

Doktori értekezés tézisei

Lineárisan approximált nemlineáris
rendszerek multiszinuszos mérés technikája

Dobrowiecki Tadeusz
a műszaki tudomány kandidátusa

Budapest, 2016.

Előzmények

Az értekezés alapvetően a lineáris mérés technika területéhez tartozik. Lineáris mérés technika, lineáris modellek analízise és szintézise az utóbbi évtizedekben a mérnöki gyakorlat egyik leggyümölcsözőbb eszközeinek bizonyult és alkalmazást talált számos különböző és szerteágazó területen. A siker titka a lineáris modellek egyszerűsége, kanonikus jellege és átjárhatósága (ekvivalenciája), akár bemeneti-kimeneti, akár állapotter modellekről, ill. akár idő-tartományról, akár frekvencia-tartományról legyen szó. Ennek következménye az, hogy a lineáris modellekhez tartozó jelenségek, rendszerviselkedések intuitíve könnyen megérthetők és a lineáris tervezési technikák több igényesebb mérnöki megközelítésnek alapját képezik.

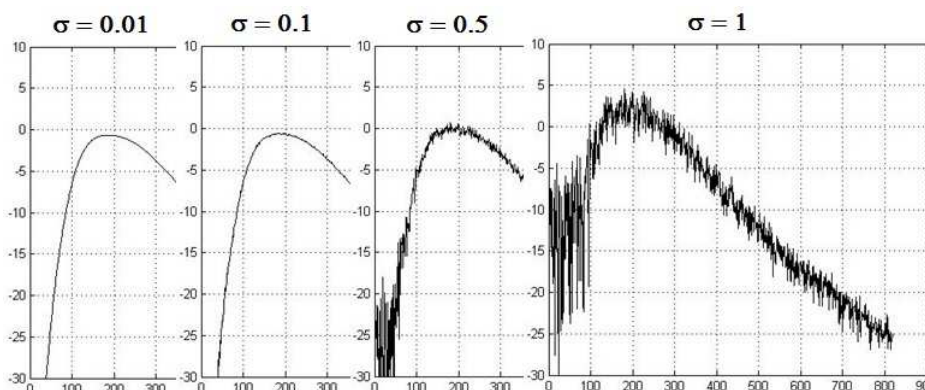
A linearitás azonban igen erős kikötés és a gyakorlatban a rendszerek többsége nem mondható lineárisnak. Tökéletes lineáris rendszerek csak tiszta absztrakcióként léteznek. Ha ragaszkodunk a lineáris mérési és modellezési technikákhoz, annak a kérdése merül fel, hogy meddig bízhatunk meg a velük kapott eredményekben.

Gyakran megeshet, hogy a mérnöki felhasználó a probléma nemlineáris jellegének nincs tudatában, mert a klasszikus lineáris mérés technikával mért lineáris modellek bizonytalansága a növekvő adatmennyiség hatására csökken és a számított modellek teljesítik a megszokott validációs teszteket. A legnagyobb probléma mégis talán az, hogy a lineáris rendszerelmélet garantálja, hogy a kapott lineáris modell érvényes lesz bármely jövőbeli kísérleti körülmények között (azaz bármilyen gerjesztő jel mellett). Ha azonban a jelenség valóban nemlineáris, a lineáris modell elvben csakis az identifikációjához használt bemeneti jelek esetére lesz érvényes. A modellt és a jelenséget eltérő jellel gerjesztve, sokkal nagyobb eltérés adódhat, mint az identifikációnál tapasztalt modellezési hiba.

Rossz mérnöki gyakorlat lineáris rendszerelméletet anélkül alkalmazni, hogy a modellek és a jelenségek közötti lehetséges eltérések fontosságát és potenciális következményeit ne mérlegelnénk. A lineáris elmélet nem mondja meg, milyen messze vagyunk a modell érvényességi határaitól, ill. mennyire robusztus az így identifikált modell. A lehetséges modellezési problémák csak zajként vehetők figyelembe, ahol ezek nem szükségképpen azonosíthatók és identifikálhatók. A helyzet potenciálisan veszélyes is lehet, mert a mérnöki felhasználó, további tervezése során, valóban egy érvénytelen modellre fog támaszkodni, kisebb hatékonyságú, de akár káros jelenségekhez vezető eredményeket produkálva.

Az előbb vázolt problémák köréből egyetlen értelmes kiútnak tűnik a linearitás feltételezését validáló nemlinearitási tesztek elvégzése a modellezési lépések megtétele előtt. A nemlineáris hatások esetleges detektálása után a felhasználó eldöntheti vajon a lineáris technikákat elveti-e és a nemlineáris modellezési technikákba kezd bele, vagy tudatosan folytatja a (most már csak közelítőnek tekinthető lineáris modell érdekében) a lineáris technikák alkalmazását. Az a döntés, hogy a nemlinearitás tapasztalása esetén a nemlineáris modellezési technikákhoz forduljunk, mégsem nyilvánvaló. Az egyetlenegy fajta (lineáris) modellre alapozó lineáris elmélettel szemben a nemlineáris rendszerelmélet gazdag az igen változó funkcionalitású, helyenként igen nagy

komplexitású nemlineáris modellek sokaságában. Következménye ennek, hogy a nemlineáris modelleket a gyakorlatban nehezebb identifikálni, implementálni, ill. nehézkes velük számolni.



1. ábra. A nemlineáris viselkedés és a gerjesztő jel kapcsolata. A vizsgált rendszer egy gyengén nemlineáris un. Wiener-Hammerstein rendszer, amely egy bemeneti dinamikus lineáris rendszer (3-ad rendű felüláteresztő Butterworth-szűrő), egy statikus nemlinearitás, jelen esetben: $y(t) = u(t) + .05u^2(t) + .1u^3(t) + .025u^4(t) + .01u^5(t)$ és egy kimeneti dinamikus lineáris rendszer (3-ad rendű aluláteresztő Butterworth-szűrő) soros kapcsolatából áll. Egy véletlen fázisú harmonikus gerjesztő jel (409 db csakis páratlan azonos amplitúdójú felharmonikus) egyetlenegyszeri alkalmazásával mérjük (Matlab szimuláció) a vizsgált rendszer empirikus frekvencia karakterisztikáját (Empirical Transfer Function Estimate - ETFE), zajmentes mérési összeállításban. A gerjesztés szintjét fokozatosan növeljük (az ábrán balról jobbra a gerjesztő jel szórása: $\sigma = 0.01, 0.1, 0.5, 1$). Alacsony gerjesztés szint mellett a rendszer frekvencia karakterisztikája meggyőzően lineáris, nagyobb gerjesztés szint esetén a nemlinearitás azonban érezhetővé válik, a karakterisztikán torzítást és láthatóan véletlenszerű "zajt" keltve. Egy tapasztalatlan felhasználó félreinterpreteálhatja ezeket a fejleményeket, ha szigorúan a lineáris elméleten belül marad. (Vegyük figyelembe, hogy 409 db, csakis páratlan gerjesztett felharmonikus esetén a legmagasabb gerjesztett frekvencia a 818-ik felharmonikus. Továbbá a jobb áttekinthetőség kedvéért az egyes ábrák átlapolva lettek szerkesztve).

Továbbiakban olyan kutatási eredményekről számolok be, amelyek az előbb említett problémák legalább egy részére keresnek és adnak választ. Olyan, még mindig lineárisnak mondható, mérési és modellezési technikát elemzek, amely a nemlineáris rendszerek esetében is, külön nemlinearitási tesztek nélkül a linearitási feltétel megsértésének mértékét is képes meghatározni és figyelembe venni, számszerűsítve a lineáris modellt sújtó nemlineáris hatásokat. A nemlineáris hatások számszerűsítése lehetőséget teremt ugyanúgy kvantifikálni a lineáris modell robusztusságát az alkalmazandó gerjesztő jelek tekintetében. Az ilyen, kvalitatíve több információt nyújtó lineáris modell birtokában a felhasználó eldöntheti, hogy meddig szabad a lineáris mérés technikánál maradnia, és mikor érdemes már a nemlineáris modellekre áttérnie.

A kutatási célok és a kutatás módszere

Az értekezés a nem parametrikus lineáris frekvencia karakterisztika (Frequency Response Function - FRF) mérés technikájának egy lényegi kiterjesztésével foglalkozik. Ebből kifolyólag az FRF

méréstechnikája meghatározza minden további feltételezés kontextusát, miszerint az eredményeket frekvencia-tartományban és a bemeneti-kimeneti rendszer relációra fogalmazzuk meg.

Bár az idő-tartománybeli és a frekvencia-tartománybeli mérések azonos információt képviselnek és a méréstechnikai probléma megfogalmazása önmagában ekvivalens, a rendelkezésre álló információ másképpen jelenik meg a mérési adatokban, utat nyitva eltérő feldolgozásból adódó előnyökhöz. A frekvencia-tartomány előnyeihez tartozik a gerjesztett frekvenciák megválasztásának a szabadsága, instabil rendszerek modellezésének lehetősége, továbbá, ha a periodikus gerjesztéseknél maradunk, a vizsgált rendszer és a kimeneti zaj modellezésének szétválasztása és a nem parametrikus zajmodell lehetősége, modellezés visszacsatolás jelenlétében, végül (ami az értekezésnek fő mondanivalója) a nemlinearitás és a kimeneti zaj hatásának a szétválasztása.

A nem parametrikus lineáris frekvencia karakterisztika mérésénél megoldást keresünk arra az esetre, amikor a vizsgált rendszerben nem elhanyagolható nemlineáris hatások mutatkoznak (azaz a vizsgált rendszer egy gyengén nemlineáris rendszernek mondható). Megmutatjuk, hogy a nemlinearitás hatását hogyan lehet a frekvencia karakterisztika mérésével egy időben érzékelni és a mért lineáris frekvencia karakterisztika hibáiként értelmezni, megkerülve így a teljes nemlineáris rendszeridentifikáció szükségességét. A lineáris frekvencia karakterisztika mérése matematikailag a nemlineáris rendszer négyzetes értelemben vett lineáris approximációjának felel meg a frekvencia-tartományban. Ezért a mérési eljárás eredményeként adódó karakterisztikával jellemzett rendszert a vizsgált rendszer legjobb lineáris közelítésének (BLA, Best Linear Approximation) fogjuk nevezni.

A kutatások során módját keressük továbbá annak is, hogy az egy bemenetű – egy kimenetű (Single Input – Single Output, SISO) rendszerekre megfogalmazott eredményeket átvihezzük a több dimenziós, több bemenetű – több kimenetű (Multiple Input – Multiple Output, MIMO) rendszerekre. Választ keresünk arra is, hogy a javasolt méréstechnikával kapott lineáris modelleket hogyan feleltessük meg a hagyományos módszerekkel mért lineáris modelleknek, biztosítva ezáltal számos területen a kutatás eredményeként előálló mérési eljárások közvetlen és hatékony felhasználását meglévő alkalmazásokban.

Mivel módszertanilag a lineáris méréstechnika eszközeinél maradunk, elsődleges fontosságú a gerjesztő jelek megfelelő megválasztása. A módszertan kidolgozásánál figyelembe vettük, hogy manapság, a mérő berendezések komoly számítási kapacitása miatt, a számítási idő olcsó, de a tényleges fizikai kísérletek drágák lehetnek (a kísérletek hossza, vagy a szükséges bonyolult műszerezés miatt). A cél érdekében a lineáris FRF méréstechnikáját oly módon egészítjük ki, hogy a nemlineáris hatások a lineáris kísérletekkel egyidőben mérhetők, ill. legalább kvalitatív módon, meghatározhatók legyenek - drága kiegészítő mérések nélkül.

Fontos megemlíteni, hogy a nem parametrikus FRF mérése egy szükségszerű információszerző lépés, amely mindig megelőzi a frekvencia-tartományban a parametrikus rendszeridentifikációt, képet nyújtva az identifikált rendszer jellegéről.

A nemlineáris hatások kiértékelése érdekében a vizsgált rendszert valamilyen nemlineáris modellel kell jellemezni. A nemlineáris rendszerelméletben modellek sokasága létezik. E mellett a nemlineáris rendszeridentifikáció gerjesztés függő. Mivel egy gyakorlatban használható és kivitelezhető

elméletet szeretnénk megalkotni, a megfelelő rendszermodell és gerjesztés típus megválasztása (korlátozása) kiemelten fontos. A lényegi munkafeltételezésekhez tartozik:

- a nemlineáris rendszerosztály,
- a gerjesztő jelek,
- a konkrét lineáris mérés technikai módszertan

indokolt megválasztása.

