

Bírálat

Hős Csaba: Direkt rugóterhelésű biztonsági szelepek dinamikus viselkedése és stabilitása című, az MTA doktora cím elnyerésére benyújtott értekezéséről

Az értekezés témaválasztása két vonatkozásban is időszerű. Az egyik vonatkozást a bevezető motivációs fejezet részletezi. Ellentmondásnak tűnik, hogy miközben a biztonsági szelepek sok évtizede kritikus, meghatározó berendezései számos gépészeti berendezésünknek, és miközben nagy mennyiségű ipari tapasztalatra és tudományos ismeretre alapozott, szabványokra épülő méretezési eljárásokkal tervezik őket, addig mindmáig jelentkeznek rajtuk olyan dinamikai jelenségek, melyek kis valószínűséggel, de nagy kárt tudnak okozni. A károk között pedig nem csupán egy-egy nyomástartó edény végzetes robbanására kell gondolni, hiszen anyagi veszteségek a nagy sorozatban gyártott és alkalmazott szelepek sorozatos hibás működéséhez, zajához, tönkremeneteléhez is kapcsolhatók. A téma a gépészmérnöki gyakorlatban fontos.

A témaválasztás azonban tudományos kutatási szempontból is időszerű. Az utóbbi évtizedek eredetileg szilárd testek és folyadékok dinamikai viselkedéséhez kapcsolódó matematikai kutatásai jelentős áttörést hoztak a nemlineáris dinamikai rendszerek elemzésében. Ennek egyik tudományos népszerűsítő anyagokban is megjelenő része a káosz jelenségének felismerése, vizsgálati módszereinek kidolgozása. Ezt az új kutatási területet szokás bifurkáció elméletnek nevezni. Az elmélet számos új, elvont matematikai fogalomra támaszkodik, gyakran jelennek meg benne a mérnökök egyetemi matematikai tananyagán túlmenő absztrakciós szintek. Mindennek következménye, hogy a már elérhető matematikai módszerek lassan jutnak át a mérnöki gyakorlatba. A műszaki tudományok területén kutatóknak ez fontos feladatot ad: olyan matematikai modelleket alkotnak és alkalmaznak mérnöki feladatok megoldása során, melyekre a mai számítástechnikai lehetőségek mellett használhatók az absztrakt matematikai módszerek. Az értekezés témája pontosan ebbe a kutatási vonalba illeszkedik, kiaknázza a bifurkáció elmélet legújabb eredményeit az említett iparilag fontos feladatok megoldása során.

Az értekezés nagy mennyiségű, évtizedes kutató munkát foglal össze, és ennek megfelelően a dolgozat teljes mértékben kihasználja a formai követelményekben megszabott kereteket: érdemi része 101 oldal, melyet 96 elemű hivatkozás jegyzék, 37 oldal melléklet, továbbá a dolgozat elején 15 oldalt kitevő jelölésjegyzék, előszó, és sok további érdekes megjegyzés egészít ki. A megjegyzések nem kötődnek tudományos eredményekhez, de fontosnak érzem a szerző kutatói habitusának pozitív megítélésében. A legfontosabb ezek közül, hogy dolgozatát magyarul készítette el, miközben publikációinak döntő többsége természetesen angol. Ez a magyar szakmai nyelv ápolása szempontjából fontos, ami tiszteletre méltó idő és energia ráfordítást igényelt. Nagyon érdekes olvasni a szerző dilemmáit mindezzel kapcsolatban: ilyen a tizedespont használatának kérdése (ami Náray-Szabó Gábor – és nem László – cikkével is foglalkozik), egyes angol és német szakkifejezések (latinon keresztüli) magyarosítása, fordíthatósága. Ugyancsak jó volt olvasni, ahogy rögzítette cikkei szerzői sorrendjének értelmezését, mellyel követi a mérnöki tudományok nemzetközi gyakorlatát. Mivel már számos tanítvánnyal dolgozik együtt, körülötte tudományos iskola alakul, példamutató ez a fajta hozzáállása a kutatás módszereihez.

