakmai és a katonai tárgyak. Az oktatást jól felkészült középiskolai tanárok, a szakmai képzést mérnök-tanárok tartják. Az oktatás színvonala jó - az alapszakmából adódóan - csak a tanulmányok végzésére alkalmas tanulók tudtak megmaradni, így ebben az iskolában viszonylag jelentősebb a gyenge tanulmányi eredmény miatt eltanácsoltak száma. A lemorzsolódás eleinte elérte az 50%-ot, később beállt a 20-30% közzé. Viszont akik megmaradtak azok jó szintű érettséget és nagyszámú sikeres főiskolai felvételt produkáltak. A nevelőtisztek sorban elvégezték a Kossuth Lajos Katonai Főiskola levelezőrendszerű, másoddiplomás kollégiumi nevelőtanári szakát, így a munkájukhoz szükséges pedagógiai elméleti tudást megszerezték. Az iskola neve megváltozott 1992.-től kikerült a tiszthelyettesképzésre utaló szó belőle és pontosodott az alapprofilra utaló megnevezés híradástechnikaira, kialakult a 4+1 éves képzés feltételrendszere^{11/}. A megoldás a 4+1 éves képzésre - amely nem technikus képzés - az érettségi után a +1 év alatt - a nem továbbtanulók számára - szaktiszthelyettes képzést végeznek 1995.-től kezdődően. Az iskola mérlege az 1994/95 tanév végéig: a szakközépiskolába 1988. óta felvettek 262 növendéket, lemorzsolódott 86 tanuló 32%, 1994.-ig érettséget tett 61 fő, melyből 35 fő jelentkezett a főiskolára akik közül felvettek 30 főt 86% / ez kiugróan kiváló eredmény / a többi végzött tiszthelyettes avatták. Az iskola végzi a szakmunkás végzettséggel rendelkező tiszthelyettes hallgatók, és a végzett érettséggel nem rendelkezők tiszthelyettesek 1+1 éves intenzív érettségi előkészítő tanfolyamát.^{12/}

6. Az orosházi Műszaki Technikai Honvéd Szakközépiskola. / 1987.-

A Honvédelmi Miniszter 09/1984. számú utasításában intézkedett a tiszthelyettesképzés új rendjéről, többek közt elrendelte nyolc 4 évfolyamos tiszthelyettesképző szakközépiskola felállítását. A végrehajtás lépcsőzetesen történt, melynek sorában 1987.-ben Orosháza következett. Az elv hogy a szakközépiskolákat a működő fegyvernemi kiképző központok bázisán kell létrehozni itt is érvényesült. Az orosházi laktányában települő műszaki zászlóalj és jogutódja a kiképző központ mellett létrejött a Gépszerező és Karbantartó Tiszthelyettesképző Szakközépiskola.^{13/} Az első tanévet ideiglenes elhelyezési és képzési körülmények feltételek és körülmények közt végezte. Az új szakközépiskola és a tanműhely 1988/89. tanév kezdetére került átadásra. Az iskola évfolyamonként egy osztályra volt tervezve - ez lett a hálózat legkisebb, a legjobb élet és képzési feltételeket nyújtó iskolája - a teljes évfolyamszámot az 1990/91. tanévben érte el, a kapacitása 120 tanuló. Az oktatás a Nevelési és Oktatási Terv alapján az OSZJ. 313. számú Gépszerező és Karbantartó alapszakmában a -2 Építőgépszerező ágazatában folyt. Ez a szakmunkásképzést folytató szakközépiskolák csoportjába sorolta az orosházi iskolát. 1992.-ben áttértek a 4+1 éves - akkor technikus képzésre - az 1993. évi OKJ. óta ez változott, maradt szakképzés, az ágazat neve „Gépszerező és Karbantartó technikaira” módosult. A képzési követelményt az alábbiak szerint határozták meg: „ a fegyvernemi szakmak megfelelő szakmunkás-képesítés megszerzése mellett a szakközépiskolai érettségi-képesítő vizsga letétele, továbbá a tiszthelyettesi beosztáshoz szükséges katonai ismeretek elsajátítása”.^{14/} A katonai ismeretek megszerzését - a

konkrét tiszthelyettes képzést- 1995. óta a +1 év alatt végzik, a katonai főiskolára nem jelentkező növendékek számára. Az iskola tanulmányi teljesítménye; a közismereti tantárgyakból 2,63-3,14 között, szakmai elméleti tantárgyakból 3,34-3,48 között, szakmai gyakorlati tantárgyakból 3,27-3,80, míg a katonai tantárgyakból 3,74-4,12 között váltakozott hat tanév eredményei alapján. Ez mutatja a mérsékelt indulószintet a gyenge merítési bázist, a katonai pálya és a polgári szakma iránti motiváltságot, a civil és katonai tanárok eltérő megítélését, sok mindent. A szakközépiskolába 1987-1995 között 225 tanulót vettek fel, 1992.-ig 32%-os lemorzsolódás volt a jellemző, azóta 25-30%-ra kismértékben javult, 1991.-ben érettségiztek először az iskolában azóta érettségit tett 83 tanuló, 9 tanulót vettek fel a főiskolára, és 57 növendéket avattak tiszthelyettesé. Megállapítható hogy a szakközépiskola mennyiségben nem de minőségben a követelmények szintjén teljesít.¹⁵⁵

7. A budapesti Élelmezési Honvéd Szakközépiskola. /1987-1994/

A szakközépiskola jogelődje az 1982.-től működő „MN. Élelmezési Tiszthelyettes és Szakmunkásképző Iskola”, amely az MN.4011 alakulat - a hadtápkiképző központkeretében, a Zách utcai laktanyában települt.¹⁶⁶ Ez a megoldás azért volt általános az összes fegyvernemi tiszthelyettes képző intézetben, mert a kiképző központok más képzési feladatot is elláttak pl. a sorkatonák szakkiképzését, a tartalékos képzést, szakmai továbbképzést. Ez az integrált képzési modell gazdaságos volt, mert az azonos profil miatt, a képzéshez és a kiképzéshez használt technikai eszközöket és a gyakorlati oktatást vezető szakoktatókat minden képzési szinten igénybe tudták venni. Az ellátáshoz így egy bázis és egy személyzet „legendő” volt. A fegyvernem vagy szakszervezeti létszámszükséglete külön-külön gazdaságtalan nagyságrendű kis létszámú intézmények fenntartását igényelte volna. Az iskolát - a többi honvéd szakközépiskola alapítása sorában- az 1987/88. tanévvel nyitották meg. Az élelmezési szakközépiskola alapítója és fenntartója a HM. - közvetlen felügyeletét 1992.-ig az MN. Hadtáp Tof., utána az MH.KKF. látta el- a szakfelügyeletét az MM./MKM/ és a feladattal megbízott Fővárosi Tanács /1990.-től önkormányzat / főosztálya látta el. Az intézmény alapfeladata az élelmezési tiszthelyettes illetve a szakács szakmunkás képzés nem változott, bővült 1990/91.-től ruházati tiszthelyettes és a csak szakmunkás végzettséggel rendelkező tts.-ek érettségire felkészítésével. A szakközépiskola évfolyamonként két osztállyal, évfolyamonként 50 növendék kollégiumi és tantermi kapacitással indult. A laktanyában új kollégiumi és iskola épületet építettek. Az iskola - a középiskolai hálózatban egyedül- 1985.-től saját fedett uszodával is rendelkezett. A képzés a polgári azonos profilú élelmezési és vendéglátó-ipari szakközépiskola - MKM. által jóváhagyott- tanterve adaptálásával és a katonai profil szerinti helyi tanterv kialakításával folyt. A helyi tanterv heti 32-33 órára növelte a civil 30-31 órás tantervet, mert a katonai ismereteket csak plusz órában tudta oktatni. Az oktatás heti váltásban, egy elméleti hetet követő gyakorlati hét rendszerben folyt. A gyakorlati hetet az iskola tankonyhájában tartották ahol az üzem étkészítés minden fázisát, az étlapkészítéstől, a beszerzésen, főzésen át, az adminisztrációig gyakorolták. Szakmai gyakorlatokra a honvédségi alakulatokhoz jártak. Később a heti órai terhelés csökkentésére hét félévig a szakközépiskola tananyaga a nyolcadik félévben a tiszthelyettesképzés és az érettségire való felkészülés volt a meghatározó. 1992.-ig a negyedik évben katonai esküt tettek, alapkiképzést kaptak,

katonai egyenruhát öltöttek és katonai hallgató státusban tanultak tovább. Az éves tanulmányi átlagok 3,5-3,8 között voltak ami a honvéd szakközépiskolák között jó eredmények minősíthető, ettől csak a ruházati szak tért el, sokkal gyengébb teljesítményt produkálva. Az oka ennek az lehetett, amíg az élelmezési szakon általában nagyarányú túljelentkezés volt jellemző, addig a ruházati szakon alig volt jelentkezés, az osztályt az élelmezési szakra nem felvettekből töltötték fel / az indított egy osztályból, 17 főből 7 jutott el az érettségig / . A katonai vezetés - gazdaságossági okokkal indokolva- 1990.-ben elhatározta a szakközépiskola „ kifutó rendszerű „ felszámolását. A szakközépiskola 1991.-ben már nem vett fel első évfolyamot. Az első érettségi is 1991.-ben volt amikor 42-en sikeresen érettségi-képesítő vizsgáztak, a jelentkezők közül 6 főt felvettek a főiskolára. A vegetáló iskolát ettől az évtől kezdve sok tanuló otthagya, az utolsó 1993/94. tanévet már a Bólyai főiskolára átköltözve fejezte be 40 tanuló.^{17/}

8. A budapesti Zeneművészeti Honvéd Szakközépiskola. / 1986 -

Ez a szakközépiskola tekinthet vissza a legnagyobb múltra .. Feladata a hadsereg zenekarainak zenész utánpótlása volt. Az igazi katonazenész mindig is tanult embernek számított, aki csak a csatában a jeleket, szignálokat fújta annak nem volt erre a tudásra szüksége, ezért ez a szakma szétvált. A katonazenekarok karmesterei 1851.-től három évig Berlinben tanultak. A monarchia a katonazenészeket 1872.-től a prágai zeneművészeti iskolát állított fel, 14 éves korú fiúk számára. Az itt végzett képzett katonazenészek oktatták a katonazenekarokban társaikat. Az első magyar katonazenész iskolát Magyarországon csak 1958.-ban alapították Budapesten. Ez az iskola mondható a legsikeresebbnek alapítása óta, soha nem küszködött legitímációval, ismert és elismert volt civil körökben, csendben nagyobb viharoktól mentesen működött az ETI / Zsúka, Bólyai/ főiskola szegletében. Az iskola első neve Zenész tiszthelyettes képző szakiskola, már ekkor a négy évfolyamos képzést folytatott a 14 éves fiúk számára. Az 1964/65. tanévtől kezdve már érettségit tehettek a kerületi II.Rákóczi Ferenc gimnáziumban, levelező tagozaton. Az iskola 1976.-ban MN. Központi Zene Szakközépiszkolává alakult, eleinte a Bartók Béla Zeneművészeti Szakközépiskola kihelyezett tagozataként. Az iskolában zenei és katonai képzést kaptak. A hangszeres oktatást kiváló muzsikusok tartották, köztük volt katonazenészek. A legnagyobb kultusza a rézfúvós kamarazenének van az iskolában, ebben országos, nemzetközi hírnevet vívtak ki. A szakközépiszkolában már nem csak a zenészmesterséget tanultak, hanem - a közismereti tárgyakon kívül- zene irodalmat is. Az iskola 1986.-ban önálló lett MN. Zeneművészeti Szakközépiskola néven. A iskola növendékei a magyar rádió állandó és a TV időszakos szereplői, sok hangverseny, bemutató jelzi a képzés magas szintjét. Kétévente a szakmai tudásról a debreceni Nemzetközi Katonazenai Fesztiválon bizonyítanak, a doboszázaddal és az iskola zenekarral. Az iskola nem nagy kapacitású /70 fő /, a sokféle hangszeren tanuló növendékek eltérő gyakorlási helye, ideje, évfolyamon belüli is eltérő szintje, mozgalmos életet eredményez, jószerével a növendékek egymással csak a közismereti órákon találkozhatnak. A sikeres zeneiskola - a középiskolai képzés indulása 1969 óta- 368 növendéket vett fel, melyből leérettségizett 198 növendék, és mind a 198.-at tiszthelyettesé avatták / páran később elvégezték a konzervatóriumot /. Jelenleg a többsége a végzeteknek a polgári életben sikeres, neves zenész.

A szakközépiskolai képzés összegzése nagyon ellentmondásos, mert nem lehet elvonatkoztatni a - nyolcvanas évek második és a kilencvenes évek első felének - a hadsereg és ebben kiemelten a tiszthelyettesek helyzetétől. Az tény hogy a gondok nem akkor kezdődtek, sokkal régebben, valószínű a szakközépiskolai képzés éppen ezeket kezdte volna megoldani, emelve a szaktiszthelyettesek szakmai, általános műveltségi színvonalát, vonzóvá téve a pályát. Azzal sokan egyetértettek hogy a tiszthelyettesi pályát az érettségizéshez kell kötni hiszen a sorkatonák iskoláztatási színvonala is emelkedett, bonyolult haditechnikai rendszerek léptek be, az egyenletesebb jobb színvonalú utánpótlás érdekében emelni kellett a pálya presztízst az iskolai szint emelése által is. Ez gyönyörű idea volt amit az idő az események nem igazoltak, pontosan ellentétesen alakult minden, a megvalósításhoz hosszú zavartalan evolúciós fejlődési időre lett volna szükség már pedig ez nem így alakult. Az átalakulásoknak a hadseregben- az alakulatok megszüntetéseknek, diszlokációknak, fizetés elértéktelenedésnek, a feleség munkanélkülivé válásának stb.- első kárvallottai / a fiatal tisztekkel együtt / a tiszthelyettesek voltak. A hadsereget nagy tömegben hagyták el - belőlük duzzadt a rendőrség, a határvédelem, az őrző-védő Kft.-k, stb. mobilabbak, kevésbé válogatósak voltak. Az állományarányok megfordultak 25%-al több tiszttel szolgái most mint tiszthelyettes, a NATO norma megközelítőleg 1:2 arányt írta elő fordítva a tiszthelyettesek javára. A szakközépiskolák ezekben az években futottak fel, kezdték a kibocsátásokat. A katonai pálya presztízscsökkenésével párhuzamosan egyre kevesebb megfelelő minőségű tanuló jelentkezett az iskolákban egyre nőt a már tanulók körében a lemorzsolódás, egyre drágábbá vált így az egy főre jutó képzés. Az ördögi kört csak nyugodt perspektivikus átalakítással lehetett volna megszakítani, nem ez történt, elkezdődött a képzési rendszer amputációja részben hogy a megmaradt részeket ezzel megmentik. A honvéd szakközépiskolákban 1984-1994 között 3741 tanuló jelentkezett, ez 1.5-szeres túljelentkezést jelentett / ami a gyakorlatban nem túljelentkezés, az orvosi-pszichológiai 20%-os alkalmatlanság és a középiskolai tanulmányokra alkalmatlan, igen gyenge tanulói réteg kirotálása következtében /. A szakközépiskolai tanulmányokat 2385 fő kezdte meg. Az érettségit eddig 815-en szerezték meg, ebből a katonai felsőoktatásba 61 főt vettek fel, ez a végzetek 8%-át jelenti /ami azt bizonyítja hogy ez az iskolatípus nem a felsőoktatásra készít fel, még annak ellenére is hogy hivatalosan 1992.-től kezdve került le a nevéből a tiszthelyettes jelző /. Az első évvel együtt - amikor avattak még szakmunkásokat is- összesen 877 tiszthelyestest adott ez az iskolatípus a hadseregnek. Ez a mennyiség tiszthelyettesi hiányt befolyásolni nem tudta, a szaktiszthelyettesek minőségét viszont kétségtelenül javította. A szakközépiskolai hálózat ilyen mértékű fennmaradásának azért is kevés a valószínűsége mert most a katonai vezetés gyors sikereket ígérő megoldások híve, úgy érzékeli hogy nagy a baj, / a csodatevők megjelentek és a szakmunkások számára egy-két éves tiszthelyettesképzés, plusz egy-két éves érettségire felkészítés - részben átfedően- módszerével papíron rövid idő alatt több ezer tiszthelyestest ígértek /. Itt van a gond, az évente kedvező esetben 150-200 főt kibocsátó 4+1 éves képzési idejű szakközépiskolák és az ennyit vagy ennyit sem kibocsátó főiskolára telepített tiszthelyettes képzés, ezt nem tudja produkálni. Nagy ígérete van a KLKF.-en jelenleg működő képzés átalakításának, a két éves tiszthelyettesi parancsnokképzés /esetleg zászlósképzés /, a katonai kiképző szakvégeztetés OKJ.-ben való legalizálása útján egy polgári kompatibilitással rendelkező képzés alakulna ki amely a későbbi post secondary szint alapját vetné meg, ez kétségtelen minőség irányában

mutató jó megoldásnak tűnik A szakközépiskolák jövője kérdéses a NAT az új érettségi szabályzat tükrében, a technikusképzés idejének növekedése miatt. A katonai középiskolai képzés jövőbeni léte válaszút előtt áll, a választ a jelenlegi értékprioritás alapján nem lehet megadni, lehet benne hinni, de ez a döntéshozókat nem fogja befolyásolni.

