

УДК 681.51

Д.В. Довжук

Державний науково-дослідний інститут, авіації, Київ

ОБМЕЖЕННЯ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ ДО ВІДМОВ ЕРГАТИЧНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ

У статті розглядається наукова проблема синтезу ергатичних систем керування, які мають властивість стійкості до виникаючих відмов елементів замкнутого контуру керування. Приводяться результати дослідження можливості синтезу таких систем у рамках існуючих методичних підходів: забезпечення функціональної стійкості складних технічних систем, послідовної векторної оптимізації людино-машинних систем і застосування «організмичного» підходу.

Ключові слова: ергатичні системи, складні технічні системи.

Вступ

Інтенсивний розвиток технологічної бази авіаційної промисловості в останні десятиріччя, створює передумови для створення нових типів високоефективних бойових авіаційних комплексів. Реалізація проєктів бойових авіаційних комплексів п'ятого покоління та нових типів безпілотних бойових авіаційних комплексів передбачає розробку нових систем керування з характерними особливостями.

По-перше, можливості адаптації створюваних систем та ступінь використання наявних ресурсів повинні багатократно перевищувати можливості існуючих зразків.

По-друге, вони повинні забезпечувати високу ефективність функціонування в умовах суттєвої апріорної невизначеності та гостроконфліктних ситуаціях. Для цього у них планується використовувати нові типи ергатичних систем керування з активною участю людини в оцінці поточної ситуації та створенні керуючих сигналів.

По-третє, створенні системи повинні мати ще більш високий рівень автоматизації керування по зрівнянню з існуючими зразками. Це пов'язано з тим, що об'єм інформації, необхідної для ефективного функціонування та кількість різних керуючих впливів в проєктуємих комплексах значно перевищує фізіологічні можливості людини-оператора. Тому, в таких комплексах не можливо без участі ієрархічно організованих автоматичних систем, здійснювати керуючий вплив та переробляти інформацію, що надходить до оператора.

Практична реалізація проєктів таких систем безпосередньо зв'язана з необхідністю вирішення ряду технічних, технологічних, організаційних, наукових та науково-технічних проблем. Однією з них є необхідність забезпечення заданого високого рівня надійності функціонування ергатичних систем керування, надання їм властивості стійкості до виникаючих відмов елементів замкнутого контуру керування.

Постановка завдання синтезу ергатичних систем керування, стійких до відмов. В [1] обґрунтовано, що адекватну математичну модель замкну-

того контуру ергатичної системи керування можливо представити у вигляді системи трьох рівнянь

$$\begin{cases} M = A, P_g, u_M = g x ; \\ \frac{dx}{dt} = F_i x, u, \xi, a, t ; \\ u t = f x, a, u_M, t , \end{cases} \quad (1)$$

де перше рівняння описує технічну складову системи, друге – функціонування людини-оператора (льотчика) у цій системі, третє описує шуканий алгоритм формування результуючого керуючого m -мірного сигналу u . В цій системі x – n -мірний вектор стану; ξ – n -мірний вектор випадкових впливів; a – апріорно невизначені параметри моделі; t – час; F_i – векторна нелінійна нестационарна функція, $i = 1 \dots N$, яка характеризує стан працездатності системи керування (F_0 – відповідає нормальному (безвідмовному) режиму функціонування, решта випадків F_i – відповідають виникненню i -ої відмові).

Вважаємо імовірності характеристики можливих відмов апріорно невідомими.

