

УДК 358.4:656.7

П.А. Білько

ДП «Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління», Київ

## ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПОВІТРЯНОЇ НАВІГАЦІЇ В УМОВАХ ВИКОРИСТАННЯ РЕЖИМУ ВІЛЬНОГО ПОЛЬОТУ

*Аналіз вихідної структури повітряного простору України підтвердив необхідність синтезу та оптимізації його структури з поступовим запровадженням концепції вільних маршрутів. На основі методики синтезу структури повітряного простору в статті проведена оцінка ефективності повітряної навігації в умовах режиму вільного польоту. На основі отриманих результатів моделювання були визначені значення узагальненого показника функціоналу якості функціонування повітряного простору вільних маршрутів та його залежність від оптимізації структури повітряного простору.*

**Ключові слова:** повітряний простір вільних маршрутів, повітряна навігація, оцінка ефективності.

### Вступ

**Постановка завдань.** Аналіз функціонування повітряного простору трасових маршрутів (ППТМ) і впливу на них дестабілізуючих факторів показав, що задача побудови повітряного простору вільних маршрутів (ППВМ) є дуже широкою й багатогранною.

Усі заходи щодо забезпечення функціонування ППВМ необхідно виконувати з урахуванням мінімальної вартості, умов інформаційного впливу на систему орга-

нізації повітряного руху (ОПР), умов лавиноподібного наростання повітряних потоків, скорочення часу на обробку інформації і прийняття рішень, а також подальшого ускладнення математичних моделей розрахункових завдань з обробки інформації

Результати аналізу функціонування існуючої системи повітряного простору трасових маршрутів (ППТМ) підтверджують обмежену пропускну спроможність та досить великі економічні втрати. Основними причинами цього є:

– обмеженість повітряних трас та ешелонів польотів;

– складні схеми входу-виходу в райони аеродромів (CTR);

– обмеження виконання польотів на ешелонах з мінімальними витратами палива, в т.ч. виконання польотів «по потолках»;

– існування зарезервованого повітряного простору державної (військової) авіації поблизу аеродромів цивільної авіації обмежує виконання набору висоти та зниження за економічною схемою.

Одним із шляхів усунення даної проблеми є реалізація принципів використання повітряного простору вільних маршрутів.

Аналіз вихідної структури ППТМ підтвердив необхідність синтезу та оптимізації його структури з поступовим запровадження концепції вільних маршрутів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На даний час досліджені і обґрунтовані методи оперативного регулювання потоків повітряного простору при зміні умов виконання польотів в діючій авіаційній системі ОПР такими вченими як Бабаєва С.І., Смельянов В.Е., Назаров П.В., Савельєв О.П., Гучков В.К та ін.. При цьому було досліджено та обґрунтовано методи оперативного регулювання потоків повітряних суден при зміні умов виконання польотів в автоматизованій системі (АС) ОПР, які дозволяють забезпечити безпеку польотів при обмеженнях на їх економічність і регулярність з урахуванням норм завантаження взаємодіючих диспетчерських центрів [1,2].

Питання щодо використання повітряного простору при реалізації концепції вільного польоту є не достатньо досліджене.

**Метою даної статті** є оцінка ефективності повітряної навігації в умовах режиму вільного польоту.

### Основний матеріал

Постановка задачі синтезу ППВМ. Дано:

Граф вихідної структури ППТМ  $G_0$ , що складається з  $N = 20$  вершин (по кількості основних аеродромів України).

Розташування аеродромів системи ППТМ з зазначеними умовними координатами  $X, Y$ .

Імовірність повітряної навігації між будь-якою парою аеродромів  $v_i$  і  $v_j$ ;  $p = 0,9$ .

