Bírálói vélemény
Dobrowiecki Tadeusz: Multisine Measurement Technology of Linearly Approximated weakly Non-linear Systems
(Lineárisan approximált nemlineáris rendszerek multiszinuszos méréstechnikája)
című MTA doktori (DSc) értekezésről

Az értekezés a lineáris frekvencia karakterisztika kiterjesztésével foglalkozik. Mérnöki alkalmazásokban a lineáris méréstechnika a legelterjedtebb eszközök egyike, melynek oka a lineáris modellek egyszerűsége, kezelhetősége. Lineáris rendszerekre sok elmélet létezik, melyek jó alapul szolgálhatnak a nem lineáris jelenségek közelítő vizsgálatára is. A valóságban a legtöbb rendszer nem mondható lineárisnak, ami felveti azt a kérdést, hogy a lineáris elméleteken alapuló eszközök milyen feltételek mellett használhatók nemlineáris vagy akár csak gyengén nemlineáris rendszerekre?

A gyengén nemlineáris rendszerek modellezése egy jól ismert terület. Nemlineáris jelenségek lineáris eszközökkel való közelítése már a méréstechnika korai kutatásaiban is felmerült. Első megközelítésben a lineáris modelltől való eltérést leginkább modellezési zajként lehet kezelni. Nemlineáris hatások detektálása esetén (pl. nemlinearitási tesztek segítségével) felmerülhet nemlineáris modellek használata is. A nemlineáris modelleket azonban nehezebb identifikálni és implementálni, mint a lineáris rendszereket. A lineáris elmélet egyértelműsége és alkalmazhatósága miatt a gyakorlatban ezért sokszor fordul elő lineáris modell alkalmazása nemlineáris rendszerre is.

Az értekezés a fenti problémák tárgyalásával, megoldásával foglalkozik. A szerző olyan lineáris mérési és modellezési technikákat elemez, amelyek nemlinearitási tesztek nélkül is figyelembe veszik a linearitási feltételeket megsértő nemlineáris hatásokat és azokat számszerűsítik is. Ez alapján a felhasználó eldöntheti, hogy az adott feladatnál indokolt-e a lineáris elmélet alkalmazása, vagy inkább nemlineáris modellekre kell áttérni. A kutatási téma ilyen tekintetben aktuális és jelentős gyakorlati tartalommal bír.

Az értekezés fő témaköre a nem parametrikus lineáris frekvencia karakterisztika méréstechnikájának lényegi kiterjesztése. A cél a lineárisként mért nemlineáris rendszer FRF frekvencia-karakterisztikájában felismerni és szétválasztani a rendszeres és a zajszerű, alkalmas utófeldolgozással eltüntethető nemlineáris hatásokat.

A szerző az eredményeit frekvencia-tartományban és bemeneti-kimeneti rendszer relációra fogalmazta meg. A frekvencia-tartománybeli vizsgálat előnyeihez tartozik többek között a gerjesztett frekvenciák megválasztásának a szabadsága, instabil rendszerek modellezésének lehetősége illetve a nemlinearitás és a kimeneti zaj hatásának a szétválasztása. Központi szerepet játszik az értekezésben a nemlineáris rendszer karakterisztikájának négyzetes értelemben vett lineáris approximációja, melyet a szerző legjobb lineáris közelítésének (BLA, Best Linear Approximation) nevez. Itt megjegyzendő, hogy a négyzetes értelemben vett legjobb lineáris közelítésről van szó.

A nem parametrikus FRF mérése egy szükségszerű információszerző lépés, amely mindig megelőzi a rendszer parametrikus identifikációját, és így információt ad a rendszer jellegéről. Ezután kiemelt fontosságú a nemlineáris rendszerosztálynak, a gerjesztő jeleknek és a konkrét lineáris méréstechnikai módszertanának megválasztása. A szerző az értekezésben a nemlineáris problémák modellezésénél konvergens Volterra-sorokat használ. E választásának az indokait tételesen felsorolja. Többek között, a Volterra-sorokkal lehetséges a lineáris és a nemlineáris jelleg együttes tárgyalása, sok gyakorlati fontosságú nemlineáris rendszer leírható alacsony fokszámú Volterra-sorral, a Volterra-sorok frekvencia-tartománybeli reprezentációja kidolgozott, kernelfüggvények segítségével lehetséges a nemlineáris dinamika modellezése,

az egy-bemenetű egy-kimenetű modellek kiterjeszthetők több-bemenetű több-kimenetű modellekre illetve periodikus (vagy majdnem periodikus) gerjesztésre a Volterra-sorok periodikus (vagy majdnem periodikus) kimeneti jelekkel válaszolnak. A vizsgált gerjesztő jelek aszimptotikusan Gauss-eloszlású periodikus bemeneti jelek voltak. Ennek indoka a spektrális szivárgás elkerülése, a bemeneti jelek és a mérést terhelő zaj elkülöníthetősége, a gerjesztés randomizálhatósága. Ezeket a gerjesztéseket jelgenerátorokkal könnyű megvalósítani, lehetőség van a nem periodikus jelek közelítő modellezésére is, illetve a harmonikus gerjesztő jeleket könnyű analitikusan integrálni és differenciálni.

Az értekezésben kidolgozott eljáráshoz a szerző lineáris átlagolást alkalmaz, azaz a bemeneti sztochasztikus folyamatból független mintafüggvényeket generálva és gerjesztésként alkalmazva, lineárisan átlagolja a mérésből kapott egyedi eredményeket. Fontos kiemelni a véletlen fázisú multiszinusz gerjesztő jel szerepét, amellyel az elvégzett FRF mérések eredménye aszimptotikusan a Gauss-zajjal végzett mérési eredményekhez tart a vizsgált nemlineáris rendszerek esetén is.

A szerző a tudományos eredményeket két csoportba osztja. Az első csoportba azokat sorolja, ahol az eredményért felelős szerző elkülönítése nem lehetséges a kutatás csoportmunka jellege miatt. A második csoportba azokat az eredményeket sorolta, amelyeket a szerző felelősségteljesen magáénak tulajdonít annak ellenére, hogy ezek az eredmények is többszerzős szakcikkekben lettek publikálva. Először a szétválaszthatatlan eredményeket foglalja össze, ezeket nem foglalja tézisekbe. Utána a saját eredményeit részletezi, ezek alkotják a téziseket.

Az együttesen elért kutatási eredményeket öt csoportba sorolja. Az első, és talán a legfontosabb eredmény az, hogy a szerző és kutatótársai kidolgozták a gyengén nemlineáris SISO rendszerekre vonatkozó legjobb lineáris nemparametrikus közelítés elméletét. Ennek lényege, hogy bizonyos körülmények között a nemlineáris rendszer helyettesíthető egy lineáris rendszerrel (ezt nevezik legjobb lineáris közelítésnek, angolul Best Linear Approximation, BLA). Ez a közelítés szoros kapcsolatban áll a nemlineáris rendszer lineáris részével, valamint egy additív nemlineáris zajjal, melynek varianciája erősen függ az eredeti rendszer nemlineáris részétől. A második közös eredmény, hogy megvizsgálták többféle frekvenciarács alkalmazásának következményeit lineáris méréseknél. A harmadik közös eredmény az, hogy megvizsgálták a legjobb lineáris közelítés aszimptotikus tulajdonságait sok, gyakorlatban fontos gerjesztő jel esetén. A negyedik, hogy vizsgálták a nemlineáris hibakomponensek kölcsönös viszonyát általánosabb felépítésű nemlineáris rendszereknél. Az ötödik közös eredmény, hogy becslést adtak a visszacsatolt rendszer nem modellezett nemlinearitása által okozott stabilitásvesztésének valószínűségére. Itt megjegyzendő, hogy a vizsgált lineáris stabilitásvesztés mellett gyakorlatban sokszor fontosabb nemlineáris hatások lényegesen befolyásolhatják a rendszer globális viselkedését.

