Elmozdulásában korlátozott lengésfojtó periodikus pályái

A study on a special case of periodic orbits in the model of tuned mass damper with motion limiting constraints

IKLÓDI Zsolt[1], DOMBÓVÁRI Zoltán[1,2]

[1]Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki kar, Műszaki Mechanikai Tanszék, H-1111 Bp., Műegyetem rkp. 5., MM ép. Tel.: +36 1 463-1332, https://www.mm.bme.hu, zsolt.iklodi@mm.bme.hu
[2]MTA-BME Lendület Szerszámgéprezgések Kutatócsoport, dombovari@mm.bme.hu

Abstract

The application of tuned mass dampers can provide a simple and effective solution for avoiding the effect of resonance. However, in some applications, such as boring bars, the inner inertial mass and their free displacement is restricted by obvious constructional constraints. Consequently, given large enough vibration amplitudes the inertial mass will inevitably collide with the vibration attenuated structure causing unforeseen and serious deviation in system dynamics and damping performance.

Keywords: tuned mass damper, impact, piecewise smooth, periodic orbit, continuation

Kivonat

Passzív lengésfojtók alkalmazása egy egyszerű és hatásos módja a rezonancia hatásának csökkentésére. Bizonyos ipari alkalmazások esetén azonban, mint például furateszterga szerszámok által végzet forgácsoló eljárások esetén, a szerszámtestbe tervezett passzív lengésfojtó szabad elmozdulását konstrukciós korlátok akadályozzák. Kellően magas rezgésamplitúdók esetén így elkerülhetetlen a lengő tömeg felütközése a szerszámtestre, mely komoly és nehezen előre jelezhető változásokat eredményez a rendszer dinamikai viselkedésében és lengéscsillapítási teljesítményében.

Kulcsszavak: passzív lengésfojtó, ütközés, szakaszosan sima, periodikus pálya, pályakövetés

1. BEVEZETÉS

Rezonancia problémák megoldására az ipari gyakorlatban előszeretettel alkalmaznak passzív lengésfojtókat, mivel egyszerű, olcsó és hatásos lehetőséget biztosítanak a lengéscsillapítandó szerkezetek problémás módusainak elhangolására. Optimális hangolásukhoz analitikus képletek is rendelkezésünkre álnak, mint a legismertebb Den Hartog- [1] vagy a szerszámgépeknél használatos Sims-féle [2] formulák.

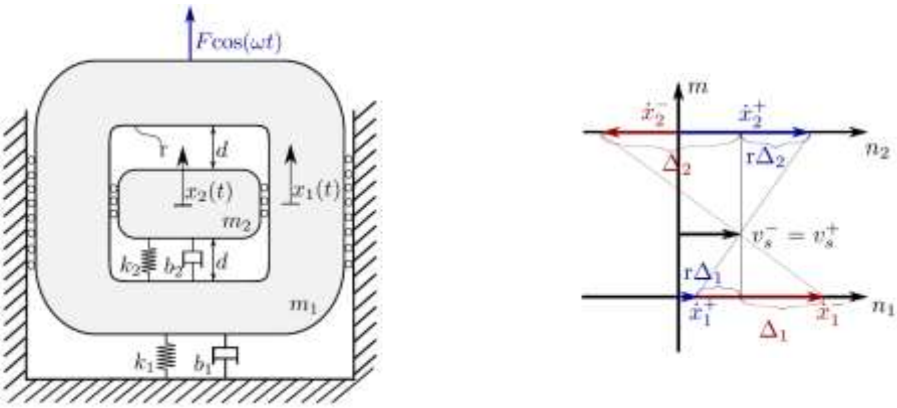
Bizonyos ipari alkalmazások során, mint például furateszterga szerszámok [3], a lengésfojtót alkotó lengő tömeg szabad elmozdulását elkerülhetetlen konstrukciós korlátok akadályozzák. Ezen geometria kényszerek hatására kellően nagy lengésamplitúdók mellett elkerülhetetlenné válik a lengésfojtó felütközése, amely drasztikusan megváltoztatja a lengésfojtó dinamikai viselkedését és lengéscsillapítási teljesítményét.

Az ütközések hatására a rendszer dinamikailag szakaszosan-simává válik, így vizsgálata speciális eszköztárat és különös gondot igényel. di Bernardo et al. [4] részletes áttekintést nyújt a szakaszosan-sima dinamikai rendszerek viselkedése és elemzési lehetőségei kapcsán, Shaw et al. [5-7] és Wagg et al. [8-9] pedig az ütközéses lengésfojtókhoz hasonló alacsony szabadságfokú ütközéses rendszerek dinamikai vizsgálatával foglalkozik.

