

MISKOLCI EGYETEM



GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR

SZUPERFINISELŐ BERENDEZÉS DINAMIKAI VIZSGÁLATA

PhD értekezés tézisei

KÉSZÍTETTE:

Szilágyi Attila

okleveles gépészmérnök

SÁLYI ISTVÁN GÉPÉSZETI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA,
GÉPEK ÉS SZERKEZETEK TERVEZÉSE TÉMATERÜLET,
SZERSZÁMGÉPEK TERVEZÉSE TÉMACSOPORT

DOKTORI ISKOLA VEZETŐ:

Dr. habil Tisza Miklós

egyetemi tanár

a műszaki tudomány doktora

TÉMATERÜLET VEZETŐ:

Dr. habil Döbröczöni Ádám

egyetemi tanár

TÉMACSOPORT VEZETŐ:

Prof. Emeritus Tajnafői József

a műszaki tudomány doktora

TÉMAVEZETŐ:

Dr. habil Patkó Gyula

egyetemi tanár

Miskolc, 2011

MISKOLCI EGYETEM



GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR

SZUPERFINISELŐ BERENDEZÉS DINAMIKAI VIZSGÁLATA

PhD értekezés tézisei

KÉSZÍTETTE:

Szilágyi Attila

okleveles gépészmérnök

SÁLYI ISTVÁN GÉPÉSZETI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA,
GÉPEK ÉS SZERKEZETEK TERVEZÉSE TÉMATERÜLET,
SZERSZÁMGÉPEK TERVEZÉSE TÉMACSOPORT

DOKTORI ISKOLA VEZETŐ:

Dr. habil Tisza Miklós

egyetemi tanár

a műszaki tudomány doktora

TÉMATERÜLET VEZETŐ:

Dr. habil Döbröczöni Ádám

egyetemi tanár

TÉMACSOPORT VEZETŐ:

Prof. Emeritus Tajnafői József

a műszaki tudomány doktora

TÉMAVEZETŐ:

Dr. habil Patkó Gyula

egyetemi tanár

Miskolc, 2011

A BEMUTATOTT KUTATÓ MUNKA

A TÁMOP-4.2.1-08/1-2008-0006, „A MISKOLCI EGYETEM TECHNOLÓGIA- ÉS TUDÁSTRANSZFER
CENTRUMÁNAK KIALAKÍTÁSA ÉS MŰKÖDTETÉSE” CÍMŰ, VALAMINT

A TÁMOP 4.2.1.B-10/2/KONV, „A FELSŐOKTATÁS MINŐSÉGÉNEK JAVÍTÁSA A KUTATÁS-FEJLESZTÉS-
INNOVÁCIÓ-OKTATÁS FEJLESZTÉSÉN KERESZTÜL” CÍMŰ
PROJEKTEK RÉSZEKÉNT VALÓSUL MEG.

Bíráló bizottság

Elnök:

Dr. Bertóti Edgár MTA doktora, ME, egyetemi tanár

Titkár:

Dr. Szabó J. Ferenc műsz. tud. kandidátusa, ME, egyetemi docens

Tagok:

Dr. Insperger Tamás PhD, BME, egyetemi docens

Dr. Mátyási Gyula PhD, BME, egyetemi docens

Dr. Rontó Miklós MTA doktora, ME, egyetemi tanár

Hivatalos bírálók:

Prof. h. c. Dr. Arz Gusztáv PhD, BME, címzetes egyetemi tanár

Dr. Nándori Frigyes PhD, ME, egyetemi docens

1. BEVEZETÉS, IRODALMI ELŐZMÉNYEK

A szuperfiniselés – más néven *tükörsimítás* – befejező finomfelületi megmunkálás, általában hengeres felületek, például tengelyek, dugattyúk, szelepek, gördülőcsapágyak futófelületeinek megmunkálására használják. A műveleti ráhagyást a csiszolókövek szemcseélei távolítják el: ennek következtében javul a felület minősége, miközben a munkadarab mérete és alakja lényegesen nem változik. A tükörsimítást egy erre a célra készített célgép vagy esztergára, ritkábban palástköszörűre szerelt finiselő berendezés végzi, amely általában pótlólagosan kerül az alapgépre. Szuperfiniselés során a felület simaságát az alapgépbe fogott gyártmány forgatásával és a kövek rövid löketű rezgőmozgásával érik el. A kövek mozgatása történhet közvetett módon mozgásátalakító merev kinematikával, vagy közvetlenül pneumatikus, hidraulikus, villamos hajtás segítségével.