A közös eredmények után a szerző a saját eredményeit foglalta négy téziscsoportba. Az első téziscsoport multiszinuszos gerjesztő jelekhez ad tervezési módszertant SISO rendszerek esetén. Az 1.1 tézis multiszinuszos jelszintézishez ad tervezési megfontolásokat. A gyengén nemlineáris rendszerek FRF mérésénél a kétszeresen páratlan véletlen fázisú multiszinusz gerjesztő jeleket javasolja. Az 1.2 tézis a multiszinuszos gerjesztő jelek frekvencia-rács modellezésével foglalkozik és kimondja a mérési eredmények egyenletes eloszlású ponthalmazok elméletén alapuló ekvivalenciáját. Az 1.3 tézis széles sávú gerjesztő jelek tervezésével foglalkozik. Fontos kiemelni, hogy mivel a valódi rendszer nemlinearitása nem ismert, ezért a karakterisztika hiba legrosszabb esetét lehet csak meghatározni.

A második téziscsoport a rendszeres nemlineáris hiba tulajdonságaival foglalkozik, továbbra is SISO rendszerek esetében. Az 2.1 tézis a legjobb lineáris közelítés torzítására jellemző

korlátokat vizsgálja, ahol a szerző megadja a nem mérhető hiba becslését a legrosszabb esetben. A 2.2 tézis azzal foglalkozik, hogy a rendszer koherencia függvénye hogyan fejezhető ki a nemlineáris rendszer legjobb lineáris közelítésének elemeivel. A szerző a vizsgálatokat általánosságban, illetve konkrétabb nemlineáris rendszerstruktúrákat feltételezve végezte el. A 2.3 tézisben megmutatja a szerző, hogy abban a frekvencia tartományban, ahol két szuperponált rendszerkomponens magas értékű koherencia függvénnyel rendelkezik, érvényes marad a lineáris rendszerelméletből ismert szorzatreláció, miszerint a szuperponált rendszerek frekvenciakarakterisztikája megadható az egyes frekvenciakarakterisztikák szorzataként. A 2.4 tézis a legjobb lineáris közelítés mérési idejének mérséklésével foglalkozik Monte Carlo zajvariancia-csökkentő technika alkalmazásával.

Míg az első két téziscsoport SISO rendszerekkel foglalkozik, addig a harmadik és a negyedik téziscsoportok MIMO rendszerek elméletéhez járul hozzá.

A harmadik téziscsoport a nemlineáris hiba tulajdonságait általánosítja MIMO rendszerekre. A 3.1. tézis az FRF nemlineáris hibáinak elméletét terjeszti ki általános MIMO rendszerekre. Itt a szerző külön foglalkozik a két bemenetű - két kimenetű gyengén nemlineáris rendszermodellekkel azok gyakorlati fontossága miatt. Teljes általánosításként megmutatja, hogy a véletlen multiszinusz jelekkel gerjesztett több bemenetű Volterra-rendszer felírható legjobb lineáris közelítő FRF karakterisztikák hálózataként, kimenetenként nemlineáris zajokkal kiegészítve. A 3.2 tézisben a szerző kimondja, hogy a legjobb lineáris MIMO közelítés robusztus, ha a nemideális gerjesztéseket gyengén nemlineáris MIMO Volterra-rendszerrel modellezzük.

Az utolsó, negyedik téziscsoport a gerjesztő jelek tervezésével foglalkozik MIMO rendszerek esetén. Érdekes észrevétel, hogy különbséget kell tenni a két és a kettőnél több bemenetű gyengén nemlineáris rendszerek között, mert alacsony fokszámú, két bemenetű rendszereknél még mindig sikerrel alkalmazhatók a hagyományos, lineáris méréstechnikából ismert zajcsökkentő módszerek. Magasabb fokszám illetve több bemenet esetén azonban új módszereket kell kifejleszteni. A 4.1 tézis kimondja, hogy a lineáris zajcsökkentő méréstechnika ugyanúgy hatásos a 2-dimenziós harmadfokú gyengén nemlineáris rendszerek legjobb lineáris FRF karakterisztika mérésénél, azonban ez a technika nem alkalmazható magasabb fokszámú nemlinearitás illetve kettőnél több bemenet esetén. A 4.2 tézis a Gauss zaj, a periodikus zaj és a véletlen fázisú multiszinusz gerjesztő jelek ekvivalenciáját mondja ki abban az értelemben, hogy a velük mért többdimenziós legjobb lineáris FRF karakterisztika mátrix közelítések ugyanahhoz az átviteli karakterisztika mátrixhoz tartanak. A 4.3 tézisben a szerző új, úgynevezett ortogonális véletlen fázisú multiszinuszos gerjesztő jeleket vezet be, melyekkel új módszert ad a MIMO Volterra rendszerek legjobb lineáris FRF közelítésének hatékony mérésére.