Természetesen találkoztam olyan megjegyzéseivel is, amikkel nem értek egyet. Sajnáltam, hogy nem használta ki a vektor és mátrix mennyiségek megkülönböztetésének lehetőségét vastag szedéssel. Túlzásnak éreztem a paraméterek indexeiben megjelenő, magyar elnevezésekből származó jelöléseket (mint például *ny* a nyitónyomásra, *sz* a szelepre, *cs* a csőre), miközben persze a paraméterek betűjelei általában a megfelelő latin vagy angol szavakból származnak. A mértékegységek ábrákon és szövegben történő egységes megjelenítését sem sikerült megoldani (zárójelzés, álló vagy dőlt betű, vö. 9., 37., 49. ábra). Ezek nehezítették a dolgozat olvasását –

de tudom, egy ilyen terjedelmű munkában, több szakterületet érintő fogalomrendszer mellett, szinte reménytelen jó és egységes jelölésrendszert összerakni.

Mindezzel együtt, a szerző mindent elkövetett az eredmények érthető közléséért; a világos szerkesztés, a kiváló minőségű ábrák, a gondosan szedett képletek, a szinte hibátlan gépelés, vagy a magyarázó és értelmező lábjegyzetek kiterjedt használata mind ezt bizonyítják. Külön élvezettel olvastam például a „red herring” angol kifejezés magyarázatát, ami rámutat a dolgozat eredményeinek egyik fontos gyakorlati következményére is. A bíráló már szinte megőrül, ha elvéve egy-egy a szövegszerkesztő által sem jelzett elírást talál, mint a „rendszer” rendszerre helyett, „egyenlőre” egyelőre helyett, vagy „eltoldónak” eltolódnak helyett, illetve ha megjegyezheti, hogy a többször felbukkanó dominál, fluktuál, precíz szavak helyett is megfelelő magyar szinonimákat lehetett volna használni.

Rátérve a dolgozat első fejezetére, mivel nem közvetlen szakterületem az áramlástan, a hidrodinamika, ezért számomra nagyon hasznos volt a nyomáshatároló szelepek felépítéséről szóló bevezetés, illetve a szelepek dinamikai viselkedésének rendellenességeivel kapcsolatos, az iparban kialakult fogalmi rendszer tömör összefoglalása. Ezekből világosan vezeti le kutatásainak célkitűzéseit. Ugyanitt foglalja össze és indokolja legfontosabb mechanikai modellezési feltételeit, közelítéseit, amiken a dolgozat egyes részeiben azért gyakran túllép.

A második fejezet a nyomáshatároló szelepek matematikai modellezésével foglalkozik, és már itt felveti az általa minőséginek és a mennyiséginek nevezett modellek közötti választásának okait. Az én szemléletemnek tökéletesen megfelel a szerző megközelítése: miközben az ipari és sürgető követelményeit a mennyiségi modellek alkalmazásával nagy számítógépi kapacitás használatával elégítik ki, addig az akadémiai kutatások hangsúlyát lehet a jelenségek minőségi leírására helyezni – ezek vezethetnek el új fizikai felismerésekig az összetett paraméter függések dzsungelében. Természetesen a szerző járatos a nagyméretű numerikus modellek alkalmazásában is, ezeket azonban inkább arra használja, hogy minőségi eredményeinek egy-egy vonatkozását adott paraméterek mellett visszacsatolja, ellenőrizze.

A dolgozatban használt fogalmak közül az átfolyási tényező bevezetése összenyomhatatlan, majd összenyomható közegek esetére világos, de a 6. ábra kapcsán nem sikerült megértenem, hogyan készülnek a 100%-nál nagyobb nyitási állapotokkal kapcsolatos mérések, ha 100% a szelep teljesen nyitott állapotát jelenti.