JEGYZETEK

- 1./ A 1014/1984/ IV.18/sz. Mt.határozat és az 1/1984/ V.19/HM. rendelet./ feltalálható az adott évi közlönytarban.
- 2./ A debreceni Elektroműszerész Tiszthelyettesképző Honvéd Szakközépiskola, az 1985.-i képzési koncepció alapján felállított nyolc szakközépiskola egyike volt, 1987-1991 között működött. Éppen felfutott, mind a négy évfolyama kialakult amikor megszüntették Egy évfolyamot leérettisgiztettek és tiszthelyettesé avattak. Az I-III. évfolyamot, 134 főt, áthelyezték a szolnoki szakközépiskolába, jogilag a két iskolát összevonták. A debreceni szakközépiskola a debreceni Kossuth laktanya sarkában települt, új iskola és kollégium épült, nagyon korszerű felszerelést, szakmúhelyt kapott, a városban elismert minőségű tanári kar alakult ki. Az iskola leszerelve üresen állt évekig, míg hosszas huza-vona után 1995.-ben a debreceni egyetem megkapta.

A KET megint a jogszabályi rés kihasználása, „végzettség gyár„ beindítása. A szakmunkások érettségire felkészítő tanfolyama folyik a polgári életben is, vagy levelező képzés vagy nappali képzés formájában de egyik sem rövidebb két évnél. A honvédség ezt egy év alatt végzi, ettől az évtől kezdődően már az összes honvéd szakközépiskola és gimnázium folytat ilyen képzést. A cél az érettségivel nem rendelkező tiszthelyettesek végzettséghez juttatása, mivel a rövidesen életbelépő szolgálati törvény ezt előírja számukra. A tiszthelyettes létszám felfuttatása nagy létszámú tiszthelyettes képzését feltételezi, de az érettségivel rendelkezők nem akarnak erre az alacsony -még a tisztelnél is alacsonyabb- presztizsű, rosszul fizetett pályára lépni, ezért a megoldást úgy találták ki, hogy szakmunkás bizonyítvánnyal vesznek fel a jelenleg 2 éves tiszthelyettes iskolára, majd végzés után elvégeztetik az egyéves érettségit adó tanfolyamot.

- 3./ A szolnoki szakközépiskola éves beszámoló jelentései. 1985-1994. / az intézmény és a MH.Középiskolai Igazgatóság birtokában/.
- 4./ Alapító parancs. 1985 szeptember. 1. HM. /a szakközépiskola birtokában /.
- 5./ A szabadszállási szakközépiskola éves beszámoló jelentései. 1985-1995. statisztikai adatok -táblázatok.
- 6./ Az 1014/1984.számú Mt. határozat. / Mejelent a Művelődési Közlöny 4.sz. és a Honvédségi Közlöny 6.sz./IV.19./ és a HM. 1/1984 valamint a 09/1984. utasítása.
- 7./ Az MH.Pk. 13/1991. és az MH.Szf. és Kik. Fcsf. 44/1991.sz. intézkedései. Ennek alapján az országban a különféle helyeken, fegyvernemi kiképző központokban működő tiszthelyettesképző iskolákat a három katonai főiskolára összevonták / jelenleg is ott van és 1-2 éves formában tiszthelyetteseket képeznek. Az érettségivel rendelkezők részére 1 év de jelentkező alig van, főleg a főiskolai felvételin meg nem felelt katonai kollégisták ők általában egy év után -miután letöltötték ezzel a

- katonaidőt- az avatás előtt szerelnek le. A szakmunkások számára a 2 éves rendszer sem így igaz -bár ide van jelentkező, az előbbi anomáliával- mert avatás után rögtön az érettségi felkészítő plusz 1 év következik.
- /8./ OSZJ.614.elektroműszerész és OSZJ.615-2 mechanikaiműszerész / ma OKJ./
- /9./ Ez jogtalan lépés volt -inkább igazságtalan, mert jogi szabályozás csak mostanában lesz- ugyanis mindent végig csináltak amit a többi tts.-nek avatott, de a felvettek nem kaptak rendfokozatot, ugyanis azzal fizetés járt -mig a főiskolás hallgató ösztöndíjat kapott- a kettő közt lényeges különbség van, és nem részesülhettek más hivatásos állományút megillető kedvezményben. A másik oldalt, aki fizetést kapott az akkor nem kaphatott diákigazolványt -ma már kap- és nem élvezhette a velejáró kedvezményeket.
- /10./ Az alapító intézkedés. a 31/1987./HK.10/ HM.int. ezt újból kellett kérni mert a közoktatásról szóló 1993.évi LXXIX. törvény 37.paragrafus alapján a HM.-nek,, Alapító okiratot,, kell kiadni./minden középiskola esetében így történt/ Nytsz.330/1994.
- /11./ Az OKJ. /kiadva a 7/1993./XII.30./ MúM.rendelet mellékleteként. Az Országos Képzési Jegyzék: 93 4 0210 -02 33 08 azonosítású számú hiraadóműszerész /szakképzés/ 93 5 0210 -16 30 07 azonosítású számú hiraadástechnikus /technikusképzés/ ez két évet ir elő évente 1100 tanórát. Ez ami a technikusképzének nem kedvezett a szakközépiskolákban a 4+2 évet túl hosszúnak és költségesnek ítélte meg a a katonai vezetés.
- /12./ Az óratervet az MH.Szf.és Kik. Fszlő. 29/1993./HK.5/ intézkedésével adta ki.
- /13./ 31/ 1987.HM /HK.10/ int.
- /14./ Az orosházi Műszaki Technikai Szakközépiskola Nevelési és Oktatási Terve. 1993
- /15./ Éves beszámoló jelentések. Statisztikák. 1987-1995. Iskola irattára birtokában.
- /16./ 013/1982. HM.int., a 9/1982. HM.uts. az óraterv kiadására. 025/1982.MN.Kik. Ff.int. A tiszthelyettes és szakmunkásképző iskola alapítására, a 044/1982. MN. Hadtáp.Tőf. int. a tervezés és szervezés végrehajtására.
- /17./ Az MH.Élelmezési Szakközépiskola.Felszámolási jegyzőkönyve.Bp.1994.julius 31.

Dr. Pokorádi László
főiskolai docens
Kiképzési Osztály, tudományos főmunkatárs

A REPÜLŐGÉPEK ÜZEMELTETÉSE MINT MARKOV-FOLYAMAT
(SORBANÁLLÁSI MODELL)

a szerző

Pannonian Applied Mathematical Meeting '95
4-7 of May, 1995, Balatonfüred

konferencián előadott és a

Bulletins for Applied Mathematics 1073/95

kiadványban (79 - 86 oldal) megjelent

AIRCRAFT OPERATION AS A MARKOV-PROCESS
(a Queuing Model)

című tanulmányának magyar nyelvű változata

A repülőgépek üzemeltetése egy diszkrét állapotokra bontható, utóhatásmentes sztochasztikus folyamat. Az üzemeltetés matematikai szempontból, egy Markov-folyamat, és Markov-lánc-ként közelíthető. Az előadás a Markov-folyamatok elméletének alapjait, valamint a katonai repülőgépek kiképzési repülése műszaki kiszolgálásának markovi sorbanállási modelljét, annak felállítását és alkalmazását mutatja be.

1. Bevezetés

Az olyan sztochasztikus folyamatokat, amelynek jövőbeli alakulását a múltbeli alakulása csak a jelenlegi állapoton keresztül befolyásolja, azaz amelyek utóhatásmentesek, Markov-folyamatoknak nevezzük. Ezen folyamatok elméletének történetét Andrej Andrejevics Markov orosz matematikus munkássága (1836 - 1922) nyitotta meg.

A repülőtechnika üzemeltetése, a repülőgépekre, valamint azok kiszolgálására, a harcfeleladatokra való előkészítésükre, különböző nagyságrendű javításukra szolgáló személyekre és előírásokra épülő sztochasztikus folyamat.

Ez a folyamat a repülőgéppel, vagy annak valamely rendszerével, berendezésével, azaz az Üzemeltetés tárgyával, a gyártás és a kiselejtezés között történtek összessége.

A katonai repülőgépek Üzemeltetésének egy jellegzetes és jelentős részét képezik a kiképzési repülések. Ekkor a hajózó állomány különböző repülési gyakorlatokat hajt végre, és a repülőgépek ismételt feladatra való előkészítését a műszaki állomány végzi a kiszolgáló zónában. Ez a műszaki kiszolgáló tevékenység matematikailag egy sorbanállási folyamatként közelíthető. A sorbanállási modell segítségével prognosztizálható befogadóképességű zóna és repülőgépszám esetén a zóna leterheltsége.

2. A Markov-folyamatok

Matematikailag felírva az $\eta(t)$ valószínűségi folyamatot Markov-folyamatnak nevezzük, ha 1 valószínűséggel teljesül minden $t_1 < t_2 < \dots < t_n < t_{n+1}$ és $X_1, X_2, \dots, X_n, X_{n+1}$ valószínűségekre a:

$$P \left\{ \eta(t_{n+1}) = X_{n+1} \mid \eta(t_1) = X_1 ; \dots ; \eta(t_n) = X_n \right\} = P \left\{ \eta(t_{n+1}) = X_{n+1} \mid \eta(t_n) = X_n \right\} \quad (1)$$

feltételes valószínűségek egyenlősége.

Ha az $\eta(t)$ folyamat a vizsgálati idő alatt bármely pillanatban felvehet valamilyen X értéket, akkor azt folytonos, ha η csak kitüntetett időpontokban rendelkezhet értékkel, diszkrét idejűnek nevezzük. Diszkrét állapotterűnek tekintjük azt a sztochasztikus folyamatot, ahol az η valószínűségi változó lehetséges értékei véges, vagy megszámlálhatóan végtelen elemű halmazt alkotnak.

A véges vagy megszámlálhatóan végtelen - azaz diszkrét - állapotterű, utóhatásmentes sztochasztikus folyamatokat Markov-láncnak nevezzük. Ekkor az (1) egyenletben meghatározott értéket átmenetvalószínűségnek nevezzük:

$$P_{ij}^{n,n+1} = P \left\{ \eta(t_{n+1}) = X_j \mid \eta(t_n) = X_i \right\} . \quad (2)$$

ami annak a valószínűségét fejezi ki, hogy $\eta(t_{n+1}) = X_j$, feltéve, hogy $\eta(t_n) = X_i$.

A fenti $P_{ij}^{n,n+1}$ jelölés azt is mutatja, hogy az átmeneti valószínűség nemcsak az i kezdeti és a j végállapot, hanem az idő (t_n) függvénye is. Ezt a valószínűséget a továbbiakban - az egyszerűség érdekében - a

$$P_{ij}^{n,n+1} = P_{ij}(t_n) = P_{ij}(t) \quad (3)$$

módon jelöljük.

Véges, N számú állapot esetén a P_{ij} átmeneti valószínűségeket mátrixba szokás rendezni. Ezt a

$$P_{=N \times N}(t) = \left[P_{ij}(t) \right] \quad (4)$$

mátrixot a folyamat Markov-mátrixának vagy átmenetvalószínűség mátrixnak nevezzük.

Ha a fenti egy lépéses átmenetvalószínűségek függetlenek az időtől, akkor azt mondjuk, hogy a Markov-folyamat stacioner. Ebben az esetben felírható, hogy

$$P_{ij}^{n,n+1} = P_{ij} . \quad (5)$$

illetve

$$P_{=N \times N} = \left[P_{ij} \right] \quad (6)$$

mivel az független az n értékétől és P_{ij} annak a valószínűségét jelenti, hogy az $\eta(t)$ értéke X_i -ből X_j -be vált át a $(t_{n+1}; t_n)$ időintervallumban.

Egy Markov-folyamat egyértelműen az állapotokból való távozások eloszlásai és az átmenetvalószínűségek megadásával jellemezhető. Ha valamely állapotból való távozás eloszlásának jellege nem exponenciális, az adott sztochasztikus folyamatot félmarkovinak nevezzük.

3. A kiképzési repülések vizsgálata

A kiképzési repülés műszaki kiszolgálása matematikai szempontból egy többcsatornás, korlátozott tárolási méretű, markovi, vagy félmarkovi sorbanállási rendszert alkot.



1. ábra

Sorbanállási, kiszolgálási rendszeren olyan rendszert értünk, amelybe a /ogyasztók véletlenszerűen érkeznek be, eltérő igényeik kielégítésére várnak, majd a kiszolgálásuk után rendszerből távoznak [4]. A kiképzési repülések műszaki

kiszolgálása is egy ilyen rendszerben végbemendő sztochasztikus folyamatnak tekinthető. Ekkor a repülésen résztvevő gépeket tekintjük a fogyasztók-nak, a repülőműszaki állományt pedig a kiszolgálók-nak.

A fogyasztók rendszerbe való belépését - esetünkben a repülőgépek repülési feladatokról való visszatérését - *érkezési folyamat*-nak nevezzük. Ez matematikai szempontból egy felújítási folyamatot alkot [2].

Tekintsük az érkezések közti időket egy $X_1 ; X_2 ; X_3 \dots$ sorozatnak. Ekkor X_1 az első fogyasztó rendszerbe történő beérkezéséig eltelt időt, X_2 az első és a második gép beérkezése közti időt jelenti. Ez a sztochasztikus sorozat egy diszkrét állapotterű véletlen folyamatot alkot és az n -edik beérkezés ideje

$$T_n = \sum_{i=1}^n X_i \quad (7)$$

módon határozható meg. Az érkezési folyamatot az érkezések közti $\langle X_n \rangle$ idők megadása helyett le lehet írni az Y_t érkezések teljes számával. Az Y_t egy folytonos idejű véletlen folyamat, jelentése matematikailag az

$$[Y_t = n] \equiv [T_n \leq t < T_{n+1}] \quad (8)$$

formában írható fel.

Vizsgálatunkban a kiszolgálás alatt nem csak a repülőgépek ismételt feladatra való előkészítését, hanem a következő feladatra való várakozását is értjük, mivel mindkét dolog a zónában (a kiszolgáló helyen) megy végbe. Így a *távozási folyamat*-on a gépek a zónából a következő feladatra való távozását értjük. Ezt a folyamatot - mely szintén egy felújítási folyamat - alapvetően a repülési tervtábla határozza meg. Mivel a kiképzési repülés során az egyéb, véletlenszerű kül-

ső hatások miatt (például az időjárás viszonyok változása) a tervtáblától történő eltérés léphet fel, ezt a folyamatot is sztochasztikusnak tekinthetjük.

A kiszolgálási mechanizmus leírható az egymásután beérkezett fogyasztók $W_1 ; W_2 ; W_3 \dots$ kiszolgálási idejeinek véletlen sorával. A beérkezés vizsgálatánál leírttal analóg módon definiálhatunk a Z_t folytonos idejű, kiszolgálási folyamatot.

A kiszolgáló állomások vagy másnéven a kiszolgálási csatornák száma alatt az egyszerre, párhuzamosan és egymástól függetlenül működő kiszolgálók számát értjük. Esetünkben ez alapvetően - a műszaki értelemben vett - kiszolgáló helyek (a töltőkutak vagy töltő kocsik, földi áramforrások) számát jelenti.

A vizsgált rendszer többcsatornásnak tekinthető, mert a zónában a műszaki állomány a kiszolgáló helyeken egyszerre, párhuzamosan végezheti az ismételt feladatra való előkészítések. A csatornák számát r -el jelöljük.

A korlátozott tárolási méretet a repülésen résztvevő gépek számaként - mint a rendszer jellemzőjét - kell felvennünk. Feltételezzük, hogy a kiképzési repülés során újabb, illetve nem a repülőegységhez tartozó gép vagy gépek kiszolgálására nem kerül sor. Ezzel a feltétellel a később felállítandó átmenetvalószínűségi mátrix méretét határoztuk meg. A rendszer maximális tárolási méretét K -val jelöljük. A korlátozott tárolási méret azt jelenti, hogy ha a sorbanállók száma eléri a maximális K értéket, az újabb beérkező fogyasztókat a rendszer elutasítja, míg a sor hossza K alá nem csökken.

Jelentse N_t a várakozó sor hosszát a t időpillanatban, azaz azon fogyasztók számát, akik kiszolgálása folyamatban van, vagy kiszolgálásra várnak. Ez az előzőekhez hasonlóan,

egy folytonos idejű, diszkrét állapotterű sztochasztikus folyamatot alkot.

