ISSN 1727-7337 (print)
ISSN 2663-2217 (online)

УДК 621.452.3.037.015.2:681.513.2 **doi: 10.32620/aktt.2021.4.07**

С. В. ЄНЧЕВ, С. О. ТАКУ

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ РЕГУЛЯТОР ЗАПАСУ ГАЗОДИНАМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ КОМПРЕСОРА АВІАЦІЙНОГО ГТД

Газодинамічна стійкість компресорів авіаційних газотурбінних двигунів є одним з найважливіших умов, що визначає їх надійність і рівень безпеки польотів. Нестійка робота компресора в системі двигуна (помпаж) призводять до втрати тяги, супроводжуються зростанням температури газів перед турбіною і підвищенням рівня вібрацій в результаті великих амплітуд пульсацій тиску й масових витрат по тракту двигуна. Для покращення параметрів САК авіаційними ГТД все більше використовуються регулятори, побудовані із застосуванням алгоритмів нечіткої логіки. Реалізація алгоритмів нечіткого керування відрізняється від класичних алгоритмів, що побудовані на основі концепції зворотного зв'язку і відтворюють задану функціональну залежність або диференціальне рівняння. Ці функції пов'язані з якісною оцінкою поведінки системи, аналізом поточної змінюваної ситуації та вибором найбільш прийнятного для даної ситуації керування ГТД. Така концепція отримала назву випереджувального керування. САК ГТД з нечіткими регуляторами є нелінійними системами, в яких можливі стійкі автоколивання. Для розв'язку задач аналізу періодичних коливань в нелінійних системах використовуються наближені методи. Серед них найбільш розробленим у теоретичному і методичному аспектах є метод гармонічної лінеаризації. У роботі вирішується наукова задача - методики синтезу інтелектуальної системи керування з нечітким регулятором як сепаратної підсистеми на основі методу гармонічної лінеаризації та проектуванні на його основі нечіткої САК запасом газодинамічної стійкості авіаційного ГТД. На основі проведеного аналізу принципів побудови нечітких систем керування показано, що застосування нечіткої логіки забезпечує новий підхід до проектування систем керування авіаційними ГТД на відміну від традиційних способів керування гарантує можливість вирішення низки проблем в умовах невизначеності. Показано, що нечіткий регулятор, як єдиний суттєво нелінійний елемент при використанні чисельних методів інтегрування може бути гармонічно лінеаризований. Гармонічна лінеаризація дозволяє для оцінки якості в сепаратних каналах нечітких САК авіаційними ГТД використовувати показник коливальності. Для оптимального налаштування функцій приналежності типових нечітких регуляторів за критеріями якості до перехідних процесів розроблена нечітка експертна система.

Ключові слова: *авіаційний газотурбінний двигун; газодинамічна стійкість; система керування; інтелектуальний нечіткий регулятор; гармонічна лінеаризація.*

Вступ

Газодинамічна стійкість компресорів авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД) є одним з найважливіших умов, що визначає їх надійність і рівень безпеки польотів. Нестійка робота компресора в системі двигуна, так званий помпаж, викликає інтенсивні коливання тиску робочого тіла в проточній частині або газодинамічні удари. Помпаж є причиною виключення двигунів в польоті, пожежі або обгорання лопаток турбіни [1, 2].

1. Постановка проблеми

Як показують результати досліджень представлених в [1-4], помпажні явища в ГТД призводять до втрати тяги, супроводжуються зростанням температури газів перед турбіною і підвищенням рівня вібрацій в результаті великих амплітуд пульсацій тиску і масових витрат по тракту двигуна. Можливість появи цих явищ є серйозною перешкодою на шляху збільшення надійності ГТД зокрема і безпеки польотів в цілому [4].

На сьогодні для суттєвого покращення параметрів САК авіаційними ГТД все більше використовуються регулятори, побудовані із застосуванням алгоритмів нечіткої логіки [5-7]. Під нечітким керуванням будемо розуміти стратегію керування, яка базується на емпірично набутих знаннях щодо функціонування об'єкту і представлених у лінгвістичній формі у вигляді деякої сукупності правил [5].