Визначити: Оптимальну структуру ПП  $G_\xi(V, E)$ ,  $\xi = 1, 2, \dots, 5$ , що задовольняє вимогам загальної задачі синтезу системи ППВМ:

$$F_{\text{ППВМ}} = f(P_{ij}) \rightarrow \max . \quad (1)$$

При обмеженнях:

$$C_\xi = \sum_i \sum_j C_{ij} (l_{ij}, \rho_{ij}, h_{ij}) \leq C_{\text{ДОП}\xi} ; \quad (2)$$

$$\chi(G) \geq 2; \quad \lambda(G) \geq 2; \quad (3)$$

$$G_0(V, E) \subseteq G_\xi(V, E); \quad (4)$$

$$i, j = 1, 2, \dots, N. \quad (5)$$

У наведених залежностях:

$F_{\text{ППВМ}}$  – узагальнений показник функціоналу якості, обчислений за матрицею ймовірностей суміжності з урахуванням вагових коефіцієнтів  $b_{ij}$ :

$$F_{\text{ППВМ}} = f(P_{ij}) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N b_{ij} \cdot P_{ij}, \quad (7)$$

де  $P_{ij}$  – ймовірність повітряної навігації двополуносно-го графа з вершиною-витоком  $v_i$  і вершиною-стоком  $v_j$ , яка обчислюється алгоритмічним способом на основі модернізованих оцінок Поліського [3, 4]. Індекс  $\xi$  припускає знаходження кількох структур для заданої економії вартості польотів  $C_{\text{ДОП}\xi}$ .

За умови вводу в систему повітряного простору вільних маршрутів між аеродромами:

$\xi = 1$ : знайти  $G_1(V, E)$  для  $C_{\text{ДОП}1} = 20\,000$  у.о.;

$\xi = 2$ : знайти  $G_2(V, E)$  для  $C_{\text{ДОП}2} = 50\,000$  у.о.;

$\xi = 3$ : знайти  $G_3(V, E)$  для  $C_{\text{ДОП}3} = 100\,000$  у.о.;

$\xi = 4$ : знайти  $G_4(V, E)$  для  $C_{\text{ДОП}4} = 500\,000$  у.о.;

$\xi = 5$ : знайти  $G_5(V, E)$  для  $C_{\text{ДОП}5} = 1\,000\,000$  у.о.

Рішення кількох однокритеріальних оптимізаційних завдань із заданими значеннями  $C_{\text{ДОП}\xi}$  прийнято щоб уникнути рішення двокритеріальної задачі на графах, що є складним.

Допущення.

1. Структури  $G_\xi(V, E)$ ,  $\xi = 1, 2, \dots, 5$ , не повинні мати кратних ребер.

2. Визначені структури не мають заборонених маршрутів. З будь-якого аеродрому  $v_i$  в будь-який аеродром  $v_j$  можна визначити маршрут  $e_{ij}(v_i, v_j)$ , що має довжину  $l_{ij}$  і економія вартості витрат  $C_{ij}$  на виконання польоту.

3. Довжина маршруту  $l_{ij}$  обчислюється:

$$l_{ij} = \frac{\sqrt{(X_j - X_i)^2 + (Y_j - Y_i)^2}}{K_L}, \quad (6)$$

де  $K_L = 1120$  у.о.довж./км;  $X_i, X_j, Y_i, Y_j$  – умовні координати аеродромів.

4. Пропускна здатність одиничного маршруту приймається  $\rho_{ij} > h_{ij}$ , де  $h_{ij}$  – інтенсивність потоку літаків між аеродромами  $v_i$  і  $v_j$ .

5. Економія вартості будь-якої структури  $G_\xi(V, E)$  обчислюється через витрати пального за методикою інженерно-штурманських розрахунків по визначеним маршрутам між аеродромами для конкретного типу літака.

Умови експерименту.

Синтез здійснюється при різних значеннях  $C_{\text{ДОП}}$ : 20000 у.о., 50000 у.о., 100000 у.о., 500000 у.о., 1000000 у.о.

Значення ймовірності пропускну здатності  $\rho$  при рішенні завдання синтезу приймалося однаковою для кожного маршруту:  $\rho = 0,9$ .

Рішення завдання синтезу здійснювалося в середовищі Delphi 5.0 за допомогою програмного проекту NET на ПЕОМ Pentium-III-1700, створеного на базі теорії структурного програмування [8, 9]. Основою для програмування задачі синтезу є алгоритм оптимізації структури.

Особливістю рішення задачі синтезу є використання вихідної структури ППТМ –  $G_0(V, E)$  – всі маршрути ППТМ  $G_0$  змінені у синтезованих структурах ППВМ –  $G_s(V, E)$ .

