

Kisteljesítményű gázturbina modellezése és nemlineáris irányítása (Tézisek)

Készítette: AILER PIROSKA

Témavezető: Dr. Sánta Imre egyetemi docens
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi
Egyetem
Repülőgépek és Hajók Tanszék

Dr. Hangos Katalin egyetemi tanár
Veszprémi Egyetem
Számítástudomány Alkalmazása Tanszék
MTA SZTAKI Rendszer- és Irányításelméleti
Kutató Laboratórium

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Közlekedésmérnöki Kar
Repülőgépek és Hajók Tanszék
Budapest

2002

1. A kitűzött kutatási feladat összefoglalása

A gázturbinás hajtóművek alkalmazási területeinek (repülés, villamos energiaipar, gázszállítás, katonai alkalmazások) fontossága, valamint az üzemeltetés igényessége és biztonsági követelményei miatt napjainkban egyre növekednek az igények a gázturbinás hajtóműveken kialakított szabályozási rendszerekkel, azok feladatkörével és a szabályozások pontosságával (maximális hatásfokú jelleggörbék követése) kapcsolatosan. Szerencsére ezzel egyidejűleg a szabályozások tervezése során alkalmazható módszerek is sokasodnak, a lineáris módszerek mellett egyre inkább teret nyernek a nemlineáris technikák [6], melyek szerepe jelentős az elektromos, mechanikai és folyamatrendszerek [5] esetében egyaránt.

Dinamikus modellezési szempontból a gázturbinás hajtómű egy termodinamikai-mechanikai vegyes rendszerként írható le. A modellt alkotó dinamikus és algebrai egyenletek általában nemlineárisak, melyek kezelése komplex feladat. Ezért a leggyakrabban a nemlineáris modell helyett egy, valamely munkapont körül linearizált modellt alkalmaznak a dinamikus analízis és a szabályozótervezés alapjául. Másrészt azonban az utóbbi időben olyan matematikai és irányításelméleti módszerek és eszközök kerültek a kutatás előterébe és kifejlesztésre, melyekkel lehetővé vált a nemlineáris rendszerek, modellek kezelése és vizsgálata nemlineáris technikákkal is. A nemlineáris modellre alkalmazott dinamikus analízis eredményei pedig jól alkalmazhatók a nemlineáris szabályozók tervezésére [6], [10].

Mindezen megállapítások alapján a dolgozatomban leírt kutatás célja az volt, hogy egy egyszerű szerkezetű és munkafolyamatú gázturbina [1] példáján (2. fejezet) megvizsgáljam egy előírt szabályozási célokat megvalósító nemlineáris szabályozó kialakításának lehetőségeit, majd megtervezek és behangoljak egy lehetséges nemlineáris szabályozót.

A dolgozat első részében a megfogalmazott kutatási cél megvalósítása érdekében a vizsgált gázturbina szabályozási célú, dinamikus modelljét kell felállítani [9]. A modell termodinamikai, illetve mechanikai alapelvekből, megfelelő kiegészítő egyenletek hozzávételével készíthető el (3. fejezet) [5]. Fontos lépés a dinamikus modell behelyettesített differenciál-egyenleteinek nemlineáris állapotter alakban való megfogalmazása és annak vizsgálata, hogy az állapotegyenletek nemlineáris input-affin formára átalakíthatók-e. A felírt dinamikus matematikai mo-

dell ismeretlen statikus és dinamikus paramétereket tartalmaz, melyek becslése [7] után a nyitott rendszer szimulációs kísérleteinek felhasználásával elvégezhető a dinamikus modell verifikációja (4. fejezet). A tervezendő szabályozások céljainak meghatározásában fontos lépés az érzékenység-vizsgálat, valamint a gázturbina és ezzel együtt a modell működési tartományának kijelölése.