Реалізація алгоритмів нечіткого керування принципово відрізняється від класичних («жорстких») алгоритмів, що побудовані на основі концепції зворотного зв'язку і відтворюють задану функціональну залежність або диференціальне рівняння. Ці функції пов'язані з якісною оцінкою поведінки системи, аналізом поточної змінюваної ситуації та вибором

© С. В. Єнчев, С. О. Таку, 2021

найбільш прийнятного для даної ситуації керування ГТД. Така концепція отримала назву випереджувального керування [5].

САК ГТД з нечіткими регуляторами (НР) є нелінійними системами, в яких можливі стійкі автоколивання. На сьогодні при проектуванні таких систем до кінця не вирішенні питання аналізу стійкості та якості процесу керування, так як через складність аналітичного опису нечітких систем практично відсутні методи їх дослідження [5-7]. Тому основним методом аналізу є моделювання.

Для розв'язку задач аналізу періодичних коливань в нелінійних системах використовуються наближені методи. Серед них найбільш розробленим у теоретичному і методичному аспектах є метод гармонічної лінеаризації [5, 6]. Тому мета дослідження – розробка методики синтезу інтелектуальної системи керування з нечітким регулятором як сепаратної підсистеми на основі методу гармонічної лінеаризації та проектуванні на його основі нечіткої САК запасом газодинамічної стійкості авіаційного ГТД.

2. Основна частина

У разі лінеаризації НР будемо розглядати як єдиний нелінійний елемент. На рис.1 зображена структурна схема САК ГТД з нечітким ПД-регулятором, який будемо розглядати в якості сепаратної підсистеми нечіткої САК.

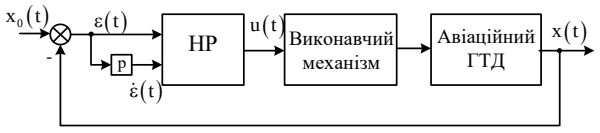

Рис. 1. Структурна схема САК ГТД з нечітким ПД-регулятором

Тоді структурну схему САК ГТД з нечітким ПД-регулятором можна уявити як послідовне з'єднання нелінійної ланки виду $u(t)=F\left[\varepsilon(t),\dot{\varepsilon}(t)\right]$ і лінійної частини, що дозволяє використати метод гармонічної лінеаризації [8].

Для лінеаризації НР на його вхід подається гармонічний сигнал $x(t)=a\sin f$, де $\phi=\omega t$. Тоді $\dot{x}(t)=a\omega\cos\phi$. Вихідний сигнал НР буде періодичним, але не гармонічним. Після розкладу вихідного сигналу в ряд Фур'є та введення спрощувальних припущень щодо відсутності постійної складової та того, що лінійна частина має властивості фільтра низьких частот, наближений вираз вихідного сигналу НР має вигляд [6].

$$u(t)=q(a,\omega)a\sin\phi+q'(a,\omega)a\cos\phi.$$

Такий самий вихідний сигнал можна отримати, якщо гармонічний сигнал $x(t)=a\sin\phi$ подати на вхід лінійної ланки з передатною функцією [8]

$$W_{НР}(a,p)=q(a,\omega)+\frac{q'(a,\omega)}{\omega}p,$$

де $q(a,\omega)$, $q'(a,\omega)$ - коефіцієнти гармонічної лінеаризації, які визначаються за формулами:

$$q(a,\omega)=\frac{1}{\pi a}\int_0^{2\pi}F(a\sin\phi,a\omega\cos\phi)\sin\phi d\phi,$$

$$q'(a,\omega)=\frac{1}{\pi a}\int_0^{2\pi}F(a\sin\phi,a\omega\cos\phi)\cos\phi d\phi.$$

Таким чином, за допомогою гармонічної лінеаризації НР система (рис. 1) приводиться до вигляду рис. 2, де частотна характеристика $W_{НР}(a,j\omega)$ еквівалентної ланки залежить тільки від амплітуди а і не залежить від частоти ω:

$$W_{НР}(a)=q(a)+jq'(a).$$

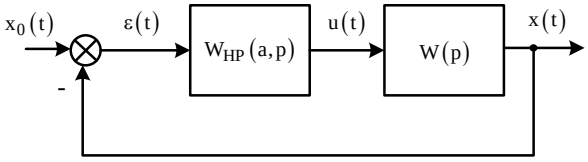

Рис.2. Гармонічно лінеаризована САК

Отже, на основі чисельної процедури можлива гармонічна лінеаризація НР, це дозволяє проводити синтез НР із умови відсутності автоколивань в системі. Так для гарантованої відсутності коливань в системі достатньо виконання критерію Л. С. Гольфарба [8]: не перетинання годографів лінійної $W(j\omega)$ та нелінійної $R_{НР}(a)$ частин системи на комплексній площині.

Цю умову можна використовувати як критерій стійкості замкненої системи при розробці методики синтезу нечіткої САК. Якість процесів керування значною мірою залежить від параметрів функції приналежності вхідних і вихідних логічних правил (ЛП) НР. Тому важливим етапом синтезу НР є оптимальне налаштування параметрів функцій приналежності відповідно із заданими критеріями якості процесу керування. Таким чином задача синтезу НР полягає в наступному. За заданої лінійної частини САК, заданої базі правил НР, критеріїв якості до перехідних процесів і критерію стійкості або заданого показника коливальності (забороненої зони для АФЧХ лінійної частини САК) необхідно налаштувати параметри функцій приналежності НР.

Найбільш перспективними є безперервні замкнуті системи керування осьовими компресорами за параметрами [1]. Застосування цього параметра в

ISSN 1727-7337 (print)
ISSN 2663-2217 (online)

системах керування осьовим компресором зумовлено тим, що число М однозначно відповідає кожному значенню приведеної частоти обертання ротора і монотонно зменшується при наближенні робочої точки до границі газодинамічної стійкості компресора. Це дозволяє при наближенні лінії робочих режимів до границі стійкості сформувати упереджуючу команду на управління компресором при зменшенні числа М до певної величини. Типова залежність числа М від приведеної витрати повітря на вході в компресор наведена на рис. 3.

Рис. 3. Характеристика компресора

Шляхом моделювання були виявлені залежності якості перехідного процесу [6] від параметрів функцій приналежності для замкнених систем з нечіткими ПІ- та ПД-регуляторами:

1. Розтяг / стиснення діапазону вихідної функції приналежності НР призводить до збільшення / зменшення початкової швидкості перехідного процесу.

2. Розтяг / стиснення діапазону функції приналежності на першому вході НР призводить до зменшення / збільшення часу перехідного процесу.

3. Розтяг / стиснення діапазону функції приналежності на другому вході НР призводить до збільшення / зменшення перерегулювання перехідного процесу.

Виявлені залежності можна використовувати для формування бази правил експертної системи, яка дозволяє налаштовувати НР із умови виконання заданих критерії якості. Оскільки виявлені залежності сформульовані у вигляді нечітких висловлювань, для вирішення цієї задачі пропонується використовувати блок налаштування, який побудований теж на основі апарату нечіткої логіки (рис. 4).

На рис. 4 прийняті такі позначення: T - масив поточних значень часу; X - масив значень відповідного перехідного процесу; $t^*_{рег}$, σ^* - бажані час регулювання величина перерегулювання; $t_{рег}$, σ - час регулювання та величина перерегулювання в синтезованій системі; $\Delta t_{рег}$, $\Delta\sigma$ - відхилення від бажаних часу регулювання та величини перерегулювання; f_ε, $f_{\dot\varepsilon}$, f_u - коефіцієнти налаштування функцій приналежності за похибкою, швидкістю похибки та керувального впливу відповідно.

На входи блока налаштування подаються відхилення від бажаних значень величини перерегулювання $\Delta\sigma$ і часу регулювання $\Delta t_{рег}$ перехідного процесу проектованої системи.

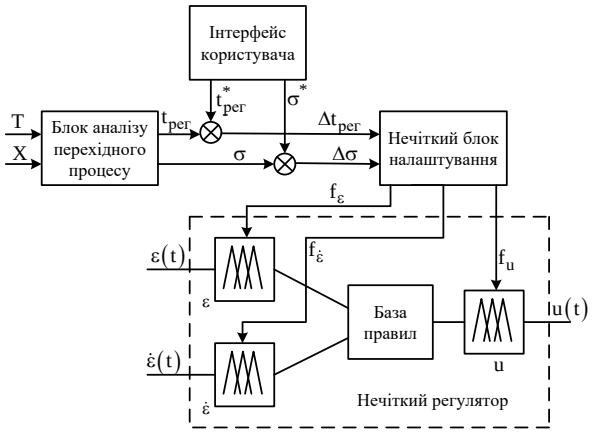

Рис. 4. Налаштування нечіткого регулятора за допомогою нечіткої експертної системи

Безпосереднє використання вказаних залежностей в базі правил нечіткого блоку налаштувань потребує попереднього аналізу показників якості за відповідним перехідним процесом на виході синтезованої САК ГТД, що реалізовано блоком аналізу перехідного процесу.

Висновки

На основі проведеного аналізу принципів побудови нечітких систем керування показано, що застосування нечіткої логіки забезпечує новий підхід до проектування систем керування авіаційними ГТД на відміну від традиційних способів керування гарантує можливість вирішення низки проблем в умовах невизначеності. Показано, що нечіткий регулятор, як єдиний суттєво нелінійний елемент при використанні чисельних методів інтегрування може бути гармонічно лінеаризований. Це дозволяє проводити дослідження періодичних рухів у нечітких САК. Гармонічна лінеаризація дозволяє для оцінки якості каналах нечітких САК авіаційними ГТД використовувати показник коливальності. На основі запропонованих критеріїв стійкості та якості процесів керування розроблена методика синтезу нечітких систем керування. Для оптимального налаштування функцій

приналежності типових нечітких регуляторів за критеріями якості до перехідних процесів розроблена нечітка експертна система.

Подальше дослідження пропонується розвивати в напрямку практичної реалізації даної методики для конкретних ГТД.

Література

1. Волянська, Л. Г. Методи і засоби підвищення газодинамічної стійкості компресорів газотурбінних двигунів [Текст] : монографія / Л. Г. Волянська, В. В. Панін, С. Гаоюн. – К. : НАУ, 2005. – 200 с.

2. Панин, В. В. Газодинамическая устойчивость компрессоров авиационных ГТД [Текст] : монография / В. В. Панин. – К. : КМУГА, 1998. – 152 с.

3. Кулик, М. С. Метод визначення запасів стійкості каскадів компресора двигуна Д–18Т на перехідних режимах [Текст] / М. С. Кулик, В. В. Панін, І. Ф. Кінащук // Вісник Національного авіаційного університету. - 2002. - № 3 (14). - С. 14–18.

4. Идентификация помпажа в компрессорах авиационных газотурбинных двигателей с помощью вейвлет-анализа [Текст] / В. В. Панин, С. В. Енчев, А. В. Попов, А. Ю. Сидоренко // Авиационно-космическая техника и технология. - 2011. - № 9 (86). - С. 134–138.

5. Васильев, В. И. Интеллектуальные системы управления : теория и практика [Текст] : учеб. пособие / В. И. Васильев, Б. Г. Ильясов. – М. : Радиотехника, 2009. – 392 с.

6. Yenchev, S. V. Fuzzy Automatic Control System Synthesis of the Propeller Fan the Aviation Gas Turbine Engine [Text] / S. V. Yenchev, T. A. Mazur, S. S. Tovkach // Electronics and Control Systems. - 2018. - № 58. - Vol. 4. - P. 56–63.

7. Гостев, В. И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления [Текст] : монографія / В. И. Гостев. – К. : Радіоаматор, 2008. - 972 с.

8. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического регулирования [Текст] : учеб. пособие для вузов / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – 4. изд. – СПб. : Профессия, 2007. - 751 с.

References

1. Volyans′ka, L. H., Panin, V. V., Haoyun, S. *Metody i zasoby pidvyshchennya hazodynamichnoyi stiykosti kompresoriv hazoturbinnykh dvyhuniv* [Methods and means of increasing the gas-dynamic stability of gas turbine engine compressors]. Kyyiv, 2005. 200 p.

2. Panin, V. V. *Gazodinamicheskaja ustojchivost' kompressorov aviacionnyh GTD* [Analysis Gas-dynamic stability of aviation gas turbine compressors]. Kyyiv, 1998. 192 p.

3. Kulyk, M. S., Panin, V. V., Kinashchuk, I. F. Metod vyznachennia zapasiv stiikosti kaskadiv kompresora dvyhuna D-18T na perekhidnykh rezhymakh [Method for determining the margins of stability of the compressor stages of the D-18T engine in transient modes]. *Bulletin of the National Aviation University*, 2002, no. 3 (14), pp. 14–18.

4. Panin, V. V., Yenchev, S. V., Popov, A. V., Sidorenko, A. Ju. Identifikacija pompazha v kompressorah aviacionnyh gazoturbinnyh dvigatelej s pomoshh'ju vejvlet-analiza [Identifying Surge in Aircraft Gas Turbine Compressors Using Wavelet Analysis]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2011, no. 9(86), pp. 134-138.

5. Vasil'ev, V. I., Il'jasov, B. G. *Intellektual'nye sistemy upravlenija : teorija i praktika* [Intelligent control systems: theory and practice]. Moscow, 2009. 392 p.

6. Yenchev, S. V., Mazur, T. A., Tovkach, S. S. Fuzzy Automatic Control System Synthesis of the Propeller Fan the Aviation Gas Turbine Engine. *Electronics and Control Systems*, 2018, no. 58, vol. 4, pp. 56-63. DOI: 10.18372/1990-5548.58.13510.

7. Gostev, V. I. *Nechetkie reguljatory v sistemah avtomaticheskogo upravlenija* [Fuzzy controllers in automatic control systems]. Kyyiv, 2008. 972 p.

8. Besekerskiy, V. A., Popov, Ye. P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* [Theory of automatic control systems]. St. Petersburg, 2007. 751 p.

Надійшла до редакції 09.06.2021, розглянута на редколегії 09.08.2021

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ РЕГУЛЯТОР ЗАПАСА ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ КОМПРЕССОРА АВИАЦИОННОГО ГТД

С. В. Енчев, С. О. Таку

Газодинамическая устойчивость компрессоров авиационных газотурбинных двигателей является одним из важнейших условий, определяет их надежность и уровень безопасности полетов. Неустойчивая работа компрессора в системе двигателя (помпаж) приводят к потере тяги, сопровождаются ростом температуры газов перед турбиной и повышением уровня вибраций в результате больших амплитуд пульсаций давления и массовых расходов по тракту двигателя. Для улучшения параметров САК авиационными ГТД все больше используются регуляторы, построенные с применением алгоритмов нечеткой логики. Реализация алгоритмов нечеткого управления отличается от классических алгоритмов, построенные на основе концепции обратной связи и воспроизводят заданную функциональную зависимость или дифференциальное уравнение. Эти функции связаны с качественной оценкой поведения системы, анализом текущей изменяемой ситуации и выбором

ISSN 1727-7337 (print)
ISSN 2663-2217 (online)

