

Beszámoló jelentés

Projekt címe: Gépszerkezetek érintkezési paramétereinek azonosítása nemlineáris dinamikai kísérletekkel

OTKA azonosító: **K101714**

A munka kezdete és befejezése: **2012. január 1. - 2015. december 31.**

Témavezető: **Dr. Stépán Gábor egyetemi tanár**

A kutatás célja a gépekben, gépszerkezetekben kísérleti úton meghatározott érintkezési erők modellezése és leírása részben a gép üzemelése közben végzett kísérletekkel, kimérve annak lineáris és nemlineáris dinamikai tulajdonságait. A mérnöki alkalmazások között kiemelten kívántunk foglalkozni a gyártási folyamatok közben fellépő forgácsoló erőkkel, a járműdinamikában a kúszóerőkkel, robotok erőszabályozása esetében az ember-gép érintkezési erőkkel, vagy az egyszerű csúszó és tapadó száraz súrlódási erőkkel például merev testek kétpontos gördülése esetén.

Ezt a célt a kutatás során nem kellett módosítani, a munka a tervek szerint haladt, de a költségek és azok struktúrája jelentősen csökkent az eredeti munkatervben szereplő elképzelésekhez képest. Ennek oka, hogy a témavezető által 2014 áprilisában elnyert ERC projekttel való részbeni átfedés miatt az OTKA szerződés módosítására került sor. A beruházási, személyi teljesen töröltük, a dologi költségek egy részét is csökkentettük a 2014. július 14-én módosított szerződésben.

A személyi összetétel vonatkozásában a szenior kutatókban nem volt változás a projekt négy éve alatt. Közülük Insperger Tamás 2015-ben a projekt témájához részben kapcsolódó kutatási eredményeivel elnyerte az MTA doktora címet. 2013 decemberétől 2014 júliusáig John Milton csatlakozott a csoporthoz, aki a kaliforniai Pomona College professzora, és akinek vendégül látásához az MTA kiemelt védéskutatói pályázatát nyertem el.

A fiatal kutatók személyében és a nem-kutató résztvevők tekintetében voltak kisebb változások. Két új PhD hallgató csatlakozott a csoporthoz, akik név szerint nem voltak megemlítve a pályázatban, de felvételük tervezve volt: Giuseppe Habib és Antali Máté. A projekt ideje alatt a többi fiatal résztvevő közül Dombóvári Zoltán még 2012-ben, Bachrathy Dániel és Giuseppe Habib 2013-ban, Magyar Bálint és Zelei Ambrus pedig 2015-ben védtek meg értekezéseiket, melyek témái mind az OTKA projektből adódtak. A fiatal kutatók közül Miklós Ákos is megvédte PhD fokozatát 2015-ben, az ő értekezésének témája azonban ettől eltérő volt. 2015-ben további két résztvevő, Reith Márta és Antali Máté is elindították doktori cselekményüket szintén a projekt keretében elért eredményeikkel, várhatóan 2016-ben nyújtják be értekezéseiket. Összesen tehát 6 PhD védésre került sor a projekt kutatócsoportjában, melyekből 5 szorosán a projekthez kapcsolódott. Giuseppe Habib a római La Sapienza egyetemmel közös program keretében kapott kettős PhD diplomát Budapesten és Rómában.

A nem-kutató résztvevők közül Szmolyán Mária csatlakozott a kutatáshoz, mivel a digitális könyvtárászati munka olyan megerhelést jelentett kutatóinknak, hogy azt vele tudtuk hatékonyabbá tenni.

Röviden összefoglalva, a projektben dinamikus érintkezési feladatokat oldottunk meg. A kialakított mechanikai modellezési módszertan és a hozzájuk kapcsolódó matematikai megközelítés lényege, hogy az érintkezési tartományok bonyolult mechanikai deformációs és termodinamikai folyamatait leíró, nagy számítási igényű és csak numerikusan kezelhető parciális differenciálegyenlet-rendszerekkel szemben egyszerűsített, késleltetett differenciálegyenletes modellezést alkalmazunk. Ezek a bonyolultabb modellekből haladó hullám jellegű megoldásokkal származtathatók.

