

УДК 681.3

О.А. Кононов, В.П. Пастушенко

## МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ СИНТЕЗУ ФУНКЦІОНАЛЬНО СТІЙКИХ ЕРГАТИЧНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ПЕРСПЕКТИВНИМИ БОЙОВИМИ АВІАЦІЙНИМИ ТА АВІАЦІЙНО-КОСМІЧНИМИ КОМПЛЕКСАМИ

*Розглядається одна з актуальних проблем створення перспективних бойових авіаційних та авіаційно-космічних комплексів: забезпечення високого рівня надійності функціонування ергатичних систем керування. Досліджуються можливості синтезу таких систем у рамках існуючих методичних підходів: забезпечення функціональної стійкості складних технічних систем та використання методів векторної оптимізації людино-машинних систем.*

### Постановка проблеми та аналіз літератури

Загальна тенденція розвитку військової авіації, форм і засобів її використання полягає в постійному підвищенні ефективності бойового використання створюваних новітніх систем та комплексів порівняно з існуючими. У сучасних умовах ця тенденція виявляється у формі розробки нових, потенційно більш ефективних типів бойових авіаційних та авіаційно-космічних комплексів. У них високий рівень ефективності бойового застосування планується забезпечити за рахунок впровадження нових ергатичних (людино-машинних) систем керування, де людина-оператор (льотчик) забезпечує функціонування системи в умовах апріорної невизначеності та швидкої зміни ситуації, а на технічну складову системи покладаються завдання ефективної реалізації цільових завдань людини-оператора. При необхідності забезпечити високий рівень ефективності комплексу (універсальності застосування) в умовах невизначеності ситуації концепція ергатичних систем керування не має альтернативних варіантів. Складності її реалізації, які мають експериментальне підтвердження, полягають у тому, що використання ергатичних систем керування із загальноприйнятими структурами, які отримані "пасивними" інтуїтивно-експериментальними методами, не дозволяють людині-оператору (льотчику) через об'єктивні фізіологічні обмеження ефективно реалізувати технічні функції новітніх комплексів. Одним з наслідків цієї проблемної ситуації є неефективність застосування традиційних методів додаткового резервування, дублювання підсистем та пристроїв, використання елементів з підвищеним рівнем надійності для забезпечення необхідного рівня надійності функціонування новітніх ергатичних систем керування.

Крім того, з точки зору існуючих поглядів на забезпечення надійності складних систем неможливо пояснити, чому при функціонуванні ергатичних сис-

тем керування великими нестационарними нелінійними об'єктами часто виникають відмови, імовірність яких при традиційному погляді практично дорівнює нулю.

Для розв'язання цієї проблемної ситуації був запропонований специфічний підхід [1], сутність якого полягає у забезпеченні функціональної стійкості системи керування – властивості системи забезпечити виконання визначених функцій (можливо з погіршенням якості) в умовах виникнення регламентованої множини відмов в енергетичній, інформаційно-вимірjuвальній та обчислювальній підсистемах як за рахунок традиційних методів (резервування та структурного забезпечення надійності), так і за рахунок використання різних форм надмірності, перерозподілу ресурсів у системі та її реконфігурації. Цей підхід дозволяє забезпечити необхідний високий рівень надійності системи керування без погіршення тактико-технічних та техніко-економічних властивостей комплексу.

Теоретичні основи забезпечення цієї властивості замкнутого контуру керування складних технічних систем викладені в [2]. З іншого боку, в [3, 4] авторами досліджуються часткові питання забезпечення надійності ергатичної системи керування. Але при цьому питання про можливість синтезу функціонально стійких ергатичних систем при застосуванні даних методичних підходів не отримало належного дослідження.

**Мета статті** – викладення результатів досліджень авторів напрямку дослідження можливості синтезу функціонально стійких ергатичних систем.

### Основний матеріал

У [4] обґрунтовано, що адекватну математичну модель замкнутого контуру ергатичної системи керування можна представити у вигляді системи трьох рівнянь

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

де перше рівняння описує технічну складову системи, друге – функціонування людини-оператора (льотчика) у цій системі, третє описує алгоритм формування результуючого керуючого  $m$ -вимірною сигналу  $u$ . У цій системі під  $x$  розуміється  $n$ -мірний вектор стану;  $\xi$  –  $n$ -вимірний 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 відмови). Вважаємо імовірності характеристики можливих відмов апріорно невідомими.

Друге рівняння системи (1) є семіотичним [3]. Воно описує поведінку людини (оператора, льотчика) у контурі керування множиною припустимих відношень між  $x$  та керуючими реакціями оператора  $u_M = g(x)$ , заданих в деякому алфавіті  $A$  набором ерграфічних  $P_g$ . Цільові функції формуються людиною (оператором, льотчиком) у цьому базисі, як умови досягнення кінцевого фазового стану  $\{x_k\}$  у 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 залежно від поточного стану  $x(t)$ .

Завдання синтезу функціонально стійкої системи керування полягає у визначенні алгоритму керування  $u(t)$ , який здатний забезпечити у визначених умовах

$$\begin{aligned} x \in \Omega_x, u \in \Omega_u, \xi \in \Omega_\xi, F_i \in \{F_i\}, M \in \{M\}, \\ t = [t_0, \dots, t_k], i = \{1, \dots, N\} \end{aligned}$$

досягнення кінцевого фінітного стану  $\{x_k\}$  з імовірністю не нижче заданої:

$$P(x(t_k) \in \{x_k\}) \geq P_{lim}.$$

Дане стохастичне обмеження може бути використано для кількісного опису ступеня функціональної стійкості замкнутого контуру керування.