A szerző négy téziscsoportban összesen 12 tézis fogalmaz meg, melyek mind hozzájárulnak a gyengén nemlineáris rendszerek lineáris méréstechnikán alapuló modellezéséhez. A módszerek elsősorban gyakorlati jelentőségűek, amit a számos alkalmazás is alá támaszt, melyeket a szerző a disszertáció 7. fejezetében részletesen fel is sorol.

Kérdések, megjegyzések:

- A nemlineáris rendszer lineáris modelltől való eltérését első megközelítésben lehet modellezési zajként kezelni. Alkalmazható-e ebben az esetben a kis paraméterek módszere illetve annak valamilyen, például függvényterekre vett általánosítása?
- Az eredeti nemlineáris rendszer egyensúlyi helyzete tipikusan eltérhet a közelítő lineáris rendszer egyensúlyi helyzetétől. Lehet-e becslést adni az eltérésből adódó hibára?

- A nemlineáris hatások lényegesen befolyásolhatják a rendszer aszimptotikus viselkedését. Például ha egy nemlineáris rendszer egyensúlyi helyzete lineárisan stabil, attól még a nemlinearitás a rendszerben csökkentheti az egyensúlyi helyzet vonzástartományának méretét (pl. szubkritikus bifurkáció esetén). Hogyan lehet ezt a hatást modellezni a közelítő lineáris rendszerrel?

Egyéb, főleg formai megjegyzések:

- A disszertáció nyelvezete néhol nehézkes, de azért érthető és jól követhető.
- A disszertáció hét fejezetből áll, a szerző a téziseket az első fejezetben adja meg, majd a következő fejezetekben fejti ki őket.
- Sok ábránál (pl. 1.1.1, 2.3.1, 2.5.2, 3.5.1, 5.2.2, 5.2.3 ábra) hiányoznak a tengelyfeliratok.
- Néhány ábránál nem lehet elolvasni a tengelyek feliratait (pl. 2.4.1, 2.5.5 ábra).
- Nem egyértelmű, hogy mi az ábra aláírása az 1.1.1 ábránál. A képaláírás átlóg a másik oldalra, de a „General note on the figures in the dissertation" szakasz már nem ehhez az ábrához tartozik.

A szerző 2016-ban nyújtotta be doktori értekezését, melyek korábbi, részben társszerzőkkel, részben saját eredményeit foglalja össze. A szerző lektorált folyóiratcikkeinek száma 13. Egy 2013-ban publikált magyarországi folyóiratcikken kívül 2010 óta nem volt nemzetközi folyóiratban publikált szakcikke. Konferencia cikkeinek száma 38, melyek eloszlása egyenletes az elmúlt években. Számos konferencián vett részt szervezőként illetve szerkesztőként, több nemzetközi szakmai szervezet tagja és több tanítványa szerzett PhD fokozatot.

Összefoglalásként megállapítható, hogy a szerző a lineárisan közelített gyengén nemlineáris rendszerek multiszinuszos méréstechnikájának területén jelentős önálló eredményeket ért el. Az eredményeket doktori értekezés formájában ismertette külön kitérve a saját illetve a társszerzőkkel közösen elért eredményekre. A közölt eredmények alátámasztják a problémafelvetések gyakorlati jelentőségét és a megoldások alkalmazhatóságát. **A téziseket a szerző önálló, új tudományos eredményeiként elfogadom.** Az értekezésben szereplő eredmények értékes hozzájárulást jelentenek a gyengén nemlineáris rendszerek méréstechnikájának területén. A fentiek alapján **javaslom a nyilvános vita kitűzését.**

Budapest, 2017. február 10.

Insperger Tamás
az MTA doktora