A dolgozat második részének témája a felállított és verifikált modell irányításelméleti vizsgálata. Ennek első lépéseként a lokálisan linearizált és a nemlineáris modell dinamikus analízisét kell elvégezni (5. fejezet) [6], [11]. A linearizált modell dinamikus tulajdonságai lokális fennállásának ellenőrzése viszonylag egyszerű feladat. A nemlineáris modell esetében a dinamikus analízis elvégzése igen számításigényes és gyakran nehézségekbe ütközik.

A dinamikus analízis eredményeit felhasználva a szabályozási célok kitűzése után a lehetséges szabályozóstruktúrák közül egy lineáris [2], [4] és egy nemlineáris [3] szabályozót célszerű kiválasztani, megtervezni és behangolni (6., 7. fejezet). A lineáris szabályozó referencia-esetként szolgál és alkalmas arra, hogy szimulációk segítségével, meghatározott minőségi és mennyiségi tulajdonságok összevetésével összehasonlítsuk a nemlineáris szabályozással (8. fejezet).

2. A felhasznált eszközök és módszerek

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Repülőgépek és Hajók Tanszékén működik egy Deutz T216-os, tengelyteljesítményt szolgáltató gázturbinás hajtómű próbapadi kialakításban [1]. A próbapadon kialakított mérőrendszer lehetővé teszi a statikus, munkaponti mérések mellett dinamikus, tranziens folyamatok mérésének végrehajtását is. Mindkét esetben lehetőség van a gázturbinás körfolyamat jellegzetes pontjaiban a torlóponthoz tartozó nyomások és hőmérsékletek, valamint a fordulatszám, a terhelő nyomaték és a tüzelőanyag fogyasztás mérésére. A vizsgált gázturbina a modellezés és a szabályozótervezés objektuma.

A modellezés egy szisztematikus és kötött sorrendű lépéssor végrehajtását jelenti [5]. Elsőként a modellezés objektumát és célját kell meghatározni, melyek nagyban befolyásolják a modell végső formáját. A dinamikus modell felírásához dinamikus (differenciál-) egyenletekre van szükség, amelyek megmaradási törvényekből vezethetők le; míg az algebrai egyenletek további, statikus kapcsolatokat fogalmazznak meg. A modell egyenletek elkészítése során a modellezési feltételezéseket azonos módon és állandóan figyelembe kell venni. Vizsgálni kell az algebrai egyenletek behelyettesíthetőségét a differenciál-egyenletekbe. Ha az algebrai egyenletek mindegyike explicit módon behelyettesíthető a differenciál-egyenletekbe, akkor végeredményül egy differenciál-egyenlet rendszert kapunk, amely viszonylag egyszerűen átírható nemlineáris állapotteres, speciálisan nemlineáris input-affin formára.

A dinamikus modellek általában tartalmaznak ismeretlen statikus és/vagy dinamikus paramétereket [7]. Ha a becslési modellek statikus paramétereiben lineárisak, akkor a legkisebb négyzetek módszerének alkalmazásával eredményre lehet jutni. Ha az ismeretlen dinamikus paraméterek becslési modellje paramétereiben nemlineáris, akkor egy optimalizálási feladatot kell valamilyen módszerrel, például a Nelder-Mead simplex algoritmussal [8] megoldani. Minden esetben vizsgálni kell a becslés pontosságát, "jóságát", a becsült paraméterek szórását.

A modellezési folyamat következő fontos lépése a modell érvényességi, működési tartományának meghatározása. Ezen a tartományon belül kell a modellezett rendszert vizsgálni, dinamikus tulajdonságait megállapítani és a szabályozást megtervezni. Végül a dinamikus modell verifikációját kell elvégezni, amely a modell ellenőrzését jelenti mérnöki, a valós

rendszer ismerő tudásunkat és intuícióinkat felhasználva. A verifikációt bonyolult algebrai alakú modell esetén legcélszerűbben szimulációkkal lehet megtenni.