Az irodalmi áttekintés alapján ütközéses mechanikai rendszerek dinamikáját célszerű hibrid-periodikus pályáikon keresztül elemezni. Kutatómunkánk során tehát egy 2 szabadságfokú, harmonikusan gerjesztett, ütközéses, lineáris oszcillátor modell viselkedését vizsgáltuk spektrál-kollokáción alapuló periodikus pálya követés segítségével. Ez alapján meghatároztuk az elmozdulásában korlátozott lengésfojtó pszeudo-átviteli függvényét, és ezen keresztül vizsgáltuk az egyes ütközési paraméterek hatását az eszköz lengéscsillapítási teljesítményére.

2. MECHANIKAI MODELL

Az alkalmazás szempontjából tetszőleges lengéscsillapítandó szerkezetet, az egyszerűség kedvéért, a problémás módusát jellemző egy szabadságfokú lengőrendszerrel helyettesítettük. Így az 1. ábra bal paneljén látható elrendezésre jutunk, ahol $|x_1 - x_2| = d$ esetén a jobb panelnek megfelelő ütközések zajlanak le, a Newton-féle ütközési törvény alapján.



1. ábra. *Ütközéses lengésfojtó mechanikai modellje (bal panel).*
Ütközések Maxwell-ábrája (jobb panel).

A rendszert jellemző szakaszosan-sima másodrendű differenciálegyenletet a problémás módus sajátfrekvenciája (ω_1) és az egyensúlyi légrés (d) segítségével dimenziótlanítottuk, a lengésfojtó paramétereit pedig a Sims-féle hangolási képletek alapján választottuk. A két tömeg aránya m_2/m_1 0.05, az ütközési tényező pedig 0.8 volt.

3. NUMERIKUS MÓDSZEREK

Hibrid periodikus pályák követéséhez a rendszert jellemző szakaszosan-sima mozgásegyenletet át kell alakítani egy azzal egyenértékű peremérték feladattá, amely garantálja, hogy a megoldásként kapott pályák az eredeti kezdeti érték feladat stacionárius megoldásai lesznek. Ehhez a periodikus pályákat folytonosan sima szakaszokra kell bontanunk, amelyek között az ütközési törvény, és az ütközési feltétel segítségével teremtünk majd kapcsolatot. Minden egyes ütközéshez tartoznia kell egy szegmens határnak, így a peremérték feladat megalkotásához ismernünk kell az adott periodikus pályában bekövetkező ütközések számát és helyét. Az $x_1 - x_2 = \pm d$ feltétel mellett ugyanis 2 különálló felület mentén következhetnek be ütközések, amelyeket meg kell különböztetni a peremérték feladat felírása során.

A periodikus pályák követéséhez tehát szükségünk van egy megfelelően pontos kiinduló becslésre. Ehhez időbeli szimulációkat futtattunk eseménydetektálás mellett a *julia DifferentialEquations.jl* csomagja segítségével. Az így talált periodikus pálya típusokhoz felírt peremérték feladatok elemei, a szegmensek diszkretizációja után, az 1.táblázatban láthatók, ahol n az ütközések száma, $m = 4$ a rendszer dimenziója, es minden szegmensen belül N darab interpolációs pontot használunk.

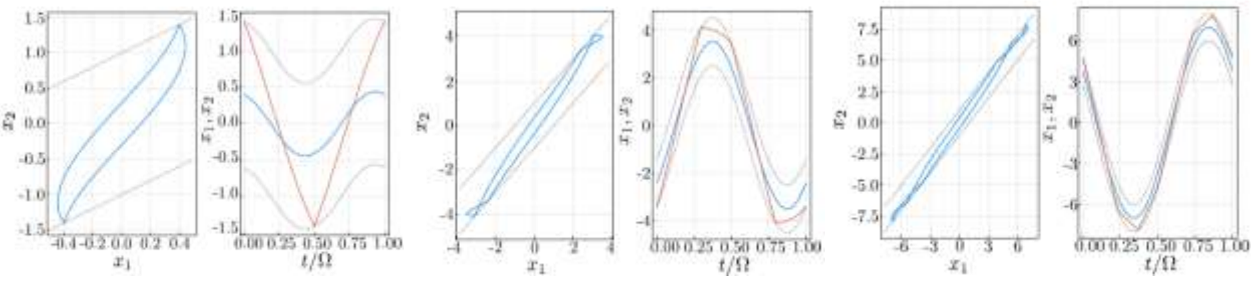
Hibrid periodikus pályák peremérték feladata — 1. táblázat

szabad paraméterek		**kényszerek**	
állapotváltozók	$n \times m \times N$	mozgásegyenlet	n × m × (N-1)
szegmensek hossza	n	ütközési törvény	n × m
gerjesztés fázisa	1	ütközési feltétel	n
		fázis feltétel	1

Az egyes folytonosan sima szegmenseket Chebyshev integrálási pontok szerint diszkretizáltuk, és a rendszer állapotváltozóit Chebyshev polinomok segítségével interpoláltuk. Ennek következtében a mozgásegyenenlet teljesülését egyszerűen ellenőrizhettük, adaptív hálózás mellet is, spektrális deriválás segítségével. A spektrális deriválási operátor ugyanis könnyedén skálázható az egyes szegmensek hosszával [10].

Az adaptív diszkretizáció miatt a peremérték feladat nemlineárissá válik, így csak iteratív módszerek segítségével lesz megoldható. Ezen felül ellenőriznünk kell a megoldásul kapott periodikus pályák valóságtartalmát is. Ha az ütközési feltétel a szegmenseken belül sérül, vagy valamelyik ütközés 0 relatív sebesség mellett következik be, a periodikus pálya fizikailag nem lesz lehetséges.

Ez az úgynevezett „grazing” bifurkáció, amely egy szakaszosan-sima rendszerekre jellemző jelenség. A periodikus pályák követését ekkor le kell állítani, majd egy új becslés alapján, egy új pályatípussal folytatni. Ezen események kezelése a folytonos esetszétválasztások miatt nagy gondot és türelmet igényel, valamint nagyon nehezen automatizálható. Kutatásunk során mindig időbeli szimulációk segítségével kerestünk új pályatípusokat, tehát kizárólag stabil, stacionárius állapotban is megjelenő megoldásokkal foglalkoztunk, mint például a 2. ábrán látható pályák. Ennek következtében csak egy szűk halmazát térképeztük fel a lehetséges periodikus pályák sokaságának.



2. ábra. *2,4 és 6 ütközéses hibrid, 1 gerjesztési periódus hosszú pályák.*

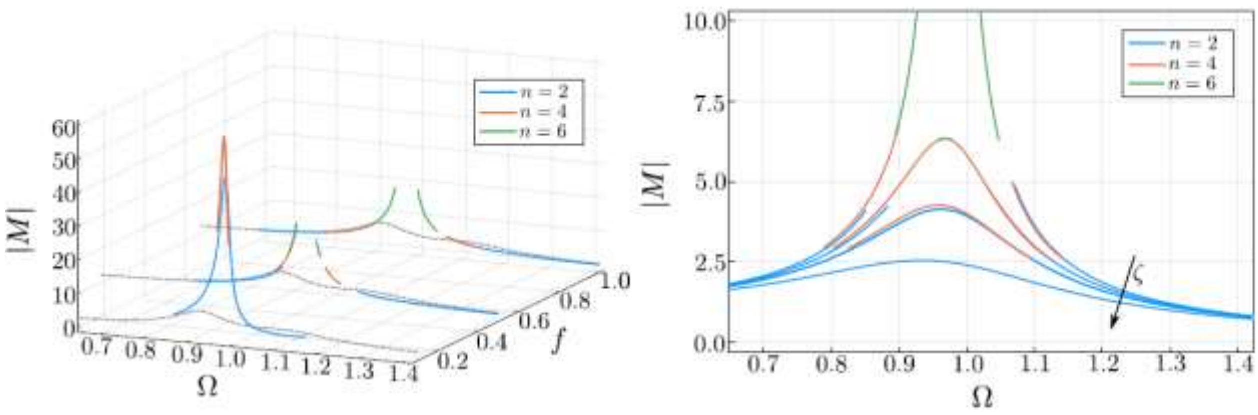
4. EREDMÉNYEK

A periodikus pálya követéseket a rendszer pszeudo-átviteli függvényének meghatározására használtuk fel, így azokat a gerjesztési frekvenciában (Ω) végeztük, az m_1 tömeg lengésamplitúdóját vizsgálva. Először a lengéscsillapítandó szerkezet sajátfrekvenciájától (ω_1) kellően távol két ütközéses, egy gerjesztési periódus hosszú pályákat azonosítottunk, majd ezeket követtük a rezonancia a csúcs felé. Ennek során a lengésamplitúdó növekedésével, „grazing” bifurkációkon keresztül, 4, 6 … végtelen ütközéses periodikus pályákra juthatunk, a rendszer szimmetriájából adódóan mindig páros számú ütközés mellett. A sokütközéses pályák feltérképezésének numerikus nehézségei miatt azonban vizsgálatainkat 2-6 ütközéses pályákra koncentráltuk.