A rendszermodellről

Az értekezésben, a nemlineáris problémák modellezésénél konvergens Volterra-sorokra (ld. 1. képlet) esett a választás. E modellosztály hasznosságát az támasztja alá, hogy:

1. Természetes módon lehetséges benne a lineáris és a nemlineáris jelleg együttes (additív) tárgyalása és a nemlinearitás mennyiségi kézbetartása;
2. Számos gyakorlati fontosságú nemlineáris rendszer alacsony fokszámú Volterra sorral már jól leírható;
3. Sok rendszer négyzetes értelemben aszimptotikusan közelíthető Volterra-sorokkal;
4. Kidolgozott a Volterra-sorok frekvencia-tartománybeli reprezentációja;
5. Természetes módon (kernelfüggvényekkel) lehetséges a nemlineáris dinamika modellezése;
6. A Volterra-sorok lefedik a gyakorlati szempontból fontos un. nemlineáris blokkmodelleket (a lineáris dinamikus és a statikus nemlineáris rendszerek különböző kombinációit), azaz a Wiener-, a Hammerstein- és a Wiener-Hammerstein modelleket; és ha a kernelfüggvényekben Dirac- vagy Kronecker-delta függvényeket is megengedjük, akkor az un. nemlineáris, véges impulzusválasz-függvényű (Nonlinear Finite Impulse Response (NFIR)) modelleket is;
7. Az egy-bemenetű egy-kimenetű (SISO) modellek a több-bemenetű több-kimenetű (MIMO) esetre kiterjeszthetők;
8. Lehetőség van a fizikai a priori tudás figyelembevételére (a Volterra kernelfüggvények száma, fokszáma, szimmetriája, frekvencia sávja, stb. által);
9. Periodikus (majdnem periodikus) gerjesztésre a Volterra-sorok periodikus (majdnem periodikus) kimeneti jelekkel válaszolnak.

Mindezek ellenére a Volterra modellek nem univerzális eszközök, a kifejező erejük korlátos, ráadásul sok olyan érdekes és fontos nemlineáris jelenség is létezik, amit Volterra modellekkel csak módjával, vagy egyáltalán nem lehet leírni. Tekintettel, hogy a Volterra sorok a Taylor sorfejtés egyfajta általánosításai, nem modellezhetők velük bifurkációk, kaotikus viselkedés, nemlineáris rezonanciák, szub-harmonikusok generálása, stb.

$$y(t) = V^{(K)}[u](t) = \sum_{\alpha=1}^K y^{\alpha}(t) = \sum_{\alpha=1}^K \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} g_{\alpha}(\tau_1, \dots, \tau_{\alpha}) \prod_{i=1}^{\alpha} u(t - \tau_i) d\tau_i \quad (1)$$

A gerjesztő jel modellről

A második lényegi döntés a gerjesztő jelekre vonatkozik. A kutatás során az aszimptotikusan Gauss-eloszlású periodikus bemeneti jelekre (ld. 2. képlet) tettük a hangsúlyt, mivel:

1. A periodikus jelek kevesebb problémát jelentenek az FRF méréseknél (nincs spektrális szivárgás);
2. A periodikus bemeneti jelek és a mérést terhelő zaj tulajdonságai könnyen elkülöníthetők;
3. A gerjesztés egyszerű módon randomizálható (véletlen fázisok és/vagy a spektrális amplitúdók);
4. Szabad kezünk van a különböző tulajdonságú gerjesztések formálásában, spektrális tulajdonságokat, fázisokat, ill. frekvencia-rácsot manipulálva;
5. Az ilyen, akár nagyon nagy felharmonikus tartalmú gerjesztéseket manapság modern jelgenerátorokkal könnyű megvalósítani, amiből kifolyólag a kifejlesztett elmélet közvetlenül alkalmazható a gyakorlatban;
6. Lehetőség van a nem periodikus jelek közelítő modellezésére is, feltéve, hogy egy véges frekvencia sávban növeljük az alkalmazott felharmonikusok számát;
7. A javasolt gerjesztő jel alkalmazásával kiváltható a sok mérés technikai problémakörben eddig jól bevált, sokak által megszokott Gauss-zaj gerjesztés, megőrizve azt a sajátosságot, hogy a Gauss eloszlású jelek „barátságosan” viselkednek statikus nemlinearitások esetén;
8. A harmonikus gerjesztő jeleket könnyű analitikusan integrálni és differenciálni, megkerülve a hibaérzékeny numerikus módszerek problémáit, amikor pl. szükség van a gerjesztő jel ilyen különböző formáinak (pl. sebesség, szögpozíció és gyorsulás) együttes alkalmazására.

$$u(t) = \sum_{k=1}^M A_k \cos(\omega_k t + \phi_k) \quad (2)$$

A módszertanról, dióhéjban

A kitűzött cél a lineáris ként mért nemlineáris rendszer FRF frekvencia-karakterisztikájában felismerni és szétválasztani a rendszeres (a mérési eredményben megmaradó torzító) és a zajszerű, alkalmas utófeldolgozással eltüntethető nemlineáris hatásokat.

Ennek érdekében szükség van egy jól kezelhető sztochasztikus folyamatra, melynek mintafüggvényeivel a vizsgált rendszert gerjesztjük. Az egyes mintafüggvényekre a nemlineáris rendszer mindig másképpen fog válaszolni, a rendszeres hibát (a lineáris FRF-hez képest) más-más módon viselkedő „nemlineáris zajjal” álcázva (ld. 1. ábra).

Mivel a rendszer bemenete egy sztochasztikus folyamat, a rendszer kimenete szintén egy sztochasztikus folyamat lesz, amely jelekből, elvben, a rendszeres (nem nulla várható értékű) és a „zajszerű” (nulla várható értékű) hibakomponenseket megfelelő eljárással, a megfelelő momentumok kiszámításával, ki tudjuk nyerni.

Az eljáráshoz szükséges momentumok becslését az egész bemeneti sokaságra vonatkozó várhatóérték-képzéssel kell elvégezni, ami mérés-technikai szempontból azt jelenti, hogy a bemeneti sztochasztikus folyamatból független mintafüggvényeket generálva és gerjesztésként alkalmazva, lineárisan átlagoljuk a mérésből kapott egyedi eredményeket (ld. 3. képlet, ahol az l változó a diszkrét frekvencia).

Az alkalmazott lineáris átlagolás megfelelő módszer, mert (a) a lineáris átlagolás az elvi várhatóérték konzisztens becslése, és a mérésszámnak nincs elvi korlátja, a gyakorlati korlát legfeljebb a mérési időben jelentkező (műszerezés költsége, stacionaritás elvesztése, stb.); (b) lineáris esetben Gauss jeleknél az átlag egyben minimális varianciájú becslő; (c) a lineáris átlag rekurzív módon számítható a mérési eredmények fölösleges tárolása nélkül, ami különösképpen az (a) miatt fontos.

$$\hat{G}(l) = \frac{E\{Y(l)\bar{U}(l)\}}{E\{|U(l)|^2\}} = \frac{S_{YU}(l)}{S_{UU}(l)} \approx \frac{\sum_{k=1}^N Y_k(l)\bar{U}_k(l)}{\sum_{k=1}^N |U_k(l)|^2} = \frac{\hat{S}_{YU}(l)}{\hat{S}_{UU}(l)} \quad (3)$$

A kutatások kezdetekor a vizsgált gerjesztő jel rögzített periódusidejű Gauss zaj volt (az un. periodikus zaj), az elterjedt alkalmazások, ill. az örökölt eredmények miatt. Az áttöréshez vezető gondolat annak a felismerése volt, hogy – ha a több felharmonikust tartalmazó trigonometrikus polinom jel fázisai véletlenek, függetlenek és az eloszlásuk az egységkörön értelmezett egyenletes eloszlás, akkor – a harmonikus komponensek számának növelésével az ilyen, **véletlen fázisú multiszínusznak** nevezett gerjesztő jel (ld. 2. képlet) Gauss tulajdonságú jelhez, és a vele végzett FRF mérések eredménye aszimptotikusan a Gauss zajjal végzett mérési eredményekhez tart a **vizsgált nemlineáris rendszerek esetén is**, cserébe teljes kontrollt biztosítva a gerjesztés spektrális tartalma fölött.

A kutatási eredmények összefoglalása

A kutatásaim háttéréről

VUB ELEC tanszéken (Vrije Universiteit Brussel, Dienst Algemeene Electriciteit en Instrumentatie) lineáris rendszeridentifikációt támogató tudás intenzív algoritmusokat kutatva csatlakoztam a nemlineáris problémákkal foglalkozni kezdő csoporthoz és tagja lettem - a jelen értekezés szempontjából releváns - alapelméletet megalapozó team-nek. Több periódusban tanulmányoztam az ezen elméletből fakadó SISO jellegű problémákat, majd kidolgoztam az elmélet alapjait MIMO esetre, ahol a folytatásban számos további nyitott problémával is foglalkoztam. Azóta ez az elmélet intenzíven kutatott téma több nemzetközi elméleti és alkalmazói műhelyben.

Az FRF mérésekben fellépő nemlineáris hatások kutatásában az alapkonceptiók helyileg a VUB ELEC tanszékén láttak ugyan napvilágot, de a VUB-re más egyetemi kutató csoportokból sűrűn szervezett tanulmányi látogatások révén az előrehaladás lehetőségeit folyamatosan mérlegeltük és megvitattuk, és kifejezetten közös szerzőségű publikációkban jelenítettük meg (a BME

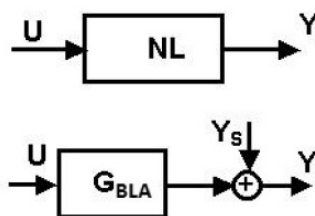
Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék számára a támogató háttérrel, 1997-2006 között, elsősorban 4 db sikeres Flamand-Magyar Kormányközi Pályázat biztosította).

A tudományos eredmények között ily módon található olyanok, ahol a felelős egyéni szerző elkülönítése gyakorlatilag nem lehetséges, vannak azonban olyan eredmények, amelyeket felelősségteljesen magaménak tulajdonítok, a többszerzős publikációk ellenére. Teljesség kedvéért először a szétválaszthatatlan eredményeket foglalom össze, az elkülönülő szerzőségű eredményeket pedig, szokásos módon tézisekbe foglalom.

Együttesen elért kutatási eredmények

I. Kidolgoztuk a (gyengén) nemlineáris SISO rendszerekre vonatkozó legjobb lineáris nem-parametrikus közelítés elméletét. Megadtuk a közelítés matematikai struktúráját és az egyes komponenseinek elvi és a gyakorlatban verifikálható tulajdonságait. Az elméleti megközelítéshez, mérlegelve a lineáris frekvencia-karakterisztika mérés szempontjait, megadtuk a megfelelő elemzésekkel, szimulációkkal és javaslatokkal támogatott mérés technikai technológiai háttérrel.

A kidolgozott elmélet lényege a 2. ábrán látható és a 4. képlettel kifejezett helyettesítő kép, amely szerint bizonyos körülmények között a nemlineáris rendszer helyettesíthető egy lineáris rendszerrel (az eredeti rendszer un. legjobb lineáris közelítésével - BLA: Best Linear Approximation), amely szoros kapcsolatban áll a nemlineáris rendszer lineáris részével, valamint egy additív nemlineáris zajjal, melynek varianciája erősen függ az eredeti rendszer nemlineáris részétől. Minél erősebb a nemlinearitás, annál jobban módosul a BLA rendszer (nem parametrikus FRF karakterisztikája) és annál erősebben jelentkezik a (nemlineáris) additív zaj. (Lineáris rendszer mérése esetén a BLA a lineáris rendszerrel egybeesik.)



2. ábra. A nemlineáris rendszer BLA + additív (nemlineáris) zajmodellje.

$$Y(l) = G_{BLA}(l)U(l) + Y_s(l) \quad (4)$$

Az FRF nemlineáris torzítása csak a páratlan fokszámú kernelfüggvényektől függ, a nemlineáris zaj viszont egyaránt függ a páratlan és a páros fokszámú kernelfüggvényektől és igen „barátságos” sztochasztikus tulajdonságokkal rendelkezik. (Adott frekvencián a nemlineáris zaj zérus várhatóértékű, aszimptotikusan cirkuláris komplex normális eloszlású véletlen változó, valamint aszimptotikusan korrelálatlan más frekvenciákon mért zajértékekkel és (azonos frekvencián mért) bemeneti jellel is.)

II. Megvizsgáltuk többféle frekvenciarács alkalmazásának következményeit. Lineáris méréseknél a multiszínusz gerjesztő jel frekvenciarácsa legfeljebb a perzisztencia, ill. a kapott eredmények felbontása miatt lehet érdekes. Nemlineáris méréseknél, ahol a nemlineáris komponensek multiplikálják a kimeneti jelben a bemeneti jel frekvenciáit, a frekvenciarács megválasztása alapvetően hat a mérési eredmények jellegére. Az alap gondolat bizonyos felharmonikusokat kihagyni, ill. ügyesen (nem egyenletesen) csoportosítani és ezáltal befolyás alá vonni a nemlineáris torzítások hatását az eredményre.