Jelen vizsgálatunk során egy várakozási-hossz problémát kell megoldani. Ekkor a kiszolgálásra váró fogyasztók számát, amely tartalmazza azokat is, melyek kiszolgálása éppen folyik, vizsgáljuk az idő függvényében. Ugyanis a rendszerben lévő igények száma határozza meg elemzésünk során a kiszolgáló zóna szükséges befogadó képességét.

4. A sorbanállási modell felállítása

A fent leírt $\langle X_n \rangle$ és $\langle W_n \rangle$ véletlen sorozatok, illetve a velük analóg Y_t és Z_t folyamatok meghatározzák a kiszolgálási rendszer, a várakozási sor viselkedését. Jellemzésükre szolgál a λ jelű beérkezési intenzitás, illetve a μ kiszolgálási intenzitás. E két paraméter statisztikai meghatározása az alábbi módon történhet:

$$\lambda = \frac{1}{\tilde{X}} \quad ; \quad \mu = \frac{1}{\tilde{W}} \quad , \quad (8)$$

ahol:

\tilde{X} - a beérkezések közti idők átlaga;

\tilde{W} - a kiszolgálási idők átlaga.

Az így felállított rendszermodell az alábbi tulajdonságokkal bír:

(I) - Ha a sor hossza kisebb a K maximális tárolási méretnél, annak a valószínűsége, hogy a sor Δt időintervallum alatt eggyel növekszik:

$$\lambda \Delta t + o(\Delta t) \quad \text{ha } N_t < K ;$$

- Ha a sor hossza egyenlő a maximális tárolási mérettel, ez a valószínűség

$$o(\Delta t) \quad \text{ha } N_t = K$$

lesz.

- (II) - Egy kiszolgálás valószínűsége a fentivel egyező Δt idő alatt az $N_t = i$ egyenlőség esetén:

$$\mu_i = i \mu \Delta t + o(\Delta t) \quad \text{ha } i \leq r, \quad (10)$$

$$\mu_i = r \mu \Delta t + o(\Delta t) \quad \text{ha } i > r.$$

- (III) - Annak a valószínűsége, hogy egynél több beérkezés vagy kiszolgálás történik a vizsgált Δt idő alatt:

$$o(\Delta t)$$

melynek a határértéke:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} o(\Delta t) = 0$$

- (IV) - Az I és II tulajdonságok a rendszerben korábban történtektől és minden más feltételtől függetlenek.

Az (I) - (IV) tulajdonságokból következik, hogy az $\langle X_n \rangle$ érkezési és a $\langle W_n \rangle$ kiszolgálási idők kielégítik a felújítási folyamatok exponenciális eloszlására jellemző "feledékenységi" tulajdonságát. Mindkét sor - egymástól is - független valószínűségi változók sora

$$\lambda e^{-\lambda t}, \quad \text{illetve} \quad \mu e^{-\mu t}$$

sűrűség függvényvel. Az W_t és Z_t folyamatok pedig Poisson

(nulladrendű Markov) típusú folyamatok.

Igy N_t egy folytonos idejű, $\{0; 1; 2; \dots; K\}$ véges állapotterű Markov-láncot alkot, az alábbi valószínűségi derivált mátrixszal:

$$A = \begin{bmatrix} -\lambda & \mu_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \mu_1 & -(\lambda + \mu_1) & \lambda & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \mu_2 & -(\lambda + \mu_2) & \lambda & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \mu_i & -(\lambda + \mu_i) & \lambda \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & 0 & \lambda & -\mu_K \end{bmatrix} \quad (11)$$

ahol μ_i értékeit a (II) feltétel - a (10) egyenlet - alapján lehet meghatározni.

A (11) egyenlet felhasználásával felírható az alábbi mátrixegyenlet:

$$\frac{dp(t)}{dt} = A p(t) \quad (12)$$

ahol:

$p(t)$ - az N_t folyamat állapotokban való tartózkodásának valószínűség-vektora a t időpillanatban.

A (12) egyenlet jelenti a kiképzési repülések műszaki kiszolgálásának sorbanállási modelljét.

5. A feladat megoldása

Stacioner, azaz már beállt, kiszolgálási folyamat esetén az N_t folyamat állapotokban tartózkodás valószínűségének

$$p = p(t)$$

vektorát a

$$\Delta p = 0 \quad (13)$$

egyenlet megoldásaként kaphatjuk meg, mivel a (12) egyenlet bal oldala ekkor:

$$\frac{dg(t)}{dt} \equiv 0$$

A fenti lineáris egyenletrendszer esetén problémaként jelentkezik, hogy a numerikus algoritmusok a

$$p = 0$$

triviális megoldást adják meg. Viszont könnyen belátható, hogy minket az egyenlet ettől eltérő megoldás érdekel. Mivel céлом egy könnyen algoritmizálható eljárás kidolgozása, a [8] cikkben már korábban ismertetett eljárást alkalmaztuk. A "K ismeretlenes"¹ (13) egyenletet "K+1 ismeretlenes"-re alakítottuk át. Az p vektor K+1-edik elemének azt a biztos esemény valószínűségét tekintve, amikor az N_t folyamat a lehetséges állapotok valamelyikében tartózkodik. Ekkor az K+1-edik egyenlet a:

$$p_{K+1} = \sum_{j=0}^K p_j = 1 \quad (14)$$

mely a (13) mátrixegyenlet K+1-edik sorát alkotja. Valamint a (13) egyenlet mindegyik sorához hozzáadtuk a K+1-edik (biztos) esemény valószínűségét. Így az egyenletrendszer - kiegészítve a (14) egyenlettel az alábbi mátrixalakot veszi fel:

¹

Valójában a (13) egyenlet K+1 ismeretlenes, mivel a folyamat $\langle 0; 1; 2; \dots; K \rangle$ állapotterű, így az egyenletrendszernek van egy nulladik sora is. A fenti megfogalmazást az egyszerűség miatt alkalmaztam.

$$\left[\begin{array}{c|c} \Lambda & \begin{matrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{matrix} \\ \hline 1 & 1 \dots 1 \\ \hline & 0 \end{array} \right] \begin{bmatrix} P_0 \\ \vdots \\ P_K \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

E lineáris egyenletrendszer bármely ismert numerikus módszerrel kapott eredménye a (13) egyenlet triviálisától eltérő megoldása lesz.

Az eljáráshoz az irodalomban található algoritmusokhoz képest ekkor nincs szükség megfontolásokat igénylő egyedi egyenletrendszer megoldásokra. Például behelyettesítésre, vagy valamely egyenlet helyett a (14) egyenlet bevezetésére. Nem a legcélszerűbben választott egyedi algoritmus esetén a megoldás nagyon bonyolulttá, kezelhetetlenné vagy a végeredmény numerikusan pontatlanná válhat.

6. Példa az alkalmazásra

Szemléltetésképpen az I. Táblázatban található kiinduló adatok felhasználásával modelleztünk egy kiképzési repülés műszaki kiszolgálását.

repülőgépek száma:	$K = 20$
kiszolgáló csatornák száma:	$r = 15$
beérkezési intenzitás:	$\lambda = 0,136$
kiszolgálási intenzitás:	$\mu = 0,029$

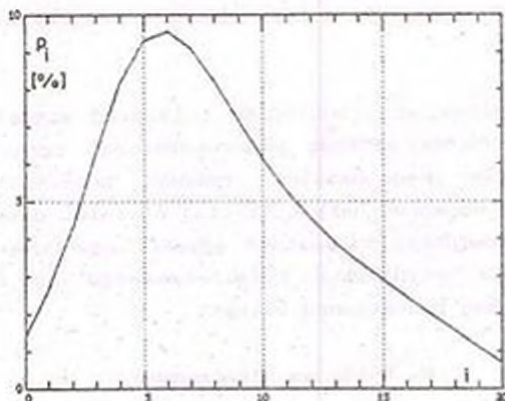
I. Táblázat
Kiinduló adatok

Az állandósult N_t folyamat állapotokban való tartózkodás valószínűségeit szemlélteti a 2. ábra.

Összefoglaló

Az előadás bemutatta a Markov-folyamatok elméletének alkalmazási lehetőségét a katonai repülőgépek kiképzési repülésé-

nek matematikai modellvizsgálatára. Felállítottuk a folyamat többcsatornás, korlátozott tárolási méretű sorbanállási modelljét. Egy könnyen algoritmizálható eljárás bemutatására került a stacioner modell megoldására.



2. ábra
Az állapotokban való tartózkodások valószínűségei
állandósult folyamat esetén

A felállított modell alkalmazási lehetőségét egy egyszerű példa szemléltette. A bemutatott matematikai modell felhasználható például adott számú repülőgép kiszolgálásához szükséges zónkapacitás meghatározására.

Felhasznált irodalom

- [1] - Clarke A.B., Disney R.L., Probability and Random Processes for Engineers and Scientists, John Wiley & Sons Inc., New York, 1970.
- [2] - Karlin S., Taylor H.M., Sztochasztikus folyamatok, Gondolat, Budapest, 1985.
- [3] - Kleinrock L., Sorbanállás - kiszolgálás, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1979.
- [4] - Papoulis A., Probability, Random Variables and Stochastic Processes, McGraw-Hill Book Company, Singapore, Hamburg, 1984.

- [5] - Pokorádi László, Application of Markov Process Theory to Investigation of Aircraft Operational Processes, Proceeding of 19th Congress of the ICAS, Anaheim (California, USA), 1994 September 18-23. 2172-2180.
- [6] - Pokorádi László, Investigation of Aircraft Operation System with Markov-Matrix, Proceeding of 4th Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Analyses, Budapest, 1994 november 7-9. (megjelenés alatt).
- [7] - Prékopa András, Valószínűségelmélet műszaki alkalmazásokkal, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1980.
- [8] - Rohács József, Műszaki Uzemeltetési folyamatok optimális irányítása markovi modellek alapján, AUTOMATIKA '86, Nyiregyháza, 1986 április 15-17., 423-435.

Békési Bertold mk. főhadnagy
főiskolai oktató
Repülő szakág tanszék

A REPÜLŐGÉP HOSSZIRÁNYÚ MOZGÁSÁNAK MATEMATIKAI MODELLJE

Bevezetés

A repülőgép mozgását két mozgás formájában képzelhetjük el: a tömegközéppont adott pályán történő és a repülőgép, mint szilárd test e középpont körüli mozgása. Ezen mozgások hat szabadságfokkal rendelkeznek.

A tömegközéppont helyzetét egy adott koordináta-rendszerhez viszonyítva, lineáris koordináták határozzák meg: a H repülési magasság, X megtett út, Z oldaleltérés. A lineáris koordináták mellett még szögkoordináták is jellemzik a repülőgép helyzetét. Ezen kívül még figyelembe kell venni a repülés azon paramétereit is, amelyek a repülőgép mozgását a levegőhöz viszonyítva jellemzik: V sebesség, α állásszög, β csúszásszög.

A kormányzott repülés végrehajtása céljából változtatni kell a repülőgépre ható F erőket és M nyomatékokat. A feladat végrehajtása céljából a mozgás pillanatnyi paramétereit állandóan összehasonlítják a szükséges paraméterekkel, majd az összehasonlítás eredményeként vezérlő jeleket alakítanak ki. A repülőgép bonyolult mozgását egy sor egyszerű mozgásra bontják és így tanulmányozzák valamennyit. A légi járművek repülésdinamikájának vizsgálatát derékszögű és polár koordináta-rendszerek segítségével végzik el.

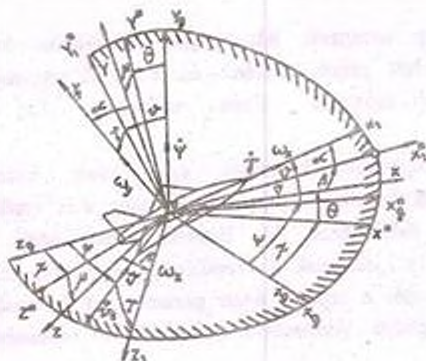
1. A repülőgép térbeli mozgásának egyenletei

A repülőgép egyenleteinek meghatározására a következő koordináta-rendszereket használják fel:

- a.) Földi koordináta-rendszer.
- b.) Földi koordináta-rendszer a repülőgép tömegközéppontú origóval.

- c.) A repülőgéppel összekapcsolt koordinátarendszer.
 d.) Sebességi koordinátarendszer.

A repülőgép térbeli mozgását tanulmányozva a földi koordinátarendszerhez viszonyítva az idő függvényében, a kinematikai törvényszerűségeket is figyelembe véve két derékszögű koordinátarendszert használnak: $O X_0 Y_0 Z_0$ földi és $O X_1 Y_1 Z_1$ repülőgéppel összekapcsolt koordinátákat.



1.ábra
 Koordinátarendszerek

A repülőgép tömegközéppontját az $O X_0 Y_0 Z_0$ koordinátarendszerben három lineáris koordináta: L megtett út, Z oldaleltérés, h repülési magasság, és a repülőgéppel összekapcsolt $O X_1 Y_1 Z_1$ koordinátáknak, a földi koordináta rendszerhez viszonyított szögkoordináták: ψ irány, ϑ bólintási és γ bedöntési szöge határozzák meg. A repülés folyamán fontos paraméter az α állásszög és a β csúszásszög.

Kinematikai összefüggés, amely összekapcsolja a ϑ bólintási α állás és θ pályaszöveget:

$$\vartheta = \theta + \alpha \quad (1)$$

A repülőgép földi koordináta-rendszerhez viszonyított mozgásának teljes elemzéséhez a kinematikai egyenletek nem elegendőek, szükséges még ismerni a repülőgépre ható erők és nyomatékok megoszlását. Ezek a repülőgép stabilitását és kormányozhatóságát határozzák meg. [1.,3.,4.,5.,6.,7.,8.,10.,12.,14.]

A dinamika a rendszerek mozgása közötti kapcsolatot a rájuk ható erők és nyomatékok figyelembevételével vizsgálja, a repülőgép térbeli mozgását leíró matematikai modell létrehozását teszi lehetővé.

A merev repülőgép térbeli mozgásegyenleteit megkaphatjuk az impulzus megmaradás (2) és a perdület - tétel (3) törvényeiből.

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = \sum F \quad (2)$$

$$\frac{d\vec{\pi}}{dt} = \sum M \quad (3)$$

- ahol m - a repülőgép tömege
 \vec{V} - tömegközéppont mozgási sebessége
 $\sum F$ - a repülőgépre ható erők eredője
 $\vec{\pi} = I\vec{\omega}$ - a repülőgép perdület tételének nyomatéka
 I - a tehetetlenségi tenzor
 $\sum M$ - a külső erők eredő nyomatéka

A repülőgép térbeli mozgását hat dinamikai egyenlet írja le. A repülőgép mozgásegyenleteit felírjuk a test koordináta-rendszerben (OXYZ). Ezeket komponens egyenleteknek nevezzük:

$$\begin{aligned} m(\dot{V}_x + \omega_y V_z - \omega_z V_y) &= F_x \\ m(\dot{V}_y + \omega_z V_x - \omega_x V_z) &= F_y \\ m(\dot{V}_z + \omega_x V_y - \omega_y V_x) &= F_z \end{aligned} \quad (4)$$

ahol F_x, F_y, F_z - a külső erők vektorának vetülete a test koordináta-rendszer tengelyeire.

A forgó mozgás egyenletei (OXYZ) rögzített koordináta-rendszer tengelyei körül:

$$\begin{aligned} I_x \dot{\omega}_x + (I_x - I_y) \omega_y \omega_z &= M_x \\ I_y \dot{\omega}_y + (I_x - I_z) \omega_x \omega_z &= M_y \\ I_z \dot{\omega}_z + (I_y - I_z) \omega_x \omega_y &= M_z \end{aligned} \quad (5)$$

ahol M_x, M_y, M_z - a külső erők nyomatékának komponens összetevői.

Ezeket az egyenletrendszerket két különböző mozgásra lehet szétbontani:

1. Hosszirányú mozgásra - X_1 és Y_1 mentén mozog és az OZ_1 tengely körüli forgásra.
2. Oldalirányú mozgásra - Z_1 mentén mozog és az X_1 és Y_1 körüli forgásra.

2. A repülőgép hosszirányú mozgás egyenletei

Az oldalirányú mozgás hatása a hosszirányú mozgásra elhanyagolható
 $(V_z, \omega_x, \omega_y) = 0$

Ha áttérünk a sebességi koordinátarendszerre akkor $V_x = V, V_y = 0$ és

$$\frac{d\omega_x}{dt} = \dot{\Theta} \quad (6)$$

akkor kapjuk

$$\begin{aligned} m \frac{dV}{dt} &= \sum F_x \\ mV \omega_x &= \sum F_y \\ I_x \frac{d\omega_x}{dt} &= \sum M_x \end{aligned} \quad (7)$$

A mozgásegyenletek

$$\begin{aligned} m\dot{V} &= P \cos \alpha - X_x - m g \sin \Theta \\ mV \dot{\Theta} &= Y_x + P \sin \alpha - m g \cos \Theta \\ I_x \dot{\omega}_x &= M_x, \quad \dot{\Theta} = \omega_x \\ V_x &= V \cos \Theta, V_y = V \sin \Theta \\ \alpha &= \vartheta - \Theta \end{aligned} \quad (8)$$

Az egyenletrendszer továbbra is nemlineáris marad, mivel trigonometrikus összefüggéseket tartalmaz, az aerodinamikai erők és nyomatékok együtthatói szintén nemlineáris függvények. [1.,3.,4.,5.,6.,7.,10.,11.,12.,14.]

