



BUDAPESTI MŰSZAKI EGYETEM
KÖZLEKEDÉSMÉRNÖKI KAR
„JÁRMŰVEK ÉS MOBILGÉPEK” TUDOMÁNSZAK

ÉPÍTŐGÉPEK, ANYAGMOZGATÓGÉPEK ÉS ÜZEMI LOGISZTIKA TANSZÉK

**ÉPÍTŐ ÉS ANYAGMOZGATÓ GÉPEK TEHERVISELŐ ELEMEINEK
SZERKEZETI DIAGNOSZTIKÁJA**

A

KÍSÉRLETI MODÁLIS ELEMZÉS ALKALMAZÁSÁVAL

**Ph.D. Értekezés
TÉZISFÜZET**

Készítette:

**Dr. Univ. Pápai Ferenc
Okleveles Gépészmérnök**

Témavezető:

**Dr. Prof. Kulcsár Béla
Tanszékvezető Egyetemi Tanár**

2007

TARTALOMJEGYZÉK

1	BEVEZETÉS.....	3
1.1	A KUTATÁS SZAKIRODALMI ELŐZMÉNYEI	3
1.2	A KUTATÁS CÉLKITŰZÉSEI ÉS MÓDSZEREI	6
2	ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK.....	6
3	AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN KÉSZÍTETT SAJÁT PUBLIKÁCIÓK	11
4	HIVATKOZÁSOK A SZERZŐ PUBLIKÁCIÓIRA	12
5	HIVATKOZÁSOK JEGYZÉKE.....	12

1 BEVEZETÉS

Az ipari körülmények között működő anyagmozgató gépek szerkezeti felügyelete a modern „berendezés üzemeltetés” fontos feladata. Mechanikai szerkezetek diagnosztizálásának célja, hogy meghatározzák annak technikai, műszaki állapotát, és amennyiben az nem kielégítő, lokalizálják a hiba, a károsodás helyét és felbecsülik annak mértékét. Forgógépek diagnosztizálásának legelterjedtebb eszköze a rezgésdiagnosztika. Amikor a vizsgált rezgésjellemző meghalad egy bizonyos értéket, legyen az szabványelőírás, vagy a gyártó ajánlása, elemző vizsgálatokat kell végezni a hiba okának azonosítására, azonosítására. Az építő- és anyagmozgató gépek diagnosztikai feladatai között, a forgógépek monitorozása mellett egyre nagyobb szerepet kap a teherviselő mechanikai szerkezetek állapot-felügyelete is. Az anyagmozgató gépek között pedig különlegesen fontos szerep jut a híddaruknak. Ezek a gépek a mai fejlett ipari gyártó és logisztikai kapacitások, a gyártó, a szerelő, energiatermelő és kiszolgáló csarnokok alapvető infrastruktúrájához tartoznak. A híddaruk üzemének fenntartása, rendszeres felügyelet (monitorizálás) nélkül ma már elképzelhetetlen. Fontos kutatási célkitűzés tehát olyan módszerek kidolgozása, amelyekkel ezek a vizsgálatok üzemi körülmények között, gyorsan és eredményesen elvégezhetőek.

1.1 A kutatás szakirodalmi előzményei

Gépészeti berendezések komplex felügyeleti rendszerei a következő öt, egymásra épülő funkcionális elemről épülnek fel:

Model formation, diagnosztikai séma tervezése, kiinduló modell képzése.

Observing, megfigyelés, mérés.

Monitoring, adatgyűjtés, feldolgozás, naplózás, aggregáció, alarm jelek generálása.

Diagnosztika, melynek célja a jelenség okának meghatározása, az analízis és az azonosítás eszközeinek felhasználásával.

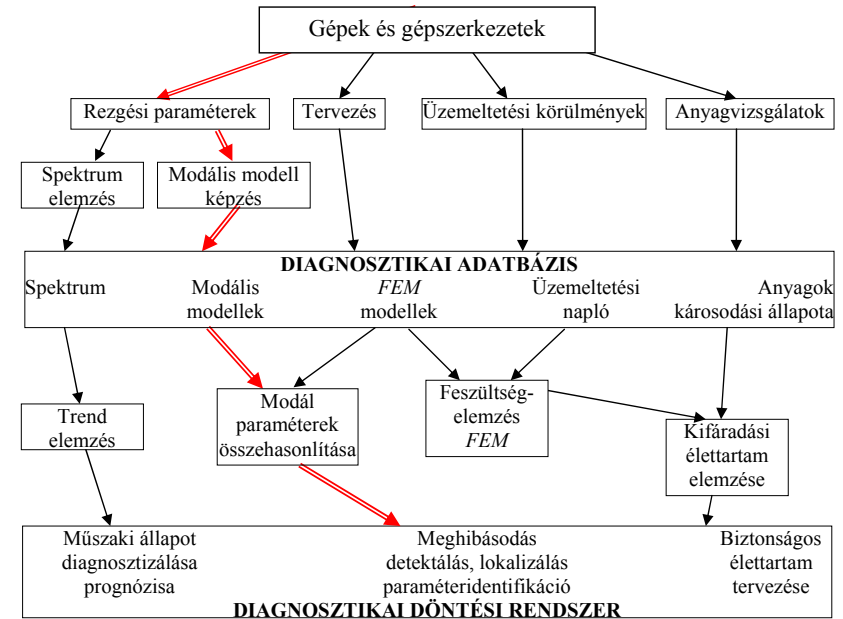
Maintenance, (karbantartás, helyreállítás) azoknak a tevékenységeknek a megfogalmazása, és kivitelezése, amelyek az újraműködést lehetővé teszik.

A működésben lévő gép rezgésszint növekedésének forgógépek esetében két alapvető oka lehet:

- o valamilyen gépészeti meghibásodás miatt túl nagy gerjesztő erők lépnek fel,
- o a periódikus gerjesztő erők rezonanciajelenséget idéznek elő.

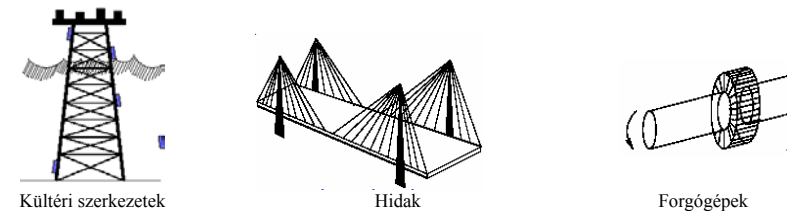
Állandó, konstans fordulatszámon üzemelő berendezések esetében működés közben úgy kerülhet a szerkezet rezonanciába, ha a szerkezet valamely dinamikai tulajdonsága megváltozik. Ezek a dinamikai tulajdonságok a sajátfrekvenciák és a lengésképek. A dinamikai tulajdonságok változását a merevségi, tömeg és csillapítási jellemzők változása okozza. A diagnosztikai eljárás feladata, hogy a megváltozott dinamikai tulajdonságok alapján következtessen az azokat okozó szerkezeti változásokra. Általános értelemben tehát a diagnosztika inverz feladatnak tekinthető. Számos aperiódikus működésű szerkezetnél hasonlóan felmerül a dinamikai tulajdonságok változása, így itt is megfelelő monitorizálási és diagnosztikai feladatok megoldása szükséges.