Az elkészített modell dinamikus analízise alapvető fontosságú a szabályozótervezésben. A dinamikus analízis három alapvető dinamikus tulajdonság, az irányíthatóság, a megfigyelhetőség és a stabilitás meglétének az ellenőrzését jelenti. Linearizált modell esetén az irányíthatóság és a megfigyelhetőség fennállásának megállapítása jól ismert algoritmusokkal, a Kalman-féle irányíthatósági és megfigyelhetőségi mátrixok rangjának, míg a stabilitás a linearizált modell állapotmátrixa sajátértékeinek vizsgálatával történik [11]. Nemlineáris input-affin modell esetén a dinamikus jellemzők nagyon eltérőek lehetnek az állapottér különböző tartományaiban [6], [10]. Vizsgálatuk a lineáris eset kiterjesztésén alapuló algoritmusokkal lehetséges, amelyek azonban igen számításigényesek és így gyakran nem vezetnek eredményre. Ilyenkor, bizonyos esetekben más megfontolások alapján bizonyítható a dinamikus tulajdonságok megléte.

A dinamikus analízis eredményei nagyban befolyásolják a tervezendő szabályozás lehetőségeit, tulajdonságait és feladatait. A szabályozás megtervezéséhez mindenekelőtt ki kell tűzni annak céljait, melyek részletesen tartalmazzák a szabályozással kapcsolatban megfogalmazott elvárásokat. Ezek után a lehetséges lineáris és nemlineáris szabályozások közül kiválaszthatóak azok, amelyek a szabályozás céljainak és a dinamikus analízis eredményeinek megfelelnek. A nemlineáris kontroll Ljapunov-függvény alapú szabályozó például garantálni tudja a zárt rendszer globálisan aszimptotikus stabilitását [3], mely tulajdonság megléte esetében a nemlineáris modell dinamikus analízisével nem bizonyítható. A szabályozások megtervezése és az előírt mennyiségi követelményeket eredményező hangolás után fontos feladat a szabályozások összevetése és értékelése. Ehhez a szabályozótervezés céljaiból kiindulva szükséges a minőségi és mennyiségi kritériumokat előre megállapítani. Az összehasonlítás eredményeképpen megállapítható, hogy az adott szabályozási feladat megoldására melyik szabályozó alkalmasabb, melyik mutat jobb minőségi és mennyiségi tulajdonságokat.

3. Új tudományos eredmények

Az értekezésben bemutatott új tudományos eredményeket az alábbi tézisekben foglalom össze.

1. Tézis *A vizsgált gázturbina nemlineáris dinamikus modellje* (3. fejezet)

([P1], [P2], [P3])

A vizsgált gázturbinát vegyes termodinamikai-mechanikai rendszerként kezelve szisztematikus és ellenőrzött modellezési eljárással felállítottam és verifikáltam a gázturbina irányítási célokra alkalmas dinamikus modelljét. Megmutattam, hogy ez a modell az alábbi speciális tulajdonságokkal rendelkezik:

- 1.1. A gázturbina dinamikus modellje egy nemlineáris differenciál-algebrai egyenlet-rendszer, amelynek differenciálegyenletei az égéstérre, mint mérlegelési térfogatra felírt tömeg- és belső energia-megmaradási egyenletek, valamint a forgórész mechanikai energia-megmaradási egyenlete.
- 1.2. Megmutattam, hogy az elkészített 3 állapotváltozós nemlineáris dinamikus modell állapotegyenletei input-affin formára hozhatóak.
- 1.3. A dimenziómentesített és centrált nemlineáris modell koordináta-függvényei a következő tulajdonságokkal rendelkeznek:
 - 1.3.1. az $f(x)$ koordináta-függvények a zavarás-vektor elemeitől is függenek: $f(x) = f(x, d)$,
 - 1.3.2. a $g(x)$ koordináta-függvények nem függenek az állapotváltozóktól: $g(x) = B = const.$,
 - 1.3.3. a kimeneti egyenletek koordináta-függvényei a következő alakúak: $h_1(x) = h_1(x, d_1)$, $h_2(x) = x_2$, valamint $h_3(x) = x_3$.

2. Tézis *A nemlineáris dinamikus modellben szereplő ismeretlen paraméterek becslése* (4. fejezet)

([P3], [P4])

A vizsgált gázturbina dinamikus modelljét mért adatok segítségével validáltam. A modellben szereplő ismeretlen statikus paraméterek

becslésével megállapítottam, hogy a kompresszor és a turbina karakterisztikák közelítésére az egyszerűbb bilineáris típusú becslési modellek elegendően pontosak, valamint a becsült dinamikus paraméterekkel a dinamikus modell megfelelő (1% körüli) pontosságú.

2.1. A modell statikus paraméterei a kompresszor és a turbina karakterisztikáit approximáló polinomok ismeretlen együtthatói, amelyeket statikus mérések felhasználásával a legkisebb négyzetek módszerével becsültem meg.

2.2. A dinamikus paraméterek értékét mért egységugrás válaszfüggvények és az ismeretlen paramétereket nemlineáris alakban tartalmazó szimulációs modell segítségével becsültem. A becsléshez tartozó nemlineáris optimalizálási feladatot a Nelder-Mead simplex algoritmussal oldottam meg.

3. Tézis *A nemlineáris dinamikus modell nemlineáris dinamikus analízise* (5. fejezet)

(**[P3]**)

A nemlineáris dinamikus analízis segítségével megmutattam, hogy a gázturbina nemlineáris dinamikus modellje:

3.1. a kontroll Ljapunov-függvény alapú nemlineáris szabályzó tervezhetősége miatt stabilizálható és a tervezett kontroll-bemennettel a visszacsatolt zárt rendszer bármely kezdeti értékről a működési tartományon belüli bármely munkapontjának tetszőlegesen kis környezete elérhető;

3.2. nemlineáris értelemben megfigyelhető.

4. Tézis *Lineáris és nemlineáris szabályozóstruktúra-választás és szabályozótervezés* (6., 7., 8. fejezet)

(**[P5]**)

A szabályozások pontos mérnöki feladatkitűzéséből kiindulva a lehetséges lineáris és nemlineáris szabályozási struktúrák közül kiválasztottam a lineáris LQ szervo szabályozót, mint összehasonlítási alapesetet és megterveztem egy nemlineáris kontroll Ljapunov-függvény alapú blokkstruktúrájú szabályozót. Számítógépes szimulációs kísérletek alapján történő összevetés eredményeként megmutattam, hogy a nemlineáris kontroll Ljapunov-függvény alapú

szabályozóval visszacsatolt zárt rendszer ugyanolyan, vagy kedvezőbb minőségi és mennyiségi tulajdonságokat mutat, mint a lineáris LQ szervo-val visszacsatolt zárt kör jellemzői.

4.1. Megterveztem és az előírt szabályozási céloknak megfelelően behangoltam az LQ szervo szabályozót.

4.2. A vizsgált gázturbina nemlineáris dinamikus modelljére megterveztem és behangoltam egy nemlineáris kontroll Ljapunov-függvény alapú blokkstruktúrájú szabályozót. Az ezzel a szabályozóval visszacsatolt zárt kör tulajdonságai - az adott tulajdonságot garantáló szabályozási blokk(ok) felsorolásával - a következők:

4.2.1. a működési tartományon belüli munkapontok mindegyike beállítható és a munkapontok mindegyike globálisan aszimptotikusan stabil (a stabilitást garantáló blokk, az aszimptotikus stabilitást garantáló blokk és a további munkapontok aszimptotikus stabilitását garantáló blokk együttes alkalmazása);

4.2.2. a gázkar által előírt jelet, mint referencia-jelet a fordulatszám követni tudja (a további munkapontok aszimptotikus stabilitását garantáló blokk alkalmazása);

4.2.3. a statikus munkapontokban garantálható a gázturbina védelme a túl nagy fordulatszámától és a túl magas hőmérséklettől (a gázturbina védelmét ellátó blokk alkalmazása);

4.2.4. a zavarás-vektor elemeinek változására a fordulatszám átvitel érzéketlen (a további munkapontok aszimptotikus stabilitását garantáló blokk alkalmazása);

4.2.5. az időben változó, nem mérhető paraméterekre nézve a zárt rendszer robusztus (robusztusságot biztosító blokk alkalmazása);

4.2.6. a nemlineáris szabályzó paramétereinek hangolásával a zárt kör az előírt beállási idővel rendelkezik.

4. Az értekezés témaköréből készült publikációk:

- [P1] P. Ailer, I. Sánta, G. Szederkényi and K. M. Hangos. Nonlinear Model-Building of a Low-Power Gas Turbine. *Periodica Polytechnica Ser. Transportation Engineering* 2001. **29**/1-2. pp. 117-135. (1. tézis)
- [P2] P. Ailer. Nonlinear Mathematical Modeling and Control Design Developed for Gas Turbine. *Proceedings of the 7th Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies* Budapest, szerkesztő: Dr. Zobory István, kiadó: Budapesti Műszaki Egyetem, 2000. pp. 465-472. (1. tézis)
- [P3] P. Ailer, G. Szederkényi and K. M. Hangos. Modeling and Non-linear Analysis of a Low-Power Gas Turbine. *Research report of the Systems and Control Laboratory SCL-1-2001* Budapest, MTA SZTAKI, 2001. 25 p. (1., 2. és 3. tézis)
- [P4] P. Ailer, G. Szederkényi and K. M. Hangos. Parameter-estimation and Model Validation of a Low-Power Gas Turbine. *Proceedings of the "Modelling, Identification and Control'2002" Conference* Innsbruck, Ausztria, editor: M. H. Hamza, published by the ACTA Press, 2002. pp. 604-609. (2. tézis)
- [P5] P. Ailer, G. Szederkényi and K. M. Hangos. Model-Based Nonlinear Control of a Low-Power Gas Turbine. *Proceedings of the "15th IFAC World Congress on Automatic Control"* Barcelona, Spanyolország, editors: E. F. Camacho, L. Basanez, J. A. de la Puente, published by the Elsevier Science, 2002. paper no.: 755. 6 p. (4. tézis)

5. Az értekezés témaköréhez részben kapcsolódó publikációk:

- [O1] P. Ailer. Az RD-33-as Hajtómű Centrifugális Fordulatszám-Szabályozójának Matematikai Modellezése. *ZMNE Repüléstudományi Közlemények* 1998. **X. 24.** pp. 175-191.
- [O2] P. Ailer and I. Sánta. Mathematical Modelling and Dynamic Analysis of Rotational Speed Control System of Low Bypass Ratio Turbofan. *Proceedings of the 6th Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies* Budapest, szerkesztő: Dr. Zobory István, kiadó: Budapesti Műszaki Egyetem, 1998. pp. 337-348.
- [O3] P. Ailer. Kis Teljesítményű Gázturbina Szabályozásának Matematikai Modellezése. *ZMNE Repüléstudományi Közlemények* 1999. **XI. 26.** pp. 239-250.
- [O4] P. Ailer. Mathematical Modelling of Control System of Low-Power Engine. *Proceedings of "The Challenge of Next Millenium on Hungarian Aeronautical Sciences" Conference* Budapest-Nyíregyháza, szerkesztő: Dr. Rohács József, Dr. Szabó Gyula, Ailer Piroska és Veress Árpád, kiadó: eR-GROUP, 1999. pp. 142-152.
- [O5] P. Ailer. Gázturbina-Egységek Karakterisztikája, a Gázturbina Matematikai Modellje. *ZMNE Repüléstudományi Közlemények* - 2000. **XII. 29.** pp. 139-147.
- [O6] P. Ailer. Comparison of Linear and Non-linear Mathematical Models Developed for Gas Turbine Control. *Proceedings of the 3rd International Conference on Nonlinear Problems in Aviation and Aerospace* Daytona Beach, Florida, USA, editor: Seenith Sivasundaram, published by the European Conference Publications, Cambridge, UK, 2000. pp. 11-19.
- [O7] P. Ailer. Mathematical Modelling of a Low-Power Gasturbine Engine and Its Control System. *Proceedings of the 22nd International Congress of Aeronautical Sciences* Harrogate, Nagy-Britannia, editor: J. P. Marec, published by the Optimage Ltd., 2000. paper no.: 752. 7 p.