A Miskolci Egyetem az elmúlt évek során konzorciumi tagként részt vett egy új típusú, kombinált szuperfiniselési eljárás és az azt megvalósító berendezés kifejlesztésében. Az eljárás azért újszerű, mert a szuperfiniselést és az azt megelőző keményesztergálást ugyanazon alapgépen, egy felfogásban végzi. A nemzetközi konzorciumban, amely az EU6-os program keretében alakult, a német CEROBEAR és a HWG Wälzlager csapágygyártó, a holland székhelyű Hembrug és a román Diasfin cégekkel együtt az Aacheni Fraunhofer Intézet Gépgyártás-technológiai Osztálya és a Miskolci Egyetem Szerszámgépek Tanszéke is helyet kapott. A konzorcium az új típusú eljárás optimális paramétereit egy kísérleti szuperfiniselő berendezés segítségével kívánta feltárni. A berendezés megtervezése és kivitelezése a Miskolci Egyetem Szerszámgépek Tanszékének feladata volt. A prototípus berendezés a gyártását követően az Aacheni Fraunhofer Intézetbe került. A részleteiben is aprólékosan megtervezett kísérletsorozat egy éves időtartamot ölelt fel, melynek eredményeként feltárta az új típusú kombinált szuperfiniselési eljárás legkedvezőbb megmunkálási paramétereit. A nemzetközi projekt záró értekezletén a konzorcium felvetette a prototípus berendezés továbbfejlesztésének lehetőségét, és ezzel kapcsolatban egy jellemzően piaci szempontú elvárást fogalmazott meg, melynek lényege a következő: a rezgő egységek tömegét, valamint a berendezés befoglaló méreteit körültekintően, az alapgép munkaterének méreteit szem előtt tartva kell megválasztani úgy, hogy az alapgép átalakítása nélkül legyen adaptálható, és a gyári tartozékként meglévő revolverfej mozgását ne korlátozza. A berendezés tömegét és méreteit alapvetően a hajtás jellege és annak energetikai viszonyai határozzák meg, melyek feltárását a berendezés dinamikai vizsgálata teszi lehetővé. Ultraprecíz – *a továbbiakban UP* – megmunkálás során, ahol a munkatér viszonylag kicsi, és követelmény a nagy alak- és méretpontosság, a konzorcium által felvetett szempont figyelembevételre különösen fontos. Előzetes elméleti megfontolások alapján úgy véltük, hogy javítva a berendezés energetikai viszonyait, és figyelembe véve a kísérletek során meghatározott legkedvezőbb megmunkálási paramétereket, a konzorcium által megfogalmazott piaci követelmény teljesíthetőnek látszik: lehetőség adódik egy, a prototípus berendezésnél jóval kisebb méretű, tömegű és gazdaságosabban működő, a piaci szempontoknak is megfelelő berendezés megépítésére.

A szuperfiniselő berendezés ilyen irányú továbbfejlesztésének elvi alapjait az alábbi megfontolások jelentették. Az értekezésben vizsgált új típusú szuperfiniselő berendezést csillapított gerjesztett rezgőrendszernek tekintjük. Kimutatható, hogy adott frekvenciára hangolt és ehhez közeli frekvenciával gerjesztett rendszer kedvező energetikai viszonyok mellett működhet. A prototípus berendezést alkalmasan megválasztott rugalmas taggal kiegészítve, és

ezáltal a kísérletsorozat eredményeként feltárt munkapontra hangolva azt várjuk, hogy az így kapott új típusú berendezés kedvezőbb energetikai viszonyok között működik.

Az értekezés egy, a fenti elvek szerint működő, rövid löketű, villamosan hajtott, egyfázisú szuperfiniselő berendezés elméleti vizsgálatát mutatja be. A vizsgálat szempontjából lényeges dinamikai és energetikai tulajdonságok feltárását az elektrodinamikus rezgéskeltő berendezés modelljét felhasználva végezzük [30]. A vizsgált modellek mozgásegyenlet-rendszerét a Lagrange-féle másodfajú mozgásegyenletekből származtatjuk [25], [27], [30].

A szuperfiniselési folyamatot első közelítésben sebességgel arányos, lineáris mechanikai csillapításként vesszük figyelembe: ez jelentősen megkönnyíti a számítás menetét [5], [9], [10], [16]. Úgy véljük, hogy már ez az egyszerű modell is fontos dinamikai jelenségekre irányíthatja rá a figyelmet.

Nemlineáris modellek segítségével azonban dinamikai jelenségek jóval szélesebb körét tárhatjuk fel: előre jelezhetünk káros rezgéstani jelenségeket, pontosabbá és gazdaságosabbá tehetjük a berendezés működését. A szuperfiniselési folyamat valósághűbb közelítése érhető el nemlineáris csillapítási modell, például a megmunkálási folyamatot jobban tükröző Coulomb-féle száraz súrlódási modell alkalmazásával. Az értekezés egy ilyen csillapítással ellátott, több szabadságfokú, harmonikusan gerjesztett rezgéstani modellt alkalmaz az új típusú szuperfiniselő berendezés dinamikai és energetikai viszonyainak vizsgálatára.