A modális elemzésen alapuló szerkezeti diagnosztikai adatok - *Uhl* [Uhl_1] alapján - az alábbi **1-1 ábra** szerint illeszkednek a hagyományosan alkalmazott felügyeleti illetve diagnosztikai eljárások által felhasznált adatstruktúrába.



1-1 ábra. Diagnosztikai rendszer vázlata [Uhl_1]

A fenti vázlat forgógépek és aperiódikus működésű gépek diagnosztizálására egyaránt vonatkozik. Az adatok, modellek felhasználása - a fenti diagnosztikai döntési rendszerben való felhasználás mellett - megjelenik a szerkezetfejlesztés és az irányítás tevékenységében is. A szakirodalomban a szerkezeti diagnosztika alkalmazási területei rendkívül széleskörűek, ezek közül mutat néhányat az **1-2 ábra**.

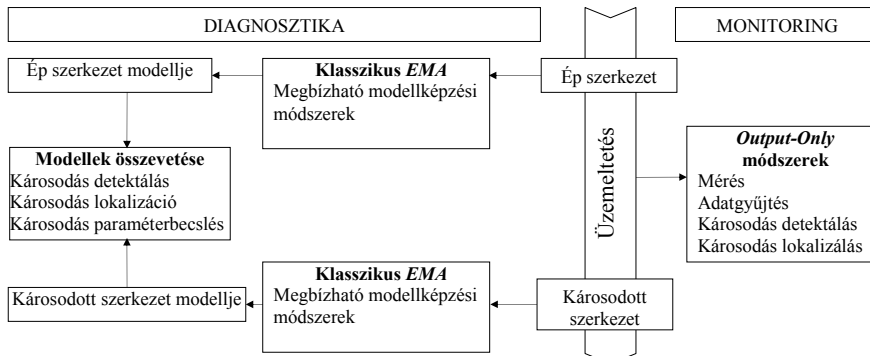


1-2 ábra Szerkezeti diagnosztika néhány alkalmazási területe

A fenti szerkezeteknél a monitorozáshoz nem alkalmaznak külön gerjesztő berendezést, a gerjesztést a szerkezet "működése", üzemeltetése közben fellépő erőhatások szolgáltatják. Ilyen feladatoknál különös gonddal kell megválasztani a szenzorok elhelyezését, annak érdekében, hogy valóban reprezentáns rezgésjellemzők kerüljenek meghatározásra.

A szerkezeti diagnosztika módszerének alapelvei:

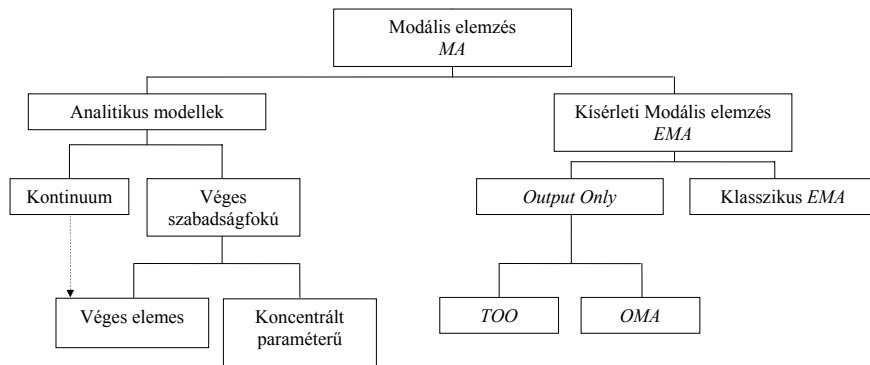
- o az eredeti (hibátlan) elkészült szerkezetről egy dinamikai modellt készítenek,
- o üzemeltetés közben a szerkezeten folyamatosan, vagy időszakosan dinamikus méréseket végeznek,
- o a mért jellemzőket összevetik a hibátlan szerkezet modelljével, vagy az előző mérés eredményeivel,
- o amennyiben a dinamikai tulajdonságok megváltozására utaló eltérést tapasztalnak az eredeti szerkezet dinamikai modellje és az aktuális (károsodott) szerkezetről készített modell összevetésével behatárolják a károsodás helyét, mértékét.



1-3 ábra Komplex felügyeleti rendszer diagnosztikai és monitorizálási feladatai

Az 1-3 ábrán láthatóan a szerkezet üzemeltetésének a kezdetén, és a diagnosztikai időszak végén a klasszikus kísérleti modális modellképzési eszközök, monitorozáskor a csak válaszjeleket mérő és elemző ún. *Output-Only* módszerek kerülnek alkalmazásra. Úgy a monitorozási, mint a diagnosztikai feladatoknál felmerül a károsodás detektálásának, lokalizálásának feladata. A diagnosztikai feladatcsoporton belül pedig ezen túlmenően a paraméterbecslés és a paraméter-identifikáció.

A szakirodalom a modális elemzés tudományágát, mint a dinamikai vizsgálatok egyik részterületét az 1.4 ábra szerint kategorizálja.



1-4 ábra Modális elemzés módszereinek csoportosítása

Az értekezés kutatási célkitűzéseit a kísérleti modális elemzési módszerek tanulmányozása és új, gyakorlatban alkalmazható módszerek kidolgozása érdekében fogalmazzuk meg.

1.2 A kutatás célkitűzései és módszerei

A kutatás célkitűzése

- A teherviselő szerkezetek diagnosztikai módszereinek elemzése.
- Vizsgálati és modellképzési módszer alapjainak megteremtése.
- Új kísérleti modális elemzésen alapuló monitorizálási és diagnosztikai módszerek kifejlesztése.
- Gyakorlati alkalmazás előkészítése.

A kitűzött célok eléréséhez az értekezés a következőkben felsorolt vizsgálati módszereket alkalmazza:

- Az irodalomban ismert módszerek elemzése, alkalmazhatósági határai és hiányosságai feltárása.
- A modellalkotás, a modellek megoldási, vizsgálati, elemzési módszereinek és az ezekhez szükséges számítógépes programok kidolgozása. Elméleti megállapítások megtétele.
- Az elméleti megállapításoknak valóságos szerkezeten végzett mérésekkel való ellenőrzése.

Tanulmányozni szükséges a véges szabadságfokú állandó (valós) együtthatós (diagnosztikai kontextusban lassan változó együtthatós) lineáris rendszerek modális elemzésének elméleti alapjait. Vizsgálni kell az általános eset mellett a speciális eseteket, mint pl. szimmetrikus rendszereket, a szimmetrikus rendszerek klasszikus normál módusait, a csillapítás modellezésének további lehetőségeit.

Át kell tekinteni a frekvencia-átviteli (*FRF, komplex frekvencia fv.*) függvény mérési módszerekkel való meghatározásának eseteit, az ismert módusindikátor függvényeket, a modális paraméterek meghatározásának lokális és globális frekvenciatartománybeli módszereit. Ki kell fejleszteni a paraméterszintézis és a modell validáció módszereit nemszimmetrikus rendszerekre. Meg kell vizsgálni ún. *Output-Only* mérési módszereket, modellképzési lehetőségeket és a monitorizálásnál való alkalmazhatóságukat.

Részletesen elemezni kell azokat a megoldásokat, melyek a sérült szerkezeten végzett kísérleti modális modell és az eredeti szerkezet modális modelljének az összevetésével határozzák meg a károsodás helyét és mértékét.

