

Torziós csillapító alkalmazása belebegés megszüntetésére

Application of a torsional absorber for flutter suppression

LELKES János, LENDVAI Bálint

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
Gépészmérnöki Kar, Áramlástan Tanszék,
Budapest 1111, Bertalan Lajos u. 4-6.,
e-mail: lelkes@ara.bme.hu, lendvai@ara.bme.hu

Abstract

A special torsional pendulum damper for aeroelastic wing model was investigated to eliminate the unwanted vibrations generated above the critical wind speed. By successfully selecting the appropriate damping parameters, the critical wind speed associated with the loss of stability was increased. The usability of the damper was shown with analytical model and numerical simulation as well.

Keywords: Pendulum absorber, aeroelasticity, computational fluid dynamics, Theodorsen model

Kivonat

Aeroelasztikus szárnymodell esetében alkalmazott speciális torziós inga csillapítót vizsgáltunk, amely a kritikus szélsébség fölött létrejövő nemkívánatos rezgések hivatott megszüntetni. A megfelelő csillapító paraméterek megválasztásával sikerült jelentősen megnövelnünk a stabilitásvesztéshez tartozó kritikus szélsébséget. Megmutattuk a csillapító használhatóságát analitikus modellel és numerikus szimulációval is.

Kulcsszavak: Inga csillapító, aeroelasztika, numerikus áramlástan szimuláció, Theodorsen-modell

1. BEVEZETÉS

Az belebegés (flutter) jelensége megnöveli a szárny dinamikus terhelését, csökkentheti az élettartamát és előre nem látható hatással lehet a repülő sárkányszerkezetére. Ezek miatt a gyakorlatban a belebegés tervezésén keresztül történő megelőzése a legkedvezőbb megoldás. Azonban számos esetben ez nem lehetséges, vagy a belebegés megjelenése olyan következményekkel járhat, hogy lengéscsillapító alkalmazása szükséges. Különböző aerodinamikai és mechanikai megoldások léteznek a belebegés okozta rezgés csillapítására. Ezeket aktív- és passzív csillapítóba sorolhatjuk. Aktív csillapítók bevált típusai például a periodikus gerjesztéssel csillapító [1], valamint a kilépő éli csűrőlap szabályozása [2]. Ezekkel szemben a helikopter rotorokon gyakran alkalmazott, passzív csillapító az általunk vizsgált torziós inga csillapító [3,4], illetve annak transzverzális változata [5,6].

A jelen tanulmányban bemutatott kutatás célja egy torziós inga csillapító vizsgálata analitikus módon és numerikus szimulációval. Ahogy minden csillapító, úgy a torziós inga csillapító is több szerkezeti paraméterrel írható le: tömeg, tehetetlenségi nyomaték, húrhossz menti pozíció, torziós rugómerevség és csillapítás. Ebben a paraméter térben kell vizsgálatot végeznünk, hogy megfelelően tudjuk megválasztani a csillapító paramétereit. Az optimális paraméterekkel alkalmazott csillapító jelentősen növeli a rendszer kritikus szélsébségét. Rosszul beállított paraméterekkel üzemelő csillapító pedig sok esetben csökkentheti a stabilitásvesztés határához tartozó kritikus szélsébséget.