[O8] P. Ailer. Mathematical Modelling of Gas Turbine Engine and Its Control System. *Periodica Polytechnica Ser. Transportation Engineering* (megjelenés alatt)

6. Az eredmények hasznosítása

A dolgozatban bemutatott, a vizsgált gázturbinára alkalmazott modellezési, statikus és dinamikus paraméter-becslési és irányításelméleti módszerek alkalmazhatóak más típusú, más konstrukciójú, bonyolultabb szerkezetű (például kétáramú, kéttengelyes, és/vagy utánégetőteres) gázturbinás hajtóművekre is.

Természetesen egy más konstrukció vizsgálata során megváltoznak a modellt alkotó egyenletek, számuk általában növekszik. Két forgórész esetén például két mechanikai energia-megmaradási dinamikus egyenletre van szükség a modellben. Mivel a két forgórész miatt két (egy kisnyomású és egy nagynyomású) kompresszor és két turbina van, ezért az algebrai egyenletek, a karakterisztikákat közelítő polinomok száma is a kétszeresére növekszik.

Általában több a beavatkozó változó is, például utánégetőteres konstrukció esetén bemenet az utánégetőtérbe betáplált tüzelőanyag mennyisége, vagy ha a gázturbina valamely egysége nem állandó keresztmetszetű, akkor a változtatható keresztmetszetek (például a kompresszor elfordítható állólapátkoszorúja, vagy a változtatható geometriájú fúvócső stb.) is a bemeneti vektor elemei.

Bővül a szabályozás feladatköre. Nemcsak a fordulatszámot, de utánégetőteres kialakítás esetén az utánégetőtér torlóponti hőmérsékletét is állandó értéken kell tartani annak működtetésekor.

A fenti eltérések ellenére a vizsgált gázturbina fontos alapesetként, mintaként szolgál egy bonyolultabb konstrukciójú hajtómű irányításelméleti, szabályozástervezési problémáinak megoldásához, mivel az elvégzendő feladatok sorrendje és az alkalmazható módszerek mindkét esetben lényegében megegyeznek.

Hivatkozások

- [1] *Industrial Gas Turbine T216*. Klöckner-Humboldt-Deutz AG, Köln.
- [2] J. Bokor. Modern irányításelmélet I. Lecture Notes, 1998.
- [3] R. A. Freeman and P. V. Kokotovic. *Robust Nonlinear Control Design, State-Space and Lyapunov Techniques*. Birkhauser, Boston-Basel-Berlin, 1996.
- [4] P. Gáspár and I. Szászi. Robust servo control design using identified models. *Proceedings of 3rd IFAC Symposium on Robust Control Design*, 2000.
- [5] K. M. Hangos and I. T. Cameron. *Process Modelling and Model Analysis*. Academic Press, New York, London, 2001.
- [6] A. Isidori. *Nonlinear Control Systems (3rd ed.)*. Springer, New York-Berlin-etc, 1995.
- [7] L. Ljung. *System identification - theory for the user*. University of Linköping, Sweden, Linköping, 1984.
- [8] J. A. Nelder and R. Mead. A simplex method for function minimization. *Computer Journal*, **7**:308–313, 1965.
- [9] I. Sánta. *Gázturbinás Hajtóművek Termodinamikai Modellezése és a Modellek Alkalmazásai*. Kandidátusi értekezés, Budapesti Műszaki Egyetem, Budapest, 1993.
- [10] A. J. van der Schaft. *L₂-Gain and Passivity Techniques in Nonlinear Control*. Springer, New York-Berlin-etc, 1996.
- [11] K. Zhou, J. C. Doyle, and K. Glover. *Robust and Optimal Control*. Prentice Hall, New Jersey, 1995.