

DOI: 10.35681/1560-9189.2025.27.1.335752

УДК 004.5

**О. Г. Додонов, М. Г. Кузнєцова, О. С. Горбачик**

Інститут проблем реєстрації інформації НАН України  
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна

## Моделювання і оцінювання функціональної стійкості інформаційних систем

*Визначено поняття функціональної стійкості інформаційних систем та її ключові характеристики. Розглянуто підходи до побудови функціонально стійких ІС з використанням принципів багатоверсійності, багатопараметричної адаптації та багаторівневого керування деградацією системи. Подано модель багатоверсійної системи та запропоновано показники функціональної стійкості, що враховують як функціональні можливості, так і структурні характеристики системи. Показано, що оцінювання функціональної стійкості ІС за параметрами графа, що описує її структуру, зводиться до з'ясування питання живучості графа або структурної живучості ІС. Окреслено методи та засоби підвищення структурної живучості, проаналізовано операційні цикли на різних рівнях ієрархії з метою забезпечення стійкості системи. Розглянуто шляхи підвищення функціональної стійкості, зокрема, технологію динамічної реконфігурації. Запропоновано модель структурно-функціональної реконфігурації і модульну структуру підсистеми управління реконфігурацією.*

**Ключові слова:** інформаційна система, функціональна стійкість, показник функціональної стійкості, структурна живучість, динамічна реконфігурація.

### Вступ

Інформаційні системи (ІС) сьогодні відіграють важливу роль в управлінні, особливо в управлінні критичними ситуаціями. Саме завдяки засобам і технологіям ІС стало можливим швидко збирати і аналізувати дані, прогнозувати розвиток подій, ефективно розподіляти наявні ресурси, планувати логістику їхньої доставки, оперативно координувати заходи реагування у разі виникнення надзвичайних ситуацій (НС). Завдяки засобам ІС стало можливим доводити актуальну інформацію до населення через мобільні застосунки і тим самим попереджати небажані соціальні збурення. Аналітичні технології ІС дозволяють проводити ґрунтовний аналіз

© О. Г. Додонов, М. Г. Кузнєцова, О. С. Горбачик

реалізації управлінських рішень, виявляти слабкі місця в управлінні та заходах реагування, напрацьовувати нові удосконалені стратегії попередження НС на майбутнє. Отже, від якості функціонування ІС сьогодні залежить функціональність, надійність і безпека різноманітних об'єктів та інфраструктур сучасного світу. Наслідки відмов апаратних, програмних і комунікаційних засобів ІС можуть бути значущими для навколишнього середовища, життя та здоров'я людей, тому особливого значення набуває задача забезпечення функціональної стійкості таких систем.

### **Функціональність інформаційних систем**

З точки зору користувачів, ІС виконує такі функції:

- оброблювальну/обчислювальну (вчасне та якісне оброблення інформації в усіх аспектах, що цікавлять користувачів);
- моніторингову (відстеження та формування необхідної для користувача зовнішньої і внутрішньої інформації);
- запам'ятовувальну (забезпечення постійного накопичення інформації, збереження та відновлення всієї необхідної інформації);
- комунікаційну (забезпечення передачі необхідної інформації у задані пункти);
- інформаційну (реалізація швидкого доступу, пошуку та видачі необхідної інформації);
- регулювальну (здійснення інформаційно-управлінського впливу на різних рівнях управління у випадку відхилень фактичних значень від заданих);
- оптимізаційну (забезпечення оптимальних розрахунків у разі зміни критеріїв та умов функціонування, стану об'єктів);
- прогнозну (виявлення основних тенденцій, закономірностей і показників розвитку інфраструктури, передбачення наслідків розвитку подій на об'єктах і в самій інфраструктурі при виникненні надзвичайних ситуацій);
- аналітичну (визначення основних показників техніко-економічної діяльності, оцінювання можливих збитків від порушень і відмов на об'єктах інфраструктури);
- документальну (забезпечення отримання всіх обліково-звітних та інших форм документів, їхнє архівування та збереження).

Гарантовано довіряти послугам ІС можна, якщо система є функціонально стійкою. Під функціональною стійкістю розуміють здатність системи своєчасно і безпомилково виконувати функціональні задачі з якістю, визначеною користувачем, в умовах збоїв, відмов, зовнішніх випадкових чи зловмисних деструктивних впливів [1]. Функціональна стійкість ІС, як свідчить статистика [2], не тільки й не настільки залежить від збоїв апаратури, як від стійкості процесів обробки, збереження та передачі даних, тобто від технології роботи з інформаційними ресурсами ІС.

