

УДК 004.722

С.М. Неділько<sup>1</sup>, О.А. Машков<sup>2</sup><sup>1</sup> Державна льотна академія України, Кіровоград<sup>2</sup> Вища атестаційна комісія України, Київ

## МЕТОДИКА ОЦІНКИ СТРУКТУРИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПОВІТРЯНИМ РУХОМ УКРАЇНИ ЗА ПОКАЗНИКОМ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ

*Запропоновано узагальнений показник функціональної стійкості автоматизованої системи управління повітряним рухом, який оснований на визначенні ймовірності зв'язності графа структури систем, а також структурні показники, що характеризують рівень функціональної стійкості системи. Здійснено порівняльний аналіз надмірних структур за показниками функціональної стійкості.*

**Ключові слова:** функціональна стійкість, надмірність, автоматизована система управління повітряним рухом, ймовірність зв'язності.

### Вступ

Під автоматизованою системою управління повітряним рухом (АСУПР) у роботі розуміється сукупність взаємозалежних і узгоджено діючих апаратно-програмних засобів передачі, зберігання та обробки цифрової інформації, сполучених з наземними радіолокаційними комплексами і призначених для рішення широкого класу задач контролю та управління повітряним рухом у межах зон відповідальності районного центра управління повітряним рухом.

В сучасних умовах актуальним є забезпечення автоматизованої системи управління повітряним рухом (АСУПР) властивості функціональної стійкості. Функціональна стійкість – це властивість складної технічної системи, що характеризує можливість продовжувати виконувати певний обсяг функцій, можливо з погіршенням якості, під час впливу внутрішніх і зовнішніх дестабілізуючих факторів. Для рішення цієї задачі потрібно забезпечити збір, обробку й аналіз інформації з автоматичним розпізнанням позаштатної ситуації, що зароджується, і фор-

муванням рекомендацій щодо дій в умовах таких ситуацій.

**Загальна постановка задачі дослідження.** Забезпечення функціональної стійкості будь-якої складної технічної системи здійснюється за рахунок наявної надмірності різних видів: структурної, апаратної, часової, інформаційної, тощо. Згідно стратегії забезпечення функціональної стійкості [1] в АСУПР повинні бути реалізовані кілька процедур: виявлення позаштатної ситуації; її розпізнавання; виявлення наявного ресурсу (надмірності); оптимальне використання надмірності. Однією з невирішених і актуальних на сьогоднішній день є задача оцінки структури системи та порівняння декількох пропонуєваних структур за показниками функціональної стійкості для обґрунтування прийнятого рішення з проектування структури автоматизованої системи управління повітряним рухом України.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз теорії функціональної стійкості, щодо методик оцінки значень показників функціональної стійкості складних технічних систем показав, що існують відповідні наукові праці для динамічних систем, які описуються системою диференціальних рівнянь [2], а також для розподілених інформаційних та псевдосупутникових радіонавігаційних систем [3, 4]. Особливості принципу роботи АСУПР дозволяють зробити висновок про те, що, незважаючи, на серйозні наукові результати теорії функціональної стійкості, досліджувані в ній математичні моделі складних систем не здатні адекватно описати процес функціонування АСУПР [5]. Отже, актуальним завданням є розробка показників функціональної стійкості за якими можна здійснити оцінку структури АСУПР з урахуванням впливу дестабілізуючих факторів.

**Метою статті** є представлення результатів досліджень щодо оцінки функціональної стійкості автоматизованої системи управління повітряним рухом з урахуванням впливу дестабілізуючих факторів.

### Основна частина

Функціональна стійкість як властивість складної системи забезпечується шляхом перерозподілу деякої існуючої в системі надмірності з метою виключення наслідків позаштатних ситуацій. Заходи, які спрямовані на забезпечення або підвищення рівня функціональної стійкості, в першу чергу, забезпечують поліпшення характеристик відмовостійкості та живучості, але не обов'язково показників надійності окремих комплектуючих елементів і виробів, а також тактико-технічних характеристик системи. Теорія функціональної стійкості перебуває в стадії розвитку, і на наш погляд, формування показників функціональної стійкості як показників ефективності складних систем є важливим напрямком наукових досліджень.