A kutatások során nagyon sok frekvenciarács került megvizsgálásra, eléggé differenciált eredményekhez vezetve. Alapvetően kétféle megközelítéssel foglalkoztunk: (a) bizonyos nemlineáris hatások teljes kiejtését eredményező rácsok, ill. (b) a gerjesztett és az un. tesztfrekvenciákat tartalmazó rácsok, ahol a tesztfrekvencián nemlineáris hatásokat mérve, következtetni lehetett valamilyen mértékben arra, hogy milyen hiba sújtja a gerjesztett frekvenciákon mért karakterisztika értékeket. A probléma bonyolultabb frekvenciarácsok esetén analitikusan nem követhető, az elvégzett kimerítő szimulációk arra engednek következtetni, hogy a tesztfrekvencián mért nemlineáris torzítások nagyságrendileg egybeesnek a gerjesztett frekvenciákon mért és a karakterisztika méréseit meghamisító nemlineáris hibákkal, lehetőséget teremtve azok legalább részleges kompenzálására.

III. Kimerítően foglalkoztunk a legjobb lineáris közelítés aszimptotikus tulajdonságaival. Az alap felismerés az volt, hogy ha a Volterra-sort sok felharmonikus tartalmazó véletlen multiszínuszos jellel gerjesztjük, akkor a gerjesztő jel megfelelő normalizálása mellett a legjobb lineáris közelítés kifejezése formálisan egy Riemann integrálközelítő összegnek felel meg. Ebből kiindulva nagyon sok, gyakorlatban fontos gerjesztő jel esetén megfogalmaztuk azokat a (Riemann-ekvivalens) feltételeket, amelyek betartásával, e jelekkel mért és a Volterra-sorok négyzetes értelemben vett határértékével közelíthető nemlineáris rendszerek jellemezhetőek invariáns módon a korábban bevezetett additív helyettesítő képpel.

IV. Kutattuk a nemlineáris hibakomponensek kölcsönös viszonyát. Tekintettel, hogy a BLA méréseknél a nemlineáris zaj varianciája (a gerjesztések megfelelő megtervezésével) közvetlenül mérhető, a BLA rendszeres torzítottságának mértéke pedig egyáltalán nem, régóta kutatott téma, hogy becsülhető-e az egyik a másikkal. Pontosabban a cél annak a kiderítése volt, hogy mivel a BLA közelítés nemlineáris torzítás függő, az viszont függ a bemeneti jelektől, becsülhető-e a BLA karakterisztika variabilitása, ha a bemeneti jel teljesítménye megváltozik.

Hogy figyelembe vehessünk olyan nemlineáris rendszereket is, amelyeknek nem létezik valódi lineáris részük, a szisztematikus és a véletlen nemlineáris hatás jellemzésére újfajta mérőszámot javasoltunk, melynek analitikus formáját megadtuk a statikus polinomiális rendszerek esetére. A worst-case korlátot numerikus számításokkal határozzuk meg. Általánosabb felépítésű nemlineáris rendszereknél (vizsgáltuk az un. Wiener-, Wiener-Hammerstein, és több parallel ágból álló általánosított Wiener-rendszereket) a korlát felállítása nemlineáris zajvariancia alapján a probléma komplexitása miatt, még numerikus módszerekkel sem tűnik kivitelezhetőnek.

V. Becslést adtunk a visszacsatolt rendszer stabilitásvesztésének valószínűségére. Nemlineáris hatások beleszólhatnak egy visszacsatolt rendszer stabilitásába. Itt kifejezetten azzal a részproblémával foglalkoztunk, hogy mi történhet, ha a nemlinearitások kicsik, a rendszert alapvetően lineárisnak gondoljuk (és nem szándékozunk nemlineáris rendszeridentifikációt alkalmazni), mégis a jelek amplitúdója annyira felerősödhet a hurokban, hogy a nemlineáris hatás végül érzékelhetővé válik.

Az alapötlet a kimeneti teljesítmény felbontása (a bemenettel kapcsolatos) koherens és nem koherens komponensekre és nemlineáris teljesítmény erősítési tényező bevezetése, ami méri a nem koherens teljesítmény érzékenységet a bemeneti perturbációkra. Az erősítési tényező becslésével (GEV - General Extreme Value distribution: extrémális értékű statisztikák elmélete alapján) körülhatárolható annak valószínűsége, hogy a hurok a mérés folytatása során esetleg instabillá válik.

Hozzájárulásaim a SISO elmélethez

Az elvi alapok megteremtése során számos további problémát tártunk fel, ahol a hozzájárulások már konkrét kutatókhoz köthetők. SISO rendszerek esetében foglalkoztam a multiszinuszos jelek tervezési szempontjaival és a szisztematikus nemlineáris hiba (FRF torzítása) kiértékelésével néhány jobban körülhatárolt mérés-technikai problémakörben. Ezeket az eredményeket az alábbiakban független kutatási tézisekben foglalom össze.

1. Téziscsoport. Multiszinuszos gerjesztő jelek tervezési módszertana – SISO rendszerek esete

A multiszinuszos gerjesztő jelek nagy előnye, hogy a tervezési paraméterei révén (amplitúdók, fázisok, frekvenciarács) az alkalmazások változó igényeihez igen rugalmasan alakíthatók.

1.1 Kutatott problémakör: A magas felharmonikus tartalmú multiszinusz jelek elméleti és műszerezettségi megalapozása előtt számos mérés-technikai területen az uralkodó gerjesztő jel a Gauss eloszlású zaj volt. Elméletileg a kétfajta jel aszimptotikusan ekvivalens, azonban a gyakorlati hitelesség érdekében meg kellett vizsgálni a jelek nem aszimptotikus viselkedését is.

1.1 Tézis: Tervezési megfontolások a multiszinuszos jelszintézishez

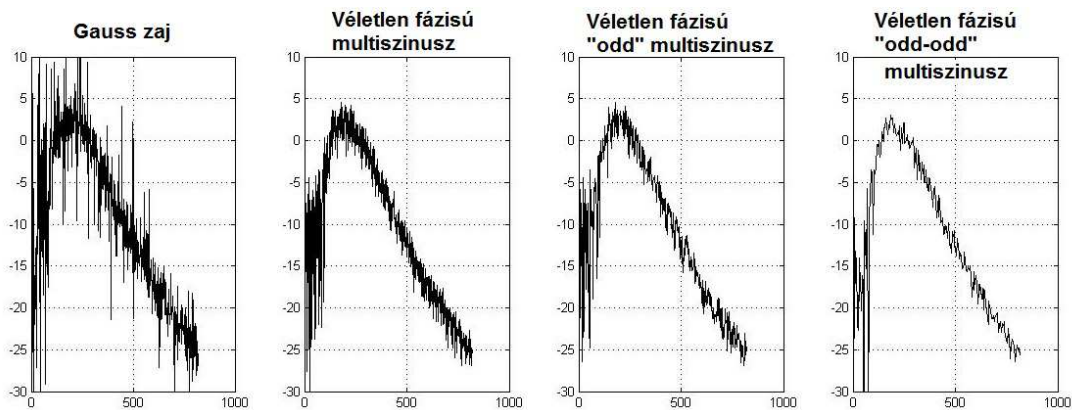
Az elméleti megfontolások és az elvégzett szimulációk alapján javaslatokat tettem a jelkomponensek megválasztására nem aszimptotikus feltételek mellett.

A gyengén nemlineáris rendszerek FRF mérésénél az "odd-odd" (kétszeresen páratlan: minden második páratlan harmonikus frekvencia) véletlen fázisú multiszinusz gerjesztőjeleket javaslom használni, mivel:

- a mért FRF ugyanaz, mint a Gauss jellel mért rendszer esetében,
- a páros nemlinearitások és részben páratlan nemlinearitások hatásának kiesése miatt a mérés bizonytalansága nagymértékben csökken (ld. 3. ábra),
- lehetőség van a páros és a páratlan nemlinearitások szétválasztására és megjelenítésére.

Megállapítható továbbá, hogy a Gauss zaj alkalmazása esetén a kényszerű sávkorlátozásnak és az amplitúdó levágásának torzítás növelő hatással van a mért FRF-re, feltéve, ha a mért rendszer

tartalmaz páratlan nemlinearitásokat, illetve hogy a szokásos $\pm 3 \sigma$ levágási szint a nemlineáris méréseknél nem lesz elegendő (a javasolt szint $\pm 4 \sigma$).

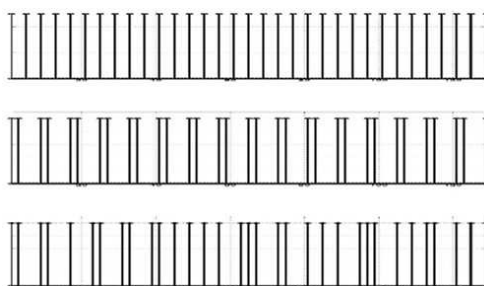


3. ábra. A kétszeresen páratlan (odd-odd) véletlen fázisú multiszínusz gerjesztő jel nemlineáris zaj csökkentő hatása.

1.2 Kutatott problémakör: Frekvenciarács a multiszínuszos jelek tervezési paramétere. Különböző struktúrájú frekvenciarácsok sikerrel alkalmazhatók egy-egy speciális mérés technikai probléma megoldásaként. Ha az alkalmazott frekvenciarácsok a felépítésükben különböznek, fontos kérdés, hogy akkor mennyire mondhatók konzisztensnek a mérési eredmények - az FRF karakterisztika legjobb lineáris közelítése?

1.2 Tézis: A multiszínuszos gerjesztő jelek frekvencia-rács modellezése egyenletes eloszlású pontthalmazok elméletével és a mérési eredmények ezen alapuló aszimptotikus ekvivalenciája

Megállapítottam, hogy ha a frekvenciarácsok, egyenletes eloszlású pontthalmazokként értelmezve, egyre nagyobb felbontásúak (egyre kisebb diszkrétenciájúak), akkor a különböző felépítésű frekvenciarácsokon definiált véletlen fázisú multiszínusz gerjesztő jelekkel végzett mérési eredmények közötti hiba csökken és a nagysága a rácsfinomítás nagyságrendjébe esik.

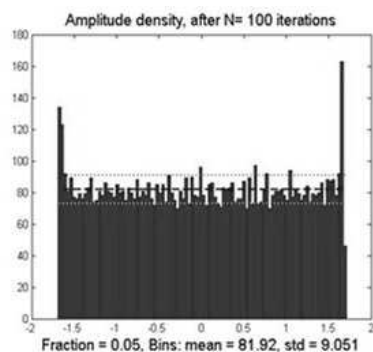


4. ábra. Aszimptotikusan ekvivalens eredményeket adó, hasonló diszkrétenciájú frekvenciarácsok példái.

1.3 Kutatott problémakör: Nemlineáris rendszerek mérésénél fontos a gerjesztő jel amplitúdósűrűségének megfelelő formálása, kézbe tartása, hogy a nemlineáris karakterisztika egyes szakaszaira eső jelteljesítményt az alkalmazás igényeinek megfelelően szabályozhassuk.

1.3 Tézis: Széles sávú gerjesztő jelek tervezése amplitúdó sűrűség felhasználói formálásával

Megmutattam, hogy a multiszinuszos jeleknél a tervezői kézben lévő fázisok, alkalmas algoritmusokkal (a fázisok iteratív módosításával), felhasználhatók a gerjesztő jel amplitúdósűrűségének az alkalmazói igényeknek megfelelő formálására, sőt kompromisszumos módon bevihető az eljárásba a csúcstényező minimalizálása is.



5. ábra. Egy multiszinuszos gerjesztő jel amplitúdójának egyenletes eloszlásra való beállítása a fázisok megfelelő megválasztásával.

2. Téziscsoport. A rendszeres nemlineáris hiba tulajdonságai – SISO rendszerek esete

Egy gyengén nemlineáris rendszer legjobb lineáris közelítésének tényleges rendszeres hibája nem ismert (nem mérhető), viszont közvetlenül mérhető a véletlen hiba - a nemlineáris zaj varianciája. A nemlineáris torzítás és nemlineáris zajvariancia elvi kifejezéseiben részben ugyanazok a magasabb rendű kernelfüggvények szerepelnek (bár másképpen integrálva és összegezve). Kérdésként vetődik fel, hogy nem becsülhető-e a lineáris karakterisztika nemlineáris rendszeres hibája a nemlineáris zajvarianciájával. Mivel a valódi rendszer (dinamika, nemlinearitások) nem ismert, a kérdésnek csak worst-case értelemben van értelme.

2.1 Kutatott problémakör: Érdekes és gyakorlati fontosságú eset minősíteni a kapott mérési eredmények pontosságát, amikor nem rendelkezünk megbízható információval a nemlinearitás jellegéről. A kutatásban feltételeztük, hogy a nemlinearitás polinomiális és egyéb a priori információ hiányában kíséreltük meg meghatározni a karakterisztika hiba legrosszabb esetét.

2.1 Tézis: A legjobb lineáris közelítés rendszeres hibájára (torzítására) jellemző korlátok vizsgálata

Megállapítottam, hogy statikus polinomiális nemlinearitásoknál a köbös rendszer worst-case esetnek tekinthető és ennek alapján megadtam a nem mérhető hiba worst-case becslését. Az eljárást heurisztikus alapon kiterjesztettem a Wiener-Hammerstein rendszer modell esetére.