A modellekben használt effektív felület részletes magyarázata szintén fontos volt számomra, itt viszont az nem volt világos, hogy az 5. ábrán szereplő tányérszelep esetén, ha a kilépési szög esetleg 45 foknál kisebb, akkor a (2.5) képletben ismét a kúpos szeleptestre vonatkozó képlet tűnne helyesnek.

A szeleptest mozgásegyenletében szereplő viszkozitási tényezővel kapcsolatban több kérdés is adódik. A szerző a matematikai modelljei jelentős részében ezt elhanyagolhatónak tekinti, bár stabilitási kritériumaiban, majd számpéldáiban is gyakran jelennek meg reális, pozitív értékek. Minőségi vizsgálataira számára a csillapítás elhanyagolhatóságát többek között azzal indokolja, hogy ez konzervatív becslést jelent. Ez általában igaz, de ha a szelephez nincs hosszabb felvív vagy alvív oldali csővezeték kapcsolva, előfordulhatnak kivételek. Ennek kifejtése meghaladja a bírálat terjedelmét, de a csővezetékhez kapcsolt modellek esetében a csatolt közönséges és parciális differenciálegyenlet rendszer késleltetett differenciálegyenletekké transzformálható; a késleltetett oszcillátorok esetén viszont kimutatták a csillapítás esetleges destabilizáló hatását. A kérdés messzire vezet, és úgy látom, nem érinti a dolgozat lényegi eredményeit, de a pontosság kedvéért meg kívántam jegyezni – ez további vizsgálatok tárgya lehet.

Az egyébként általa is kikerülhetetlenül jelenlévőnek nevezett természetes csillapítási hatásokat a mellékletekben pontosan részletezi és levezeti. A szelepszár és a szelepszár megvezetése között fellépő csillapítással azonban keveset foglalkozik – érdekelne, miért. Mivel nem végeztem szelepekkel ilyen méréseket, nem tudom jól érzékelni a kérdés fizikai realitását, de elméletileg egy a szelepszár megvezetésénél jelentkező száraz súrlódás, vagy kevert száraz-viszkózus súrlódás alternatív magyarázata lehetne a szelepek nyitásakor és zárásakor jelentkező hiszterézis jelenségének, és akkor még nem is említem az esetlegesen ott fellépő akadozó csúszás jellegű dinamikai jelenségek lehetőségét. Gondolom, a szerző erre tud megnyugtató választ adni, a szakirodalomban évtizedek alatt kialakult modellezési közelítések is ezt támaszthatják alá.

A szelep modell közönséges differenciálegyenleteinek összeállítása tehát nagyon sokrétű és alaposan kidolgozott kombinációja szilárdtest és folyadék mechanikai modellekben szereplő közelítéseknek, nem egyszerű átvétel valamelyik jól ismert modellezési iskolából. Ebben a vonatkozásban a tartály és a csőmodellek levezetése jobban letisztult, ismert közelítésekkel dolgozik, miközben a matematikai modellek alkalmasint bonyolultabb, parciális differenciálegyenletekhez vezetnek. Itt tulajdonképpen a dimenziótlan egyenletek összeállítása, a dimenziótlan paraméterek kiválasztása jelentette a feladatot, hiszen ezeket már a szelep modellel összhangban kellett meghatározni (például a szelep csillapítatlan sajátkörfrekvenciáját használva) annak érdekében, hogy a matematikai modellben a lehető legkevesebb paraméter szerepeljen, de ezek egyúttal őrizzék az egyes fizikai tartalommal bíró, jól mérhető paraméterek jelentését. Miközben ez pusztán matematikai játéknak tűnhet, nagy a gyakorlati jelentősége, hiszen olyan stabilitási térképek és bifurkációs diagramok készítését alapozzák meg, melyek értelmezése és mérési sorozatokkal történő ellenőrzése egyszerűsödik.