Az értekezésben meg kell fogalmazni a lehetséges diagnosztikai, monitorozási koncepciókat, különös tekintettel a hídárak ismert állapot-felügyeleti rendszerének kibővítési lehetőségeire.

2 ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. TÉZIS: Továbbfejleszttem a klasszikus EMA modellképzési módszereket, ezen belül;

1.1 Tézis: Osztályoztam az ismert módusindikátor függvényeket és indikációs módszereket. Megalkottam a módusindikátor függvények egy csoportjára az „aggregátor típusú módusindikátor” fogalmat.

Ez alapján a módusindikátor függvények és módszerek három csoportba sorolhatók, melyek a lokális, az aggregátor típusú és a tartomány típusú módszerek. Megfogalmaztam az aggregátor típusú módusindikátor függvényekkel kapcsolatos követelményeket.

1.2 Tézis: Új aggregátor típusú módusindikátor függvényt fejlesztettem ki, melyet az

$$RCNP(j\omega) := \frac{dH(j\omega)}{H(j\omega) d\omega}$$

összefüggéssel definiáltam.

A kifejlesztett módusindikátor függvény az ún. „relatív komplex Nyquist kerületi sebesség” (*RCNP*) függvény, melynek sajátosságai a következők:

- Mért frekvencia-átviteli (*FRF*) függvény alapján képezhető.
- Lokális méréseken is alkalmazható.
- Lokális mérések *RCNP* diagramjai alapján aggregálással a szerkezet vizsgált frekvenciatartományba eső összes módusa detektálható.
- A lokális és az aggregált *RCNP* egyaránt komplex értékű függvény, melyen a hagyományos modális paraméterbecslési és numerikus görbeillesztési módszerek alkalmazhatók.
- Megállapítottam, hogy nem interferáló módusok esetén az *RCNP* diagram alapján a csillapítás közvetlenül becsülhető.
- Az *RCNP* diagram egyaránt értelmezhető az elmozdulásválaszra, a sebességválaszra és a gyorsulásválaszra vonatkozó *FRF* függvényeken.

1.3 Tézis: Kísérleti mérések tapasztalatai alapján a gyakorlati alkalmazhatóság és megbízhatóság növelése érdekében továbbfejlesztettem a sajátértékeket és a reziduumokat becsülő differenciaformulákat.

A λ_i sajátérték becslésére a

$$\lambda_i := \frac{-j}{2N_q + 1} \sum_{q=-N_q}^{N_q} \frac{\omega_{i_D+q} \cdot \hat{H}(j\omega_{i_D+q}) - (\omega_{i_D+q-1}) \cdot \hat{H}(j\omega_{i_D+q-1})}{\hat{H}(j\omega_{i_D+q}) - \hat{H}(j\omega_{i_D+q-1})},$$

ahol

ω_{i_D}	detektált sajátkőrfrekvencia, $\omega_{i_D} = i_D \cdot \Delta\omega$,
$\Delta\omega$	kőrfrekvencia felbontás,
$\hat{H}(j\omega_{i_D+q})$	<i>FRF</i> mért értéke az $\omega_{i_D+q} = (i_D + q) \cdot \Delta\omega$ körfrekvencián,
$2N_q + 1$	becslésnél figyelembevett pontok száma,

a reziduumok becslésére a

$$P_i := \frac{-j \cdot \Delta\omega}{2N_q + 1} \sum_{q=-N_q}^{N_q} \frac{\hat{H}(j\omega_{i_D+q}) \cdot \hat{H}(j\omega_{i_D+q-1})}{\hat{H}(j\omega_{i_D+q}) - \hat{H}(j\omega_{i_D+q-1})}$$

összefüggéseket állítottam fel.

- Kimutattam, hogy a differencia formulák alapján történő becslésre nem elegendő az *FRF* függvény maximumhelyének felhasználása, hanem a becslést a félteljesítményhez tartozó (3 dB-es) sávzélességre ki kell terjeszteni.
- Kimutattam, hogy a továbbfejlesztett differenciaformulák lokális és aggregált *RCNP* diagramokon is alkalmazhatók.

1.4 Tézis: Továbbfejlesztettem a mért *FRF* függvényeken végzett komplex lineáris és komplex nemlineáris görbeillesztési módszereket.

Kimutattam, hogy a görbeillesztés legkisebb négyzetes funkcionáljának minimalálásához szükséges *Jacobi* mátrix elemeinek számításánál a következők figyelembevétele szükséges:

- A reziduum paraméterekre vonatkozó összegeket elegendő a módus félteljesítményhez tartozó sávzélességére meghatározni.
- Az effektív tömeg és maradó hajlékonyság számításához tartozó összegeket a teljes vizsgált frekvenciaintervallumra el kell végezni.
- Megállapítottam, hogy a kidolgozott görbeillesztési algoritmusok az *RCNP* diagramokon is alkalmazhatók.

1.5 Tézis: Új modális modell szintézis módszert fejlesztettem ki, mely szimmetrikus és nonszimmetrikus rendszerek kísérleti vizsgálatánál is alkalmazható.

- Levezettem a paraméterszintézis összefüggéseit a nonszimmetrikus rendszerek esetére.

- Kidolgoztam a sajátvektorok diadikus dekompozíció alapuló szintézisének módszerét.
- Új globális kísérleti modális modellt képező rendszert fejlesztettem ki. A modális modellképzés lépései a következők:

1. Az összes mért *FRF* függvényből aggregált *RCNP* képzése.
2. Az aggregált *RCNP* függvényen a sajátfrekvenciák detektálása.
3. Az aggregált *RCNP* függvényen sajátértékek kezdeti becslése.
4. Komplex lineáris görbeillesztés az aggregált *RCNP* függvényen.
5. Komplex nemlineáris görbeillesztés az aggregált *RCNP* függvényen a (globális) λ_i ($i = 1, \dots, N_m$) sajátértékek meghatározására.
6. Az előző pontban meghatározott sajátértékeket felhasználva lokális komplex lineáris görbeillesztés az összes mért *FRF* függvényen, ezek lokális $P_{i,kl}$ komplex amplitúdó-paramétereinek meghatározására.
7. Sajátvektorok diadikus dekompozíció alapuló szintézise.

A vizsgálatok és a kapott eredmények részleteit az értekezés 3. fejezete ismerteti. A kifejlesztett eljárásokat és az igazoló kísérleti eredményeket a publikációimban részletesen bemutattam.

2. TÉZIS: Kidolgoztam az *Output-Only* módszerek alkalmazását és továbbfejlesztését anyagmozgató gépek, különösen híddaruk felügyeletének támogatására. Az eljárás ipari körülményeket feltételező gerjesztésen, többszatornás rezgésmérésen és keresztspéktrumok felhasználásával képzett *RCNP* függvények alkalmazásán alapul.

- Az eljárás szélessávú gerjesztést (impulzus illetve egységugrás) alkalmaz, amely ipari körülmények között, a vizsgált szerkezet megfelelő üzemmódjának választásával realizálható.
- Módus-indikátorként a válaszjelek alapján mért keresztspéktrumokon értelmezett aggregált *RCNP* függvényeket használ.
- Alkalmos a lengési sajátfrekvenciák közvetlen becslésére, és a lengéseképek megjelenítésére.
- Az elvégzett vizsgálatok eredményeit értékelve megállapítható, hogy a vizsgált szerkezetek *Output-Only* módszerrel meghatározott módusai a műszaki gyakorlat számára elegendő pontossággal megközelítik a klasszikus kísérleti modális elemzés módszerével meghatározott módusokat.