ІС сьогодні є важливими у забезпеченні безпеки функціонування різноманітних об'єктів, оскільки вони складові автоматизованих систем організаційного управління, від їхніх засобів і технологій залежить ефективність управлінських процесів на об'єкті. Високий рівень складності та інтеграції ІС у різні сфери діяльності робить надважливим забезпечення виконання заданих функцій (надання відповід-

них послуг) в умовах виникнення або прояву збоїв і відмов в ІС унаслідок фізичних, проектних дефектів програмно-апаратних засобів, помилкових або навмисних дій людини, зовнішніх атак тощо.

## Функціональна стійкість ІС

Функціональна стійкість — це інтегральна властивість, що характеризує наявність у ІС певного рівня надійності, відмовостійкості, адаптивності, живучості та безпеки. Функціональна стійкість характеризує здатність ІС зберігати або відновлювати виконання критичних функцій навіть в умовах збурюючих впливів, таких як технічні збої, людські помилки, зовнішні атаки або інші непередбачувані події. Ця властивість дозволяє мінімізувати ризики переходу ІС до аварійного або небезпечного станів, що може призвести до серйозних порушень у роботі об'єкта управління.

Будемо вважати ІС на інтервалі часу  $\Delta t$  функціонально стійкою, якщо на цьому інтервалі часу при будь-якому наборі деструктивних впливів  $R_{\Delta t}$  існує хоча б один працездатний розподіл ресурсів ІС, який забезпечить при наявному на інтервалі  $\Delta t$  стані зв'язку реалізацію визначеної множини функцій  $F = \{f_n\}$  з рівнем якості не нижче заданого  $\alpha_{lim}$ .

Забезпечення функціональної стійкості ІС передбачає введення певної надмірності; перманентного моніторингу стану ІС системою вбудованого контролю; формуванням контуру захисту від негативних впливів зовнішнього середовища; використання компонентів з підвищеним рівнем захищеності та надійності, створення процедур для оперативного відновлення роботи ІС після виникнення збоїв. Та на жаль, додаткова надмірність веде до погіршення техніко-економічних характеристик ІС. Системи контролю відстежують заданий ряд параметрів, але не завжди забезпечують адекватну реакцію на нештатну ситуацію, до того ж не зменшується ймовірність виникнення таких ситуацій. Контур захисту мінімізує вплив зовнішніх факторів, але повністю його не виключає. Вибір елементної бази з підвищеним рівнем захищеності та надійності підвищує відмовостійкість ІС, та не забезпечує функціональної стійкості, коли відмова вже сталася.

Функціональну стійкість ІС оцінюють, використовуючи різні процедури та техніки [2–7], які недостатньо систематизовані й узгоджені за вхідними та вихідними параметрами. Так, у різних дослідженнях показниками функціональної стійкості конкретних ІС слугують: кількість виконуваних управлінських функцій, виконання визначеної функції із заданим показником якості, сумарна вага виконуваних ІС функцій, час безперервного функціонування системи, керованість технологічних процесів, зв'язність певної управлінської структури, завершеність управлінських, виробничих чи інших процесів тощо. Для мінімізації ризиків неточного оцінювання необхідно визначитися з порядком їхнього сумісного та паралельного застосування.

## Оцінювання функціональної стійкості

Для зниження ймовірності відмов, що викликані фізичними дефектами апаратних засобів, дефектами проектування програмних засобів і зовнішніми впливами інформаційного та іншого характеру при створенні ІС, які задіяні в процесах

управління, впроваджуються методи та структурні рішення на засадах багатoversійності (дiверсності, N-versійності, diversity, multiversity). У широкому сенсі це означає використання процесно-продуктної різноманітності в системах, яка передбачає резервні можливості (канали), що створені за різними програмно-апаратними версіями. Багатoversійна система — це система, в якій, на відміну від одноверсійної, наявні кілька версій-продуктів і спеціальні засоби для їхнього ініціювання і обробки результатів виконання версій.

Одноверсійну систему можна описати четвіркою [2]:

$$S(1) = \{\hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z}, F\},$$

де  $\hat{X}$  — алфавіт вхідних сигналів;  $\hat{Y}$  — алфавіт внутрішніх станів;  $\hat{Z}$  — алфавіт вихідних сигналів;  $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$  — множина виконуваних функцій.

Багатoversійна система  $S(N)$  описується наступним чином:

$$S(N) = \{\hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z}, F, \hat{V}, \Psi\},$$

де  $\hat{X}$  — алфавіт вхідних сигналів;  $\hat{Y}$  — алфавіт внутрішніх станів;  $\hat{Z}$  — алфавіт вихідних сигналів;  $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$  — множина виконуваних функцій;  $\hat{V} = \{\hat{v}_1, \hat{v}_2, \dots, \hat{v}_N\}$  — множина версій,  $\Psi = \{\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_K\}$  — множина варіантів обробки результатів реалізації версій.

Існує залежність між багатoversійною і одноверсійною системами [2]:

$$S(N) = \{S(1), \hat{V}, \Psi\}.$$

Одноверсійна система може бути структурно надмірною і мати засоби  $\Psi$ , які здійснюють обробку результатів від ідентичних каналів.