A módszer előnye, hogy az ezekre kifejlesztett megfelelő numerikus megoldási eljárás (a szemi-diszkrétizáció) számítási igénye jelentősen kisebb. Másik előnye, hogy a klasszikus stabilitási és bifurkációs vizsgálatok végtelen dimenziós kiterjesztésével sokszor analitikus eredmények is elérhetők. Ezeket sikerrel alkalmazzák azután a nagy bonyolultságú véges elemes számítások tesztelésére is.

A modellezési és számítási technika feltétlenül kísérleti igazolást igényelt, mivel eredményei sokszor a mérnöki intuícióval ellentétesek. Számos egyszerűsített laboratóriumi és az ERC projekt támogatásával néhány ipari szintű kísérlettel igazoltuk eredményeinket. A sikeres mérnöki alkalmazások között említjük a fémek forgácsolása során fellépő forgácsoló erőket, a járműdinamikában az egyszerű csúszási/tapadási súrlódó erőktől a kúszóerőig, illetve a robotok erőszabályozását ahol gép-munkadarab, illetve gép-ember között jelentkeznek érintkezési erők.

A következőkben a projekt eredményeit és előrehaladását a munkaterv szerinti évenkénti bontásban ismertetjük.

2012.01.01-2012.12.31.

A projekt indulásával egy időben Reith Márta kezdett új doktoranduszként dolgozni, és jelentős részben az ő munkájával a tervezett szakirodalmi kutatást elvégeztük. Az érintkezési erők nemlineáris karakterisztikájának azonosításával kapcsolatos szakirodalmi adatok és eredmények beépítésre kerültek a megjelenő publikációk bevezető fejezeteiben.

Megtörtént a laboratóriumban a három tervezett kísérleti eszköz felújítása, rendszerbe állítása. A kisméretű 3D NC marógép számítógépes vezérlése működőképes állapotba került, bár szoftver rendszerén további fejlesztést terveztünk az első tapasztalatok alapján. Elvégeztük a szerszám gép első kísérleti modális analízisét és az eredményeket összevetettük véges elemes számítógépi modellek eredményeivel. Az egyezés kielégítő, további pontosítását 2013-ban terveztük. Az eredményeket részben egy Peridoc Polytechnica cikkben, illetve hazai konferencián publikáltuk.

A szállítószalagos kerék kísérleti berendezést szintén működőképes állapotba hoztuk. Az első sikeres, az érintkezési erő hatására keletkező hő kitűnően szemléltető hőkamerás felvételeket és ennek matematikai modellezését a Vehicle System Dynamics folyóiratban publikáltuk Takács Dénessel.

Az ember-gép érintkezési erőkkel kapcsolatos feladatokhoz a robotos rendszerek építése most is folyamatban van, részeredményeket a CISM-IFTOMM RoManSy konferencián Zelei Ambrus doktorjelölttel publikáltunk, illetve az Interface folyóiratban jelent meg publikációnk John Milton amerikai kollégával közösen, későbbi vendégkutatónkkal, amiben a gyorsulásjelek érzékelésének és késleltetett visszacsatolásának hatását elemeztük. A robot

kísérletekkel kapcsolatos további részeredmények a Peridocia Polytechnica folyóiratban jelentek meg Magyar Bálint társszerzésével, aki szintén doktorjelöltként vesz részt a projektben.

A nemlineáris forgácsolóerőkkel kapcsolatos, a lehetséges kísérleti módszereket elemző elméleti vizsgálatokat és részben kezdeti kísérleteinket is felhasználó eredményeket konferenciákon publikáltunk. Ezek között Dombóvári Zoltán doktorjelölttel a terveknek megfelelően az ICTAM 2012. évi pekingi világtalálkozóán szerepeltünk előadással és kibővített összefoglalóval, ugyanitt a terveknek megfelelően szerveztem egy az anyagmegmunkálás nemlineáris dinamikájával foglalkozó szimpóziumot, amit a szervező bizottság elfogadott és amin mintegy 14 előadás hangzott el. Hasonló eredményekről számoltunk be proceedings cikkben és előadásban az eindhoveni 2. Mélyfúrás dinamikája konferencián. Az eredmények verifikált része végül egy ASME folyóirat cikkben is megjelentek.