Az *Output-Only* módszerek ipari környezetben való alkalmazására és ellenőrzésére a BME Építőgépek, Anyagmozgatógépek és Üzemi Logisztika Tanszék laboratóriumában elvégzett kísérletorsorozat meggyőzően igazolta, hogy az *Output-Only* módszerek alkalmasak az anyagmozgató (és más) gépek felügyeletének megvalósítására.

A vizsgálatok és a kapott eredmények részleteit az értekezés 4. fejezete ismerteti.

3. TÉZIS: Továbbfejlesztettem a modális modellek alkalmazási területeit melyek a következők:

3.1 Tézis: Teljessé tettem az érzékenységi egyenletek levezetési módszereit. Két új levezetést dolgoztam ki.

- Az átviteli mátrix analitikus alakja alapján levezettem a nonszimmetrikus rendszerek sajátértékeinek sajátvektorokkal kifejezett érzékenységi egyenleteit.
- A rendszermátrix alapján levezettem a nonszimmetrikus rendszerek sajátértékeinek érzékenységi egyenleteit.

3.2 Tézis: Megfogalmaztam és megoldottam a szerkezetdinamikai modifikáció egy inverz feladatát, a szerkezeti módosítás paraméter-identifikációjának problémáját.

A módszer nem igényli a szerkezet analitikus modelljének ismeretét. Sajátosságai a következők:

- kísérleti modális modelleken is alkalmazható,
- a hibafunkcionál minimalálásának numerikus eljárása az általánosított szelómódszert alkalmazza (nonderivatív).

Az eljárást sikerrel alkalmaztam hagyományos lokális tömeg-módosítás, merevség-módosítás és csillapítás-módosítás identifikációjára, peremfeltétel identifikációra és végeeselemes modell globális paraméter-identifikációjára.

3.3 Tézis: Kimutattam a dinamikai hajlékonyság fizikai-térbeli főirányait. Bizonyítottam, hogy minden módusra létezik egy válaszrezgési és egy gerjesztési főirány, melyek a modális modell sajátvektoraival kifejezhetők. Igazoltam, hogy klasszikus normál módusok esetén a válaszrezgési és a gerjesztési főirányok egybeesnek.

$$\begin{array}{ll} \text{Válaszrezgési főirányok} & \text{Gerjesztési főirányok} \\ \operatorname{Re}\{x_{ip}\} \cos(\vartheta_i) + \operatorname{Im}\{x_{ip}\} \sin(\vartheta_i) & \operatorname{Re}\{y_{ip}\} \cos(\varphi_i) + \operatorname{Im}\{y_{ip}\} \sin(\varphi_i) \\ \vartheta_i = -\operatorname{arc} \sqrt{\sum_{p=1}^3 x_{ip}^2} & \varphi_i = -\operatorname{arc} \sqrt{\sum_{p=1}^3 y_{ip}^2} \end{array}$$

A kutatási eredmény diagnosztikai, monitorizálási területen való gyakorlati alkalmazása a kísérleti mérések lokációinak megtervezésénél jelenik meg. A válaszrezgés mérése a kimutatott főirányokban végezhető el hatékonyan. A levezetést az értekezés 5.6 fejezete tartalmazza.

3.4 Tézis: Kimutattam az általános viszkózus csillapítású rendszerek csillapítási mechanizmusa identifikációjának lehetőségét. Megállapítottam, hogy klasszikus normál módusú, egyszerű sajátértékekkel rendelkező szimmetrikus rendszerekre, ha a csillapítási mátrix a $C = M \cdot f_1(M^{-1}K)$ analitikus alakban az $M^{-1}K$ mátrix függvényeként felírható, akkor a rendszer sajátértékeire

$$\langle -2\delta_i \rangle = f_1(\Omega_N^2)$$

írható, ahol δ_i az i -edik sajátérték valós része, Ω_N pedig a csillapítatlan rendszer spektrálmátrixa.

A szerkezet kísérleti mérésekkel meghatározott komplex sajátértékei, és a csillapítatlan rendszer sajátértékei ismeretében regressziós módszerrel meghatározható annak az $f_1()$ skalár változós függvénynek a közelítő analitikus alakja, amely alapján a C csillapítási mátrix $M^{-1}K$ függvényében az $f_1(M^{-1}K)$ mátrixfüggvénnyel felírható. A vizsgálatok és a kapott eredmények részleteit az értekezés 5.7 fejezete ismerteti.

4. TÉZIS: A szerkezeti károsodás detektálására, lokalizálására, paraméter becslésére és paraméter-identifikációjára alkalmas új eljárásokat dolgoztam ki.

4.1 Tézis: Output-Only méréseken alapuló új károsodás- detektáló és lokalizációs eljárást fejlesztettem ki, mely a monitorozott kereszt spektrumok alapján képezett transmissibility (TRF) függvényekből képezi az aspiráns lokációk károsodási indexeit.

Az eljárás sajátosságai a következők:

- o A monitorozott szerkezet kiválasztott lokációiban mintavételezett válaszjeleken *on-line* spektrális elemzések.
- o A regisztrált spektrumokból az adatfeldolgozás során *TRF* függvények, majd károsodási indexek képzése.
- o A szerkezeti károsodás lokációját az elemzett lokációk közül a legnagyobb változású károsodási indexű lokáció(pár) jelöli ki.
- o A károsodási indexek egy szerkezeti pontra és lokációpárokra is értelmezhetők.

Az eljárást kísérleti tesztekkel validáltam, melyet az értekezés 6.1 fejezete részletesen ismerteti.

4.2 Tézis: Új módszereket fejlesztettem ki, melyek lehetővé teszik a szerkezeti károsodás detektálását, lokalizálását, paraméterbecslését és paraméter-identifikációját a modális modell alapján.

A módszercsalád elemei a következők:

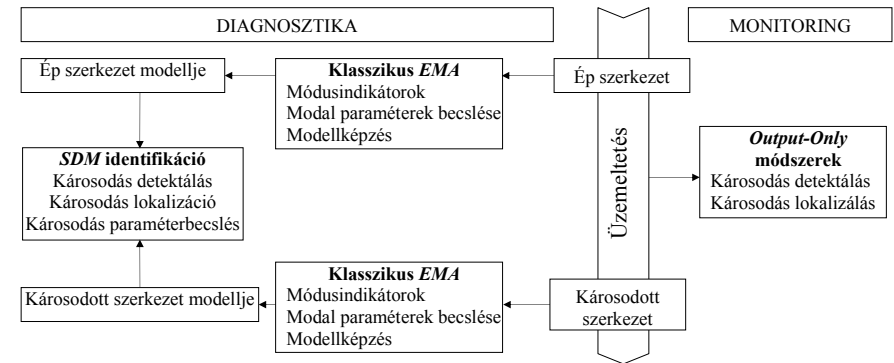
- o Detektálás és lokalizáció statikus hajlékonysági hányadosokból képezett károsodási indexekkel.
- o Detektálás, lokalizáció és paraméterbecslés a statikus hajlékonysági mátrix alapján.
- o Szerkezeti károsodás *SDM* identifikáción alapuló paraméterazonosítása.