У багатoversійних системах можливо застосувати декілька видів версійної надмірності [2]. Їхню множину  $R = \{r_1, r_2, \dots, r_r\}$  можна декомпонувати на підмножини за версіями продуктів і версіями процесів. У версіях продуктів багатoversійної системи акумулюються в свою чергу різні види версійної надмірності  $r \in R$ . Це описується відображенням із застосуванням булевої матриці  $\Xi = \|\Theta_{rj}\|$ :

$$\Xi: R \rightarrow \hat{V}.$$

У цьому випадку багатoversійну систему можна описувати як:

$$S(N, r) = \{\hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z}, F, \hat{V}, \Psi, R, \Theta\} \text{ або } S(N, r) = \{S(N), R, \Theta\} = \{S(1), \hat{V}, \Psi, R, \Theta\}.$$

Для багатoversійних систем важлива також відповідність між множинами версій  $\hat{V}_i$  резервних каналів системи  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_q\}$  [2], що можна задати відображенням із використанням булевої матриці  $Q = \|w_{ij}\|: Q: \hat{V} \rightarrow C$ .

І відповідно модель багатoversійної системи матиме вигляд:

$$S(N, r, q) = \{\hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z}, F, \hat{V}, \Psi, R, \Theta, C, Q\} = \{S(N, r), C, Q\}.$$

Принцип багатoversійності ефективно може доповнюватися при проектуванні функціонально стійких ІС багатопараметричною адаптацією та багаторівневою керованістю деградації [2]. Багатопараметрична адаптація передбачає організацію кількох програмно реалізованих і апаратно підтримуваних контурів управління процедурою реконфігурації з урахуванням видів і числа компонент, що від-

мовили, а багаторівнева керованість деградацією дозволяє провести перерозподіл надмірних і ненадмірних, але мобільних ресурсів (і корекцію, за необхідності, цілей функціонування) для мінімізації обсягів деградації.

Визначимо структуру системи управління об'єктом  $\hat{S}$  у вигляді трійки:

$$\hat{S} = \langle G, R, U \rangle,$$

де  $G$  — компонентна множина системи;  $R$  — сукупність правил, за якими повинна функціонувати система  $\hat{S}$ ;  $U$  — процес функціонування, що визначений на множині  $G$  в рамках правил  $R$ . ІС входить до складу системи управління об'єктом  $\hat{S}$ .

Припустимо, що за відсутності відмов ІС забезпечує виконання комплексу завдань управління об'єктом:  $\Phi = (\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_m)$ .

Комплекс завдань  $\Phi$  виконується із заданою якістю та необхідною ефективністю за умов наявності в ІС ресурсів для виконання деякої множини функцій:

$$F = \bigcup_{i \in I} F_i = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}.$$

На функціональному рівні ІС складову системи управління об'єктом  $\hat{S}$  можна розглядати як сукупність функціональних модулів, що виконують функції із множини  $F$ :  $\hat{s} = (\hat{s}_1, \hat{s}_2, \dots, \hat{s}_k)$ ,  $\hat{s} \subset \hat{S}$ .

Позначимо множину критичних управлінських завдань, невиконання яких спричинить небажані зміни у стані об'єкта управління, через  $\Phi^{kr} = (\phi_1^{kr}, \phi_2^{kr}, \dots, \phi_m^{kr})$ ,  $\Phi^{kr} \subset \Phi$ .

Завдання управління з множини  $\Phi^{kr}$  передбачають виконання сукупності управлінських задач, незалежних чи інформаційно пов'язаних, в ІС, що можливо за наявності в системі ресурсів для виконання функцій з множини  $F$ .

Припустимо, що  $F^* \subseteq F$  — деяка підмножина виконуваних в ІС функцій. Тоді, якщо  $d$  таке, що:

1) у разі відмови будь-яких  $d$  функціональних компонентів  $\hat{s}_j$  ІС може виконати будь-яку функцію з множини  $F^*$  і відповідно система управління об'єктом  $\hat{S}$  забезпечить виконання множини критичних управлінських завдань  $\Phi^{kr} \subset \Phi$ ;

2) знайдеться такий набір з  $(d + 1)$  функціональних компонентів  $\hat{s}_j$  і така функція  $f_i \in F^*$ , що в разі відмови  $(d + 1)$  функціональних компонентів  $\hat{s}_j$  ІС не зможе забезпечити виконання функції  $f_i \in F^*$ , то величину

$$P_{stab} = \frac{d}{n}$$

визначимо як коефіцієнт функціональної стійкості ІС і водночас функціональної стійкості системи управління об'єктом  $\hat{S}$ .

