

АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА

УДК 629.7.03:681.5.03 (045)

Єнчев С.В.

Національний авіаційний університет

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВІДМОВОСТІЙКОСТІ НЕЧІТКОЇ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ АВІАЦІЙНИМИ ДВИГУНАМИ

Статтю присвячено питанню забезпечення відмовостійкості систем керування авіаційними двигунами. Система керування уявляється як складна логіко-динамічна системи, яка дає змогу продовжувати дії, задані програмою, після виникнення відмов. Для забезпечення відмовостійкості у разі відмови електронної керувальної частини передбачено перехід на резервні гідромеханічні системи. Застосування відмовостійкої інтелектуальної системи керування авіаційними двигунами на основі нечіткої логіки дає змогу забезпечити локалізацію відмови та її парирування та зберегти при цьому необхідну якість процесів керування. Розроблено нечітку відмовостійку систему керування одновального авіаційного двигуна за каналом швидкості обертання вільної турбіни та досліджено його роботу за відмови одного з датчиків.

Ключові слова: авіаційний двигун, інтелектуальна система керування, нечітка логіка, відмовостійкість, адаптація.

Постановка проблеми. Однією з головних характеристик систем керування авіаційними двигунами (АД) є надійність. Підвищення надійності базується на принципі запобігання несправностям шляхом зниження інтенсивності відмов та збоїв елементів системи автоматичного керування (САК), застосування електронних схем і компонентів із поліпшеними ймовірнісними характеристиками, використання полегшених режимів роботи схем. Відмовостійкість – це така властивість САК як складної логіко-динамічної системи, яка дає змогу продовжувати дії, задані програмою, після виникнення відмов; комплексний показник надійності функціональної системи (ФС), визначуваний ймовірністю того, що система функціонуватиме на певному рівні якості після того, як відбудеться відмова (або декілька відмов) у компонентах її апаратури і (або) їхнього програмного забезпечення [контролю та діагностування стану ІСК АД;

– відновлення працездатності ІСК під час виникнення відмов АД або керувальної частини САК.

Виклад основного матеріалу дослідження. Важливим напрямом забезпечення відмовостійкості САК АД є вдосконалення їхньої архітектури на основі базової концепції (Full Authority Digital Engine Control), яка базується на побудові цифрової САК АД із повною відповідальністю.

Сучасні бортові САК АД типу FADEC поєднують функції керування АД, а також функції контролю технічного стану, діагностики відмов елементів САК та їх парирування. Поряд із традиційними завданнями ІСК АД повинні вирішувати додаткові завдання, пов'язані з прийняттям оперативних рішень на основі накопичених знань в умовах невизначеності та адаптації (тобто зміни своєї структури і параметрів) у разі виникнення можливих нештатних ситуацій. Таким чином, сформуємо завдання дослідження – розроблення відмовостійкої ІСК АД на основі інтелектуальних технологій – нечіткої логіки.

Принципи забезпечення відмовостійкості САК АД. Для забезпечення відмовостійкості цифрових САК на практиці використовують три способи введення резерву [5, с. 139]:

- структурний;
- програмний;
- часовий.

Загалом відмовостійкість САК АД забезпечується виконанням трьох дій: виявлення відмови, її діагностування та відновлення. Здебільшого відмовостійкість забезпечується шляхом використання методів приховання несправностей, для яких у явному вигляді відсутні операції виявлення та діагностування.

Засоби діагностування цифрових САК АД базуються на використанні таких методів автоматичного контролю [6, с. 3.35]:

1. Контроль парності оперативної пам'яті, контроль парності у разі введення/виведення інформації, а також за безпосереднього звертання до пам'яті.

2. Захист за допомогою спеціальних лічильників-таймерів від зациклювань або неправильного ходу виконання програм, які викликані порушенням коду команд.

3. Контроль вихідної напруги блоку живлення.

4. Захист пам'яті на випадок одночасного звертання до неї декількох програм.

5. Захист від неправильної адресації у разі звертання до оперативної пам'яті.