2.2 Kutatott problémakör: A koherencia függvény egy közismert eszköz a nemlineáris rendszerek felismerésében és vizsgálatában. Az általam vizsgált kérdés az volt, hogy ha egy nemlineáris rendszer rendelkezik a legjobb lineáris közelítés alapú helyettesítő képpel, akkor ennek elemeivel (torzítás és nemlineáris zaj) vajon hogyan fejezhető ki a rendszer koherencia függvénye?

2.2 Tézis: A koherencia függvény és a legjobb lineáris közelítés kapcsolatának vizsgálata

Meghatároztam, hogy a nemlineáris rendszer koherencia függvénye kifejezhető a legjobb lineáris közelítés leíró elemeivel (rendszeres nemlineáris torzítás és véletlenszerű nemlineáris zajvariancia), valamint hogy a koherencia függvény nemlinearitást jellemző tulajdonságai konzisztensek a legjobb lineáris közelítés elemeinek viselkedésével. A vizsgálatokat általánosságban, illetve konkrétan nemlineáris rendszerstruktúrákat (Wiener-Hammerstein) feltételezve végeztem el.

2.3 Kutatott problémakör: Kérdés, hogy mikor jogos a gyengén nemlineáris rendszerek szuperponálásakor a külön kimért legjobb lineáris közelítő karakterisztikákat összeszorozni a lineáris rendszerelméletből ismert elv mintájára. A vizsgálatot, egyfajta jellemző esetként, a kis mértékben torzított köbös Wiener-Hammerstein rendszerekre végeztem el.

2.3 Tézis: A SISO rendszerek szuperpozíciójának vizsgálata a legjobb lineáris közelítés szempontjából

Megállapítottam, hogy abban a frekvencia tartományban, ahol a két szuperponált rendszerkomponens magas értékű koherencia függvényével rendelkezik, érvényes marad a lineáris rendszerelméletből ismert szorzatreláció (a szuperponált rendszerek frekvenciakarakterisztikája az egyes frekvenciakarakterisztikák szorzata).

2.4 Kutatott problémakör: A legjobb lineáris közelítés mérésének szokásos megvalósítása a mért frekvencia-tartománybeli jelek lineáris átlagolása (3. képlet) (Gauss gerjesztő jelek és lineáris rendszer esetében ez egyben a minimális varianciájú Maximum Likelihood becslés). Ez a minimális variancia alapja a szokásos mérési pontosság kontra mérési idő tervezésének. A nemlinearitás miatt azonban a sokaság szerinti átlagolás többé nem optimális becslés és a varianciája nem az elérhető elvi minimum. Kérdés, hogy milyen feltételek mellett tudjuk javítani a legjobb lineáris közelítés mérésének konvergencia viszonyait?

2.4 Tézis: A legjobb lineáris közelítés mérési idejének mérséklése Monte Carlo varianciacsökkentő módszereivel

Kifejlesztettem a legjobb lineáris közelítés méréstechnikai protokolljának egy olyan változatát, ahol az alap mérési protokoll (3. képlet) bonyolítása nélkül, a zajvariancia-csökkentő Monte Carlo technika alkalmazásával kedvezőbb feltételeket kaptam a mérési pontosság kontra mérési idő problémára.

Hozzájárulásaim a MIMO elmélethez

A problémafelvetés szintjén is originálisnak tekinthető alapkutatói eredményeket a MIMO rendszerek területén értem el. Itt vizsgáltam a MIMO rendszerek legjobb lineáris közelítését általánosságban, majd foglalkoztam néhány kiemelt speciális problémával is.

3. Téziscsoport. A rendszeres nemlineáris hiba tulajdonságai – MIMO rendszerek esete

Bonyolultabb jelenségeknél több, egyidejű kölcsönhatást is figyelembe kell tudnunk venni. Elvárjuk ennél, hogy a korábban megfogalmazott egydimenziós elmélet a többdimenziós elmélet speciális

eseteként jelenjen meg. Nem zárható ki az sem, hogy a több bemeneti gerjesztés jelenléte és kölcsönhatása a nemlineáris rendszeren belül olyan újszerű problémákhoz is vezet, amiknek a SISO elméletben nincsen megfelelője.

3.1 Kutatott problémakör: Több bemenetű rendszerek esetében a legjobb lineáris közelítő karakterisztika külön-külön definiálható és mérhető minden egyes bemenet-kimenet jelcsatornára. Az ilyen karakterisztika számításánál más bemenetek (a rendszeren belüli csatolások miatt) zavarjelként viselkednek és a várható értékek (3. képlet) számítását bonyolítják. A SISO rendszerhez hasonlóan bizonyos kernelfüggvények nem gerjesztenek rendszeres nemlineáris hibát, a teljes kép azonban sokkal komplikáltabb. Gyakorlati fontosságuk miatt külön foglalkoztam a két bemenetű - két kimenetű gyengén nemlineáris rendszermodellekkel.

3.1 Tézis: Az általános MIMO elmélet megalkotása az FRF nemlineáris hibái szempontjából

A két bemenetű legfeljebb harmadfokban nemlineáris rendszer esetében megállapítottam, hogy a SISO legjobb lineáris közelítés méréseivel kidolgozott multiszinuszos mérés technikát alkalmazva, az egyes bemenetekre azonos frekvenciarácson definiált, de egymástól független fázisokat tartalmazó jeleket ráadva, a rendszer kimenete, a SISO esethez hasonlóan, felírható 2-dimenziós lineáris karakterisztika és a nemlineáris zaj összegeként. Folytatásul teljes általánosításként megállapítottam, hogy a véletlen multiszinusz jelekkel gerjesztett több bemenetű Volterra-rendszer felírható legjobb lineáris közelítő FRF karakterisztikák hálózatoként, kimenetenként nemlineáris zajokkal kiegészítve. A korábban kapott SISO és két bemenetű esetek az általános modell speciális esetei.

3.2 Kutatott problémakör: A SISO rendszerekhez hasonlóan MIMO rendszerek körében is érdekes kérdés, hogy mennyire robusztus egy MIMO rendszer legjobb lineáris közelítésének FRF mátrixa a rendszerre szuperponált további nemlineáris hatások szempontjából. Két szituációt hasonlítottam össze, amikor a MIMO Volterra-rendszer gerjesztése ideális, illetve egy olyan generátorral valósul meg, amit a vizsgált rendszer leterhel. Alkalmos módon definiálva a nem ideális generátor nemlinearitását vizsgáltam a MIMO rendszer legjobb lineáris közelítésének FRF mátrixának robusztusságát. A vizsgálatokat általános rendszerek esetére végeztem, amit majd a szimulációk érdekében 2-dimenziós harmadfokú rendszerekre korlátoztam.

3.2 Tézis: A MIMO rendszerek szuperpozíciójának vizsgálata a legjobb lineáris közelítés szempontjából

Megállapítottam, hogy a legjobb lineáris MIMO közelítés robusztus, ha a nemideális gerjesztéseket gyengén nemlineáris MIMO Volterra-rendszerrel modellezzük. Megállapítottam, hogy azonos nagyságrendű nemlineáris hatások nagyobb eredő torzításokhoz vezetnek, mint a lineáris torzító hatások, a keresztcsatolásokban található torzító hatások nagyobb hibákhoz vezetnek, mint az egyenes ági hatások, ill. a fázis hibák gyorsabban nőnek az amplitúdó hibákhoz képest.

4. Téziscsoport. Gerjesztő jelek tervezése – MIMO (MISO) rendszerek esete

Több bemenet nagyobb szabadságot jelent a gerjesztések tervezésénél. Az egyedi jelek tervezési paraméterein túlmenően eldönthetjük azt is, hogy hogyan viszonyuljanak egymáshoz a különböző

bemeneteken és a különböző mérésekben alkalmazott gerjesztő jelek. A kihívás olyan gerjesztő jelek megtervezése, amelyek „jobb mérés technikát” eredményeznének, pl. kisebb költségen ekvivalens mérési eredményeket biztosítva. Több bemenetű rendszerek esetén különbséget kell tenni a két és a kettőnél több bemenetű gyengén nemlineáris rendszerek között. Meglepő módon alacsony fokszámú, két bemenetű rendszereknél még mindig sikerrel alkalmazhatók a hagyományos, lineáris mérés technikából ismert zajcsökkentő módszerek. Ez az előny azonban magasabb fokszám és/vagy több bemenet esetén elvész és a zajok csökkentése (avagy a mérés felgyorsítása, ill. az eredmények pontosítása) érdekében újszerű, a nemlineáris rendszerekre szabott módszereket kell fejleszteni.

4.1 Kutatott problémakör: Lineáris MIMO méréseknél a mérés technika fontos része a zajok csökkentése (az eredmények pontosságának fokozása) érdekében az együttesen tervezett bemeneti jelek alkalmazása. Működőképesek lesznek ezek a technikák a gyengén nemlineáris rendszerek esetében? Az összehasonlítás szempontjai a mérés hordozhatósága (a mért legjobb lineáris közelítés invarianciája) és a mérés költségcsökkenése (kevesebb zaj miatt kevesebb az átlagolás és rövidebb a mérési idő). Az első vizsgált (pilóta) probléma a sok területen fontos két bemenetű rendszer esete volt, legfeljebb harmadfokú nemlinearitással. Ez lehetővé tette az elemzés egyszerűsítését, mégis figyelembe lehetett venni az egyenes ágú és keresztkapcsolatok és egyaránt páros és páratlan nemlinearitások hatását.

4.1 Tézis: A 2-dimenziós legjobb lineáris közelítés mérésénél alkalmazható gerjesztés optimalizálása

Megállapítottam, hogy a lineáris zajcsökkentő mérés technika ugyanúgy hatásos a 2-dimenziós harmadfokú gyengén nemlineáris rendszerek legjobb lineáris FRF karakterisztika mérésénél. Egyúttal megállapítottam, hogy ez a technika nem alkalmazható erősebb (magasabb fokszámú) nemlinearitás ill. kettőnél több bemenet esetében.

4.2 Kutatott problémakör: A legjobb lineáris közelítés elméletének MIMO kiterjesztése a véletlen fázisú multiszínusz jelek esetére lett kimondva, kérdésként vetődik fel azonban, hogy a SISO elméletből ismert és az alkalmazásukkal aszimptotikusan az azonos értékű FRF karakterisztikához konvergáló mérési eredményt adó gerjesztések (multiszínusz, periodikus zaj, Gauss zaj), azonos értelemben ekvivalensek-e a MIMO rendszerek esetében.

4.2 Tézis: A gerjesztő jelek ekvivalenciájának megállapítása az FRF rendszeres nemlineáris hibája szempontjából

Megállapítottam, hogy a Gauss zaj, a periodikus zaj és a véletlen fázisú multiszínusz gerjesztő jelek a nemlineáris MIMO Volterra rendszerek esetében is aszimptotikusan (ha a vizsgált jelek a megfelelően definiált összevethető spektrális tartalommal rendelkeznek, ill. ha a periodikus jelekben a felharmonikusok száma minden határon túl nő) ekvivalensek abban az értelemben, hogy a velük mért többdimenziós legjobb lineáris FRF karakterisztika mátrix közelítések ugyanahhoz az átviteli karakterisztika mátrixhoz tartanak.

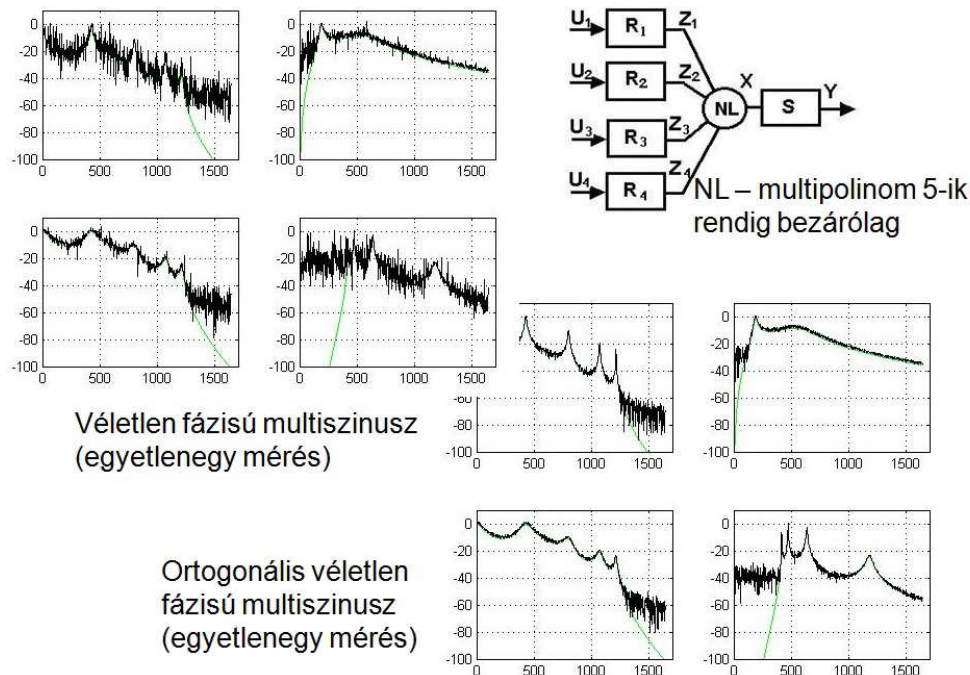
4.3 Kutatott problémakör: A többdimenziós esetben, a mérési eljáráshoz tartozó bemeneti inverz mátrix mérési bizonytalanság növelő hatása, ami a SISO elmélettel ellentétben a véletlen fázisú multiszinuszos gerjesztésnél is jelent problémát. Egy természetes további kutatási lépés volt tehát olyan újszerű, MIMO Volterra rendszereknél alkalmazható gerjesztő jelek kidolgozása, amelyek biztosítják a több dimenziós legjobb lineáris FRF karakterisztika közelítésének statisztikailag kedvezőbb mérését.