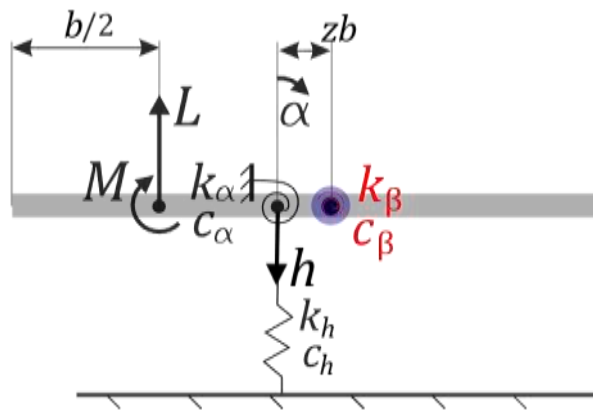
2. ANALITIKUS ÉS NUMERIKUS MODELLEK

A vizsgált torziós inga csillapítót egy aeroelasztikus, kétdimenziós, két szabadsági fokú (hajlítás, csavarás) síkprofilra alkalmaztuk, a rendszer szerkezeti ábrája az 1. ábrán látható. Az elasztikus tengely a húrhossz felénél helyezkedik el. Az inga pozícióját a 'z' paraméter határozza meg, a paramétertartomány csökkentésének érdekében az inga csillapítót a húrhossz közepénél helyeztük el. A szerkezeti paraméterek értékeit [7] alapján állítottuk be. A rendszer mozgásegyenletét az (1) egyenlet írja le.

$$\begin{bmatrix} m & S_\alpha & 0 \\ S_\alpha & I_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & I_\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{h} \\ \ddot{\alpha} \\ \ddot{\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_h & 0 & 0 \\ 0 & c_\alpha + c_\beta & -c_\beta \\ 0 & -c_\beta & c_\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{h} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_h & 0 & 0 \\ 0 & k_\alpha + k_\beta & -k_\beta \\ 0 & -k_\beta & k_\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h \\ \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L \\ M \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

ahol h a síklap transzverzális elmozdulása, α a síklap szögkitérése, β az inga szögkitérése, m a síklap és a csillapító együttes tömege, I_α az elasztikus tengely körüli tehetetlenségi nyomaték, I_β az inga csillapító tehetetlenségi nyomatéka, S_α az inga tömegéből az elasztikus tengelyre számolt elsőrendű nyomaték, c_h , c_α és c_β rendre a transzverzális, torziós és inga csillapítás, k_h , k_α és k_β a transzverzális, torziós és inga rugómerevség, L a felhajtóerő és M az elasztikus tengelyre ható nyomaték. A mozgásegyenlet jobb oldalán az aerodinamikai erő és nyomaték szerepel. Ezeket analitikus vagy numerikus szimulációk útján lehet meghatározni. Analitikus esetben megkülönböztethetünk lassú és gyors mozgást végző szárnyprofil. Amennyiben a szárny lassú mozgást végez, úgy megfelelő az aerodinamikai erőket leíró kvázi-statisztikus modell [8]. Gyors mozgás esetén az áramlási közeg okozta hozzáadott tömeg és pillanatnyi leúzó cirkulációt is figyelembe szükséges venni, ezt a Theodorsen modellel [9] lehet megtenni.

További megoldás lehet a kapcsolt aeroelasztikus-áramlástanai numerikus szimuláció az aerodinamikai erők leírására. A RANS modell minden időlépésben kiszámolja a szárnyra ható erőt és nyomatékot, ezekkel megoldja a test (1) egyenletben leírt mozgásegyenletét és frissíti a szárny helyzetét.