3. A hosszirányú mozgásegyenletek linearizálása.

Tételezzük fel:

1. Zavarásmentes állapotban $V=0$, $V_s=0$.
2. A repülőgép tömegét és tehetetlenségi nyomatékait állandónak vesszük.

Legyen a kiindulási stacionárius állapot állandó magasságokon végrehajtott egyenesvonalú egyenletes repülés. Ebben a kiindulási állapotban a változókat jelöljük "0" indexszel. A mozgásegyenletek linearizálása $V_0; P_0; \alpha_0, \dots$ és így tovább állandó értékekkel jellemezhető, és a zavartalan mozgáshoz viszonyítva a mozgás kismértékű változásait vesszük figyelembe $\Delta V; \Delta P; \Delta \alpha, \dots$, és így tovább.

A kis zavarások módszerével a változókat a következő alakban írhatjuk fel:

$$V = V_0 + \Delta V, P = P_0 + \Delta P, \alpha = \alpha_0 + \Delta \alpha \text{ stb.}$$

Mivel a kiindulási állapot paramétereinek deriváltjai nullával egyenlők, ezért egyértelműek a következő kifejezések: $\dot{V} = \Delta \dot{V}$, $\dot{\theta} = \Delta \dot{\theta}$ és így tovább. Az erők és nyomatékok linearizálásánál figyelembe kell venni, hogy azok linearizálása a nyugalmi pontban történik. Ez az adott pillanatban megfelel az egyenesvonalú egyenletes mozgásnak, csúszás nélkül, így ezek a mennyiségek azonosan egyenlők nullával. [1.,2.,10.,12.,13.]

Az aerodinamikai erők és nyomatékok, mint ismeretes, a következő állandók segítségével határozhatók meg:

$$Y_s = c_{Y_s} \frac{\rho V^2}{2} S; X_s = c_{X_s} \frac{\rho V^2}{2} S; M_s = m_s \frac{\rho V^2}{2} S b_s \quad (9)$$

ahol X_s - légellenállási erő

Y_s - aerodinamikai felhajtóerő

M_s - a bólintási nyomaték

- c_{x_0} - légellenállási tényező
 c_{x_1} - aerodinamikai felhajtóerő tényezője
 m_2 - bólintási nyomaték együtthatója
 S - a szárny felülete
 b_A - közepes aerodinamikai húr (KAH)

Az aerodinamikai erők és nyomatékok együtthatóira a következő összefüggést lehet felírni:

$$\begin{aligned}
 c_{x_0} &\cong c_{x_0}(V, h, \alpha); \\
 c_{x_1} &\cong c_{x_1}(V, h, \alpha); \\
 m_2 &= m_2(V, h, \alpha, \dot{\alpha}, \omega_z, \delta_p).
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

A hajtómű tolóerejére a következő összefüggést lehet felírni:

$$P = P(V, h, \delta_p) \tag{11}$$

Az (8) egyenletrendszer első egyenletének linearizálása

$$m \frac{dV}{dt} = P \cos \alpha - X_a - m g \sin \Theta \tag{12}$$

$$\frac{d(V_0 + \Delta V)}{dt} = \frac{dV_0}{dt} + \frac{d\Delta V}{dt} = \frac{d\Delta V}{dt} \tag{13}$$

ahol $\frac{dV_0}{dt} = 0$

behelyettesítve az (12) egyenletbe az (13) kifejezést kapjuk

$$m \frac{d\Delta V}{dt} = (P_0 + \Delta P) \cos(\alpha_0 + \Delta\alpha) - (X_{a_0} + \Delta X) - m g \sin(\Theta_0 + \Delta\Theta) \tag{14}$$

$$\cos(\alpha_0 + \Delta\alpha) = \cos\alpha_0 \cos\Delta\alpha - \sin\alpha_0 \sin\Delta\alpha \tag{15}$$

$$\sin(\Theta_0 + \Delta\Theta) = \sin\Theta_0 \cos\Delta\Theta + \cos\Theta_0 \sin\Delta\Theta \tag{16}$$

$$m \frac{d\Delta V}{dt} = P_0 \cos \alpha_0 \cos \Delta \alpha - P_0 \sin \alpha_0 \sin \Delta \alpha + \Delta P \cos \alpha_0 \cos \Delta \alpha - \Delta P \sin \alpha_0 \sin \Delta \alpha - \\ - X'_{\alpha} - \Delta X - m g \sin \theta_0 \cos \Delta \theta - m g \cos \theta_0 \sin \Delta \theta \quad (17)$$

Legyen

$$\sin \Delta \alpha \approx \Delta \alpha; \cos \Delta \alpha \approx 1 \quad (18)$$

Az (17), (18) egyenletből kapjuk

$$m \frac{d\Delta V}{dt} = -P_0 \sin \alpha_0 \Delta \alpha + \Delta P \cos \alpha_0 - \Delta X - m g \cos \theta_0 \Delta \theta \quad (19)$$

továbbá

$$X = X(V, h, \alpha) \quad (20)$$

Feltételezzük, hogy a linearizálni kívánt függvény nemlineáris összefüggései a kiindulási stacionárius állapotban és annak környezetében akárhányszor differenciálható így azok Taylor - sorba fejthetők. A munkapont körüli változásokra szorítkozva a magasabb rendű tagokat elhanyagoljuk.

Sorbafejtjük az (11) és (20) nemlineáris funkciókat

$$P = P_0 + \left(\frac{\partial \Delta P}{\partial V} \right)_{r=r_0} \Delta V + \left(\frac{\partial \Delta P}{\partial h} \right)_{h=h_0} \Delta h + \left(\frac{\partial \Delta P}{\partial \delta} \right)_{\delta=\delta_0} \Delta \delta, \quad (21)$$

Vezessük be a következő általános kifejezést $\frac{\partial F}{\partial X} = F^*$ akkor kapjuk

$$P = P_0 + P^r \Delta V + P^h \Delta h + P^{\delta} \Delta \delta, \quad (22)$$

vagyis a következő egyenletet kapjuk

$$m \frac{d\Delta V}{dt} = -P_0 \sin \alpha_0 \Delta \alpha + (P^r \Delta V + P^h \Delta h + P^{\delta} \Delta \delta) \cos \alpha_0 - \\ - (X^r \Delta V + X^h \Delta h + X^{\alpha} \Delta \alpha) - m g \cos \theta_0 \Delta \theta \quad (23)$$

A második egyenlet linearizálásakor feltételezzük, hogy $P = P(V, h)$ vagyis elhanyagoljuk a nehézségi erőt a vezérlőkarok helyzetétől ($P^{\theta, \delta}, \sin \alpha \approx 0$).

A hosszirányú mozgás lineáris modellje a következő:

$$\begin{aligned} \dot{V} + a_x^r V + a_x^0 \Theta + a_x^c \alpha + a_x^h h &= a_x^{\delta} \delta, \\ \dot{\Theta} + a_\theta^r V + a_\theta^0 \Theta + a_\theta^c \alpha + a_\theta^h h &= 0 \\ \dot{\omega}_z + a_\omega^r V + a_\omega^0 \Theta + a_\omega^c \omega_z + a_\omega^c \alpha + a_\omega^h h &= a_\omega^{\delta} \delta, \\ \dot{\alpha} - a_\alpha^r V - a_\alpha^0 \Theta - \omega_z - a_\alpha^c \alpha - a_\alpha^h h &= 0 \\ \dot{h} + a_h^r V + a_h^0 \Theta &= 0 \end{aligned} \quad (24)$$

Az (24) egyenletrendszer néha szokás kiegészíteni $\dot{\vartheta} = \omega_z$; $\vartheta = \theta + \alpha$ ami lehetővé teszi a pályaszög kizárását. Így a következő egyenletrendszer kapjuk:

$$\begin{aligned} \dot{V} + a_x^r V + a_x^0 \vartheta + (a_x^c - a_x^0) \alpha + a_x^h h &= a_x^{\delta} \delta, \\ \dot{\omega}_z + a_\omega^r V + a_\omega^0 \vartheta + a_\omega^c \omega_z + (a_\omega^c - a_\omega^0) \alpha + a_\omega^h h &= a_\omega^{\delta} \delta, \\ \dot{\alpha} - a_\alpha^r V - a_\alpha^0 \vartheta - \omega_z - (a_\alpha^c - a_\alpha^0) \alpha - a_\alpha^h h &= 0 \\ \dot{h} + a_h^r V + a_h^0 \vartheta - a_h^0 \alpha &= 0 \end{aligned} \quad (25)$$

Az (24) egyenletrendszer derivatív együtthatói amelyek a hosszirányú mozgást írják le, a következők:

$$\begin{aligned} a_x^r &= \frac{1}{r_s} \left(c_{x_s} + \frac{V}{2} c_{x_s}^r \right) \frac{\cos \alpha}{m} P^r; \quad a_x^c = \frac{g}{V} \cos \theta; \\ a_x^0 &= \frac{c_{x_s}^0}{2r_s} + \frac{P \sin \alpha}{mV}; \quad a_x^h = \frac{P^0 r}{mV} \cos \alpha; \\ a_\omega^0 &= \frac{YT^h}{2T_s} \left[\frac{r_s P^r \cos \alpha}{m} - c_{x_s} \left(1 + \frac{1}{R_s T^h} \right) \frac{V c_{x_s}^r}{2} \right]; \\ a_\alpha^r &= -\frac{1}{r_s} \left(c_{x_s} + \frac{V}{2} c_{x_s}^r \right) \frac{P^r}{m} \sin \alpha; \quad a_\alpha^0 = -\frac{g}{V} \sin \theta; \end{aligned}$$

$$a_x^h = \frac{VT^h}{2T_h} \left[\frac{\tau_a P^r \sin \alpha}{m} + c_{r_a} \left(1 + \frac{1}{R_0 T^h} \right) + \frac{Vc_{r_a}^r}{2} \right]; \quad (26)$$

$$a_y^h = \frac{c_{r_a}^a}{2\tau_a} \frac{P \cos \alpha}{mV};$$

$$a_{m_z}^r = -\chi \left(V m_z^r + 2m_z + \frac{b_A}{V} m_z^r a_y^a \right); \quad a_{m_z}^o = -\chi \frac{b_A}{V} m_z^r a_y^o;$$

$$a_{m_z}^v = -\chi \frac{b_A}{V} (m_z^v + m_z^r); \quad a_{m_z}^a = -\chi \left(m_z^r + \frac{b_A}{V} m_z^r a_y^a \right);$$

$$a_{m_z}^h = \chi \left\{ \frac{VT^h}{2T_h} \tau_a \left[m_z^r V + 2m_z \left(1 + \frac{1}{R_0 T^h} \right) \right] - \frac{b_A}{V} m_z^r a_y^h \right\};$$

$$a_{m_z}^{h,r} = \chi m_z^{h,r}; \quad a_x^r = -\frac{\sin \Theta}{\tau_a}; \quad a_x^o = -\frac{\cos \Theta}{\tau_a}; \quad \chi = \frac{\rho V^2}{2} S \frac{b_A}{I_z}; \quad \tau_a = \frac{m}{\rho V S}.$$

Az (25) differenciális egyenletrendszer a következő mátrix alakban írható fel

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

ahol

$$x = \begin{pmatrix} V \\ \Theta \\ \omega_z \\ \alpha \\ h \end{pmatrix}; \quad A = \begin{pmatrix} -a_x^r & -a_x^o & 0 & -a_x^a & -a_x^h \\ -a_y^r & -a_y^o & 0 & -a_y^a & -a_y^h \\ -a_{m_z}^r & -a_{m_z}^o & -a_{m_z}^v & -a_{m_z}^a & -a_{m_z}^h \\ a_y^r & a_y^o & 1 & a_y^a & a_y^h \\ -a_x^r & -a_x^o & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad u = \begin{pmatrix} a_x^{h,r} \delta_r \\ 0 \\ a_{m_z}^{h,r} \delta_B \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (27)$$

Az (27) egyenlet és az (25) összefüggés teljes egészében leírja a repülőgép hosszirányú mozgását. A gyakorlatban az $a_x^r; a_x^o; a_{m_z}^h$ el lehet hanyagolni, ami valamelyest leegyszerűsíti a matematikai modellt, mivel a kinematikai egyenlet

$$\dot{h} + a_x^r V + a_x^o \Theta = 0 \quad (28)$$

nincs hatással az egyenletrendszer többi egyenletére.

Alkalmazva a Laplace transzformációt ehhez az egyenletrendszerhez nulla kezdeti feltételek mellett, a hosszirányú mozgás matematikai modelljét a következő alakban kapjuk.

$$\begin{aligned}
 (s+a_x^r)V(s) + a_x^0\Theta(s) + a_x^\alpha\alpha(s) &= a_x^{\delta_r}\delta_r \\
 a_y^rV(s) + (s+a_y^0)\Theta(s) + a_y^\alpha\alpha(s) &= 0 \\
 a_m^rV(s) + a_m^0\Theta(s) + (s+a_m^{\omega_r})\omega_r(s) + a_m^\alpha\alpha(s) &= a_m^{\delta_r}\delta_r(s) \\
 -a_x^rV(s) - a_y^0\Theta(s) - \omega_r(s) + (s-a_x^\alpha)\alpha(s) &= 0
 \end{aligned}
 \tag{29}$$

Az (28) egyenletnek a következő karakterisztikus egyenlet felel meg

$$\begin{aligned}
 D(s) &= \begin{vmatrix} (s+a_x^r) & a_x^0 & 0 & a_x^\alpha \\ a_y^r & (s+a_y^0) & 0 & a_y^\alpha \\ a_m^r & a_m^0 & (s+a_m^{\omega_r}) & a_m^\alpha \\ -a_x^r & -a_y^0 & -1 & (s-a_x^\alpha) \end{vmatrix} = \\
 &= s^4 + q_3s^3 + q_2s^2 + q_1s + q_0 = 0
 \end{aligned}
 \tag{30}$$

ahol

$$\begin{aligned}
 q_0 &= a_m^\alpha (a_x^r a_y^0 - a_x^0 a_y^r) + a_m^0 (a_x^0 a_y^r - a_x^r a_y^0) + a_m^r (a_x^0 a_m^\alpha - a_x^\alpha a_m^0) \\
 q_1 &= a_m^{\omega_r} [a_y^r (a_x^\alpha - a_x^0) - a_x^r (a_m^\alpha - a_m^0)] + (a_x^r a_m^\alpha - a_x^\alpha a_m^r) : (a_x^0 a_m^\alpha - a_x^\alpha a_m^0) \\
 q_2 &= a_y^r (a_x^\alpha - a_x^0) - a_x^r (a_m^\alpha - a_m^0) + a_m^\alpha + a_m^{\omega_r} (a_x^\alpha + a_y^0 - a_x^0) \\
 q_3 &= a_m^{\omega_r} + a_x^r + a_y^0 - a_x^\alpha
 \end{aligned}
 \tag{31}$$

A karakterisztikus egyenletnek öt gyöke van. Az egyik egyenlő nullával. Ez azt jelenti, hogy a repülőgép semlegesen viselkedik a magasságváltozást illetően (aerodinamikai erők és nyomatékok nem függenek a magasságtól). A többi négy gyök komplex konjugált és jelentős mértékben különbözik egymástól. Ezért a hosszirányú mozgás transziens folyamatát két mozgásformában írhatjuk le: hosszú periódusú (sebesség szerint) és rövid periódusú (állásszög szerint).

4. A hosszirányú mozgás átviteli függvényei

Az automatikus irányítási rendszerek analízise és szintézise során széles körben használatosak az átviteli függvények. Átviteli függvénynek

nevezik azt a viszonyt amely a kimeneti értékeket írja le a bemeneti értékeknek nulla kezdeti feltételek mellett. Azonban a repülőgép átviteli függvényeiben, amelyeket nemsokára megkapunk, a bemeneti értékek (a bólintási irány elfordulását) ellentétes előjellel veszik. Ezt azzal lehet megmagyarázni, hogy az aerodinamikában ezt az irányt veszik a pozitívnak.

$$\text{Például, } W_{\delta}^p(s) = \frac{\delta(s)}{-\delta_{\delta}(s)}$$

Az átviteli függvények lehetőséget adnak a tranzien (átmeneti) folyamatok és frekvenciajellemzők tanulmányozására. A repülőgép mozgására vonatkozóan pedig a rövid és hosszú periódusú, valamint a bedöntés és elfordulás szerinti mozgásainak vizsgálatára. [1., 2., 9., 10., 13.]

A repülőszerkezetekre ható külső zavarás legyen függőleges irányú szélleökés. Kezdetben a repülőszerkezet tehetetlensége miatt a repülés sebességének abszolút értéke V , valamint a pályaszög Θ gyakorlatilag nem változik. Ekkor az állásszög α és a bólintási szög ϑ intenzív változását figyelhetjük meg. Mivel az állásszög és a bólintási szög nagy frekvenciával változik, tehát a vizsgált paraméterek ($\alpha; \vartheta$) periódusideje kicsi, ezért ezt a mozgást szokás rövidperiódikus mozgásnak nevezni (RPM).

A rövidperiódikus mozgás befejeztével jelentőssé válik a repülés sebességvektorának (abszolút értékének V és irányának Θ) megváltozása. Mivel ekkor az állásszög állandónak tekinthető, ezért a pályaszög változása követi a bólintási szög változását: $\vartheta = \Theta + \alpha$. Ez a mozgás kisméretű, nagy periódusidővel rendelkezik, ezért szokás hosszúperiódikus mozgásnak nevezni.

Az eddig elhangzottak alapján a rövidperiódikus mozgásra igaz: $\Delta V = 0; \Delta \Theta = 0$.

Az (29) egyenletrendszer összefüggéseiben az $a_y^v, a_{m_y}^v, a_y^0, a_{m_y}^0$ állandókat el lehet hanyagolni. Ez lehetővé teszi, hogy a rövidperiódusú hosszirányú mozgásra egy egyszerű modellt kapjunk.

$$\begin{aligned} (s + a_{m_z}^v) \omega_z(s) + a_{m_z}^0 \alpha(s) &= a_{m_z}^v \delta_{\delta}(s) \\ -\omega_z(s) + (s - a_z^v) \alpha(s) &= 0 \end{aligned} \quad (32)$$

ahol $a_{m_z}^v, a_{m_z}^0, a_z^v$ - állandók, a repülőgép hosszirányú csatornájának erős összefüggései.

A repülőgép ω_z szerinti átviteli függvénye $W_{\omega_z}(s) = \frac{\omega_z(s)}{-\delta_y(s)}$

Az (32) egyenletrendszerből a CRAMER szabály segítségével határozzuk meg az átviteli függvényt:

$$\omega_z = \frac{D_{\omega_z}}{D_1}$$

$$D_1 = \begin{vmatrix} s + a_{\omega_z}'' & a_{\omega_z}'' \\ -1 & s - a_y'' \end{vmatrix} = (s + a_{\omega_z}'')(s - a_y'') + a_{\omega_z}'' = a_0 s^2 + a_1 s + a_2 = 0 \quad (33)$$

$$D_{\omega_z} = \begin{vmatrix} a_{\omega_z}'' \delta_y(s) & a_{\omega_z}'' \\ 0 & s - a_y'' \end{vmatrix} = (s - a_y'') a_{\omega_z}'' \delta_y(s) \quad (34)$$

ahol $a_1 = a_{\omega_z}'' - a_y''$; $a_2 = a_{\omega_z}'' - a_y'' a_{\omega_z}''$

Tehát

$$\omega_z = \frac{D_{\omega_z}}{D_1} = \frac{(s - a_y'') a_{\omega_z}'' \delta_y(s)}{a_0 s^2 + a_1 s + a_2} \quad (35)$$

Az (34) egyenletnek, amely a rövidperiódusú hosszirányú mozgást leírja, a következők a megoldásai:

$$\omega_z(s) = \frac{a_{\omega_z}'' (s - a_y'')}{a_0 s^2 + a_1 s + a_2} \delta_y(s) \quad (36)$$

$$\alpha(s) = \frac{a_{\omega_z}''}{a_0 s^2 + a_1 s + a_2} \delta_y(s) \quad (37)$$

Vezessük be a következő jelöléseket

$$\omega_n^2 = a_1; \quad \xi_n = \frac{a_2}{2\sqrt{a_1}}; \quad T_0 = \frac{1}{a_0}; \quad K_n^z = \frac{a_{\omega_z}''}{\omega_n^2}; \quad K_n^z = \frac{K_n^z}{T_0} \quad (38)$$

Figyelembevéve az (25), (36), (37), (38), összefüggéseket megkapjuk az átviteli függvényeket bőlöntési irány és bedöntési szögek alapján.

$$W_a^n(s) = \frac{\alpha(s)}{-\delta_a(s)} = \frac{K_a^n \omega_a^2}{s^2 + 2\xi_a \omega_a s + \omega_a^2} \quad (39)$$

$$W_{\omega_r}^n(s) = \frac{\omega_r(s)}{-\delta_a(s)} = \frac{K_a^n \omega_a^2 (T_0 s + 1)}{s^2 + 2\xi_a \omega_a s + \omega_a^2} \quad (40)$$

$$W_{\theta}^n(s) = W_{\omega_r}^n(s) \frac{1}{s} = \frac{\vartheta(s)}{-\delta_a(s)} = \frac{K_a^n \omega_a^2 (T_0 s + 1)}{(s^2 + 2\xi_a \omega_a s + \omega_a^2) s} \quad (41)$$

$$W_{\omega}^n(s) = W_{\theta}^n(s) - W_a^n(s) = \frac{\Theta(s)}{-\delta_a(s)} = \frac{K_a^n \omega_a^2}{(s^2 + 2\xi_a \omega_a s + \omega_a^2) s} \quad (42)$$

ahol

$$K_a^n = \frac{a_{m_r}^{n_r}}{\omega_a^2} a_r^n = \frac{a_{m_r}^{n_r}}{\omega_a^2 T_0}$$

Határozzuk meg a repülőgép átviteli függvényét az n_r normál túlterhelés szerint, amely igen fontos szerepet játszik a repülési folyamatok irányításában.

$$W_{n_r}^n(s) = \frac{n_r(s)}{-\delta_a(s)} = \frac{K_{n_r}^n \omega_a^2}{s^2 + 2\xi_a \omega_a s + \omega_a^2} \quad (43)$$

ahol

$$K_{n_r}^n = K_a^n \frac{V}{g T_0} \quad - \text{a túlterhelés arányossági tényezője}$$

Felhasznált irodalom

- [1] - Aszlanjan A. E. Szisztyemi avtomatycieszkovo upravlenyija poljotom letatelnih apparatov, Kijevszkoje vizssee voennoe aviacionnoe inzenyermoe ucilise, Kijev, 1984.
- [2] - Bajborogyina J. V. Bortovije szisztyemi upravlenyija poljotom, Transzport, Moszkva, 1984.

- [3] - Belogorodszkij Sz. L. Automatizacija upravlenija poszadkoj szamoljota. Transzport, Moszkva, 1972.
- [4] - Blakelock H. John Automatic Control of Aircraft and Missiles. John Wiley & Sons, Inc. New York/London/Sydney, 1965.
- [5] - Bjugensz G. Sz., Sztudnev R. V. Dinamika prodolnovo i bokovovo dvizsenyija. Masinosztroenyije, Moszkva, 1979.
- [6] - Bjugensz G. Sz., Sztudnev R. V. Dinamika poljota. Prosztranzszennoje dvizsenyije, Masinosztroenyije, Moszkva, 1983.
- [7] - Dickinson B. Aircraft Stability and Control for Pilots and Engineers, Sir Isaac Pitman & Sons LTD, London, 1968
- [8] - Dobrolenszkij J. P. Dinamika poljota v nyeszpakojnoj atmosfere, Masinosztroenyije, Moszkva, 1969.
- [9] - Hacker T. Flight Stability and Control, American Elsevier Publishing Company, Inc., New York, 1970.
- [10] - Horváth Dezső A repülőgép dinamikai tulajdonságának vizsgálata hosszirányú mozgás esetén. Tudományos Kiképzési Közlemények, Szolnok, 1994/2-3.
- [11] - McCormick W. B. Aerodynamics, Aeronautics, and Flight Mechanics, John Wiley & Sons, New York - Chichester - Brisbane - Toronto, 1964.
- [12] - Dr. Rácz Elemér Repülőgépek, Tankönyvkiadó, Budapest, 1985.
- [13] - Szabolcsi Róbert Légijárművek nemlineáris mozgásegyenleteinek linearizálása Tudományos Kiképzési Közlemények, Szolnok, 1992/2-3.
- [14] - Sznyesko J. I. Iszledovanyija v poljote usztojcsivosztyi i upravljaemosztyi szamoljota. Masinosztroenyije, Moszkva, 1971.

Dr. Szabó László
főiskolai docens

Repülő Sárkány-Hajtómű Tanszék, szakcsoportvezető

**A "VERÉB" felsőszárnyas motoros könnyűrepülőgép -számítógéppel
segített-repülés mechanikai elemzése**
III. rész

A REPÜLÉSTUDOMÁNYI ÉS KÉPZÉSI KÖZLEMÉNYEK előző két számában hasonló címen megjelent cikkeim befejező része az alábbi munkám, amely az ott bemutatott repülés mechanikai elemzés kiegészítő adatai és a számítás metodikája után a kapott eredményeket foglalja össze.

11. A repülés mechanikai elemzés gyakorlati végrehajtása, az elemzés eredményei

A "VERÉB" repülőgép repülés mechanikai elemzés gyakorlati végrehajtásához a következő számítógépes szoftvereket használtam fel:

- | | |
|------------------------------|--|
| "A" Dr. Gausz T. (BME): | SRÓF |
| "B" Labodics J. (AEROPLEX): | ULTRAKÖNNYŰ REPÜLŐGÉPEK
REPÜLÉS MECHANIKAI ÉS STA-
BILITÁS SZÁMÍTÁSA |
| "C" Dr. Bálint - Dr. Tátrai: | GYAKORLATI STATISZTIKAI SZÁ-
MÍTÁSOK |
| "D" | QUATTRO |

11.1. EREDMÉNYEK

Az elméleti témarész 3.1 pontja alapján a várható sebességekhez tartozó Reynolds-szám $1,56 \cdot 10^6$ - $4,26 \cdot 10^6$ közötti értéket vesz fel, ezért

POLÁRISOK
INPUTJAI

Cy	alfa	Cxpr *(E -3)	Cxi *(E -3)	Cx szárny *(E -3)	Cx káros *(E -3)	Cx rg *(E -3)
-0.30	-7.2	10.0	5.075	15.075	40.170	55.245
-0.25	-6.8	9.5	3.524	13.024	40.170	53.194
-0.20	-6.4	9.0	2.256	11.256	40.170	51.425
-0.15	-6.0	8.5	1.269	9.769	40.170	49.939
-0.10	-5.7	8.1	0.564	8.664	40.170	48.834
-0.05	-5.3	7.9	0.141	8.041	40.170	48.211
0.00	-4.8	7.6	0.000	7.600	40.170	47.770
0.05	-4.4	7.3	0.141	7.441	40.170	47.611
0.10	-3.8	7.1	0.564	7.664	40.170	47.834
0.15	-3.0	7.0	1.269	8.269	40.170	48.439
0.20	-2.5	6.8	2.256	9.056	40.170	49.225
0.25	-2.2	6.7	3.524	10.224	40.170	50.394
0.30	-1.5	6.7	5.075	11.775	40.170	51.945
0.35	-1.1	6.7	6.908	13.608	40.170	53.778
0.40	-0.4	6.8	9.022	15.822	40.170	55.922
0.45	0.0	6.9	11.419	18.319	40.170	58.489
0.50	0.6	7.1	14.098	21.198	40.170	61.367
0.55	1.4	7.3	17.058	24.358	40.170	64.528
0.60	2.0	7.5	20.301	27.801	40.170	67.970
0.65	2.5	7.7	23.825	31.525	40.170	71.695
0.70	3.0	7.8	27.631	35.431	40.170	75.601
0.75	3.6	8.0	31.720	39.720	40.170	79.890
0.80	4.3	8.3	36.090	44.390	40.170	84.560
0.85	5.0	8.6	40.742	49.342	40.170	89.512
0.90	5.6	8.8	45.676	54.476	40.170	94.646
0.95	6.3	9.3	50.892	60.192	40.170	100.362
1.00	7.0	9.7	56.391	66.091	40.170	106.260
1.05	7.4	10.2	62.171	72.371	40.170	112.540
1.10	8.2	10.6	68.233	78.833	40.170	119.002
1.15	8.9	11.0	74.577	85.577	40.170	125.746
1.20	9.6	11.5	81.202	92.702	40.170	132.872
1.25	10.4	11.9	88.110	100.010	40.170	140.180
1.30	10.8	12.6	95.300	107.900	40.170	148.070
1.35	11.6	13.7	102.772	116.472	40.170	156.642
1.40	12.3	14.7	110.526	125.226	40.170	165.395
1.45	12.8	15.7	118.561	134.261	40.170	174.431
1.50	13.6	16.8	126.879	143.679	40.170	183.849
1.55	14.7	18.7	135.478	154.178	40.170	194.348
1.60	15.2	20.5	144.360	164.860	40.170	205.030
1.65	16.4	22.2	153.523	175.723	40.170	215.893
1.70	18.0	24.0	162.969	186.969	40.170	227.139

1. táblázat

a rendelkezésemre álló profilpolárisok közül a $2,0 \cdot 10^6$ Reynolds-számhoz tartozót tekintem kiinduló függvénynek. Ez alapján:

$$C_{y_{max}} = 1,7$$

$$\alpha_{kz} = 18^\circ$$

$$a_0 = 5,958$$

$$\lambda = 7,114$$

$$\lambda_{eff} = 6,039$$

$$a = 4,704$$

A szárny és a repülőgép polárisainak meghatározását az elméleti alapok 3.3 és 3.4 pontjaiban foglaltak alapján hajtottam végre, aminek eredményeit, valamint a káros ellenállások összefoglaló táblázatos értékeit 1 - 2. táblázat és az 1 - 4. ábra reprezentálja.

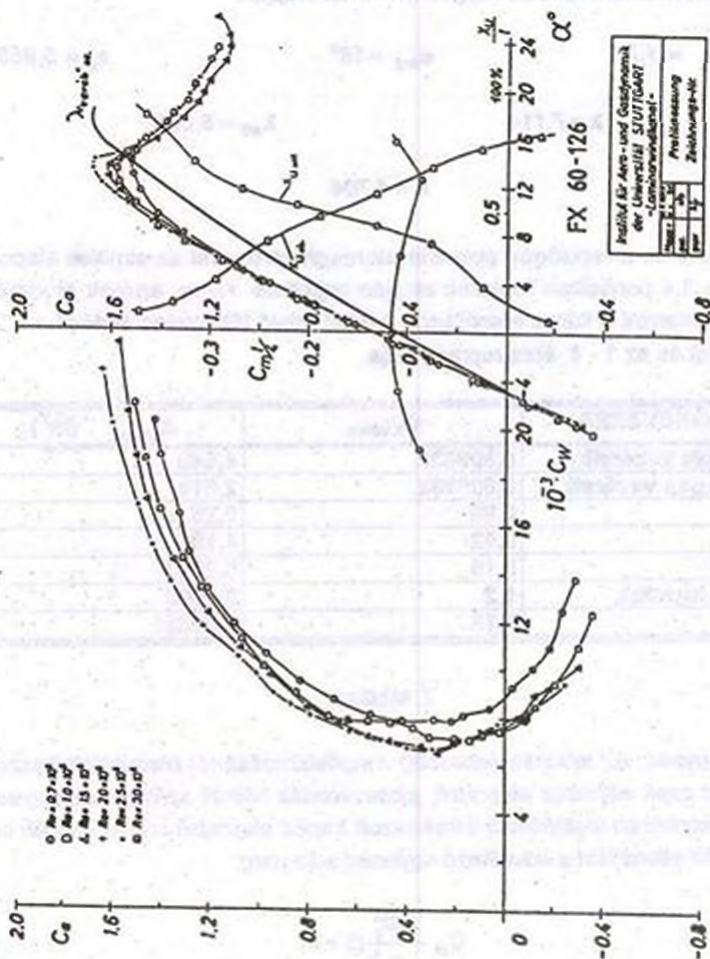
MEGNEVEZÉS	$C_{x_{káros}}$	$A_{előre}$ (m ²)
Vízszintes vezérsík	0,009932	4,648
Függőleges vezérsík	0,009932	2,514
Motor	0,09	0,28
Törzs	0,12	4,188
Futómű	0,15	0,2123
Vezérlő huzalok	1,2	0,0008
Dúcok	0,15	0,01831

2. táblázat

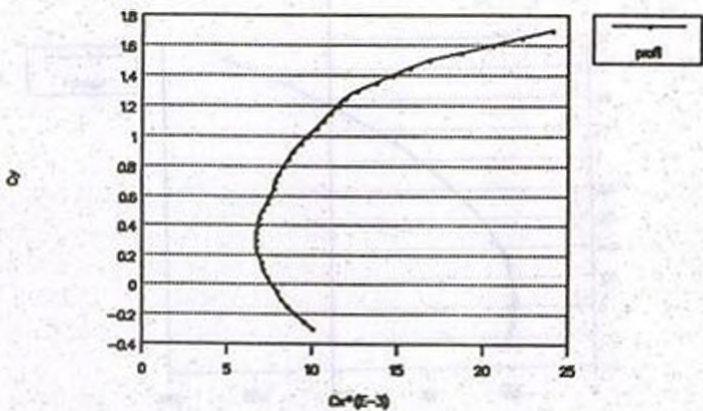
Megjegyzés: Az indukált sebesség meghatározásánál bemutatott összefüggés csak elliptikus alaprajzú, elcsavarodás nélküli szárnyra érvényes. A gyakorlatban legtöbbször alkalmazott trapéz alaprajzú szárny esetén az indukált ellenállást a következő egyenlet adja meg:

$$C_{x_i} = \frac{C_y^2}{\pi \lambda} (1 + \delta)$$

Ahol δ -t (a trapézviszony [szárnyvéghúr és a szárnyközéphúr viszonya]) a λ függvényében az [1.] szakirodalom 45. oldal 22/a ábrából kapjuk. Adataimnak megfelelően; $\delta = 0,07$.