4.3 Tézis: Speciális ortogonális multiszinuszos jelek bevezetése

Az un. ortogonális véletlen fázisú multiszinuszos gerjesztő jelek bevezetésével (ld. 5. és 6. képletek) új módszert adtam a MIMO Volterra rendszerek legjobb lineáris FRF közelítésének hatékony mérésére. Bebizonyítottam, hogy az új bevezetett gerjesztő jelek az eddigi szokványos gerjesztő jelekkel a 4.2 Tézis értelmében szigorúan ekvivalensek, viszont lényegesen kisebb varianciájú nemlineáris zajt eredményeznek a mért FRF karakterisztikákon (ld. 6. ábra).

$$\mathbf{U}_N(l) = \begin{bmatrix} w_{11}U_1^{(1)}(l) & w_{12}U_1^{(1)}(l) & \dots & w_{1N}U_1^{(1)}(l) \\ w_{21}U_2^{(1)}(l) & w_{22}U_2^{(1)}(l) & \dots & w_{2N}U_2^{(1)}(l) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{N1}U_N^{(1)}(l) & w_{N2}U_N^{(1)}(l) & \dots & w_{NN}U_N^{(1)}(l) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{W}^H \mathbf{W} = \mathbf{W} \mathbf{W}^H = N \mathbf{I}_N \quad (6)$$



6 ábra. Az ortogonális véletlen fázisú multiszinusz gerjesztés hatásának illusztrálása. Egy négy bemenetű, gyengén nemlineáris Wiener-Hammerstein rendszer legjobb lineáris közelítés FRF mátrixát mérjük, véletlen fázisú multiszinusszal (bal fent), ill. az ortogonális véletlen fázisú multiszinusz jellel (jobb alul), a

gerjesztések egyszeri alkalmazásával. Ez utóbbi esetben, az azonos rendszeres hibával terhelt FRF karakterisztikán lényegesen kevesebb nemlineáris zajt látunk (ami a mérési idő jelentős mértékű csökkentését teszi lehetővé). A szimulációban használt Wiener-Hammerstein rendszer: R1 a 9-edfokú aluláteresztő Chebyshev szűrő 25 dB ingadozással, R2 a 3-adfokú felüláteresztő Chebyshev szűrő 10 dB ingadozással, R3 a 9-edfokú aluláteresztő Chebyshev szűrő 10 dB ingadozással, R4 a 9-edfokú felüláteresztő Chebyshev szűrő 25 dB ingadozással, és S1 a 3-adfokú aluláteresztő Chebyshev szűrő 1 dB ingadozással.

Az eredmények hasznosítása

Mire szolgál a legjobb lineáris közelítés kidolgozott elmélete? Az alkalmazója „minőségileg jobb lineáris méréstechnikához” jut hozzá abban az értelemben, hogy jobb rálátása lesz (nem parametrikus lineáris FRF) modelljének esetleges nemlineáris torzításaira. Egyszerűen kivitelezhető méréstechnikai javaslatok révén olyan optimalizált méréstechnikai megoldásokhoz jut, amelyek a nemlineáris információ mellett egyrészt lényegesen lecsökkentik a méréseinek időráfordítását, másrészt rendelkezni fog általános bizonytalansági korlátokkal a nemlineáris hatások okozta modellbizonytalanságokat illetően. Ezáltal kisebb lesz annak veszélye, hogy a széles körben használatos lineáris rendszeridentifikációs módszerek eredményét félreértelmezi, és később hibásan használja fel. Hátránya a kidolgozott elméletnek, hogy az alkalmazója nem fog rendelkezni igazi nemlineáris modellel (ennek szükségességét el akartuk kerülni), csakis periodikus gerjesztésekkel fog tudni dolgozni (de azok a gerjesztő Gauss zajjal aszimptotikusan ekvivalensek), ill. hogy a figyelembe vett nemlineáris rendszer-osztály (Volterra sorok határértékei) túlzottan megszorító lehet számára.

Ennek ellenére az elmélet eredményei már számos gyakorlati alkalmazásban felhasználásra kerültek az alábbi területeken:

- közelítő modellépítés scanning inkjet nyomtatóknál Iterative Learning Control tervezéséhez [17],
- ADC-k tesztelése, alacsony költségű ADC-k felbontásnövelése [151], [11-12], [131], [253], [5],
- DSP rendszerek kvantálási torzításának mérése [152],
- mikrohullámú áramkörök széleskörű bemérése és tesztelése [236], [30-31], [47-49], [18], [46], [231], [123], [13], [145], [156-157], [241-243], [79-80],
- σ - Δ átalakítók bit-error rate (BER) tulajdonságainak és a nemlinearitásuknak mérése [244-245],
- nemlinearitások modellezése, ill. a lineáris és a nemlineáris viselkedés szétválasztása a száraz súrlódással jellemzett precíziós mechanikai rendszerek elemzésében, ill. a hidraulikus tengelykapcsoló modellezésében [147], [111], [217], [176], [101], [265],
- többcsuklós ipari robotok identifikációja (ortogonális multiszinuszos gerjesztő jelek rútin használatával az ABB Robotics-nál (Svédország)) [258-262], [92], [133], [179-182], [193-194], [149], [146],
- bioimpedanciák nemlinearitásának mérése [95-97],
- szélessávú elektromos impedancia spektroszkópia [7], [189-191],
- elektrokémiai impedancia mérése [14-15], [99], [77],
- elektronikus nyelv tervezése [110],
- glukóz noninvazív mérése [150],
- vékonyrétegek felvitelének nemlineáris strukturális modellezése [266],
- ionos polimer jelátalakító nemlinearitásának jellemzése [108],
- irány-függő folyamatok modelljének egyik komponenseként [228],

- Young modulus mérése [164-165, 167],
- desztillációs oszlopok identifikálása [232-233],
- műveleti erősítők elemzése és jellemzése [141], [166], [168-169], [230], [229],
- mechanikai struktúrák hibáinak detektálása [102], [248-250],
- hibák lokalizálása hangszórókban [32-33],
- nemlineáris hibák mérése diszkrét idejű rádióvevőkben [83],
- repülőgépekben használt gázturbinák elemzése [38-41], [74],
- rotorok csapágyazásának elemzése [4], [94], [159-160],
- mikrogyártás (mikro-marás folyamat modellezése) [16],
- mezőgazdasági gépek elemzése (permetező berendezések) [2], [42],
- szemcseáramlás modellezése [132],
- villamos gépek modellezése (szinkron gépek, állandó mágneses motorok) [254], [187],
- automotív struktúrák rezgéseinek modális elemzése és tesztelése [255-257], [195], [78]; [270], [178], [45], [88],
- gépkocsi-felfüggesztés elemzése [117-118], [196-197],
- repülőgépek talajszintű rezgéseinek elemzése [160-161],
- fej-nyak komplexum identifikációja a felsőtest rezgéseinek hatására [75], [3],
- RGA (Relative Gain Array) modellezése [100],
- vezérlőstruktúrák megválasztásának egyik segédeszközeként vezérlőtervezésnél [35-37],[216], [93], [251-252], [222], [234], [218].

Az értekezés témaköréből készült publikációk (értekezés szerinti számozásban)

- [1] T.P. Dobrowiecki, F. Louage, **Expert Systems in System Identification - Second Generation Issues**, IMEKO XIII World Congress - From Measurement to Innovation, Torino, 1994, pp. 936-941.
- [4] Dobrowiecki T.P., Louage F., **Modeling, measurement and artificial intelligence - Toward the new generation of intelligent measuring systems**, Per. Polytechnica: Electrical Engineering 41:(4) pp. 123-133, 1997.
- [5] Dobrowiecki T.P., J. Schoukens, **Practical Choices in the FRF Measurement in the Presence of non-linear Distortions**, Proc. of the IEEE Instr. and Measurement Tech. Conf., IMTC/99, Venice, Italy, May, 1999, pp. 922-927
- [6] Dobrowiecki, T., Schoukens, J., **Bounds on Modeling Errors Due to Weak non-linear Distortions**, Internal Report, BME-MIT - VUB-ELEC, 2000, <http://home.mit.bme.hu/~tade/publications/NL/bounds-report-2000.pdf>.
- [7] Dobrowiecki, T., **Statistics of the complex output of a Wiener-Hammerstein system connected in a cascade**, Internal Report, BME-MIT, 2000, <http://home.mit.bme.hu/~tade/publications/NL/Report-SISO-superposition-figures-2000.pdf>.
- [8] Dobrowiecki T.P., J. Schoukens, **Practical Choices in the FRF Measurement in the Presence of non-linear Distortions**, IEEE Trans. on Instr. and Meas., Feb 2001, Vol 50, No 1, pp. 2-7.
- [9] Dobrowiecki T.P., Schoukens J., **Bounds on modeling error due to weak non-linear distortions**, Proc. of the 18th IEEE Instr. and Meas. Tech. Conf., IMTC/2001. Budapest, pp. 14-19. Vol. 2
- [10] Dobrowiecki T., J. Schoukens, **Cascading Wiener-Hammerstein systems**, Proc. of the 19th IEEE Instr. and Meas. Tech. Conf., IMTC/2002. Anchorage, 2002, pp. 881-886.
- [11] Dobrowiecki T., J. Schoukens, **Coherence Function and Wiener-Hammerstein Systems**, Baltic Electronic Conference, BEC-2002. Tallinn, 2002, pp. 145-148.