Для цього до системи поставлені вимоги можливості передачі радіолокаційної інформації з будь-якого вузла на будь-який інший. Разом з тим, продовження функціонування, можливо зі зменшенням якості, під час впливу дестабілізуючих факторів вимагає виявлення і використання надмірності в структурі системи. Тому доцільно обмежитись дослідженням структури системи передачі даних (СПД) автоматизованої системи управління повітряним рухом.

Для виявлення надмірності запропоновано виконання зворотної задачі, а саме синтезу надмірної структури із заданими властивостями функціональної стійкості і вартості побудови та експлуатації системи.

Пропонується обчислювати рівень функціональної стійкості для систем передачі даних АСУПР узагальненим імовірнісним показником  $F_{АСУ}$ , що обчислюється як згортка матриці ймовірностей зв'язності  $P_{ЗВ}$ :

$$P_{ЗВ} = \begin{bmatrix} 0 & P_{12} & P_{13} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & 0 & P_{23} & \dots & P_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ P_{n1} & P_{n2} & P_{n3} & \dots & 0 \end{bmatrix},$$

$$F_{АСУ} = F(P_{ЗВ}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{ij} \cdot P_{ij}, \quad (1)$$

де  $n$  – число вузлів комутації в СПД АСУПР;

$P_{ij}$  – імовірність зв'язності між вузлами  $v_i$  та  $v_j$ ;

$w_{ij}$  – вагові коефіцієнти ліній зв'язку, які залежать від заданої інтенсивності передачі інформації  $\rho_{ij}$  між вузлами  $v_i$  та  $v_j$ :

$$w_{ij} = \begin{cases} 2, & \text{при } \rho_{ij} \geq M[\rho]; \\ 1, & \text{при } 0,1M[\rho] \leq \rho_{ij} < M[\rho]; \\ 1/2, & \text{при } \rho_{ij} < 0,1M[\rho]. \end{cases}$$

Математичне очікування заданої інтенсивності передачі інформації  $M[\rho]$  у СПД АСУПР визначається на основі наступної залежності:

$$M[\rho] = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n \rho_{ij}.$$

Імовірність  $P_{ij}$  визначається на основі наступних вихідних даних:

1) структури СПД АСУПР, що задана матрицею суміжності  $A_{СМ}$ ;

2) імовірності передачі інформації  $\rho_{ij}$  по лінії зв'язку  $l_{ij}$ .

Найбільш простим методом визначення  $P_{ij}$  є розкладання структури АСУПР на послідовне і паралельне з'єднання ліній зв'язку. Складні розгалужені структури, що мають перехресні зв'язки, неможливо привести до елементарних з'єднань ланок у

смысле надійності. У цьому випадку доцільно застосувати структурні перетворення графів [3]. Їх сутність полягає в розкладанні структури АСУПР щодо якого-небудь елемента по методу Шенона-Мура. У

результаті розкладання отриману структуру можна представити у вигляді послідовно-паралельних з'єднань. Наприклад, для обчислення  $P_{14}$  вихідний граф  $G$  (рис. 1) перетвориться у два графи  $G_1$  і  $G_2$ .

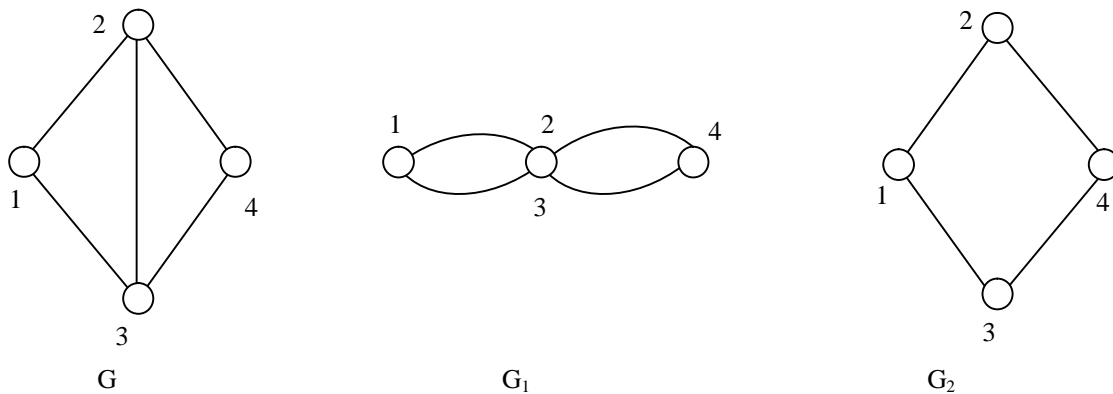


Рис. 1. Приведення графа до послідовно-паралельного з'єднання ребер

Граф  $G_1$  отримано стягуванням ребра  $l_{23}$ , що відповідає справному стану ребра  $l_{23}$ . Граф  $G_2$  одержано після розриву  $l_{23}$ , що відповідає його несправному стану. Імовірність зв'язності  $P_{1,4}$  для графа  $G$  можна обчислити за основною формулою розкладання:

$$P_{14}(G) = p_{23} \cdot P_{14}(G_1) + q_{23} \cdot P_{14}(G_2),$$

де  $p_{23} = 1 - q_{23}$  – імовірність передачі інформації через лінію зв'язку, що відповідає ребру  $l_{23}$ ;

$P_{14}(G_1)$  і  $P_{14}(G_2)$  – визначаються на основі методів теорії надійності як послідовне та паралельне з'єднання елементів:

$$P_{14}(G_1) = P_I \cdot P_{II} = (1 - q_{12}q_{13}) \cdot (1 - q_{24}q_{34});$$

$$P_{14}(G_2) = 1 - Q_I \cdot Q_{II} = 1 - (1 - p_{12}p_{34}) \cdot (1 - p_{13}p_{34}).$$

Якщо прийняти  $p_{ij} = p$ ,  $q_{ij} = q$  для всіх  $i, j = 1, 2, \dots, n$ , тоді вираз для  $P_{14}$  прийме вигляд:

$$P_{14}(G) = p \cdot (1 - q^2)^2 + q \cdot \left[ 1 - (1 - p^2)^2 \right]. \quad (3)$$

Вираз (3) є тотожним виразу  $P_{1,4} = p^2(1 + q^2) + 2p^3(q + q^2)$ , що підтверджує збіжність отриманих результатів за допомогою двох методів.

Аналіз методу розкладання графів Шеннона-Мура дозволяє виділити наступні його особливості:

метод є ефективним для слабозв'язних графів з  $n \leq 10$  і дозволяє виконувати аналітичні розрахунки;

для більш складних графів процедуру розкладання потрібно буде повторювати кілька разів;

в результаті виконання  $m$  процедур розкладання, вихідний граф розпадається на  $2^m$  графів з послідовно-паралельними з'єднаннями ребер;

алгоритм, побудований за даним методом, має складність  $O(2^m)$ , де  $m$  – число ребер, за якими виконується розкладання.

Ще однією особливістю ймовірності зв'язності  $P_{ij}$ , як часткового показника функціональної стійкості, є її чутливість до деградації й нарощування структури. Видалення (відмова) будь-якої лінії зв'язку АСУПР приводить до зменшення значення  $P_{ij}$ , а додавання будь-якої лінії зв'язку – до збільшення  $P_{ij}$ , що обумовлено появою нових, незалежних маршрутів передачі інформації.

Обчислення показника функціональної стійкості  $F_{АСУ}$  за виразом (1) розглянемо на прикладі структури існуючої системи передачі даних АСУПР представлена на рис. 2, на якому вершини графа позначають вузли комутації, розташовані на території держави, а ребра графа – лінії зв'язку між ними.

Для порівняння даної структури з іншими доцільно синтезувати надмірні структури, тобто побудувати додаткові лінії зв'язку. Синтез надмірних структур виконувався за такою постановкою.

Задано:

Граф вихідної структури  $G_0(V, E)$ , що складається з  $N=20$  вершин.

Матриця суміжності  $S = \{s_{ij}\}$  графа  $G_0(V, E)$ .

Розташування вузлів комутації системи із зазначеними умовними координатами  $X, Y$ .

Імовірність передачі інформації між будь-якою парою вузлів комутації  $v_i$  і  $v_j$  дорівнює  $p=0,9$ .

Визначити:

Оптимальну структуру  $G_\xi(V, E)$ ,  $\xi=1, 2, \dots, 5$ , що задовольняє вимогам загальної задачі синтезу функціонально стійких АСУПР:

$$F_{АСУ} = f(P_{ij}) \rightarrow \max$$

при обмеженнях:

$$C_\xi = \sum_i \sum_j C_{ij}(l_{ij}, p_{ij}, h_{ij}) \leq C_{\text{ДОП}\xi} \quad i, j = 1, 2; \quad (3)$$

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

$$G_0(V, E) \subseteq G_\xi(V, E).$$

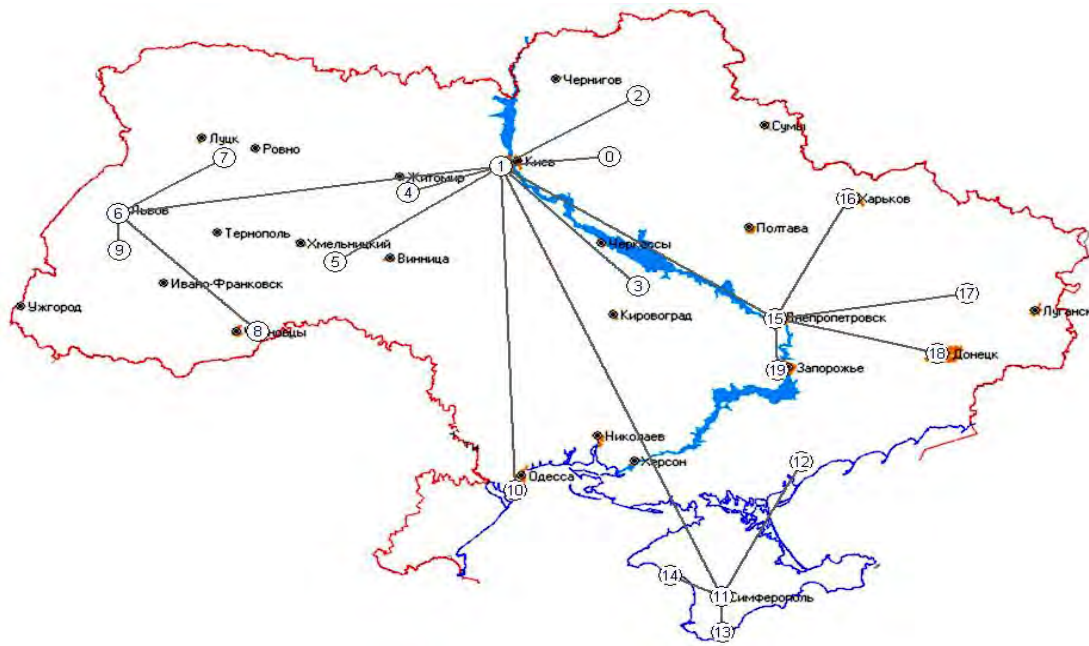


Рис. 2. Структура існуючої системи передачі даних АСУПР

В наведених залежностях:

$F_{АСУ}$  – узагальнений показник функціональної стійкості, обчислений за формулою (1)

Індекс  $\xi$  в (3) припускає знаходження декількох структур для заданої вартості  $C_{доп}$  для оптимізації та нарощування структури системи:

- $\xi = 1$ : знайти  $G_1(V,E)$  для  $C_{доп1}=150\ 000$  н.у.о.;
- $\xi = 2$ : знайти  $G_2(V,E)$  для  $C_{доп2}=300\ 000$  н.у.о.;
- $\xi = 3$ : знайти  $G_3(V,E)$  для  $C_{доп3}=500\ 000$  н.у.о.;
- $\xi = 4$ : знайти  $G_4(V,E)$  для  $C_{доп4}=700\ 000$  н.у.о.;
- $\xi = 5$ : знайти  $G_5(V,E)$  для  $C_{доп5}=1\ 000\ 000$  н.у.о.