наиболее приемлемого для данной ситуации управления ГТД. Такая концепция получила название опережающего управления. САК ГТД с нечеткими регуляторами являются нелинейными системами, в которых возможны устойчивые автоколебания. Для решения задач анализа периодических колебаний в нелинейных системах используются приближенные методы. Среди них наиболее разработанным в теоретическом и методическом отношениях является метод гармоничной линеаризации. В работе решается научная задача – методики синтеза интеллектуальной системы управления с нечетким регулятором как сепаратного подсистемы на основе метода гармонической линеаризации и проектировании на его основе нечеткой САК запасом газодинамической устойчивости авиационного ГТД. На основе проведенного анализа принципов построения нечетких систем управления показано, что применение нечеткой логики обеспечивает новый подход к проектированию систем управления авиационными ГТД в отличие от традиционных способов управления гарантирует возможность решения ряда проблем в условиях неопределенности. Показано, что нечеткий регулятор, как единственный существенно нелинейный элемент при использовании численных методов интегрирования может быть гармонично Линеаризованные. Гармоничная линеаризация позволяет для оценки качества в сепаратных каналах нечетких САУ авиационными ГТД использовать показатель колебательности. Для оптимальной настройки функций принадлежности типичных нечетких регуляторов по критериям качества переходных процессов разработана нечеткая экспертная система.

Ключевые слова: авиационный газотурбинный двигатель; газодинамическая устойчивость; система управления; интеллектуальный нечеткий регулятор; гармоничная линеаризация.

INTELLECTUAL STOCK REGULATOR OF GAS-DYNAMIC STABILITY OF THE AVIATION GTE COMPRESSOR

S. Yenchev, S. Taku

The gas-dynamic stability of compressors of aircraft gas turbine engines is one of the most important conditions that determine their reliability and level of flight safety. Unstable operation of the compressor in the engine system (surge) leads to loss of thrust accompanied by an increase in gas temperature in front of the turbine and increased vibration because of large amplitudes of pressure pulsations and mass flow through the engine path. To improve the parameters of ACS aviation gas turbine engines are increasingly using regulators built using fuzzy logic algorithms. The implementation of fuzzy control algorithms differs from classical algorithms, which are based on the concept of feedback and reproduce a given functional dependence or differential equation. These functions are related to the qualitative assessment of system behavior, analysis of the current changing situation, and the selection of the most appropriate for the situation supervision of the gas turbine engine. This concept is called advanced management. ACS gas turbine engines with fuzzy regulators are nonlinear systems in which stable self-oscillations are possible. Approximate methods are used to solve the problems of analysis of periodic oscillations in nonlinear systems. Among them, the most developed in theoretical and methodological aspects is the method of harmonic linearization. The scientific problem is solved in the work – methods of synthesis of intelligent control system with the fuzzy regulator as a separate subsystem based on the method of harmonic linearization and design on its basis of fuzzy ACS reserve of gas-dynamic stability of aviation gas turbine engine. Based on the analysis of the principles of construction of fuzzy control systems, it is shown that the use of fuzzy logic provides a new approach to the design of control systems for aviation gas turbine engines in contrast to traditional control methods. It is shown that the fuzzy controller, as the only essentially nonlinear element when using numerical integration methods, can be harmonically linearized. Harmonic linearization allows using the oscillation index to assess the quality in the separate channels of fuzzy ACS aviation gas turbine engines. A fuzzy expert system has been developed for optimal adjustment of the functions of belonging of typical fuzzy regulators according to quality criteria to transients.

Keywords: aircraft gas turbine engine; gas-dynamic stability; control system; intelligent fuzzy regulator; harmonic linearization.

Єнчев Сергій Васильович – д-р техн. наук, доц., проф. каф. автоматизації та енергоменеджменту Аерокосмічного факультету Національного авіаційного університету, Київ, Україна.

Таку Сергій Олегович – викладач Фахового коледжу інженерії та управління Національного авіаційного університету, Київ, Україна.

Serhii Yenchev - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Automation and Energy Management of the Aerospace Faculty of the National Aviation University, Kyiv, Ukraine,
e-mail: esw@ukr.net, ORCID: 0000-0001-6994-9378, ResearcherID: serhii-yenchev
https://scholar.google.com.ua/citations?user=3rMflLEAAAAJ&hl=uk.

Serhii Taku – Lecturer at the Professional College of Engineering and Management of the National Aviation University, Kyiv, Ukraine,
e-mail: taku_777@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0107-5437.