Результуючі структури ППТМ і ППВМ  $G_s(V, E)$  для значень  $C_{доп}$  представлені на рис. 1, 2:

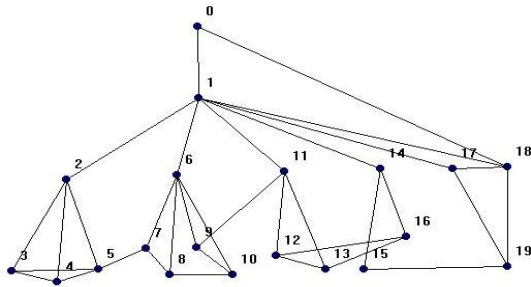


Рис. 1. Синтезована структура ППТМ  $G_1(V,E)$  при  $C_{доп}=20\ 000$  у.о.

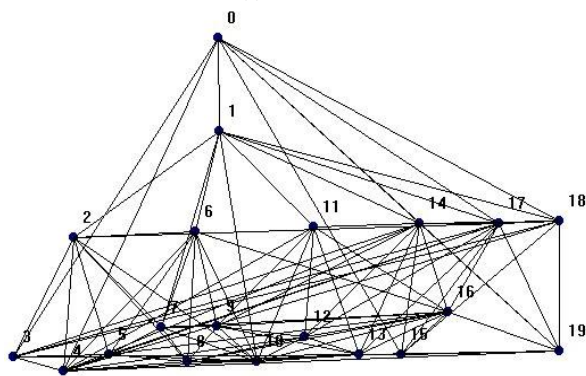


Рис. 2. Синтезована структура ППВМ  $G_5(V,E)$  при  $C_{доп}=1000\ 000$  у.о.

Також визначені відповідні матриці суміжності та матриці ймовірностей повітряної навігації  $P_{ij}$  для оптимізованих структур ППВМ  $G_i(V, E)$ , де  $i = 1, 2, \dots, 5$ .

Аналіз отриманих структур ППВМ  $G_\xi(V,E)$ ,  $\xi = 1, 2, \dots, 5$  показує, що всі вони відрізняються від вихідної структури  $G_0(V,E)$  додатковими маршрутами. Структурні показники оптимізованих структур ППВМ представлені в табл. 1.

Аналіз динаміки зміни структурних показників оптимізованих структур дозволяє зробити наступні висновки:

- 1) при підвищенні економії вартості польотів  $C_{доп}$  підвищується число ліній зв'язку  $M$ , пропорційно підвищується коефіцієнт надмірності  $K_n$ ;
- 2) зниження діаметра графа не є пропорційним вартості й для самої розгалуженої структури  $G_\xi(V,E)$  досягає значення  $D = 2$ . Це значить, що довжина найкоротшого маршруту між будь-якою парою вершин графа буде не більш 2;

Таблиця 1

Структурні показники оптимізованих структур

Структура $G_\xi(V, E)$	$C_{доп}$ тис.у.о.	Число маршрутів	Діаметр графу $D$	Коефіцієнт централізації	Коефіцієнт надмірності	Економія Вартості $C_{у.о.}$
$G_0(V,E)$	0	19	4	0,906	0	1004
$G_1(V,E)$	20	27	4	0,806	0,421	19986
$G_2(V,E)$	50	34	4	0,770	0,789	49671
$G_3(V,E)$	100	45	4	0,511	1,368	99405
$G_4(V,E)$	500	100	3	0,308	4,263	499259
$G_5(V,E)$	100	158	2	0,304	7,316	999340

3) коефіцієнт централізації, що характеризує нерівномірність завантаження елементів системи, також знижується зі зростанням  $C_{доп}$  і досягає прийнятних значень  $K_{ц} \leq 0,5$  при  $C_{доп} \geq 100\ 000$  у.о.

На рис. 3, 4 представлені графіки залежностей ймовірності повітряної навігації  $P_{ij}$  для найбільш важливих маршрутів в залежності від ймовірності пропускної здатності  $\rho$  для різних синтезованих структур ППВМ  $G_\xi(V, E)$ ,  $\xi = 1, 5$ .