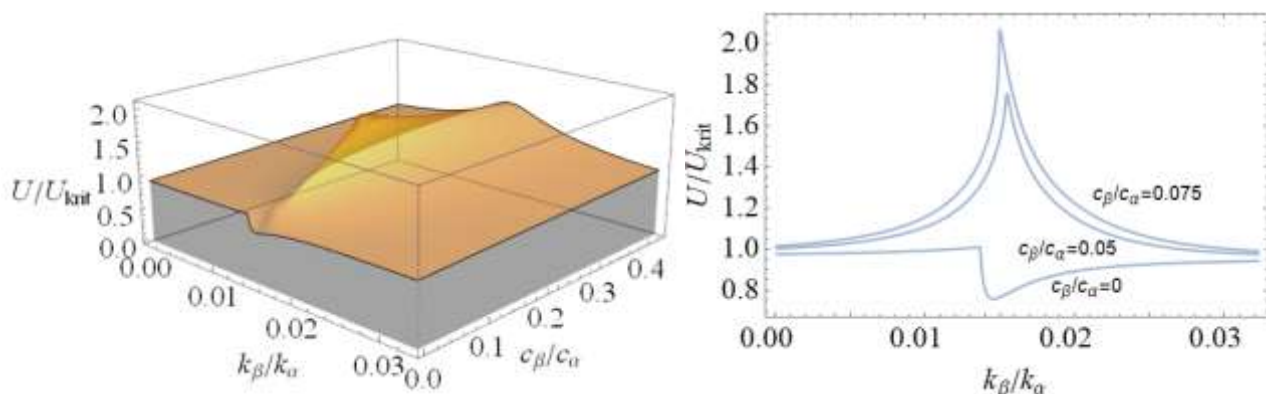


1. ábra. Rendszer szerkezeti ábrája

Mivel az inga csillapító növeli a repülő jármű tömegét, ezért a csillapító tömegét alacsonyon szükséges tartani. Emiatt az inga tömegét a szárny tömegének tízed részének, tehetetlenségi nyomatékát a szárny tehetetlenségi nyomatékának $10^{5/3}$ részének rögzítettem a dimenziós skálázás miatt.

3. EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

Kvázi-statisztikus aerodinamikai modellezéssel a stabilitáshatárhoz tartozó paraméterek analitikus módon kiszámolhatóak. Az inga csillapító nélküli kritikus szélességhez viszonyított stabilitáshatár látható az 2. ábrán.



2. ábra. Kvázi-statisztikus modell stabilitás határa, $z = 0$

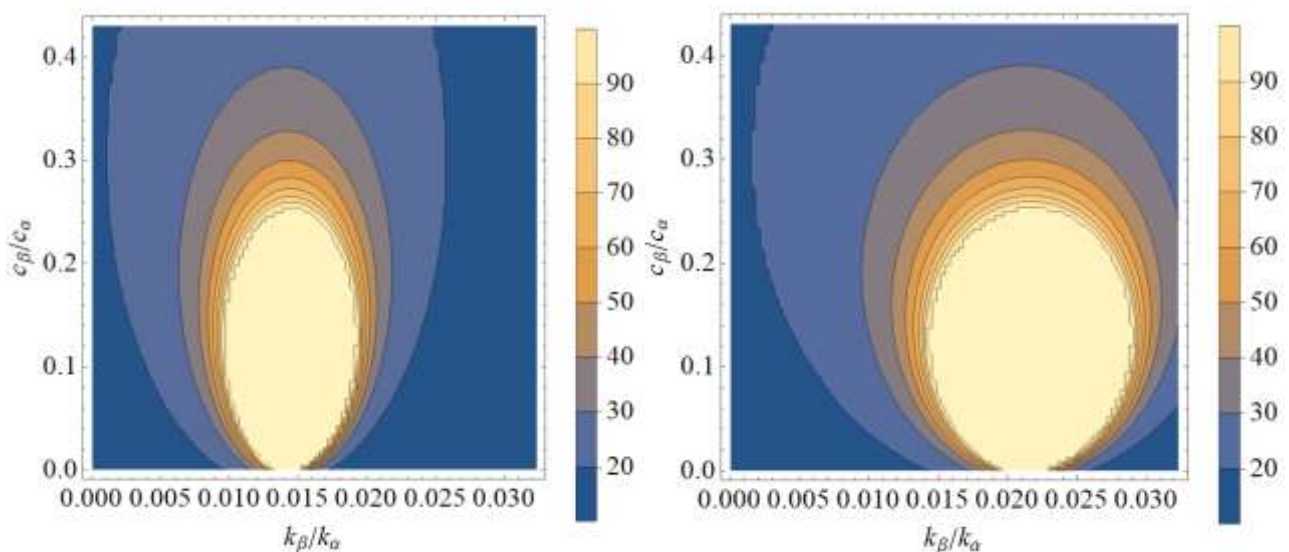
bal: háromdimenziós felület, jobb: kétdimenziós metszetek különböző csillapítási arányokra

Megfigyelhető a diagramon, hogy a felületen jelen van egy él, amin a globális stabilitásmaximum is elhelyezkedik. Továbbá nagyon jól megfigyelhető az ábrán, hogy a rugómerevség hányadosok arányának növelésével hirtelen lecsökken a dimenziótlán kritikus megfúvási sebesség is. Ezzel a csökkenéssel a rendszer instabilabb lett, mint a csillapító nélkül volt. Pontosan emiatt van szükség a tervezés során a csillapítók paramétereinek vizsgálatára. Ezzel szemben a megfelelően hangolt csillapító képes a kritikus megfúvási sebesség növelésére: a csillapító nélküli kritikus megfúvási sebesség kvázi statikus modell esetében $U_{krit,kv} = 8.02 [m/s]$, ezt az értéket a csillapító megfelelő hangolásával közel kétszeresére emeltük.

A stabilitásvizsgálat kvázi-statisz aerodinamikai modellel analitikusan elvégezhető. Ezzel szemben gyors mozgás esetén ez nem kifizetődő, jelentősen gyorsítható a stabilitásvizsgálat numerikus módszerek alkalmazásával, ezért a síklap stabilitását eseménykövetéssel vizsgáltuk 100 periódus hosszan. A stabilitástérkép színezése adja meg, hogy a rendszer hány periódusig marad biztosan stabil, ahol a stabilitás 10 foknál és 0.2 méternél kisebb amplitúdójú rezgésnek van definiálva. A legvilágosabb területen 100 periódus alatt sem veszít stabilitást a rendszer. A megfúvási sebesség növelésével csökken a csillapító által stabilizált terület. Továbbá érdemes megjegyezni, hogy a csillapítók megfelelő kalibrációjával gyors mozgást feltételezve 40% fölötti kritikus megfúvási sebesség emelkedés érhető el.

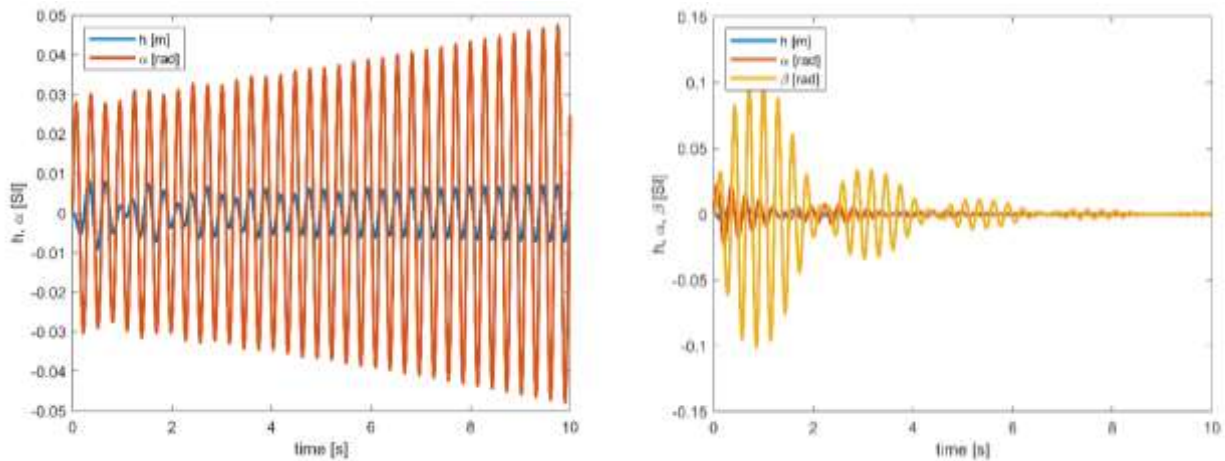
A numerikus áramlástan szimuláció jelentősen magasabb flutter frekvenciát számol (3.42 Hz), mint az analitikus Theodorsen modell (2.65 Hz). Az inga csillapító keskeny frekvenciasávon tud megfelelő hatáskkal energiát elnyelni, ezért az analitikus modellel optimalizált inga csillapító nem fog megfelelően működni a numerikus szimulációban.

A becsült frekvenciák közti különbségek miatt a numerikus szimulációba implementált csillapító behangolásához az analitikus modellben a rendszer merevségét úgy módosítottuk, hogy a numerikus szimulációval számolt flutter frekvencián alakuljon ki a rezgés. Az 3. ábrákon láthatóak a transziens Theodorsen modellel számolt stabilitástérképek az eredeti szerkezeti paraméterek esetén és a numerikus szimuláció alapján frekvenciakorrekció után. Észrevehető, hogy a stabil zóna eltolódott a magasabb rugómerevség-arány irányába, ami a magasabb sajátfrekvencia miatt indokolt.



3. ábra. Stabilitástérkép erősen transziens aerodinamikai modell, $z = 0, U = 18 m/s$
bal: Theodorsen modell, jobb: frekvenciakorrekció után

Az 4. ábrákon láthatóak a numerikus szimulációval számolt rendszer kitérés idősorai a csillapító alkalmazása nélküli és a csillapító alkalmazása esetében. A csillapító nélkül a rendszer egyértelműen instabil, ezzel szemben a megfelelően hangolt csillapító csökkenti a rezgésamplitúdókat, a rendszer stabil a kritikus szélesebbé fölé is.



4. ábra. Kitérés-idő diagramok, $U = 22 \text{ m/s} > U_{krit}$
 bal: csillapító nélkül, jobb: csillapítóval, $k_\beta/k_\alpha = 0.022$, $c_\beta/c_\alpha = 0.1$

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Tanulmányunkban analitikusan és numerikus kapcsolt aeroelasztikus-áramlástani szimulációban is sikeresen alkalmaztuk a torziós ingát egy két szabadságfokú, aeroelasztikus szárnyprofilon. Megmutattuk, hogy a megfelelően hangolt inga csillapító képes a flutter jelenséghez tartozó kritikus megfűvési sebesség növelésére, továbbá a fellépő rezgéseket hatékonyan csillapítja.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal K-18 129023 projektjének és az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-20-3 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült. A jelen publikációban megjelenő kutatások az ITM NKFIÁ által nyújtott TKP2020 IKA támogatásokból, az NKFIH által kibocsátott támogatói okirat alapján valósultak meg (projekt azonosítók: TKP2020 BME-IKA-VÍZ, TKP2020 BME-NKA).

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Peretz, O., Gat, A. D., Forced vibrations as a mechanism to suppress flutter—An aeroelastic Kapitza’s pendulum. *Journal of Fluids and Structures*, 85, 138–148., 2019, doi:10.1016/j.jfluidstructs.2018.12.008
- [2] De Marqui, C., Belo, E., Marques, F., Wind-Tunnel Model and a Controller for Flutter Suppression. 45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference., 2004, doi:10.2514/6.2004-1854
- [3] Hamouda, M.-N. H., Pierce, G. A., Helicopter Vibration Suppression Using Simple Pendulum Absorbers on the Rotor Blade. *Journal of the American Helicopter Society*, 29(3), 19–29., 1984, doi:10.4050/jahs.29.19
- [4] NAGASAKA, I., ISHIDA, Y., KOYAMA, T., FUJIMATSU, N., Vibration Suppression of a Helicopter Using Pendulum Absorbers: First Elastic Mode of a Blade. *Journal of System Design and Dynamics*, 4(6), 837–847., 2010, doi:10.1299/jsdd.4.837
- [5] Verstraelen E., Habib G., Kerschen G., Dimitriadis G., Experimental Passive Flutter Mitigation Using a Linear Tuned Vibrations Absorber. In: Kerschen G. (eds) *Nonlinear Dynamics, Volume 1. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*. Springer, Cham., 2016, doi:10.1007/978-3-319-29739-2_35
- [6] Lelkes, J., Kalmár-Nagy, T. Analysis of a piecewise linear aeroelastic system with and without tuned vibration absorber. *Nonlinear Dyn.* 2020, doi:10.1007/s11071-020-05725-0
- [7] Szabó, Zs., Stépán, G., Zelei, A., Experimental and analytical investigation of a fluttering bridge section model. 3. 2663-2670., 2014
- [8] Dowell, E. H., *A Modern Course in Aeroelasticity*, Fifth Revised and Enlarged Edition, Springer International Publishing, 2015, doi:10.1007/978-3-319-09453-3
- [9] T. Theodorsen. General theory of aerodynamic instability and the mechanism of flutter. Technical Report 496, National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), DC, USA, 1935.