Для можливості досягнення результату в роботі прийнято рішення стосовно вирішення декількох однокритеріальних оптимізаційних задач із заданими значеннями  $C_{доп}$ , так як обчислення багатокритеріальної задачі на графах є майже недосяжним.

Припущення.

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

2. Шукані структури не мають заборонених ліній зв'язку. Будемо вважати, що із будь-якого вузла  $v_i$  у будь-який вузол  $v_j$  можна побудувати лінію зв'язку  $e_{ij}(v_i,v_j)$ , що має довжину  $l_{ij}$  і вартість витрат  $C_{ij}$  на капітальні вкладення та експлуатацію лінії зв'язку.

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

$$l_{ij} = \sqrt{(X_j - X_i)^2 + (Y_j - Y_i)^2} / K_L, \text{ де } K_L = 1120 \text{ у.о.довж./км; } X_i, X_j, Y_i, Y_j - \text{ умовні координати вузлів.}$$

4. Пропускна здатність поодинокого каналу передачі інформації приймається  $\rho_{ij} > h_{ij}$ , де  $h_{ij}$  – інтенсивність інформаційного обміну між вузлами  $v_i$  і  $v_j$ .

5. Вартість капітальних вкладень і експлуатації будь-якої структури  $G_\xi(V,E)$  обчислюється на основі відомих емпіричних залежностей. У цих емпіричних

залежностях прийнято константи:  $K_{\text{подовж}}=1,12$  – коефіцієнт подовження каналу;  $\lceil h_{ij} / \rho \rceil = 1$ .

6. Вагові коефіцієнти  $w_{ij}$  у виразі (1) при обчисленні узагальненого показника функціональної стійкості  $F_{АСУ}$  носять суб'єктивний характер і повинні визначатися на основі методу експертних оцінок після ранжирування різних напрямків передачі даних за важливістю.

Особливістю рішення задачі синтезу є використання вихідної структури  $G_0(V,E)$  – всі лінії зв'язку  $G_0$  збережені в синтезованих структурах  $G_\xi(V,E)$ .

В запропонованому модельному прикладі оптимізації структури автоматизованої системи управління повітряним рухом пропонується оптимізувати за критерієм максимуму показника функціональної стійкості при обмеженнях на вартість системи. Така постановка завдання в практичному сенсі інтерпретується як намагання отримати структуру системи, яка б за рахунок закладеної надмірності могла б максимально чинити опір зовнішнім та внутрішнім дестабілізуючим факторам. Вартість капіталовкладень на побудову та експлуатацію системи може бути обрана дослідником на будь-якому рівні, що не перевищує виділених обсягів інвестицій.

В результаті моделювання отримані структури для різних значень  $C_{доп}$  та матриці зв'язності для кожної структури. Наприклад, на рис. 3 наведено структуру  $G_2(V,E)$  для  $C_{доп}=300\ 000$  н.у.о.

Аналіз отриманих структур  $G_\xi(V,E)$ ,  $\xi=1,2,\dots,5$  показує, що всі вони відрізняються від вихідної структури  $G_0(V,E)$  додатковими лініями зв'язку, що забезпечують альтернативні маршрути передачі інформації. Структурні показники оптимізованих структур представлені в табл. 1.

