

# Навігація

УДК 621.7396

М.А. Калашник, Д.М. Обідін

*Кіровоградська льотна академія Національного авіаційного університету, Кропивницький*

## ФУНКЦІОНАЛЬНА СТІЙКІСТЬ ПІЛОТАЖНО-НАВІГАЦІЙНОГО КОМПЛЕКСУ ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА НА ОКРЕМИХ РЕЖИМАХ ПОЛЬОТУ

*Розглянуто існуючі науково-методичні підходи із забезпечення функціональної стійкості складних технічних систем літального апарата (ЛА), теоретичні та практичні напрацювання у цій області. Проаналізовано основні причини можливих відмов пілотажно-навігаційних приладів на різних етапах польоту літального апарату. Визначено невирішену раніше задачу зі створення ефективної методики із забезпечення функціональної стійкості пілотажно-навігаційного комплексу літального апарату на окремих режимах польоту, запропоновано нові підходи її вирішення.*

**Ключові слова:** пілотажно-навігаційний комплекс, функціональна стійкість, окремі режими польоту.

### Вступ

**Загальна постановка проблеми та зв'язок з практичними завданнями.** При різних режимах польоту на роботу пілотажно-навігаційного обладнання можуть впливати внутрішні і зовнішні несприятливі фактори, здатні вивести його з ладу або привести до виникнення помилок у показаннях приладів і позиціонуванні ЛА в просторі.

Пілотування в звичайних умовах польоту здійснює у льотчика певний стереотип розподілу уваги. При відмові будь-яких приладів цей стереотип порушується, що ускладнює своєчасне зчитування показань приладів і може викликати помилки в техніці пілотування [1].

Іншими словами, якщо в польоті виникла ситуація відмови бортового пілотажно-навігаційного обладнання, то пілоту необхідно приділити багато часу на налаштування або перевірку роботи даних приладів, оцінку ситуації і можливий перезапуск устаткування або усунення неполадки, що негативно відбивається на якості виконання і безпеці польоту.

Основними шляхами вирішення проблеми забезпечення заданого рівня безпеки польоту в умовах відмови пілотажно-навігаційного комплексу (ПНК) є зменшення впливу людського фактора при пілотуванні ЛА за рахунок автоматизації управління і забезпечення мінімально необхідного рівня працездатності систем ЛА шляхом перерозподілу апаратних, програмних і обчислювальних ресурсів.

Таким чином, частиною проблеми забезпечення безпеки польотів є забезпечення функціональної стійкості пілотажно-навігаційного комплексу літального апарату при впливі на нього зовнішніх і внутрішніх дестабілізуючих факторів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В останні роки в міру значного підвищення складності технічних систем і розширення класу завдань, які вирішуються ними, виникла гостра необхідність в забезпеченні високого рівня їх надійності (безвідмовності), відмовостійкості та живучості. Але підвищення цих властивостей тягне за собою необхідність використання різного роду «надмірності» системи, що значно її ускладнює. Для вирішення цієї проблеми Машковим О.А. вперше введено поняття функціональної стійкості (ФС) динамічної системи [2], «як властивості системи, яка полягає в здатності виконувати хоча б встановлений мінімальний обсяг своїх функцій при відмовах в інформаційній, обчислювальній та енергетичній частинах системи, а також впливів зовнішніх збурень, передбачених умовами експлуатації». Крім того, це поняття включає в себе поняття надійності, відмовостійкості та живучості (рис. 1).

Подальший розвиток понятійний апарат функціональної стійкості отримав при вирішенні ряду проблем з забезпечення функціональної стійкості для конкретних технічних систем. Так Барабаш О.В. розглянув рішення проблеми забезпечення функціональної стійкості розподілених інформаційних систем [3, 4], Кравченком Ю.В. була вирішена проблема ФС псевдоспутникових радіонавігаційних систем [5].

У роботах Неділька С.М. [6] було розглянуто проблему забезпечення функціональної стійкості автоматизованої системи управління повітряним рухом. Обідіним Д.М. була вирішена проблема забезпечення властивістю функціональної стійкості інтелектуальної системи автоматичного управління ЛА [7].



Рис. 1. Місце функціональної стійкості в системі властивостей складних технічних систем (за роботою [2])

Також окремі завдання забезпечення функціональної стійкості відображені в роботах Авіжієніса А., Пархоменка П.П., Гуляєва В.А., Коростиля Ю.М., Дем'янчука В.С., Баранова Г.Л., Тоценка В.Г., Кононова А.А., Савченко В.А. та ін. вітчизняних та зарубіжних вчених.