2013.01.01-2013.12.31.

A kísérleti berendezések közül mind a szerszámgéprezgési vizsgálatokhoz kiépített kisméretű NC marógépen, mind a kerékgördülési vizsgálatokhoz fejlesztett futószalagos mérőberendezésen tovább folytattuk kísérleteinket. Egy nemlineáris rúdszerkezeten végzett rezgésmérésekhez kialakított laborberendezés pedig a terveken felül került összeállításra gerjesztett nemlineáris rezgési vizsgálatokhoz, többek között az instabil periodikus mozgásoknak a gerjesztési frekvencia függvényében megjelenő hiszterézis kimérésén alapuló azonosításához. Ez a laboratóriumi kísérlet egy egyszerűsített formában reprezentálta a szerszámgépeken jelentkező nemlineáris regeneratív rezgéseket, azok kimérésének lehetőségét, miközben a gerjesztő erőt szabályoztuk.

Az ember-gép erőkapcsolatokhoz épülő további robotikai berendezések egy része csak 2014-ben készült el, de a tervezéssel kapcsolatban végzett kutatómunka eredményei publikálásra kerültek nemzetközi konferencián. Beszereztünk és részben átalakítottunk továbbá egy számítógéppel szabályozható aero-ingát, amivel laboratóriumi körülmények között jól tudjuk kísérletileg tanulmányozni a meghajtó ventilátornak, mint késleltetett szabályozóerőnek a karakterisztikáját, illetve ennek hatását a kialakuló nemlineáris rezgésekre, a rendszer stabilitására. Az ezzel kapcsolatos mérési eredményeket nemzetközi folyóirat cikk formában benyújtottuk, miközben már elfogadták az elméleti modellezést és annak analízisét. A kísérleti cikk bírálatai nyomán sok további mérés elvégzésére volt szükség, végső elfogadására csak két év múlva került sor.

A terveknek megfelelően három módszerrel is kísérleteztünk a nemlineáris erő-karakterisztikák instabil határciklusokon keresztüli azonosítására. Ezeket mind az NC szerszámgépen, mind a futószalagos jármű vontatmány modelleken, illetve az említett egyszerű újonnan épített laborberendezéseken kipróbáltuk. Várakozásunknak megfelelően a legegyszerűbb, növekvő perturbációra épülő kísérletek adták a gyors, látványos, videóra is jól rögzíthető eredményeket, melyeket jól tudtunk használni konferencia előadásainkban. A stabilitási határokhoz kapcsolódó hiszterézist egyelőre csak a legegyszerűsített új modelleken sikerült jól kimérni, az instabil határciklusokra történő szabályozást, azok stabilitásának pedig egyedül az aero-inga esetében sikerült valamelyest megvalósítani. Ezzel az utóbbi módszerrel csak komolyabb szabályozó rendszer kiépítése esetén tudtunk volna továbblépni, ezek meghaladták az adott évben pénzügyi kereteinket.

A tervezett három gépészeti alkalmazási területen elért eredményeket sikerült négy magas hatástényezőjű folyóiratban publikálni. Ezek közül az egyensúlyozás során az ember és a gép kapcsolatát meghatározó érintkezési erő modellezése, mint gyorsulás jel visszacsatolása, az eredeti terveken túlmenő eredmény volt, ezt a kaliforniai John Milton professzorral közösen értük el és publikáltuk, ezért szerepel ennél a publikációnál az NSF támogatása is. A kutatási eredményeket mind a három alkalmazási területen, konferenciákon is előadtuk, az eredeti terveknek megfelelően a SIAM és az ASME kongresszusokon, illetve nyitó plenáris előadás keretében az ICOVP'2013 nemzetközi konferencián Lisszabonban. Ebben az évben nyertük el Milton professzor számára az MTA vendégprofesszori támogatást is, amivel 2014-ben fél évet dolgozik kutatócsoportunkban.