Зрозуміло, що  $0 \leq P_{stab} \leq 1$ . Якщо неможлива відмова жодного із функціональних компонентів  $\hat{s}_j$  ІС без втрати можливості виконувати управлінські завдання з множини  $\Phi^{kr}$ , то  $P_{stab} = 0$ . Якщо ресурсів ІС достатньо для виконання всіх функцій, і до того ж існує достатньо велика функціональна надмірність або можливість взаємозаміни функціональних компонентів  $\hat{s}_j$  в ІС, то  $P_{stab} = 1$ .

Для різних класів систем можливі різні алгоритми обчислення показника функціональної стійкості. Та якщо відомий коефіцієнт функціонального перекрит-

тя  $K_f$  — кількісний показник (забезпечується проектом ІС), що визначає число функцій  $f_i \in F^*$ , виконуваних одним функціональним компонентом  $\hat{s}_j$  ІС, і характеризує можливості функціональної взаємозамінності  $\hat{s}_j$ ;  $N$  — кількість  $f_i$ , які мають реалізовуватися в ІС для виконання множини критичних управлінських завдань системою управління об'єктом  $\hat{S}$ , то можна визначити верхню оцінку коефіцієнта функціональної стійкості:  $P_{stab} \leq \frac{K_f}{N}$ .

Оскільки верхня оцінка коефіцієнта функціональної стійкості не залежить від кількості функціональних компонентів в ІС, то підвищити функціональну стійкість системи простим резервуванням функціональних компонентів неможливо. Підвищення коефіцієнта функціональної стійкості можливе шляхом підвищення коефіцієнта функціонального перекриття або «вдалим» вибором множини функцій  $F$  і розподілу функцій  $f_i$  між функціональними компонентами  $\hat{s}_j$  ІС.

### Оцінювання функціональної стійкості ІС з урахуванням властивостей структури системи

ІС, що задіяні у процесах управління, належать до класу складних систем і створюються на основі технології корпоративних обчислень. Головною вимогою до таких систем є гарантоване забезпечення користувачів (управлінців) доступом до розподілених інформаційних ресурсів, об'єднаних у єдиний корпоративний інформаційний простір, для вирішення завдань управління об'єктом.

Оцінювання функціональної стійкості розподіленої ІС за умови визначення її основної функції, як обміну даними між вузлами комунікації, зазвичай зводяться до розв'язання задач аналізу зв'язності графів, оцінки ймовірності існування комунікаційних структур, що надають можливість досягти визначеного вузла, оцінки ймовірності формування працездатної структури в ІС в умовах накопичення пошкоджень ліній зв'язку тощо. Моделлю структури ІС слугує неорієнтований граф  $G(V, L)$ ;  $V = \{v_i\}$ ;  $L = \{l_{ij}\}$ ;  $i, j = \overline{1, M}$ , де  $V$  — множина вершин графа, що відповідає множині вузлів комунікації;  $L$  — множина ребер, відповідає множині ліній зв'язку між вузлами комунікацій. Граф описується матрицею суміжності:

$$A = \|a_{ij}\|, i, j = \overline{1, M}, a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } l_{ij} \in L \\ 0, & \text{якщо } l_{ij} \notin L \end{cases}$$

Розподілена ІС буде функціонально стійкою, якщо при видаленні вершини або ребра з графа  $G$ , що є моделлю ІС, буде отримано граф, у якому не виконується жодне з наступних тверджень:

- граф складається як мінімум з двох компонентів;
- не існує направлених  $(l_i - l_j)$  шляхів для визначених множин вершин;
- число вершин у найбільшій компоненті графа  $G$  менше деякого наперед заданого числа;
- найкоротший шлях  $(l_i - l_j)$  довший за деяку задану величину.

Оцінювання функціональної стійкості ІС за параметрами графа, що описує її структуру, зводиться до з'ясування питання живучості графа або структурної живучості ІС. Побудова оцінок структурної живучості ІС пов'язана з вирішенням таких задач:

- пошуку критичних компонентів мережі, зокрема вузлів, вилучення яких призводить до розпаду мережі на незв'язані частини;
- аналізу стійкості, еластичності й уразливості мережі;
- оцінки навантаження дуг і пропускної здатності мережі;
- аналізу відновлюваності мережі;
- пошуку варіантів побудови та розвитку мережі з мінімальним значенням середнього шляху, навантаження дуг і в той же час з максимальною пропускною здатністю;
- побудови показників зв'язності мережі.

Обрахування показників зв'язності, наприклад, імовірності зв'язності за умови випадкового існування ребер графа, на практиці стикається зі значними обчислювальними складностями, оскільки рішення цієї задачі зводиться фактично до прямого перебору. У той же час, використовуючи шляхи та розрізи графа, що моделює комунікаційну мережу, можна отримувати достатньо прості (порівняно з точними методами знаходження відповідних характеристик) граничні — верхню та нижню — оцінки потрібного показника (оцінки Цезарі-Прошана, Литвака-Ушакова) [2].

Дослідження зв'язності більшості графів, тобто рішення задачі про те, чи може певний вузол-джерело здійснити зв'язок з іншим певним вузлом-стоком у багатьох випадках не дає вичерпного критерію для відповіді на питання про якість функціонування системи з мережною структурою. Тому проводилися дослідження щодо пошуку інших відповідних показників якості функціонування комунікаційних мереж.

Важливу групу показників структурної живучості, та відповідно структурної стійкості, складають так звані «міри живучості». При їхньому визначенні припускалось, що розумний супротивник, знаючи структуру мережі, намагається порушити її функціонування. Мережа має високий показник живучості, якщо необхідно «зруйнувати» велике число вузлів і (або) ребер, щоб відчутно погіршити або зовсім перервати її функціонування. Таку міру живучості умовно називають «детермінованою мірою надійності» і застосовують при початковому плануванні і розробці мереж зв'язку, коли відчувається дефіцит статистичних даних щодо якості функціонування мережі.

У математичній теорії графів міри живучості часто інтерпретуються як кількісні міри зв'язності для структури графа: мінімальний розріз, вузлова зв'язність, узагальнена зв'язність, довжина шляху тощо.

Задача оцінювання функціональної стійкості, як і аналізу структурної живучості, постає ще на початкових етапах створення структури зв'язку розподіленої ІС і формулюється як задача оцінки розміру максимального потоку, який може передаватися у мережі при відмовах її елементів за умов зниження до дозволеного рівня якості функціонування. При оцінюванні живучості комунікаційних мереж у залежності від технологій передачі, які в них використовуються, враховується наявність різних видів трафіку (аудіо- та відеоінформація, дані, стислі відео і аудіо), різних категорій сервісів, ймовірність втрати даних, вимоги до якості виконання обробки. Покращення структурної живучості і відповідно функціональної стійкості такої системи досягається шляхом використання пакетної передачі даних. Маршрути доставки різних пакетів інформації від одного вузла мережі до іншого можуть проходити

різними фізичними каналами зв'язку, змінюючись залежно від працездатності та завантаження каналів. Якщо деякі із каналів зв'язку виходять з ладу або пошкоджуються, мережа все одно залишатиметься працездатною, вся інформація буде передаватися через інші активні канали, що гарантує функціональність.

Застосування кільцевої топології надає можливість автоматичного переключення каналів, при виникненні будь-яких аварійних ситуацій, на резервні. Наприклад, устаткування SDH (Synchronous Digital Hierarchy) передбачає резервування ліній і апаратних блоків за схемою 1+1, що надає можливість автоматично переключати трафік на резервний напрямок і проводити відновлювальні технологічні роботи без перерви трафіку.

Визнаним методом підвищення структурної живучості, а значить і функціональної стійкості розподілених ІС, є резервування тих дуг і вузлів мережі, які багаторазово використовуються при організації різних маршрутів. Резервовані мережі можуть створюватись за допомогою різних технологій, які забезпечують відмовостійкість та балансування навантаження. Так технологія RSTP (Rapid Spanning Tree Protocol) дозволяє швидко реагувати на зміни топології мережі, блокуючи або активуючи певні маршрути для запобігання появі петель та оптимізації трафіку. Метод Redundant Coupling передбачає попарне з'єднання сегментів мережі, завдяки чому підвищується стійкість до відмови окремих з'єднань. Технологія подвійного з'єднання (Dual Homing), що передбачає підключення мережевих вузлів одночасно до двох різних комутаторів або маршрутизаторів, дозволяє знизити ризик втрати зв'язку у разі виходу одного з них з ладу. Технологія trunking (агрегації каналів) дозволяє об'єднувати кілька фізичних з'єднань в одне логічне, завдяки чому не тільки підвищується пропускна здатність, але й забезпечується резервування на рівні лінків. Використання резервованих кільцевих структур, таких як Hirschmann HIPER-Ring, дозволяє автоматично переключатися на резервний шлях у разі обриву основного кільця і забезпечує мінімальний час відновлення (у межах кількох мілісекунд).

## **Реконфігурації в ІС як засіб підвищення функціональної стійкості**

Реконфігурація, у загальному випадку, є процесом зміни структури, параметрів, технологій функціонування для відновлення до потрібного рівня показників працездатності й ефективності системи або забезпечення мінімального зниження рівня цих показників в умовах функціональної деградації системи. Основна складність полягає у необхідності визначення моменту застосування процедури реконфігурації, правил і алгоритмів перерозподілу наявних ресурсів і формування нових структурних зв'язків [2], забезпечуючи неперервність і якість функціонування (надання відповідних сервісів) ІС.