Забезпечення функціональної стійкості ергатичних систем керування при використанні методів синтезу функціонально стійких технічних систем [1, 2] полягає у виділенні в системі керування, синтезованої відомими методами, (наприклад, методом аналітичного конструювання оптимальних регуляторів

О.А. Красовського) 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 отримані апріорно. При їх збіганні контролююча система реконфігурує основний контур системи керування (змінює алгоритм керування). Змінення направлено на забезпечення умов стійкості за Ляпуновим «у малому» деякої цільової квадратичної функції вигляду

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

так, щоб виконувалася умова

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

при виконанні умови

$$|J(x, u, t_0 | F_0) - J(x, u, t_0 | F_i)| < \varepsilon, \quad \delta < \varepsilon, \delta > 0, \varepsilon > 0 \quad [2].$$

При цьому для виявлення відмов системи керування, що виникли (стану, коли порушується працездатність, порушуються умови досягнення цільового стану), використовуються імовірності властивості систем. Так, якщо всі можливі події зміни працездатності системи  $P(F_0), P(F_1), \dots, P(F_N)$  утворюють повну групу подій, то умовою виявлення поточного стану системи є

$$F_i : \max P(F_i | x(t)),$$

$$\text{де} \quad P(F_i | x(t)) = \frac{P(F_i) P(x(t) | F_i)}{\sum_{i=1}^N P(F_i) P(x(t) | F_i)} \quad (2)$$

– байєсівська оцінка умовної імовірності виникнення відмов  $F_i$  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).

За цих умов необхідність врахування інтегральної умовної імовірності стану системи  $P(F_i | Z, x, t)$  при реалізації алгоритму виявлення відмов потребує експоненціального в часі росту кількості необхідних обчислень:

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

У цьому випадку необхідно враховувати всі 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.

Крім цього, для забезпечення стійкості ергатичної системи цим способом необхідно мати повну апріорну інформацію про фазові «образи» можливих наслідків відмов. Якщо недостатній обсяг 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.

У [3] пропонується векторна постановка оптимізаційного завдання синтезу ергатичних систем з двокомпонентним критерієм

$$J = \begin{bmatrix} J_c(x, u, t) \\ J_g(x, u, t) \end{bmatrix},$$

де цільовий критерій  $J_c(x, u, t)$  забезпечує оптимальне досягнення мети керування, а гомеостазисна компонента  $J_g(x, u, t)$  вводиться для забезпечення необхідного режиму роботи людини (оператора, льотчика). Методом оптимізації в цьому випадку пропонується послідовна векторна оптимізація:

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

$$u^* = \arg \min J_c(x, u_g, t)$$

при урахуванні умови

$$J_g(x, u_g, t) = J_g^*.$$

Для синтезу оптимального алгоритму ергатичного керування в цьому випадку необхідно уточнити цільову функцію оператора  $Z(\dots)$  та конкретний вид критеріїв  $J_c(x, u, t)$ ,  $J_g(x, u, t)$  після виявлення поточного стану працездатності системи  $F_i(\dots)$  і тільки після цього визначати 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 (виду критеріїв)  $J_c(x, u, t)$  та  $J_g(x, u, t)$  є причиною методичного обмеження даного підходу при забезпеченні функціональної стійкості синтезованих ергатичних систем.

Метод побудови ергатичних систем керування на основі застосування формальних принципів найкращого сполучення елементів (принципу техноло-

гічного (функціонального) гомеостазу, принципу найменшої взаємодії, принципу стаціонарності та принципу функціональної сумісності), запропонований В.В. Павловим [4], дозволяє звести процедуру синтезу до вирішення сукупності задач класичної теорії стійкості та оптимального керування. Але врахування можливості виникнення різного роду відмов у межах даного підходу призводить до необхідності визначення формальних моделей людини-оператора для кожної із можливих ситуацій  $M(F_i, x, t) = (A, P_g, u_M = g(x)/F_i, x, t)$ , що суттєво обмежує область використання даного підходу та призводить до виникнення викладеного вище недоліку.

### Висновки

Таким чином, результати досліджень дозволяють зробити висновки:

1. Методичний апарат синтезу складних технічних систем та ергатичних систем, який існує зараз, має принципові обмеження щодо можливості адекватного представлення процесу забезпечення функціональної стійкості систем керування.

2. Необхідною умовою створення функціонально стійких систем керування є використання системного підходу до їх синтезу (проективання). Він полягає у комплексному забезпеченні як стійкості до відмов технічної складової, так і надійності функціонування людини у замкнутому контурі керування.

3. Актуальним напрямком подальших досліджень є розробка адекватного методичного апарату синтезу функціонально стійких ергатичних систем керування, що дозволяє врахувати специфічні інформаційно-енергетичні процеси функціонування цих систем.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лайниотис Д.Г. Разделение – единый метод построения адаптивных систем. 1. Оценивание. 2. Управление // ТИИЭР. – 1976. – Т. 64, № 8. – С. 12 – 43, 56 – 78.
2. Артюшин Л.М., Машков О.А. Оптимизация цифровых автоматических систем, устойчивых к отказам. – К.: КВВАИУ, 1991. – 89 с.
3. Большие технические системы: проектирование и управление / Под ред. И.А. Попова. – Х.: Факт, 1997. – 400 с.
4. Павлов В.В. Начало теории эргатических систем. – К.: Наук. думка, 1975. – 240 с.

Надійшла 06.02.2005

Рецензент: д-р військ. наук професор Г.А. Дробаха, Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба.