

## СТРАТЕГІЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ ІНТЕГРОВАНИХ КОМПЛЕКСІВ БОРТОВОГО ОБЛАДНАННЯ СУЧАСНИХ І ПЕРСПЕКТИВНИХ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН

Калашник Г. А., Калашник-Рибалко М. А.

### ВСТУП

Загальносвітова тенденція розвитку авіоніки заснована на глибокій інтеграції систем і комплексів із використанням загальних ресурсів програмного й апаратного забезпечення. Це формує сучасні вимоги щодо вдосконалення комплексів бортових обладнань повітряних суден (далі – ПС). Якісне вирішення проблеми забезпечення необхідного рівня безпеки польотів, високої ефективності літальних апаратів, оперативності обробки даних, розширення бази даних щодо стану функціонування ПС може бути забезпечено за рахунок впровадження функціонально стійких інтелектуальних інтегрованих комплексів бортового обладнання (далі – КБО).

Особливістю таких КБО є відкрита функціонально стійка мережева архітектура, побудована на базі ІМА-технологій<sup>1</sup> із застосуванням перспективних інтерфейсів взаємодії, що мають розвинені властивості адаптації до мінливих у широких діапазонах умов польоту, до виникнення нештатних, малоймовірних ситуацій, які неможливо передбачити, тобто за відсутності повної апріорної інформації.

Головною особливістю функціонально стійких інтегрованих КБО є можливість самодіагностування технічного стану, прогнозування відмов ще до їх виникнення і завчасне парирування наслідків відмов<sup>2</sup>. Збільшується значення засобів автоматизації управління польотом. Автоматизація функціонування інтегрованих КБО

---

<sup>1</sup> Eveleens René L.C. Open Systems Integrated Modular Avionics – The Real Thing. Mission Systems Engineering. *Educational Notes RTO-EN-SCI-176*. 2006. Neuilly-sur-Seine, November, France : RTO. Paper 2. P. 2–20.

<sup>2</sup> Результати дослідження ефективності функціонування комплексу бортового обладнання літака DA-42 за показниками функціональної стійкості під впливом дестабілізуючих факторів. *Системи обробки інформації*. 2020. № 4 (163). С. 27.

неможлива без інтелектуалізації. Інтелектуалізація сучасних КБО насамперед повинна передбачати керування інформаційними потоками, їх своєчасну обробку та використання в інтересах забезпечення безпеки польотів і ефективності повітряних суден, підтримання їх функціональності за умов різних дестабілізуючих впливів. Тому забезпечення функціональної стійкості комплексів бортового обладнання літальних апаратів є частиною проблеми забезпечення безпеки польотів та одним зі найбільш актуальних напрямів наукових досліджень.

### **1. Аналіз існуючих підходів до побудови функціонально стійких інтегрованих комплексів бортового обладнання повітряних суден**

Інтегровані комплекси бортового обладнання ПС – це сукупність інтелектуальних елементів: бортових функціонально об'єднаних інформаційних засобів, обчислювально-програмних систем автоматизованого управління, систем індикації та сигналізації, призначених для вирішення завдань літаководіння і забезпечення роботи інших бортових систем літального апарата.

На сучасному етапі розвиток КБО пов'язаний з істотним збільшенням обсягів інформації з одночасним посиленням вимог до часових обмежень на її обробку, надійності та точності координатно-часового забезпечення, підтримання їх функціональності за умов різних дестабілізуючих впливів. Побудова таких розподілених систем, збору, обробки та передачі великого обсягу інформації, здатних до самоорганізації, здійснюється за допомогою різних технологій передачі даних зі структурою, що здатна динамічно перебудовуватися і має низьке енергоспоживання. Так, у разі порушення процесу накопичення, перетворення, обробки та передачі навігаційної інформації внаслідок виходу з ладу одного з основних модулів КБО ПС – пілотажно-навігаційного комплексу – в ньому повинно пройти відновлення процесу за час, істотно менший, ніж це необхідно для збереження оперативної цінності обробленої інформації. Однією з вимог до надійності та стійкості сучасних пілотажно-навігаційних комплексів є збереження ефективного функціонування у режимі числення шляху та корекції координат навіть за одночасного виникнення двох відмов. Це досягається за рахунок багаторазового резервування, надмірності вимірювань і розвиненої системи контролю.

Під відмовою елемента КБО ПС розуміється подія, що полягає у частковій або повній втраті його працездатності, зумовлена навмисним пошкодженням, фізичним старінням чи конструктивно-виробничими недоліками. Будь-яка нештатна ситуація, викликана відмовою елемента КБО ПС, може призвести до катастрофічних наслідків.

Попередити відмову можливо, якщо виявити зміни параметрів, які характеризують працездатність об'єкта. Зміна параметрів до критичного рівня передуює повній відмові, котра може призвести до втрати функціональності системи, об'єкта чи системи. Якщо вчасно виявити такі зміни, то можна прийняти відповідні заходи щодо усунення відмови, що може призвести до нештатної ситуації.

