

Horváth Dezső
főiskolai docens

Repülő Szakág Tanszék, Műszertechnikai szakcsoportvezető

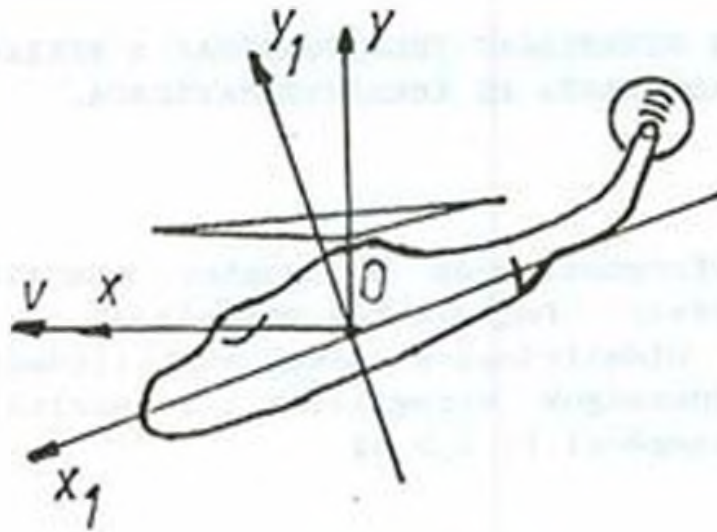
A HELIKOPTER DINAMIAIKAI TULAJDONSÁGAI. A HELIKOPTER
STABILITÁSA ÉS KORMÁNYOZHATÓSÁGA.

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

Bevezetés

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

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



1. ábra

A helikopterre ható erők.

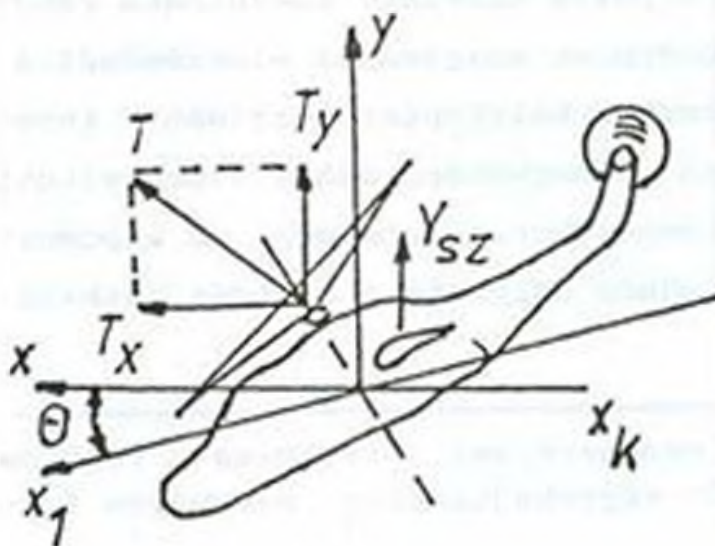
A helikopterre ható erők a 2. ábrán láthatók. A ható

erők [1,2,3,4]:

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

- a forgószárny teljes aerodinamikai ereje (T) -

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



2. ábra

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

hajtóerő);

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

A helikopter mozgásegyenletei.

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

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

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

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

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

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

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

Stabilitás.

Dinamikai stabilitás. [1,2,3,4,5]

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

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

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

Statikus stabilitás. [1, 2, 3, 4, 5]

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

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

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

Kormányozhatóság. [1, 2, 3, 4]

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

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

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

A helikopter útirányú kormányzása a lábormánnyal biztosítható.

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

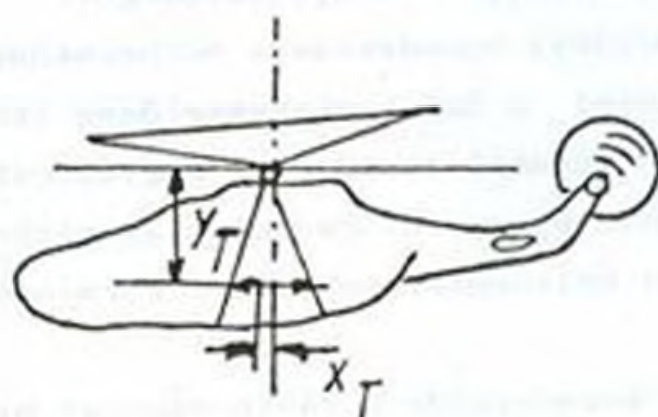
1. Egyforgószárnyas helikopter statikus stabilitása.