Ehhez hasonló rendszerek vizsgálata fordul elő a [11], [12], [43] művekben, amelyek alapján látható, hogy a Coulomb-súrlódással csillapított rendszerek vizsgálata jóval körülményesebb, mint a lineárisé. Az ilyen rendszerek vizsgálatát analitikus módszerek mellett rendszerint kísérleti vagy numerikus módszerekre, valamint ezek kombinációjára támaszkodva szokták végezni [1]. A Coulomb-csillapítással rendelkező rezgőrendszerek vizsgálatával igen kiterjedt szakirodalom foglalkozik. Az ilyen rendszerekkel kapcsolatos első mélyreható, elméleti vizsgálat az 1930-as évek elejéről, J. P. den HARTOG tollából származik [13]. Tanulmányában den HARTOG állandósult állapotot leíró egzakt megoldásokat állít elő, melyek időbeli csatolása transzcendens egyenletek megoldására vezet. Hasonló modelleket és módszereket mutatnak be a [22], [29], [41], [51] művek különböző szabadságfokú, erő- és útgerjesztéses rendszerek vizsgálatakor. Ezek a művek egységesek abból a szempontból, hogy vizsgálataik során a hangsúlyt a mozgásegyenlet-rendszer egzakt megoldásainak, valamint az amplitúdó-frekvencia függvények meghatározására helyezi. A [11], [12], [20], [21], [35], [43] művek a fenti eredményeken túlmenően már a rendszer stabilitásvizsgálatával kapcsolatos módszereket is bemutatnak, azonban a megoldásokat továbbra is szakaszonként állítják elő.

E megoldások alkalmazása bonyolultnak tűnik, mivel a paraméterekben beállt változások rezgőrendszerre gyakorolt hatása nehezen követhető. Ezek a nehézségek több szabadságfokú rendszerek vizsgálatakor fokozottan jelentkeznek. Célszerű ilyenkor a mérnöki gondolkodásmódhoz jobban illeszkedő és könnyebben kezelhető analitikus közelítő módszereket alkalmazni, melyek segítségével a nemlineáris mozgásegyenlet-rendszer megoldásait a paraméterek egyenletesen folytonos függvényében állítjuk elő: ezáltal a műszaki paraméterek rezgőrendszerre gyakorolt hatása áttekinthetőbbé válik.

Számos ilyen eljárás ismert. Ezek egyike a rendszer mozgásegyenlet-rendszerében előforduló szakadásokat folytonos függvények bevezetésével közelíti: simítja a karakterisztikát [6], [14], [28], [31], [32], [34], [49]. A módszer egyik hátránya, hogy a szakadási hely környezetében előforduló letapadási jelenségeket figyelmen kívül hagyja. Ennek következtében előfordulhat, hogy az így előállított analitikus közelítő megoldások nem jelzik előre az összes instabil tartományt. A módszer másik hátránya, hogy az általában trigonometrikus vagy

hiperbolikus simító karakterisztika következtében adódó bonyolult összefüggések miatt a további analitikus vizsgálat nehézkessé válik.

Vannak fokozatos közelítő módszerek, amelyek a megoldás feltételezett függvénysorát helyettesítik az eredeti nemlineáris mozgásegyenletbe, majd a függvénysorban előforduló ismeretlen együtthatókat valamilyen minimalizálási elv segítségével határozzák meg. Ide sorolhatjuk például a Galjorkin- és Ritz-módszereket, a harmonikus egyensúly módszerét, valamint a különféle trigonometrikus kollokációs módszereket [8], [15], [26], [36], [46]. Ebben az esetben a közelítő megoldás véges tagból álló függvénysorként adódik, ezért időigényessé válhat a sor ismeretlen együtthatóinak meghatározása. Emiatt sokszor már a sorozatos közelítés első tagjának figyelembevételével is megelégszünk, mivel gyakran már ez a közelítő megoldás is viszonylag pontos eredményt szolgáltat.

A fokozatos közelítő módszerek első közelítése sok esetben egy linearizálással egyenértékű eredményre vezet. A linearizálási módszerek nem törekszenek pontos megoldásra, csupán a megoldásoknak a gyakorlatban jól hasznosítható első közelítéseit kívánják előállítani úgy, hogy az eredeti nemlineáris mozgásegyenlethez valamilyen meggondolással egy ekvivalens lineáris egyenletet rendelnek hozzá [38], [39]. A linearizálás egyik előnye az, hogy a linearizált modell hagyományos analitikus eszközökkel jól kezelhető. Emellett – a *gépészmérnöki gyakorlatban elvárt módon* – többszabadságfokú rendszerek esetén is gyorsan analitikus összefüggéseket biztosít, amely a konstrukciós paraméterek befolyását könnyen áttekinthetővé teszi. Az ilyen linearizálási módszerek viszonylagos egyszerűsége és szemléletessége illeszkedik a mérnöki gondolkodásmódhoz. A [2], [19], [42] művek szakaszosan folytonos rendszerek linearizálására mutatnak példát.

Jelen értekezés egy, a [38], [39] művekben részletezett linearizálási eljárásra, a fázisgörbe feletti linearizálás módszerére – *mint szemléletes mérnöki módszerre* – támaszkodva állítja elő a Coulomb-súrlódással csillapított, kétszabadságfokú elektromechanikai rezgőrendszer ekvivalens lineáris egyenletrendszerét. Ezt követően hagyományos analitikai eszközökkel meghatározza a rendszer amplitúdó-gerjesztő körfrekvencia függvényeit. Az amplitúdó-gerjesztő körfrekvencia görbék stabilis szakaszainak feltárását a [7] (170-172.o.), valamint a [24] (167-170.o.) művekben is megtalálható módszer segítségével végezzük: függvényvizsgálat alapján megnézzük, hogy a súrlódási erő értékének kicsiny megváltozása az amplitúdó-gerjesztő körfrekvencia függvény milyen változását idézi elő. Az általunk alkalmazott Coulomb-féle súrlódási modell hűtőkenőanyag jelenlétét nem veszi figyelembe, és eltekint a súrlódási erő szuperfiniselési folyamat közben történő változásától.

