

М.А. Калашник-Рибалко

Льотна академія Національного авіаційного університету, Кропивницький

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОПТИМАЛЬНО РОЗПОДІЛЕНОЇ СТРУКТУРИ ПІЛОТАЖНО-НАВІГАЦІЙНОГО КОМПЛЕКСУ ЛІТАЛЬНОГО АППАРАТУ В УМОВАХ ДЕСТАБІЛІЗУЮЧИХ ВПЛИВІВ

У статті наведено обґрунтування комплексу критеріїв, прийнятних до оцінки різних варіантів побудови системи (показників якості) пілотажно-навігаційного комплексу (ПНК) літального апарату (ЛА) з визначенням критерію переваги. Обґрунтовано метод оптимізації. Наведено результати математичного моделювання обраного для дослідження пілотажно-навігаційного комплексу ЛА. Обрано оптимальні варіанти ПНК ЛА за сукупністю критеріїв з визначенням найбільш раціонального варіанту шляхом застосування пріоритетного критерію переваги з додатковим визначенням запасу функціональної стійкості. Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному: удосконалено методіку підвищення ефективності функціонування ПНК ЛА в умовах дестабілізуючих впливів за допомогою реалізації синтезу його оптимально розподіленої структури шляхом застосування методів оптимізації за критерієм максимуму показника функціональної стійкості з обмеженням на вартість побудови системи. На відміну від існуючих запропонована методика дозволяє з множини допустимих варіантів обрати компромісний і водночас найбільш раціональний з урахуванням можливих позаштатних ситуацій в умовах дестабілізуючих впливів шляхом врахування ймовірнісного характеру інтенсивності обміну інформацією як множини зв'язків між елементами системи ПНК.

**Ключові слова:** пілотажно-навігаційний комплекс, дестабілізуючі фактори, функціональна стійкість, синтез оптимально розподіленої структури.

### Вступ

**Загальна постановка проблеми та зв'язок з практичними завданнями.** Під пілотажно-навігаційним комплексом (ПНК) розуміють сукупність бортових функціонально об'єднаних інформаційних засобів (датчиків), обчислювально-програмних систем, систем автоматичного управління, систем індикації і сигналізації, призначених для вирішення завдань літаководіння і забезпечення роботи інших бортових систем літального апарату (ЛА).

Структура пілотажно-навігаційного комплексу літального апарату повинна оптимізуватися за єдиним критерієм або комплексом критеріїв, що характеризують якість функціонування за результатами виконання основних поставлених перед комплексом завдань та техніко-економічних і експлуатаційних вимог до нього.

Очікується, що оптимізація ПНК ЛА за критеріями функціональної стійкості дасть можливість: 1) підвищити безпеку польоту ЛА, у тому числі і на граничних режимах; 2) скоротити терміни відпрацювання навичок пілотування у льотного складу завдяки можливості реалізації оптимальних з точки зору ергономіки характеристик керування ЛА.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для різних складних технічних систем на цей час розроблено досить багато методів оптимізації [1–3 та ін.]. За визначенням оптимізація означає вибір найкращого варіанта за одним або за низкою критеріїв, який характеризує ефект від створення і викорис-

тання техніки. При створенні технічної системи намагаються врахувати, за можливістю, усі критерії ефективності. Але розмаїття критеріїв часто приводить до протиріччя між ними.

На цей час важливим напрямком наукових досліджень є подальший розвиток теорії функціональної стійкості та формування показників функціональної стійкості як показників ефективності складних технічних систем. Згідно стратегії забезпечення функціональної стійкості, яка була розроблена професором Машковим О.А., та отримала подальший розвиток у роботах професорів Кравченка Ю.В., Барабаша О.В., Неділька С.М., Обідіна Д.М., функціональна стійкість досягається застосуванням у складній системі різних, вже існуючих, видів надмірності (апаратної, структурної, часової, інформаційної, функціональної, навантажувальної та ін.) шляхом перерозподілу ресурсів з метою парировання наслідків позаштатних ситуацій.

У загальному випадку під функціональною стійкістю мають на увазі збереження деякої властивості процесу функціонування відносно збурювання, або невизначеності деяких параметрів системи, або її математичної моделі. При цьому обов'язково повинен бути обговорений припустимий клас збурень. За результатами досліджень нами у роботах [4–5] були запропоновані нові підходи щодо забезпечення функціональної стійкості пілотажно-навігаційного комплексу (ПНК) літального апарату (ЛА) на окремих режимах польоту, зокрема в умовах впливу ге-

ліогеофізичних збурень [6], було вивчено взаємний вплив зовнішніх дестабілізуючих факторів один на одного та на функціонування складових систем навігаційного забезпечення літальних апаратів.

Основними серед існуючих методів синтезу розподілених структур є наступні [7–8]: 1) синтез структур за критерієм мінімуму вартості при обмеженнях на обсяги переданої інформації  $\phi_{ij} < \rho_{ij}$ , часу передачі повідомлення  $\tau_{\text{сеп}} < T$ , ступеня вузлової зв'язності структури  $\chi(G) > 1$ ; 2) синтез мережі інформаційного обміну на основі визначення основного мінімально-зв'язуючого дерева графу структури; 3) синтез параметрів мережі інформаційного обміну за заданою топологією графу структури. Зазначені методи мають низку недоліків, а саме: обмеженість внаслідок розгляду та дослідження певних класів структур за топологією, використання найбільш простого класу цільових функцій (лінійні, параболічні, монотонні, тощо), що виражають вартість, пропускну здатність або час передачі інформації.

Можливості існуючих на цей час наукових методів синтезу розподілених структур ПНК ЛА не дозволяють забезпечити необхідний рівень їх функціональності в умовах потоку відмов і пошкоджень за мінімум часу. Таким чином, проблема забезпечення ефективного функціонування ПНК ЛА в умовах непередбачуваних дестабілізуючих впливів на сьогоднішній день залишається вирішеною не повністю.

**Метою статті** є розробка методики підвищення ефективності функціонування пілотажно-навігаційного комплексу літального апарату в умовах непередбачуваних дестабілізуючих впливів шляхом синтезу оптимально розподіленої структури за показниками функціональної стійкості з обмеженням на вартість побудови системи.

## Виклад основного матеріалу

У випадку реалізації синтезу на основі використання дискретної оптимізації складних технічних систем, до яких відноситься і ПНК ЛА, дослідження повинні включати послідовне виконання наступних завдань [9–11]: обґрунтування комплексу критеріїв, прийнятних до оцінки різних варіантів побудови системи (показників якості) з визначенням критерію переваги; моделювання різних варіантів з бажаними змінами відомих параметрів системи і розрахунок показників якості; вибір методу оптимізації; визначення області ефективних варіантів на основі розгляду всього комплексу критеріїв, що відображають вимоги до системи ПНК; вибір оптимальних варіантів за сукупністю критеріїв з визначенням раціонального варіанту шляхом застосування пріоритетного критерію переваги.

Під функціональною стійкістю ПНК ЛА будемо розуміти його властивість перебувати у стані

працездатності і виконувати певне цільове завдання або впродовж заданого інтервалу часу, або в умовах потоку відмов через вплив зовнішніх і внутрішніх факторів, можливо із деяким погіршенням своїх характеристик, але зі збереженням виконання хоча б мінімально необхідних функцій.

Необхідна і достатня умова функціональної стійкості [9] ПНК ЛА у такому разі полягає в існуванні такого складу елементів та зв'язків між ними, при якому система продовжувала б виконувати хоча б мінімально необхідні функції в умовах дестабілізуючих впливів, а також мала б достатню надмірність для парирування наслідків позаштатних ситуацій.

Розглянемо пілотажно-навігаційний комплекс як розподілену інтелектуальну систему виду:

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

де безліч вершин  $V$  відповідає безлічі інформаційних (інтелектуальних) модулів ПНК розмірністю  $n$ . Безліч ребер  $L$  відповідає безлічі зв'язків між інформаційними модулями.

Використовуючи досвід використання математичних моделей, побудованих на основі теорії графів для процесу діагностування діагностичний граф моделі ПНК можемо задати у вигляді матриці суміжності:

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

де  $a_{ij}$  – елементи матриці суміжності графа, які мають значення  $1, 2, \dots, n$ , якщо існує ребро,

$$l_{ij} = \{v_i, v_j\} \in L$$

та  $0$  – якщо ребра не існує.

Основними структурними та параметричними критеріями, прийнятними до оцінки різних варіантів побудови системи ПНК ЛА (показників якості) за результатами аналізу робіт [9; 12–13] нами обрано наступні: вид топології вихідного графа, число і розташування вузлів, лінії зв'язку; структурні параметри графа: коефіцієнт надмірності зв'язків  $K_H$ , діаметр графа  $D$ , коефіцієнт централізованості  $K_C$ ; вартість витрат на лінії зв'язку; показники функціональної стійкості ПНК ЛА: ступінь вершинної зв'язності  $\chi(G)$ , ступінь реберної зв'язності  $\lambda(G)$ , ймовірність зв'язності  $P_{ij}$ , запас функціональної стійкості: вершинний запас функціональної стійкості  $Z_V$  і реберний запас функціональної стійкості  $Z_E$ .

Коефіцієнт надмірності зв'язків (відношення різниці числа зв'язків у структурі  $M$  і мінімально-необхідного числа  $M_{\text{мін}}$  зв'язків для забезпечення зв'язності графа до значення  $M_{\text{мін}}$ ) за даними роботи [12] визначається як:

$$K_H = \frac{M - M_{\text{мін}}}{M_{\text{мін}}} = \frac{M}{N-1} - 1, \quad (3)$$

де  $M_{\min} = N - 1$  – число ребер у деревоподібному графі;  $N$  – число вершин графу.

Діаметр графа характеризує кількість ліній зв'язку (ЛЗ), що входять до маршрута максимальної довжини [13]:

$$D = \max_{i,j} \{ d_{ij} \}, \quad i, j = 1, \overline{N}, i \neq j, \quad (4)$$

де  $d_{ij}$  – кількість ЛЗ, які входять до найдовшого маршруту між  $v_i$  і  $v_j$ .

Коефіцієнт централізованості характеризує нерівномірність завантаження елементів системи і визначається за даними роботи [8] як:

$$K_{ц} = \frac{(N-1)(2Z_{\max} - N)}{Z_{\max}(N-2)}, \quad (5)$$

де

$$Z_{\max} = \max_i \left\{ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N d_{ij} \right\}. \quad (6)$$

Вартість витрат на лінії зв'язку (ЛЗ) на передачу даних може бути обчислена як:

$$C_{лз} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N C_{ij} \cdot a_{ij}, \quad (7)$$

де  $a_{ij}$  – елементи матриці суміжності структури ПНК ЛА;  $C_{ij}$  – вартість витрат на капітальні вкладення і експлуатацію прямого каналу зв'язку між елементами  $v_i$  і  $v_j$ .

Для оцінки ймовірності зв'язності  $P_{ij}$  значення ймовірності існування лінії зв'язку ЛЗ (ймовірність передачі інформації між суміжними  $v_i$  та  $v_j$  з ЛЗ  $l_{ij}$ ) варіює у межах  $p \in [0,5; 0,95]$ .

Запас функціональної стійкості  $P_{запас\ фс}$  ПНК ЛА за даними роботи [9] може бути обчислений як:

$$P_{запас\ фс} = 1 - P \{ F_{\tau} [ z(\alpha, t), t \leq \tau ] \in B_{A_1}^{\tau} \}, \quad (8)$$

де  $P \{ F_{\tau} [ z(\alpha, t), t \leq \tau ] \in B_{A_1}^{\tau} \}$  – множина показників функціональної стійкості;  $F_{\tau} = F_{\tau} [ z(\alpha, t), t \leq \tau ] \in B_{A_1}^{\tau}$  – однопараметричне сімейство дійсних функціоналів;  $z(\alpha, t)$  – внутрішній стан системи, що є елементом фазового простору  $Z$ ;  $\alpha$  – параметр системи ПНК,  $\alpha \in A$ , – де  $A$  – простір параметрів;  $t$  – поточний час,  $t \in I$ , де  $I$  – сукупність розглянутих моментів часу;  $\tau$  – інтервал часу, на якому оцінюється функціональна стійкість;  $B_{A_1}^{\tau}$  – множина значень усіх функцій з  $B$ , розглянутих у точці  $\tau$ ;  $0 \leq \varepsilon \leq 1$  – деяке число.

Цей критерій функціональної стійкості вимагає, щоб деяка властивість ПНК ЛА зберігалась у тому чи іншому ймовірнісному сенсі на заздалегідь обраному інтервалі часу.

Основними причинами низького рівня функціональної стійкості ПНК ЛА можуть бути [9]: ієрархічна деревоподібна структура системи передачі даних (СПД) з малим числом альтернативних маршрутів, низький ступінь вершинної зв'язності  $\chi(G) \leq 2$ , якій не дозволяє здійснювати функціонування СПД при виході з ладу або руйнуванні більше двох вузлів комутації; низький ступінь реберної зв'язності  $\lambda(G) \leq 3$ , що не дозволяє здійснювати функціонування СПД при виході з ладу або руйнуванні більше трьох ліній зв'язку; низька ймовірність зв'язності структури, що не дозволяє зберігати зв'язність структури при впливі внутрішніх та зовнішніх дестабілізуючих факторів; низький запас функціональної стійкості структури.

У якості критерію переваги ми оберемо узагальнений показник функціональної стійкості  $F_{пнк\ ла}$ , обчислений на основі матриці ймовірностей суміжності з урахуванням вагових коефіцієнтів  $b_{ij}$ , що максимізується:

$$F_{пнк\ ла} = f(P_{ij}) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N b_{ij} \cdot P_{ij}, \quad (9)$$

де  $F_{пнк\ ла}$  – функціонал якості системи;  $b_{ij}$  – вагові коефіцієнти;  $P_{ij}$  – ймовірність зв'язності двополюсного графа із вершиною витокком  $v_i$  і вершиною стоком  $v_j$ ;  $N$  – число вершин графу.

Функціонал якості системи, що максимізується має розраховуватися за матрицею ймовірностей суміжності з урахуванням вагових коефіцієнтів  $b_{ij}$ , які визначаються на базі використання методу експертних оцінок після ранжування різних напрямків передачі даних за їхньою важливістю. Ймовірність зв'язності двополюсного графа з вершиною-витокком і вершиною стоком обчислюється алгоритмічним способом на основі модернізованих оцінок Поліського [8]. У роботі [9] доведено, що точне визначення ймовірності зв'язності  $P_{ij}$  аналітичним методом для розгалужених та насичених мереж недоцільно, а в деяких випадках й неможливо.

Нехай обмін інформацією між елементами ПНК ЛА, базою знань валідних параметрів роботи елементів системи пілотажно-навігаційного комплексу здійснюється згідно до матриці інтенсивності  $Q = \|q_{ij}\|$  розміру  $N \times N$ , де  $q_{ij}$  – обсяг інформації, що передається від блока і до блока  $j$  в одиницю часу,  $i=1, \dots, N, j=1, \dots, N, i \neq j$ .

Обмеження оптимізації задамо за відомою функцією вартості побудови системи  $C$  шляхом визначення допустимих витрат за індексом заданої вартості  $\varepsilon = 1, 2, \dots, n$ , на її створення і експлуатацію  $C_{доп}$ . Основними показниками функціональної стійкості є: 1) ступінь вершинної зв'язності  $\chi(G) \geq 2$ , 2) ступінь реберної зв'язності  $\lambda(G) \geq 3$ , 3) необхідні значення ймовірності зв'язності  $P_{потр}$ .

Оскільки нам потрібно визначити оптимальну структуру розподіленої ПНК ЛА, яка характеризується максимальним рівнем функціональності  $F_{\text{ПНК ЛА}}$ , що залежить від імовірності зв'язності  $P_{ij}$ , при заданих обмеженнях на витрати для створення і експлуатації системи, а також інші параметри функціонування системи, то математична модель синтезу буде виглядати наступним чином:

$$F_{\text{ПНК ЛА}} = f(P_{ij}) \rightarrow \max, \quad i, j, \dots, N, \quad i \neq j \quad (10)$$

при обмеженнях:

$$\begin{aligned} C = \sum_i \sum_j C_{ij} (l_{ij}, \rho_{ij}, q_{ij}) &\leq C_{\text{доп}}; \\ \forall \pi_{ij} \quad P_{ij} &\geq P_{\text{потр}}; \\ \chi(G) &\geq 2; \lambda(G) \geq 3; \\ G_0(V, E) &\subseteq G_\varepsilon(V, L); \\ \phi_{ij} &\leq \rho_{ij}; \\ \tau_{\text{сер}} &\leq T_{\text{max}}, \end{aligned}$$

де  $N$  – число блоків комутації ПНК ЛА, що синтезуються;  $F_{\text{ПНК ЛА}}$  – функціонал якості системи, що максимізується;  $P_{ij}$  – ймовірність зв'язності між парою  $(i, j)$  елементів системи;  $\pi_{ij}$  – усі маршрути значення ймовірності зв'язності  $P_{ij}$ ;  $\chi(G)$  – ступінь вершинної зв'язності;  $\lambda(G)$  – ступінь реберної зв'язності;  $l_{ij}$  – довжина лінії зв'язку між елементами  $(i, j)$ ;  $\phi_{ij}$  – обсяг потоку інформації, що передається;  $\rho_{ij}$  – пропускна здатність;  $\varepsilon$  – індекс заданої вартості,  $\varepsilon = 1, 2, \dots, n$ , що передбачає знаходження декількох структур заданої вартості  $C_{\text{доп}\varepsilon}$  для оптимізації та нарощування структури системи,  $\tau_{\text{сер}}$  – середній час затримки оповіщення, що передається від одного елемента до іншого.

Визначення оптимального варіанту моделі ПНК ЛА буде здійснюватись за критерієм максимуму показника функціональної стійкості  $F_{\text{ПНК ЛА}}$ , обраного у якості критерію переваги з обмеженням на вартість побудови системи.

У загальному випадку потрібна оптимізація системи і визначення її вигляду на основі усього зазначеного комплексу критеріїв функціональної стійкості та тих, що відображують умови до системи ПНК ЛА ( $F_{\text{ПНК ЛА}}$ ), і коли кожний з них виступає самостійно. У такому випадку остаточне оптимальне та найбільш раціональне проектне рішення може бути обрано: 1) шляхом аналізу області ефективних варіантів; 2) шляхом компромісного варіанту із застосуванням обраного критерію переваги із комплексу критеріїв функціональної стійкості.

Проведений аналіз структури графа обраного нами для дослідження пілотажно-навігаційного комплексу (рис. 1, табл. 1, 2) дозволив зробити наступні висновки:

1. Вихідна структура графа ПНК ЛА змішана, на окремих ділянках має деревоподібну ієрархічну

структуру з додатковими лініями зв'язку. Граф структури ПНК ЛА однокомпонентний, зв'язний (рис. 1). У структурі графа  $M=71$  лінія зв'язку. Структура складається з  $N=38$  вузлів, які з'єднані лініями зв'язку (рис. 1, табл. 1–2).

2. Структурні параметри графа ПНК ЛА.

Коефіцієнт надмірності зв'язків, що розрахований за формулою (3), дорівнює:

$$KN = (71/(38 - 1)) - 1 = 0,92.$$

Діаметр графа ПНК ЛА, що розрахований за виразом (4), дорівнює  $D=15$ :

$$(11 \Rightarrow 34 \Rightarrow 32 \Rightarrow 33 \Rightarrow 15 \Rightarrow 21 \Rightarrow 22 \Rightarrow 19 \Rightarrow 23 \Rightarrow 24).$$

3. Коефіцієнт централізованості, що розрахований за виразом (5), дорівнює:  $K_{\text{Ц}} = 0,948$ .

4. За показниками функціональної стійкості максимальний ступінь вершинної зв'язності графу ПНК ЛА  $\chi_{\text{max}}(G)$  дорівнює 16, мінімальний ступінь вершинної зв'язності  $\chi_{\text{min}}(G)$  – дорівнює 1, максимальний ступінь реберної зв'язності  $\lambda_{\text{max}}(G)$  – дорівнює 4, мінімальний ступінь реберної зв'язності  $\lambda_{\text{min}}(G)$  – дорівнює 1 (рис. 1). Для структури ПНК вершинний запас функціональної стійкості  $Z_V$  і реберний запас функціональної стійкості  $Z_E$  дорівнює: для 18 елементів ПНК ЛА  $Z_{V_i}=0$  та  $Z_{E_i}=0$ .

Таким чином, вихідна структура розглянутого ПНК ЛА підлягає оптимізації для підвищення проблем її захищеності від збоїв, відмов, зокрема відмов від структурної надмірності та підвищення функціональної стійкості в умовах дестабілізуючих впливів.

Виконаємо синтез структури обраного для дослідження ПНК ЛА.

Задано.

Вихідна структура ПНК ЛА у вигляді графу  $G_0(V, L)$ , що складається із  $N = 38$  вершин (рис. 1).

Матриця суміжності  $A = \{a_{ij}\}$  графу  $G_0(V, L)$ , що представлена у табличному вигляді (табл. 1).

Ймовірність передачі інформації між парою елементів  $v_i$  і  $v_j$  дорівнює  $p = 0,9$ .

Потрібно визначити. Оптимальну структуру ПНК ЛА  $G_\varepsilon(V, L)$ ,  $\varepsilon = 1, 2, \dots, 4$ , за виразом (10) з наведеними до нього обмеженнями. Для цього попередньо виконати математичне моделювання декількох оптимізованих структур пілотажно-навігаційного комплексу для різних значень вартості побудови системи  $C_{\text{доп}\varepsilon}$ :

для  $\varepsilon = 1$ : визначити  $G_1(V, L)$  з  $C_{\text{доп}1} = 10\,000$  н.у.о.;

для  $\varepsilon = 2$ : визначити  $G_2(V, L)$  з  $C_{\text{доп}2} = 20\,000$  н.у.о.;

для  $\varepsilon = 3$ : визначити  $G_3(V, L)$  з  $C_{\text{доп}3} = 50\,000$  н.у.о.;

для  $\varepsilon = 4$ : визначити  $G_4(V, L)$  з  $C_{\text{доп}4} = 100\,000$  н.у.о.

та для різних значень ймовірності передачі інформації між парою елементів  $v_i$  і  $v_j$  з подальшим вибором найбільш оптимального варіанта оптимально розподіленої структури ПНК ЛА.



Значення  $\delta_i$  – локального ступеня  $i$ -тої вершини вихідної структури ПНК ЛА  $G_0(V,L)$ 

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
$\delta_i$	1	1	1	1	1	3	1	3	1	1	1	1	1	1	8	3	1	1	30
	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
$\delta_i$	6	9	2	9	2	2	4	5	2	1	1	2	5	4	2	2	1	4	3

Припущення завдання синтезу. Синтез ПНК ЛА здійснюється за умови виконання наступних припущень:

1. Структури, що синтезуються  $G_\varepsilon(V,L)$ ,  $\varepsilon = 1,2,\dots,4$ , не повинні мати кратних ребер.

2. Усі лінії зв'язку вихідної структури  $G_0(V,L)$  повинні бути збережені у синтезованих структурах  $G_\varepsilon(V,L)$ .

3. Структури, що синтезуються не повинні мати заборонених ліній зв'язку.

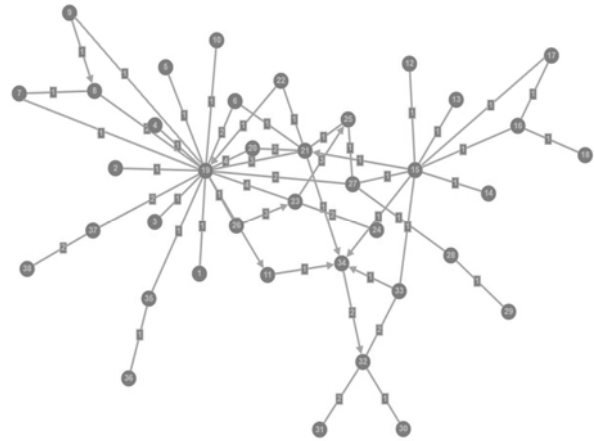
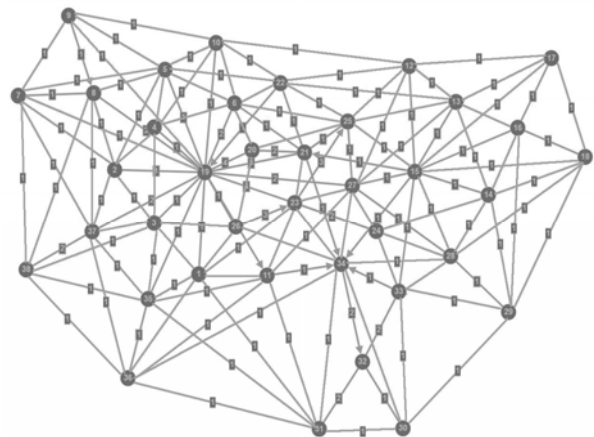
4. Пропускна спроможність одного каналу передачі інформації приймається  $\rho_{ij} > q_{ij}$ , де  $q_{ij}$  – інтенсивність інформаційного обміну між елементами  $v_i$  і  $v_j$ .

5. Вагові коефіцієнти  $b_{ij}$  у виразі (10) для спрощення прийнято  $b_{ij}=1$ ,  $i, j=1,\dots,N$ .

Умови експерименту. Синтез ПНК ЛА здійснюється для різних допустимих значень вартості побудови системи  $C_{\text{Доп}}$ : 10 000 н.у.о., 20 000 н.у.о., 50 000 н.у.о., 100 000 н.у.о. Значення ймовірності передачі інформації  $p$  приймається однаковим для усіх каналів інформаційного обміну і дорівнює  $p=0,9$ .

Рішення задачі синтезу здійснювалось за допомогою розробленого програмного комплексу NET\_1 (Delphi 6.0). В основу програмування задачі синтезу було покладено запропонований нами алгоритм оптимізації структури ПНК ЛА.

Аналіз графів отриманих оптимізованих структур  $G_\varepsilon(V,L)$ ,  $\varepsilon = 1,2,\dots,4$  показав, що усі вони суттєво відрізняються від графу вихідної структури ПНК ЛА  $G_0(V,L)$  (рис. 2-6) додатковими каналами передачі інформації, що у разі необхідності дозволяє використовувати альтернативні лінії зв'язку для інформаційного обміну.

Рис. 2. Граф вихідної структури ПНК ЛА  $G_0(V,L)$ Рис. 3. Граф синтезованої структури ПНК ЛА  $G_1(V,L)$  з  $C_{\text{Доп}}=10\,000$  н.у.о.Рис. 4. Граф синтезованої структури ПНК ЛА  $G_2(V,L)$  з  $C_{\text{Доп}}=20\,000$  н.у.о.Рис. 5. Граф синтезованої структури ПНК ЛА  $G_3(V,L)$  з  $C_{\text{Доп}}=50\,000$  н.у.о.

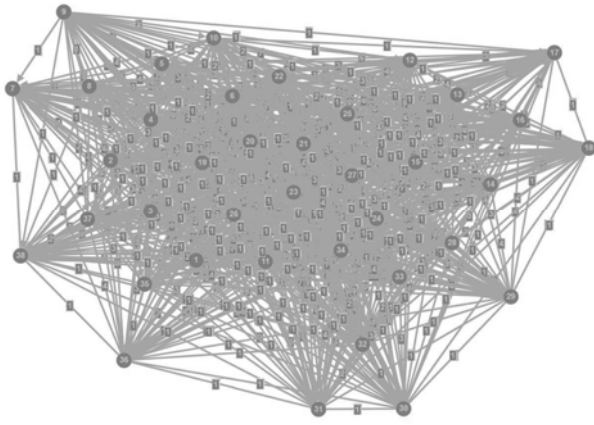


Рис. 6. Граф синтезованої структури ПНК ЛА  $G_4(V,L)$  з СДоп = 100 000 н.у.о.

Розраховані за виразами (3–7) структурні показники оптимізованих структур обраного для дослідження пілотажно-навігаційного комплексу ЛА (рис. 3–6) наведено у табл. 3.

Таблиця 3

Структурні показники оптимізованих структур ПНК ЛА

Структура $G_\epsilon(V, L)$	С <sub>доп</sub> тис. н.у.о.	Число ЛЗ	Діаметр графа D	Коефіцієнт централізації $K_c$	Коефіцієнт надмірності $K_n$	Вартість С н.у.о.
$G_1(V, L)$	10	74	15	0,932	1,000	9894
$G_2(V, L)$	20	87	15	0,803	1,087	25432
$G_3(V, L)$	50	179	14	0,518	1,395	50315
$G_4(V, L)$	100	419	13	0,415	4,583	209631

Аналіз динаміки зміни структурних показників (табл. 3) оптимізованих структур дозволяє зробити наступні висновки:

- 1) при підвищенні заданої вартості С<sub>доп</sub> підвищується число ліній зв'язку M та водночас пропорційно підвищується і коефіцієнт надмірності  $K_n$ ;
- 2) зниження діаметра графа оптимізованих структур не є пропорційним щодо витраченої вартості, для найбільш розгалуженої структури  $G_4(V,L)$  діаметр графа досягає значення  $D = 13$ ;
- 3) коефіцієнт централізації, що характеризує нерівномірність завантаження елементів системи, також знижується із зростанням С<sub>доп</sub> і досягає прийнятних значень  $K_c \leq 0,5$  при  $C_{доп} \geq 50\ 000$  н.у.о.

Наведені на рис. 7-11 розраховані графіки залежностей ймовірності зв'язності  $P_{ij}$  від ймовірності передачі інформації  $p$  для вихідної структури  $G_0(V,L)$  ПНК ЛА (рис. 6) та синтезованих структур  $G_\epsilon(V,L)$  з С<sub>доп1</sub> = 10 000 н.у.о. (рис. 7), С<sub>доп2</sub> = 20 000 н.у.о. (рис. 8), С<sub>доп3</sub> = 50 000 н.у.о. (рис. 9), С<sub>доп4</sub> = 100 000 н.у.о. (рис. 10) дозволяють зробити

висновок, що для усіх оптимізованих структур ПНК ЛА при зростанні параметра  $p$  значення  $P_{ij}$  також зростає.

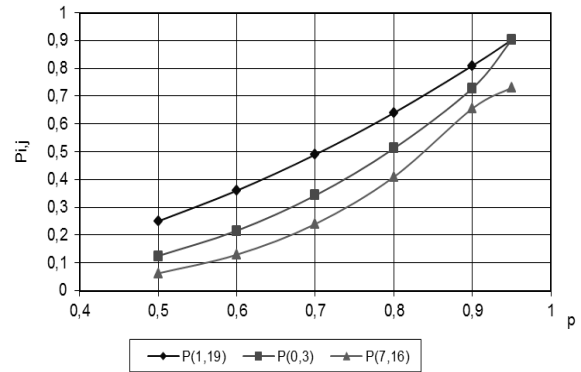


Рис. 7. Залежність ймовірностей зв'язності P1,19, P0,3, P7,16 від ймовірності передачі інформації  $p$  для вихідної структури  $G_0(V,L)$  ПНК ЛА

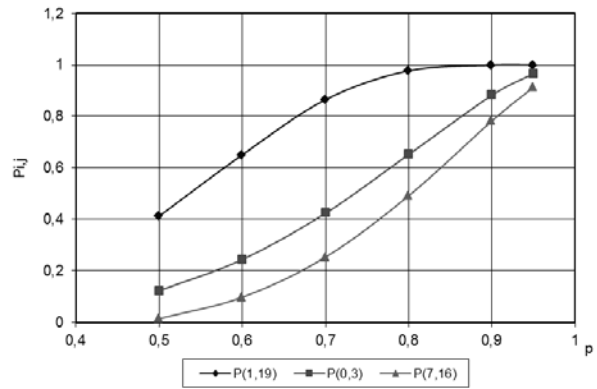


Рис. 8. Залежність ймовірностей зв'язності P1,19, P0,3, P7,16 від ймовірності передачі інформації  $p$  для вихідної структури  $G_1(V,L)$  ПНК ЛА з СДоп = 10 000 н.у.о.

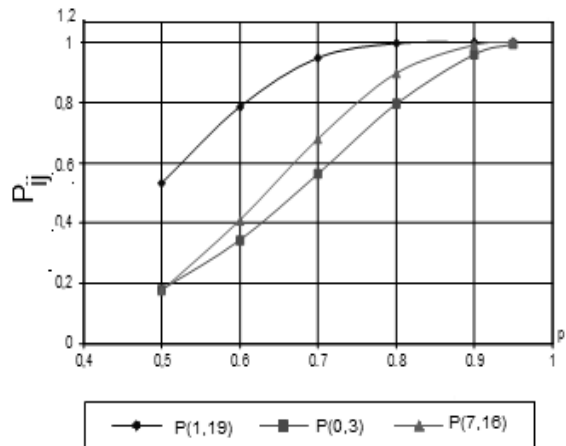


Рис. 9. Залежність ймовірностей зв'язності P1,19, P0,3, P7,16 від ймовірності передачі інформації  $p$  для вихідної структури  $G_2(V,L)$  ПНК ЛА з СДоп = 20 000 н.у.о.

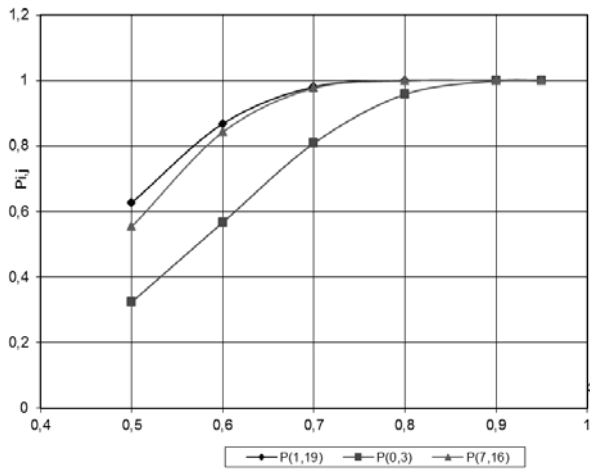


Рис. 10. Залежність ймовірностей зв'язності  $P_{1,19}$ ,  $P_{0,3}$ ,  $P_{7,16}$  від ймовірності передачі інформації  $p$  для оптимізованої структури  $G_3(V,L)$  ПНК ЛА з СДОП = 50 000 н.у.о.

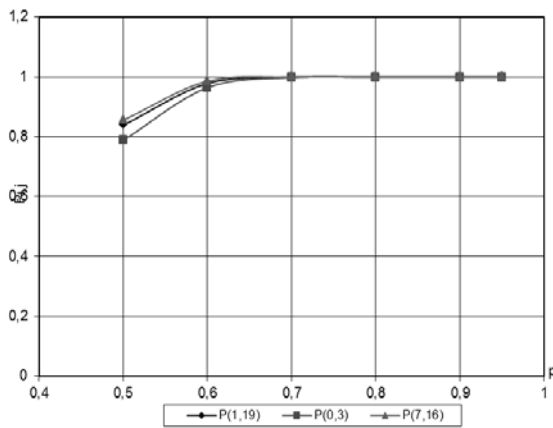


Рис. 11. Залежність ймовірностей зв'язності  $P_{1,19}$ ,  $P_{0,3}$ ,  $P_{7,16}$  від ймовірності передачі інформації  $p$  для оптимізованої структури  $G_4(V,L)$  ПНК ЛА з СДОП = 100 000 н.у.о.

Для структур  $G_3(V,L)$  та  $G_4(V,L)$ , графіки залежностей ймовірності зв'язності  $P_{ij}$  від ймовірності передачі інформації  $p$  мають яскраво виражений характер насичення: для  $G_3$  починаючи із значень показника  $p \geq 0,9$ , а для  $G_4$  починаючи із значень показника  $p \geq 0,65$ . Очевидно, що для досягнення заданого рівня ймовірності зв'язності  $P_{ij}$  на окремих напрямках потрібно насичувати структуру ПНК ЛА додатковими лініями зв'язку, а не підвищувати значення ймовірності передачі інформації  $p$  по кожному із каналів.

Аналіз показників якості функціонування отриманих оптимізованих структур пілотажно-навігаційного комплексу  $G_\varepsilon(V,L)$   $\varepsilon = 1,2, \dots, 4$ , дозволив зробити висновок, що виведення структури дослідженого ПНК ЛА у прийнятну область функціонування можна здійснити лише після оптимізації з об'ємом вартості  $C_{\text{доп}} \geq 50\,000$  н.у.о. (табл. 4).

Таблиця 4

Показники якості функціонування синтезованих структур ПНК ЛА

Структура $G_\varepsilon(V,L)$	Рисунк	$C_{\text{доп}}$ тис. н.у.о.	$\chi(G)$	$\lambda(G)$	$Z_V$	$Z_L$	Область функціонування
$G_1(V,L)$	3	10	1	1	0	0	не прийнятна
$G_2(V,L)$	4	20	2	2	1	0	не прийнятна
$G_3(V,L)$	5	50	5	5	4	3	прийнятна
$G_4(V,L)$	6	100	13	13	12	11	прийнятна

За результатами аналізу отриманих значень узагальненого показника якості функціонування системи (табл. 5)  $F_{\text{ПНК ЛА}}(P_{ij})$  залежно від ймовірності передачі інформації  $p$  можна зробити висновок про його незначну чутливість до зміни допустимої вартості структури у області відносно високих значень показника  $p$  ( $p = 0,9 \dots 0,95$ ).

Таблиця 5

Значення узагальненого показника якості функціонування  $F_{\text{ПНК ЛА}}(P_{ij})$

Структура $G_\varepsilon(V,L)$	$C_{\text{доп}}$ тис. н.у.о.	Для значень ймовірності $p$					
		$p=0,5$	$p=0,6$	$p=0,7$	$p=0,8$	$p=0,9$	$p=0,95$
$G_0(V,L)$		64,5	99,82	143,4	203,2	284,8	315,7
$G_1(V,L)$	10	67,8	127,5	210,5	278,5	341,7	367,8
$G_2(V,L)$	20	123,1	199,8	285,4	351,6	378,4	381,5
$G_3(V,L)$	50	174,6	275,1	345,9	375,4	381,7	382,0
$G_4(V,L)$	100	325,1	373,4	379,9	382,0	382,0	382,0

Водночас, зниження значень ймовірності передачі інформації  $p$  приводить до необхідності більш високих витрат на побудову додаткових каналів інформаційного обміну для забезпечення потрібної якості функціонування ПНК ЛА. Але можливим альтернативним підходом підвищення якості функціонування ПНК ЛА за умови обмеженні вартості може бути забезпечення оптимального диференційованого підвищення показника  $p$  окремо для кожного каналу інформаційного обміну між його модулями.

Найбільш прийнятною за узагальненим показником якості функціонування  $F_{\text{ПНК ЛА}}(P_{ij})$  як пріоритетного (табл. 5) та з додатковим урахуванням наступних структурних показників — діаметр графа, коефіцієнт централізації, коефіцієнт надмірності (табл. 3), показників якості функціонування синтезованих структур ПНК ЛА: ступінь вершинної зв'язності, ступінь реберної зв'язності, вершинний запас стійкості; реберний запас стійкості (табл. 4) є оптимізація структури обраного для дослідження ПНК ЛА (рис. 1) для заданої умовної вартості



$C_{\text{доп}} = 50\,000$  н.у.о. Оптимізація дозволила отримати приріст узагальненого показника якості функціонування  $F_{\text{ПНК ЛА}}(P_{ij})$  для значень ймовірності  $p = 0,95$  на 21,0 % порівняно з вихідною структурою (табл. 5) за умови  $p = 0,9$  з прийнятним значенням коефіцієнту централізації  $K_{ц} = 0,518$  ( $K_{ц} \leq 0,5$ ) (табл. 3). При вартості оптимізованої системи ПНК ЛА  $C_{\text{доп}} \geq 100\,000$  н.у.о (при  $p > 0,6$ ) (табл. 5) оптимізація не приводить до суттєвого підвищення рівня узагальненого показника функціональної стійкості структури, що робить недоцільним використання значних фінансових вкладень ( $C_{\text{доп}} \geq 100\,000$  н.у.о) для реорганізації існуючої системи ПНК ЛА.

## Висновки

У статті запропоновано удосконалену методику реалізації синтезу оптимально розподіленої структури ПНК ЛА в умовах дестабілізуючих впливів шляхом застосування методів оптимізації структури пілотажно-навігаційного комплексу за критерієм максимуму узагальненого показника якості функціонування  $F_{\text{ПНК ЛА}}(P_{ij})$ , обраного у якості критерію переваги з комплексу критеріїв функціональної стійкості з обмеженням на вартість побудови системи.

На відміну від існуючих для складних технічних систем, реалізація запропонованої методики синтезу оптимально-розподіленої структури пілотажно-навігаційного комплексу дозволила з множини допустимих варіантів обрати компромісний і водночас найбільш раціональний з урахуванням можливих позаштатних ситуацій в умовах дестабілізуючих впливів та за рахунок цього підвищити значення показників його функціональної стійкості до досяжного рівня без значних витрат.

Проведена експериментальна оцінка отриманих теоретичних результатів шляхом математичного моделювання оптимізованих функціонально стійких моделей ПНК ЛА підкреслює перспективність подальшого розвитку обраного напрямлення досліджень для теорії та практики удосконалення систем пілотажно-навігаційного комплексу літального апарату.

Одержані результати можуть бути використані при розробці та удосконаленні інших видів ПНК ЛА, оскільки вони зазвичай синтезуються із введенням оптимальної структурної надмірності. Підвищення ефективності ПНК ЛА може бути досягнуто шляхом перерозподілу параметрів системи між елементами з адаптацією до конкретних умов обстановки у разі непередбачених дестабілізуючих впливів.

## Список літератури

1. Артюшин Л.М. Оптимизация цифровых автоматических систем, устойчивых к отказам / Л.М. Артюшин, О.А. Машков. – К.: КВВАИУ, 1991. – 89 с.
2. Boehm B.W. Software cost estimation with COCOMO II / B.W. Boehm. – New Jersey: Prentice Hall PTR, 2000. – 506 p.
3. Hosam M.F. A Neural Approach to Topological Optimization of Communication Networks, With Reliability Constraints / M.F. Hosam, S. Al-Sumait Loulwa // IEEE Transactions on Reliability. – December 2001. – Vol. 50. – No. 4. – P. 397-408.
4. Калашник М.А. Постановка задачи обеспечения функциональной устойчивости пилотажно-навигационного комплекса летательного аппарата на отдельных режимах полета / М.А. Калашник, Д.Н. Обидин // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2015. – Вип. 4 (36). – С. 27-30.
5. Калашник М.А. Забезпечення стійкого функціонування засобів навігації літальних апаратів під впливом зовнішніх дестабілізуючих факторів / Г.А. Калашник, Д.М. Обідін, М.А. Калашник // Системи обробки інформації. – 2016. – Вип. 3 (140). – С. 52-56.
6. Калашник Г.А. Основні заходи щодо забезпечення ефективного функціонування систем управління, зв'язку та навігації в умовах впливу деструктивних геологічних збурень / Г.А. Калашник, М.А. Калашник-Рибалко // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних сил України. – 2018. – №1. – С. 92-98.
7. Fitzgerald Kent Reliability Modeling and Assessment of the Star-Graph Networks / Fitzgerald Kent, Latifi Shahram, Srimani Pradip K. // IEEE Transactions on Reliability, March 2002. – Vol. 51. – No. 1. – P. 49-57.
8. Олифер В.Г. Компьютерные сети. Принципы технологии, протоколы / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер. – С.-Пб.: Питер, 1999. – 668 с.
9. Неділько С.М. Основи теорії функціональної стійкості автоматизованої системи управління повітряним рухом / С.М. Неділько. – Кіровоград: ДЛАУ, 2011. – 220 с.
10. Mashkov V.A. Self-checking and Self-diagnosis of Module Systems on the Principle of Walking Diagnostic Kernel / V.A. Mashkov, O.V. Barabash // Engineering Simulation. – Amsterdam: OPA, 1998. – Vol. 15. – P. 43-51.
11. Барабаш О.В. Методика обнаружения отказов в вычислительных системах на основе блуждающего диагностического ядра / О.В. Барабаш, М.В. Куклинский // Проблемы информатизации та управління. – 2005. – №12. – С. 22-27.
12. Николаев В.И. Системотехника: методы и приложения / В.И. Николаев, В.М. Брук. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1985. – 199 с.
13. Оре О. Графы и их приложение / О. Оре. – М.: Эдиториал, 2003. – 340 с.

## References

1. Artyushin, L.M. and Mashkov, O.A. (1991), "Optimizatsiya tsifrovyykh avtomaticheskikh sistem, ustoychivyykh k otkazam" [Optimization of digital automatic systems, resistant to failures], KVVAIU, Kiev, 89 p.
2. Boehm, B.W. (2000), *Software cost estimation with COCOMO II*, New Jersey, Prentice Hall PTR, 506 p.
3. Hosam, M.F. and Al-Sumait Loulwa, S. (2001), A Neural Approach to Topological Optimization of Communication Networks, With Reliability Constraints, *IEEE Transactions on Reliability*, December 2001, Vol. 50, No. 4, pp. 397-408.
4. Kalashnyk, M.A. and Obidin, D.M. (2015), "Postanovka zadachi obespecheniya funktsionalnoy ustoychivosti pilotazhno-navigatsionnogo kompleksa letatel'nogo aparata na otdelnykh rezhimakh poleta" [Establishment of the task of ensuring the functional stability of the aeronautical navigational complex of the aircraft on individual flight modes], *Control, Navigation and Communication Systems*, No. 4(36), pp. 27-30.
5. Kalashnyk, G.A., Obidin, D.M. and Kalashnyk, M.A. (2016), "Zabezpechennia stiikoho funktsionuvannia zasobiv navihatsii litalnykh aparativ pid vplyvom zovnishnikh destabilizuyuchykh faktoriv" [Provision of stable of aircraft navigation aids under the influence of destabilizing factors], *Information Processing Systems*, No. 3 (140), pp. 52-56.
6. Kalashnyk, G.A. and Kalashnyk-Rybalko, M.A. (2018), "Osnovni zakhody shchodo zabezpechennia efektyvnoho funktsionuvannia system upravlinnia, zviazku ta navihatsii v umovakh vplyvu destruktivnykh helioheofizychnykh zburon" [Main activities to ensure the efficient of management, communication and navigation systems under the influence of destructive heliogeophysical disturbances], *Science and Technology of the Air Forces of Ukraine*, No. 1, pp. 92-98.
7. Fitzgerald, Kent, Latifi, Shahram and Srimani, Pradip K. (2002), Reliability Modeling and Assessment of the Star-Graph Networks, *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 51, No. 1, pp. 49-57.
8. Olifer, V.G. and Olifer, N.A. (1998), "Kompyuternuie seti. Printsipyi tehnologii, protokoly" [Computer networks. Principles of technology, protocols], Peter, S.-Pb., 668 p.
9. Nedilko, S.M. (2011), "Osnovy teorii funktsionalnoi stiikosti avtomatyzovanoi systemy upravlinnia povitrianyim rukhom" [Basic theory of functional stability automated air traffic management system], DLAU, Kirovohrad, 220 p.
10. Mashkov, V.A. and Barabash, O.V. (1998), Self-checking and Self-diagnosis of Module Systems on the Principle of Walking Diagnostic Kernel, *Engineering Simulation*, Amsterdam, OPA, Vol. 15, pp. 43-51.
11. Barabash, O.V. and Kuklinskiy, M.V. (2005), "Metodika obnaruzheniya otkazov v vychislitelnykh sistemah na osnove bluzhdayushchego diagnosticheskogo yadra" [Method for detection of failures in computing systems based on the roaming diagnostic core], *Problems of informatization and management*, No. 12, pp. 22-27.
12. Nikolaev, V.I and Brook, V.M. (1985), "Sistemotekhnika: metody i prilozheniya" [System engineering: methods and applications], Mechanical Engineering, Leningrad Branch, Leningrad, 199 p.
13. Ore, O. (2003), "Grafyi i ih prilozhenie" [Graphs and their application], Editorial, Moscow, 340 p.

Надійшла до редколегії 14.02.2018

Схвалена до друку 17.04.2018

### Відомості про автора:

**Калашник-Рибалко Мирослава Анатоліївна**  
аспірант  
Льотна академія  
Національного авіаційного університету,  
Кропивницький, Україна  
<https://orcid.org/0000-000-0997-9609>

### Information about the author:

**Myroslava Kalashnyk-Rybalko**  
Postgraduate Student  
of Flight Academy  
of National Aviation University,  
Kropyvnytskyi, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-000-0997-9609>

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПТИМАЛЬНО РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СТРУКТУРЫ ПИЛОТАЖНО-НАВИГАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В УСЛОВИЯХ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ВЛИЯНИЙ

М.А. Калашник-Рыбалко

В статье представлено обоснование комплекса критериев, приемлемых для оценки различных вариантов построения системы (показателей качества) пилотажно-навигационного комплекса (ПНК) летательного аппарата (ЛА) с определением приоритетного критерия. Обоснован метод оптимизации. Представлены результаты математического моделирования синтезированных структур выбранного для исследования пилотажно-навигационного комплекса ЛА. Выбраны оптимальные варианты ПНК ЛА по совокупности критериев с определением наиболее рационального варианта путем применения приоритетного критерия с дополнительным определением запаса функциональной устойчивости. Научная новизна полученных результатов состоит в следующем: усовершенствована методика повышения эффективности функционирования ПНК ЛА в условиях дестабилизирующих воздействий посредством реализации синтеза его оптимально распределенной структуры путем применения методов оптимизации по критерию максимума показателя функциональной устойчивости с ограничением по стоимости построения системы. В отличие от существующих,

предложенная методика позволяет из множества допустимых вариантов выбрать компромиссный и одновременно наиболее рациональный с учетом возможных нештатных ситуаций в условиях дестабилизирующих воздействий путем учета вероятностного характера интенсивности обмена информацией как множества связей между элементами системы ПНК.

**Ключевые слова:** пилотажно-навигационный комплекс, дестабилизирующие факторы, функциональная устойчивость, синтез оптимально распределенной структуры.

## IMPROVING THE EFFECTIVENESS OF OPTIMALLY DISTRIBUTED STRUCTURE OF AIRCRAFT FLIGHT AND NAVIGATION COMPLEX IN CONDITIONS OF DESTABILIZING IMPACTS

M. Kalashnyk-Rybalko

*The subject matter of the article is the processes of synthesis of the optimally distributed structure of aircraft flight and navigation complex for solved applied problems of improving the effectiveness of functioning in conditions of destabilizing impacts. The goal is to develop a method for improving the effectiveness of optimally distributed structure of aircraft flight and navigation complex in conditions of unpredictable destabilizing impacts. The tasks to be solved are: 1) to develop a method of optimal distribution of structure of aircraft flight and navigation complex on the indicators of functional stability in order to limitation the cost; 2) to select an effective algorithm for optimization it; 3) mathematical modeling of optimal structures selected for the study of aircraft flight and navigation complex. The methods used are: mathematical optimization models, method of synthesis of aircraft flight and navigation complex using the mathematical methods of the structure optimization by the maximum criterion of the functional stability parameter with a limitation of the system construction cost. The following results were obtained: 1) there were substantiated set of criteria acceptable to the estimation of various variants of the system construction (quality indicators) of aircraft flight and navigation complex with determination of the advantage criterion; 2) choice of optimization method; 3) definition of the area of effective options based on consideration of the whole set of criteria, reflecting the requirements for the flight and navigation complex system; 4) the choice of optimal options regarding to a set of criteria with the definition of a rational variant by applying a priority advantage criterion with an additional definition of the stability reserve, as well as the area of stability in the phase space of aircraft flight and navigation complex system parameters. The scientific novelty of the results obtained is as follows: it was improved the method for increasing the effectiveness of aircraft flight and navigation complex in conditions of destabilizing impacts thorough realization of the synthesis of its optimally distributed structure by applying methods of optimization by the maximum criterion of the functional stability parameter with a limitation of cost. Unlike the existing ones, this proposed method allows to choose from a variety of acceptable options a compromised and at the same time the most rational one considering possible extraordinary situations under conditions of destabilizing impacts by taking into account the probabilistic nature of the power as a plurality of connections between elements of flight and navigation complex system.*

**Keywords:** flight and navigation complex, destabilizing impacts, functional stability, synthesis of optimally distributed structure.