Друге рівняння системи (1) являється семіотичним [1]. Воно описує поведінку людини (оператора, льотчика) в контурі керування множиною припустимих відношень між x та керуючими реакціями оператора $u_M = g x$, заданих в деякому алфавіті A набором ергаграматик P_g . Цільові функції формуються людиною (оператором, льотчиком) в цьому базисі, як умови досягнення кінцевого фазового стану x_k в момент часу t_k

$$Z x, F_i, M, t : x t_k \in x_k ,$$

при цьому конкретні значення $\{x_k\}$ та t_k визначаються в залежності від поточного стану $x(t)$. Завдання синтезу полягає у визначенні алгоритму керування $u(t)$, який би забезпечив у визначених умовах $x \in \Omega_x, u \in \Omega_u, \xi \in \Omega_\xi, F_i \in F_i, M \in M, t = [t_0, \dots, t_k]$, досягнення кінцевого фінітного стану $\{x_k\}$ з імовірністю не нижче заданої:

$$P \times t_k \in x_k \geq P_{lim}$$

Дане стохастичне обмеження кількісно характеризує властивість забезпечення стійкості до виникнення відмов елементів замкнутого контуру керування.

Метою статті є викладення результатів дослідження автора можливості вирішення поставленого завдання в рамках існуючих методичних підходів: забезпечення функціональної стійкості складних технічних систем [2 – 4], послідовної векторної оптимізації людино-машинних систем [5] та використання «організмичного» підходу [1].

Основна частина

Можливість забезпечення стійкості до відмов ергатичних систем керування при використанні методів забезпечення функціональної стійкості технічних систем. Методи, описані [2 – 4], полягають у виділенні в системі керування, синтезованої відомими методами, (наприклад, методом аналітичного конструювання оптимальних регуляторів А.А. Красовського [6]) деякої підсистеми (необов'язково апаратної). Вона контролює функціонування основного контуру порівнянням фазового «зразку» поточного стану з еталонними «зразками» наслідків відмов, які зберігаються у пам'яті та отриманні апріорно. При їх збіганні контролююча система реконфігурує основний контур системи керування (змінює алгоритм керування). Змінення направлено на забезпечення умов стійкості по Ляпунову «у малому» деякої цільової квадратичної функції вигляду

$$J(x, u, t) = M \left(\int_{t_0}^{t_k} x^T \cdot \beta \cdot x \, dt + \int_{t_0}^{t_k} u^T \cdot C^{-1} \cdot u \, dt \right),$$

так, щоб виконувалася умова

$$\lim_{t \rightarrow t_k} J(x, u, t) | F_0 - J(x, u, t) | F_1 < \delta$$

при виконанні умови

$$| J(x, u, t_0) | F_0 - J(x, u, t_0) | F_1 | < \varepsilon, \delta < \varepsilon, \delta > 0, \varepsilon > 0 \quad [4].$$

При цьому для виявлення події виникнення відмов системи керування (стан, коли порушується працездатність, порушуються умови досягнення цільового стану) використовуються імовірності властивості систем. Так, якщо розглядаємо події зміни працездатності системи $P F_0, \dots, P F_N$ утворюють повну групу подій, то умовою виявлення поточного стану системи являється $F_1 : \max P F_1 | x, t$, де

$$P F_1 | x, t = P F_1 P x, t / F_1 \Big/ \sum_{i=1}^N P F_i P x, t / F_i \quad (2)$$

байєсовська оцінка умовної імовірності виникнення відмов F_1 при даних x, t [2].

При реалізації алгоритму виникнення (2) для забезпечення функціональної стійкості системи (1), необхідно враховувати умовну імовірність

$$P x, t / Z x, t - \Delta t,$$

викликану можливістю оперативної зміни цільових настанов людиною (оператором, льотчиком).

В цих умовах

$$P F_1 | x, u, t = \frac{P F_1 P x, Z, t | F_1 P Z | x, t - \Delta t}{\int_{t_0}^t \left(\sum_{i=1}^N P F_i P x, Z, t | F_1 P Z | x, \tau \right) dt}.$$

Необхідність врахування інтегральної умовної імовірності стану системи $P F_1 | Z, x, t$ при реалізації алгоритму виявлення потребує експоненціального в часі росту кількості необхідних обчислень.