A módszert és az igazoló kísérleti eredményeket az értekezés 6.2 fejezetében részletesen ismertetem.

5. TÉZIS: Komplex felügyeleti koncepciót dolgoztam ki építő és anyagmozgató gépek teherviselő elemeire. Megfogalmaztam az építő és anyagmozgató gépek teherviselő szerkezeti elemeinek komplex felügyeleti rendszere szerkezeti monitorozási és diagnosztikai részfeladatainak egy lehetséges megoldási módszerét.

- o A szerkezetre telepített folyamatos adatgyűjtést végző monitoring rendszer az *Output-Only* technikával mért válaszjelek mintavételezett értékein előfeldolgozást végez. A károsodás detektálására a *TRF* függvényeken alapuló károsodási indexeket képez. Károsodás detektálásakor riasztja az üzemeltetőt. A detektált károsodás kivizsgálása, a károsodás lokalizációjának pontosítása, paraméterbecslése a károsodás súlyosságának megítélése és a várható élettartam becslése klasszikus *EMA* modális elemzéssel történik.
- o A szerkezeten időszakos ellenőrző mérésekkel *Output-Only* mérés technikával és a *TRF* függvényeken alapuló károsodási indexek elemzésével történik a károsodás megjelenésének detektálása és lokalizációja. Detektált károsodás esetén a lokalizált károsodási helyekre klasszikus *EMA* modellt képeznek és identifikálják a károsodás mértékét.

Az értekezésben kidolgozott eredmények az alábbi ábrán látható diagnosztikai koncepció megvalósítását szolgálják.



2-1 ábra Komplex felügyeleti koncepció feladatai és azok megoldási módszerei

3 AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN KÉSZÍTETT SAJÁT PUBLIKÁCIÓK

- P1. **Pápai Ferenc:** A modális elemzés alkalmazása a szerszám gép vizsgálatokban. *Egyetemi Doktori Értekezés. Budapesti Műszaki Egyetem Gépészmérnöki Kar, Budapest, 1991.*
- P2. **Ferenc Pápai:** Identification of Parameters of a Structural Modification. (Generalised Secant Method) *Proceedings of the 13th International Seminar on Modal Analysis, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium 19-23 September 1988, pp: C-26.*
- P3. **Pápai Ferenc:** Szerkezeti Módosítás Paramétereinek Identifikációja. (Az általánosított szelő módszer alkalmazása) *Gép. XLI. Évfolyam, 1989, Április, pp: 126-136. ISSN 0016-8572.*
- P4. **Dr. Popper György – Pápai Ferenc - Siti Arni Suparmadi:** Modális elemzésen alapuló identifikációs alkalmazása szerszám gép lefogási paramétereinek meghatározására. *V. Magyar Mechanikai konferencia, Miskolc. 1987. Aug. pp.:121-123. ISBN 963 661 101 7.*
- P5. **Túri László – Dr. Szűcs István – Dr. Pápai Ferenc:** Nagyméretű és nagy értékű objektumok dinamikai vizsgálata. *Dinamikus hidvizsgálatok. Tudományos Ankét, Széchenyi István Főiskola. Győr, 1996. május 23. pp: 12-18.*
- P6. **Dr. Pápai Ferenc – Túri László:** Szerkezeti Károsodás Detektálása és Paraméterbecslése Modális Adatok Alapján. *XIV. Nemzetközi Diagnosztikai Konferencia, Hungary Siófok 2004 Március 09-10. pp.:67-84.*
- P7. **Ferenc Pápai:** Experiences of Modal Analysis Based on Impulse Exciting Tests. *DYNAMIKA '85 Konferenz. Wroclaw, 17-19, September 1985.*
- P8. **Pápai Ferenc:** A modal analízis alkalmazása a konstrukciók dinamikai optimalizálásában. *OMFB-6 "Fokozott pontosságú anyagalkotó technológiák és berendezések K+F feladatai" tárcaprogram. Zárószimpózium. Budapest. 1991. pp.: 139-152.*
- P9. **Dr. habil Kulcsár Béla – Dr. Pápai Ferenc:** Megjegyzések a TRICEPT robotok inverz feladatához. *MicroCAD 2002. Konferencia. Miskolc.*
- P10. **Pápai Ferenc - Cselle Tibor:** A modális elemzés görbeillesztő algoritmusának vizsgálata. *Bánki Donát Gépipari Műszaki Főiskola Jubileumi Tudományos Ülésszak. Budapest, 1984. Márc. 21-24. pp.:306-309.*
- P11. **Pápai Ferenc - Dr. Onódi Károly:** Modalanalízis a Rezgésvizsgálatokban. *Zaj és Minőség '87.(A zaj-és rezgés csökkentés korszerű eszközei.) Szeminárium. Optikai, Akusztikai és Filmtechnikai Egyesület kiadványa. Budapest. 1987. pp.: 110-115.*
- P12. **Dr. Baráti Antal - Dr. Hajdu György - Láng Ferenc - Dr. Onódi Károly – Pápai Ferenc:** SZERSZÁMGÉP-VIZSGÁLATOK. *Szakkönyv. Műszaki könyvkiadó, Bp.1988. 1.2.7. fejezet: A modális elemzés módszere. pp: 73-105. ISBN 963 10 7181 2.*
- P13. **Pápai Ferenc:** A SZIMFI Modális Elemzési Módszere. *Rezgés-védelem 1988 Szeminárium. Eger, 1988. Szept.29 - Okt. 1.*
- P14. **Pápai Ferenc:** A SZIMFI Modális Elemzési Módszere. XI. Szerszám gép Kollokvium. (Poszter előadás) Budapest, 1988. Szept. 20-21. pp: 313-333. ISBN 963 8093 55 2 ISSN 0236 96 21
- P15. **Láng Ferenc – Pápai Ferenc:** Finommegmunkáló esztergák rezgési problémáinak vizsgálata, a rezgéselemzés egy korszerű módszere. *KGM SZERSZÁMGÉPIPARI MŰVEK: Közlemények. XVIII. évf. 1.sz. 1978, pp: 14-38. ISSN 0134-0816.*
- P16. **Láng Ferenc – Pápai Ferenc:** Vizsgálati példák szerszám gépágyak és állványok rezgési viselkedéséről. *Mechanite öntvények tervezése és gyártása. SZIM-GTE kiadvány. Bp.1980. pp: 151-173.*
- P17. **Dr. Baráti Antal - Dr. Hajdu György - Láng Ferenc - Dr. Onódi Károly – Pápai Ferenc.** SZERSZÁMGÉP-VIZSGÁLATOK. *Szakkönyv. Műszaki könyvkiadó, Bp.1988. 1.1.6. fejezet: A merevségi mérleg számítása számítógéppel. pp.:30-38. ISBN 963 10 7181 2.*
- P18. **Yehia El Karamany – Ferenc Pápai:** Determination of Turning Machine Performance by Nonlinear Programming. *International Journal of Machine Tool Design and Research. Vol. 18. pp.: 181-187. Pergamon Press Ltd. 1978. ISSN 0020-7357.*
- P19. **Dr. Hajdu György - Dr. Baráti Antal - Dallos Kálmán - Láng Ferenc - Onódi Károly – Pápai Ferenc - Péchy György:** A szerszám gép vizsgálatok korszerű irányzatai. *Minőség és Megbízhatóság. 1981/1.sz. pp:7-20. ISSN 0580-4485.*
- P20. **Pápai Ferenc:** Az inhomogén zaj azonosításának elvi lehetőségei. *Zaj és minőség '89 Konferencia (Az ipari termékek szerepe a zaj- és rezgés védelemben), Optikai, Akusztikai és Filmtechnikai Egyesület kiadványa. Budapest, 1989. október 31.-november 1. pp: 69-76.*