- [12] Dobrowiecki T.P., J. Schoukens, **Excitations signals and non-linearly distorted systems**, MSM' 2003 - XI Miedzynarodowe Sem. Metrologów, 17-20 Sept, 2003, Rzeszow-Lviv, Poland-Ukraina, Materiały XI Miedzynarodowe Sem. Metrologów, 17-20 Sept, 2003, Rzeszow, Zeszyty Naukowe Politech. Rzeszowskiej, Elektrotechnika z. 25, pp. 33-44
- [13] Dobrowiecki T., J. Schoukens, **Optimal Measurements of Linear Approximation to Volterra TITO Systems**, The 9th Biennial Baltic Electronic Conf., BEC2004, Tallinn, Oct 3-6, pp. 189-192, 2004
- [14] Dobrowiecki T.P., J. Schoukens, **Linear Approximation of Weakly non-linear MIMO Systems**. Proc. of the 21th IEEE Instr. and Meas. Tech. Conf. – IMTC'2004, Como, Italy, pp. 1607-1612.
- [15] Dobrowiecki T., J. Schoukens, **Measuring linear approximation to weakly non-linear MIMO systems**, In: P Horacek, M Simandl, P Zitek (szerk.), Proc. of 16th IFAC World Congress. Prague, July 4-8, 2005, Elsevier, Paper 1915.
- [16] Dobrowiecki T., Schoukens J., Guillaume P., **Optimized excitation signals for MIMO frequency response function measurements**, Proc. of the IEEE Instr. and Meas. Tech. Conf., IMTC 2005. Ottawa, pp. 1872-1877.
- [17] Dobrowiecki T.P., Schoukens J., Guillaume P., **Optimized Excitation Signals For MIMO Frequency Response Function Measurements**. IEEE Trans. on Instr. and Meas. 55:(6) pp. 2072-2079. (2006)
- [18] Dobrowiecki T.P., J. Schoukens, **Robustness of the Related Linear Dynamic System Estimates in Cascaded non-linear MIMO Systems**, IMTC 2006, Instr. and Meas. Tech. Conf., 24-27 April 2006, pp. 117-122, Sorrento
- [19] Dobrowiecki T., **Superposition of weakly nonlinear MIMO Volterra systems**, Internal Report, BME-MIT, 2006, <http://home.mit.bme.hu/~tade/publications/NL/MIMO-superposition-report.pdf>.
- [20] Dobrowiecki T., J. Schoukens, **Measuring the best linear approximation of a non-linear system with uniformly frequency-distributed periodic signals**, In: Proc. of the IEEE Instr. and Meas. Tech. Conf., IMTC '2007. Warsaw, 2007, pp. 1-6.
- [21] Dobrowiecki T.P., J. Schoukens, **Measuring linear approximation to weakly non-linear MIMO systems**, Automatica 43:(10) pp. 1737-1751, 2007.
- [22] Dobrowiecki T.P., Schoukens J., **Linear approximation of weakly non-linear MIMO systems**. IEEE Trans. on Instr. and Meas. 56:(3) pp. 887-894. (2007)
- [23] Dobrowiecki T., J. Schoukens, **Reducing the measurement time of the Best Linear Approximation of a non-linear System using improved averaging methods**, IEEE I2MTC 2015 Int. Instrumentation and Measurement Technology Conf., May 11-14, Pisa
- [24] F. Louage, T.P. Dobrowiecki, **An Automated Measurement Identification Environment**, Proc. of the 10th IFAC Symp. on System Identification - SYSID '94, Copenhagen, 1994, pp. 453-458.
- [25] F. Louage, T.P. Dobrowiecki, **Integrated Intelligent Modeling Environment Based On the Krest Workstation**, 8th European Knowledge Acquisition Workshop EKAW-94, Hoegaarden, 1994, pp. 105-110.
- [26] F. Louage, T. P. Dobrowiecki, B. Pataki, **Knowledge-Based System Identification - Components of the Expertise**, Proc. of the IFAC Workshop on Control App. of Optimization (CAO), Visegrád, 2003, pp. 334-339.
- [27] Schoukens J., T.P. Dobrowiecki, R. Pintelon, **Identification of Linear Systems in the Presence of non-linear Distortions. A Frequency Domain Approach. Part I: Non-Parametric Identification**, Proc. of the 34th Conf. on Decision and Control, New Orleans, Dec 13-15, 1995, pp. 1216-1221.
- [28] Schoukens J., T.P. Dobrowiecki, R. Pintelon, **Identification of Linear Systems in the Presence of non-linear Distortions. A Frequency Domain Approach. Part II: Parametric Identification**, Proc. of the 34th Conf. on Decision and Control. New Orleans, Dec 13-15, 1995, pp. 1222-1227.
- [29] Schoukens J., T.P. Dobrowiecki, **Design of broadband excitation signals with a user imposed power spectrum and amplitude distribution**, Proc. of the IEEE Instr. and Meas. Tech. Conf., IMTC/98, St. Paul Hotel, St. Paul, Minnesota, May 18-21, 1998, pp. 1002-1005.
- [30] Schoukens J., Dobrowiecki T., Pintelon R., **Parametric and Nonparametric Identification of Linear Systems in The Presence of non-linear Distortions - A Frequency Domain Approach**, IEEE Trans. on Automatic Control 43:(2) pp. 176-190. (1998)

- [31] Schoukens J., R. Pintelon, Y. Rolain, T.P. Dobrowiecki, **Frequency response functions measurements in the presence of non-linear distortions. A general framework and practical advices**, DISC, Dutch Institute of Systems and Control, Summer School on Identification for Control. Veldhoven, Hollandia, 1999.
- [32] Schoukens J., R. Pintelon, Y. Rolain, T.P. Dobrowiecki, **Linear modeling in the presence of non-linear distortions. A general framework and practical advices**, ERNSI Workshop on Identification. Theoule, France, 1999.
- [33] Schoukens J., R. Pintelon, Y. Rolain, T. P. Dobrowiecki, **Frequency Response Function Measurements in the Presence of non-linear Distortions**, IFAC Symp. on System Identification (SYSID 2000), Santa Barbara, California, USA, 21-23 June, 2000
- [34] Schoukens J., R. Pintelon, Y. Rolain, T.P. Dobrowiecki, **Frequency response functions measurements in the presence of non-linear distortions. A general framework and practical advices**, ISMA'2000, Leuven, Sept 13-15, 2000, pp. 459-464
- [35] Schoukens J., Pintelon R., Rolain Y., Dobrowiecki T., **Frequency Response Function Measurements in The Presence of non-linear Distortions**, Automatica 37:(6) pp. 939-946, 2001.
- [36] Schoukens J., R. Pintelon, T.P. Dobrowiecki, **Linear Modeling in the Presence of non-linear Distortions**, IMTC'2001, Budapest, May 21-23, 2001, pp. 1332-1338, vol. 2. (state-of-the-art lecture)
- [37] Schoukens J., R. Pintelon, T.P. Dobrowiecki, **Nonparametric model bounds for control design in the presence of non-linear distortions**, Proc. of the 40th IEEE Conf on Decision and Control, Orlando, Florida, USA, Dec 2001, pp. 2998-3003, vol. 3.
- [38] Schoukens J., R. Pintelon, T.P. Dobrowiecki, **Some thoughts on the stability of closed loop systems in the presence of non-linear distortions**, ERNSI 2001, Cambridge, Paper Talk 10.
- [39] Schoukens J., R. Pintelon, Y. Rolain, T.P. Dobrowiecki, **Frequency response function measurements in the presence of non-linear distortions. A general framework and practical advices**, Proc. of the Int. Seminar on Modal Analysis, Vol 1, pp. 459-464, 2001, KU Leuven
- [40] Schoukens J., Pintelon R., Dobrowiecki T., **Linear Modeling in The Presence of non-linear Distortions**, IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement 51:(4) pp. 786-792, 2002.
- [41] Schoukens J., R. Pintelon, T. Dobrowiecki, **Identification of the stability of feedback systems in the presence of non-linear distortions**, In: IFAC 15th Triennial World Congress, 21-26 July 2002, Barcelona, pp. 418-423.
- [42] Schoukens J., R. Pintelon, T.P. Dobrowiecki, Y. Rolain, **Identification of linear systems with non-linear distortions**, Plenary lecture, 13th IFAC Symp. on System Identification, 27-29 Aug, 2003, Rotterdam
- [43] Schoukens J., Dobrowiecki T., Pintelon R., **Estimation of the Risk for an Unstable Behaviour of Feedback Systems in the Presence of non-linear Distortions**. Automatica 40:(7) pp. 1275-1279, 2004.
- [44] Schoukens J., R. Pintelon, T. Dobrowiecki, Y. Rolain, **Identification of linear systems with non-linear distortions**, In: SCORES (Systems, Control and Optimization in Research, Education and Services): Workshop on System Identification. Leuven, 2004.
- [45] Schoukens J., Pintelon R., Dobrowiecki T., Rolain Y., **Identification of Linear Systems with non-linear Distortions**. Automatica 41:(3) pp. 491-504, 2005.
- [46] Schoukens J., J. Lataire, R. Pintelon, G. Vandersteen, T. Dobrowiecki, **Robustness Issues of the Equivalent Linear Representation of a non-linear System**, IEEE Trans. on Instr. and Meas. 58:(5) pp. 1737-1745, 2009.
- [47] Schoukens J., T. Dobrowiecki, Y. Rolain, R. Pintelon, **Upper bounding the variations of the best linear approximation of a non-linear system in a power sweep measurement**, Int. Instrumentation and Measurement Technology Conf., I2MTC09. Singapore, 2009, pp. 1514-1519.
- [48] Schoukens J., T. Dobrowiecki, Y. Rolain, R. Pintelon, **Upper Bounding Variations of Best Linear Approximations of non-linear Systems**. IEEE Trans. on Instr. and Meas. 59:(5) pp. 1141-1148. (2010)
- [49] Vanhoenacker K., T.P. Dobrowiecki, J. Schoukens, **Design of Multisine Excitations to Characterize the non-linear Distortion During FRF-measurements**, IMTC'2000, Proc. of the 17th IEEE Instr. and Meas. Technology Conf., Baltimore, May 1-4, 2000, pp. 1254-1259, vol. 3.

[50] Vanhoenacker K., Dobrowiecki T., Schoukens J., **Design of Multisine Excitations to Characterize the Non-linear Distortions During FRF-measurements**. IEEE Trans. on Instr. and Meas. 50:(5) pp. 1097-1102. (2001)

Az eredmények felhasználására vonatkozó publikációk (értekezés szerinti számozásban)

[2] Anthonis J., Ramon H., **Design of an active suspension to suppress the horizontal vibrations of a sprayboom**, J. of Sound and Vibration, Vol 266, Issue 3, 18 Sept 2003, pp. 573–583.

[3] Atapourfard M., Ishihara T., Inooka H., **The influences of trunk horizontal vibration to the head-neck complex**, Proc. of the 41st SICE Annual Conference, Vols 1-5. Osaka, Aug 5-7, 2002, pp. 1053-1058.

[4] Azimian H., Fatehi A., Araabi B.N., **Takagi-Sugeno control of the elevation channel of a twin-rotor system using closed-loop empirical data**, Proc. of the Am. Control Conf., Montreal, June 27-29, 2012, pp. 2615-2620.

[5] A. Baccigalupi, M. Darco, A. Liccardo, R. Schiano Lo Moriello, **Compressive sampling-based strategy for enhancing ADCs resolution**, Measurement 56:95–103, Oct 2014.

[7] Barsoukov E. (Ed.), J. Ross Macdonald (Ed.), *Impedance Spectroscopy Theory, Experiment, and Applications*, 2ND Ed., Wiley, 2005.

[11] N. Björnsell, **Modeling Analog to Digital Converters at Radio Frequency**, PhD Thesis, Royal Institute of Technology (KTH), 2007.

[12] Björnsell N., P. Suchanek, P. Handel, D. Ronnow, **Measuring Volterra Kernels of Analog-to-Digital Converters Using a Stepped Three-Tone Scan**, IEEE Trans. on Instr. and Meas. 57: (4) 666-671. (2008)

[13] Björnsell N., Nader C., Händel P., **Multi-tone design for out-of-band characterization of nonlinear RF modules using harmonic sampling**, 2010 IEEE Int. Instr. and Meas. Tech. Conf., I2MTC 2010, Austin, May 3-6, 2010, pp. 620-623.

[14] Blajiev O.L., Pintelon R., Hubin A., **Detection and evaluation of measurement noise and stochastic nonlinear distortions in electrochemical impedance measurements by a model based on a broadband periodic excitation**, J. of Electroanalytical Chemistry 576: (1) 65-72. (2005)

[15] Blajiev O.L., Breugelmans T., Pintelon R., Hubin A., **Improvement of the impedance measurement reliability by some new experimental and data treatment procedures applied to the behavior of copper in neutral chloride solutions containing small heterocycle molecules**, Electroch. Acta 51: (8-9) 1403-1412. (2006)

[16] R.S. Blom, **Model-based Process Monitoring and Control of Micromilling Using Active Magnetic Bearings**, Dutch Institute of Systems and Control (DISC), TU Delft, PhD Thesis, 2011,

[17] Bolder J., Lemmen B., Koekebakker S., Oomen T., Bosgra O., Steinbuch M., **Iterative learning control with basis functions for media positioning in scanning inkjet printers**, 2012 IEEE Multi-Conf. on Systems and Control, MSC 2012. Dubrovnik, Oct 3-5, 2012, pp. 1255-1260.

[18] Borremans J., De Locht L., Wambacq P., Rolain Y., **Nonlinearity analysis of analog/RF circuits using combined multisine and volterra analysis**, 2007 Design, Automation and Test in Europe Conf. and Exposition (DATE 2007), Nice, April 16-20, pp. 261-266.

[30] Bronckers S., Vandersteen G., Borremans J., Vandermot K., Van der Plas G., Rolain Y., **Advanced nonlinearity analysis of a 6 GHz wideband receiver**, I2MTC 2008 - IEEE Int. Instr. and Meas. Tech. Conf., Victoria, May 12-15, pp. 1340-1343.

[31] Bronckers S., Van der Plas G., Vandersteen G., Rolain Y., **The Prediction of the Impact of Substrate Noise on Analog/RF Circuits**, Substrate Noise Coupling in Analog/RF Circuits, 2010, pp. 151-193. (Artech House Microwave Library)

[32] Brunet P., Shafai B., **State-space modeling and identification of loudspeaker with nonlinear distortion**, Proc. of the IASTED Int. Conf. on Modelling, Simulation, and Identification, MSI 2011. Pittsburgh, Nov 7-9, 2011, pp. 246-253.