У цьому випадку необхідно враховувати усі можливі варіанти зміни, як цільових настанов $Z(\dots)$, так і можливі зміни стану системи $x(t)$ для кожного з них. Це свідчить про те, що в умовах зміни цільових настанов, які задаються людиною-оператором, практично неможливо виявити зміни працездатності елементів ергатичної системи керування у рамках описаного підходу [2 – 4].

Крім цього, для забезпечення стійкості ергатичної системи цим способом необхідно мати повну апріорну інформацію про фазові «образи» можливих наслідків відмов. Якщо недостатній об'єм апріорної інформації можливо компенсувати за рахунок використання різних варіантів ідентифікації, то невизначеність зміни цільових настанов є в даному випадку принциповим обмеженням можливості забезпечення стійкості до відмов синтезованої ергатичної системи керування.

Можливість забезпечення стійкості до відмов ергатичних систем керування при використанні методу послідовної векторної оптимізації. Особливістю використання інтегральних узагальнених критеріїв якості вигляду

$$J = \min \sum_{k=1}^s \lambda_k J_k \quad (3)$$

є можливість отримувати оптимальні рішення тільки при штатному функціонуванні систем керування в середині експлуатаційних областей. Це визвано тим, що лінійна форма адитивного критерію якості (3) не дозволяє адекватно сконцентрувати енергію ергатичного керування на парювання параметрів системи, яка наближується до обмежень. Тому в [5] пропонується векторна постановка оптимізаційного завдання $J = [J_c(x, u, t); J_g(x, u, t)]$, де оптимальне досягнення цілі керування забезпечує цільовий критерій $J_c(x, u, t)$, а $J_g(x, u, t)$ вводиться для забезпечення необхідного режиму роботи людини (оператора, льотчика). Методом оптимізації в цьому випадку пропонується послідовна векторна оптимізація:

$$u_g = \min J_g(x, u, t),$$

$$u^* = \min J_c(x, u, t) \text{ при урахуванні } J_g(x, u_g, t) = J_g^*.$$

Для синтезу оптимального алгоритму ергатичного керування в цьому випадку необхідно після виявлення поточного стану працездатності системи

$F_1(\dots)$ уточнити цільову функцію оператора $Z(\dots)$, конкретний вид критеріїв $J_c(x, u, t)$, $J_g(x, u, t)$ і тільки після цього знайти керування. Не зважаючи на безсумнівну перевагу даного підходу до синтезу оптимального керування в нештатних, «напружених» режимах функціонування поблизу експлуатаційних обмежень, необхідність врахування можливих відмов на зміну цільових настанов (критеріїв) $J_c(x, u, t)$ та $J_g(x, u, t)$ є причиною обмежених можливостей даного підходу при забезпеченні стійкості до можливих відмов синтезованих ергатичних систем.

Можливість забезпечення стійкості до відмов ергатичних систем керування при використанні «організмичного» підходу В.В. Павлова. Метод побудови ергатичних систем керування на основі формальних принципів найкращого сполучення елементів (принципу технологічного (функціонального) гомеостазу, принципу найменшої взаємодії, принципу стаціонарності та принципу функціональної сумісності), запропонований В.В. Павловим [1], дозволяє звести процедуру синтезу до рішення класичної задачі теорії стійкості та оптимального керування. Але при врахуванні можливості виникнення різного роду відмов необхідність наявності формальних моделей людини-оператора для кожної із імовірних ситуацій $M_{F_1, x, t} = A, P_g, u_M = g \cdot x / F_1, x, t$, суттєво обмежує область використання даного підходу. Крім цього, запропоновані методи забезпечення інваріантності синтезованої ергатичної системи (несприятливості того або іншого виходу системи до збуреного діяння довільного виду) основані на інтерпретації принципу двохканалності Б.Н. Петрова [1]. Для замкнутого контуру керування ергатичної системи виду (1), зведеного до форми

$\dot{x} = A \cdot x + C \cdot \xi$ ця умова еквівалентна

$$\sum_{\mu \neq i} \left[\frac{d^\varepsilon}{dp^\varepsilon} \alpha_{\mu i} p \right]_{p=0} C_{\mu v} = 0, \quad \varepsilon = 0, n-2, \quad (4)$$

де $\alpha_{\mu i} p$ – алгебраїчне доповнення відповідного елементу визначника $\det pE - A$. Для виконання цієї умови (4) (енергозатратні, автоколивальні або «змінні» режими, випадки «нескінченно великих» коефіцієнтів підсилення не розглядаються) для ергатичних систем необхідна достатньо точна ідентифікація в режимі реального часу.

Тому використання байєсовських алгоритмів ідентифікації системи та в даному випадку також приводить до неможливості оптимального виявлення виникаючих відмов та парировання їх наслідків.

Висновки

Результати досліджень дозволяють зробити висновки:

1. Існуючі методи синтезу ергатичних систем керування мають принципові обмеження в забезпеченні стійкості до відмов синтезованих систем.

2. Методичною причиною даних обмежень є неадекватний підхід до синтезу (проекуванню) ергатичних систем керування. При проектуванні в рамках існуючих технологій окремо забезпечується стійкість до відмов технічної складової, окремо забезпечується надійність функціонування людини у замкнутому контурі керування за рахунок створення найкращої ергатичної обстановки. Даний порядок синтезу не враховує системні особливості проектуємого об'єкту, що приводить до недостатнього рівня стійкості до можливих відмов.

3. Актуальним напрямком подальших досліджень є удосконалення методичного апарату синтезу ергатичних систем керування за рахунок умов невизначеності вибору цільових настанов.

Список літератури

1. Павлов В.В. *Начало теории эргатических систем* / В.В. Павлов. – К.: Наукова думка, 1975. – 240 с.
2. Гришин Ю.П. *Динамические системы, устойчивые к отказам* / Ю.П. Гришин, Ю.М. Казаринов. – М.: Радио и связь, 1985. – 176 с.
3. Lainiotis D.G. *Performance measure for adaptive Kalman estimator* / D.G.Lainiotis, F.L. Sims // *IEEE Trans., AS-15*, 1970, №2. – P. 249-250.
4. Артюшин Л.М. *Оптимизация цифровых автоматических систем, устойчивых к отказам* / Л.М. Артюшин, О.А. Машков. – К.: КВВАИУ, 1991. – 89 с.
5. Артюшин Л.М. *Большие технические системы. Проектирование и управление* / Л.М. Артюшин, Ю.К. Зинатдинов, И.А. Попов, А.В. Харченко: под ред. И.А. Попова. – Х.: Факт, 1997. – 400 с.
6. *Справочник по теории автоматического регулирования* / Под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.

Надійшла до редколегії 2.10.2009

Рецензент: канд. техн. наук, доц. О.А. Кононов, Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ.

ОГРАНИЧЕНИЯ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТОЙКОСТИ К ОТКАЗАМ ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Д.В. Довжук

В статье рассматривается научная проблема синтеза эргатических систем управления, которые имеют свойство стойкости к возникающим отказам элементов замкнутого контура управления. Приводятся результаты исследования возможности синтеза таких систем в рамках существующих методических подходов: обеспечение функциональной стойкости сложных технических систем, последовательной векторной оптимизации человеко-машинных систем и применения «организмического» подхода.

Ключевые слова: эргатические системы, сложные технические системы.

**LIMITATIONS OF EXISTENT METHODS PROVIDING OF FIRMNESS
TO REFUSES OF INTERACTIVE CONTROL THE SYSTEM**

D.V. Dovzhuk

In the article the scientific problem of synthesis of the interactive systems is examined managements which are a characteristic of firmness to the nascent refuses of elements reserved a management contour. Results over of research of possibility of synthesis of such systems are brought within the framework of existent methodical approaches: providing of functional firmness of the difficult technical systems, to successive vectorial optimization of the man-machine systems and application of «organismic» approach.

Keywords: *interactive systems, difficult technical systems.*