4 HIVATKOZÁSOK A SZERZŐ PUBLIKÁCIÓIRA

- H1. **Dr. Angyal Béla – Szanyi László – Cselle Tibor:** CAMAC-rendszer a Gépgyártás-technológia Tanszéken. *A Bánki Donát Gépipari Műszaki Főiskola Közleményei. 1982. pp: 9 – 44.*
- H2. **Onódi Károly:** A forgácsolás stabilitásának vizsgálata megmunkáló központokon különös tekintettel a marási műveletekre. *Egyetemi Doktori Értekezés. Budapesti Műszaki Egyetem Gépészmérnöki Kar, Budapest, 1983.*
- H3. **Dr. Popper György:** Numerikus módszer mechanikai szerkezetek parametrikus identifikációjára. *MTA Doktori értekezés. Budapest, 1987.*
- H4. **Dr. Földes László - Nagy Ottó Tibor:** Prüfung der Dynamischen Steifigkeit des Lasttragende Elements der Werkzeugmaschine an Eine Kleinmodell. *ICED '88, Bp. 1988. Aug. 23-25.*
- H5. **Dr. Földes László - Nagy Ottó Tibor:** Esztergagép Orsóház Dinamikai Merevségének Vizsgálata Kisminta Modelleken. XI. Szerszám gép Kollokvium. Budapest, 1988. Szept. 20-21.
- H6. **Siti Arni - Dr. Onódi Károly:** Szerszám gépágyak összehasonlító vizsgálata. *Rezgésvédelem '88 Szeminárium Eger, 1988 Szept. 29-Okt. 1.*
- H7. **Halmi Gábor:** Ipari robotok működési pontosságának és mozgási paramétereinek elméleti és kísérleti vizsgálata. *Műszaki doktori értekezés. Budapesti Műszaki Egyetem Közlekedésmérnöki Kar, Budapest, 1989 (K-6009)*
- H8. **Halmi Gábor:** SCARA típusú szerelőrobotok engedékenység-vizsgálata. *BME Építő- és Anyagmozgató Gépek Tanszék Közleményei 5. szám. Tanszéki Konferencia '89. Budapest, 1990. pp: 29-43.*
- H9. **Fejes István – Dr. Pristiyák András – Vonhauser Olivér:** Forgóoszlopos toronydaru modális vizsgálata. *GEP. XLVI. Évfolyam 1994/10-11. pp: 67 – 69.*
- H10. **Vonhauser Olivér:** Forgódaruk támaszerőinek dinamikai vizsgálata. *Műszaki doktori értekezés. Budapesti Műszaki Egyetem Közlekedésmérnöki Kar, Budapest 1995. (K-7136)*
- H11. **Rohács, J. – Chikány, D. – Ácsolt, Z:** Analyze and Prediction of Travel Demand Time Series at Railway Ticket Offices. *Transport Means 2006. Proceedings of 10th International Conference. Kaunas, Lithuania, 2006. ISSN 1822-296 X, pp: 249-252.*

5 HIVATKOZÁSOK JEGYZÉKE

Az értekezésben hivatkozott fontosabb publikációk.

- [Adhikari_1] **Adhikari, S.:** Classical Normal modes in Nonviscously Damped Linear Systems. *ALAA Journal, Vol.: 39, No.5, 2001, pp:978-980.*
- [Adhikari_3] **Adhikari, S.:** Damping Models for Structural Vibration. *Cambridge University Engineering Department Ph.D. Dissertation September, 2000, pp:1-204.*
- [Allehang_1] **Allehang, R.J. - Brown D.L.:** A correlation coefficient for modal vector analysis. *Proceedings of the 1st International Modal Analysis Conference, pp. 110-116, 1982.*
- [Allehang_3] **Allehang, R.J.:** Modal Parameter Estimation, Overview/Review. *Structural Dynamics Research Laboratory University of Cincinnati, 2002, 1-46.*
- [Allehang_4] **Allehang, R.J. - Brown, D.L.:** „A Unified Matrix Polynomial Approach to Modal Identification”, *Journal of Sound and vibration (1998) 211(3), pp:301-322.*
- [Allehang_5] **Allehang, R.J.:** The Modal Assurance Criterion –Twenty Years of Use and Abuse. *Journal of Sound and vibration (2003 August) , pp:14-21.*
- [Allen_1] **Allen, M.S.:** „Global and Multi-Input-Multi-Output (MIMO) Extensions of the Algorithm of Mode Isolation (AMI) Ph.D. Dissertation (2005) Georgia Institute of Technology p: 128
- [Avitabile_1] **Avitabile, P.:** Experimental Modal Analysis. Simple Non-Mathematical Presentation, *University of Massachusetts Lowell, Lowell, Massachusetts SOUND and VIBRATION JANUARY 2001, pp. 1-11.*
- [Béliveau_1] **Béliveau, J.G.:** First Order Formulation of Resonance Testing. *Journal of Sound and Vibration (1979)65(3), pp:319-327.*
- [Bendat_1] **Bendat, J.S.- Piersol, A.G.:** Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis. *John Wiley & Sons, 1980. pp:1-302.)*
- [Bernal_1] **Bernal, D.:** Load Vectors for Damage Localisation. *Department of Civil and Environmental Engineering, 427 Snell Engineering Center, Northeastern University, Boston MA 02115, U.S.A p:15.*
- [Bernal_2] **Bernal, D. Gunes, B.:** Damage Localization in Output-Only Systems. *Department of Civil and Environmental Engineering, 427 Snell Engineering Center, Northeastern University, Boston MA 02115, U.S.A p:7.*

- [Brincker_1] **Brincker, R. – Zhang, L. – Andersen, P.**: Modal Identification of Output-Only Systems Using Frequency Domain Decomposition *INSTITUTE OF PHYSICS PUBLISHING SMART MATERIALS AND STRUCTURES Smart Mater. Struct.* 10 (2001) 441–445.
- [Caccese_1] **Caccese, V. –Mewer, R. – Vel, S.**: Detection of Bolt Load Loss Using Frequency Domain Techniques. *Proceedings of the 15th International Conference on Adaptive Structures and Technologies. Bar Harbor, Maine, Oct. 24-27, 2004. p:10.*
- [Caicedo_1] **Caicedo, J.M. - Dyke S.J.**: Determination of Member Stiffnesses for Structural Health Monitoring. *Proceedings of the 3rd World Conference in Structural Control, Como, Italy, April 7-12, 2002.*
- [Cam_1] **Çam, E. - Lüty, M.- Kocaarslan, Ý. – Taplamaciödlu, Ý.**: Defect Detection in a Cantilever Beam from Vibration data. 2002.
- [Caughey_1] **Caughey, T. K.**: Classical Normal Modes in Damped Linear Dynamic System. *Transaction of the ASME. Journal of Applied Mechanics Jun. 1960. pp:269-271.*
- [Caughey_2] **Caughey, T. K. – O’Kelly, M.E.J.**: Classical Normal Modes in Damped Linear Dynamic System. *Transaction of the ASME. Journal of Applied Mechanics 32, 1965. pp:583-588*
- [Clayton_1] **Clayton, E.H.**: Frequency Correlation-Based Structural Health Monitoring with Smart Wireless Sensors. *Washington University, MSC Thesis, 2006. pp:1-97.*
- [Davis_1] **Davis, I.C.**: Damage Detection in Aluminum Cylinders Using Modal Analysis, *MSC tanulmány. Virginia Polytechnic Institute and State University 2002.*
- [Denoyer_1] **Denoyer, K.K.**: Structural Model Update Using Dynamically Measured Static Flexibility Matrices. *Dissertation, 1996, University of Colorado.*
- [Doebbling_1] **Doebbling, S.W. – Farrar, C.R. – Goodman, R.S.**: Effects of Measurement Statistics on the Detection of Damage in the Alamosa Canyon Bridge. *Proc. of the 15th International Modal Analysis Conference, Orlando, FL, February 3-6, 1997, pp. 919-929.*
- [Doebbling_3] **Doebbling, S.W. – Farrar, C.R. – Prime, M.B. – Shevitz, D.W.**: Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review. *Los Alamos National Laboratory USA, 1997. p:134.*
- [Farrar_1] **Farrar, C.R. – Duffey, T.A.**: Vibration-Based Damage Detection in Rotating Machinery. *Presented at DAMAS 99 – Dublin, Ireland, June 1999.*
- [Farrar_3] **Farrar, C.R. – Doebbling, S.W.**: An Overview of Modal-Based Damage Identification Methods *Engineering Analysis Group Los Alamos National Laboratory Los Alamos, NM pp:1-30.*
- [Fotsch_1] **Fotsch, D. – Evins, D.J.**: Application of MAC in the Frequency Domain. *SProceedings of IMAC XVIII, San Antonio, 2000, TX, pp. 1225-1231.*
- [Gao_1] **Gao, Y. – Spencer, B.F. – Bernal, D.**: Experimental Verification of the Damage Locating Vector Method. *Department of Civil and Environmental Engineering, 427 Snell Engineering Center, Northeastern University, Boston MA 02115, U.S.A p:9*
- [Gross_1] **Gross, E. – Simmermacher, T. – Rumsey, M. –Zadoks, R.I.**: Application of Damage Detection Techniques using Wind Turbine Modal Data. *American Institute of Aeronautics and Astronautics paper No.: AIAA 99-0047 pp:1-6.*
- [Halmi_1] **Halmi Gábor**: Ipari robotok Működési Pontosságának és Mozgási Paramétereinek Elméleti és Kísérleti vizsgálata. *BME Egyetemi Doktori Értekezés. Budapest, 1989.*
- [Herlufsen_3] **Herlufsen, H.**: Operational Modal Analysis of a Wind Turbine Wing using Acoustical Excitation *APPLICATION NOTE Brüel&Kjær, Denmark BO0505-11 02/02 pp: 1-8.*
- [Johnson_3] **Johnson, T.J.**: Embedded Sensitivity Functions for Characterizing Structural Damage. *Smart Materials and Structures 14 (2005) pp:155–169*
- [Kessler_1] **Kessler, S.S.**: Piezoelectric-Based In-Situ Damage Detection in Composite Materials for Structural Health Monitoring Systems. *Technology Laboratory for Advanced Composites Department of Aeronautics and Astronautics Massachusetts Institute of Technology.*
- [Kharrazi_1] **Kharrazi, M.H.K. – Ventura, C.E.- Brincker, R. – Dascotte, E.**: A Study on Damage Detection Using Output-Only Modal Data.
- [Kijewski_1] **Kijewski, T.L.**: Full-Scale Measurements and System Identification: A Time-Frequency Perspective. *Ph.D Dissertation Department of Civil Engineering and Geological Sciences Notre Dame, Indiana April 2003, p:608.*
- [Kim_2] **Kim, J.T. – Stubbs, N.**: Nondestructive Crack Detection Model and Vibration Based System Identification in Structures. *8th ASCE Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability PMC 2000-305*
- [Kolonits_1] **Kolonits Ferenc, Zobory István**: Szerkezeti csillapítás és a szerkezeti anyagok lengéscsillapító hatása. (Helyzetkép). *GÉP, LV. Évfolyam, 4-5. szám, 2004. pp: 64-74.*
- [Kulcsár_1] **Kulcsár Béla**: Futódaruk teheremelő rendszerének dinamikus méretezési modelljei. Kandidátusi értekezés, *Kecskemét, 1982 p:159.*