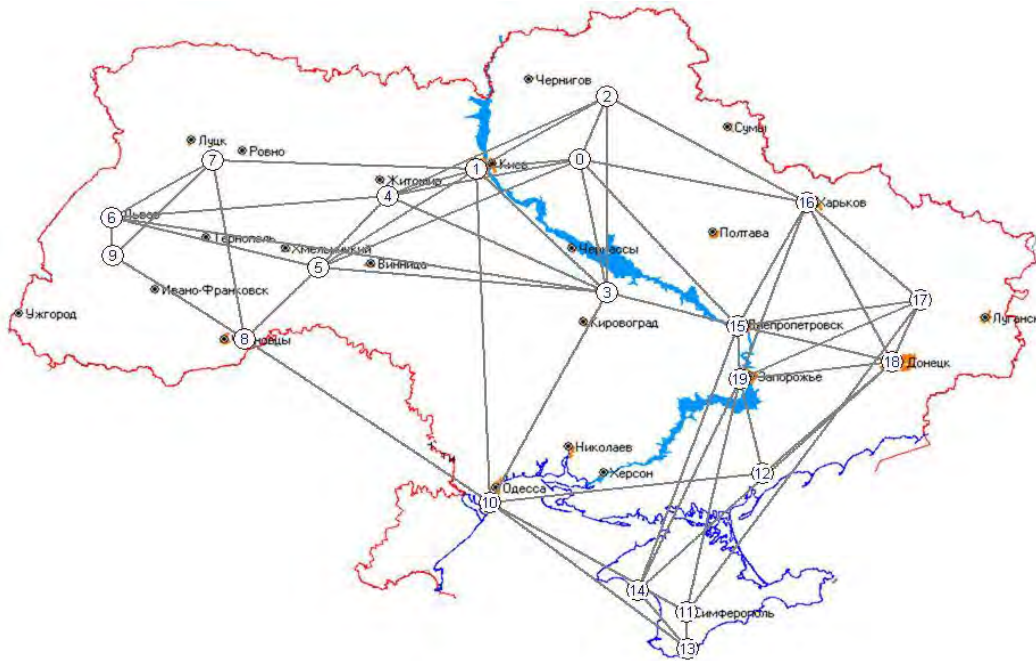


Рис. 3. Синтезована структура СПД АСУПР  $G_2(V,E)$  при  $C_{доп} = 300\ 000$  н.у.о.

Таблиця 1

Структурні показники оптимізованих структур

Структура $G_\xi(V,E)$	$C_{доп}$ тис. н.у.о.	Число ЛЗ м	Діаметр графа D	Коефіцієнт централізації $K_{Ц}$	Коефіцієнт надмірності $K_{Н}$	Вартість C тис. н.у.о.
$G_0(V,E)$	0	19	4	0,906	0	96324
$G_1(V,E)$	150	27	4	0,806	0,421	149258
$G_2(V,E)$	300	53	4	0,770	1,789	290847
$G_3(V,E)$	500	90	3	0,511	3,737	497405
$G_4(V,E)$	700	118	2	0,308	5,211	499259
$G_5(V,E)$	1000	165	2	0,304	7,684	998473

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

1) при підвищенні заданої вартості  $C_{доп}$  підвищується число ліній зв'язку M, пропорційно підвищується коефіцієнт надмірності  $K_{Н}$ ;

2) зниження діаметра графа не є пропорційним витраченій вартості, а 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 більше 2;

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  $C_{доп} \geq 500\ 000$  н.у.о.

На основі отриманих результатів моделювання були розраховані значення узагальненого показника функціональної стійкості  $F_{АСУ}(P_{ij})$ , що обчислюється за виразом (1) при  $w_{ij}=1, i,j=1,...,20$  (табл. 2).

Аналіз значень узагальненого показника функціональної стійкості дозволяє порівнювати різні структури систем.

Таблиця 2

Значення узагальненого показника функціональної стійкості  $F_{АСУ}(P_{ij})$

Структура $G_\xi(V,E)$	$C_{доп}$ тис. н.у.о.	Для значень імовірності p					
		p=0,5	p=0,6	p=0,7	p=0,8	p=0,9	p=0,95
$G_0(V,E)$	0	72,1	107,7	154,2	213,6	288,1	331,7
$G_1(V,E)$	150	72,7	124,2	194,5	268,4	341,5	367,5
$G_2(V,E)$	300	201,3	297,7	357,1	376,6	379,9	380,0
$G_3(V,E)$	500	305,2	367,1	379,4	380,0	380,0	380,0
$G_4(V,E)$	700	338,3	376,2	379,9	380,0	380,0	380,0
$G_5(V,E)$	1000	374,8	380,0	380,0	380,0	380,0	380,0

Чим вище  $F_{ACU}(P_{ij})$ , тим більше «захищеною» буде система від різних збоїв, відмов та ушкоджень за рахунок структурної надмірності. З аналізу отриманих результатів можна зробити висновок про досить слабку чутливість  $F_{ACU}(P_{ij})$  до зміни допустимої вартості структури у випадку щодо високих значень показника  $p$  ( $p=0,9\dots 0,95$ ).

Разом з тим, зниження значень  $p$  приводить до пом'якшення вимог до фізичних каналів передачі інформації, але вимагає необхідності більш високих витрат на побудову додаткових ліній зв'язку для забезпечення функціональної стійкості розподіленої автоматизованої системи управління.

В свою чергу, показник  $p$  сам по собі відображає як фізичну природу каналу зв'язку (кабельний, радіо, оптоволоконний тощо), так і комплекс заходів щодо забезпечення необхідної живучості (надійності) цього каналу. Тому іншим напрямком підвищення функціональної стійкості в смислі показника  $F_{ACU}(P_{ij})$  є підвищення значень кожного окремого показника  $p$  для кожної окремої лінії зв'язку. Очевидно, що комплекс заходів щодо підвищення живучості (надійності) також буде впливати на вартість каналу, що, в остаточному підсумку, приведе до необхідності вирішення нової проблеми вибору раціонального варіанту удосконалення конкретної системи передачі даних АСУПР. Зазначена проблема є важливим науковим напрямком подальших досліджень в цій галузі.

## Висновки

Запропоновано узагальнений показник функціональної стійкості структури СПД АСУПР України, заснований на обчисленні згортки матриці ймовірностей зв'язності вершин графа, що описує досліджувану структуру. Обґрунтовано, що даний показ-

ник характеризує можливості апаратної надмірності структури щодо забезпечення функціональної стійкості розподілених складних технічних систем.

Залежність узагальненого показника від вартості носить монотонний характер із явно вираженим насиченням. При вартості системи не менше 500 тис. н.у.о. в більшості випадків (при  $p > 0,6$ ) подальше збільшення витрат не приводить до істотного підвищення рівня функціональної стійкості структур, що пояснює недоцільність значних фінансових вкладень для реорганізації існуючих каналів зв'язку.

## Список літератури

1. Неділько С.М. Функціональна стійкість автоматизованої системи управління повітряним рухом / С.М. Неділько // Системи навігації, управління та зв'язку. – К.: ЦНДІНУ, 2011. – Вип. 2(18). – С. 37-40.
2. Артюшин Л.М. Оптимізація цифрових автоматических систем, устойчивых к отказам / Л.М. Артюшин, О.А. Машков. – К.: КВВАИУ, 1991. – 89 с.
3. Барабаш О.В. Построение функционально устойчивых распределенных информационных систем / О.В. Барабаш – К.: НАОУ, 2004. – 226 с.
4. Кравченко Ю.В. Методология многокритериальной дискретной оптимизации сложных технических систем на матроидных структурах / Ю.В. Кравченко, В.В. Афанасьев // Збірник наукових праць ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова вип. 22-1. – К.: ІПМЕ. – 2003. – С. 73-78.
5. Неділько С. М. Дослідження математичної формалізації функціональної стійкості автоматизованої системи управління повітряним рухом / С. М. Неділько // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС, 2011. – Вип. 1(27). – С. 47-50.

Надійшла до редколегії 11.04.2011

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

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СТРУКТУРЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ УКРАИНЫ ПО ПОКАЗАТЕЛЮ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

С.Н. Неделько, О.А. Машков

*Предложен обобщенный показатель функциональной устойчивости автоматизированной системы управления воздушным движением, который основан на определении вероятности связности графа структуры системы, а также структурные показатели, характеризующие уровень функциональной устойчивости системы. Выполнен сравнительный анализ избыточных структур по показателям функциональной устойчивости.*

**Ключевые слова:** функциональная устойчивость, избыточность, автоматизированная система управления воздушным движением, вероятность связности.

## THE METHOD OF ESTIMATION OF STRUCTURE OF THE AIR TRAFFIC CONTROL SYSTEM OF UKRAINE WITH INDEX OF THE FUNCTIONAL STABILITY

S.M. Nedilko, O.A. Mashkov

*The generalized index of functional stability of the air traffic control system, that is based on the connectivity probability of structure graph of the systems, and also structural indexes which characterize the level of functional stability of the system are offered. The comparative analysis of surplus structures is carried out with indexes of the functional stability.*

**Keywords:** functional stability, surplus, air traffic control system, probability of connectivity.