2. AZ ÉRTEKEZÉS CÉLKITŰZÉSE

Jelen értekezés a szuperfiniselő berendezés fentiekben bemutatott irányú továbbfejlesztésének dinamikai vizsgálatát, energetikai viszonyainak feltárását tűzi ki céljául. Ehhez a szuperfiniselő berendezés olyan mechanikai modelljét alkotjuk meg, amely alkalmas lehet a rendszer dinamikai viselkedésének és energetikai viszonyainak leírására. Az energetikai viszonyokat adott szempontrendszer alapján ítéljük meg.

A gépészmérnöki gyakorlatban megszokott módon első lépésben a szuperfiniselő berendezés lineáris modelljét alkotjuk meg. Ekkor a szuperfiniselési folyamatot sebességgel arányos, lineáris csillapításként modellezzük. A lineáris modell segítségével először elvégezzük a korábbi prototípus, majd azt követően az új típusú berendezés dinamikai vizsgálatát, energetikai

viszonyainak feltárását, és ezekből kiindulva igazoljuk az alkalmasan megválasztott rugalmas elem energetikai viszonyokra gyakorolt kedvező hatását.

Második lépésben a lineáris modellt finomítjuk: feltételezzük, hogy a kövek és a munkadarab között Coulomb-féle csillapítás ébred. Figyelmen kívül hagyjuk a mozgás- és nyugalombeli súrlódás közötti különbséget, és a stick-slip jelenségét. A súrlódási erő nagyságát a szuperfiniselési folyamat időtartama alatt végig állandónak tételezzük fel. Feltételezzük továbbá, hogy a mozgó tömegek elmozdulása a berendezés méretéhez képest kicsi. A nemlineáris mozgásegyenlet-rendszer megoldását a fázisgörbe feletti linearizálás módszerével közelítjük. Elvégezzük a közelítés eredményeként adódó amplitúdó-frekvencia függvények stabilitás vizsgálatát. A stabil görbeág ismeretében megvizsgáljuk a nemlineáris rendszer energetikai viszonyait. A kapott analitikus eredményeket néhány esetben numerikus kísérletekkel ellenőrizzük.

Megvizsgáljuk, melyik gerjesztő frekvencia esetén kedvezőbb a nemlineáris modell viselkedése. Megvizsgáljuk továbbá, milyen lehetőség adódik egy olyan szuperfiniselő berendezés tervezésére, amely a prototípuséhoz képest kisebb teljesítményű lineáris motorral is működtethető. A vizsgálatoktól azt várjuk, hogy a kísérletek során meghatározott megmunkálási paraméterek mellett a prototípushoz képest kisebb méretű és tömegű, gazdaságosabban működő, az alapgép munkaterében kedvező pozícióban elhelyezhető szuperfiniselő berendezés megépítésére nyílik lehetőség.

3. A VIZSGÁLATOK MÓDSZEREI

Az értekezés elméleti módszereket alkalmaz a kitűzött feladatok megoldására. A vizsgálatok során elsősorban a mechanika nemlineáris rezgésstanban alkalmazott módszerei, valamint a matematika nemlineáris mozgásegyenletek közelítő megoldásaival foglalkozó módszerei kapnak szerepet [7], [17], [24], [36], [37], [40], [47]. A nemlineáris mozgásegyenlet-rendszer közelítő megoldásainak előállítására a fázisgörbe feletti linearizációs módszert alkalmazza [38], [39]. A stabilitásvizsgálatnál az értekezés a differenciálszámítás ismert eszközeit használja. A megoldások előállítása, valamint vizsgálata során a matematikai analízis ismert eszközei mellett a MAPLE12 és a MATLAB/SIMULINK 6.5 matematikai szoftverek alkalmazásán keresztül a numerikus matematika eszközei is felhasználásra kerülnek [18], [33].

4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

T.1. A Lagrange-féle másodfajú mozgásegyenletből kiindulva előállítottam egy rezgéstani elven működő, rövid löketű, villamos hajtású – *továbbiakban: új típusú* – szuperfiniselő berendezés elektromechanikai modelljének lineáris mozgásegyenlet-rendszerét, melyből a rugalmas tag elhagyásával felírtam a Miskolci Egyetem Szerszámgépek Tanszékén megtervezett és legyártott lineáris motoros hajtású, rövid löketű szuperfiniselő – *továbbiakban: prototípus* – berendezés közelítő vizsgálatra alkalmas elektromechanikai modelljének mozgásegyenlet-rendszerét. Az előállított zárt alakú megoldások ismeretében részben analitikus, részben numerikus eszközökre támaszkodva megvizsgáltam az energetikai mennyiségek szélsőértékhelyeit, amelyekről megállapítottam, hogy a prototípus berendezés modellje esetén nem létezik olyan gerjesztőfrekvencia, amelynél a legkedvezőbb energetikai állapotra vonatkozó szélsőértékek egyszerre teljesülnek.