Az így elvégzett periodikus pálya követések eredményei a 3. ábrán láthatók. Az egyes periodikus pálya típusokhoz tartozó görbék a rezonancia csúcsra szimmetrikusan helyezkednek el, és a lengésamplitúdó csökkentésével összekapcsolhatók. Habár a mechanikai modell képes számos bonyolultabb, hosszabb periódusú vagy kvázi periodikus dinamikai viselkedésre, a rendszert kvalitatív jól jellemzik az egy gerjesztési periódus hosszú pályái. Az ütközéses lengésfojtó pszeudo-átviteli függvényét vizsgálva jelentős romlás tapasztalható az eszköz lengéscsillapítási teljesítményében. Az eredeti ütközésmentes rendszer átviteli függvényét szaggatott fekete vonal jelöli a 2. ábra bal panelén. A lengésfojtó szabad elmozdulását korlátozva a mechanikai rendszer viselkedése az eredeti 1 szabadságfokú szerkezetéhez lesz hasonló.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A hibrid periodikus pálya követés segítségével meghatározott pszeudo-átviteli függvényeken jól látható, hogy a lengésfojtó elmozdulásának korlátozásával jelentősen romlik az eszköz lengéscsillapítási teljesítménye. A lengésfojtó ekkor nem tudja megfelelően elhangolni a lengéscsillapítandó szerkezet sajátfrekvenciáját, és ezt az ütközések során elnyelt energia sem képes ellensúlyozni. Összességében tehát lengésfojtók tervezésekor, amikor csak lehetséges, érdemes meggyőződni a lengő tömeg szabad elmozdulási lehetőségéről.



3. ábra. *Pszeudo-átviteli függvény gerjesztési amplitúdó függvényében (bal panel), és csillapítási tényező függvényében (jobb panel).*

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ez a kutatás a Magyarország Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatalának támogatásával készült az NKFI FK 124361 és az EUROSTARS FORTH E!12998 kutatási projektek keretében. A szerző részvételét az OGÉT 2021 konferencián az Emberi Erőforrás Támogatáskezelő NTP-HHTDK-20 pályázata támogatta.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

[1] Den Hartog, J.P.; *Mechanical Vibrations*; McGraw-Hill Book. Company, New York and London, 1934.

[2] Sims, N. D. *Vibration absorbers for chatter suppression: A new analytical tuning methodology*. Journal of Sound and Vibration, 2007. 301(3-5), 592–607. doi:10.1016/j.jsv.2006.10.020.

[3] *** *Sandvik silent tools®*. https://www.sandvik.coromant.com/hu-hu/products/silent_tools/pages/default.aspx (Utolsó letöltés: 2021. 02.11).

[4] M. di Bernardo C.J. Budd A.R. Champneys and P. Kowalczyk. *Piecewise-Smooth Dynamical Systems: Theory and Applications*, Control Systems IEEE, vol. 28, no. 5, pp. 141-143, 2008.

[5] Shaw, Steven Wayne, and P. J. Holmes. *A periodically forced piecewise linear oscillator.* Journal of Sound and Vibration, 1983. 90.1, 129-155.

[6] Shaw, S. W. *Forced vibrations of a beam with one-sided amplitude constraint: theory and experiment.* Journal of Sound and Vibration 1985. 99.2, 199-212.

[7] Shaw, Jinsiang, and Steven W. Shaw. *The onset of chaos in a two-degree-of-freedom impacting system*. 1989. 168-174.

[8] Wagg, D. J.; Bishop, S. R. *Chatter, sticking and chaotic impacting motion in a two-degree of freedom impact oscillator*. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2001, 11.01: 57-71.

[9] Wagg, D. J. *Periodic sticking motion in a two-degree-of-freedom impact oscillator.* International Journal of Non-Linear Mechanics, 2005, 40.8: 1076-1087.

[10] Trefethen, Lloyd N. Spectral methods in MATLAB. Vol. 10. Siam, 2000.