2014.01.01-2014.12.31.

A projekt a 2014-es évben is a terveknek megfelelően haladt a kiegészítéssel, hogy az elnyert ERC támogatás miatt szerződés módosításra került sor: változatlan feladatok mellett az eredeti költségvetést csökkentettük a beruházási és személyi költségek 2014 és 2015 évekre eső részével. Az ERC projekt célkitűzései részben fedik az OTKA projekt alapkutatási témáján belül a szerszámgéprezgésekkel kapcsolatos feladatokat, miközben az ERC projekt pedig sokkal kiterjedtebb kísérleti program megvalósítását teszi lehetővé. Ennek megfelelően egy olyan kísérleti célú, nagy forgácsolási sebességű szerszám gép beszerzésének előkészületei indultak meg, amit az ERC program finanszíroz. Ezen a meglévő kisméretű marógépünkön a 2013/14-ben elvégzett modális analízis kísérleteket 2015-ben terveztük megismételni, immár az ipari körülményeknek megfelelő módon. Ehhez jól felhasználhatóak azok a 2014-es kísérleti vizsgálati eredmények, amelyek a stabilitási térképeknek a mért modális paraméterekre való érzékenységgel foglalkoztak – ezek publikálására a projekt utolsó évében sor is került.

Az előzetes terveken túlmenő kísérleti lehetőségeket kínált 2014-ben a marási folyamatok nagysebességű kamerával való megfigyelése. Ezt is az EC projektből adódó többlet támogatás tette lehetővé, ugyancsak megkezdődött egy professzionális erőmérő cella beszerzése, amellyel a nagysebességű marási műveletek közben is tudtuk mérni az érintkezési erők változását. Az első méréseket még az előző években az OTKA projekt keretében összeállított kisméretű marógépen végeztük el, a nagysebességű kamerás felvételeket is felhasználó kutatási eredményeinket a szerszám és a munkadarab időközönkénti elválása okozta érintkezési problémáról benyújtottuk, 2015-ben meg is jelent. A marási műveletek kísérleti stabilitási vizsgálatát segítő gyors stabilitási térkép készítő eljárásról a szakterület legrangosabb (CIRP) folyóiratában jelent meg 2014-ben publikációnk. Több nemzetközi konferencia cikk is született további eredményekről, ezek között különösen jól haladt a többkétes esztergálás vizsgálata, amire együttműködő vállalatnál kísérleti berendezés is épült. Egyeztetéseket folytattunk továbbá egy török partnerrel (Prof. Erhan Budak, Sabanci University) akik rendelkeztek ipari többkétes esztergákkal laboratóriumukban, és 2015 elején ott is tudtunk mérési sorozatot elvégezni.

A munkatervben foglaltaknak megfelelően elkezdtük tanulmányozni a szakirodalom kontinuummechanikai modelljeit a forgácsolóerő dinamikai számításokhoz alkalmas becslésével kapcsolatban. Úgy döntöttünk, hogy ezek alapján, az eredeti terveken túlmenően véges elemes mechanikai modelleket is építünk, ezek fejlesztése ABAQUS környezetben 2014-ben megkezdődött, az első publikációt ezen a témán is benyújtottuk. A késleltetett rendszerek kontinuumokhoz történő csatolásával kapcsolatban egy matematikai eredmény fizikailag paradox következményének feloldására jelentettünk meg egy eredményt

nemzetközi folyóiratban. Ez elméleti alapját képezheti a későbbi pontosított forgácsolási modelleknek. Ezt az elméleti kutatási vonalat egy 2013-ban elnyert két éves kínai-magyar TÉT projekt keretében tovább folytattuk.