- [33] P. Brunet, **Non-linear System Modeling and Identification of Loudspeakers**, PhD Thesis, Northeastern Univ., Boston, Massachusetts, April 2014
- [35] M. Castaño Arranz, W. Birk, **Bounds on a Gramian-Based Interaction Measure for Robust Control Structure Selection**, 2011 9th IEEE Int. Conf. on Control and Automation (ICCA), Santiago, Chile, Dec 19-21, MonA3.2, 89-93
- [36] M. Castaño Arranz, **Practical tools for the configuration of control structures**, Dept of Computer Science, Electrical and Space Engineering, Lulea Univ. of Technology, Lulea, Sweden, PhD Thesis, 2012
- [37] M. Castaño Arranz, W. Birk, **Estimation of Gramian-Based Interaction Measures for Weakly Non linear Systems**, 2015 European Control Conf. (ECC), July 15-17, 2015. Linz, Austria, 2438-2443
- [38] Chiras, N., C. Evans, D. Rees. **Linear and non-linear gas turbine computer modeling**, UKACC Int. Conf. on Control, Cambridge, 2000, paper 12, (CD-ROM).
- [39] Chiras, N., C. Evans, D. Rees. **Global non-linear modeling of gas turbine dynamics using NARMAX structures**, ASME J. of Engineering and Power, vol. 124, no. 4, pp. 817-826, 2002.
- [40] N. Chiras, **Linear and non-linear Modelling of Gas Turbine Engines**, PhD Thesis, The Univ. of Glamorgan, Cardiff, 2002.
- [41] Chiras N., Evans C., Rees D., **Nonlinear gas turbine modeling using feedforward neural networks**, Am. Soc. of Mech. Engineers, Int. Gas Turbine Inst., Turbo Expo (Publication) IGTI, (2002), pp. 145-152.
- [42] Clijmans L, Ramon H, Sas P, et al., **Sprayer boom motion, Part 2: Validation of the model and effect of boom vibration on spray liquid deposition**, J. of Agric. Eng. Research 76: (2) 121-128 June 2000
- [45] B. Cornelis, A. Toso, W. Verpoest, B. Peeters, **Improved MIMO FRF estimation and model updating for robust Time Waveform Replication on durability test rigs**, ISMA 2014, Leuven, Sept 2014.
- [46] Crama P., Rolain Y., **Broad-band measurement and identification of a Wiener-Hammerstein model for an RF amplifier**, ARFTG: Automatic RF Techniques Group, Conference Digest, Fall 2002 – Measurement Needs for Emerging Technologies, Washington DC, Dec 5-6, 2002, pp. 49-57.
- [47] G. Crupi, D. Schreurs, **Microwave De-embedding: From Theory to Applications**, Acad. Press, 2013
- [48] De Locht L., Rolain Y., Vandersteen G., **Designing power amplifiers? Use good excitation signals**, 67TH ARFTG Microwave Meas. Conf. - Measurements and Design of High Power Devices and Systems, San Francisco, June 16, 2007, pp. 211-213.
- [49] L. De Locht, **Measuring, modeling and realization of high-frequency amplifiers**, PhD Thesis, Vrije Universiteit Brussel, August 2007
- [74] Evans C., Rees D., Borrell A., **Identification of Aircraft Gas Turbine Dynamics Using Frequencydomain Techniques**, Control Eng. Practice 8: (4) 457-467. (2000)
- [75] Fard M. A., T. Ishihara, H. Inooka, **Identification of the head-neck complex in response to trunk horizontal vibration**, Biological Cybernetics, 90, 418–426 (2004), Springer-Verlag 2004
- [77] L. Fernández Macía, M. Petrova, T. Hauffman, T. Muselle, Th. Doneux, A. Hubin, **A study of the electron transfer inhibition on a chargedself-assembled monolayer modified gold electrode by odd randomphase multisine electrochemical impedance spectroscopy**, Electroch. Acta 140 (2014) 266–274
- [78] Gatto M., Peeters B., Coppotelli G., **Flexible shaker excitation signals for improved FRF estimation and non-linearity assessment**, Int. Conf. on Noise and Vibration Eng. (ISMA), Leuven, Sept 20-22, 2010, pp. 2475-2488.
- [79] Geens A., **Measurement and Modeling of the Noise Behaviour of High-Frequency non-linear Active Systems**, PhD Dissertation, Dept ELEC, VUB, May 2002
- [80] Geens A., W. Van Moer, Y. Rolain, **Measuring in-band distortions of mixers**, IEEE Trans. on Instr. and Meas., Vol. 52, No. 4, Aug 2003, pp. 1030-1034
- [83] Geis A., Vandersteen G., Rolain Y., **Nonlinear Distortion Measurements of Discrete-Time Radio Receivers**, I2MTC 2008 - IEEE Int. Instr. and Meas. Tech. Conf., Victoria, May 12-15, pp. 1572- 1576.
- [88] Guillaume P., Verboven P., Vanlanduit S., Parloo E., **Multisine Excitations - New Developments and Applications in Modal Analysis**, Proc. the 19th Int. Modal Analysis Conf., Kissimmee, Feb 5-8, 2001

- [92] T. Hardeman, **Modelling and Identification of Industrial Robots Including Drive and Joint Flexibilities**, Universiteit Twente, PhD Thesis, Feb 2008
- [93] Hjalmarsson H., **From Experiment Design to Closed-loop Control**, Automatica 41: (3) 393-438. (2005)
- [94] K. Hynynen, **Broadband excitation in the system identification of active magnetic bearing rotor systems**, Acta Universitatis Lappeenrantaensis 446, Diss. Lappeenranta Univ. of Technology, 2011.
- [95] Ionescu C., A. Caicedo, M. Gallego, R. De Keyser, **Detection of nonlinearities when measuring 109 respiratory impedance**, 26th Benelux Meeting on Systems and Control. Lommel, March 2007, pp. 120.
- [96] Ionescu, C., Schoukens, J., De Keyser, R., **Detecting and analyzing non-linear effects in respiratory impedance measurements**, Am. Control Conf. on O'Farrell Street, San Francisco, CA, USA, June 29-July 01, 2011. p. 5412-5417.
- [97] Ionescu, C., Vandersteen, G., Schoukens, J., Desager, K., De Keyser, R., **Measuring non-linear Effects Respiratory Mechanics: A Proof of Concept for Prototype Device and Method**, IEEE Trans. on Instr. and Meas. 63, p. 124-134, 2014.
- [99] Jorcin J-B., Scheltjens G., Van Ingelgem Y., Tourwe E., Van Assche G., De Graeve I., Van Mele B., Terryn H., Hubin A., **Investigation of the self-healing properties of shape memory polyurethane coatings with the 'odd random phase multisine' electrochemical impedance spectroscopy**, Electrochim. Acta 55: (21) 6195-6203. (2010)
- [100] A.M.H. Kadhim, M. Castano, W. Birk and T. Gustafsson, **Relative Gain Array of Weakly Nonlinear Systems using a Nonparametric Identification Approach**, 2015 IEEE Conf. on Control Applications (CCA), Part of 2015 IEEE Multi-Conf. on Systems and Control, Sept 21-23, 2015. Sydney, 1612-1617
- [101] Keikha E., Al Mamun A., Lee T.H., Bhatia C.S., **Multi-frequency technique for frequency response measurement and its application to servo system with friction**, IFAC Proc. Volumes (IFAC PapersOnline) 18th IFAC World Congress, Milano, Aug 28-Sept 2, 2011, pp. 5273-5278.
- [102] Kerschen G., Worden K., Vakakis A.F., Golinval J.C., **Past, present and future of nonlinear system identification in structural dynamics**, Mechanical Systems and Signal Processing 20: (3) 505-592. (2006)
- [108] C.S. Kothera, **Characterization, Modeling, and Control of the non-linear, Actuation Response of Ionic Polymer Transducers**, Virginia Polytechnic Institute and State University, PhD Thesis, Sept 2005
- [110] Kumar R., Bhondekar A.P., Kaur R, Vig S., Sharma A, Kapur P., **A simple electronic tongue**, Sensors and Actuators B-Chemical 171: 1046-1053. (2012)
- [111] Lampaert V., J. Swevers, F. Al-Bender, **Impact of non-linear friction on frequency response function measurements**, Proc. of the ISMA25, Int'l Conf. on Noise and Vibration Engineering, Sept 2000, Leuven, pp. 443-450
- [117] Lauwerys C., J. Swevers, P. Sas, **Linear control of car suspension using non-linear actuator control**, ISMA 2002, Int. Conf. On Noise and Vibration Engineering, KU Leuven, Sept 16-18, 2002, pp. 55-61
- [118] Lauwerys C., Swevers J., Sas P., **Design and experimental validation of linear controllers for an active suspension system of a passenger car**, Proc. of the Tenth Int. Congress on Sound and Vibration, Stockholm, July 7-10, 2003, pp. 869-877.
- [123] Leulescu O., T. Petrescu, **A New Digital Predistortion Method For Power Amplifiers Linearization**, German Microwave Conf. - GeMiC 2005, Ulm, April 5-7, 2005
- [131] H.F. Lundin, **Characterization and Correction of Analog-to-Digital Converters**, PhD Thesis, Royal Institute of Technology (KTH) School of Electrical Engineering, 2005.
- [132] Maertens K., Reyniers M., De Baerdemaeker J., **Design of a Dynamic Grain Flow Model for a Combine Harvester**, CIGR J. of Sc. Res. and Dev., PM 01 005 III, (2001)
- [133] Makarov M., Grossard M., Rodríguez-Ayerbe P., Dumur D., **A frequency-domain approach for flexible-joint robot modeling and identification**, 16th IFAC Symp. on System Identification, Brussels, July 11-13, 2012, pp. 583-588.
- [141] M. D. McKinley, **Improved Frequency Domain Measurement Techniques for Characterizing Power Amplifier and Multipath**, PhD Thesis, Electrical and Comp. Eng., Georgia Institute of Technology, 2008.

- [145] Myslinski M., Pailloncy G., Avolio G., Verbeyst F., Bossche M. V., Schreurs D., **State-of-the-art microwave device characterization using large-signal network analyzers**, Proc. of the 17th Int. Conf. - Mixed Design of Integrated Circuits and Systems, MIXDES 2010, June 24-26, 2010, pp. 91-95.
- [146] M. Norrlöf, Department of Electrical Engineering, Linköping Univ., personal communication, 2016.
- [147] Nuij P.W.J.M., Steinbuch M., Bosgra O.H., **Experimental characterization of the stick/sliding transition in a precision mechanical system using the Third Order Sinusoidal Input Describing Function**, Mechatronics 18: (2) 100-110. (2008)
- [149] Ohr J., S. Moberg, E. Wernholt, S. Hanssen, J. Pettersson, S. Persson, S. Sander-Tavallaey, **Identification of Flexibility Parameters of 6-axis Industrial Manipulator Models**, Proc. ISMA2006 Int. Conf. on Noise and Vibration Engineering, Leuven, Sept 18-20, 2006, pp. 3305-3314.
- [150] Olarte O., Van Moer W., Barbe K., Verguts S., Van Ingelgem Y., Hubin A., **Using the Best Linear Approximation as a First Step to a New Non-Invasive Glucose Measurement**, 2012 IEEE Int. Instr. and Meas. Tech. Conf. (I2MTC), Graz, May 13-16, 2012, pp. 2747-2751.
- [151] Ong M.S., Kuang Y.C, Liam P.S., Ooi M.P.L., **Multisine With Optimal Phase-Plane Uniformity for ADC Testing**, IEEE Trans. on Instr. and Meas. 61: (3) 566-578. (2012)
- [152] J. Paduart, **Identification of non-linear Systems using Polynomial non-linear State Space Models**, PhD dissertation, Vrije Universiteit Brussel, ELEC Department, 2007.
- [156] Pedro J.C., N.B. Carvalho, **Statistics of microwave signals and their impact on the response of nonlinear dynamic systems**, Proc 62nd ARFTG Conference Dig.. Boulder, Dec 4-5, 2003, pp. 143-153.
- [157] Pedro J.C., Carvalho N.B, **Designing band-pass multisine excitations for microwave behavioral model identification**, IEEE Int. Microwave Theory and Tech. Symp. Digest. Fort-Worth, June 6-11, 2004, pp. 791-794.
- [159] Peeters F., Pintelon R., Schoukens J., Rolain Y., Guiterrez E., Guillaume P., **Identification of Rotor-Bearing Systems in the Frequency Domain. Part I: Estimation of Frequency Response Functions**, Trans. of Mechanical Systems and Signal Processing (MSSP), vol. 15, no. 4, pp. 759-774, 2001
- [160] B. Peeters, A. Carrella, J. Lau, M. Gatto, G. Coppotelli, **Advanced shaker excitation signals for aerospace testing**, **Advanced Aerospace Applications**, Vol 1, Part of the series Conf. Proc. of the Soc. for Experimental Mechanics Series, Proc. of the 29th IMAC, Conf. on Structural Dynamics, pp. 229-241, 2011.
- [161] Peeters, B.; Van der Auweraer, H., **Application of Multisine Excitation to Aircraft Ground Vibration Testing**, System Identification, Vol 16, Part 1, 16th IFAC Symp. on System Identification, 2012, Brussels, pp. 512-517
- [164] Pintelon R., De Belder K., Guillaume P., Vanlanduit S., Rolain Y., **Identification of Material Damping from Broadband Modal Analysis Experiments**, SEM Annual Conf. and Exposition on Experimental and Applied Mechanics, Charlotte, North Carolina, USA, 2-4 June 2003, pp. 231-238
- [165] Pintelon R., Guillaume P., De Belder K., Rolain Y., **Measurement of Young's Modulus via Modal Analysis Experiments: A System Identification Approach**, 13th IFAC Symp. on System Identification, Rotterdam, The Netherlands, 27-29 August, 2003, pp. 389-394
- [166] Pintelon R., Vandersteen G., Rolain Y., **Experimental characterization of operational amplifiers: A system identification approach**, IEEE Instr. and Meas. Tech. Conf., Vail, CO, May 20-22, 2003, pp. 362-367.
- [167] Pintelon R., Guillaume P., Vanlanduit S., De Belder K., Rolain Y., **Identification of Young's modulus from broadband modal analysis experiments**, Mechanical Systems and Signal Processing, 18 (2004), pp. 699-726
- [168] Pintelon R., Y. Rolain, G. Vandersteen, J. Schoukens, **Experimental Characterization of Operational Amplifiers: A System Identification Approach - Part I: Theory and Simulations**, IEEE Trans. on Instr. and Meas., June 2004, Vol 53, No 3, pp. 854-862
- [169] Pintelon R., Y. Rolain, G. Vandersteen, J. Schoukens, **Experimental Characterization of Operational Amplifiers: A System Identification Approach - Part II: Calibration and Measurements**, IEEE Trans. on Instr. and Meas., June 2004, Vol 53, No 3, pp. 863-876