- T.2. Megállapítottam, hogy a Lehr-féle csillapítási tényező elég kis értéke mellett a prototípus berendezés modelljét továbbfejlesztve, alkalmasan megválasztott rugalmas taggal kiegészítve, és így előírt gerjesztő frekvenciára hangolva, a vizsgált energetikai mennyiségek rezonancia frekvenciánál olyan szélsőértékekkel rendelkeznek, melyek esetén az új típusú berendezés rezonancia frekvenciánál a legkedvezőbb energetikai viszonyok között működik. A vizsgálatok során előállított egzakt és közelítő szélsőértékeket numerikusan ellenőriztem.
- T.3. Numerikus kísérletek segítségével megmutattam, hogy azonos megmunkálási paraméterek mellett, a rezonancia frekvencián gerjesztett új típusú berendezés az ugyanezen frekvencián gerjesztett prototípushoz képest kedvezőbb energetikai viszonyok között működik, így az előírt megmunkálási paraméterek gazdaságosabb energia felhasználás mellett teljesülnek.
- T.4. A lineáris mozgásegyenlet-rendszerből kiindulva, a lineáris csillapítási modell helyett Coulomb-féle súrlódást feltételezve felírtam az új típusú berendezés nemlineáris mozgásegyenlet-rendszerét. A fázisgörbe feletti linearizálás módszerére támaszkodva előállítottam a rezgések amplitúdó-frekvencia függvényeit. A fázisgörbe feletti linearizálás módszeréből kiindulva felírtam a nemlineáris rendszer nemlinearitás mértékének egy zárt alakú összefüggését, amely alapján elvégeztem a linearizálás közelítésének egy becslését, és e szerint a linearizált rendszer viselkedése rezonancia frekvencia környezetében tér el legkevésbé a nemlineáris rendszer viselkedésétől. Az analitikus közelítő számításokat numerikusan is ellenőriztem.
- T.5. A Coulomb-féle súrlódás amplitúdó-frekvencia függvényekre gyakorolt hatását vizsgálva megállapítottam, hogy egy, a továbbiakban határ súrlódási erőnek nevezett erőnél kisebb súrlódási erő esetén alakul ki stabil rezgés. A stabil rezgések amplitúdó-frekvencia függvényét numerikus kísérletekkel is ellenőriztem. Megmutattam, hogy rezonancia frekvencia környezetében, a határ súrlódási erőnél kisebb erő esetén a linearizálás eredményeként adódó stabil görbeág függvényértékei a vizsgált intervallumon a határ súrlódási erő kicsiny környezetétől eltekintve jól közelítik a numerikusan kiszámolt értékeket.
- T.6. A stabil görbeág ismeretében vizsgáltam a nemlineáris rendszer energetikai viszonyait. Megállapítottam, hogy bizonyos paraméterkombinációk esetén az új típusú berendezés rezonancia frekvencia környezetében kedvezőbb energetikai viszonyok között működik. Az is igazolást nyert, hogy ugyanezen paraméterkombinációk mellett a rendszer nemlinearitás mértékének rezonancia frekvenciánál jó közelítéssel minimuma van.
- T.7. A nemlineáris rendszer vizsgálata során előállított analitikus összefüggéseket felhasználva megmutattam, hogy az előírt megmunkálási paraméterek a prototípushoz viszonyítva gazdaságosabban üzemelő és kisebb méretű új típusú berendezéssel is teljesíthetők.

5. PUBLIKÁCIÓK AZ ÉRTEKEZÉS TÉMÁJÁBÓL

TUDOMÁNYOS DOLGOZATOK

- P.1. Szilágyi A., Patkó Gy., Tajnafői J., Csáki T., Takács Gy., Demeter P.: *Nagyfrekvenciás köszörűgép dinamikai vizsgálata*. GÉP, LVI. Évfolyam, 2005. pp.: 171–174.
- P.2. Szilágyi A., Patkó Gy., Tajnafői J., Csáki T., Takács Gy., Demeter P.: *Dynamic analysis of a grinding machine vibrating at high frequency – along slides*. microCAD 2006 International Scientific Conference, Miskolc – Egyetemváros, pp: 61–66.
- P.3. Szilágyi A., Patkó Gy., Tajnafői J., Csáki T., Takács Gy., Demeter P.: *Nagyfrekvenciás köszörűgép dinamikai vizsgálata*. A Tudásintenzív Mechatronikai és Logisztikai Rendszerek Regionális Egyetemi Tudásközpont „INNOVÁCIÓ ÉS TUDÁS” című kiadványa, Miskolc 2006, ISBN 963 661 723 6, pp: 79–84.
- P.4. Csáki T., Szilágyi A., Patkó Gy., Tajnafői J., Takács Gy., Helbig, J.: *Szuperfiniselő berendezés tervezése*. MACH–TECH. GÉPGYÁRTÁS XLVII. ÉVFOLYAM, 2007. 2–3. SZÁM, pp.: 11–14.
- P.5. Csáki T., Szilágyi A., Patkó Gy., Tajnafői J., Takács Gy., Helbig, J.: *Development of a Superfinishing Device*. 8th REM2007 June 14–15, Tallin – Estonia. ISBN: 978-9985-59-707-1, pp.:124–127.
- P.6. Szilágyi A., Patkó Gy., Takács Gy.: *Improvement of a Superfinishing Device Based on Dynamical Analysis*. 8th REM2007 June 14–15, Tallin – Estonia. ISBN: 978-9985-59-707-1, pp.:128–130.
- P.7. Szilágyi A., Patkó Gy., Demeter P.: *Szuperfiniselő berendezés dinamikai vizsgálata*. X. Magyar Mechanikai Konferencia, 2007. augusztus 27–29, Miskolc, pp: 95.
- P.8. Szilágyi A., Csáki T., Patkó Gy., Tajnafői J., Takács Gy., Helbig, J.: *Development of a Superfinishing Combined Process*. ISSN 1215 – 0851 pp. 367–372. 12th ICT, Univ. of Miskolc, 6–8th Sep. 2007.
- P.9. Patkó Gy., Takács Gy., Szilágyi A.: *A new dynamical concept of a superfinishing device driven by a linear motor unit*. THE INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE CARPATHIAN EURO-REGION SPECIALISTS IN INDUSTRIAL SYSTEMS 7th EDITION, 21–23 May, 2008, Baia Mare, Romania. ISSN: 1224-3264.
- P.10. Patkó Gy., Tajnafői J., Takács Gy., Csáki T., Szilágyi A., Demeter P.: *Integrált szuperfiniselő berendezés*. Gépgyártás, XLIX. Évf., 2009. 4–5. sz., pp: 11 – 17.
- P.11. Patkó Gy., Takács Gy., Szilágyi A.: *The dynamical behaviour of a superfinishing device of a new type*. Сучасні технології в машинобудуванні [Текст]: зб. наук. праць. –Вип. 3. / редкол.: В. О. Федорович (голова) [та ін.]. – Харків : НТУ «ХПІ», 2009.–С. 69-75.

ELŐADÁSOK

- E.1. Szilágyi A., Patkó Gy., Tajnafői J., Csáki T., Takács Gy., Demeter P.: *Nagyfrekvenciás köszörűgép dinamikai vizsgálata*. Géptervezők és Termékfejlesztők XXI. Országos Szemináriuma, 2005. november 11–13, Miskolc.

- E.2. Szilágyi A., Patkó Gy., Tajnafői J., Csáki T., Takács Gy., Demeter P.: *Dynamic analysis of a grinding machine vibrating at high frequency – along slides*. microCAD 2006 International Scientific Conference.
- E.3. Csáki T., Szilágyi A., Patkó Gy., Tajnafői J., Takács Gy., Helbig, J.: *Szuperfiniselő berendezés tervezése*. „SZERSZÁMGÉPEK, SZERSZÁMOK, SZERSZÁMANYAGOK”. MACH-TECH, 2007. május 10., HUNGEXPO Budapest.
- E.4. Csáki T., Szilágyi A., Patkó Gy., Tajnafői J., Takács Gy., Helbig, J.: *Development of a Superfinishing Device*. 8th REM2007 June 14–15, Tallin – Estonia.
- E.5. Szilágyi A., Patkó Gy., Demeter P.: *Szuperfiniselő berendezés dinamikai vizsgálata*. X. Magyar Mechanikai Konferencia, 2007. augusztus 27–29., Miskolc.
- E.6. Szilágyi A., Csáki T., Patkó Gy., Tajnafői J., Takács Gy., Helbig, J.: *Development of a Superfinishing Combined Process*. 12th ICT, Univ. of Miskolc, 6–8th Sep. 2007.
- E.7. Patkó Gy., Takács Gy., Szilágyi A.: *A new dynamical concept of a superfinishing device driven by a linear motor unit*. THE INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE CARPATHIAN EURO-REGION SPECIALISTS IN INDUSTRIAL SYSTEMS 7th EDITION, 21–23 May, 2008, Baia Mare, Romania.
- E.8. Szilágyi A.: *Új típusú szuperfiniselő berendezés tervezése és dinamikai vizsgálata*. MTA GAB–Mechanizmusok Bizottsági ülés, 2008. május 7., BME.

6. AZ EREDMÉNYEK HASZNOSÍTÁSÁNAK ÉS TOVÁBBFEJLESZTÉSÉNEK LEHETŐSÉGEI

Lineáris, majd nemlineáris rendszerek energetikai vizsgálata során igazoltuk a rezonancia frekvencia más gerjesztő frekvenciákkal szembeni előnyét. Ezt megelőzően elsőközelítés-szerű modellvizsgálatokat végeztünk, amelyek további elméleti és gyakorlati kutatások alapjául szolgálhatnak.

A nemlineáris csillapítási modell fokozatos finomítása révén a dinamikai mellett az energetikai viszonyok egyre pontosabb leírása is lehetővé válik. Ilyen finomítást jelent például a stick-slip jelenségének, a nyugvó és mozgó súrlódási együtthatók különbségének, a kenőanyag jelenlétének, valamint a finiselési löketenként változó felületminőség figyelembevétele. Ezek a jelenségek bonyolultabb statikus és dinamikus súrlódási modellek segítségével vehetők figyelembe. A modell finomítása további nemlineáris jelenségekre, nem várt instabil viselkedésre irányíthatja figyelmünket. A berendezés rezonancia frekvencián üzemel, és ez keskeny frekvenciatartományt tesz lehetővé, melynek fenntartását nemlineáris adaptív szabályozással érhetjük el. Ennek megvalósítása szintén igényli a stabil-instabil tartományok pontos feltárását [3], [4], [45], [50].

Bonyolultabb csillapítási modellek mellett a finiselési folyamat részletesebb elemzése is lehetővé teszi az energetikai viszonyok mélyebb feltárását (lásd. pl. [48]).

Mivel a gyakorlatban inkább a többfázisú lineáris motorok alkalmazása terjedt el [23], [44], ezért egyfázisú helyett, a két-, háromfázisú elektromechanikai modellek további vizsgálata is indokolt.

Az értekezésben bemutatott elsőközelítés-szerű modellek vizsgálata alapján a stabil-instabil tartományok meghatározásakor előállított zárt alakú összefüggések – *a megmunkálási paraméterek ismeretében* – lehetővé teszik a tervező mérnök számára a berendezés méreteinek, tömegének és energetikai viszonyainak előzetes becslését, és ezek alapján a villamos egységek katalógusból történő kiválasztását.

HIVATKOZÁSOK

- [1] Andreus, U., Casini, P.: *Dynamics of friction oscillators excited by a moving base and/or driving force*. Journal of Sound and Vibration (2001) 245(4), 685-699.
- [2] Awrejcewicz, J., Olejnik, P.: *Analysis of dynamic systems with various friction laws*. Appl. Mech. Rev. Vol. 58, November 2005.
- [3] Babitsky, V. I.: *Autoresonant mechatronic systems*. Mechatronics Vol. 5, No. 5, pp. 483-495, 1995.
- [4] Babitsky, V.I., Kalashnikov, A.N., Molodtsov, F.V.: *Autoresonant control of ultrasonically assisted cutting*. Mechatronics 14 (2004) 91–114.
- [5] Bánhidi L., dr. Oláh M.: *Automatika mérnököknek*. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1991.
- [6] Berger, E. J.: *Friction modelling for dynamic system simulation*. Appl. Mech. Rev. Vol. 55, no. 6, November 2002.
- [7] Bosznay Á.: *Műszaki rezgésstan*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1962.
- [8] Cardona, A., Lerusse, A., Geradin, M.: *Fast Fourier nonlinear vibration analysis*. Computational Mechanics 22 (1998) 128-142.
- [9] Csáki F.: *Fejezetek a szabályozástechnikából – Állapotegyenletek*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1973.
- [10] Csáki F.: *Korszerű szabályozáselmélet*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1970.
- [11] Csernák, G., Stépán, G., Shaw, S. W.: *Sub-harmonic resonant solutions of a harmonically excited dry friction oscillator*. Nonlinear Dynamics (2007) 50: 93-109.
- [12] Csernák, G., Stépán, G.: *On the periodic response of a harmonically excited dry friction oscillator*. Journal of Sound and Vibration 295 (2006) 649-658.
- [13] Den Hartog, J. P.: *Forced vibrations with combined Coulomb and viscous damping*. Transactions of the ASME 53, 107-115, 1930.
- [14] Dupont, P., Armstrong, B., Hayward, V.: *Elasto-plastic friction model: Contact compliance and stiction*. To appear in the 2000 ACC; Chicago: AACC; June 2000.
- [15] Ferri, A. A.: *Friction damping and isolation systems*. Transactions of the ASME, Vol. 117, June 1995.
- [16] Fodor Gy.: *A Laplace-transzformáció műszaki alkalmazásai*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1966.
- [17] Harris and Crede: *Shock and vibration handbook*. McGraw-Hill Co., Inc., 1956.
- [18] Heck, A.: *Bevezetés a Maple használatába*. Juhász Gyula Felsőoktatási Kiadó, Zenon Kft., Szeged, 1999.
- [19] Hinrichs, N., Oestreich, M., Popp, K.: *On the modelling of friction oscillators*. Journal of Sound and Vibration (1998) 216(3), 453-459.
- [20] Hong, H. K., Liu, C. S.: *Coulomb friction oscillator: Modelling and responses to harmonic loads and base excitations*. Journal of Sound and Vibration, (2000) 229(5), 1171-1192.
- [21] Hong, H. K., Liu, C. S.: *Non-sticking oscillation formulae for Coulomb friction under harmonic loading*. Journal of Sound and Vibration, (2001) 244(5), 883-898.
- [22] Hundal, M. S.: *Response of a base excited system with Coulomb and viscous friction*. Journal of Sound and Vibration, 64(3):371-378, 1979.
- [23] *Industrial Linear Motors, LinMot Ö Termékkatalógus*, 14. Kiadás.
- [24] Jordan, D. W., Smith, P.: *Nonlinear ordinary differential equations*. Oxford University Press, 1999.
- [25] Kármán T., Maurice A. Biot: *Matematikai módszerek műszaki feladatok megoldására*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1967.
- [26] Kim, Y. B.: *Multiple harmonic balance method for aperiodic vibration of a piecewise-linear system*. Journal of vibration and Acoustics January 1998, Vol. 120.
- [27] Krause, P. C.: *Analysis of electric machinery*. McGraw-Hill Book Company, 1986.
- [28] Leine, R. I., van Campen, D. H., van de Vrande, B. L.: *Bifurcations in nonlinear discontinuous systems*. Nonlinear Dynamics 23: 105-164, 2000.