A gördülési feladatoknál jelentkező dinamikus érintkezési erőket a tervekben elképzelt stratégia szerint a forgácsolóerőkhöz hasonlóan tudtuk kezelni. További futószalagos kísérleteket végeztünk a kutatás első éveiben kialakított laboratóriumi berendezésen. Az eddig alkalmazott kapcsolt parciális és integro-differenciálegyenletekkel történő megközelítés mellett egy új elméleti módszert is kidolgoztunk, ami klasszikus, de nem-sima modelleket alkalmaz. Ezzel is sikerült új eredményeket elérni elsősorban olyan esetekben, amikor elhanyagolhatóan kicsi az érintkezési tartomány. Az eredmények közül a vasúti kerekek klasszikus öngerjesztett rezgési frekvenciájának pontosítását sikerült elvégezni, melyet rangos nemzetközi folyóiratban (Multibody System Dynamics) fogadtak el megjelenésre. Az eredményeket csapágyakra általánosítjuk, és terveink szerint kapcsoljuk a szerszámrezgési feladatokhoz, amikor a szerszámgépek főorsóinak dinamikáját modellezzük nagysebességű forgás közben. Ez elengedhetetlen lesz a marási folyamatok stabilitási tulajdonságainak pontos előrejelzésében.

A dinamikus érintkezési feladatok harmadik alkalmazási területe a robotika, ahol részben egy leegyszerűsített aero-ingát használtunk a kísérletekhez, illetve a korábbi EU5-ös projektből maradt Reharob illetve az EU6-os projektből az Acroboter berendezéseken tudunk kísérletezni. Az itt elért eredményekből két PhD dolgozat készült el ebben a kutatási évben, melyek többek között a robotok pozíció és erő szabályozása közötti átkapcsolásával foglalkoznak, azaz a munkatervben rögzítetteknek megfelelően a dinamikus érintkezési erők modellezését is elvégezték. Zelei Ambrus és Magyar Bálint, a projekt doktorandusz tagjai ebben az évben elindították doktori cselekményeiket. védik meg értekezéseiket.

Az eredeti munkatervnek megfelelően a kutatócsoport szinte teljes létszámban részt vett a bécsi Európai Nemlineáris Rezgések Konferencián több előadással és cikkel, ahol elnyertük a 2017-es budapesti rendezés jogát is. Insperger Tamással közösen pedig a Springer kiadónál indult International Journal of Dynamics and Control folyóiratnál két 2014-ben kiadott különszámot szerkesztettünk időkélseltetett dinamikai rendszerekről, melyben szintén jelent meg cikk az OTKA kutatási témánk eredményeiről.

2015.01.01-2015.12.31.

A munkaterv szerint a kutatás utolsó éve a szintézis és az eredmények disszeminációjának időszaka. A rövid összefoglalóban ismertetett kutatási módszertan és számítási algoritmusok eredményei a projekt szempontjából lezárhatóak, de az ERC projekt keretében ezeknek a szerszámgéprezgésekre vonatkozó, iparilag közvetlenül is hasznosítható része még további évek kísérleti és modellezési munkáját követeli meg. Ezekhez nagyon hasznos alapot teremtett az OTKA projekt.

A mérési feladatok közül az utolsó év januárjára húzódott át a 2014-ben egyeztetett kétképes esztergálási kísérletsorozat a Sabanci University-n, ahova Reith Márta és Bachrathy Dániel utazott el. Az eredmények Reith Márta PhD dolgozatának fontos téziseit támasztják majd alá, két ebből készült folyóirat cikk közül az egyik elfogadásra került, a másik bírálat alatt van. A munkatervben szereplő ez évi ASME konferencián proceedings cikk is jelent meg a témában, az előadást Reith Márta tartotta meg Bostonban.

Az eredeti terveknek megfelelően került sor a további publikációkra. Májusban Salt Lake City-ben a SIAM Alkalmazott Dinamikai Konferenciáján mini-szimpoziumot szerveztünk, és abban előadásra került a késleltetett kontinuummechanikai modellek paradoxonja, illetve annak lehetséges feloldása. Ezt később egy Shanghai-ban megrendezett kínai mechanikai konferencián is előadta a társszerző, illetve az év végén a rangos Journal of Sound and Vibration folyóirat is elfogadta az ebből készült cikket, ott 2016 januárjában megjelent. Ezek az eredmények lezáró jellegük mellett már a következő, alapkutató jellegű feladatok irányába mutatnak.

Ugyancsak az eredeti elképzeléseknek megfelelően szerepeltünk a pekingi ICIAM Nemzetközi Ipari és Alkalmazott Matematikai Kongresszuson a nemlineáris forgácsolóerőhöz kapcsolódó témával. Ugyanennek a témának a megmunkált felületi minőségre gyakorolt hatásáról egy a kínai Nanjingban megrendezett CIRP konferencián számoltunk be, ahol az eredményekről egy folyóirat publikáció is megjelent ismét csak 2016 januárjában. Itt a kapcsolódó kísérletek egy részét egy amerikai vállalatnál hajtották végre, de az általunk megadott kísérleti metodika szerint. Egy további rangos folyóirat publikációnk jelent meg a nemlineáris forgácsoló erő dinamikai hatásaival kapcsolatban az úgynevezett „process damping”, a megmunkálási folyamat közben kis sebességnél jelentkező csillapító hatás figyelembe vételével.

A robotikai témákban az előző év eredményeinek folyóirat publikációi történtek meg, három folyóirat cikk még Giuseppe Habib PhD dolgozatának utolsó eredményei, illetve a 2013 óta végzett „aero-pendulum” kísérletek következtetései voltak, illetve ugyancsak a projekt utolsó évében jelent meg amerikai vendégkutatónkkal közös cikkünk egy japán szerkesztésű könyv első, bevezető fejezeteként. Végül a gördülési feladatok záró publikációjaként a Multibody System Dynamics-ban jelent meg egy cikk Antali Mátéval, aki ennek alapján a projekt záró évében elindította doktori cselekményét. A cikkben a nemlineáris érintkezési erők okozta dinamika nem-sima modellezésével sikerült pontosítani a vasúti kerekek gördülésekor jelentkező rezgési frekvenciák klasszikus képletét.

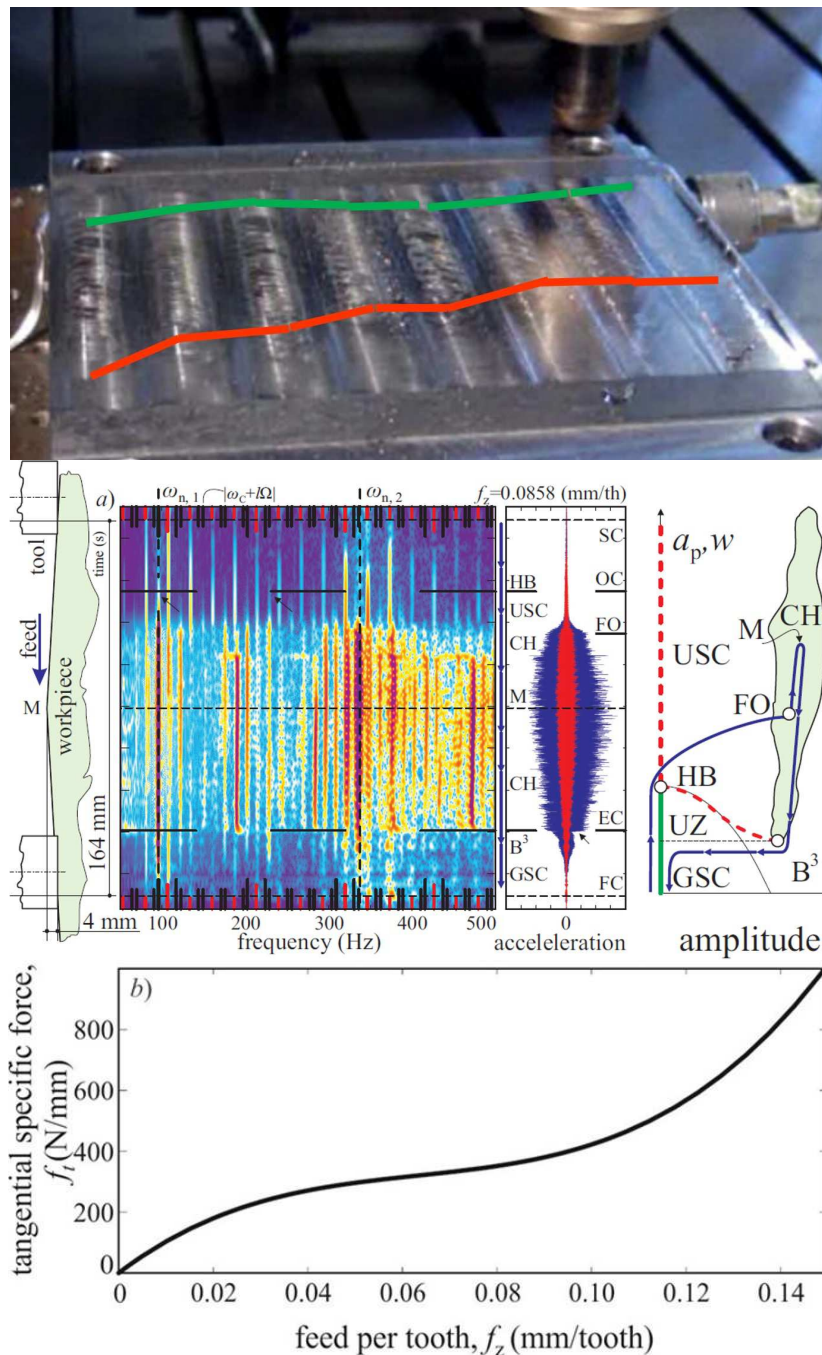
Hasznosítás, záró megjegyzések

Hazánkban számos nagy teljesítményű gyártósor működik maximális kihasználtsággal. Ezek teljesítménye nemzetközi versenynek van kitéve. Teljesítő képességük növelésének egyik korlátja a szerszámgépeken keletkező öngerjesztett rezgések. Ezek elkerülése tervezhető, ha a szerszámgépek dinamikai tulajdonságait megfelelő kísérleti módszerekkel azonosítjuk, monitorozzuk, és ennek alapján tervezzük, módosítjuk az alkalmazott technológiát. A projekt eredményei elsősorban ezen a területen jelenthetnek gazdasági hasznot.

Az OTKA projekt kidolgozása során sikerült elnyerni a hasonló témájú, de sokkal nagyobb léptékű ERC Advanced Grantet (no. ERC-2013-AdG/340889): Stability Islands: Performance Revolution in Machining (SIREN). A projekt elnyerése után egy belga partnerrel (Prof. Gaetan Kerschen, University of Liege) pályáztunk az ERC „Proof of Concept” felhívásában is, ahol a belga partner szabadalmaztatott rezgéscsökkentő módszerét kívántuk kapcsolni szerszámgép dinamikai vizsgálati eredményeinkhez.

A győri Audi Hungária gyártósorain végeztünk kezdeti méréseket, több tárgyalást folytattunk, és tervezzük, hogy az ERC projekt utolsó évében velük pályázzunk ismét az ERC „Proof of Concept” felhívására.

Gyártósorok teljesítményének növelését a szerszámgépeken keletkező rezgések korlátozzák. A rezgések előre jelzése segíti a technológia tervezését, optimalizását, a selejt arányának csökkentését, a megmunkált munkadarabok felületének jobb minőségét.



A kutatási eredmények egyfajta grafikus összefoglalóját, a kialakult modellezési, analitikus, numerikus és kísérleti vizsgálatok alkalmazásának menetét szemlélteti a fenti ábra egy homlokmarási művelet esetén, ahol a megmunkált felületi minőség mellett jól követhető a wavelet transzformációval jellemzett gazdag spektrumú rezgések hiszterézis jellege a szubkritikus Hopf és a „Nagy Bumm” bifurkációk között, és bemutatjuk az ezek mögött meghúzódó, rekonstruált, inflexióval rendelkező nemlineáris forgácsolóerő karakterisztikát is.