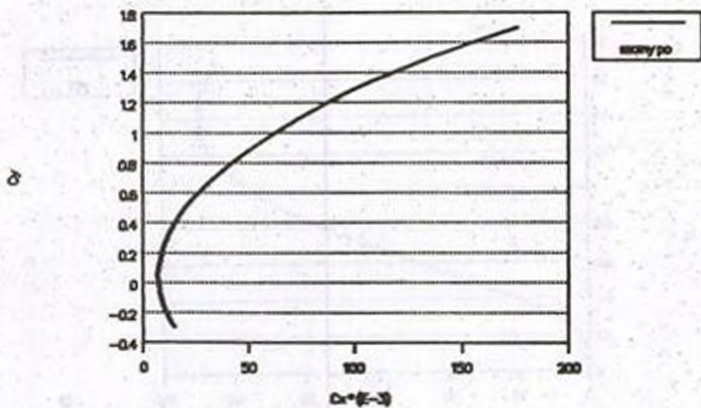


A "VERÉB" REPÜLŐGÉP PROFIL POLÁRISA



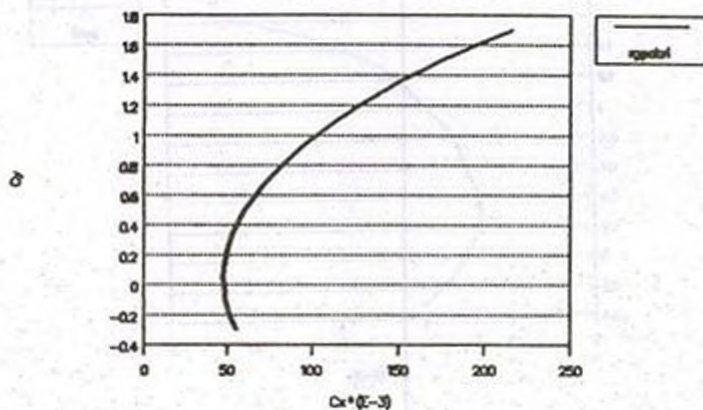
2. ábra

A "VERÉB" REPÜLŐGÉP SZÁRNY POLÁRISA



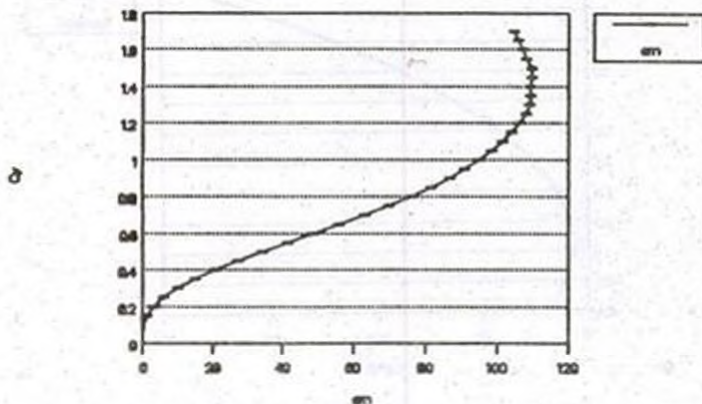
3. ábra

A "VERÉB" REPÜLŐGÉP POLÁRISA



4. ábra

A "VERÉB" REPÜLŐGÉP "em" GÖRZÉJE



5. ábra

EMELKEDÉSI-SZÁM MEGHATÁROZÁSA

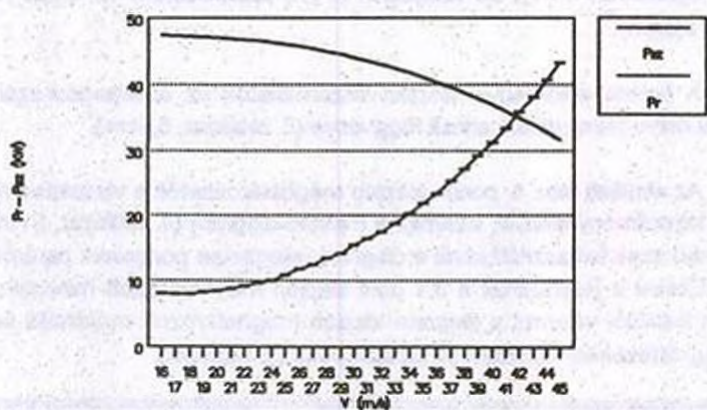
Cy	Cx rg * (E -3)	Cy ³	Cx rg ²	em
-0.30	55.245			
-0.25	53.194			
-0.20	51.425			
-0.15	49.939			
-0.10	48.834			
-0.05	48.211			
0.00	47.770	0.000000	0.000000	0.0000
0.05	47.411	0.000125	0.002248	0.0556
0.10	47.934	0.001000	0.002298	0.4352
0.15	48.539	0.003375	0.002356	1.4325
0.20	49.225	0.008000	0.002423	3.3015
0.25	50.394	0.015625	0.002540	6.1526
0.30	51.945	0.027000	0.002698	10.0064
0.35	53.778	0.042875	0.002892	14.8252
0.40	55.992	0.064000	0.003135	20.4138
0.45	58.489	0.091125	0.003421	26.6373
0.50	61.367	0.125000	0.003766	33.1920
0.55	64.528	0.166375	0.004164	39.9569
0.60	67.970	0.216000	0.004620	46.7534
0.65	71.695	0.274625	0.005140	53.4274
0.70	75.601	0.343000	0.005716	60.0118
0.75	79.890	0.421875	0.006382	66.1004
0.80	84.560	0.512000	0.007150	71.6048
0.85	89.512	0.614125	0.008012	76.6468
0.90	94.646	0.729000	0.008958	81.3806
0.95	100.362	0.857375	0.010073	85.1195
1.00	106.260	1.000000	0.011291	88.5639
1.05	112.540	1.157625	0.012665	91.4009
1.10	119.002	1.331000	0.014162	93.9867
1.15	125.746	1.520875	0.015812	96.1839
1.20	132.872	1.728000	0.017655	97.8757
1.25	140.180	1.953125	0.019650	99.3933
1.30	148.070	2.197000	0.021925	100.2066
1.35	156.642	2.460375	0.024537	100.2736
1.40	165.495	2.744000	0.027389	100.1872
1.45	174.531	3.048625	0.030461	100.0826
1.50	183.649	3.375000	0.033727	100.0687
1.55	194.348	3.723875	0.037771	98.5903
1.60	205.030	4.096000	0.042037	97.4375
1.65	215.893	4.492125	0.046610	96.3771
1.70	227.139	4.913000	0.051592	95.2280

3. táblázat

PENAUD-DIAGRAM INPUTJAI

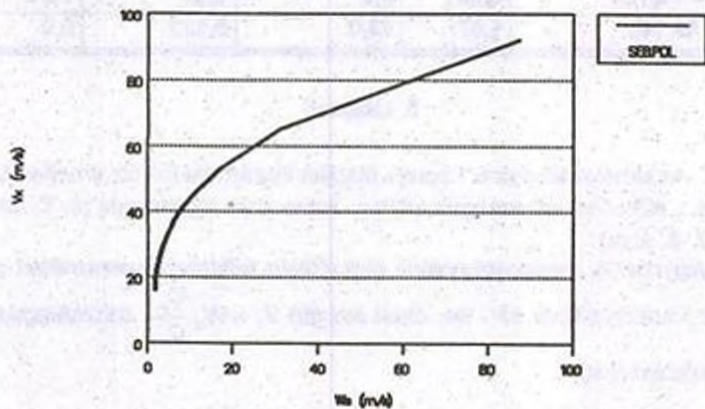
V (m/s)	Cy	Cx	Cx/Cy	Fsz (N)	Psz (KW)	Pr (KW)
16	1.656	0.215	0.1299	532.4474	8.5192	47.40
17	1.467	0.175	0.1193	489.2538	8.3173	47.35
18	1.308	0.148	0.1131	463.8793	8.3498	47.28
19	1.174	0.126	0.1073	440.0237	8.3605	47.18
20	1.060	0.113	0.1066	437.2570	8.7451	47.06
21	0.961	0.100	0.1041	426.6158	8.9589	46.90
22	0.876	0.092	0.1051	430.7562	9.4766	46.71
23	0.801	0.084	0.1048	429.8662	9.8869	46.49
24	0.736	0.077	0.1046	429.0536	10.2973	46.24
25	0.678	0.073	0.1077	441.3684	11.0342	45.96
26	0.627	0.069	0.1101	451.2260	11.7319	45.64
27	0.581	0.065	0.1118	458.3943	12.3766	45.28
28	0.541	0.063	0.1165	477.8097	13.3787	44.89
29	0.504	0.061	0.1210	496.2770	14.3920	44.45
30	0.471	0.059	0.1253	513.6802	15.4104	43.98
31	0.441	0.057	0.1292	529.9032	16.4270	43.47
32	0.414	0.056	0.1353	554.7359	17.7515	42.92
33	0.389	0.054	0.1388	568.8791	18.7730	42.33
34	0.367	0.053	0.1459	598.2875	20.3418	41.69
35	0.346	0.053	0.1532	628.0732	21.9826	41.01
36	0.327	0.052	0.1590	651.9385	23.4698	40.29
37	0.310	0.052	0.1670	684.6873	25.3334	39.52
38	0.294	0.051	0.1748	716.6100	27.2312	38.70
39	0.279	0.051	0.1830	750.4084	29.2659	37.84
40	0.265	0.051	0.1906	781.6452	31.2658	36.93
41	0.252	0.050	0.1987	814.7113	33.4032	35.97
42	0.240	0.050	0.2081	853.2315	35.8357	34.97
43	0.229	0.050	0.2160	885.4018	38.0723	33.91
44	0.219	0.049	0.2252	923.3165	40.6259	32.81
45	0.209	0.049	0.2341	959.8855	43.1948	31.65

A "VERÉB" REPÜLŐGÉP "PENAUD-DIAGRAMJA"



6. ábra

A "VERÉB" REPÜLŐGÉP SEBESSÉGI POLÁRISA



7. ábra

A Goroscenko - Fedjajevszkij összefüggés konstans értékét -az inputoknak megfelelően- $k=1,3$ -ra választom az [1.] szakirodalom 42. oldal 18. ábrája alapján.

A poláris eredményei alapján kiszámíthatók az emelkedési-szám értékei illetve felrajzolható annak függvénye (3. táblázat, 5. ábra).

Az elméleti rész 4. pontja alapján meghatározhatók a vízszintes repülés teljesítmény igényei, valamint a Penaud-diagram (4. táblázat, 6. ábra), majd ezek felhasználásával a diagram jellegzetes pontjainak paraméterei. Ezeket a jellemzőket a 3.1 pont alapján meghatározott minimális-, fel- és leszálló, valamint a diagram alapján meghatározott maximális sebességi értékekkel tüntettem fel táblázatosan (5. táblázat).

SEBESSÉG (km/h)	C_y	α (fok)	Sikló-szám	Jóság-szám
$V_{\min} = 56,842$	-	-	-	-
$V_{\text{fel}} = 68,210$	-	-	-	-
$V_{\text{p}} = 73,894$	-	-	-	-
$V_{\max} = 149,000$	-	-	-	-
$V_{\text{opt}} = 78,124$	0,89	5,6	0,99	10,1
$V_{\text{g}} = 59,148$	1,57	15,0	0,122	8,2

5. táblázat

Az elméleti alapok 5.1 pontja alapján kiszámíthatók az emelkedési-, illetve a süllyedési sebességek értékei, illetve ezek függvényei (6-7. táblázat, 7-8. ábra).

Megjegyzés: A sebességi poláris ordinátáján feltüntetett paramétert (V_x) az [1.] szakirodalom 93 - 94. oldal alapján $V_x = W_s \frac{C_y}{C_x}$ összefüggéssel határoztam meg.

Az elméleti rész 6. pontja alapján az elérhető zuhanó sebesség nagysága:

SEBESÉGI POLÁRIS ÉRTÉKEI

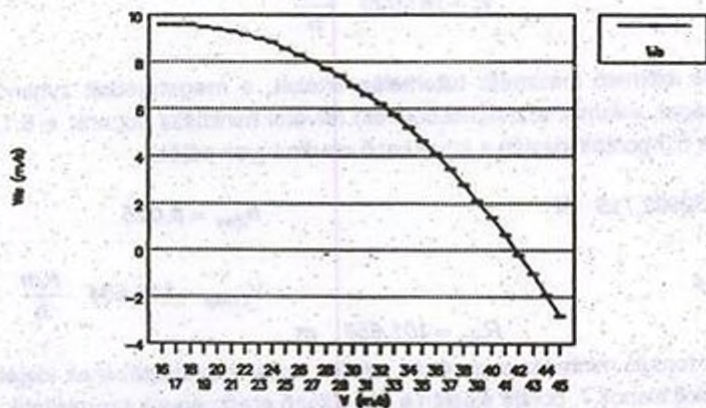
em	Cx rg * (E -3)	Cy	Ws (m/s)	Vx (m/s)
0.0556	47.411	0.05	87.300	92.068
0.4352	47.934	0.10	31.206	65.102
1.4325	48.539	0.15	17.201	53.155
3.3015	49.225	0.20	11.330	46.034
6.1526	50.394	0.25	8.300	41.174
10.0064	51.945	0.30	6.508	37.587
14.8252	53.778	0.35	5.347	34.798
20.4138	55.992	0.40	4.557	32.551
26.6373	58.489	0.45	3.989	30.689
33.1920	61.367	0.50	3.573	29.114
39.9569	64.528	0.55	3.257	27.760
46.7534	67.970	0.60	3.011	26.578
53.4274	71.695	0.65	2.817	25.535
60.0118	75.601	0.70	2.658	24.606
66.1004	79.890	0.75	2.532	23.772
71.6048	84.560	0.80	2.433	23.017
76.6468	89.512	0.85	2.352	22.330
81.3806	94.646	0.90	2.282	21.701
85.1195	100.362	0.95	2.231	21.122
88.5639	106.260	1.00	2.188	20.587
91.4009	112.540	1.05	2.153	20.091
93.9867	119.002	1.10	2.124	19.629
96.1839	125.746	1.15	2.099	19.197
97.8757	132.872	1.20	2.081	18.793
99.3933	140.180	1.25	2.065	18.414
100.2066	148.070	1.30	2.057	18.056
100.2736	156.642	1.35	2.056	17.718
100.1872	165.495	1.40	2.057	17.399
100.0826	174.531	1.45	2.058	17.097
100.0687	183.649	1.50	2.058	16.809
98.5903	194.348	1.55	2.073	16.536
97.4375	205.030	1.60	2.086	16.275
96.3771	215.893	1.65	2.097	16.027
95.2280	227.139	1.70	2.110	15.790

6. táblázat

We - V POLÁRIS ÉRTEKEI

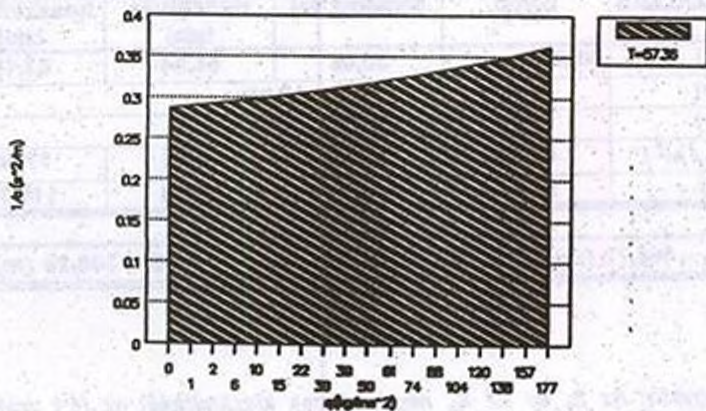
Ps _z (KW)	Pr (KW)	V (m/s)	We (m/s)
8.519	47.40	16	9.483
8.317	47.35	17	9.520
8.350	47.28	18	9.495
8.360	47.18	19	9.468
8.745	47.06	20	9.345
8.959	46.90	21	9.254
9.477	46.71	22	9.081
9.887	46.49	23	8.928
10.297	46.24	24	8.767
11.034	45.96	25	8.518
11.732	45.64	26	8.270
12.377	45.28	27	8.025
13.379	44.89	28	7.686
14.392	44.45	29	7.331
15.410	43.98	30	6.968
16.427	43.47	31	6.596
17.752	42.92	32	6.139
18.773	42.33	33	5.746
20.342	41.69	34	5.207
21.983	41.01	35	4.641
23.470	40.29	36	4.102
25.333	39.52	37	3.460
27.231	38.70	38	2.797
29.266	37.84	39	2.091
31.266	36.93	40	1.382
33.403	35.97	41	0.626
35.836	34.97	42	-0.211
38.072	33.91	43	-1.015
40.626	32.81	44	-1.906
43.195	31.65	45	-2.816

A "VERÉB" REPÜLŐGÉP EMELKEDŐ SEBESSÉGE



8. ábra

NEKIFUTÁSI ÚTHOSSZ MEGHATÁROZÁSA (FELSZÁLLÁS BÉTONRÓL)



9. ábra

$$V_z = 161,030 \frac{\text{Km}}{\text{h}}$$

Az elérhető maximális túlterhelés értékét, a megengedett zuhanó sebességet, valamint a zuhanásból való felvétel minimális sugarát a 6.1, 6.2 és a 6.3 pontok alapján a következő eredmények adják:

$$Y_{max} = 32903,715 \text{ N}$$

$$n_{max} = 8,025$$

$$n_{mag} = 4$$

$$V_{z,mag} = 113,684 \frac{\text{Km}}{\text{h}}$$

$$R_{min} = 101,654 \text{ m}$$

A forduló minimális sugarát és a teljes spirál végrehajtásának idejét az elméleti alapok 7. pontja alapján a következő eredmények szemléltetik:

$$R_{min} = 14,67 \text{ m}$$

$$t_{min} = 4,12 \text{ s}$$

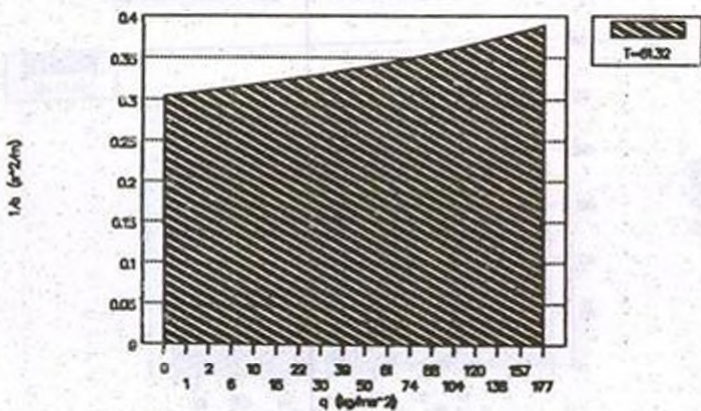
A fel- és leszálló úthossz meghatározását a 8. és 9. pontokban foglaltaknak megfelelően végeztem el.

FELSZÁLLÁS	beton	keménytala	rövidfűves tala	hosszúfűves tala
$S_1 \text{ (m)}$	48,82	50,06	61,84	63,18
$S_2 \text{ (m)}$	← 17,28 →			
$S_3 \text{ (m)}$	← 29,91 →			
$T \text{ (kg / m}^2\text{)}$	67,36	61,32	63,61	77,40
$S \text{ (m)}$	94,01	97,25	99,03	110,37
LESZÁLLÁS				
$S'_1 = 144,78 \text{ (m)}$	$S'_2 = 158,21 \text{ (m)}$	$S'_3 = 303,99 \text{ (m)}$		

8. táblázat

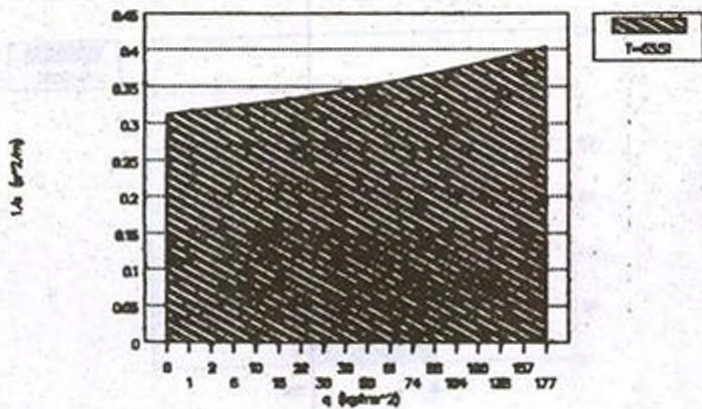
Megjegyzés: Az S_1 és az S'_1 nagyságának kiszámítását az [1.] szakirodalom 280 - 285. oldal 194. valamint 197. ábrája alapján végeztem el. Az integrál kifejezésben szereplő értéket úgy kaptam meg, hogy a q függvényében pontonként ábrázoltam az $1/a$ változását, majd a görbe alatti te-

NEKIFUTÁSI ÚTHOSSZ MEGHATÁROZÁSA (FELSZÁLLÁS KEMÉNY TALAJRÓL)



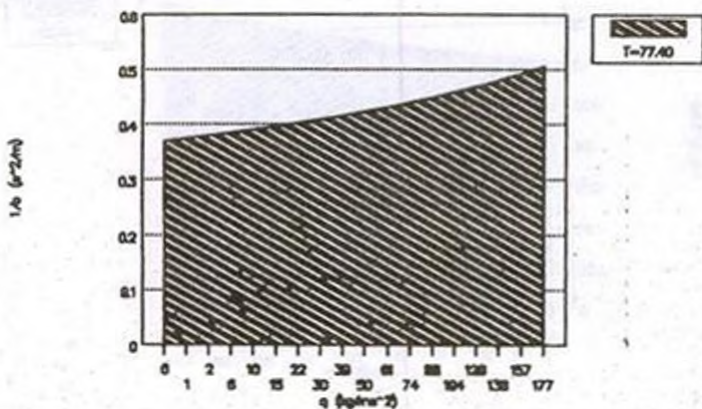
10. ábra

NEKIFUTÁSI ÚTHOSSZ MEGHATÁROZÁSA (FELSZÁLLÁS RÖVID FŰVES TALAJRÓL)



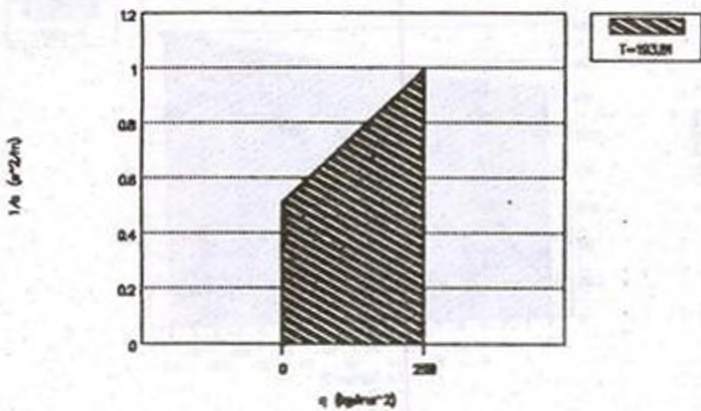
11. ábra

NEKIFUTÁSI ÚTHOSSZ MEGHATÁROZÁSA (FELSZÁLLÁS HOSSZÚ FÜVES TALAJRÓL)



12. ábra

LESZÁLLÁSI ÚTHOSSZ MEGHATÁROZÁSA (S₂ SZAKASZ)



13. ábra

rületet (T) kiszámítottam. Ha ezt az értéket osztjuk a p értékével, akkor a keresett útszakaszt kapjuk (8. táblázat, 9-13. ábra).

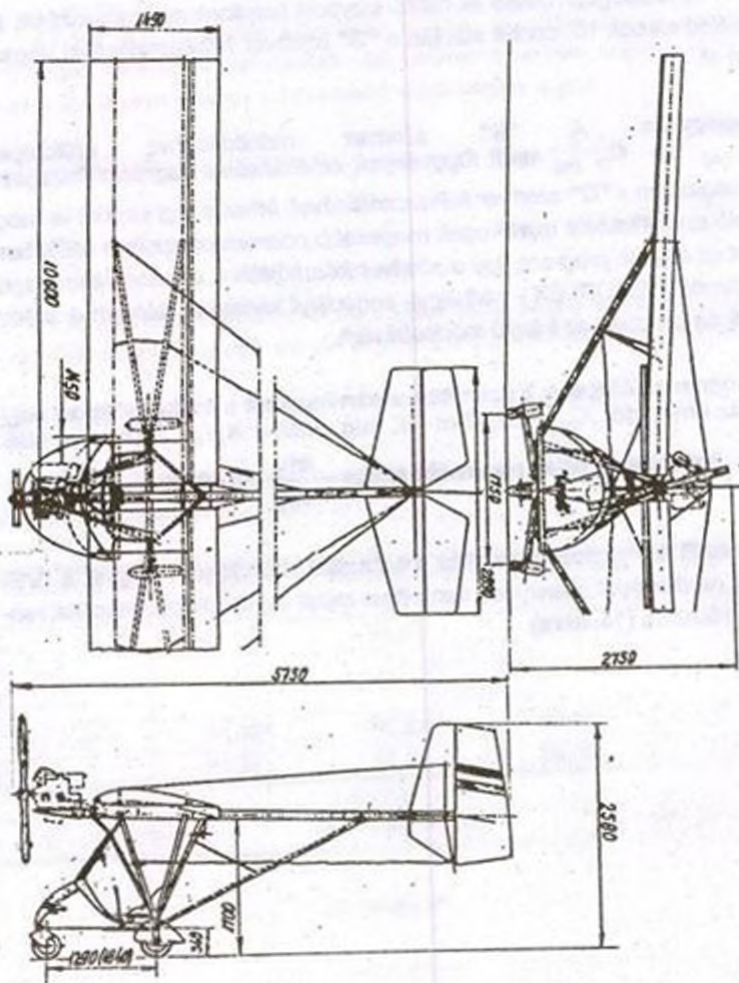
A repülőgép mellső és hátsó súlypont helyének meghatározását az elméleti alapok 10. pontja alapján a "B" szoftver felhasználásával végeztém el.

Megjegyzés: A "B" szoftver működéséhez szükséges $C_x(\alpha)$ és $C_m(\alpha)$ input függvények előállításához regresszióvizsgálatot végeztem a "C" szoftver felhasználásával. Mivel a regressziót -a megfelelő szignifikancia miatt- csak magasabb polinommal tudtam előállítani, mint az eredeti program, így a szoftver készítőjétől -Labodics János repülőmérnök [AEROPLEX - Ferihegy]- engedélyt kértem és kaptam a számítógépes program ez irányú módosítására.

A programot lefuttatva a számítás eredményeként a mellső súlypont helyzet az orrponttól $X_{spm} = 0,83 \text{ m}$ -re, míg a hátsó $X_{spn} = 1,33 \text{ m}$ -re talál-

ható. A statikai stabilitás maximális értéke $-\frac{\partial m_x}{\partial C_y} = 0,19459$ -re adódott.

Végezetül bemutatom a repülés mechanikai számításom tárgyát a "VERÉB" repülőgépet, amelynek sematikus rajzát az építők bocsájtották rendelkezésemre (14. ábra).



14. ábra

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] **Rácz Elemér:** A repülés mechanikája
TK. Budapest. 1953.
- [2] **Dr. Rácz Elemér:** Repülőgépek
TK. Budapest. 1978.
- [3] **Rácz Elemér:** Repülőgéptervezés
TK. Budapest. 1955.
- [4] **Rudnai Guido:** Repülőgépek gyártása és javítása
TK. Budapest. 1954.
- [5] **Dr. Steiger István:** Repülőgépek és hajók
TK. Budapest. 1984.
- [6] **Végh Pál:** Ultrakönnyű repülőgépek aerodinamikai
elemzése
Diplomaterv, BME. 1986.
- [7] **Labodics János:** Ultrakönnyű repülőgép számítógéppel
támogatott repülésmechanikai és aero-
dinamikai tervezése
Diplomaterv, BME. 1992.
- [8] **Dr. Gausz Tamás:** A felhajtóerő és indukált ellenállás
Kézirat, BME. 1990.
- [9] **Dr. Druber J. - Dr. Blahó M.:**
Folyadékok mechanikája
TK. Budapest, 1971.

- [10] **R. D. Campbell - I. Jones:**
The microlight flying manual
Aviation Training Publications
Granada 1982.
- [11] **Ann Welch:**
The complete Microlight Guide EP
Publishing Limited, Wakefield 1983.
- [12] **Nyéki L. - Nagy T.:**
Turbo Basic
LSI Oktatóközpont, 1991.
- [13] **Dr. Szabó L.:**
"VERÉB" felsőszárműves motoros
könnyűrepülőgép - néhány - repülés
mechanikai paramétereinek elemzése
Szakmérnöki diplomaterv, BME. 1994.
- [14] **Ferenczy L. - Gerő J.:**
QUATTRO
Számalk, Budapest, 1972.
- [15] **Bálint Á. - Tátral F.:**
Gyakorlati statisztikai számítások
Novotrade, Budapest. 1989.
- [16] **BME**
Műszaki hő- és áramlástan I/1, II.
TK., Budapest, 1988.

Horváth Dezső

mk. főhadnagy, repülést gyakorló állomásparancsnok
Kecskemét, 59. Szentgyörgyi Dezső Harcászati Repülőezred

**A REPÜLŐGÉP TÉRBELI PÁLYÁJÁNAK SZÁMÍTÁSA A
FEDÉLZETI ADATRÖGZÍTŐK ADATAI ALAPJÁN:
A VETCSINKIN-FÉLE GRAFIKUS MÓDSZER**

A cikk a repülőgép térbeli pálya számításának különféle módszereit ismerteti. Részletesen foglalkozik a Vetcsinkin-féle grafikus módszerrel. Tárgyalja a pálya hajlásszög és bedöntési szög közvetett úton történő meghatározását.

Bevezetés

A légi járműveken széles körben alkalmaznak olyan fedélzeti berendezéseket, amelyek rögzítik a repülési paramétereket. A fedélzeti adatrögzítők alkalmazásával lehetőség nyílt a mozgás térbeli pályájának rekonstruálására.

**1. A térbeli pálya felépítése. A Vetcsinkin-féle
grafikus módszer.**

A térbeli pálya felépítését több módszer szerint lehet elvégezni. A most ismertetésre kerülő módszer az egyik ajánlott grafikus integrálás, amely szerint az integrál nem más mint az integrálandó függvény alatti terület.

A módszer lényege: először meg kell rajzolni a pálya vízszintes vetületét az időjelekkel, azután a megfelelő pontokra rá kell mérni a repülési magasságot.

¹V. P. Vetcsinkin (1888-1950). A repülés dinamikájának fejlődésében nagy érdemeket szerzett. N. E. Zsukovszkijjal közösen lefektették a repülőgépek repülésének alapkérdéseit.

N. E. Жуковский: Динамика полетов (1927).

В. П. Ветчинкин: Динамика самолёта (1933).

A $H = H(t)$ függvényt a fedélzeti adatrögzítő berendezések közvetlenül regisztrálják. Ebből kifolyólag fő feladat a pálya vízszintes vetületének felépítése. A pálya vízszintes vetületét célszerű grafikus módszerrel felépíteni.

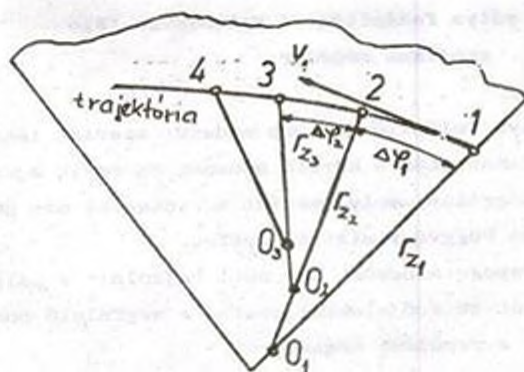
A Vetcsinkin-féle grafikus módszer. [1, 5]

A síkbeli görbevonaltú pályák függőleges kitérítési síkban vagy a változó görbületesi sugarú vízszintes vetületben történő felépítése céljából alkalmazható.

A módszer lényege az, hogy a pálya állandó sugarú körív szakaszokból tevődik össze a következő kapcsolódó szögekkel:

$$\delta\varphi = - \frac{c}{v \cos\theta} n_y \sin\gamma \delta t \quad (1)$$

Az 1.sz. ábrából látható, hogy a pálya kezdeti szakasza



O_1 szakasza r_{x_1}

sugárral épül az O_1 középpontból.