Забезпечення функціональної стійкості досягається застосуванням в складній системі різних, вже існуючих видів надмірності (апаратної, структурної, часової, інформаційної, функціональної та ін.) шляхом перерозподілу ресурсів з метою парирування наслідків позаштатних ситуацій.

Особливу увагу в теорії функціональної стійкості звернуто на те, що на етапі проектування не повинна вводитися додаткова надмірність, а парирування наслідків позаштатних ситуацій здійснюється перерозподілом вже існуючих ресурсів. Завдання полягає у виявленні вже існуючої надмірності і формуванні сигналів в потрібний момент на її перерозподіл. У цьому принципова відмінність завдання забезпечення функціональної стійкості від завдання побудови структурно-надлишкових систем.

Одним з актуальних напрямків досліджень стала розробка інтелектуальних багатофункціональних оптимальних систем управління рухом літального апарату, що мають розвинені властивості адаптації до мінливих в широких діапазонах умов польоту, виникнення нештатних ситуацій. Особливу увагу потребують заходи щодо забезпечення функціональної стійкості пілотажно-навігаційного комплексу (ПНК) літального апарату (ЛА) на окремих режимах польоту.

Таким чином, теорія функціональної стійкості знаходиться в стадії розвитку і формування показ-

ників функціональної стійкості як показників ефективності складних технічних систем, включаючи ПНК ЛА, є важливим напрямком наукових досліджень. Завдання забезпечення функціональної стійкості ПНК є однією з найбільш актуальних наукових завдань навігації і управління повітряним рухом.

**Метою статті** є розробка нових підходів для вирішення завдань забезпечення функціональної стійкості пілотажно-навігаційного комплексу літального апарату на окремих режимах польоту.

## Основна частина

До основних завдань, що вирішуються ПНК ЛА можна віднести завдання побудови навігаційної програми польоту, навігаційні завдання, пілотажні завдання і завдання контролю роботи ПНК і режимів польоту [8]. Залежно від призначення ЛА, формується основне цільове завдання кожного польоту ЛА, яка кількісно, як правило, виражається ймовірнісними параметрами виконання ЛА завдання в кожних конкретних умовах. Так, повну ймовірність виконання цільового завдання можна представити добутком ймовірностей виконання усіх завдань ПНК з урахуванням обмежень, від яких залежить основне цільове завдання. При польоті за маршрутом ймовірність виконання повного цільового завдання описується виразом:

$$P = \prod_{i=1}^n P_i, \quad (1)$$

де  $P_i = P(\Delta x_i < \Delta_{i,тр,зад})$  ( $i = \overline{1, n}$ );

$$P_2 = P(t_{\phi} < t_2);$$

$$P_1 = P(a_i < a_{i,тр,зад}).$$

Під  $a_i$  будемо розуміти деякі параметри ПНК, такі як маса, вартість або інші, під параметром  $a_{i, \text{доп}}$  – гранично допустимі значення параметрів, під  $\Delta x_i$  – відхилення  $i$ -ої координати вектору стану, під  $\Delta_{i, \text{доп}}$  – гранично допустимі відхилення по  $i$ -ій координаті,  $t_f$  и  $t_s$  – фактичний і заданий час досягнення необхідної дальності польоту. Тоді умови, відповідні виконанню основного завдання можна представити у вигляді:

$$\Delta x_i(t) < \Delta_{i, \text{доп}}(t), \quad (i = \overline{1, n}); \quad (2)$$

$$t_f - \frac{L(t)}{V_{\text{доп}}} < t_s,$$

де  $\Delta x_i(t) = x_{i, \text{доп}}(t) - x_i(t)$  – відхилення координат вектора стану  $x_i(t)$  від програмних  $x_{i, \text{доп}}(t)$ .

Для розгляду підходів щодо забезпечення функціональної стійкості ПНК проаналізуємо види відмов ПНК на окремих режимах польоту. Під функціональною стійкістю ПНК ЛА будемо розуміти його властивість перебувати в стані працездатності, тобто виконувати необхідне, повне цільове завдання протягом заданого інтервалу часу або напрацювання в умовах потоку відмов через вплив зовнішніх і внутрішніх факторів.

Аналіз досліджень відмов і пошкоджень елементів складних систем, проведений різними авторами в роботах [7 – 10], дозволяє зробити висновок, що відмови в роботі ПНК або його модулів призводять до помилок позиціонування ЛА в просторі і відхилень ЛА від лінії заданого шляху, що значно впливає на рівень безпеки польотів.

