

М.А. Калашник-Рибалко

Льотна академія Національного авіаційного університету, Кропивницький

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ПІЛОТАЖНО-НАВІГАЦІЙНОГО КОМПЛЕКСУ ПОВІТРЯНОГО СУДНА В УМОВАХ ДЕСТАБІЛІЗУЮЧИХ ВПЛИВІВ ЗА ПОКАЗНИКАМИ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ

В статті представлено результати дослідження ефективності функціонування пілотажно-навігаційного комплексу (ПНК) повітряного судна (ПС) в умовах дестабілізуючих впливів за показниками функціональної стійкості. Виконано аналіз структури ПНК ПС за наступними критеріями: вид топології, число і розташування вузлів, лінії зв'язку, структурні параметри графа: коефіцієнт надмірності зв'язків, діаметр графа, коефіцієнт централізованості, показники функціональної стійкості ПНК ПС: ступінь вершинної зв'язності, ступінь реберної зв'язності, запас функціональної стійкості. Отримані результати досліджень підтверджують низький рівень функціональної стійкості окремих елементів ПНК ПС, зокрема системи передачі даних. За результатами досліджень запропоновано шляхи вирішення проблеми забезпечення функціональної стійкості ПНК ПС.

Ключові слова: пілотажно-навігаційний комплекс, дестабілізуючі фактори, функціональна стійкість.

Вступ

Загальна постановка проблеми та зв'язок з практичними завданнями. Однією з вимог до надійності та стійкості сучасних ПНК є збереження працездатності у режимі числення шляху навіть при одночасному виникненні двох відмов. Це досягається за рахунок багаторазового резервування, надмірності вимірювань і розвиненої системи контролю.

Формування показників функціональної стійкості як показників ефективності складних технічних систем, включаючи ПНК ЛА, є важливим напрямком наукових досліджень. Завдання забезпечення функціональної стійкості пілотажно-навігаційного комплексу літального апарату при впливі на нього зовнішніх і внутрішніх дестабілізуючих факторів є частиною проблеми забезпечення безпеки польотів та одним з найбільш актуальних напрямків наукових досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Професор Машков О.А. в своїх працях першим обґрунтував властивості функціональної стійкості та загальну стратегію її забезпечення для складних технічних систем [1]. Послідовники наукової школи функціональної стійкості професори Барабаш О.В. і Кравченко Ю.В. внесли подальший вклад у розвиток понятійного апарату і вирішили проблему забезпечення функціональної стійкості для конкретних технічних систем, а саме, розподіленої інформаційної і псевдосупутникової радіонавігаційних систем [2–3]. В подальших роботах професорів Кравченка Ю.В., Барабаша О.В., Неділька С.М. [4–5], Обідіна Д.М. [6–7] було запропоновано принципово новий підхід забезпечення функціональної стійкості

автоматизованої системи управління повітряним рухом, була реалізована стратегія забезпечення функціональної стійкості інтелектуальних розподілених систем управління літальним апаратом шляхом використання динамічної верифікаційної моделі розподілених баз знань інтелектуальної системи управління літальним апаратом. Одним з актуальних напрямків досліджень стала подальша розробка інтелектуальних багатофункціональних оптимальних систем управління рухом літального апарату, що мають розвинені властивості адаптації до мінливих в широких діапазонах умов польоту, виникнення нештатних ситуацій. За результатами досліджень нами у роботах [8–10] були запропоновані нові підходи щодо забезпечення функціональної стійкості пілотажно-навігаційного комплексу (ПНК) літального апарату (ЛА), зокрема в умовах спокійної геліогеофізичної обстановки та в умовах деструктивного впливу геліогеофізичних збурень [9; 11].

Для різних систем і різних визначень на цей час розроблено досить багато методів аналізу стійкості. До основних з них можна віднести: методи Ляпунова, Вишнеградського, Рауса-Гурвиця, Михайлова, Найквіста, Ципкіна, Попова та інших [12]. В класичній теорії стійкості розроблені критерії й ознаки, за якими можна встановити факт стійкості системи. При рішенні задач структурного і параметричного синтезу крім установлення факту стійкості також визначається запас стійкості відповідно до конкретної ознаки, а також області стійкості у фазовому просторі параметрів системи [5]. Однак класична теорія стійкості головним чином оперує з динамічними системами, які описуються системою диференціальних рівнянь у різних модифікаціях: лінійні,

нелінійні, цифрові, стохастичні, адаптивні, оптимальні та інші системи. Проблема визначення стійкості складних організаційних систем, до класу яких відноситься ПНК ЛА, на сьогоднішній день залишається вирішеною не повністю.

Мета статті. Метою статті є дослідження ефективності функціонування ПНК ПС в умовах дестабілюючих впливів за показниками функціональної стійкості.

Основна частина

Під ПНК розуміють сукупність бортових функціонально об'єднаних інформаційних засобів (датчиків), обчислювально-програмних, систем автоматичного управління, систем індикації і сигналізації, призначених для вирішення завдань літаководіння і забезпечення роботи інших бортових систем ЛА.

ПНК у своєму складі об'єднує два комплекси: пілотажний і навігаційний. Під пілотажним комплексом розуміють сукупність систем автоматичного управління, зокрема автомати завантаження, обмеження і зміни передавальних чисел. Під навігаційним комплексом розуміють сукупність бортових систем і пристроїв, призначених для вирішення завдань навігації і визначення координат місцезнаходження ЛА.

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 [13].

Під функціональною стійкістю ПНК ЛА будемо розуміти його властивість перебувати в стані працездатності і виконувати певне цільове завдання або впродовж заданого інтервалу часу, або в умовах потоку відмов через вплив зовнішніх і внутрішніх факторів.

Основними причинами низького рівня функціональної стійкості ПНК ЛА можуть бути [5]: 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 дестабілюючих факторів.

Для наочності діагностичну модель ПНК, яка взята нами для дослідження можна представити у вигляді орієнтованого графа $G(V, L)$, множини вершин якого $V = \{v_i\}$ відповідає вузол комутації системи пілотажно-навігаційного комплексу, а орієнтовані ребра $L = \{v_i, v_j\}$ – елементарним перевіркам між елементами ПНК (рис. 1).

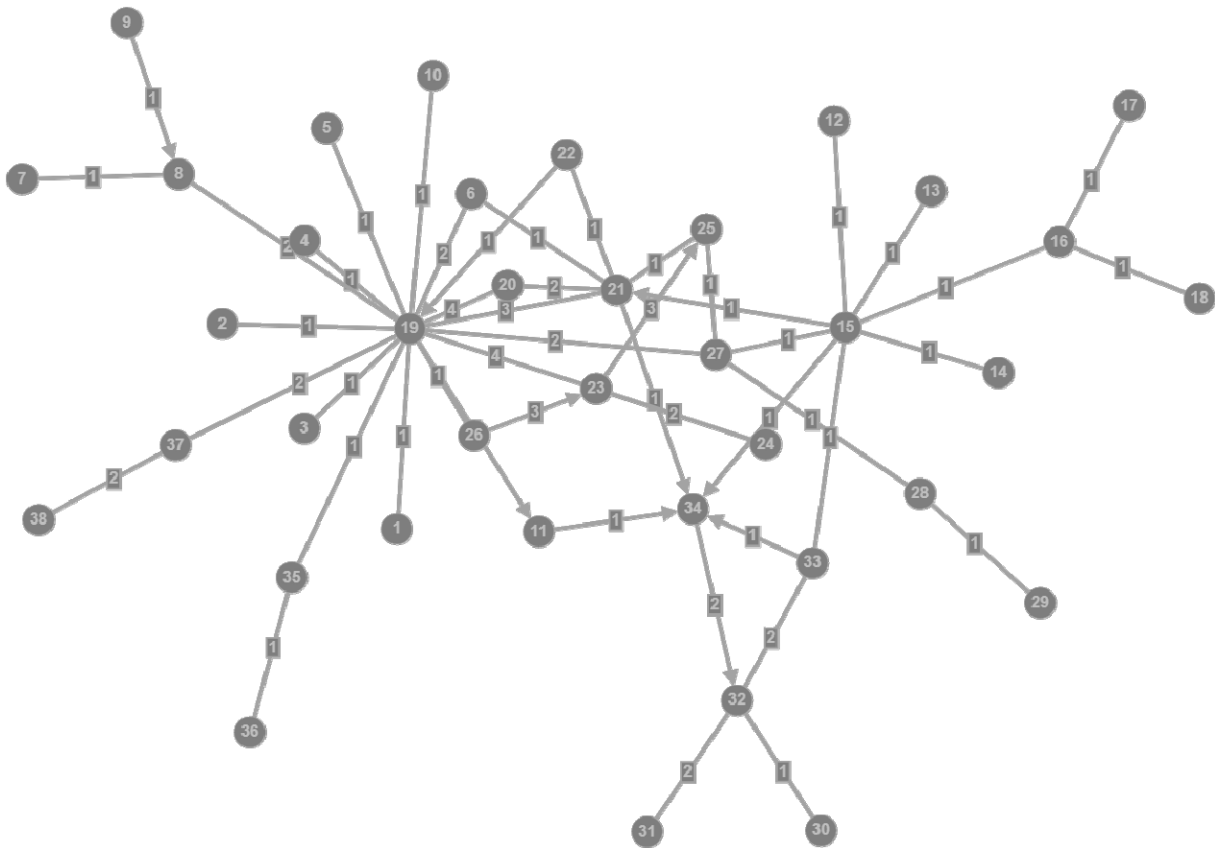


Рис. 1. Граф вихідної структури ПНК ЛА за матрицею суміжності

Використовуючи досвід використання математичних моделей, побудованих на основі теорії графів для процесу діагностування [14] діагностичний граф моделі ПНК можемо задати у вигляді матриці суміжності:

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

де a_{ij} – елементи матриці суміжності діагностичного графа, які мають значення 1,2,...,n, якщо існує ребро, та 0 – якщо ребра не існує.

Для аналізу діагностичного графу ПНК будемо використовувати математичний апарат теорії графів

[15]. Для аналізу структури ПНК окрім графу представимо її у вигляді матриці суміжності.

Матрицю суміжності $A=\{a_{ij}\}$ графу $G_0(V, L)$ представлено у табличному вигляді (табл. 1), значення δ_i – локального ступеня i -ої вершини представлено у табл. 2.

Проведемо аналіз структури графа пілотажно-навігаційного комплексу за наступними критеріями: вид топології, число і розташування вузлів, лінії зв'язку, ймовірність зв'язності, структурні параметри графа: коефіцієнт надмірності зв'язків, діаметр графа, коефіцієнт централізованості.

Таблиця 1

Матриця суміжності графа структури ПНК ЛА $G(V, L)$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38				
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
8	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
9	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
19	1	1	1	1	1	2	0	2	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	4	3	0	4	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0		
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
21	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0		
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	2	0	2	0	0	0	0	0		
33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0	
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	
35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	

Таблиця 2

Значення δ_i - локального ступеня i -ї вершини

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
δ_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
δ_i	6	9	2	9	2	2	4	5	2	1	1	2	5	4	2	2	1	4	3

1. Вихідна структура графу ПНК ЛА змішана, яка на окремих ділянках має деревоподібну ієрархічну структуру з додатковими лініями зв'язку. Структура графа не має Ейлерового циклу. Структура графа не має Ейлерового ланцюга. Граф структури ПНК ЛА однокомпонентний, зв'язний (рис. 2).

2. Лінії зв'язку. У структурі є $M = 71$ лінія зв'язку.
3. Кількість і розташування вузлів. Структура складається з $N = 38$ вузлів, які з'єднані лініями зв'язку.
4. Передбачається, що у кожному вузлі можливо встановити маршрутизатор для виконання передачі інформації між вузлами в декількох напрямках.

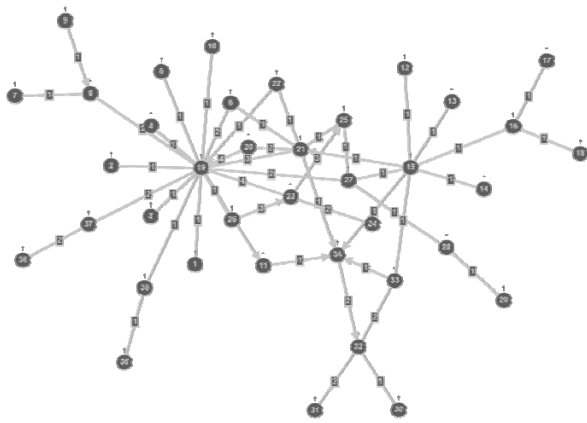


Рис. 2. Результати визначення компонентів зв'язності графу ПНК ЛА

5. Структурні параметри графа: коефіцієнт надмірності зв'язків, діаметр графа, радіус графа, коефіцієнт централізованості.

Коефіцієнт надмірності зв'язків (відношення різниці числа зв'язків у структурі M і мінімально-необхідного числа M_{\min} зв'язків для забезпечення зв'язності графа до значення M_{\min}) [15]:

$$K_H = \frac{M - M_{\min}}{M_{\min}} = \frac{M}{N-1} - 1, \quad (2)$$

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

Для графу ПНК ЛА (рис.3):

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

Діаметр графа характеризує кількість ЛЗ, що входять до маршрута максимальної довжини [16]:

$$D = \max_{i,j} \{d_{ij}\}, \quad i, j = \overline{1, N}, i \neq j, \quad (3)$$

де d_{ij} – кількість ЛЗ, які входять до найдовшого маршруту між v_i і v_j . Для графу ПНК ЛА радіус графа дорівнює 7 ($22 \Rightarrow 19 \Rightarrow 23 \Rightarrow 24$), діаметр графа дорівнює 15 (рис. 3):

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

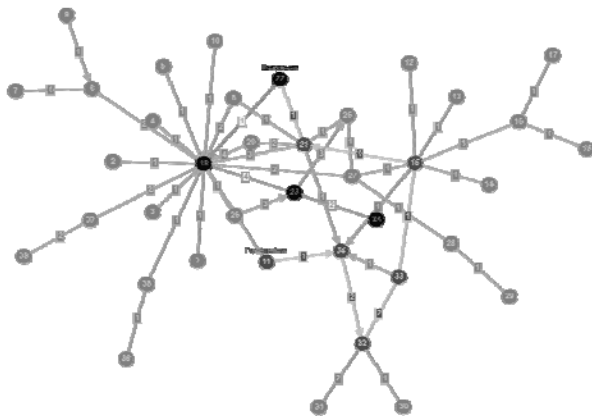


Рис. 3. Визначення діаметру та радіусу графу ПНК ЛА

Використання алгоритму Флойда-Уоршелла [17] є ефективним для розрахунку усіх найкоротших шляхів у щільних графах, коли має місце велика

кількість пар ребер між парами вершин. Для вихідного графу ПНК ЛА результат зазначеного розрахунку виглядає дуже громіздким (рис. 4).

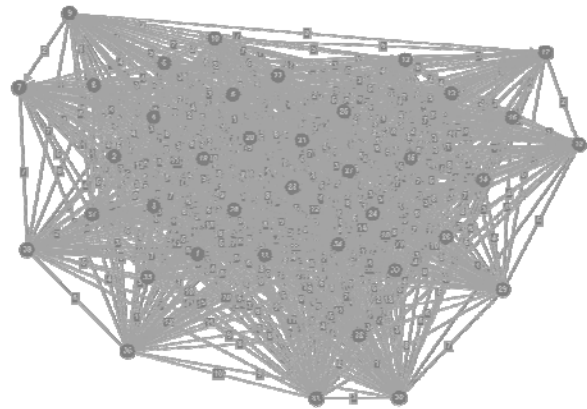


Рис. 4. Граф результату розрахунку усіх найкоротших шляхів у графі ПНК ЛА за алгоритмом Флойда-Уоршелла

Граф ПНК ЛА відноситься до розріджених з ребрами невід'ємної ваги, тому більш ефективним методом для розрахунку усіх найкоротших шляхів в даному випадку є використання алгоритму Дейкстри [18–19] для кожного з вузлів.

Наприклад, найкоротший шлях від органів управління ПНК ЛА до оператора (пілота), розрахований з використанням алгоритму Дейкстри дорівнює 6 (рис. 5): $36 \Rightarrow 35 \Rightarrow 19 \Rightarrow 37 \Rightarrow 38$.

Коефіцієнт централізованості характеризує нерівномірність завантаження елементів системи і визначається за даними роботи [13]:

$$K_{\text{ц}} = \frac{(N-1)(2Z_{\max} - N)}{Z_{\max}(N-2)}, \quad (4)$$

$$\text{де } Z_{\max} = \max_i \left\{ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N d_{ij} / \sum_{j=1}^N d_{ij} \right\} \quad (5)$$

Для графу ПНК ЛА (рис. 2) $K_{\text{ц}} = 0,948$. Чим нижче $K_{\text{ц}}$, тим рівномірніше завантажені вузли комутації і рівномірніше розподілені маршрути по вузлах комутації. Візуалізація графу ПНК ЛА на основі вагових коефіцієнтів наведена на рис. 6.

6. Показники функціональної стійкості ПНК ЛА: ступінь вершинної зв'язності $\chi(G)$, ступінь реберної зв'язності $\lambda(G)$. Аналіз графу ПНК ЛА дозволив визначити, що максимальний ступінь вершинної зв'язності $\chi_{\max}(G)$ дорівнює 16, мінімальний ступінь вершинної зв'язності $\chi_{\min}(G)$ дорівнює 1. Максимальний ступінь реберної зв'язності $\lambda_{\max}(G)$ дорівнює 4, мінімальний ступінь реберної зв'язності $\lambda_{\min}(G)$ дорівнює 1 (рис. 7).

7. Запас функціональної стійкості. 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 $Z_{E_i} = 0$.

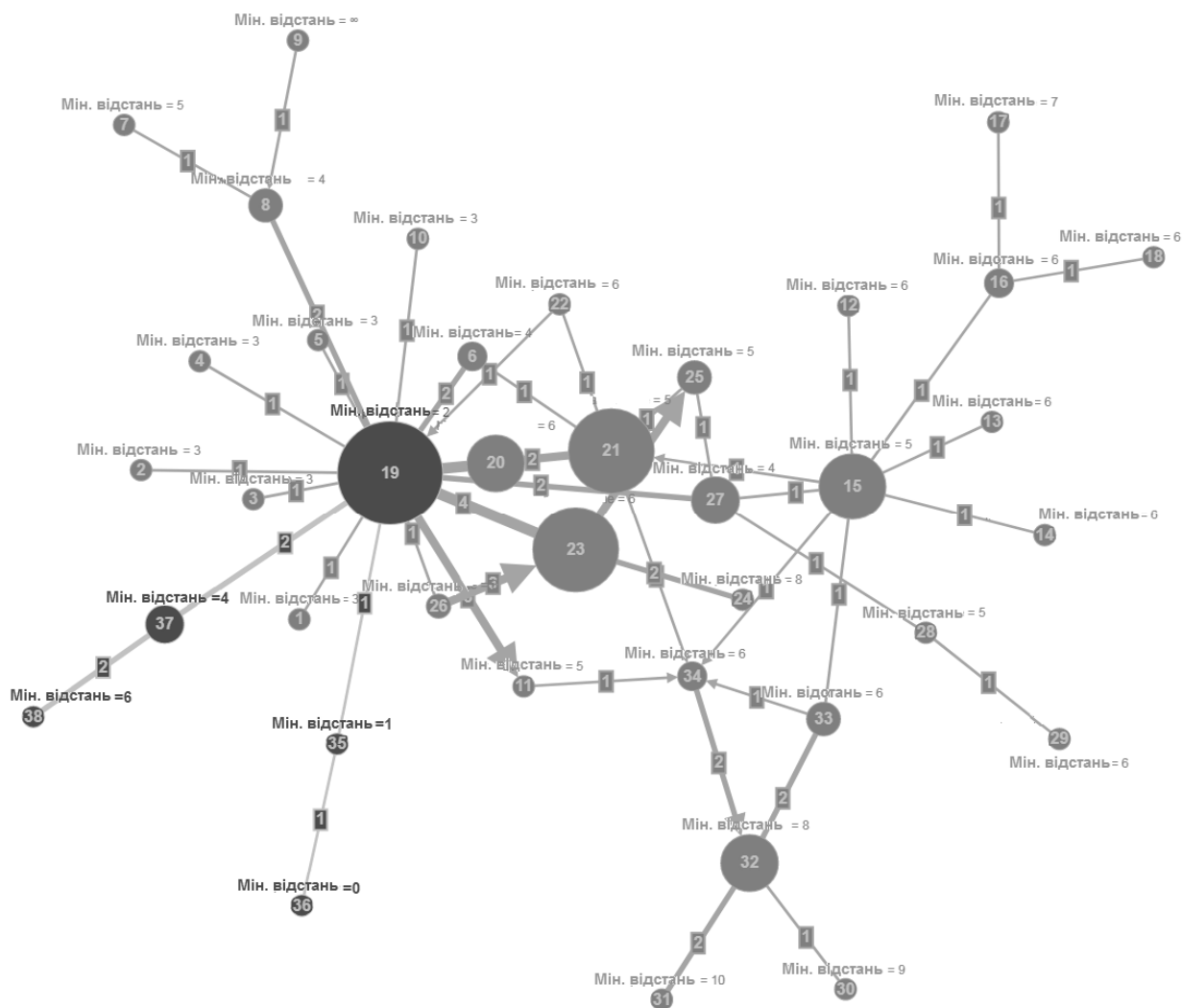


Рис. 5. Визначення найкоротшого шляху між вузлами графу ПНК ЛА за алгоритмом Дейкстри з візуалізацією вагових коефіцієнтів компонентів графу

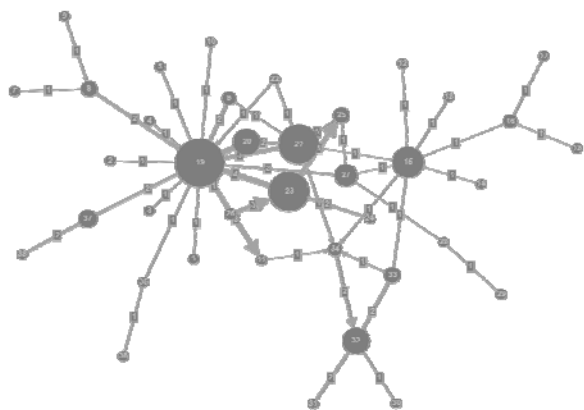


Рис. 6. Візуалізація графу ПНК ЛА на основі вагових коефіцієнтів

8. Мінімальне остовне дерево графу $G(V, L)$ – це ациклічний зв'язний підграф, до якого входять усі його вершини, що мають мінімальну вагу ребер.

Пошук мінімального остовного дерева графу ПНК та його аналіз дозволив визначити, що вага мінімального остовного дерева ПНК ЛА дорівнює 49 (рис. 8). Структура упорядкованого графу ПНК зображена на рис. 9.

Висновки та перспективи подальшого розвитку у визначеному напрямку

Оцінка визначених структурних параметрів графу ПНК ЛА та структурних показників функціональної стійкості ПНК ЛА дозволяє зробити такі висновки:

1) структура ПНК ЛА потребує зниження діаметра графу. Це означає, що довжина найкоротшого маршруту між будь-якою парою вершин графу повинна бути зменшена;

2) коефіцієнт централізації ПНК ЛА, що характеризує нерівномірність завантаження елементів структури ПНК значно вище прийнятних значень $K_c \leq 0,5$.

3) в структурі ПНК ЛА окремі елементи знаходяться на межі запасу функціонування і мають низький ступінь вершинної зв'язності структури і низький рівень реберної зв'язності. Пошкодження однієї ланки зв'язку призведе до порушення функціонування низки вузлів системи і до можливого виникнення нештатної ситуації.

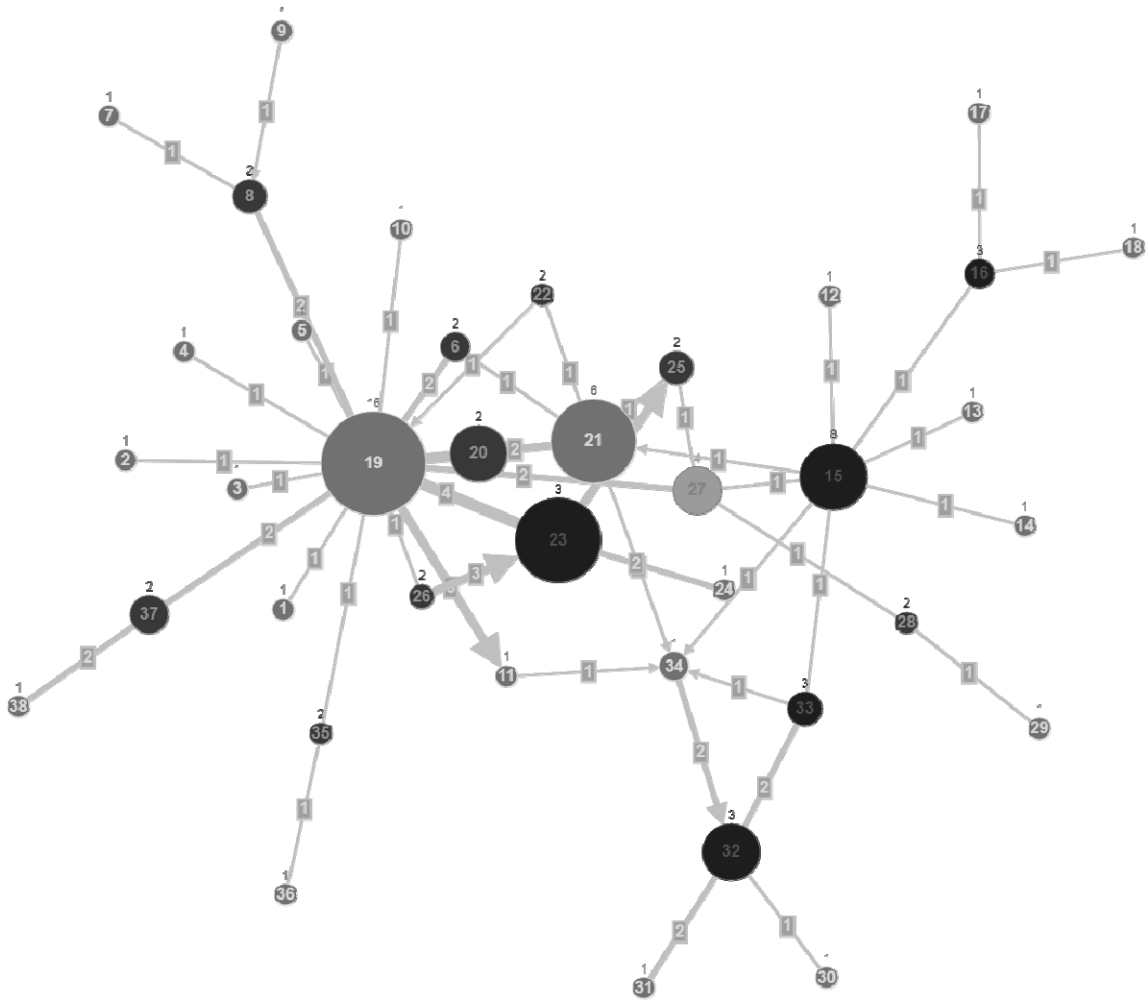


Рис. 7. Визначення максимального ступеню вершинної зв'язності графу ПНК ЛА



Рис. 8. Мінімальне остовне дерево графу пілотажно-навігаційного комплексу ЛА.



Рис. 9. Структура упорядкованого графу пілотажно-навігаційного комплексу ЛА.

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.

Одним з шляхів усунення проблеми низької функціональної стійкості ПНК ЛА та підвищення ефектив-

ності його функціонування в умовах дестабілізуючих впливів може бути виконання синтезу структури шляхом застосування методів оптимізації структури за критерієм максимуму показника функціональної стійкості з обмеженням на вартість побудови системи. Зазначене завдання є подальшим важливим науковим напрямком досліджень у цій області.

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. Кравченко Ю.В. Функціональна стійкість – властивість складних ТС / Ю.В. Кравченко, О.В. Барабаш // Труды академії, № 40. – К.: НАОУ, 2002. – С. 225-228.
3. Барабаш О.В. Построение функционально устойчивых распределенных информационных систем / О.В. Барабаш. – К.: НАУ, 2004. – 226 с.
4. Навігаційне забезпечення Збройних сил України з використанням космічних систем: моногр. / С.В. Козелков, К.С. Козелкова, С.М. Неділько та ін.; за ред. С.М. Неділька. – Кіровоград: Вид-во КЛА НАУ, 2013. – 628 с.
5. Неділько С.М. Основи теорії функціональної стійкості автоматизованої системи управління повітряним рухом / С. М. Неділько. – Кіровоград: ДЛІАУ, 2011. – 220 с.
6. Обідін Д.М. Математична формалізація функціональної стійкості процесів управління літальними апаратами / Д.М. Обідін // Системи озброєння і військова техніка. – 2014. – Вип.1 (37). – С. 179-182.
7. Обідін Д.М. Модель бази знань інтелектуальної системи управління високошвидкісного рухомого об'єкта на основі її верифікації / Д.М. Обідін, О.В. Барабаш, А.П. Мусієнко // Системи обробки інформації. – 2014. – Вип. 5 (121). – С. 3-6.
8. Калашник М.А. Постановка задачі забезпечення функціональної устойчивости пилотажно-навігаційного комплексу летального апарата на окремих режимах польота / М.А. Калашник, Д.Н. Обидин // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2015. – Випуск 4 (36). – С. 27-30.
9. Калашник Г.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.
10. Калашник М.А. Механізми забезпечення сталого функціонування засобів навігації літальних апаратів в умовах деструктивного впливу / М.А. Калашник // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2016. – Вип. 2(38). – С. 3-8.
11. Калашник Г.А. Основні заходи щодо забезпечення ефективного функціонування систем управління, зв'язку та навігації в умовах впливу деструктивних геліогеофізичних збурень / Г.А. Калашник, М.А. Калашник-Рибалко // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних сил України. – 2018. – № 1. – С. 92-98.
12. Чернецкий В.И. Математическое моделирование динамических систем / В.И. Чернецкий. – Петрозаводск: Петрозаводский гос. ун-т, 1996. – 432 с.
13. Рогожин В.О. Пилотажно-навігаційні комплекси повітряних суден / В.О. Рогожин, В.М. Синеглазов, М.К. Філяшкін. – К.: НАУ, 2005. – 316 с.
14. 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.
15. Николаев В.И. Системотехника: методы и приложения/ В.И. Николаев, В.М. Брук. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1985. – 199 с.
16. Оре О. Графы и их приложение/ О. Оре. – М.: Эдиториал, 2003. – 340 с.
17. Dijkstra E.W. A note on two problems in connexion with graphs / E. W. Dijkstra // Numer. Math - Springer Science Business Media. – 1959. – Vol. 1, Iss. 1. – С. 269-271.
18. Zwick Uri All pairs shortest paths using bridging sets and rectangular matrix multiplication/ Zwick Uri //Journal of the ACM. – 2002. – V. 49 (3). – С. 289-317.
19. Chan Timothy M. More algorithms for all-pairs shortest paths in weighted graphs / Chan Timothy M. // SIAM Journal on computing. – 2010. – V. 39 (5). – С. 2075-2089.

References

1. Artyushin, L.M. and Mashkov, O.A. (1991), “*Optimizatsiya tsifrovyyih avtomaticheskikh sistem, ustoychivyyih k otkazam*”, [Optimization of digital automatic systems, resistant to failures], Kiev, KVVAIU, 89 p.
2. Kravchenko, Yu.V. and Barabash, O.V. (2002), “Funktionalna stiiikist – vlastyivist skladnykh TS” [Functionality is the power of folding vehicles], *Trudi Akademii*, No. 40, Kiyv, NAOU, pp. 225-228.
3. Barabash, O.V., (2004), “*Postroenie funktsionalno ustoychivyyih raspredelennyih informatsionnyih sistem*” [Construction of functionally stable distributed information systems], Kiev, NAU, 226 p.
4. Kozelkov, S.V., Kozelkova, K.S., Nedilko, S.M. Nedilko, V.M., Obidin, D.M. and Hrashevsky, R.V. (2013), “*Navihatsiine zabezpechennia Zbroinykh syl Ukrainy z vykorystanniam kosmichnykh sistem*”, [Navigational support of the Armed Forces of Ukraine using space systems], Kirovohrad, KLA NAU, 628 p.
5. Nedilko, S.M. (2011), “*Osnovy teorii funktsionalnoi stiiikosti avtomatyzovanoi systemy upravlinnia povitrianyim rukhom*”, [Basic theory of functional stability automated air traffic management system], Kirovohrad, DLAU, 220 p.
6. Obidin, D.M. (2014), “*Matematychna formalizatsiia funktsionalnoi stiiikosti protsesiv upravlinnia litalnykh aparatamy*”, [The mathematical formalization of functional stability control processes aircraft], *Weapons Systems and Military equipment*, No. 1 (37), pp.179-182.
7. Obidin, D.M., Barabash, O.V. and Musienko, A.P. (2014), “*Model bazy znan intelektualnoi systemy upravlinnia vysokoshvydkisnoho rukhomoho obiekta na osnovi yii veryfikatsii*”, [Model of the knowledge base of the intelligent control system of high-speed moving object on the basis of its verification], *Information Processing Systems*, No. 5 (121), pp.3-6.
8. Kalashnyk, M.A., Obidin, D.M. (2015), “*Postanovka zadachi obespecheniya funktsionalnoy ustoychivosti pilotazhno-navigatsionnogo kompleksa letalnogo 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
9. Kalashnyk, G.A., Obidin, D.M. and Kalashnyk, M.A.(2016), “*Zabezpechennia stiiikoho funktsionuvannia zasobiv navihatsii litalnykh aparativ pid vplyvom zovnishnikh destabilizuiuchykh faktoriv*”, [Provision of stable of aircraft navigation aids under the influence of destabilizing factors], *Information Processing Systems*, No. 3 (140), pp. 52-56.

10. Kalashnyk, M.A. (2016), "Mekhanizmy zabezpechennia staloho funktsionuvannia zasobiv navihatsii litalnykh aparativ v umovakh destruktivnoho vplyvu", [Mechanisms to ensure sustainable functioning of the navigation of aircraft under conditions of the destructive impact], *Control, Navigation and Communication Systems*, No. 2(38), pp.8-17.
11. 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 zburenn", [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.
12. Chernetsky, V.I. (1996), "Matematicheskoe modelirovanie dinamicheskikh sistem", [Mathematical modeling of dynamic systems], Petrozavodsk, Petrozavodsk State University, 432 p.
13. Rogozhin, V.O., Sineglazov V.M., and Filyshkin, M.K. (2005), "Pilotazhno-navihatsiini komplekсы povitrianykh suden", [Aeronautical Navigational Complexes of Aircraft], Kyiv, NAU, 316 p.
14. 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.
15. Nikolaev, V.I. and Brook, V.M. (1985), "Sistemotekhnika: metody i prilozheniya" [System engineering: methods and applications], Leningrad, Mechanical Engineering, Leningrad Branch, 199 p.
16. Ore, O. (2003), "Grafy i ih prilozhenie" [Graphs and their application], Moscow, Editorial, 2003, 340 p.
17. Dijkstra, E.W. (1959), "A note on two problems in connexion with graphs", *Numer. Math - Springer Science Business Media*, Vol. 1, Iss. 1, pp. 269–271.
18. Zwick, Uri (2002), "All pairs shortest paths using bridging sets and rectangular matrix multiplication", *Journal of the ACM*, V. 49 (3), pp. 289-317.
19. Chan, Timothy M. (2010), "More algorithms for all-pairs shortest paths in weighted graphs", *SIAM Journal on computing*, Vol. 39 (5), pp. 2075-2089.

Надійшла до редколегії 7.02.2018

Схвалена до друку 20.03.2018

Відомості про автора:

Калашник-Рибалко Мирослава Анатоліївна
аспірант Львівської академії
Національного авіаційного університету,
Кропивницький, Україна
orcid.org/0000-0000-0997-9609
e-mail: kalashnik_miroslava2014@ukr.net

Information about the author:

Myroslava Kalashnyk-Rybalko
Postgraduate Student of Flight Academy of
National Aviation University,
Kropyvnytskyi, Ukraine
orcid.org/0000-0000-0997-9609
e-mail: kalashnik_miroslava2014@ukr.net

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПИЛОТАЖНО-НАВИГАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ВОЗДУШНОГО СУДНА В УСЛОВИЯХ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

М.А. Калашник-Рыбалко

В статье представлены результаты исследования эффективности функционирования пилотажно-навигационного комплекса (ПНК) воздушного судна (ВС) в условиях дестабилизирующих воздействий по показателям функциональной устойчивости. Выполнен анализ структуры ПНК ВС по следующим критериям: вид топологии, число и расположение узлов, линии связи, структурные параметры графа: коэффициент избыточности связей, диаметр графа, коэффициент централизованности, показатели функциональной устойчивости ПНК ВС: степень вершинной связности, степень реберной связности, запас функциональной устойчивости. Полученные результаты исследований подтверждают низкий уровень функциональной устойчивости отдельных элементов ПНК ВС, в том числе системы передачи данных. По результатам исследований предложены пути решения проблемы обеспечения функциональной устойчивости ПНК ВС.

Ключевые слова пилотажно-навигационный комплекс, дестабилизирующие факторы, функциональная устойчивость.

INVESTIGATION OF THE OF FLYING AND NAVIGATION COMPLEX EFFICIENCY FUNCTIONING OF AIRCRAFT IN THE CONDITIONS OF DESTABILIZING IMPACTS ON THE INDICATORS OF FUNCTIONAL STABILITY

M. Kalashnyk-Rybalko

In the article were presented research results of aircraft flight and navigation complex efficiency under disturbed impact by functional stability parameters. Research contains: analysis of the graph structure of flight and navigation complex by the following criteria: the type of topology, the number and location of the nodes, the communication lines, the probability of connectivity, the structural parameters of the graph: the redundancy coefficient of the links, the graph diameter, the coefficient of centralization, aircraft flight and navigation complex functional stability parameters: degree of vertex connectivity $\chi(G)$, degree of edge connectivity $\lambda(G)$, the reserve of functional stability. The given research results confirm the low level of functional stability of some elements of aircraft flight and navigation complex, including data transmission system. It was identified that in aircraft flight and navigation complex structure some elements are on the verge of functional stability reserve and have a low degree of vertex connectivity of the structure and a low level of edge connectivity. According to the research results the recommendations for solving the problem of provision of aircraft flight and navigation complex functional stability are suggested. One of the suggestions to eliminate the problem of low aircraft flight and navigation complex functional stability may be further implementation of the structure synthesis by applying methods of the structure optimization by the maximum criterion of the functional stability parameter with a limitation of the system construction cost.

Keywords: flight and navigation complex, destabilizing factors, functional stability.