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

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

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

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



3. ábra

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

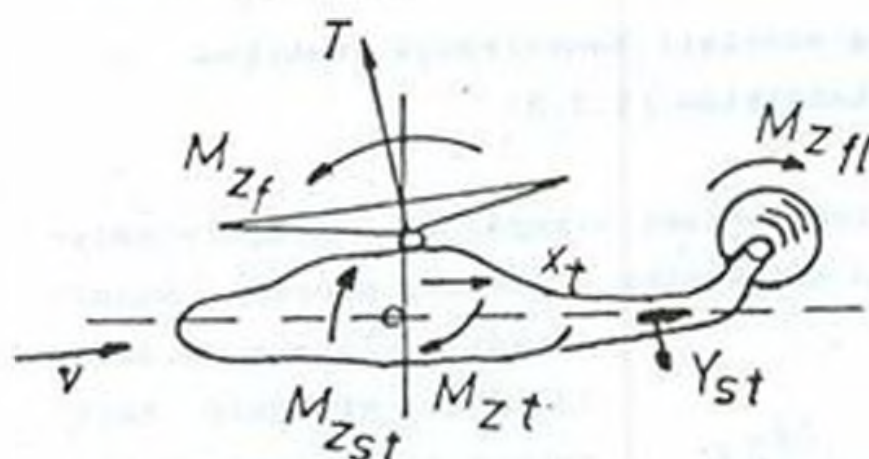
Mellső határ súlypont-helyzetet a hosszirányú vezérlés elégséges tartaléka határozza meg a hátsó ütközőig függés mellett és maximálisan megengedett sebességű hátszél esetén függőleges üzemmódon.

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

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

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

A helikopter hosszirányú kiegyensúlyozásának vázlata a 4. ábrán látható.



4. ábra

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

A vízszintes repülés-

ben az eredő nyomatékok:

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

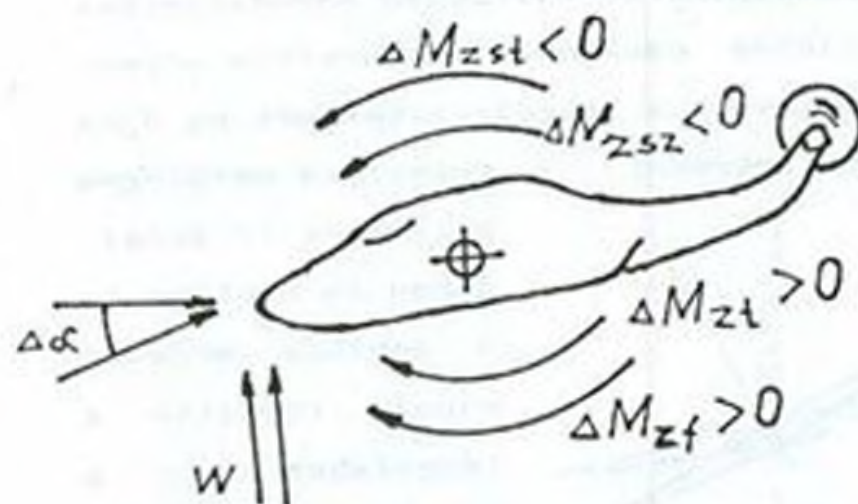
ahol: M_{zf} - a forgószárny nyomatéka;

M_{zt} - a törzs nyomatéka;

M_{zfl} - a faroklégcsavar nyomatéka;

M_{zst} - a stabilizátor nyomatéka.

A kiegészítő nyomatékok iránya az állásszög növekedésekor az 5. ábrán



5. ábra

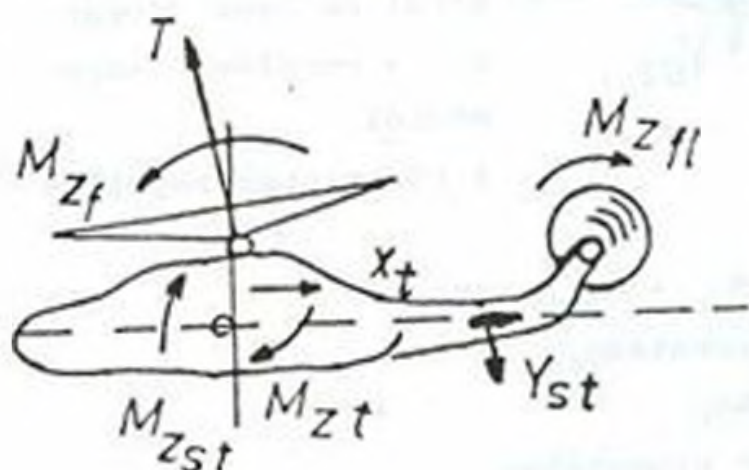
látható. Az állásszög növekedésekor a forgószárny aerodinamikai ereje T , hátrafelé dől és kiegészítő emelkedési nyomatékokat ΔM_{zf} ad, ami elősegíti az állásszög további

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

A szárny és a stabilizátor kiegyesztő összegzett nyomatéka negatív.

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

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



6. ábra

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

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



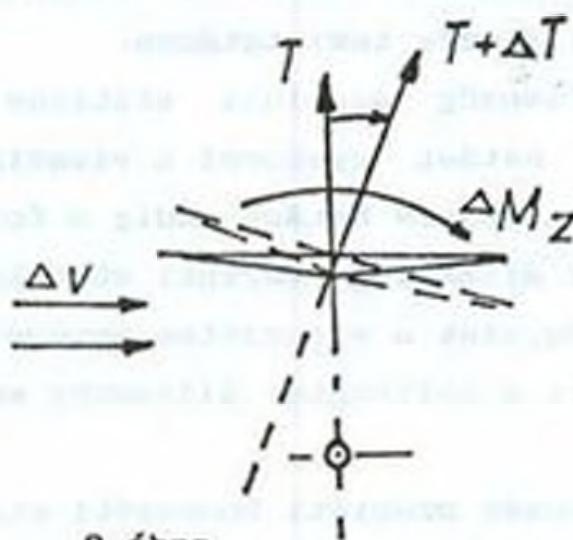
7. ábra

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

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

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

Vizsgáljuk meg a forgószárny viselkedését a repülési sebesség (vízszintes sebesség összetevő) változásakor. Tétel-



8. ábra

lezzük fel, hogy a sebesség Δv értékkel megnövekedett (8. ábra). A sebesség növekedése az előrehaladó lapáton a körüláramlási sebesség megnövekedéséhez vezet és megfordítva, a

sebesség csökkenéséhez a hátrahaladón.

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

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

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

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

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

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

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

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

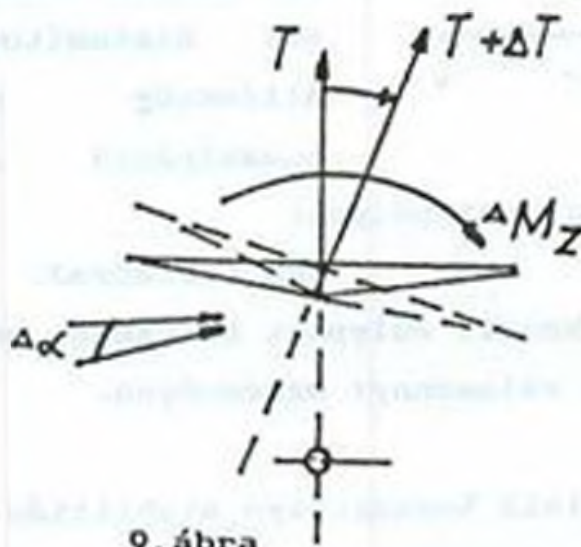
Oldalirányú viszonylatban a helikopter dinamikailag instabil.

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

Az állásszög szerinti statikus stabilitás feltétele

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

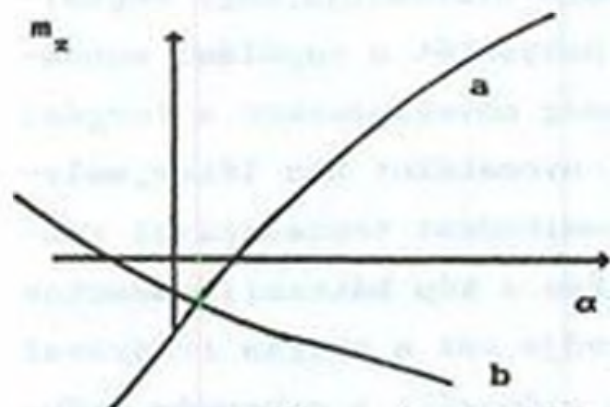
Ha van haladási sebesség, akkor az állásszög változása a forgószárny hátrabilenéséhez vezet, a T erő egyidejű növekedése mellett (9. ábra),



9. ábra

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

A helikopter törzse szintén instabil az állásszög szerint.



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

10. ábra

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

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

[1,2,3,4]

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

határ súlypont helyzet mellett a harmadik generációs heli-

koptereknel a megnövelt felületű stabilizátor és szárny alkalmazásával biztosított az állásszög szerinti

hosszirányú stabilitás (11. ábra).

hosszirányú stabilitás (11. ábra).

11. ábra

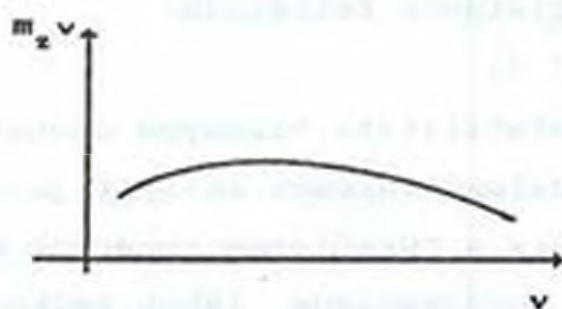
Közepes és semlegeshez közeli súlypont helyzetek mellett a helikopter semleges marad valamennyi sebességen.

2.4. A sebesség szerinti hosszirányú stabilitás.

[1,2,3]

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

vetkező:



12. ábra

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

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

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

3.A helikopter oldalirányú statikus stabilitása.

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

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

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

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

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

faroklégcsavar nyomatékának hatása következtében.

Az útirányú stabilitás meglétének feltétele:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

A hosszirányú megzavart mozgás közelítő egyenletrendszere:

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

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

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

A helikopter megzavart mozgása aperiódikus és lengő mozgásból tevődik össze.

A hosszirányú mozgás periódusa:

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

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

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

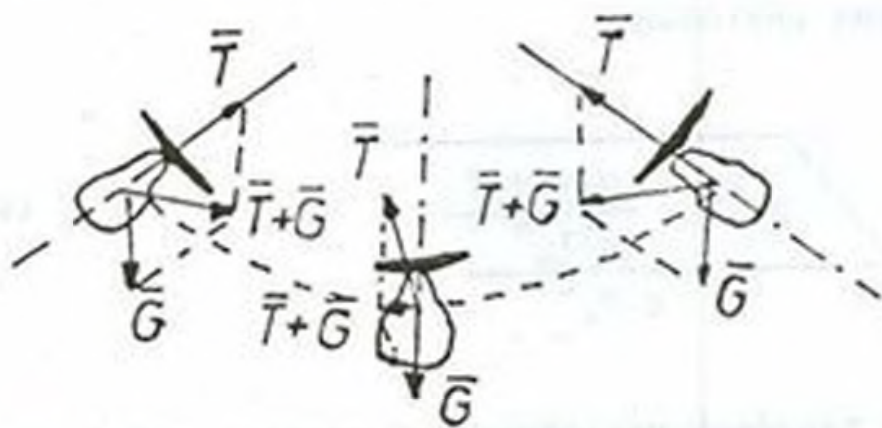
A helikopter hosszirányú lengőmozgása a 13. ábrán látható.



13. ábra

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

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



14. ábra

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

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

nulláig, azután a mozgás ellenkező irányba ismétlődik meg.

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

Felhasznált irodalom

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

HORVÁTH DEZSŐ

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