Основними причинами таких помилок є: програмні помилки, пов'язані з точністю зчитування координат з навігаційних карт і некоректним введенням програми польоту в пристрої пам'яті ПНК; помилки визначення координат ЛА, пов'язані з точністю навігаційних приладів і зовнішніми збурюючими впливами (тип навігаційної системи, іоносферні збурення, втрата сигналу, радіаційний вплив і т.п.); помилки стабілізації ЛА щодо лінії заданого шляху, які визначаються якістю роботи контурів траєкторного управління в умовах дії зовнішніх збурень.

Таким чином, з огляду на структуру ПНК і основні причини відмов, можна зробити висновок, що система має значну апаратну і програмну надмірність.

Основні відмови і помилки при роботі пілотажно-навігаційного комплексу можна парировати програмним способом. Для цього розглянемо пілотажно-навігаційний комплекс як розподілену інтелектуальну систему виду:

$$G(V, L), \quad V = \{v_i\}, \quad L = \{l_{ij}\}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

де множина вершин  $V$  відповідає множині інформаційних (інтелектуальних) модулів ПНК розмір-

ністю  $n$ . Множина ребер  $L$  відповідає множині зв'язків між інформаційними модулями.

Оскільки забезпечення функціональної стійкості включає в себе три етапи: етап визначення; етап верифікації розподіленої бази знань; етап парировання відмов ПНК [6], то введемо допущення, що відмову ПНК визначено.

Тоді для забезпечення функціональної стійкості ПНК необхідно визначити значення функцій приналежності  $\mu_i$  для окремих модулів  $v_i$ ,  $i=1..n$ , розподілених інформаційних модулів ПНК  $V$  на базі операцій з буюльовими векторами коректності модуля  $X_i$ , отриманого в результаті верифікації розподілених інформаційних модулів:

$$\begin{aligned} & \forall v_i | v_i \in V, i = 1, \dots, |V|, \\ & \exists \mu_i | \mu_i \in M, \end{aligned} \quad (4)$$

$$M = \left\{ \mu_i \mid \mu_i = \frac{1}{|X_i|} \sum_{j=1}^{|X_i|} x_{ij}, \quad x_{ij} \in X_i, \quad i = 1 \dots n \right\}.$$

Після визначення достатньої верифікаційної інформації, на її підставі формується відновлююче управління, яке і завершує етап парировання відмов ПНК.

У загальному вигляді задача етапу парировання полягає у визначенні нечіткого логічного висновку виду:

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (5)$$

На основі верифікації (4) інформаційних модулів ПНК (3) формується відновлююче управління (5) і на підставі умов задоволення основного завдання (2) визначається ймовірність виконання повного цільового завдання при польоті за маршрутом або на інших окремих режимах польоту. За даними експертів [3, 5, 7], такий підхід дозволить підвищити ефективність застосування ЛА для різного роду завдань, підвищити точність пілотування і безпеку польотів на 15-20%.

## Висновки і перспективи подальшого розвитку у даному напрямку

При різних режимах польоту на роботу пілотажно-навігаційного обладнання можуть впливати внутрішні несприятливі фактори, здатні вивести з ладу або привести до серйозних помилок в показниках приладів. Крім того, під час польоту на приладове обладнання літака також впливають різні зовнішні фактори, що також погіршує їх працездатність.

При відмовах будь-якого обладнання навантаження на пілота збільшується в багато разів, тому необхідно вживати заходів, які б сприяли розвантаженню пілотів, тим самим сприяючи комфортному, сталому і що найбільш важливо - безпечному виконанню польоту. Для зниження впливу людського фактора і як наслідок зниження ймовірності помил-

ки пілота необхідно розвивати підходи щодо забезпечення заданого рівня працездатності систем літака і автоматизації пілотування не тільки в штатних режимах, але і при виникненні позаштатних ситуацій на борту ЛА. Для вирішення такого роду завдань необхідно застосовувати теорію функціональної стійкості.

Методи забезпечення функціональної стійкості повинні бути спрямовані на більш повне використання наявних технічних ресурсів складної технічної системи. Вони повинні базуватися на концептуальному принципі активного перерозподілу наявних ресурсів для досягнення поставлених цілей, а не на пасивному автоматичному виконанні чіткої програми дій.

У традиційних системах автоматичного управління автономними об'єктами, розділених на окремі канали в складі датчиків, обчислювачів та виконавчих механізмів, ресурси (енергетичні, обчислювальні, інформаційні), які виділяються на управління, жорстко закріплені між відповідними каналами. При цьому неможливість перерозподілу ресурсів між каналами обмежує можливості формування функціонально стійкого управління [2]. Технологічною основою забезпечення функціональної стійкості стало створення бортових інформаційно-керуючих комплексів, які дозволили комплексувати ресурси системи і здійснювати їх перерозподіл.

При впровадженні нових інтелектуальних систем в авіаційній сфері теорія функціональної стійкості отримала швидкий розвиток. Системне рішення розглянутого виду завдань управління, полягає в зміні принципу управління – у використанні для управління внутрішньої структури і енергоінформаційних процесів об'єкта управління у вигляді різних ефектів самоорганізації (принципу «синергетичного» управління).

#### ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ПИЛОТАЖНО-НАВИГАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АПАРАТА НА ОТДЕЛЬНЫХ РЕЖИМАХ ПОЛЕТА

М.А. Калашник, Д.Н. Обидин

*Рассмотрены существующие научно-методические подходы по обеспечению функциональной устойчивости сложных технических систем летательного аппарата. Проанализированы основные причины возможных отказов пилотажно-навигационного комплекса на разных этапах полета летательного аппарата. Определена нерешенная ранее задача по обеспечению функциональной устойчивости пилотажно-навигационного комплекса летательного аппарата на отдельных режимах полета, предложены новые подходы по разработке эффективной методики обеспечения функциональной устойчивости.*

**Ключевые слова:** пилотажно-навигационный комплекс, функциональная устойчивость, отдельные режимы полета.

#### THE FUNCTIONAL STABILITY FOR FLIGHT AND NAVIGATION SYSTEM OF AIRCRAFT AT DIFFERENT FLIGHT MODES

M.A. Kalashnyk, D.M. Obidin

*There were considered existing scientific and methodological sides of provision of functional stability for complicated technical systems of aircraft, theoretical and practical works in this area. There were analyzed the main reasons of possible failures of flight control and navigation equipment at different flight phases of aircraft, crew actions during some failures of flight control and navigation system. There was defined the part that has been unsolved before, it is creation of effective methods of provision of functional stability for flight and navigation system at different flight modes and there were offered new sides in order to solve it.*

**Keywords:** flight control and navigation system, functional stability, different flight modes.

#### Список літератури

1. Выполнение полёта при отказе пилотажно-навигационных приборов на многоместных самолетах [Видеозапись]: Учебный документальный фильм / реж. О. Ананьев, А. Егоров: 1983.
2. Машиков О.А. Применение теории функционально устойчивых систем для решения задач навигации и управления объектами вида «макросистема» / О.А. Машиков, О.А. Кононов // Системы управления, навигации та зв'язку". – К.: ЦНДІ УіН, 2007. – Вип 3, – С. 15 – 19.
3. Барабаш О.В. Построение функционально устойчивых распределенных информационных систем / О.В. Барабаш. – К.: НАОУ, 2004. – 226 с.
4. Барабаш О.В. Математична модель забезпечення функціональної стійкості мобільних систем / О.В. Барабаш, Н.М. Берназ // Системи обробки інформації. – Харків: ХУПС, 2015. – Вип. 12 (137). – С. 97 – 100.
5. Кравченко Ю.В. Визначення проблематики теорії функціональної стійкості щодо застосування в комп'ютерних системах / Ю.В. Кравченко, С.В. Нікіфоров // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – К.: ДУТ, 2014. – №1. – С. 12 – 18.
6. Неділько С.М. Основи теорії функціональної стійкості автоматизованої системи управління повітряним рухом / С.М. Неділько. – Кіровоград: ДЛАУ, 2011. – 220 с.
7. Обідін Д.М. Аналіз теперішніх та перспективних науково-методичних підходів щодо побудови авіаційних комплексів та систем / Д.М. Обідін // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – Харків: ХУПС, 2014. – Вип.2 (15). – С. 32 – 34.
8. Рогожин В.О. Пилотажно-навигационный комплекс воздушных судов. Пособие / В.О. Рогожин, В.М. Сингладов, М.К. Філяшкін. – К.: НАУ, 2005. – 316 с.
9. Анцелиович Л.Л. Надежность, безопасность и живучесть самолета / Л.Л. Анцелиович. – М.: Машиностроение, 1985. – 296 с.
10. Когге Ю.К. Основы надежности авиационной техники / Ю.К. Когге. – М.: Машиностроение, 1993. – 175 с.

Надійшла до редколегії 22.02.2017

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. О.В. Барабаш, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ.