

УДК 004.722

С.М. НЕДІЛЬКО¹, Г.Л. БАРАНОВ²¹Державна льотна академія України, Кіровоград, Україна²ДП «Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління», Київ, Україна

ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПОВІТРЯНИМ РУХОМ

Запропоновано технологічні основи забезпечення функціональної стійкості автоматизованої системи управління повітряним рухом, які ґрунтуються на моделюванні процесу виявлення області надмірності та оптимального використання існуючих ресурсів для парирования нештатних ситуацій. Здійснено аналіз надмірних структур за показником функціональної стійкості.

Ключові слова: функціональна стійкість, надмірність, автоматизована система управління повітряним рухом.

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 формуванням 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 акту-

альних на сьогоднішній день є задача виявлення наявної надмірності в структурі АСУПР для забезпечення можливості виключення з обчислювального процесу несправних елементів та передачі їх функцій справним. Зазначеним питанням і присвячена дана стаття.

Аналіз 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 рекомендацій щодо виявлення існуючої надмірності АСУПР з урахуванням запропонованої методики оптимального використання надмірності для парирования позаштатних ситуацій.

Метою статті є представлення результатів досліджень щодо розробки технологічних основ забезпечення 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 ви-

ключення 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.

Однією з причин функціональної нестійкості складних технічних систем у позаштатних ситуаціях є недостатня готовність обчислювальної системи до розпізнавання та дій у непередбачених умовах. Це проявляється в тому, що в обчислювальній системі не враховується весь набір ситуацій. Однією з ознак може бути перший сприйнятий сигнал про порушення режиму польоту ПС або роботи АСУПР, або просторово-часової структури конкретних особливих випадків, або відсутності алгоритмів розпізнавання відмови [2], а також в обмеженні дій при парированні позаштатної ситуації.

Функціонування обчислювальної системи АСУПР з ідентифікації позаштатної ситуації передбачає виконання наступних операцій.

1. Виявлення невідповідності фактичних параметрів функціонування заданим параметрам.
2. Визначення найбільш імовірної групи, до якої відноситься відмова.
3. Відтворення повного образу передбачуваної відмови.
4. Здійснення активного сприйняття інформації на основі способу-еталона для точного розпізнавання ситуації.

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_{ACU} , що обраховується як згортка матриці ймовірностей зв'язності P_{CB} :

$$P_{CB} = \begin{bmatrix} 0 & P_{12} & P_{13} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & 0 & P_{23} & \dots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & P_{n3} & \dots & 0 \end{bmatrix};$$

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

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 ρ_{ij} між вузлами v_i та v_j :

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

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 зв'язності P_{ij} визначається на основі наступних вихідних даних:

- 1) структури СПД АСУПР, що задана матрицею суміжності A_{CM} ;
- 2) імовірності передачі інформації ρ_{ij} по лінії зв'язку l_{ij} .

Структура існуючої системи передачі даних АСУПР представлена на рис. 1, на якому вершини графа позначають вузли комутації, розташовані на території держави, а ребра графа – лінії зв'язку між ними.

Аналіз вихідної структури системи передачі даних (СПД) АСУ повітряним рухом підтвердив необхідність синтезу й оптимізації її структури. Виконаємо синтез функціонально стійкої структури на основі запропонованої методики загального синтезу структури.

Постановка задачі синтезу функціонально стійкої СПД АСУПР.

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 заданими 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:

$$F_{ACU} = f(P_{ij}) \rightarrow \max \quad (2)$$

при обмеженнях:

$$C_\xi = \sum_i \sum_j C_{ij}(l_{ij}, \rho_{ij}, h_{ij}) \leq C_{\text{Доп}\xi}; \quad i, j = 1, 2, \dots, N. \quad (3)$$

$$\chi(G) \geq 2; \quad \lambda(G) \geq 2; \quad G_0(V,E) \subseteq G_\xi(V,E).$$

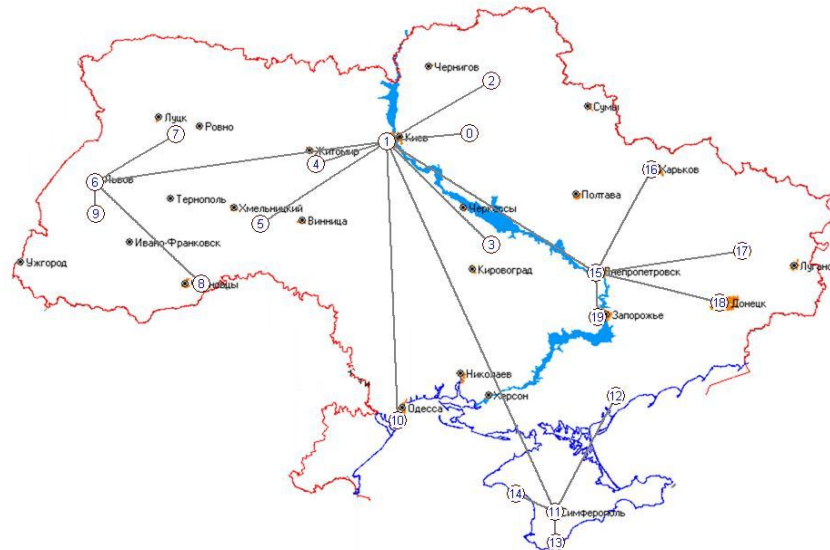


Рис. 1. Структура існуючої системи передачі даних АСУПР

В наведених залежностях: F_{ACU} – узагальнений показник функціональної стійкості, обчислений за формулою (1).

Індекс ξ в (3) припускає знаходження декількох структур для заданої вартості СДОП для оптимізації та нарощування структури системи:

- $\xi = 1$: знайти $G1(V,E)$ для
СДОП1 = 150 000 н.у.о.;
- $\xi = 2$: знайти $G2(V,E)$ для
СДОП2 = 300 000 н.у.о.;
- $\xi = 3$: знайти $G3(V,E)$ для
СДОП3 = 500 000 н.у.о.;
- $\xi = 4$: знайти $G4(V,E)$ для
СДОП4 = 700 000 н.у.о.;
- $\xi = 5$: знайти $G5(V,E)$ для
СДОП5 = 1 000 000 н.у.о.

Для можливості досягнення результату в роботі прийнято рішення стосовно вирішення декількох однокритеріальних оптимізаційних задач із заданими значеннями СДОП, 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 простягнути 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:

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

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

4. Пропускна здатність поодинокого каналу передачі інформації приймається $\rho_{ij} > h_{ij}$, де h_{ij} – інтен-

сивність 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; $[h_{ij} / \rho] = 1$.

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

Рішення задачі синтезу здійснювалося за допомогою розробленого у середовищі Delphi програмного проекту ASUPR на ПЕОМ. Основою для програмування задачі синтезу є алгоритм оптимізації структури. Час рішення задачі синтезу структури $T_{\text{синт}}$, що складає з 20 вузлів комутації, не перевищує 55 хв. Дослідження часу $T_{\text{синт}}$ для структур з більшим числом вузлів не проводилося. Однак, розроблена програма на сучасній платформі здатна вирішити задачу синтезу за прийнятний час ($T_{\text{синт}}$ не більше доби) для структури, що складається з 35 вузлів.

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 капіталовкла-

день 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.

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.

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 С, 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 $C_{доп} \geq 100\ 000$ 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 $w_{ij} = 1$, $i,j = 1,\dots,20$ (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 $F_{АСУ}(P_{ij})$, тим більше «захищеною» буде система від різних збоїв, відмов та ушкоджень за рахунок структурної надмірності. З аналізу рис. 2 можна зробити висновок про досить слабку чутливість $F_{АСУ}(P_{ij})$ 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

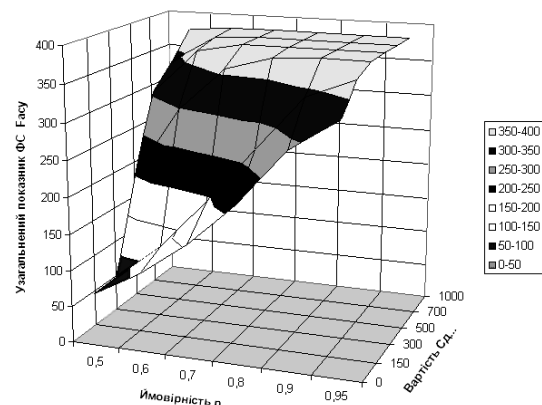


Рис. 2. Розподіл узагальненого показника функціональної стійкості в залежності від значень показників p і C

функціональної стійкості в смислі показника $F_{АСУ}(P_{ij})$ є підвищення значень кожного окремого

показника r 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 технологічні основи забезпечення функціональної стійкості автоматизованої системи управління повітряним рухом, які містять в собі дослідження існуючої та кількох оптимізованих надмірних структур системи передачі даних АСУПР за показниками функціональної стійкості, а також обґрунтування рекомендацій щодо забезпечення функціональної стійкості.

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

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 $r > 0,6$) подальше збільшення витрат не приводить до істотного підвищення рівня функціональної стійкості структур, що пояснює недоцільність значних фінансових вкладень для реорганізації існуючих каналів зв'язку.

Література

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

Надійшла до редакції 26.05.2011

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

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ

С.Н. Неделько, Г.Л. Баранов

Предложены технологические основы обеспечения функциональной устойчивости автоматизированной системы управления воздушным движением, которые основаны на моделировании процесса выявления области избыточности и оптимального использования существующих ресурсов для парирования нештатных ситуаций. Проведен анализ избыточных структур по показателю функциональной устойчивости.

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

THE TECHNOLOGICAL BASES OF MAINTENANCE OF FUNCTIONAL STABILITY OF THE AIR TRAFFIC CONTROL SYSTEM

S.M. Nedilko, G.L. Baranov

This article about technological bases of maintenance of functional stability of the air traffic control system which are based on modeling of process of revealing of area of redundancy and optimum use of existing resources for parrying of supernumerary situations. The analysis of superfluous structures on an indicator of functional stability is carried out.

Key words: functional stability, surplus, air traffic control system.

Неділько Сергій Миколайович – канд. техн. наук, проф., ректор, Державна льотна академія України, Кіровоград, Україна.

Баранов Георгій Леонідович – д-р техн. наук, проф., заступник директора, ДП «Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління», Київ, Україна.