- [Kulcsár_2] **Kulcsár Béla**: Hálózati Irányító rendszerek. *BME. Közlekedésmérnöki Kar Építőgépek Anyagmozgatógépek és Üzemi Logisztika Tanszék. Egyetemi jegyzet. 1996.*
- [Kulcsár_3] **Kulcsár Béla**: Robottechnika. *LSI, Budapest, 2000. Egyetemi Tankönyv p: 394.*
- [Kulcsár_4] **Kulcsár Béla**: Daruk teheremelési és teherfőkezési folyamatában keletkező dinamikus tényezők számítási és mérési módjai. *BME Továbbképző Intézet. Jegyzet: 4888, Budapest, 1973. p:140*
- [Kulcsár_5] **Kulcsár Béla**: Daruk mozgáshibái. *BME Továbbképző Intézet. Jegyzet: 5051, Budapest, 1977. p:185 (p)*
- [Larson_1] **Larson, E.C. - Parker, E. – Clark, B.R.**: Modern Spectral Estimation Techniques for Structural Health Monitoring, *Proceedings of the American Control Conference Anchorage, AK May 8-10, 2002, pp.4220-4223*
- [Lee_2] **Lee, L.S. – Karbhari, V.M. – Sikorsky, C.**: Investigation of Integrity and Effectiveness of RC Bridge Deck Rehabilitation with CFRP Composites. *Structural Systems Research Project, Department of Structural Engineering University of California, San Diego, La Jolla, California, June 2004, p:319.*
- [Lekszycki_1] **Lekszycki, T.**: Vibration Mode Dependent Identification of Damage in Structural Elements. *INCO Copernicus Project. No.: ERBIC15CT970706*
- [Lin_1] **Lin, S. – Yang, J.N. Zhou, L.**: Damage Identification of a Benchmark Building for Structural Health Monitoring *INSTITUTE OF PHYSICS PUBLISHING SMART MATERIALS AND STRUCTURES Smart Mater. Struct. 14 (2005) S162–S169*
- [Liszcai_1] **Liszcai Tamás Róbert** : Modern Heuristics in Structural Damage Detection Using Frequency Response Functions *PhD Dissertation, Texas A&M University, 2003, pp:1-350.*
- [Lynch_1] **Lynch, J.P. - Kiremidjian, A.S. - Law, K.H. – Kenny, T. – Carryer, E.**: Issues in Wireless Structural Damage Monitoring Technologies. *Proceedings of the 3rd World Conference on Structural Control (WCSC), Como, Italy, April 7-12, 2002.*
- [Maia_2] **Maia, N.M.M. – Silva, J.M.M. – Riberio, A.M.R.**: The Transmissibility Concept in Multidegree of Freedom Systems, *Mechanical Systems and Signal Processing (2001) 15(1), pp:129-137*
- [Marwala_1] **Marwala, T. - Hunt, H.E.M.**: Is Damage Identification Using Vibration Data in a Population of Cylinders Feasible? *Journal of Sound and Vibration (2000) 237(4), pp:727-732.*
- [Min_1] **Mín, Z. – Shen, F. – Huaiaí, C.**: Operational Modal Analysis Schemes Using Correlation Technique. *Acta Mechanica Solida Sinica, Vol. 18, No. 1, March, 2005, pp:88-94*
- [Mohanty_1] **Mohanty, P. – Rixen, D.J.**: Modifying the ERA Identification for Operational Modal Analysis in the Presence of Harmonic Perturbations, *16th ASCE Engineering Mechanics Conference July 16-18, 2003, University of Washington, Seattle*
- [Mohanty_2] **Mohanty, P.**: Operational Modal Analysis in the Presence of Harmonic Excitations. *Ph.D. Dissertation, Technische Universiteit Delft,*
- [Montalvao_1] **Montalvao, D. – Maia, N.M.M.- Riberio, A.M.R.**: A Review of Vibration-based Structural Health Monitoring with Special Emphasis on Composite Materials. *The Shock and Vibration Digest, Vol. 38, No. 4, July 2006 pp: 1-30*
- [Oliveira_1] **Oliveira, D.V. – Ramos, L.F. – Lourenco, P.B. – Roque, J.**: Structural monitoring of the Monastery of Jeronimos 2005 250TH Anniversary of the 1755 Lisbon Earthquake *pp:1-8*
- [Pascual_1] **Pascual, R. –Golínval J.C. – Razeto M.**: A Frequency Domain Correlation Technique for Model Correlation and Updating. *Proceedings of the 15th International Modal Analysis Conference, Orlando, Florida. 1997 pp: 587-592*
- [Parloo_1] **Parloo, E.**: Application of Frequency-Domain System Identification Techniques in the field of Operational Modal Analysis. *Ph.D. Dissertation Vrije Universiteit Brussel Faculteit Toegepaste Wetenschappen Pleinlaan 2, B-1050 Brussel (Belgium) pp: 1-290*
- [Peeters_1] **Peeters, B. – Maeck, J. - De Roeck, G.**: Excitation Sources and Dynamic System Identification in Civil Engineering, *Conference on System Identification and Structural Health Monitoring, Madrid, Spain, June 2000. pp:341-350*
- [Peeters_2] **Peeters, B.**: Stochastic System Identification for Operational Modal Analysis: A Review *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control December 2001, Vol. 123, pp:1-9*
- [Popper_1] **Popper György**: Numerical methods for least-square solving of nonlinear equations. *Periodica Politechnica. Vol 29. No.1-2 pp: 67 – 69, 1985.*
- [Popper_3] **Popper György**: Numerikus módszerek mérnököknek. *Akadémiai kiadó, Budapest, 1993 ISBN 963 05 6454 8 p:166*
- [Rácz_1] **Rácz Kornélia**: Műszaki Diagnosztika I. rész: Rezgé diagnosztika. *BME ÉAÜLT Egyetemi Jegyzet. p: 57; 2004.*
- [Riberio_1] **Ribeiro, A.M.R. – Fontul, M. – Maia, N.M.M. - Silva, J.M.M.**: Further Developments on the Transmissibility concept for Multiple Degree of Freedom Systems *The 11th International Conference on Vibration Engineering Timisoara, Romania, September 27 - 30, 2005.*

- [Richardson_5] **Schwarz, B. – Richardson, M.H.**: Modal Parameter Estimation from Operating Data. *SOUND AND VIBRATION/JANUARY 2003 pp:1-8*
- [Richardson_6] **Richardson, M.H. - Mannan, M.A.**: Determination of Modal Sensitivity Functions for Location of Structural Faults. *AIMAC IX. 1991 pp:1-7.*
- [Rózsa_1] **Rózsa Pál**: Lineáris algebra és alkalmazásai. *Műszaki Könyvkiadó. Budapest, 1974.*
- [Rytter] **Rytter, A.**: Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures. *PhD thesis, University of Aalborg, April 1993.*
- [Sas_1] **Sas, P.- Heylen, W. – Lammens, S.**: Modal Analysis Theory and Testing. *Katholieke Universiteit Leuven, Departement Werktuigkunde, Belgium, 1998.*
- [Sazonov_1] **Sazonov, E.S. –Klinkhachorn, P. – GangaRao, H.V.S. – Halabe, U.B.**: An Automated Damage Detection System for Armored Vehicle Launched Bridge. *U.S. Army (contract # DAAE07-96-C-X226).*
- [Schwarz_1] **Schwarz, B. – Richardson, M.**: Scaling Mode Shapes Obtained from Operating Data, *Proceedings, International Modal Analysis Conference, IMAC XXI., 2003. February 3-6. p.:8.*
- [Schwarz_3] **Schwarz, B. – Richardson, M.H.**: Measurements Required for Displaying Operating Deflection Shapes *IMAC XXII, 2004 January 26-29, pp: 1-6.*
- [Schwarz_5] **Schwarz, B. – Richardson, M.H.**: Introduction to Operating Deflection Shapes *CSI Reliability Week, Orlando, FL October, 1999, p:7.*
- [Shen_1] **Shen, J.Y. – Sharpe, L.**: Damage Detection Using Residual Modal Forces and Modal Sensitivity. *www.ce.utexas.edu/em2000/papers/JiYShen.pdf pp:1-6*
- [Sugimoto_1] **Sugimoto, K. – Yoshida, H. – Takeda, K.**: Prediction and Diagnosis on Malfunction by Remote Monitoring System for Compressor. *Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review Vol. 41 No. 3 (Jun. 2004) pp:1-5.*
- [Teughels_1] **Teughels, A. - De Roeck, G.**: Damage Assessment of the Z24 bridge by FE Model Updating. *Leuven, 2003.*
- [Uhl_1] **Uhl, T.**: Application of Modal Analysis for Monitoring and Diagnostics of Mechanical Structures
- [Van der Auweraer_3] **Van der Auweraer, H.**: Structural Dynamics Modelling using Modal Analysis: Applications, Trends and Challenges, *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Budapest, Hungary, May 21-23, 2001, pp.1-8.*
- [Verboven_1] **Verboven, P.**: Frequency-Domain System Identification for Modal Analysis, *PhD Dissertation, Vrije Universiteit Brussel, 2002, pp: 1-250.*
- [Vold_4] **Vold, H. – Schwarz, B. - Richardson, M.**: Display Operating Deflection Shapes from Nonstationary Data, *SOUND AND VIBRATION/JUNE 2000 p: 4.*
- [Yan_1] **Yan, A. – Golinval, J.C.**: Structural Damage Localization by Combining Flexibility and Stiffness Methods. *Engineering Structures 27 (2005) pp: 1752–1761.*
- [Yang_2] **Yang, C.**: Experimental Embedded Sensitivity Functions for Use in Mechanical System Identification *PhD. Thesis, Purdue University, (2004) p:185.*
- [Zonta_1] **Zonta, D.**: Structural Damage Detection and Localization by Using Vibrational Measurements. *Dissertation (2000), Università Degli Studi di Bologna. p:158.*