- [29] Levitan, E. S.: *Forced oscillation of a spring-mass system having combined Coulomb and viscous damping*. Journal of the Acoustical Society of America 32, 1265-1269, 1960.
- [30] Ludvig Gy.: *Gépek dinamikája*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1973.
- [31] Makkar, C., Dixon, W. E., Sawyer, W. G., Hu, G.: *A new continuously differentiable friction model for control systems design*. Proceedings of the 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Monterey California USA, 24-28 July, 2005.
- [32] Makkar, C., Dixon, W. E., Sawyer, W. G., Hu, G.: *Lyapunov-based tracking control in the presence of uncertain nonlinear parametrizable friction*. 2005 American Control Conference June 8-10, 2005. Portland, OR USA.
- [33] Meriam, J. L., Kraige, L. G., Harper, B. D.: *Dynamics – Solving dynamics problems in Maple*. John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [34] Mostaghel N.: *A non-standard analysis approach to systems involving friction*. Journal of Sound and Vibration 284 (2005) 583-595.
- [35] Natsiavas, S., Verros, G.: *Dynamics of oscillators with strongly nonlinear asymmetric damping*. Nonlinear Dynamics 20: 221-246, 1999.
- [36] Nayfeh, A. H., Mook, D.T.: *Nonlinear oscillations*. John Wiley & Sons, Inc. 1995.
- [37] NME Mechanikai Tanszék Munkaközössége: *Dinamika V*. Tankönyvkiadó, Budapest, 1981.
- [38] Patkó Gy.: *Dinamikai eredmények és alkalmazások a gépészetben*. A Miskolci Egyetem Habilitációs Füzetek, Miskolc, 1998.
- [39] Patkó Gy.: *Közelítő módszer nemlineáris rezgések vizsgálatára*. Kandidátusi értekezés, Miskolc, 1984.
- [40] Pontrjagin, L., Sz.: *Közönséges differenciálegyenletek*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1972.
- [41] Pratt, T. K., Williams, R.: *Non-linear analysis of stick-slip motion*. Journal of Sound and Vibration, 74(4):531-542, 1981.
- [42] Ramos, J. I.: *Piecewise-linearized methods for initial-value problems with oscillating solutions*. Applied Mathematics and Computation 181 (2006) 123-146.
- [43] Shaw, S. W.: *On the dynamic response of a system with dry friction*. Journal of Sound and Vibration (1986) 108(2), 305-325.
- [44] *Simodrive – Linearmotoren 1FN1-1FN3*. SIEMENS Termékkatalógus, 2006. 02.
- [45] Sokolov, I. J., Babitsky, V. I., Halliwell, N. A.: *Autoresonant vibro-impact system with electromagnetic excitation*. Journal of Sound and Vibration 308 (2007) 375–391.
- [46] Stein, G. J., Zahoransky, R., Mucka, P.: *On dry friction modelling and simulation in kinematically excited oscillatory systems*. Journal of sound and Vibration 311 (2008) 74-96.
- [47] Thompson, J. M. T., Stewart, H. B.: *Nonlinear dynamics and chaos*. John Wiley & Sons, 2001.
- [48] Tyurin, A. N.: *Energy Interaction of Tool and Blank in Superfinishing*. ISSN 1068-798X, Russian Engineering Research, 2008, Vol. 28, No. 5, pp. 450–453. © Allerton Press, Inc., 2008. Original Russian Text © A.N. Tyurin, 2008, published in Vestnik Mashinostroeniya, 2008, No. 5, pp. 52–55.
- [49] van de Vrande, B. L., van Campen, D. H., de Kraker, A.: *An approximate analysis of dry-friction-induced stick-slip vibrations by a smoothing procedure*. Nonlinear Dynamics 19: 157-169, 1999.
- [50] Voronina, S., Babitsky, V.: *Autoresonant control strategies of loaded ultrasonic transducer for machining applications*. Journal of Sound and Vibration 313 (2008) 395-417.
- [51] Yeh, G. C. K.: *Forced vibrations of a two-degree-freedom system with combined Coulomb and viscous damping*. Journal of the Acoustical Society of America 32(10):14-24, 1960.