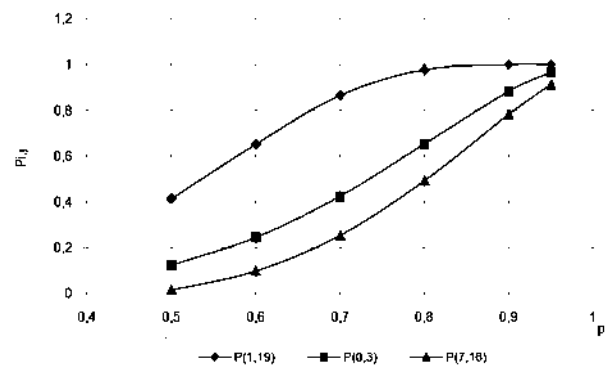


Рис. 3. Залежності ймовірностей повітряної навігації  $P_{1,8}, P_{1,15}, P_{1,17}$  від  $\rho$  для оптимізованої структури ППВМ з  $C_{доп} = 20\ 000$  у.о.

З наведених графіків можна зробити наступні висновки:

- 1) для всіх структур при зростанні  $\rho \rightarrow 1$  ймовірність повітряної навігації двополусної мережі також прагне до 1:  $P_{ij} \rightarrow 1$ ;
- 2) для структур  $G_3, G_4, G_5$  графіки  $P_{ij}$  мають яскраво-виражений характер насичення, що наочно показує більш високу ефективність структурного синтезу в порівнянні з параметричним. Для досягнення заданого рівня ймовірностей повітряної навігації  $P_{ij}$  на окремих напрямках необхідно насичувати додатковими маршрутами, а не підвищувати параметр  $\rho$  – ймовірність пропускної здатності кожного маршруту;
- 3) чим більша кількість вільних маршрутів, тим вище ймовірність повітряної навігації  $P_{ij}$ , а, отже, більше значення узагальненого показника функціоналу якості –  $F_{ППВМ}$ .

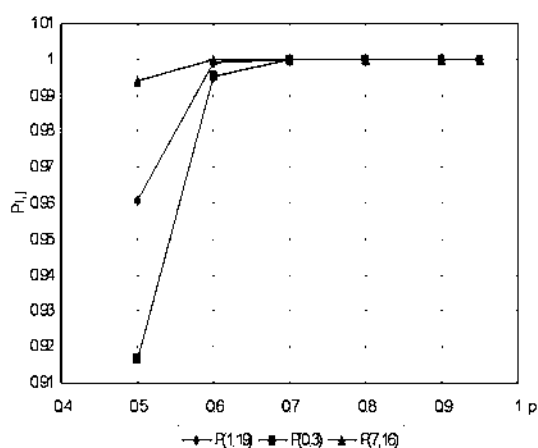


Рис. 4. Залежності ймовірностей повітряної навігації  $P_{1,8}$ ,  $P_{1,15}$ ,  $P_{1,17}$  від  $\rho$  для оптимізованої структури ППВМ зі  $C_{доп}=1\ 000\ 000$  у.о

На основі отриманих результатів моделювання були визначені значення узагальненого показника функціоналу якості –  $F_{ППВМ}(P_{ij})$ , при  $b_{ij} = 1$ ,  $i, j = 1 \dots 20$ . У табл. 2 представлені значення  $F_{ППВМ}(P_{ij})$  для синтезованих структур  $G_5(V,E)$  залежно від імовірності повітряної навігації  $P$ .

Таблиця 2

Значення узагальненого показника функціоналу якості  $F_{ППВМ}(P_{ij})$

Структура $G_5(V,E)$	$C_{доп}$ тис. у.о.	$p=0,5$	$p=0,7$	$p=0,9$	$p=0,95$
$G_0(V,E)$	0	65,9	145,5	282,6	312,9
$G_1(V,E)$	20	66,5	200,1	340,6	364,8
$G_2(V,E)$	50	121,1	286,7	376,2	379,5
$G_3(V,E)$	100	171,9	343,9	379,8	380,0
$G_4(V,E)$	500	320,0	379,8	380,0	380,0
$G_5(V,E)$	1000	370,4	380,00	380,0	380,0

### Висновки

1. В результаті проведених досліджень застосована методика синтезу структури ППВМ. В якості критерію оптимізації прийнятий максимум функціоналу якості.

2. Оптимізація структури системи ППВМ України із заданою економією вартості  $C_{доп} = 20\ 000$  у.е. дає приріст узагальненого показника функціоналу якості –  $F_{ППВМ}(P_{ij})$  на 34% (з 205,5 до 275,7) у порівнянні з вихідною структурою.

3. Отримані результати підкреслюють перспективність вибраного напрямку досліджень, а також при розробці й удосконаленні інших видів складних систем, оскільки такі системи синтезуються із введенням оптимальної структурної надмірності перерозподілом параметрів системи між елементами, які адаптовані до конкретних умов обстановки.

### Список літератури

1. Бабаєва С.І. Методи аналізу потоків повітряного руху / С.І. Бабаєва // Науковий вісник МГТУ ГА. – М.: МГТУ ГА, 2004. – № 77. – С. 37-41.
2. Таха. Х. Введення в дослідження операцій. / Х. Таха. – М.: Мир, 1985. – 320 с.
3. Большие технические системы: проектирование и управление / Л.М. Артюшин, Ю.К. Зиятдинов, И.А. Попов, А.В. Харченко. – Х.: Факт, 1997. – 400 с.
4. Басакер Р. Конечные графы и сети / Р. Басакер, Т. Саати. – М.: Наука, 1994. – 368 с.
5. Емельянов В.Е. Трирівнева модель функціонування типової інформаційної системи і її використання при виборі принципів побудови систем захисту інформації / В.Е. Емельянов, П.В. Назаров // Науковий вісник МГТУ ГА. – М.: МГТУ ГА, 2005. – № 92.
6. Савельев О.П. Алгоритм відшукування найкоротшого маршруту польоту на заданій мережі повітряних трас / О.П.Савельев, В.К. Гучков // Управління повітряним рухом. – М.: Повітряний транспорт, 1983. – № 2. – С. 47-52.
7. Бабаєва С.І. Модель використання повітряного простору на основі інформаційних образів польотної інформації / С.І. Бабаєва // Математичні методи і інформаційні технології в економіці, соціології і освіті. – Пенза: Приволзьський Будинок знань, 2005. – С. 137-141.
8. Васильев В.В. Моделирование задач оптимизации и дифференциальных игр / В.В. Васильев, В.Л. Баранов; отв. ред. Г.Е. Пухов. – К.: Наук. думка, 1989. – 296 с.
9. Баранов Г.Л. Структурное моделирование сложных динамических систем / Г.Л. Баранов, А.В. Макаров. – К.: Наукова думка, 1986. – 272 с.

Надійшла до редколегії 13.12.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.В. Барабаш, Національний авіаційний університет, Київ.

### ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЗДУШНОЙ НАВИГАЦИИ В УСЛОВИЯХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЖИМА СВОБОДНОГО ПОЛЕТА

П.А. Билько

Анализ исходной структуры воздушного пространства Украины подтвердил необходимость синтеза и оптимизации его структуры с постепенным внедрением концепции свободных маршрутов. На основе методики синтеза структуры воздушного пространства в статье проведена оценка эффективности воздушной навигации в условиях режима свободного полета. На основе полученных результатов моделирования были определены значения обобщенного показателя функционала качества функционирования воздушного пространства свободных маршрутов и его зависимость от оптимизации структуры воздушного пространства.

**Ключевые слова:** воздушное пространство свободных маршрутов, воздушная навигация, оценка эффективности.

### EVALUATION OF AIR NAVIGATION IN THE REGIME OF FREE FLIGHT

P.A. Bilko

Analysis of the initial structure of the airspace of Ukraine confirmed the need for synthesis and optimization of its structure with gradual introduction of the concept of free flight. On the basis of synthesis techniques airspace structure in the article evaluated the effectiveness of air navigation under the regime of free flight. Based on the simulation results, we determined the generalized index of quality of functional airspace free flight and its dependence on optimizing the airspace structure.

**Keywords:** free flight airspace, air navigation, the evaluation of effectiveness.