

Zárójelentés  
OTKA 76478 PD projekt  
Hidraulikus hajtások dinamikus jelenségeinek vizsgálata  
Dr. Hős Csaba

## 1. Bevezetés

Az alábbiakban összefoglaljuk a fenti OTKA PD projekt eredményeit. A projekt két részből állt:

- biztonsági nyomáshatároló szelepek öngerjesztett rezgéseinek vizsgálata és
- hidraulikus munkahengerek PID szabályzásának stabilitási tulajdonságai.

A két témakör közös jellemzője, hogy a matematikai modellek ún. nem-folytonos dinamikai rendszerek (a továbbiakban NFDR), melyek vizsgálatára a tradicionális módszerek nem alkalmasak. Az ilyen vizsgálatokat lehetővé tevő módszerek csupán egy évtizede férhetők hozzá rendszerezett formában, és napjainkban is folyamatosan fejlődnek. A projekt egyik fő célja ezen módszerek mérnöki gyakorlatban való alkalmazhatóságának vizsgálata mind elméleti szempontból, mind mérések segítségével.

Ebben a dokumentumban az egyes munkafázisokat a kutatási tervben tervezett időrendi összefoglalóval (Timetable of the project, 3. oldal) azonosan fogjuk számozni.

## 2. Szeleprezgés vizsgálatok

Minden olyan ipari létesítményben és berendezésben, ahol nyomástartó edényekkel vagy nyomás alatti közeggel találkozunk, kötelező ún. nyomáshatároló szelepeket beépíteni, melyek egy beállított (nyitó)nyomás felett a felesleges közeget lefúvatják rendszerből. Ezek a szerelvények a biztonságos működés szempontjából alapvető fontosságúak, ugyanakkor köztudottan hajlamosak az öngerjesztett rezgésekre. A kutatás során a legegyszerűbb, ún. direkt rugóterhelésű biztonsági szelepek stabilitási tulajdonságait vizsgáltuk azt remélve, hogy a jelenség minőségi megértése egyben a stabilabb szelepek tervezésének kulcsa is.

A kutatási tervvel összhangban mérőberendezést építettünk, melyen lehetőségünk volt részletes méréseket végezni és számos paraméter hatását megvizsgálni. A mérések eredményei:

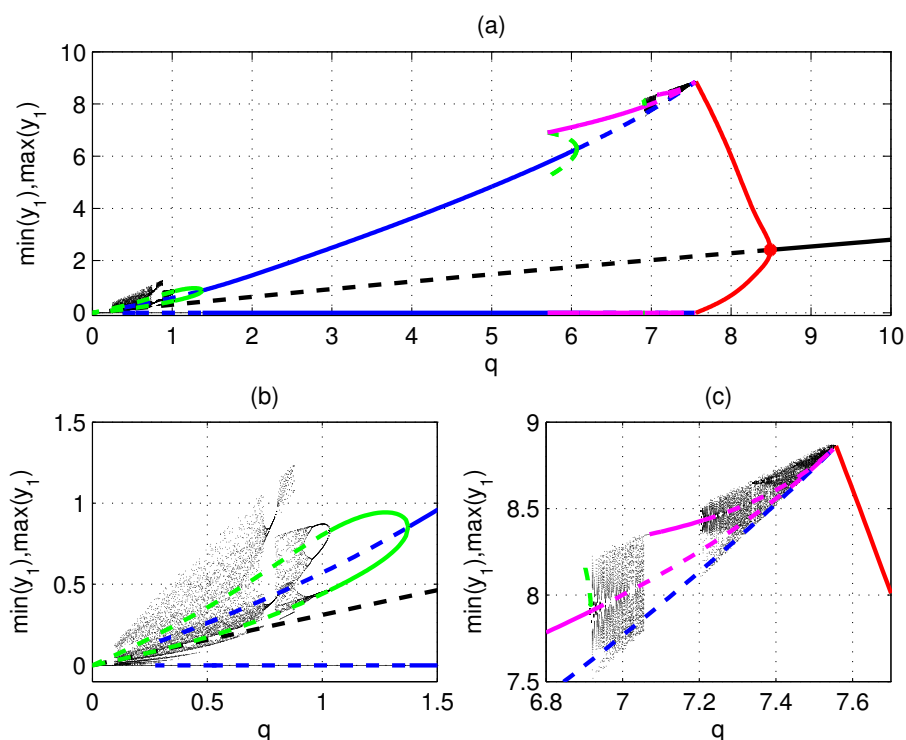
- Statikus jelleggörbéket határoztuk meg (nyomáskereső, térfogatáram, szelepnnyitás, erő). A szelep átfolyási tényezőjére olyan analitikus összefüggést találtunk, mely a mérési adatok *két* paramétere (szelepelmozdulás és nyomáskülönbség) helyett *egyetlen* paraméter segítségével írja le a görbét. A szelepre ható áramlástan eredetű erő analitikus levezetéssel kapott összefüggését a mérések alapján módosítottuk, így egyszerű, de pontos formulát kaptunk.
- A szelepen átfolyó térfogatáram lépésenkénti növelése mellett rezgés- és nyomásjeleket rögzítettünk. Feltérképeztük a stabil és instabil működési tartományokat.