A dolgozat második fejezetében részletezett modellalkotási munkát a jelölt nem fogalmazta meg tézis formában, csupán a később ennek alapján elért eredményeket. Ennek oka az lehetett, hogy a matematikai modellekben ismert közelítések különböző kombinációi jelennek meg – ilyen formában rendezve azonban jelentős eredménynek tekintem, még akkor is, ha kérdéseim egy része éppen ezzel kapcsolatban merült fel.

A dolgozat harmadik fejezete a nyomáshatároló szelep elsődleges instabilitási eseteit járja végig; ennek alapján fogalmazza meg az 1. és a 2. tézist. Az egyes típusok csoportosítását, a 3. táblázatban szereplő, különböző minőségi és mennyiségi modellekhez kapcsolódó áttekintését különösen értékesnek tartom. A minőségi modellekben az összes matematikailag elképzelhető instabilitási esetre mutat műszaki szempontból fontos jelenséget. Ezek felismerése, linearizáláson alapuló levezetése, az elkerülésükre kidolgozott ellenőrzési képletek és eljárások ugyan nem azonos súlyú eredmények, de egyetértek ezek egységes tézisbe fogalmazásával. Az alább felvetett kérdések, megjegyzések, nem érintik az 1. tézis elfogadását.

A szelep ugrálás statikus instabilitási jelenségét az effektív felület bonyolult elmozdulás függésével hozza összefüggésbe, és gáz közeg esetére mutat erre vonatkozó mérési eredményeket egy speciális szelep esetén. Van hasonló jelenség folyadék közeggel is? Nem tudtam utána nézni, hogy szerepelnek-e ilyen esetek a hivatkozott CFD számításokban.

A tartály-szelep modell esetében kimutatott dinamikus instabilitásban a viszkózus csillapításnak kulcsszerepe van – itt természetesen semmitmondó eredményt kapnánk, ha a zérus csillapítási közelítést használjuk. Szellemesnek tartottam azt a közelítést, amivel a szerző feloldja a szelep nyitott egyensúlyi helyzete és a tömegáram közötti, a harmadfokú egyenlet miatt nehézkesen kezelhető algebrai kapcsolatot, és ahogy ezzel zárt alakú ellenőrzési képletekhez jut. Azt viszont sajnálom, hogy a (3.54,55,56) képletekben az indexbe egyenlőség

jellel zérus tömegáramok kerültek, miközben a közelítő képletben szerepel a nem-zérus tömegáram – ez nagyon félrevezető volt, sokáig nem értettem.

Helyesnek tartottam volna továbbá, ha a (3.50) egyenlet kapcsán figyelmeztetésként említésre kerül az ott szereplő még nemlineáris differenciálegyenlet rendszer megoldásainak esetleges unicitási problémája, ami a négyzetgyök függvény deriválhatóságának feltételéből fakad. Ezt a mérnökök gyakran „elnezik”, és nem veszik figyelembe a numerikus eredmények ebből fakadó bizonytalanságát. A 10. ábrán szereplő numerikus szimulációk viszont természetesen helyesek, az egyensúlyi helyzetek közelében jól mutatják a rezgések alakulását.

A (3.52) egyenlet fizikai tartalmának értelmezésekor a szerző már eleve feltételezi a Hopf bifurkáció szuperkritikus jellegét, amikor kialakuló rezgésekről beszél a kritikus alatti csillapítási tényezők esetén. Ezt azonban csak később mutatja ki, az említett 10. ábrát megelőző magyarázat korai, kissé félrevezető.

A Helmholtz instabilitás vizsgálatok már a tartály és a szelep közötti csővezeték is szerepet kap a modellben, igaz egyszerűsített formában, ami a korábbi közönséges differenciálegyenlet rendszer bővülését jelenti. A linearizáláson alapuló levezetést itt nem közli részletesen, de az eredmény fizikai tartalmát alaposan elemézi. Az egyik mondatban rezonancia jelenséggént említi a keletkező rezgést. Matematikusok is beszélnek két frekvencia egyezésekor rezonanciáról, de mechanikai értelemben itt természetesen öngerjesztett rezgésről van szó. A mérnöki szóhasználatban elterjedt, hogy minden rezgési jelenséget rezonanciának tekintenek, akkor is, ha nincs külső gerjesztés, ez pedig félrevezető lehet a rezgések okának keresésekor.

A negyedhullám instabilitás a legösszetettebb eset, több alfejezetre bomlik ennek vizsgálata. Ennek megfelelően egyetértek azzal, hogy az itt kapott eredmények nem csupán az 1. tézisben szerepelnek; a legfontosabb elkülönítve, a 2. tézisben jelenik meg. Az ehhez kapcsolódó 13. ábra eleinte zavarosnak tűnt, hiányoltam az instabil tartományok jelölését – ez számomra sokat segített volna az 1. módus meghatározó szerepének gyorsabb, csupán az ábra alapján való megértésében. Végül megjegyzem, hogy a tézist igazoló levezetés teljességéhez hozzá tartozik a későbbi 6.3.3 fejezetben szereplő bizonyítás a negyedhullámszerű megoldások létezésére.

A pumpálás jelenségének matematikai elemzését szívesebben láttam volna az ugrálás statikus instabilitási jelensége és a tartály-szelep modellek után; nem értettem, miért került utolsónak csoportosítva az 1. tézisben is – a szerzőnek biztos van erre a szerkesztésre magyarázata.

A 2. tézisben gyakorlati szempontból is jelentős eredménynek tekintem a felvízoldali cső első akusztikus sajátfrekvenciájának meghatározó szerepére vonatkozó állítást. Ez egy meglehetősen bonyolult levezetés egyszerűnek tűnő eredménye, ami nagyon megkönnyíti a kidolgozott méretezési képlet alkalmazását, kimutatja megbízhatóságát. Az elsővel együtt ezt a tézist is elfogadom új tudományos eredménynek.

Első olvasatban meglepődtem, hogy a dolgozat 4. fejezetében közölt numerikus szimulációkhoz és mérési eredményekhez nem kapcsolódnak tézisek. Úgy gondolom, a jelölt nem tekintette az ismert numerikus módszerek implementálását, a CFD modellek kereskedelmi szoftverekkel való futtatását, vagy az ipari kooperációban végzett kísérleteket új tudományos eredménynek. Ezzel együtt, a 4. fejezet eredményei nagyon fontosak az első két tézis alátámasztására, pontosabban azoknak a minőségi matematikai modelleknek az igazolására, melyekre az első két tézist alapozta. Az alfejezetek struktúrája bonyolult, de az eredmények jól jellemzik a különböző közelítési kombinációk jogosságát, érvényességi körét.

A 17. ábrán jó lett volna a különböző paraméter kombinációkat a megfelelő paneleknél közölni. A paraméterek értékeit gondosan azonosítja, és a legbonyolultabb negyedhullám instabilitásra a csőhossz változtatásával meggyőző kísérleti eredményeket mutat be folyadék esetében.

A gáz munkaközeg esetében végzett CFD szimulációk jól egyeznek a gázdinamikai modell szimulációs eredményeivel, és ezeket viszonylag jól közelítik a kritikus csőhosszakra vonatkozó korábbi analitikus becslések. Nem világos azonban a 20. ábrán, hogy a (3.85) képletnek megfelelő stabilitási határ miért egyezik rosszabbul a szimulációs eredményekkel, mint a (3.89) képlet, ami pedig növekvő tömegáramok esetén elvileg pontatlanabb.

A 4.3 fejezetben közölt mérési eredmények egy amerikai vállalat számára végzett ipari kutatási munka keretében születtek. Ez egyrészt mutatja a jelölt eredményeinek, szakértelmének gyakorlati elismerését, másrészt viszont jelzi, hogy a méréseket nem tudta a tudományos kutatás igényeihez mért alaposággal, a teljes paraméter tartományban elvégezni. Ez különösen a víz munkaközeggel végzett mérésekre igaz, ahol a stabilitási térképeket nem kellően sűrű pontokban tudta mérésekkel meghatározni. A 23. ábrán levegő munkaközegre végzett mérések esetén már sokkal meggyőzőbbek a mérési eredmények, megjegyzem azonban, hogy stabilitási térképek kimérésekor a stabilitási határ közelében tapasztalt rezgési frekvenciáknak a térképek felett való megjelenítése és elméleti eredményekkel való összevetése ugyanolyan hasznos lett volna a modell igazolására, mint magának a határnak az azonosítása.

Érdekesnek és meggyőzőnek találtam a további alfejezetekben a mérések kapcsán tapasztalt nyitási és zárási instabilitás magyarázatát, illetve a csősúrlódás, illetve a belépési nyomásesés hatásának elemzését. Miközben a mérésekhez és szimulációkhoz nem kapcsolódnak tézisek, számos új kutatási irányt jelölnek ki, tisztázandó kérdéseket vetnek fel.

Az 5. fejezetben kerül sor a tartály-szelep modell globális nemlineáris dinamikájának elemzésére. A stabilitásvesztés után keletkező rezgésekről kimutatja, hogy megfelelő térfogatáram értékeknél a szelep felütközése miatt további, ún. „grazing” bifurkáció jelentkezik, és az utána kialakuló ütközéses mozgások további bifurkációit, periodikus, esetenként kaotikus mozgását is meghatározza. A periodikus mozgásokat több szemi-analitikus és numerikus módszerrel is követi. Az 5.3.1 fejezetben bevezetett peremérték feladattal való leírás esetében nagyon zavarónak találtam, hogy x az időt jelölte, és ezen a lágjegyzetben elhelyezett figyelmeztető megjegyzés is alig segített. A részben erre épülő további módszerek ismertetése részletes, és a 29. ábrán meggyőző a szemi-analitikus eredmények összevetése direkt numerikus szimulációkkal. A 30. ábrán bemutatott kvalitatív ábra és a megfelelő szelepmozgások szemléltetése jól kapcsolja össze a bonyolult nemlineáris dinamikai elemzést a szelep valóságos mozgásával. Az eredmények látványosak, de meg kell jegyezni, hogy a szövevényes bifurkációs diagramok, vagy az ezek alapján összeállított 30. ábra kétparaméteres diagramja nagyon érzékeny a paraméterek változására, ezek gyakorlatban való pontos kimérése reménytelen lehet.

Az új eredményeknek az a része azonban mindenképpen hasznos, melyeket a 3. tézisben foglal össze. Ha mérések során találunk ilyen jellegű különleges, bonyolult, alkalmasint több frekvenciát tartalmazó vagy éppen kaotikusnak tűnő rezgéseket, következtethetünk a jelenség okára, megjelenésének paraméter tartományára, és nem kell feltétlenül új, nem modellezett fizikai jelenséget keresnünk: nemlineáris matematikai modellünk helyes, tartalmazhatja ezeket.

Az 4. tézishez vezető 5.5 fejezet a szelep ütközéses dinamikájának egy különleges esetével, az egyszerű bifurkáció sorozattal nem leírható, úgynevezett Shilnikov típusú homoklinikus pálya létezésével foglalkozik. Az ilyen típusú megoldásnak fontos szerepe lehet az esetleges kaotikus dinamika bizonyításában. A fázistérben a pálya topológiai konstrukciója szakaszosan folytonos rendszerekben pusztán matematikailag is izgalmas, látványos, egy valóságos műszaki feladatban azonosítani pedig igazi kuriózum. Az elemzés különös érdekessége, hogy a topológiai konstrukcióhoz szükség volt a fizikailag egyébként értelmezhetetlen negatív szelep elmozdulásoknak megfelelő trajektóriák fázistérbeli azonosítására is. A 4. tézist ismét azzal a megjegyzéssel fogadom el új tudományos eredménynek, hogy annak gyakorlati jelentősége

leginkább abban áll, hogy ha ehhez hasonló dinamikai jelenséget tapasztalunk méréseink során, az minőségileg megfelel a dolgozatban összeállított nemlineáris dinamikai szelep modellnek.

Az 5. és a 6. tézis állításait a szerző az érdemi részt befejező 5. fejezetben alapozza meg. A szakirodalomban ismert, hogy a csőhálózatok dinamikai vizsgálatának egyik leghatékonyabb, az elektromos hálózatok vizsgálatára is alkalmazott módszere az impedancia módszer. Ezt a szerző kutatóhelyén eddig is fejlesztették, széles körben, bonyolult csőhálózatokra alkalmazták. Nem véletlen tehát, hogy az 5. fejezetben ennek a módszernek egy olyan általánosítását dolgozza ki a jelölt, ami megengedi az általa kialakított nyomáshatároló szelep dinamikai modelljeinek peremfeltételszerű csatolását a tetszőleges topológiájú, tartályokat is tartalmazó csőhálózatokhoz. A módszer lényege ismét lineáris stabilitási vizsgálat, de a számítás úgy van összeállítva, hogy viszonylag áttekinthető rendszerbe foglalja az egyes csőszakaszokra érvényes parciális differenciálegyenleteket és azok csatlakozási- és peremfeltételeit.

A módszert szemi-analitikusnak lehet nevezni, hiszen algebrai alapú számítás, nem numerikus szimuláció, de a bonyolult algebrai egyenleteket, nagyméretű determináns kifejtéseket már csak numerikus adatokkal lehet elvégezni, kiértékelni. Ezzel együtt, a módszerrel gyorsan, pontosan, hatékonyan lehet paraméterek hatását vizsgálni. Az alfejezetekben felsorolt számos példa különböző közelítési feltételrendszerét (mikor elhanyagolható a csillapítás, mikor a csősúrlódás, mikor a tartálytérfogás, stb.) nehezen tudtam követni, de a korábbi vizsgálataihoz legközelebb álló tartály, felvízi csővezeték, szelep esetre meggyőzően hozta ki a negyedhullám instabilitást, mint a legveszélyesebb stabilitásvesztési módot. Ezt korábban a numerikus szimulációkra és mérésekre alapozott feltételezésként használta.

A dolgozat 37. ábrájának (a) és (b) panelje meggyőző a szemi-analitikus és a direkt numerikus szimulációval kapott stabilitási határok egyezését tekintve, de érdekelne, vajon miért olyan bizonytalanok a numerikus szimuláció instabil tartományban megadott legnagyobb szelepelmozdulás szintvonalai az (a) panel egyértelmű pszi szintvonalaihoz képest, illetve próbált-e a szerző numerikus kapcsolatot találni a kétféle szintvonal között.

A jelölt egy további módszert is kidolgozott a stabilitási határok környékén a stabil tartományok kiválasztására, azonosítására. Ezt nem tartom jelentős új eredménynek, erre sok más alternatív módszer is kínálkozna, de az általa választott út valóban kényelmesen kombinálható az impedancia módszer algoritmusával.

Összességében az 5. tézist is elfogadom új és jól alkalmazható tudományos eredménynek. A 6. tézis állítása talán összevonható az 5. tézissel, szorosan kapcsolódik hozzá, de ez nem lényeges tartalmi kérdés, az állítást itt is elfogadom.

Összefoglalva: az értekezés és annak tézisei alapján a doktori munka eredményeit elegendőnek tartom a az MTA doktora cím megszerzéséhez, a **nyilvános vita kitűzését javaslom**, a jelölt számára javaslom a MTA doktora cím odaítélését.

Budapest, 2020. augusztus 18.



Stépán Gábor
az MTA levelező tagja