- [176] Qian X., Wang Y.Y., **System identify of servomechanisms with nonlinear friction**, 2007 Conf. Proc. IPEC, Vols 1-3. Singapore, Dec 3-6, 2007, pp. 276-281.
- [178] Reynders E., **System Identification Methods for (Operational) Modal Analysis: Review and Comparison**, Archives of Comp. Methods in Engineering 19: (1) 51-124. (2012)
- [179] Rijlaarsdam D., Van Loon B., Nuij P., Steinbuch M., **Nonlinearities in industrial motion stages - Detection and classification**, Proc. of the 2010 Am. Control Conf., ACC 2010, Baltimore, June 30-July 2, 2010, pp. 6644-6649.
- [180] Rijlaarsdam, D., Nuij, P. W., Schoukens, J., Steinbuch, M., **Frequency Domain Based Friction Compensation - Industrial Application to Transmission Electron Microscopes**, Am. Control Conf. on O'Farrell Street, San Francisco, CA, USA, June 29-July 01 2011 p. 4093-4098.
- [181] D. Rijlaarsdam, **Frequency Domain Based Performance Optimization of Systems with Static nonlinearities**, PhD Thesis, Cotutelle TU Eindhoven - Vrije Universiteit Brussel, June, 2012
- [182] Rijlaarsdam, D., Nuij, P. W., Schoukens, J., Steinbuch, M., **Frequency domain based non-linear feed forward control design for friction compensation**, Mechanical Systems and Signal Processing. 27, p. 551-562, 2012.
- [187] Ruderman M., Ruderman A., Bertram T., **Observer-Based Compensation of Additive Periodic Torque Disturbances in Permanent Magnet Motors**, IEEE Trans. on Indust. Informatics 9: (2) 1130-1138. (2013)
- [189] B. Sanchez, G. Vandersteen, R. Bragos, J. Schoukens, **Optimal multisine excitation design for broadband electrical impedance spectroscopy**, Measurement Science and Technology 22 (11), 115601, 2011
- [190] B. Sanchez, G. Vandersteen, R. Bragos, J. Schoukens, **Basics of broadband impedance spectroscopy measurements using periodic excitations**, Meas. Science and Technology 23 (10), 105501, 2012
- [191] B. Sanchez, E. Louarroudi, E. Jorge, J. Cinca, R. Bragos, R. Pintelon, **A new measuring and identification approach for time-varying bioimpedance using multisine electrical impedance spectroscopy**, Physiological measurement 34 (3), 339, 2013
- [193] Saupé F., Knoblach A., **Design of excitation signals for the closed loop identification of industrial robots**, Proc. of the IEEE Int. Conf. on Control Applications. Dubrovnik, Oct 3-5, 2012, pp. 1553-1560.
- [194] Saupé F., Knoblach A., **Experimental determination of frequency response function estimates for flexible joint industrial manipulators with serial kinematics**, Mechanical Systems and Signal Processing, 52-53:60-72, 2015.
- [195] Savaresi S.M., Silani E., Bittanti S., Porciani N., **On Performance Evaluation Methods and Control Strategies for Semi-Active Suspension Systems**, Proc. of the IEEE Conf. on Decision and Control, Maui, Dec 9-12, 2003, pp. 2264-2269.
- [196] Savaresi S.M., Silani E., Bittanti S., **Acceleration-driven-damper (add): An Optimal Control Algorithm For Comfort-oriented Semiactive Suspensions**, J. Dyn. Syst. Meas. Control-Trans. ASME 127: (2) 218-229. (2005)
- [197] Savaresi S.M., Spelta C., **Mixed sky-hook and ADD: Approaching the filtering limits of a semiactive suspension**, J. of Dynamic Systems Meas. and Control-Trans. of THEASME 129: (4) 382-392. (2007)
- [216] Smolders K., M. Witters, J. Swevers, P. Sas, **Identification of a Nonlinear State Space Model for Control using a Feature Space Transformation**, Proc. of the Int. Conf. on Noise and Vibration Engineering (ISMA2006), Leuven, Sept 18-20, 2006, pp. 3331-3342.
- [217] K. Smolders, **Tracking Control of Continuous-Time non-linear Systems: A Model-Based Iterative Learning Approach**, PhD Thesis, KU Leuven, 2007.
- [218] Smolders K., Volckaert M., Swevers J., **Tracking control of nonlinear lumped mechanical continuous-timesystems: A model-based iterative learning approach**, Mechanical Systems and Signal Processing 22: (8) 1896-1916. (2008)
- [222] Solomou M., C. Evans, N. Chiras, D. Rees, **Controller Design for Systems Suffering non-linear Distortions**, 13th IFAC Symp. on System Identification, 27-29 Aug 2003, Rotterdam, pp. 1201-1206.

- [228] Tan A.H., **Direction-dependent systems - A survey**, Automatica 45: (12) 2729-2743. (2009)
- [229] Telescu M. G., Stievano I. S., Canavero F. G., Tanguy N., **An application of volterra series to IC buffer models**, 2010 IEEE 14th Workshop on Signal Propagation on Interconnects, SPI 2010, Hildesheim, May 9-12, 2010, pp. 93-96.
- [230] Thorsell M., Andersson K., Pailloncy G., Rolain Y., **Using the best linear approximation to model the nonlinear behavior of supply modulated amplifiers**, European Microwave Week 2011: "Wave to the Future", EuMW 2011, Conf. Proc. - 6th European Microwave Integrated Circuit Conf., EuMIC 2011. Manchester, Oct 10-11, 2011, pp. 324-327.
- [231] Thorsell M., Andersson K., Pailloncy G., Rolain Y., **Extending the Best Linear Approximation to Characterize the Nonlinear Distortion in GaN HEMTs**, IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques 59: (12) 3087-3094. (2011)
- [232] Ugrumowa D., G. Vandersteen, B. Huyck, F. Logist, J. Van Impe, B. De Moor, **Identification and Modeling of Distillation Columns From Transient Response Data**, 2012 IEEE Int. Instr. and Meas. Tech. Conf. (I2MTC 2012), Graz, May 13-16, 2012, pp. 2098-2103.
- [233] D. Ugryumova, **Identification From Partially Missing Data and Modeling of Distillation Columns**, PhD Thesis, Vrije Universiteit Brussel, July 2015
- [234] D. Vaes, **Optimal static decoupling for multivariable control design**, PhD Thesis, KU Leuven, 2005.
- [236] W. Van Moer, **Development of New Measuring and Modelling Techniques for RFICS and Their non-linear Behaviour**, PhD Thesis, Vrije Universiteit Brussel, ELEC, 2001.
- [241] Vandermot K., W. Van Moer, J. Schoukens, Y. Rolain, **Understanding the non-linearity of a Mixer using Multisine Excitations**, Proc. of the IEEE Instr. and Meas. Technology Conf. IMTC'2006, Sorrento, Italy, 24-27 April, 2006, pp. 1205-1209
- [242] Vandermot, K., Van Moer, W., Rolain, Y., Schoukens, J., **Identifying the Structure of non-linear Perturbations in Mixers using Multisine Signals**, IEEE Instr. & Meas. Magazine. 10, p. 32-39, 2007.
- [243] K. Vandermot, **Best Linearized models for RF systems**, PhD Thesis, Vrije Univ. Brussel, Oct 2010.
- [244] Vandersteen, G., Rolain, Y., Vandermot, K., Pintelon, R., Schoukens, J., Van Moer, W., **Quasi-Analytical Bit-Error-Rate Analysis Technique Using Best Linear Approximation Modeling**, IEEE Trans. on Instr. and Meas. 58, p. 475-482, 2009.
- [245] Vandersteen G., De Locht L., **Qualification and quantification of the nonlinear distortions in discrete-time sigma-delta ADCs**, 2009 European Conf. on Circuit Theory and Design, Vols 1 and 2. Antalya, Aug 23-27, 2009, pp. 759-762.
- [248] Vanlanduit S., Guillaume P., Schoukens J., E. Parloo, **Detection and Localization of non-linear Distortion**, Proc. of IMAC-XVII: A Conf. on Structural Dynamics, San Antonio, Texas, February 2-5, 2000, pp. 1597-1603
- [249] Vanlanduit S., Guillaume P., Schoukens J., E. Parloo, **Linear and nonlinear damage detection using a scanning laser vibrometer**, Shock and Vibration 9 (2002) 43-56
- [250] Vanlanduit S., Parloo E., Guillaume P., (2004) **An on-line combined linear-non-linear fatigue crack detection technique**, NDT & E International 37 (1): 41-45 Jan 2004
- [251] Vargas A., F. Allgower, **Complexity Reduction of Nonlinear Systems for Process Control**, DYCOPS 7, 7th Int. Symp. on Dynamics and Control of Process Systems. Cambridge, USA, July 5-7, 2004.
- [252] Vargas A., Allgower F., **Model reduction for process control using iterative nonlinear identification**, Proc. of the Am. Control Conference. Boston, June 30-July 2, 2004, pp. 2915-2920.
- [253] B. Vargha, **Model Based Calibration of D/A Converters**, PhD Thesis, Vrije Univ. Brussel, 2002.
- [254] J. Verbeeck, **Standstill Frequency Response Measurement and Identification Methods for Synchronous Machines**, PhD Thesis, Vrije Universiteit Brussel, 2000.
- [255] P. Verboven, **Frequency-Domain System Identification for Modal Analysis**, PhD Thesis, Vrije Universiteit Brussel, 2002.

- [256] Verboven P., Guillaume P., Cauberghe B., Vanlanduit S., Parloo E., **Assessment of non-linear distortions in modal testing and analysis of vibrating automotive structures**, Proc. of 22nd Int. Modal Analysis Conf., pap.no.191, Dearborn, MI (USA), January 26-29, 2004.
- [257] Verboven P., Guillaume P., Vanlanduit S., Cauberghe B., **Assessment of non-linear distortions in modal testing and analysis of vibrating automotive structures**, J. of Sound and Vibration, Vol 293, Issues 1–2, 30 May 2006, pp. 299–319
- [258] Wernholt E., S. Gunnarson, **Analysis of methods for multivariable frequency response function estimation in closed loop**, 46th IEEE Conf. on Decision and Contr. New Orleans, Dec 12-14, 2007, pp. 4881-4888.
- [259] E. Wernholt, **Multivariable Frequency-Domain Identification of Industrial Robots**, Dissertation. No. 1138, Dept of Electrical Eng., Linköping 2007.
- [260] Wernholt E., Moberg S., **Frequency-domain gray-box identification of industrial robots**, IFAC Proc. Volumes (IFAC-PapersOnline) 17th IFAC World Congress. Seoul, July 7-11, 2008, pp. 15372-15380.
- [261] Wernholt E., Moberg, S., **Experimental Comparison of Methods for Multivariable Frequency Response Function Estimation**, IFAC World Congress, Vol 17, Part 1, COEX, South Korea, 2008, pp. 15359-15366
- [262] Wernholt E., Moberg S., **Nonlinear gray-box identification using local models applied to industrial robots**, Automatica 47: (4) 650-660. (2011)
- [265] Widanage, W. D., Stoev, J., Van Mulders, A., Schoukens, J., Pinte, G., **Non-linear system identification of the Filling Phase of a Wet-clutch System**, Control Engineering Practice. 19, p. 1399-1410, 2011.
- [266] Wolfrum P., Vargas A., Gallivan M., Allgower F., **Complexity reduction of a thin film deposition model using a trajectory based nonlinear model reduction technique**, Proc. of the American Control Conf., Portland, June 8-10, 2005, pp. 2566-2571.
- [270] Yin Y.Y., Zivanovic S., Li D.X., **Displacement modal identification method of elastic system under operational condition**, Nonlinear Dynamics 70: (2) 1407-1420. (2012)