Під функціональною стійкістю розуміють здатність системи виконувати свої функції впродовж заданого інтервалу часу за умови впливу на неї потоку експлуатаційних відмов, навмисних пошкоджень, втручання в обмін та обробку інформації, а також у разі помилок обслуговуючого персоналу<sup>3</sup>.

Функціональна стійкість складної технічної системи поєднує властивості надійності, відмовостійкості, живучості та характеризує здатність об'єкта до відновлення працездатного стану за рахунок використання надмірності<sup>4</sup>.

Згідно зі стратегією забезпечення функціональної стійкості складних технічних систем професора О.А. Машкова, яка надалі була розвинута у роботах професорів Ю.В. Кравченка, О.В. Барабаша, С.М. Неділька, Д.М. Обідіна та ін., парирування наслідків зовнішніх впливів, передбачених умовами, здійснюється у три етапи: виявлення відмов; розпізнавання відмов; парирування наслідків позаштатних ситуацій<sup>5</sup>, яке полягає у формуванні та впливі на систему так званого відновлюючого управління. Під відновлюючим управлінням розуміється управління, що парирує наслідки відмов, збоїв, руйнувань, а також впливів інших зовнішніх дестабілізуючих чинників, передбачених умовами, з метою збереження, хоч і з деяким

---

<sup>3</sup> Артюшин Л.М., Машков О.А. Оптимизация цифровых автоматических систем, устойчивых к отказам : монография. Киев : КВВАИУ, 1991. С. 51.

<sup>4</sup> Машков О., Барабаш О. Оцінка функціональної стійкості розподілених інформаційно-керуючих систем. *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології*. 2005. Вип. 1. С. 160.

<sup>5</sup> Машков О.А., Барабаш О.В. Проблеми моделювання функціонально-стійких складних інформаційних систем. *Інформатично-математичне моделювання складних систем*. Львів, 2002. С. 139.

погіршенням, основних функцій системи шляхом перерозподілу надмірності.

Нами були обґрунтовані механізми забезпечення стійкого функціонування засобів навігації літальних апаратів під впливом зовнішніх дестабілізуючих факторів<sup>6</sup>, основні заходи щодо забезпечення ефективного функціонування систем управління, зв'язку та навігації за умов впливу деструктивних геліогеофізичних збурень<sup>7</sup> і розроблений метод забезпечення функціональної стійкості пілотажно-навігаційного комплексу (далі – ПНК) літального апарата на окремих режимах польоту<sup>8</sup>. Він відрізняється підтриманням у валідному стані завчасно сформованих баз знань (далі – БЗ) параметрів окремих модулів розподіленої системи ПНК.

Сьогодні науково-методичний апарат забезпечення функціональної стійкості досить глибоко розроблений для динамічних об'єктів, що описуються системою диференціальних рівнянь<sup>9</sup>, однак для складних організаційних, інформаційних систем, до класу яких належить КБО ПС, застосовні тільки принципи забезпечення функціональної стійкості, до яких належать введення структурної, апаратної, програмної та часової надмірності на стадії проектування; виявлення, ідентифікація, локалізація і парирування нештатних ситуацій під час експлуатації комплексу. Аналіз процесів забезпечення функціональної стійкості комплексів бортового обладнання повітряних суден показав обмеженість застосування теорії функціональної стійкості у розглянутій предметній сфері, що вимагає її подальшого розвитку. Відомі методи забезпечення функціональної стійкості конкретних складних технічних систем не

---

<sup>6</sup> Калашник Г.А., Обідін Д.М., Калашник М.А. Забезпечення стійкого функціонування засобів навігації літальних апаратів під впливом зовнішніх дестабілізуючих факторів. *Системи обробки інформації*. 2016. Вип. 3 (140). С. 56.

<sup>7</sup> Калашник Г.А., Калашник-Рибалко М.А. Основні заходи щодо забезпечення ефективного функціонування систем управління, зв'язку та навігації в умовах впливу деструктивних геліогеофізичних збурень. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних сил України*. 2018. № 1. С. 98.

<sup>8</sup> Калашник-Рибалко М.А. Методика забезпечення функціональної стійкості пілотажно-навігаційного комплексу літального апарата на окремих режимах польоту. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних сил*. 2018. № 1 (55). С. 75.

<sup>9</sup> Машков О.А., Аль-Тамими Р.К.Н., Лами Д.Д.Х., Косенко В.Р. Функціональна стійкість складних екологічно-небезпечних динамічних об'єктів. *Екологічні науки*. 2015. № 14–15. С. 69.

можуть бути автоматично застосовані до КБО літальних апаратів. Тому розробка нових механізмів і методів забезпечення функціональної стійкості КБО літальних апаратів є невирішеною частиною проблеми забезпечення безпеки польотів та одним із найбільш актуальних напрямів наукових досліджень. Проблеми виявлення відмов і пошкоджень в обчислювальних мережах, елементах КБО ПС, підвищення достовірності діагностування розподілених динамічно змінних структур вирішені не повною мірою.

У процесі створення складної технічної системи намагаються врахувати різні критерії ефективності, що часто приводить до суперечностей між ними. Так, нині виникла суперечність між структурною надмірністю, нерівномірністю завантаження елементів систем існуючих комплексів бортового обладнання повітряних суден, з одного боку, та вимогою своєчасності, точності надання навігаційної інформації, побудови траєкторій руху, забезпечення заданого рівня функціональності з обмеженням на вартість комплексу для оперативного парирування позаштатної ситуації та формування відновлюючого управління за умов впливу потоку відмов, збоїв, навмисних пошкоджень, дестабілізуючих збурень космічної погоди, з іншого. Це зумовлює необхідність забезпечення функціональної стійкості КБО повітряних суден на етапах побудови й експлуатації за умов впливу зовнішніх і внутрішніх дестабілізуючих факторів. Таким чином, основним напрямом наукових досліджень є підвищення значень показників функціональної стійкості комплексу бортового обладнання повітряних суден для парирування порушень функціонування за умов впливу потоків відмов.

## **2. Обґрунтування стратегії забезпечення функціональної стійкості комплексів бортового обладнання повітряних суден**

Комплекс бортового обладнання сучасного ПС – це сукупність функціонально пов'язаних бортових систем і пристроїв, які забезпечують вирішення завдань пілотування, навігації та спеціального застосування ПС різними способами.

Комплекси бортового обладнання ПС характеризуються такими основними рисами: 1) об'єднанням у єдиний комплекс систем із різними фізичними принципами, створюваними різними галузями промисловості, що обслуговуються фахівцями різних профілів; 2) численними взаємними зв'язками між системами, від функціонування яких залежить працездатність всього комплексу загалом; 3) різноманітністю й інтенсивністю потоків інформації, які

замикаються на бортову обчислювальну систему; 4) необхідністю забезпечення ергономічних аспектів взаємодії льотного екіпажу з комплексом бортового обладнання.

КБО сучасного ПС повинен мати мережеву функціонально стійку архітектуру на базі ІМА (Integrated Module Avionics) з використанням єдиного обчислювального середовища (платформи). Функції систем комплексу виконують програмні додатки, що поділяють спільні обчислювальні й інформаційні ресурси.

Математичну модель інтегрованого КБО повітряного судна розглянемо на основі описі елементів структури за допомогою орієнтованого графа і представлену у вигляді розподіленої інтелектуальної системи. У ній множина вершин графа відповідає множині інформаційних (інтелектуальних) модулів КБО, а множина ребер – множині зв'язків між інформаційними модулями. Така модель враховує випадкову структуру верифікаційних зв'язків між модулями системи КБО ПС, дозволяє виконувати перевірки окремих модулів комплексу з боку інших суміжних модулів у випадковий моменту часу.

Розглянемо КБО ПС як розподілену інтелектуальну систему виду:

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

де множина вершин  $V$  графа  $G(V, L)$  відповідає множині інформаційних (інтелектуальних) модулів КБО ПС розмірністю  $n$ , множина ребер  $L$  відповідає множині зв'язків  $l_{ij}$  між інформаційними модулями  $(i, j)$

Представимо граф моделі КБО ПС у вигляді матриці суміжності<sup>10</sup>:

$$A = \{a_{ij}\}, i, j = 1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

де  $a_{ij}$  – елементи матриці суміжності діагностичного графа, які мають значення 1, якщо існує ребро:

$$l_{ij} = \{v_i, v_j\}, \in L, \cdot \quad (3)$$

та 0 – якщо ребра не існує;  $v_i, v_j$  – модулі розподіленої системи комплексу бортового обладнання ПС, пов'язані інформаційними лініями зв'язку  $l_{ij}$ .

---

<sup>10</sup> Машков О., Барабаш О. Оцінка функціональної стійкості розподілених інформаційно-керуючих систем. *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології*. 2005. Вип. 1. С. 160.

Під функціональною стійкістю КБО ПС будемо розуміти його властивість збереження основних функцій, тобто можливість виконувати необхідне, повне цільове завдання протягом заданого інтервалу часу або функціонування за умов потоку відмов через вплив зовнішніх і внутрішніх дестабілізуючих факторів, можливо, із деяким погіршенням своїх характеристик, але зі збереженням виконання хоча б мінімально необхідних функцій.

Необхідна і достатня умова функціональної стійкості комплексу бортового обладнання повітряного судна у такому разі полягає в існуванні такого складу елементів і зв'язків між ними, за якого комплекс продовжував би виконувати хоча б мінімально необхідні функції, а також мав би достатню надмірність для парирування наслідків позаштатних ситуацій.

Простір параметрів  $P$  комплексу бортового обладнання ПС представимо як  $\langle V, L, F \rangle$ , де множина вершин  $V$  графа  $G(V, L)$  відповідає множині інформаційних (інтелектуальних) модулів КБО ПС, множина ребер  $L$  відповідає множині зв'язків  $l_{ij}$  між інформаційними модулями  $(i, j)$ ,  $F$  – множина функцій інформаційних (інтелектуальних) модулів комплексу бортового обладнання і зв'язків між ними.

Для формалізованого визначення функціональної стійкості комплексу бортового обладнання повітряного судна використаємо підхід, розроблений у роботі<sup>11</sup>. Процес функціонування комплексу бортового обладнання визначається законами внутрішнього стану у часі під впливом дії зовнішніх і внутрішніх дестабілізуючих факторів.

Будемо вважати, що функціонування КБО визначається набором параметрів  $p \langle v, l, f \rangle$ , де підмножина  $v \subseteq V$ ,  $|v| \leq |V|$ , підмножина  $l \subseteq L$ ,  $|l| \leq |L|$ , підмножина  $f \subseteq F$ ,  $|f| \leq |F|$ . Відповідно параметр  $p \langle v, l, f \rangle$  є елементом множини простору параметрів  $P \langle V, L, F \rangle$ . Зміна внутрішнього стану КБО у часі  $w(t, p)$  залежить від  $p$ .  $t \in T$ , де  $T$  – часовий інтервал функціонування комплексу бортового обладнання ПС.

Стратегія реалізації принципів функціональної стійкості інтегрованого КБО ПС полягає у такому. На етапі проектування

---

<sup>11</sup> Неділько С.М. Основи теорії функціональної стійкості автоматизованої системи управління повітряним рухом : монографія. Кіровоград : ДЛАУ, 2011. С. 47.

забезпечення функціональної стійкості здійснюється введенням структурної, апаратної, програмної та часової надмірності. Для цього визначається оптимальна (за критерієм максимуму функціональної стійкості) структура КБО ПС, що характеризується структурною й апаратною надмірністю. Основні відмови та помилки у роботі КБО ПС парируються програмним способом. Для цього в програмне забезпечення вводиться програмна та часова надмірність для контролю, діагностування та дешифрування діагностичної інформації. Тоді для функціональної стійкості інтегрованого КБО ПС як властивості складної системи буде справедливим:

$$\begin{aligned} \forall v \subseteq V \exists v_{max}, v_{min}, \Delta v \neq \emptyset, \\ \forall l \subseteq L \exists l_{max}, l_{min}, \Delta l \neq \emptyset, \\ \forall f \subseteq F \exists f_{max}, f_{min}, \Delta f \neq \emptyset, \end{aligned}$$

де

$$\begin{aligned} v &= v_{max} \cup v_{min}, \Delta v = v_{max} \cap v_{min}, \\ l &= l_{max} \cup l_{min}, \Delta l = l_{max} \cap l_{min}, \\ f &= f_{max} \cup f_{min}, \Delta f = f_{max} \cap f_{min}, \end{aligned}$$

де  $v_{max}, l_{max}, f_{max}$  – максимальні за потужностями підмножини відповідно елементів, ліній зв'язків, функцій елементів комплексу бортового обладнання ПС, для яких є справедливими умови:  $|v_{max}| = |V|$ ,  $|l_{max}| = |L|$ ,  $|f_{max}| = |F|$ ,

$v_{min}, l_{min}, f_{min}$  – мінімальні за потужностями підмножини відповідно елементів, ліній зв'язків, функцій елементів комплексу бортового обладнання ПС, для яких є справедливими умови:  $|v_{min}| < |V|$ ,  $|l_{min}| < |L|$ ,  $|f_{min}| < |F|$ ,

$\Delta v, \Delta l, \Delta f$  – формальний опис надмірностей відповідно елементів, ліній зв'язків, функцій елементів комплексу бортового обладнання ПС.

На етапі експлуатації здійснюється функціонування у штатному режимі, за якого комплекс бортового обладнання виконує призначені йому функції. Забезпечення функціональної стійкості КБО ПС включає в себе етапи самодіагностування, прогнозування відмов шляхом верифікації розподіленої бази знань (РБЗ), парирування відмов, відновлення структури комплексу бортового обладнання без значної перебудови засобів верифікації.



Забезпечення функціональної стійкості КБО ПС будемо здійснювати на основі методу, який базується на процедурі підтримання у валідному стані баз знань окремих модулів розподіленої системи КБО ПС через організацію динамічної верифікації таких баз знань під час їх застосування за принципом ймовірнісного діагностичного ядра з відновленням розподіленої системи без значної перебудови засобів верифікації. Метод включає в себе три етапи: визначення відмови; розпізнавання відмов (верифікацію розподіленої бази знань); їх парирування (відновлення без значної перебудови засобів верифікації).

У процесі динамічної верифікації КБО ПС представляється сукупністю інтелектуальних інформаційних модулів, пов'язаних мережею інформаційних зв'язків для перевірки один одного. Ці модулі, побудовані на базі процесорів, будуть мати часову та програмну надмірність для постійного виконання тестових перевірок і збереження та накопичення результатів цих перевірок.

Верифікація РБЗ КБО ПС є процесом визначення відповідності модулів структури специфікаціям, що описують процеси під час його функціонування, шляхом організації тестового діагностування на базі ймовірнісного діагностичного ядра. У штатному режимі КБО ПС виконує призначені йому функції та постійно контролює стан елементів системи.

Функціональна стійкість КБО ПС забезпечується використанням принципу «синергетичного» відновлюючого управління. Це дозволяє парирувати наслідки стійких відмов, збоїв, руйнувань, нестійких відмов, некоректностей інформаційного обміну з метою збереження, хоч і з деяким погіршенням, основних функцій систем та елементів.

У загальному вигляді задача парирування полягає у визначенні нечіткого логічного виведення виду:

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (4)$$

Як результат, здійснюється оперативна верифікація та парирування відмов, відновлюється розподілена система КБО ПС без значної перебудови засобів верифікації.

Модель самодіагностування бази знань КБО ПС буде будуватися за принципом ймовірнісного діагностичного ядра<sup>12</sup>. Цей підхід враховує випадкову структуру діагностичних зв'язків; накопичення

---

<sup>12</sup> Mashkov V.A., Barabash O.V. Self-checking and Self-diagnosis of Module Systems on the Principle of Walking Diagnostic Kernel. *Engineering Simulation*. Amsterdam : OPA, 1998. Vol. 15. P. 45.

діагностичної інформації в пам'яті елементів КБО; визначення достатності діагностичної інформації для її аналізу; дешифрування діагностичної інформації для визначення стану елементів комплексу бортового обладнання.

Верифікація бази знань КБО ПС за принципом діагностичного ймовірного ядра є процесом визначення відповідності модулів структури специфікаціям, що описують процеси його функціонування.

Після визначення достатньої верифікаційної інформації один із коректних модулів аналізує і дешифрує синдром із визначенням місця і виду відмови. На підставі цієї інформації формується відновлювальне управління. Під час відновлення здійснюється інформаційний обмін по резервних маршрутах, реструктуризація РБЗ шляхом передачі справним модулям функцій несправних, відновлення функціонування реструктуризованої РБЗ й усіх верифікаційних процедур із незначною їх перебудовою. Після відновлення корегуються протоколи маршрутизації із відповідною зміною розподіленої структури КБО ПС.

Таким чином, структура комплексу бортового обладнання у процесі виявлення та дешифрування порушення нормального функціонування елементів постійно динамічно змінюється. Водночас для якісного функціонування за умов впливів необхідна оптимально розподілена структура комплексу бортового обладнання повітряного судна.

Завдання синтезу комплексу бортового обладнання ПС загалом виглядає так. На першому етапі визначається структурна схема КБО та його параметри, здатні задовольнити обраний критерій оптимальності, який забезпечує ефективне функціонування комплексу навіть за умов впливу потоку дестабілізуючих факторів. Це потребує синтезу КБО ПС з оптимально введеною надмірністю (структурною, апаратною, часовою, програмною). На другому етапі визначаються оптимально розподілені за певними параметрами елементи структури та зв'язки між ними.

Таким чином, при синтезі структури КБО ПС на основі дискретної оптимізації послідовно виконується:

- обґрунтування комплексу критеріїв (показників якості), прийнятних до оцінки різних варіантів побудови систем комплексу, з визначенням критерію переваги;
- моделювання різних варіантів із бажаними змінами відомих параметрів систем комплексу і розрахунок показників якості;
- вибір методу оптимізації;
- визначення області ефективних варіантів на основі розгляду всього комплексу критеріїв, що відображають вимоги до КБО ПС;

– вибір оптимальних варіантів за сукупністю критеріїв із визначенням раціонального варіанту шляхом застосування пріоритетного критерію переваги.

Таким чином, функціонально стійкі інтегровані КБО повинні мати можливість:

1) розпізнавання в реальному часі небезпечних поєднань факторів зовнішньої обстановки та внутрішнього стану ПС, здатних привести до виникнення особливої ситуації, ранжування виявлених сполучень факторів за ступенем небезпеки;

2) прогнозування можливих небезпечних поєднань факторів з урахуванням плану польоту, оцінки зміни зовнішньої обстановки та внутрішнього стану ПС, здатних призвести до відмови або потоку відмов;

3) завчасне парировання наслідків відмов шляхом виконання в автоматичному режимі дій по виходу з особливих ситуацій, зниження їх небезпеки або їх запобігання, в т. ч. блокування дій пілотів, що призводять до виникнення особливої ситуації або збільшують ступінь її небезпеки, шляхом використання функціонально стійких ергатичних систем.

Всі заходи щодо забезпечення функціональної стійкості КБО ПС необхідно виконувати з обмеженням по вартості, враховуючи умови лавиноподібного наростання інформаційних потоків, скорочення часу на обробку інформації та прийняття рішень, а також подальшого ускладнення математичних моделей розрахункових завдань з обробки інформації під впливом дестабілізуючих факторів.

В останнє десятиліття з'явилася низка актуальних наукових робіт з управління обчислювальними мережами, адаптивної маршрутизації, динамічної реструктуризації та ін., однак проблеми виявлення відмов і пошкоджень під впливом внутрішніх і зовнішніх дестабілізуючих факторів в обчислювальних мережах, підвищення достовірності діагностування розподілених структур, що динамічно змінюються, опрацьовані не повною мірою.

Нами розроблена узагальнена комплексна математична модель функціонування супутникової навігаційної системи (СНС)<sup>13</sup>, що входить до складу пілотажно-навігаційного комплексу (ПНК) КБО ПС, під впливом зовнішніх дестабілізуючих факторів. Її основна перевага – на відміну від попередніх, вона забезпечує функціональну

---

<sup>13</sup> Kalashnyk-Rybalko M.A. Features of provision sustainable navigation aids functioning under heliogeophysical disturbances. *Вісник Національного Авіаційного Університету*. 2018. № 2. С. 37.

стійкість засобів навігації супутникової навігаційної системи у складі ПНК ПС за умов впливу нерегулярних варіацій космічної погоди:

$$G = \langle M, \gamma \rangle, \quad (5)$$

де  $M$  – модель роботи супутникової навігаційної системи;

$\gamma$  – модель дестабілізуючих впливів зовнішніх факторів.

У свою чергу, модель роботи супутникової навігаційної системи може бути представлена як:

$$M = \langle A, U, L, \beta \rangle, \quad (6)$$

де  $A$  – множина ресурсів супутникової навігаційної системи;  $U$  – моделі середовища поширення навігаційного сигналу;  $L$  – опис структури супутникової навігаційної системи, організації її роботи, кількісні значення вимог до СНС, показники в межах встановлених норм;  $\beta$  – опис технології визначення позиціонування з компенсацією іоносферної та інших похибок, які виникають під впливом дестабілізуючих факторів космічної погоди, апаратно-програмне забезпечення методики визначення іоносферних похибок СНС, за яких використовуються ресурси множин  $A$  та  $U$ .

Узагальнена модель дестабілізуючих впливів зовнішніх факторів може бути описана таким чином:

$$\gamma = \langle R, \alpha \rangle, \quad (7)$$

де  $R$  – множина дестабілізуючих зовнішніх факторів впливу;  $\alpha$  – просторово-часова структура впливу дестабілізуючих зовнішніх факторів.

Просторово-часова структура  $\alpha$  впливу дестабілізуючих зовнішніх факторів множини  $R$  на роботу супутникової навігаційної системи може бути представлена як:

$$\alpha = \langle n, m, \tau \rangle, \quad (8)$$

де  $n = \langle A, R, N \rangle$  – бінарне відношення ( $N \subseteq A \times R$ ), яке визначає розподіл впливів множини дестабілізуючих факторів  $R$  на множину ресурсів супутникової навігаційної системи  $A$ ;

$m = \langle U, R, M \rangle$  – бінарне відношення ( $M \subseteq U \times R$ ), що визначає розподіл впливів множини дестабілізуючих факторів  $R$  на моделі середовища поширення навігаційного сигналу  $U$ ;

$\tau$  – параметр, який визначає тривалість впливів дестабілізуючих факторів і моменти початку їх впливу.

Множина ресурсів супутникової навігаційної системи  $A$  формально описує усі види множини абстрактних елементів системи  $W$ ,

множини абстрактних зв'язків  $C$ , множини функцій абстрактних елементів і зв'язків  $F$  системи, тобто:

$$A = \langle W, C, F \rangle, \quad (9)$$

а також усі види надмірності у системі:  $\Delta w$  – надмірність елементів системи,  $\Delta c$  – надмірність зв'язків між елементами системи,  $\Delta f$  – надмірність функцій системи, які повинні існувати для функціонально стійкої системи з деякими параметрами моделі СНС  $a = \langle w, c, f \rangle$ , де  $w \subseteq W$ ,  $c \subseteq C$ ,  $f \subseteq F$ , згідно з такими умовами:

$$\begin{aligned} \forall w \subseteq W \exists w_{\max}, w_{\min}, \Delta w \neq \emptyset, \\ \forall c \subseteq C \exists c_{\max}, c_{\min}, \Delta c \neq \emptyset, \\ \forall f \subseteq F \exists f_{\max}, f_{\min}, \Delta f \neq \emptyset, \end{aligned}$$

де  $w_{\max}, c_{\max}, f_{\max}$  – максимальні за потужністю підмножини абстрактних елементів, зв'язків, функцій системи СНС відповідно;

$w_{\min}, c_{\min}, f_{\min}$  – мінімальні за потужністю підмножини абстрактних елементів, зв'язків, функцій системи СН, відповідно.

Потрібно зазначити, що нині у всіх галузях авіації основним інформаційним ядром сучасного ПНК повинні бути інтегровані інерціально-супутникові навігаційні системи. Спільне використання інерціальних навігаційних систем (ІНС) і СНС дозволяє, з одного боку, обмежити зростання похибок ІНС, а з іншого – знизити шумову складову частину похибок СНС, підвищити темп видачі інформації бортовим споживачам, істотно підняти рівень завадозахищеності.

Метою діагностування комплексу СНС – ІНС є моніторинг цілісності СНС і контроль правильності функціонування ІНС. В основу контролю цілісності СНС покладений принцип аналітичної надмірності (analytical redundancy), а діагностичні ознаки (характеристики об'єкта, необхідні для визначення його технічного стану) формуються на базі вимірювань обох навігаційних систем. Це дозволить підвищити надійність автономного діагностування цілісності та перевірку правильності функціонування ІНС за умов польоту повітряного судна, проводити своєчасне виявлення, локалізацію та виключення аномальних вимірювань і забезпечувати функціональну стійкість комплексу супутникових та інерціальних навігаційних систем літальних апаратів навіть в особливих польотних ситуаціях.

Перспективними напрямками подальших досліджень можуть бути забезпечення функціональної стійкості комплексу супутникових та

інерціальних навігаційних систем у складі ПНК комплексів бортового обладнання повітряних суден в особливих польотних ситуаціях шляхом:

1) своєчасного прогнозування збоїв і відмов у супутниковій системі навігації під впливом зовнішніх факторів і парирування позаштатних ситуацій до розвитку особливих ситуацій;

2) забезпечення автономних методів діагностики цілісності навігаційних систем і відновлення функціонування у разі виникнення відмов за заданий мінімальний час.

Перспективним напрямом розвитку також є розробка технологій створення функціонально стійкого не обслуговуваного людиною комплексу бортового обладнання ПС на базі ІМА другої генерації. Це забезпечить можливість перерозподілу програмних, апаратних і функціональних ресурсів бортового обладнання в разі виникнення потоку відмов і дозволить мінімізувати резервування та забезпечити досягнення максимально можливої безпеки й ефективності виконання або завершення польоту. Перехід на повністю автоматизовані комплекси бортового обладнання дозволить істотно знизити витрати на експлуатацію, зменшити час підготовки до польоту, скоротити перелік критичних відмов.

Загалом забезпечення функціональної стійкості комплексів бортового обладнання перспективних ПС дозволить:

1) підвищити рівень безпеки польотів ПС, у т. ч. і на граничних режимах;

2) парирувати відмови ще до розвитку особливих польотних ситуацій;

3) створити умови для побудови та подальшої безпечної експлуатації комплексів бортового обладнання ПС нових поколінь;

4) проектувати й експлуатувати функціонально стійкі комплекси обладнання ПС для умов внутрішніх і зовнішніх дестабілізуючих впливів, зокрема потоку відмов, збоїв, навмисних порушень функціонування;

5) здійснювати підвищення показників функціональної стійкості наявних КБО ПС до заданого рівня за умов цілеспрямованого впливу дестабілізуючих факторів за рахунок оптимального введення надмірності з обмеженням на вартість комплексу для забезпечення у разі необхідності оперативного парирування нештатної ситуації та формування відновлюючого управління.

## **ВИСНОВКИ**

1. Проаналізовані тенденції й основні проблеми розвитку комплексів бортового обладнання ПС на найближчу перспективу. Аналіз відомих підходів до забезпечення функціональної стійкості конкретних складних технічних систем довів, що вони не можуть бути автоматично застосовані до КБО ПС, тому розробка нових підходів і методів забезпечення функціональної стійкості КБО літальних апаратів є невирішеною частиною проблеми забезпечення безпеки польотів та одним із найбільш актуальних напрямів наукових досліджень.

2. Обґрунтована стратегія забезпечення функціональної стійкості комплексу бортового обладнання сучасних і перспективних ПС за умов впливу зовнішніх і внутрішніх дестабілізуючих факторів, потоку відмов. Реалізація принципів функціональної стійкості здійснюється на етапі проектування шляхом створення розподіленої надлишкової структурної, апаратної, програмної та часової надмірності структури КБО ПС і на етапі експлуатації шляхом розробки та реалізації ефективних методів самодіагностування, завчасного прогнозування відмов і відновлення функціонування. За сучасних умов зростання обсягів інформаційних потоків з одночасним посиленням вимог до часових обмежень прийняття рішень, практична значущість забезпечення функціональної стійкості КБО ПС полягає у стійкому функціонуванні комплексу під впливом внутрішніх і зовнішніх дестабілізуючих факторів.

3. Розглянуто головні принципи розвитку функціонально стійкого не обслуговуваного людиною комплексу бортового обладнання перспективних ПС на базі технології ІМА другої генерації.

4. Напрямами подальших наукових досліджень є обґрунтування комплексу оптимальних критеріїв, ознак і показників функціональної стійкості комплексу бортового обладнання ПС, розробка та математична формалізація методів самодіагностування, парирування відмов ще до розвитку особливих ситуацій, формування відновлюючого управління за умов впливу потоку відмов і дестабілізуючих збурень космічної погоди, що забезпечить функціональну стійкість і дозволить запобігти раптовому виникненню стану, за якого настає авіаційна подія або катастрофа.

## **АНОТАЦІЯ**

За сучасних умов одним із перспективних напрямів забезпечення безперервного функціонування комплексів бортового обладнання ПС є забезпечення їх функціональної стійкості у разі впливу на нього

внутрішніх (відмов, збоїв, помилок обслуговуючого персоналу) і зовнішніх (таких як навмисні пошкодження, інформаційні атаки, збурення космічної погоди) факторів. Представлена розроблена стратегія забезпечення функціональної стійкості комплексів бортового обладнання ПС, актуальність якої підтверджується необхідністю підвищення надійності, відмовостійкості, живучості за умов лавиноподібного наростання інформаційних потоків, скорочення часу на обробку інформації та прийняття рішень, а також подальшого ускладнення математичних моделей розрахункових завдань з обробки інформації під впливом дестабілізуючих факторів. Розглянуто головні принципи розвитку функціонально стійкого не обслуговуваного людиною комплексу бортового обладнання перспективних ПС на базі технології ІМА другої генерації.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Eveleens René L.C. Open Systems Integrated Modular Avionics – The Real Thing. *Mission Systems Engineering*. Educational Notes RTO-EN-SCI-176, 2006. Neuilly-sur-Seine, November, France: RTO. Paper 2. P. 2–20.
2. Калашник Г.А., Калашник-Рибалко М.А. Результати дослідження ефективності функціонування комплексу бортового обладнання літака DA-42 за показниками функціональної стійкості під впливом дестабілізуючих факторів. *Системи обробки інформації*. 2020. № 4 (163). С. 27–36. URL: <https://DOI:10.30748/soi.2020.163.03>.
3. Артюшин Л.М., Машков О.А. Оптимизация цифровых автоматических систем, устойчивых к отказам : монография. Киев : КВВАИУ, 1991. 89 с.
4. Машков О., Барабаш О. Оцінка функціональної стійкості розподілених інформаційно-керуючих систем. *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології*. 2005. Вип. 1. С. 159–165.
5. Машков О.А., Барабаш О.В. Проблеми моделювання функціонально-стійких складних інформаційних систем. *Інформатично-математичне моделювання складних систем*. Львів, 2002. С. 137–142.
6. Калашник Г.А., Обідін Д.М., Калашник М.А. Забезпечення стійкого функціонування засобів навігації літальних апаратів під впливом зовнішніх дестабілізуючих факторів. *Системи обробки інформації*. 2016. Вип. 3 (140). С. 52–56.
7. Калашник Г.А., Калашник-Рибалко М.А. Основні заходи щодо забезпечення ефективного функціонування систем управління,



зв'язку та навігації в умовах впливу деструктивних геліогеофізичних збурень. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних сил України*. 2018. № 1. С. 92–98. DOI: 10.30748/nitps.2018.30.13

8. Калашник-Рибалко М.А. Методика забезпечення функціональної стійкості пілотажно-навігаційного комплексу літального апарата на окремих режимах польоту. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних сил*. 2018. № 1 (55). С. 67–76.

9. Машков О.А., Аль-Тамими Р.К.Н., Лами Д.Д.Х., Косенко В.Р. Функціональна стійкість складних екологічно-небезпечних динамічних об'єктів. *Екологічні науки*. 2015. № 14–15. С. 65–74.

10. Машков О., Барабаш О. Оцінка функціональної стійкості розподілених інформаційно-керуючих систем. *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології*. 2005. Вип. 1. С. 159–165.

11. Неділько С.М. Основи теорії функціональної стійкості автоматизованої системи управління повітряним рухом : монографія. Кіровоград : ДЛАУ, 2011. 220 с.

12. Mashkov V.A., Barabash O.V. Self-checking and Self-diagnosis of Module Systems on the Principle of Walking Diagnostic Kernel. *Engineering Simulation*. Amsterdam : OPA, 1998. Vol. 15. P. 43–51.

13. Kalashnyk-Rybalko M.A. Features of provision sustainable navigation aids functioning under heliogeophysical disturbances. *Вісник Національного Авіаційного Університету*. 2018. № 2. P. 35–42.

**Information about the authors:**

**Kalashnyk Ganna Anatoliivna,**

orcid.org/0000-0002-9581-9865

Doctor of Geological Sciences, Senior Researcher,

Professor at the Department of Air Navigation

Flight Academy

of the National Aviation University

1, Dobrovolskogo str., Kropyvnytskyi, 25005, Ukraine

**Kalashnyk-Rybalko Myroslava Anatoliivna,**

orcid.org/0000-0003-0997-9609

Candidate of Technical Sciences (PhD),

Senior Instructor at the Department of Air Navigation

Flight Academy

of the National Aviation University

1, Dobrovolskogo str., Kropyvnytskyi, 25005, Ukraine