A mérési eredményeket az [1-4] cikkekben publikáltuk, ezek közül a [2] cikket 2012 augusztus végéig adjuk le. Ezek az eredmények a kutatási tervben megadott 1.a és 1.c pontokat teljesítik.

A mérések alapján számos, különböző komplexitású matematikai modellt hoztunk létre (a kutatási terv 1.d pontja). Ezeket szisztematikusan összevetettük a mérésekkel és végül két modellt vizsgáltunk. Az első egy részletes modell, mely minden lényeges elemet tartalmaz (tartály-, szelep- és csődinamika) és a paraméterek széles tartományában valóságghű számításokat tesz lehetővé. A másik modell egy redukált megközelítés, mely a szelep stabilitásának meghatározására szolgál és csak a stabilitásvesztés közelében érvényes. Kihangsúlyozzuk, hogy itt nem linearizálásról van szó (mivel a redukált rendszer is erősen nemlineáris), hanem arról, hogy a csőbeli hullámjelenségeket csak korlátozottan (negyed állóhullámot feltételezve) vesszük figyelembe.

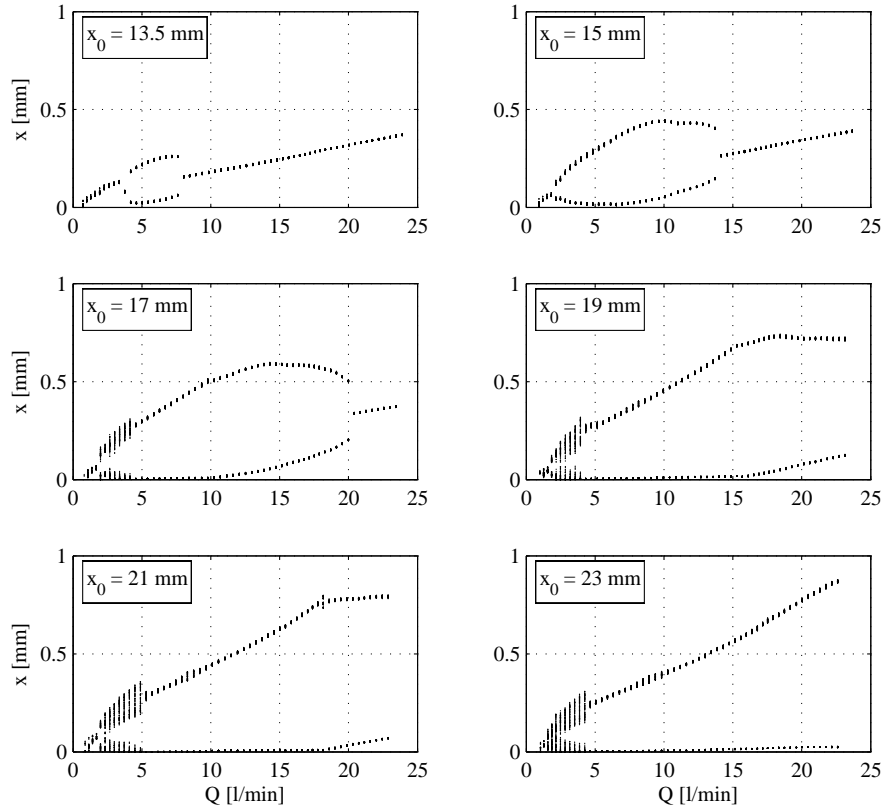
A redukált modell segítségével és a NFDR elméletének felhasználásával parametrikusan feltérképeztük a stabil és instabil működési tartományokat. Részletes leírást adtunk az egyes stabilitásvesztési mechanizmusokról (Hopf bifurkáció, grazing bifurkáció, ütközést tartalmazó periodikus pályák globális bifurkációi és ütközéses kaotikus pályák). Kapcsolódó publikációk: [5-8].

Egy ilyen számításra látható példa az 1. ábrán, ahol a függőleges tengelyen a szelepelmozdulás szélsőértékeit ábrázoltuk a rajta átfolyó térfogatáram függvényében (mindkét mennyiség dimenziótlan). Az ábrán jól látható, hogy a térfogatáramot csökkentve a stabil egyensúlyi helyzet először elveszíti a stabilitását és lengeni kezd, majd a lengés minimuma eléri a szeleplükét ( $y_1 = 0$ ) és ütközéses dinamika veszi kezdetét, amely még kisebb térfogatáramoknál kaotikussá válik. Minőségileg hasonló eredményeket kaptunk mérések során is, ld. 2. ábra.



1. ábra. Egy-paraméteres bifurkációs diagram: szelepelmozdulás a térfogatáram függvényében.

Numerikus áramlástani (CFD) vizsgálatokat is végeztünk a szelepen, elsősorban az áramlástani eredetű csillapítóerő meghatározására (kutatási terv 1.b és 1.e pontja). Ez a paraméter fontos szerepet



2. ábra. Egy-paraméteres bifurkációs diagram: mérési eredmények.

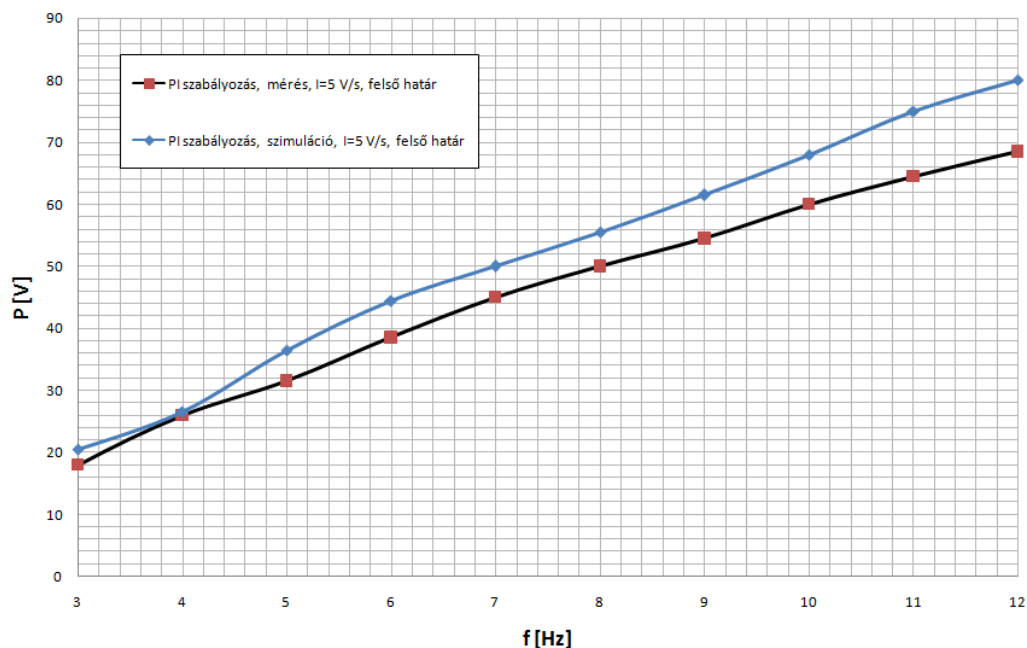
játszik a szelepdinamikában és a stabilitási tulajdonságokban, de nehézkes a kísérleti meghatározása. Kapcsolt (áramlástan-mechanika) CFD számítások segítségével meghatároztuk a csillapítóerőt és ki-mutattuk, hogy az általunk vizsgált paramétertartományban a csillapítóerő viszkozus jellegű, továbbá meghatároztuk a csillapítási tényezőt. Ezek a vizsgálatok jelentős előrelépést eredményeztek a modell paramétereinek hangolásában. Az eredményeket a [9] publikációban közöltük.

### 3. Hidraulikus munkahenger PID szabályozása

Hidraulikus munkahengereket elterjedten alkalmaznak az iparban nagy terhek gyors és pontos mozgatózásához. Bár számos fejlettebb szabályozási algoritmus is rendelkezésre áll, manapság az iparban fellelhető szabályozások elsősorban többsége a hagyományos PID algoritmussal működik. Ez a módszer azonban nem veszi figyelembe az hidraulikus rendszerek eredő nemlinearitásait; tapadó/csúszó súrlódás, szelep holtáv és nemlineáris karakterisztika, digitális mintavételezésből adódó késés. A kutatás során a szelep holtávanak és a digitális mintavételezés késésének hatását vizsgáltuk.

Az előző témához hasonlóan itt is intenzív kísérleti munkával kezdtük a vizsgálatokat (munkaterv 2a, 2c és 2d pontja). A PID szabályozás a digitális mintavételezés miatt valamilyen  $\Delta t$  időkéssel

reagál a rendszer viselkedésére és az arányos tag egy kritikus ( $P_{krit}$ ) értékét meghaladva öngerjesztett rezgések jelennek meg, azaz a munkahenger instabillá válik. A felújított berendezésen szisztematikus méréseket végeztünk és olyan stabilitási térképeket készítettünk, melyeken a szabályozás mintavételezési frekvencia függvényében az arányos tag kritikus értéke szerepel (ld. 3. ábra). Ezeket a mérési eredményeket a [10] publikációban közöljük hamarosan (2012 augusztus végéig).

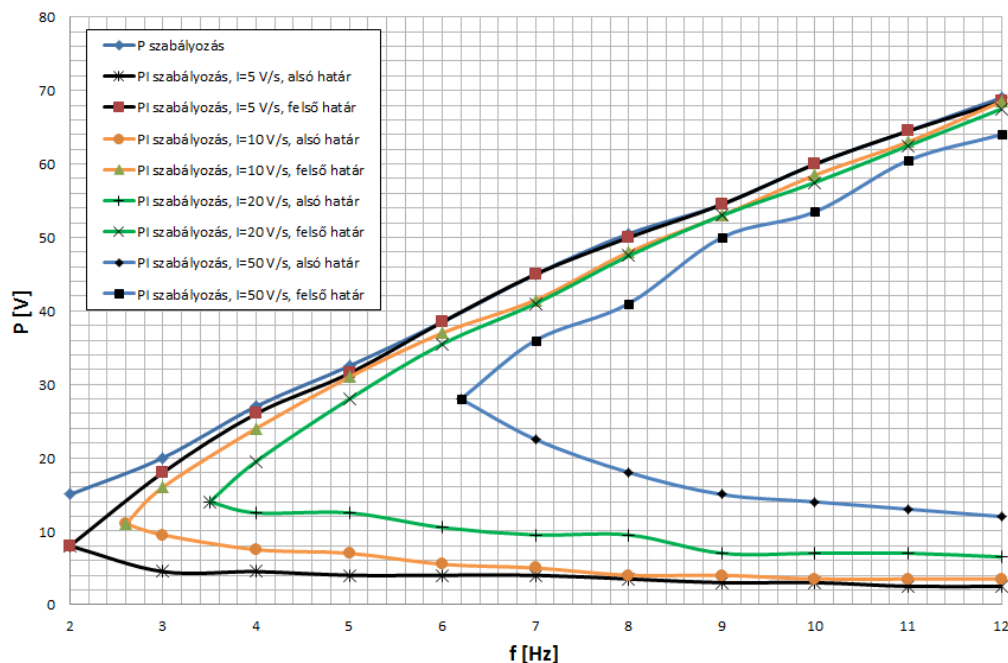


3. ábra. Munkahenger PID szabályozás: stabilitási határok összehasonlítása.

A matematikai modellezés során a szelep holtáv hatását vizsgáltuk (2e és 2f pontok a munkatervben). Az ipari munkahenger vezérlő szelepek a bemenő jel kb. 10%-áig jellemzően lezárnak, ezzel rontva a pozicionálási pontosságot. A pontosságon az arányos tag növelésével lehet javítani, ami azonban a stabilitási tulajdonságot rontja. Első lépésként a holtáv elhagyásával kialakuló stabilitási határokat vizsgáltuk meg, ez hagyományos lineáris stabilitásvizsgálat segítségével könnyedén megtehető. Ezután a holtáv növelésének hatását vizsgálva numerikus módszerekkel vizsgáltuk a kialakuló lengések tartományát. Ezt a vizsgálatot peremértékmegoldó algoritmus segítségével végeztük el úgy, hogy a periodikus pályát számos darabból "összeragasztva" követtük a paramétersíkon. A számítások eredményeképpen olyan görbesereget kaptunk, melyek a többi szabályozási paraméter függvényében (differenciáló és integráló tag) adja meg a kritikus arányos tagot. Összességében azt kapjuk, hogy a holtáv kismértékű növelése, bár rontja a beállási pontosságot, de javítja a rendszer stabilitását. Az eredményeket a [11 és 12] cikkekben publikáltuk ill. fogjuk publikálni.

A digitális mintavételezés hatását egyrészt a holtáv elhanyagolásával analitikus módszerekkel, másrészt a holtávot is figyelembe véve a tanszéken rendelkezésre álló szimulációs programcsomaggal vizsgáltuk. A csomagból hiányzó elemeket létrehoztuk és adoptáltuk a kísérleti berendezéshez. A szimulációk helyességének ellenőrzése után számos parametrikus stabilitási vizsgálatot végeztünk, melyek során a differenciáló és az integráló tag hatását vizsgáltuk a stabilitásra. Sajnos általános érvényű következtetéseket nem tudtunk levonni a paraméterek nagy száma miatt, ezért számos tipikus pa-

raméterértékre stabilitási görbeseregeket határoztunk meg. Ezeket az eredményeket a [10] cikk fogja tartalmazni, egy tipikus eredmény látható a 4. ábrán.



4. ábra. Munkahenger PID szabályozása: stabilitási határgörbék a mintavételezési frekvencia függvényében

## 4. Összefoglalás

Mindkét probléma kidolgozása során jelentős előrelépéseket tettünk a NFDR vizsgálati módszereinek alkalmazásában. Hangsúlyozzuk, hogy itt nem új matematikai eszközök kidolgozásáról van szó (ez nem is volt célja a munkának), hanem a nemzetközi tudományos közösség által az elmúlt 10 évben kidolgozott, újszerű matematikai módszerek alkalmazásáról valós mérnöki berendezésekben felmerülő kérdések megválaszolásához.

A projekt eredményeképpen mindkét témakörben olyan matematikai modelleket és numerikus módszereket dolgoztunk ki, melyek lehetővé teszik a stabilitási határok gyors, hatékony kiszámítását, továbbá a stabilitásvesztési mechanizmusok minőségi megértését.

## 5. Publikációs tevékenység

1. Bazsó Cs., Hős Cs.: *An experimental study on relief valve chatter*, Stépán G, T. Szalay, Á. Antal, I. Gyurika (szerk.): Gépészet 2010: Proceedings of the Seventh Conference on Mechanical Engineering. Budapest, Magyarország, 2010.05.25, 2010

2. Bazsó Cs., Hős Cs.: *An experimental study on the stability and chattering of a direct spring loaded hydraulic relief valve*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, **IF=0.913**,  **folyamatban, 2012 augusztus végéig lesz leadva.**
3. Bazsó Cs., Hős Cs.: *An experimental, numerical and theoretical study on valve chatter*, Fluid Power and Motion Control (FPMC 2010). Bath, Anglia, 2010.09.15-2010.09.17., pp. 493-504. (ISBN: 978-1-86197-181-4), 2010
4. Bazsó Cs., Hős Cs.: *Nyomáshatároló szelep átfolyási tényezőjének meghatározása a szeleptestre ható erők elméleti és kísérleti vizsgálatával*, Dr. Csibi Venczel (szerk.) OGÉT 2010-XVIII. Nemzetközi Gépészeti Találkozó. Baia Mare, Románia, 2010.04.22-2010.04.25. (OGÉT), Kolozsvár, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, 2010
5. Licskó G., Hős Cs., A. Champneys: *Nonlinear Analysis of a Single Stage Pressure Relief Valve*, IAENG International Journal of Applied Mathematics, Volume 39 Issue 4, pp. 286-299
6. Licskó G., Hős Cs., A. Champneys: *Dynamical analysis of a hydraulic pressure relief valve*, International Conference of Mechanical Engineering (ICME'09), London, U.K., 1-3 July, 2009
7. Bazsó Cs., Hős Cs.: *On the influence of transmission line dynamics on relief valve chatter*, 7th International Fluid Power Conference: Efficiency through Fluid Power. Aachen, Németország, 2010.03.22-2010.03.24., Aachen, pp. 1-12. Paper 9., ISBN: 978-3-940565-91-4, 2010
8. Hős Cs, A. Champneys: *Grazing bifurcations and chatter in a pressure relief valve model*, Physica D: Nonlinear Phenomena, 2011, **IF=1.594**  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physd.2011.05.013>
9. Bazsó Cs., Hős Cs.: *A CFD study on the stability of a hydraulic pressure relief valve*, Proceedings of the Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'12), 2012
10. Hős Cs., Kuti B.: *An experimental study on the effect of digital sampling on the stability of the PID control of a hydraulic cylinder*, Periodica Polytechnica Mechanical Engineering,  **folyamatban, 2012 augusztus végéig lesz leadva.**
11. Magyar B., Hős Cs., Stépán G.: *Influence of Control Valve Delay and Dead Zone on the Stability of a Simple Hydraulic Positioning System*, Mathematical problems in engineering 11: pp. 1-10. Paper 349489. (2010), **IF=0.777**
12. Hős Cs.: *On the effect of valve dead zone on the stability of PID control of a hydraulic cylinder*, SIAM Journal of Applied Dynamical Systems, **IF=1.79**,  **folyamatban, 2012 szeptember végéig lesz leadva.**

Budapest, 2012. július 27.