Для забезпечення відмовостійкості САК АД у разі відмови електронної керувальної частини передбачено перехід на резервні гідромеханічні системи, які забезпечують реалізацію спрощених алгоритмів керування керування [1, с. 121].

Для підвищення надійності електронної керувальної частини можуть бути використані такі методи, як мажоритарне резервування, дублювання (або потрійне резервування) окремих модулів і порівняння результатів обчислень програмним шляхом або за допомогою спеціальної апаратури.

Використання ІСК АД дає змогу при цьому забезпечити властивості робастності, адаптивності та відмовостійкості процесів керування АД в умовах дії суттєвих чинників невизначеності [4, с. 12]. Для забезпечення надійності та відмовостійкості ІСК АД необхідне вирішення таких завдань: контролю та діагностування ІСК АД; відновлення працездатного стану ІСК за виникнення відмов АД або керувальної частини САК.

Нині під час створення САК АД відмовостійкість забезпечується за рахунок уведення резервування на основі методології FADEC. Перевагою даного підходу є досягнення високого рівня безвідмовності за рахунок резервування і перехресних зв'язків. Головний недолік – екстенсивний підхід до вирішення проблеми надійності.

Застосування сучасних інтелектуальних технологій передбачає використання експертних знань або знань, накопичених ІСК, для виявлення відмови і парировання його за рахунок реконфігурації або адаптації.

Розглянемо підхід до забезпечення надійності та відмовостійкості ІСК АД, який базується на парадигмі навчання, адаптації до внутрішніх і зовнішніх чинників; реконфігурацій каналів керування (характері взаємодії локальних регуляторів) на основі принципу мінімальної складності. Послідовність етапів синтезу відмовостійкої САК АД наведена на рис. 1.



Рис. 1. Етапи синтезу відмовостійкої САК АД

Синтез відмовостійкої нечіткої системи керування авіаційним АД. Системи автоматичного керування АД із нечіткими регуляторами можна віднести до класу динамічних експертних систем [4, с. 11] поруч з алгоритмами керування, які використовуються за нормальних умов польоту ПС. База знань нечіткої ІСК авіаційним АД повинна містити в собі алгоритми розпізнавання нештатних ситуацій у польоті та правила прийняття рішень у цих ситуаціях. Згідно з [1, с. 58], розрізняють такі нормовані за НТД вимоги до можливих проявів особливих польотних ситуацій:

- ускладнення умов польоту (УУП);
- складна ситуація (СС);
- аварійна ситуація (АС);
- катастрофічна ситуація (КС).

У разі виявлення відмови одного з елементів САК АД база знань дає змогу вибрати одне з можливих альтернативних рішень для досягнення поставленого завдання керування ІСК авіаційним АД за рахунок наявних структурних, функціональних, програмних, навантажувальних видів резервування без або з частковою втратою якості керування. До цих рішень слід віднести [5, с. 140]:

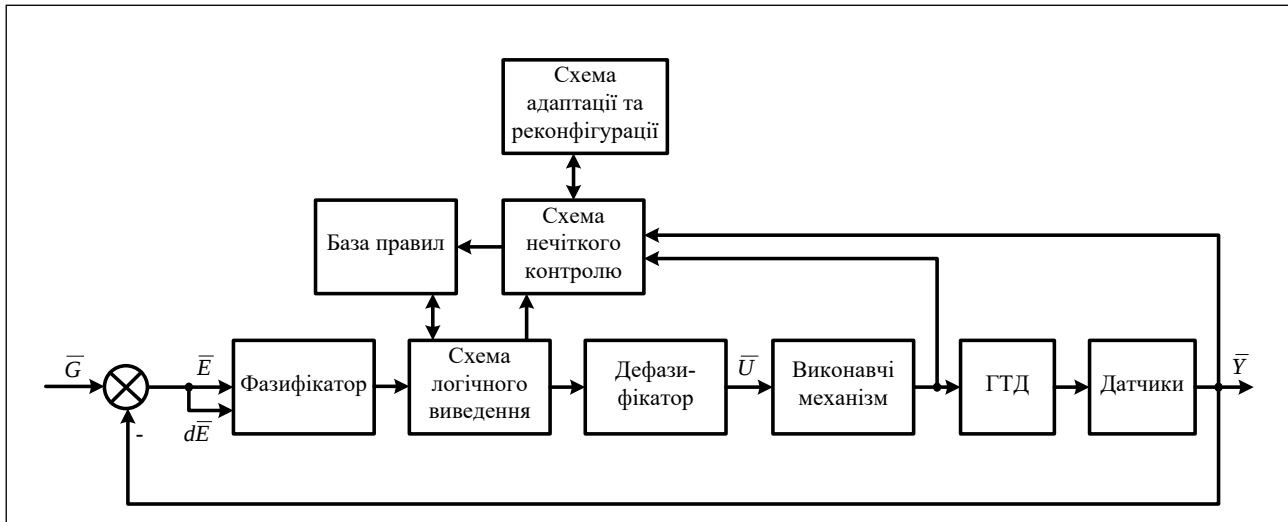


Рис. 2. Структурна схема нечіткої відмовостійкої САК АД

– зміну структури та параметрів алгоритмів керування на основі інформації про поведінку САК в особливих ситуаціях у польоті;

– спрощення алгоритмів обчислення керувального впливу, наприклад шляхом застосування більш простої бази правил;

– зміну точності обчислень керувальних впливів, що дає змогу вивільнити час для процесора САК АД, яке необхідне для парировання відмови алгоритмічними методами;

– скорочення списку виконуваних польотних завдань, перехід на резервні програми керування АД;

– використання структурної надлишковості: підключення резервних датчиків, виконавчих механізмів, інших елементів САК АД;

– оповіщення пілота про виникнення нештатної ситуації та видача рекомендації з їх усунення.

На рис. 2 наведено структурну схему нечіткої відмовостійкої САК АД, де $\bar{G}$ – вектор задавальних впливів; $\bar{Y}$ – вектор вимірюваних параметрів АД; $\bar{U}$ – вектор керувальних впливів; $\bar{E}$ – вектор похибок керування; $d\bar{E}$ – вектор похідних похибок керування.

Вектор керувальних впливів $\bar{U}$ формується за такими етапами [3, с. 12]:

1. Визначення відхилень вектора похибок керування $\bar{E}$ та вектора похідних похибок керування $d\bar{E}$.

2. Фазифікація даних векторів $\bar{E}$ та $d\bar{E}$, тобто перетворення отриманих значень до нечіткого вигляду, у формі лінгвістичних змінних.

3. Визначення нечітких (якісних) значень вектора керувальних впливів $\bar{U}$ або його приросту $d\bar{U}$ у вигляді функцій приналежності відпо-

відним нечітким підмножинам на основі раніше сформульованих правил логічного виводу, записаних у базі правил (знань).

4. Дефазифікація – обчислення реальних числових значень вектора $\bar{U}$, які використовуються як керувальні впливи АД.

На рис. 3 наведено один із можливих виглядів таблиці рішень для двох змінних X_k і X_n , що являє собою набір нечітких правил «ЯКЩО – ТО» для i -го каналу керування САК АД.

		X_n										X_k	
		VLN	LN	MN	SN	Z	SP	MP	LP	VLP			
VLN													Область нормального функціонування
LN													
MN													
SN													
Z													
SP													
MP													
LP													Область передвідмовного стану
VLP													
													Область відмов
													Область невизначеності

Рис. 3. Розширена таблиця рішень нечіткої САК АД

Змінні X_k і X_n можуть приймати множину якісних значень:

$$S = \{Z, SP, MP, LP, VLP, SN, MN, LN, VLN\},$$

де Z – «нуль»; SP – «мале додатне»; MP – «середнє додатне»; LP – «велике додатне»; VLP – «дуже велике додатне»; SN – «мале від'ємне»; MN – «середнє від'ємне»; LN – «велике від'ємне»; VLN – «дуже велике від'ємне».

Клітини розширеної таблиці значень заповнюються на основі правил прецедентів, експертних

оцінок, які містяться в базі знань. На основі експертних оцінок або експериментальним шляхом визначаються допустимий діапазон зміни змінних X_k і X_n , САК АД і правила поведінки (прийняття рішень) у штатних та особливих ситуаціях у польоті. Відмова у цьому разі визначається з якісними значеннями (термами) сигналів похибок та їхніх похідних. Якщо вказані якісні значення приймають непередбачені комбінації, то така ситуація визнається особливою й видається сигнал відмови [6, с. 3.35].

Розглянемо приклад синтезу відмовостійкої нечіткої ІСК авіаційного одновального АД із вільною турбіною (рис. 4). На рис. 4 використані позначення: К – компресор; Т – турбіна; ГГ – газогенератор; ВТ – вільна турбіна; КЗ – камера згоряння; G_T – витрата палива в камеру згоряння; W – потужність, що відбирається на валу вільної турбіни.

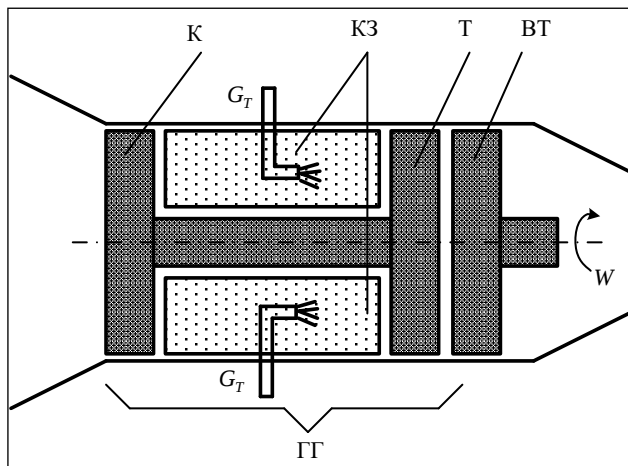


Рис. 4. Кінематична схема одновального АД із вільною турбіною

Уважаємо, що під час вибору алгоритмів керування САК АД необхідно виконати такі вимоги [3, с. 8]:

- у разі зміни корисного навантаження на вільній турбіні в діапазоні від 10% до 100% необхідно забезпечувати задану швидкість обертання ротора вільної турбіни ($n_{BT}=const$);

- у разі відмови одного з датчиків швидкостей обертання компресора n_K та вільної турбіни n_{BT} необхідно зберегти працездатність САК АД шляхом зміни конфігурації системи керування.

На рис. 5 наведено структурну схему нечіткої відмовостійкої ІСК одновального авіаційного АД за каналом швидкості обертання вільної турбіни, де $W_1(p)$ та $W_2(p)$ – лінійні пропорційно-інтегральні регулятори; НР – нечіткий регулятор; n_{BT0} – задана частота обертання ротора вільної турбіни; n_K – частота обертання компресора; n_{BT} – частота обертання ротора вільної турбіни; ПН – паливний насос.

Інтелектуальний регулятор САК АД складається з нечіткого регулятора (супервізора), який має розширену таблицю рішень (базу знань). Таблиця рішень оновлюється на рівні інтелектуальної САК АД на основі алгоритмів Data Mining: неперервні дані дефазифікуються, а далі на основі алгоритмів формування знань формується дерево правил. Застосування такого підходу забезпечує необхідну якість перехідних процесів у широкому діапазоні роботи АД: $0 \leq H \leq 5200$ м; $0 \leq M \leq 0,4$, а також забезпечити реконфігурацію САК АД у разі відмови одного датчика.

У процесі функціонування САК АД похибка керування Δn_{BT} та її похідна $\Delta \dot{n}_{BT}$ аналізуються за допомогою нечітких правил, і в разі їх нерозрахункових значень формується сигнал відмови.

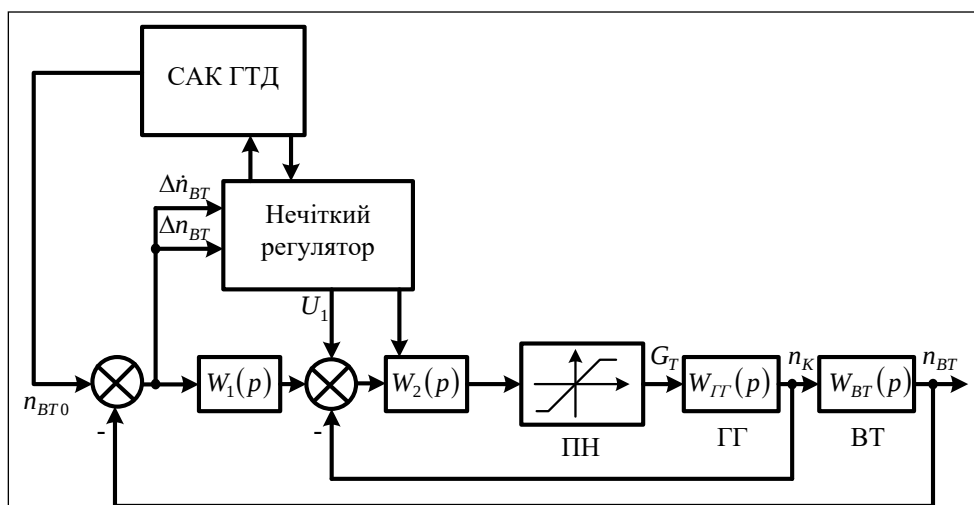


Рис. 5. Структурна схема нечіткої відмовостійкої ІСК одновального авіаційного АД за каналом швидкості обертання вільної турбіни

На основі проведеного аналізу сигналів на виході нечіткого регулятора та сигналів із датчиків n_K і n_{BT} приймається рішення про зміну параметрів другого ПІ-регулятора.

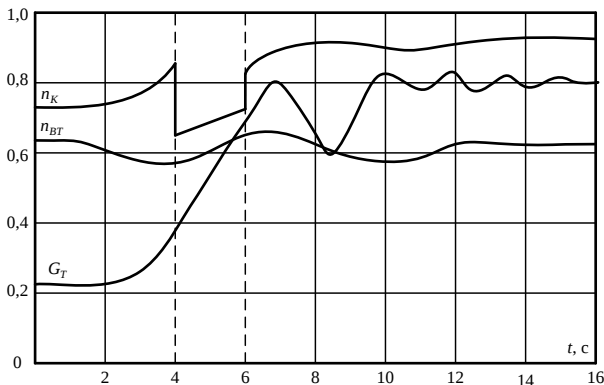


Рис. 6. Результати моделювання САК АД за відмови датчика n_K без нечіткого регулятора

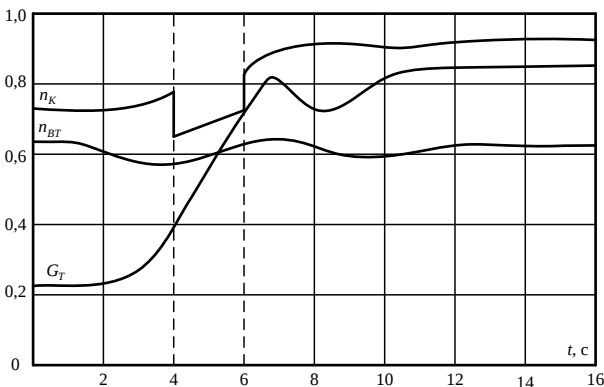


Рис. 7. Результати моделювання САК АД за відмови датчика n_K із нечітким регулятором

На рис. 6 і 7 наведено результати комп'ютерного моделювання роботи відмовостійкої САК АД

для двох випадків: використання класичних ПІ-регуляторів у контурів керування n_K і n_{BT} та під час використання нечіткої ІСК АД (режим «малий газ – номінал»). У кожному з випадків приймали появу відмови датчика швидкості обертання n_K в інтервалі часу 4...6 с.

При цьому на етапі парирування короткотривалої відмови датчика частоти обертання компресора АД n_K нечіткий регулятор зменшив коефіцієнт підсилення пропорційної частини другого ПІ-регулятора на 28% до моменту відновлення сигналу з датчика n_K , викид за витратою палива G_T став менше на 8%, ніж у разі використання лінійних алгоритмів керування.

Висновки. Таким чином, застосування відмовостійкої ІСК АД на основі нечіткої логіки дає змогу забезпечити локалізацію відмови та її парирування й зберегти при цьому необхідну якість процесів керування. Перевагою цього підходу є можливість використання знань про поведінку САК АД у вигляді правил, що дає змогу виконати оцінку ситуації на якісному рівні, тобто при цьому у базі знань вимальовується узагальнений образ ситуації керування.

Зазначимо, що під час синтезу нечітких алгоритмів керування АД необхідно приділяти велику увагу питанням мінімізації обсягу бази знань, оскільки за наявності великої кількості правил необхідне залучення більших обчислювальних ресурсів. Ураховуючи сучасні досягнення в галузі авіоніки, програмній реалізації обчислень на основі нечіткої логіки, можна передбачити застосування алгоритмів керування на базі нечіткої логіки для керування САК АД у реальному масштабі часу.

Список літератури:

1. Системна ефективність програмованої експлуатації авіоніки: монографія / В.П. Захарченко та ін. ; за заг. ред. В.М. Воробйова. Київ : НАУ, 2018. 192 с.
2. Ранченко Г.С., Буряченко А.Г. Перспективы развития электронных САУ АД. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2018. № 7(151). С. 95–100.
3. Кузнецова Т.А., Августиневич В.Г., Губарев Е.А. Алгоритмы диагностики и парирувания отказов каналов измерения системы автоматического управления авиационным двигателем. *Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. 2015. № 16. С. 5–14.
4. Кривошеев И.А., Годованюк А.Г. Использование моделей АД в составе адаптивных отказоустойчивых систем управления и контроля. *Вестник УГАТУ*. 2010. Т.14. № 5(40). С. 10–14.
5. Воробьев В.М., Захарченко В.А., Енчев С.В. Методология формирования концепции архитектуры программного обеспечения отказоустойчивой авионики перспективных воздушных судов. *Електроніка та системи управління*. 2006. № 2(8). С. 138–148.
6. Енчев С.В., Киселев А.Д. Алгоритм и архитектура обеспечения отказоустойчивой авионики перспективных воздушных судов. *ABIA-2006* : праці VII міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ, 25–27 вересня 2006 р. Київ, 2006. Т. II. С. 3.33–3.36.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ НЕЧЕТКОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВИАЦИОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Статья посвящена вопросу обеспечения отказоустойчивости систем управления авиационными двигателями. Система управления представляется как сложная логико-динамическая система, которая позволяет продолжать действия, заданные программой, после возникновения отказов. Для обеспечения отказоустойчивости в случае отказа электронной управляющей части предусмотрен переход на резервные гидромеханические системы. Применение отказоустойчивой интеллектуальной системы управления авиационными двигателями на основе нечеткой логики позволяет обеспечить локализацию отказа и ее парирование и сохранить при этом необходимое качество процессов управления. Разработана нечеткая отказоустойчивая система управления одновального авиационного двигателя по каналу скорости вращения свободной турбины и исследована его работа при отказе одного из датчиков.

Ключевые слова: авиационный двигатель, интеллектуальная система управления, нечеткая логика, отказоустойчивость, адаптация.

ENSURING THE FAULT-TOLERANCE OF FUZZY INTELLECTUAL CONTROL SYSTEM OF AVIATION ENGINES

The paper is devoted to the issue of providing fault-tolerance of aviation engine control systems. The control system is presented as a complex logical and dynamic system, which allows the ability to continue actions specified by the program after failures occur. In order to ensure fault tolerance in case of failure of the electronic control unit, a transition to a backup hydromechanical system is provided. The use of a fault-tolerant intelligent control system for aircraft engines based on fuzzy logic makes it possible to localize the failure and its countering while maintaining the required quality of control processes. A fuzzy fault-tolerant control system for a single-shaft aircraft engine was developed along a channel of rotational speed of a free turbine and its operation was investigated when one of the sensors failed.

Key words: aircraft engine, intelligent control system, fuzzy logic, fault tolerance, adaptation