A pálya következő 12, 23, stb.

szakaszai r_{x_2} , r_{x_3} , sugarak-

kal épül az O_2 , $O_3 \dots$ középpontokból.

1. sz. ábra

A pálya görbületesének sugarait a következő képletek alapján kell meghatározni.

a./ A gyorsulás vetületei a koordináta tengelyekre:

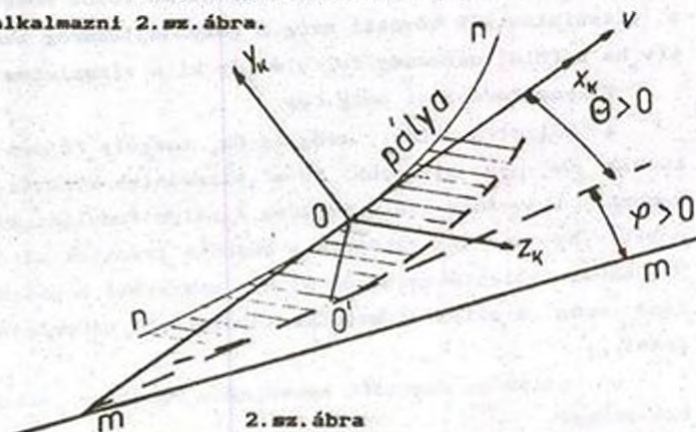
$$j_y = v \frac{d\theta}{dt} \quad (2)$$

$$J_y = \frac{v^2}{r_y} \quad (3)$$

a (2) és (3) képletből kapjuk, hogy

$$r_y = \frac{v}{\frac{d\theta}{dt}} \quad (4)$$

A légi jármű harci manőverezése során magába foglalja a síkbeli és a térbeli pályákon történő mozgást. A feladat megoldásához a pályához kapcsolt koordináta rendszert célszerű alkalmazni 2.sz. ábra.



2.sz. ábra

A pályához kapcsolt koordináta rendszer mozgó, 0 kezdőpontja a légi járművön helyezkedik el (általában a tömegközéppontban). A pályához kapcsolt koordináta rendszer Ox_k tengelye a légi jármű földi sebességének (a Földhöz viszonyított sebességének) irányába mutat. Ez szélcsendben megegyezik a légi sebességgel (a légi jármű levegőhöz viszonyított sebességével). Az Oy_k tengely az Ox_k tengelyen (a

sebességen) áthaladó függőleges síkban fekszik és általában felfelé irányul a Földhöz viszonyítva. Ebből következik, hogy az Ox_k tengely mindig vízszintes lesz. A pályához kapcsolt rendszer tengelyeinek iránya nincs kapcsolatban a repülőgép helyzetével. Ezek a tengelyek mintegy stabilizálva vannak a térben: az Oy_k tengely pedig a vízszintes síkban.

A földi sebesség irányát, és így a rendszer pályához kapcsolt Ox_k tengelyének irányát két szög jellemzi: a pályahajlásszög (θ) és a pályaeelfordulási szög (φ).

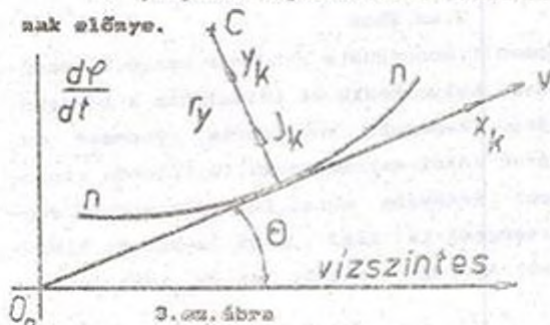
Pályahajlásszög (θ).

A pályahajlásszög [2.3] a légi jármű földi sebessége és a vízszintes sík közötti szög. A pályahajlásszög akkor pozitív, ha a földi sebesség felfelé tér ki a vízszintes síktól.

Pályaeelfordulási szög (φ).

A pályaeelfordulási szög az Ox_k tengely Földre vett vetülete és egy bizonyos "n-m" vízszintes közötti szög, ami kezdeti irányának van elfogadva. A pályaeelfordulási szög akkor pozitív, ha az Ox_k vetülete a kezdeti iránytól az óramutató járásával ellentétesen tér el. Más szavakkal, a pályaeelfordulási szög a pálya vízszintes vetületének elfordulását jel-
leszi.

A pályához kapcsolt koordináta rendszer alkalmazásának előnye.

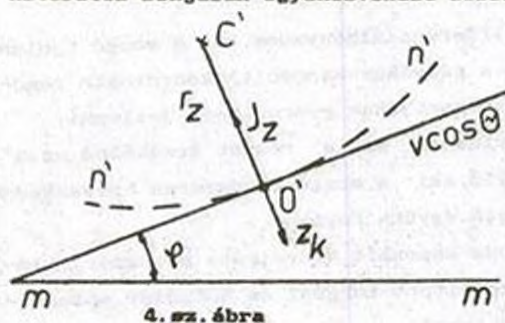


A 3. sz. ábrán a pálya képe a kitérítés síkjában látható.

A földet elvágó síkhoz hozzávesszük a pályán keresztüli egy függőleges

hengeres felületet. Ezután a hengeres felülettel együtt a benne lévő "n-n" pályával egyenesítsük ki a síkban. A pályához kapcsolt rendszer Oy_x tengelye a pálya normálisában helyezkedik el és irányába mutat a pálya görbületének (kitérítés síkjában mért) r_y sugara is.

Könnnyen belátható, hogy a mozgás gyorsulásának Oy_1 tengely szerinti összetevője (J_y) jellemezni fogja a pálya görbületét a függőleges síkban (pl. ha $J_y=0$, akkor a pálya a kitérítés síkjában egyenesvonalú lesz).



4. sz. ábra

A 4. sz. ábrán a pálya vízszintes vetületének képe látható. A pálya vízszintes vetülete görbületének r_z sugara az Ox_k tengely meghosszabításában fekszik.

Így a J_z normális gyorsulás jellemzi a pálya vízszintes vetületének görbületét (pl. ha $J_z=0$, akkor a pálya vízszintes vetülete egyenesvonalú lesz. Ha a normális gyorsulás mindkét összetevője nulla $J_y=0$ és $J_z=0$, akkor a pálya egyenesvonalú a térben).

Következtetés.

A pályához kapcsolt koordináta rendszer tengelyei szerinti gyorsulások meghatározott mozgástulajdonságokat jellemeznek:

- J_x gyorsulás jellemzi a sebesség abszolút értékének változását;
- J_y gyorsulás jellemzi a pálya görbületét a függőleges kitérítési síkban;

- J_z gyorsulás jellemzi a pálya vízszintes vetületének görbületét.

A gyorsulás, pályához kapcsolt koordináta rendszer tengelyeire vett, vetületeinek matematikai kifejezései.

A mozgás gyorsulására vonatkozó vektoros kifejezés:

$$\vec{J} = \frac{d\vec{v}}{dt} + \vec{\omega}_k \times \vec{v} \quad (5)$$

ahol: $\frac{d\vec{v}}{dt}$ - helyi differenciálhányados, ami a mozgó (jelen esetben a pályához kapcsolt), koordináta rendszer kezdőpontjának gyorsulását jellemzi;

A gyorsulásnak ezt a részét érzékelné az a megfigyelő, aki a mozgó rendszeren helyezkedne el, és vele együtt forogna.

$\vec{\omega}_k, \vec{v}_k$ - a pályához kapcsolt koordináta rendszer Földhöz viszonyított forgási és haladási sebességének vektorai.

A gyorsulás, bármely mozgó koordináta rendszer tengelyeire vett vetületeinek általános felírási formája:

$$J_z = \frac{dv_x}{dt} + \omega_{k_y} v_z - \omega_{k_z} v_y \quad (6)$$

$$J_y = \frac{dv_y}{dt} + \omega_{k_x} v_x - \omega_{k_x} v_z \quad (7)$$

$$J_x = \frac{dv_x}{dt} + \omega_{k_z} v_y - \omega_{k_y} v_z \quad (8)$$

Mivel a pályához kapcsolt koordináta rendszer egy sebességi

koordináta rendszer ezért:

$$v_x = 0; \quad v_y = 0; \quad v_z = 0; \quad \frac{dv_y}{dt} = 0; \quad \frac{dv_x}{dt} = 0;$$

$$a_{kz} = \frac{d\theta}{dt} - \text{mivel a } \frac{d\theta}{dt} \text{ szögsebesség vektora egybe-}$$

esik az Oz tengely irányával;

$$a_{ky} = \frac{d\phi}{dt} \cos \theta - \text{a } \frac{d\phi}{dt} \text{ szögsebesség vektora függőle-}$$

ges irányú, vagyis eltér az Oy_k tengelytől θ szögre (3.sz. ábra).

Tengelyek szerinti gyorsulások:

$$J_x = \frac{dv}{dt} \quad (9)$$

$$J_y = v \frac{d\theta}{dt} \quad (10)$$

$$J_z = -v \cos \theta \frac{d\phi}{dt} \quad (11)$$

A normális gyorsulás a v sebességen és ζ pályagörcbületi sugaron keresztül kifejezve:

$$J_n = \frac{v^2}{r_y} \quad (12)$$

Végezetül a gyorsulás matematikai vetületének kifejezései:

$$J_y = \frac{v^2}{r_y} \quad (13)$$

$$J_z = \frac{v^2 \cos^2 \theta}{r_z} \quad (14)$$

b./ A (11) és (14) kifejezésekből kapjuk, hogy

$$r_z = - \frac{v \cos \theta}{\frac{d\varphi}{dt}} \quad (15)$$

c./ A pályagörbület sugaraira vonatkozó képletek meghatározása, az n_y túlterhelés felhasználásával.

A túlterhelések felhasználásával a tömegközéppont dinamikájának egyenletei:

$$\frac{dv}{dt} = g (n_x - \sin \theta) \quad (16)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{g}{v} (n_y \cos \gamma - \cos \theta) \quad (17)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = - \frac{g}{v \cos \theta} n_y \sin \gamma \quad (18)$$

A (17) és (18) egyenletből kapjuk:

$$r_y = \frac{v^2}{g (n_y \cos \gamma - \cos \theta)} \quad (19)$$

$$r_z = \frac{v^2 \cos^2 \theta}{g n_y \sin \gamma} \quad (20)$$

A (17) egyenlet a pálya elgörbülését jellemzi a kité-

rités síkjában (ha a jobboldal nullával egyenlő, akkor a pálya a kitérítés síkjában egyenesvonalú lesz). A (18) egyenlet a pálya vízszintes vetületének elgörbülését jellemzi (ha γ bedöntési szög és a $\sin \gamma$ nullával egyenlő, akkor $d\varphi/dt = 0$ és így a pálya be van zárva a függőleges síkba).

Összegezve.

- A mozgás tetszőleges térbeli pályája kettős görbülettel rendelkezhet. A pálya szerinti koordináta rendszer alkalmazásával a térbeli pálya görbületét a sugaraival lehet jelezni egyrészt a függőleges kitérítési síkban (r_y), másrészt pedig a pálya vízszintes vetületén (r_x).

- Kapcsolat a pálya függőleges és a vízszintes síkban lévő görbületei között. A (20) egyenletet osszuk el a (19) egyenlettel:

$$\frac{r_x}{r_y} = \frac{(n_y \cos \gamma - \cos \theta) \cos^2 \theta}{n_y \sin \gamma} \quad (21)$$

A (21)-ből következik, hogy a pálya görbületi sugarainak viszonyát (megadott túlterhelés és ismert pályahajlásszög mellett) csak a bedöntési szög határozza meg és ez a viszony nem függ a repülési sebességtől. A bedöntési szög növelése csökkenti a görbületi sugarak r_x/r_y hányadosának értékét, vagyis növeli a pálya vízszintes vetületének görbületét.

- A grafikus módszer szerint lépésenként ki kell számítani a pálya görbületének sugarait:

$$r_x = \frac{v^2 \cos^2 \theta}{g n_y \sin \gamma} \quad (22)$$

valamint a pálya elfordulási szögeit a δt időintervallum alatt

$$\delta\varphi = - \frac{g}{v \cos \theta} n_y \sin \gamma \delta t \quad (23)$$

2. A pályahajlásszög (θ) és bedöntési szög (γ) meghatározása közvetett úton, számítási módszerrel.

A SzARPP típusú fedélzeti adatrögzítők az idő függvényében regisztrálják a repülési magasságon, a $v=v(t)$ sebéségen, valamint az $n_{x1} = n_x(t)$ és $n_{y1} = n_y(t)$ túlterheléseken kívül a hajtómű fordulatszámát és a stabilizátor kitérés szögét. A korszerűbb repülési paraméter tároló rendszerek még egy sor más paramétert is rögzítenek.

Ezért a szükséges paramétereket, a θ pályahajlásszöget és a γ bedöntési szöget, közvetett úton, számítási módszerrel kell meghatározni.

a.) A pályahajlásszög (θ) meghatározása.

A pályahajlásszög meghatározásához felhasználhatjuk a következő egyenleteket:

$$H = v \sin \theta \quad (24)$$

$$v = g (n_x - \sin \theta) \quad (25)$$

miután előzetesen meghatároztuk a SzARPP anyaga alapján a következő differenciálhányadosokat:

$$\frac{dH}{dt} \approx \frac{\delta H}{\delta t} \quad \text{és} \quad \frac{dv}{dt} = \frac{\delta v}{\delta t}$$

így a (24) egyenletből:

$$\theta = \arcsin \frac{\frac{\delta H}{dt}}{v} \quad (26)$$

a (25) egyenletnek megfelelően:

$$\theta = \arcsin \left(n_x - \frac{1}{g} \frac{\delta v}{\delta t} \right) \quad (27)$$

ahol: $n_x = n_{x_1} \cos \alpha - n_{y_1} \sin \alpha$.

Azt, hogy melyik képletet használjuk, attól függ, hogy mennyire pontos a H , a v és az n_x rögzítése a SZARPP fedélzeti adatrögzítőben.

A $\theta = \theta(t)$ függvény meghatározása után meg lehet állapítani a $d\theta/dt \approx \delta\theta/\delta t$ differenciálhányadosok értékét.

b.) A bedöntési szög (γ) meghatározása.

A következő lépésként, az alábbi egyenlet

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{g}{v} (n_y \cos \gamma - \cos \theta) \quad (28)$$

segítségével, a különböző időpillanatokra, kiszámítható a bedöntési szög értéke:

$$\gamma = \arcsin \frac{1}{r_y} \left(\frac{v}{g} \frac{d\theta}{dt} + \cos \theta \right) \quad (29)$$

ahol: $n_y = n_{y_1} \cos \alpha + n_{x_1} \sin \alpha \approx n_{y_1}$.

Ezek után meghatározzuk a θ és γ szögek értékeit, amelyek lehetővé teszik a következő egyenletek alkalmazását:

$$r_u = \frac{v^2 \cos^2 \theta}{g n_y \sin \gamma} \quad (30)$$

$$\varphi = - \frac{g}{v \cos \theta} n_y \sin \gamma \quad (31)$$

a térbeli pálya felépítésékor.

Szél esetén a pályát a Földhöz viszonyítva a széleltérés figyelembevételével kell kiszámolni.

A gyakorlatban más módszert is alkalmaznak a pálya számításához, amikor nem teljesek a kiinduló adatok.

A SzARPP által regisztrált $H(t)$ függvény lépcsőzetes, így a numerikus integrálása nehézségekbe ütközik. Ezért megadják a $\gamma(t)$ és $n_y(t)$ függvények feltételezett változását és fokozatos közelítéssel (a mozgásegyenletek sorozatos numerikus integrálása útján), olyan $\gamma(t)$ és $n_y(t)$ törvényszerűségeket választanak meg, amelyek biztosítják a legjobb egybeesést a rögzített repülési paraméterekkel.

Felhasznált irodalom

- [1] - A. M. Tarasenkov, B. G. Braha, B. T. Taranenko: Динамика полёта и боевого маневрирования летательных аппаратов ВВИА. ин. проф. Н. Е. Жуковского, Москва, 1984
- [2] - Динамика полёта: Под редакцией д-ра техн. наук, проф. А. М. Мхитряна "Машиностроение", Москва, 1971
- [3] - И. З. Остаславский, М. В. Сражева: Динамика полёта. Траектории летательных аппаратов "Машиностроение", Москва 1969
- [4] - А. С. Шаталов, Д. И. Топчев, В. С. Кондратьев: Летательные аппараты как объекты управления "Машиностроение" Москва, 1972
- [5] - А. М. Tarasenkov, B. G. Braha, B. T. Taranenko: Динамика полёта и боевого маневрирования летательных аппаратов Часть I. Траектории движения и лётные характеристики ВВИА. ин. проф. Н. Е. Жуковского, Москва, 1973