Вирішення будь-якого завдання, що підтримується засобами ІС, які забезпечують накопичення, обробку, зберігання та передачу інформації, породжує певну підсистему інформаційної взаємодії. Так, підсистема інформаційної взаємодії, що виникає при вирішенні задач управління об'єктом в автоматизованій системі організаційного управління, породжується організаційною структурою вирішення завдання управління та складається з вузлів комутації і каналів (ліній) зв'язку між окремими елементами підсистеми. Математичною моделлю такої підсистеми підтримки виконання завдання управління може слугувати неорієнтований граф:



$\hat{G}(V, L)$ ;  $V = \{v_i\}$ ;  $L = \{l_{ij}\}$ ;  $i, j = \overline{1, M}$ , де  $V$  — множина вершин графа, що відповідає множині вузлів комутації й обробки інформації;  $L$  — множина ребер, яка відповідає множині зв'язків між вузлами.

Пропустимо, що ІС буде виконувати основну функцію — забезпечення інформаційної взаємодії, завдяки обміну даними між вузлами комутації й обробки інформації, — якщо існує хоча б один маршрут передачі даних. У цьому випадку вимога функціональної стійкості ІС трансформується у вимогу зв'язності графа  $\hat{G}$ , що дає підставу кількісної оцінки функціональної стійкості ІС, виходячи з топології ІС.

Унеможливити виконання завдань забезпечення інформаційної взаємодії для управління об'єктом може, наприклад, непрацездатність вузла комутації й обробки інформації підсистеми інформаційної взаємодії чи втрата зв'язків між вузлами внаслідок їх фізичного руйнування або порушення цілісності даних; погіршення у функціонуванні ІС (зниження продуктивності, пропускнуєї спроможності ліній зв'язку та ін.); спотворення чи дефекти алгоритмів функціонування вузлів комунікації й обробки інформації; зменшення структурної надлишковості, запасу ресурсів; погіршення функціонування елементів ІС чи деградація всієї системи; фатальна втрата працездатності ІС тощо.

Кожний вузол комунікації й обробки інформації  $v_i$  являє собою функціональний компонент ІС, який характеризується своїм функціональним призначенням — множиною функцій  $F_i \subseteq F$ . Функціональна спеціалізація вузлів відбувається шляхом інсталяції відповідного програмного забезпечення і налагодження необхідних зв'язків для обміну інформацією. Модульний принцип розробки програмного забезпечення дозволяє формувати необхідну конфігурацію підсистеми ІС для виконання функцій накопичення, обробки, зберігання і передачі інформації для підтримки вирішення конкретного завдання управління. Функціональність вузла  $v_i$  може бути розширена, у разі потреби, підключенням нових програмних модулів.

Для забезпечення безперервності процесу управління, гарантованого виконання завдань управління навіть за наявності небажаних впливів на ІС, які можуть призвести до непрацездатності вузлів комутації й обробки інформації, порушення зв'язків між ними в ІС впроваджується технологія динамічної реконфігурації. Впровадження цієї технології передбачає постановку і рішення різних класів задач управління структурною динамікою, зокрема, задач планування і управління процесами обробки і передачі ресурсів при перебудові структури системи. Отже, динамічна реконфігурація є не лише технологічним рішенням щодо компенсації відмов в ІС, а й самостійним управлінським процесом по забезпеченню оперативного перерозподілу функцій і ресурсів між вузлами (функціональними компонентами ІС) та підвищенню ефективності функціонування ІС [8].

Планування процедур динамічної реконфігурації ІС потребує розв'язання задач:

— побудови сценаріїв реконфігурації ІС в умовах дії деструктивних впливів на ІС чи об'єкт управління;

— розробки, аналізу та багатокритеріального синтезу планів функціонально-структурної реконфігурації ІС в умовах перманентної зміни середовища функціонування;

— дослідження шляхом аналітико-імітаційного моделювання умов реалізації процедур реконфігурації.

Комп'ютерне моделювання динамічної реконфігурації ІС дозволяє відпрацювати не лише процеси, які реалізуються на основі функціонального резервування чи побудови відмовостійких розкладів виконання задач для множини працездатних станів ІС, а й ті, що враховують структурну та функціональну розподіленість системи і дозволяють задіяти реальні та віртуальні ресурси для виконання визначених функцій.

Основою для побудови комп'ютерної моделі структурно-функціональної реконфігурації може слугувати узагальнена теоретико-множинна модель реконфігурації складної системи у вигляді математичної структури вибору:

$$\left( Q(s, w), \Delta, \{r_i^\alpha(w)\}_{i \in \Gamma}, \{r_j^\beta(w)\}_{j \in \Gamma_1}, \{F^k(w)\}_{k \in \Gamma_2}, \Omega = \{w\} \right),$$

де  $Q(s, w)$  — деяка вихідна структура типу  $s$ , яка визначає тип моделі (статична, динамічна, математична, логіко-алгебраїчна, детермінована, з невизначеністю тощо);

$\Delta$  — множина альтернатив (планів, способів) структурно-функціональної реконфігурації, серед яких відбувається вибір;

$\{r_i^\alpha(w)\}_{i \in \Gamma}$  — множина  $\alpha$  відношень, обмежуючих вибір, які вводяться безпосередньо при постановці задач вибору та відбивають основні просторово-часові, технічні та технологічні обмеження, що пов'язані з процесом функціонування складної системи;

$\{r_j^\beta(w)\}_{j \in \Gamma_1}$  — множина  $\beta$  відношень переваг, що задаються на  $\Delta \times \Omega$  і характеризують різні переваги при виборі раціонального рішення;

$\{F^k(w)\}_{k \in \Gamma_2}$  — множина узгоджувачих правил, які дозволяють визначити результуюче відношення переваги задачі структурно-функціональної реконфігурації системи;

$\Omega = \{w\}$  — множина подій (множина невизначеності).

Ця модель надає широкі можливості для різноманітних постановок задач реконфігурації. Однак, слід зазначити, що у конкретну постановку задачі бажано привнести дані, які би дозволили мінімізувати критеріальну та модельну невизначеність і звести задачу з невизначеними факторами до її детермінованого варіанта.

Реконфігурація в ІС ініціюється задля збереження функціональності системи, для відновлення до потрібного рівня показників працездатності й ефективності системи або забезпечення мінімального зниження їхнього рівня в умовах накопичення ушкоджень компонентів системи та втрати ресурсів. Процедури динамічної реконфігурації можуть виконуватись окремою підсистемою ІС, до складу якої входять модулі моніторингу, аналізу, діагностування, формування конфігурації, реалізації реконфігурації, база даних реконфігурації (БДР).

*Модуль моніторингу* призначений для збору даних щодо стану ІС і її компонентів. Отримані дані записуються, із зазначенням точного часу їхнього отримання, у відповідні таблиці спеціалізованої БДР.

*Модуль аналізу* призначений для виявлення відхилень у функціонуванні ІС та її компонентів. Виявлення критичних відхилень даних моніторингу від норматив-

них чи граничних значень дозволяє ідентифікувати компоненти ІС, які можуть загрожувати стабільному функціонуванню ІС, а також оцінити їхній вплив на роботу інших компонентів. Модулем аналізу формується список потенційно небезпечних компонентів ІС, який передається на подальшу обробку модулю локалізації.

*Модуль діагностування* у разі отримання від модуля аналізу повідомлення про критичність виявлених відхилень ініціює процедуру діагностування небезпечних компонентів ІС, на яких виявлені критичні відхилення. Основне завдання модуля — вжити необхідних заходів для виключення з робочої конфігурації ІС компонентів, які знаходяться під небажаним впливом або непрацюючі, за мінімальний час.

Процедура діагностування включає кілька етапів: визначення області діагностування, вибір методу діагностування, виконання локалізації компонентів, на яких зафіксовані критичні відхилення або вони непрацюючі, а також формування списку користувачів, яких потрібно повідомити про результати. Після цього відповідні повідомлення надсилаються користувачам згідно зі сформованим списком. Формується також список функціональних компонентів ІС, моніторинг яких не виявив критичних відхилень. Після завершення процедур локалізації і формування списку працездатних функціональних компонентів ІС ініціюється процедура реконфігурації перерозподілу функціональних задач.

*Модуль формування конфігурації* призначений для формування рішення про вибір і застосування процедури реконфігурації. Основні функції цього модуля: визначення функціональних задач для перерозподілу; встановлення обмежень для кожної із цих задач, що підлягають перерозподілу; визначення списку функціональних компонентів ІС і їхніх властивостей для перерозподілу функціональних задач; вирішення задачі перерозподілу функціональних задач з урахуванням визначених обмежень.

Передусім модуль формування конфігурації визначає список функціональних задач, у виконанні яких були задіяні під час діагностування функціональні компоненти з критичним відхиленням показників функціонування, а також задач, які повинні виконувати ці функціональні компоненти ІС надалі. Визначаються дві групи функціональних задач:

- 1) задачі, виконання яких було припинено під час діагностування і які не завершилися у штатному режимі;
- 2) задачі, які мають виконуватися після завершення перерваних, відповідно до вимог технологічного процесу.

Для кожної задачі із цих груп визначаються пріоритети; правила взаємодії і права доступу користувачів у процесі вирішення задач та інші обмеження, які формалізують властивості та вимоги функціональних задач.

Другим блоком вхідної інформації для вирішення задачі перерозподілу функціональних задач є список компонентів ІС, що є працездатними на даний момент і здатні потенційно виконувати функціональні задачі зі списку, який було сформовано раніше. Природно, що список компонентів для перерозподілу може бути меншим за список компонентів ІС, який отримано за допомогою модуля діагностування. Наступним етапом є формування переліку властивостей для кожного функціонального компонента ІС з цього списку (продуктивність, поточне завантаження, планове завантаження тощо). Інформація про функціональні задачі, обмеження,

список функціональних компонентів і їхні властивості є вхідною для вирішення задачі реконфігурації і отримання множини рішень, які потім ранжуються за визначеними критеріями. Обирається рішення з найвищим рангом. Отримані результати записуються у БДР.

*Модуль реалізації реконфігурації* призначений для виконання рішення про реконфігурацію. Основні функції модуля включають: реалізацію обраної процедури реконфігурації і формування списку користувачів, яким необхідно повідомити про результати реконфігурації. Модуль виконує перезапуск задач, що були аварійно завершені під час діагностування, на визначених компонентах ІС, а також вносить необхідні зміни до структури послідовності виконання комплексу задач. Ці зміни автоматично коригуються в диспетчері задач, який контролює їхнє виконання. Оскільки деякі задачі з низьким пріоритетом можуть бути виключені з подальшого виконання, то це призводить до зміни структури зв'язків між задачами.

*База даних реконфігурації* — це спеціалізована система, що призначена для зберігання даних і знань, які необхідні для функціонування підсистеми динамічної реконфігурації. Вона містить перелік індикаторів і їхніх параметрів (граничні та нормативні значення); часові ряди значень індикаторів, отриманих у результаті моніторингу; список компонентів ІС, які підлягають виключенню; методи та механізми обробки відмов. Необхідність використання БДР обумовлена тим, що обсяг даних, які потребують зберігання в одиницю часу, є значним і залежить від кількості індикаторів, які відслідковуються, а також частоти отримання даних. Для таких цілей промислового реляційного СУБД не підходить, оскільки вона не оптимізована для обробки великих обсягів даних.

Підсистема динамічної реконфігурації має працювати у фоновому режимі. В разі появи відхилень від заданого штатного режиму функціонування компонентів ІС, які можуть призвести або призвели до нештатних ситуацій, підсистема динамічної реконфігурації активізується.

Практичний досвід свідчить, що впровадження динамічної реконфігурації дозволяє підвищити функціональну стійкість ІС і відповідно безпеку функціонування та управління різноманітними об'єктами.

## Висновки

Функціональна стійкість є важливою характеристикою ІС, що визначає їхню здатність ефективно функціонувати, забезпечуючи виконання критичних функцій навіть в умовах непередбачуваних відмов. Показник функціональної стійкості ІС залежить від концептуальних засад, на яких створюється система, таких як використання багатоверсійності, багатопараметричної адаптації до відмов, методів резервування тощо. «Вдале» функціональне перекриття та розподіл функцій і ресурсів між компонентами ІС, організація та впровадження процедур динамічної реконфігурації дозволяє покращити показник функціональної стійкості системи.

1. Oleksandr Dodonov, Olena Gorbachyk, Maryna Kuznietsova. Automated Organizational Management Systems of Critical Infrastructure: Security and Functional Stability. *CEUR Workshop Proceedings*. 2021. **3241**. P. 1–12. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-3241/paper1.pdf>

2. Забезпечення функціональної безпеки критичних інформаційно-керуючих систем: монографія / за ред. В.С. Харченка, С.В. Яковлева. Харків: Константа, 2019. 272 с.

3. S. Tolupa, S. Laptiev. The Methodology for Evaluating the Functional Stability of the Protection System of Special Networks. *Наукоємні технології*. 2022. Т. 3, № 55. С. 178–183.
4. Миронюк М.Ю., Майстров О.О., Мусієнко А.П., Макарчук А.В. Аналіз побудови інтелектуальної інформаційної системи на основі поняття функціональної стійкості. *Зв'язок*. 2024. № 1. С. 3–8.
5. Барабаш О., Макарчук А., Саландра І. Дослідження ймовірнісного показника функціональної стійкості розподілених інформаційних систем. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, 2024. № 1. С. 45–50. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-77-6>.
6. Калашник-Рибалко М.А. Методика забезпечення функціональної стійкості пілотажно-навігаційного комплексу літального апарату на окремих режимах польоту. *Збірник наукових праць Харківського національного університету повітряних сил*. 2018. № 1. С. 67–76.
7. Гук О.М., Пермяков О.Ю., Нестеров О.М., Уварова Т.В. Аналіз існуючих підходів щодо оцінювання функціональної стійкості гетерогенних інформаційних систем військового призначення. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2020. № 3(39). С. 39–43.
8. Oleksandr Dodonov, Olena Gorbachyk, Maryna Kuznietsova. Dynamic Reconfiguration in Automated Organizational Management Systems. Selected Papers of the XX International Scientific and Practical Conference «Information Technologies and Security» (ITS 2020). Kyiv, Ukraine, December 10, 2020. Online: <http://ceur-ws.org/Vol-2859>. P. 129–141.

Надійшла до редакції 23.03.2025