

УДК 004.052.2+004.8

DOI: 10.31673/2412-9070.2024.010308

М. Ю. МИРОНЮК¹, канд. військ. наук;О. О. МАЙСТРОВ¹, канд. техн. наук;А. П. МУСІЄНКО², доктор техн. наук, доцент;А. В. МАКАРЧУК², аспірант,¹ Національний університет оборони України, Київ² Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

АНАЛІЗ ПОБУДОВИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ ПОНЯТТЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ

Розвиток сучасного суспільства вимагає інтенсивного прогресу інформаційних технологій із високим ступенем автономності. Особливо гостро ця проблематика стосується виробничих підприємств, які функціонують за умов впливу дестабілізуювальних факторів. У статті продовжено дослідження особливостей функціональної стійкості. Під функціональною стійкістю розуміється властивість інтелектуальної інформаційної системи зберігати функціонування, можливо із зниженням якості, протягом зазначеного часу під впливом зовнішніх і внутрішніх дестабілізуювальних факторів. Під зовнішніми та внутрішніми дестабілізуювальними факторами розуміються відмови, збої модулів системи, механічні пошкодження, теплові впливи, помилки обслуговувального персоналу. Основними етапами забезпечення функціональної стійкості є виявлення модуля, який відмовив під час контролю, його діагностування та відновлення функціонування інтелектуальної інформаційної системи. Особливістю інтелектуальних інформаційних систем є те, що вони мають функціонувати автономно. За їх допомогою можна забезпечити підвищення продуктивності праці всіх виробничих центрів із зменшенням кількості зайнятих у виробництві людей.

Метою роботи є побудова математичного апарату для кількісного оцінювання функціональної стійкості системи обміну даних інтелектуальної інформаційної системи. Також у статті наведено переваги застосування кількісних методів оцінювання функціональної стійкості за такими показниками, як межа та запас функціональної стійкості.

На основі цього оцінювання можна давати рекомендації з побудови інтелектуальної інформаційної системи. Крім того, такі оцінювання допоможуть більш чітко формулювати вимоги до структури інтелектуальної інформаційної системи, яка проєктуватиметься для безперебійного передавання даних.

Ключові слова: інтелектуальні системи; функціональна стійкість; діагностування; повнота; математична модель.

Вступ

Прогрес сучасного суспільства потребує інтенсивного розвитку інформаційних технологій із високим ступенем автономності. Особливо гостро це стосується виробничих підприємств, які функціонують за умов впливу екстремальних факторів. Як об'єкт дослідження вибрано інтелектуальну інформаційну систему виробничого підприємства. Головною вимогою, що висувається до інтелектуальної інформаційної системи, є виконання нею основної функції — забезпечення абонентів мережі потенційною можливістю доступу до розподілених інформаційних ресурсів, об'єднаних у систему обміну даних. Усі інші вимоги — продуктивність, надійність, точність, сумісність, керованість, живучість, розширюваність і масштабованість — пов'язані з якістю виконання цієї основної задачі [1]. За сучасних умов на інтелектуальну інформаційну систему впливають внутрішні (відмови, збої, помилки) і зовнішні (навмисне пошкодження, дія температур) фактори. Тому задача забезпечення стійкого функціонування інтелектуальної інформаційної системи обміном даними є актуальною.

Аналіз останніх досліджень. Розв'язанню цього завдання присвячено багато наукових праць [1-5]. Однак, на наш погляд, основну увагу в них приділено вирішенню часткових задач, а саме: побудові резервованих інформаційно-керувальних систем, відмовостійких керувальних обчислювальних систем, адаптивних систем керування.

У статті [6] введено поняття функціональної стійкості складних динамічних об'єктів, що можуть описуватися системою диференціальних рівнянь. Однак для складних організаційних систем такий апарат неприйнятний. У теорії надійності [2] визначення показників надійності ґрунтується загалом на приведенні структури до послідовних і паралельних з'єднань. Це також не годиться для складних організаційних систем.

Як уже зауважувалося, інтелектуальні інформаційні системи підприємств функціонують за умов впливу зовнішніх та внутрішніх дестабілізуювальних факторів. За негативного впливу модулі систем можуть виходити з ладу. Проте системи повинні функціонувати в автономному режимі протягом заданого часу. Таку умову функціонування можна виконати завдяки забезпеченню властивості функціо-

нальної стійкості. Функціональна стійкість — це запорука функціонування інтелектуальної інформаційної системи, можливо із зниженням якості, протягом зазначеного часу під впливом зовнішніх і внутрішніх дестабілізуювальних факторів [7; 8]. Під зовнішніми та внутрішніми дестабілізуювальними факторами розуміються відмови, збої модулів системи, механічні пошкодження, теплові впливи, помилки обслуговувального персоналу. Основними етапами забезпечення функціональної стійкості є виявлення модуля, який відмовив під час контролю, його діагностування та відновлення функціонування інформаційної системи підприємства.

Отже, однією з найголовніших передумов забезпечення функціональної стійкості є побудова ефективної системи діагностування та самодіагностування ключових агрегатів на кожному виробничому центрі виробничого підприємства [9].

Метою роботи є побудова математичного апарату для кількісного оцінювання функціональної стійкості системи обміну даних інтелектуальної інформаційної системи.

Основна частина

Математична модель подання структури інтелектуальної інформаційної системи має вигляд неорієнтованого графа $G(V, E)$, $v_i \in V$, $e_{ij} \in E$, $i, j = 1, 2, \dots, n$, який можна описати матрицею суміжності. Множині вершин V відповідає безліч робочих станцій розмірності n , а множині ребер E — безліч ліній зв'язку між елементами. Нехай інтелектуальна інформаційна система виконуватиме основну функцію — обмін даними, якщо між будь-якою парою вузлів комутації існує хоча б один маршрут передавання інформації. Отже, вимога зв'язності графа дає підставу кількісно оцінити властивість функціональної стійкості інтелектуальної інформаційної системи.

Зауважимо, що в цій статті не розглядатиметься якість виконання основних функцій, подану часом затримки повідомлення під час пересилання. Також уважатимемо, що канали зв'язку мають пропускну здатність, яка дає змогу переслати будь-який обсяг інформаційного потоку.

У технічній кібернетичі, а саме в теорії автоматичного керування, побудовано класичну теорію стійкості динамічних систем, засновником якої є А. М. Ляпунов. У цій теорії можна оцінити стійкість, не розв'язуючи систему диференціальних рівнянь, що описують об'єкт, а скориставшись простими ознаками, умовами і критеріями стійкості, розробленими такими вченими, як Вишнеградський І. О., Гурвиц А., Михайлов А. В., Найквіст Х. та ін. За аналогією з класичною теорією стійкості пропонується оцінювати функціональну стійкість за параметрами графа, що описує структуру інтелектуальної інформаційної системи [10; 11]. Тобто, за зовнішнім виглядом графа і його параметрами можна визначити: чи буде система функціонально стійкою, нестійкою або нейтральною. Скористаємося такими ознаками:

- *ознака функціональної стійкості структури.* Структура інтелектуальної інформаційної системи є функціонально стійкою, якщо граф структури є однокомпонентним і не має мостів та вузлів з'єднання. Зворотне визначення дає змогу схарактеризувати функціональну нестійкість структури;

- *ознака функціональної нестійкості структури.* Структура інтелектуальної інформаційної системи є функціонально нестійкою, якщо її граф є багатокомпонентним і незв'язним.

Отже, за зовнішнім виглядом графа, а саме за кількістю компонентів, наявності мостів і вузлів з'єднання графа можна робити висновок щодо функціональної стійкості структури, тобто про закладену в ній здатність парувати відмови й ушкодження. Однак для сильно розгалужених і багатoverшинних графів здійснити оцінювання за зовнішнім виглядом доволі складно. Тому для кількісного оцінювання ступеня функціональної стійкості введемо в розгляд такі показники функціональної стійкості структури:

- *вершинну зв'язність $\chi(G)$* — найменшу кількість вершин, видалення яких разом із інцидентними їм ребрами зумовлює утворення незв'язного чи одновершинного графа;

- *реберну зв'язність $\lambda(G)$* — найменшу кількість ребер, видалення яких спричинює утворення незв'язного графа;

- *імовірність зв'язності $P_{ij}(t)$* — ймовірність того, що повідомлення з вузла i у вузол j буде передано за час, не більший за t .

Аналіз цих показників дає змогу виокремити такі їх особливості:

- *вершинна і реберна зв'язності характеризують тільки поточну структуру, незалежно від надійності вузлів комутації чи ліній зв'язку;*

- *показники $\chi(G)$ і $\lambda(G)$ набувають значень цілих чисел і пов'язані співвідношенням:*

$$\chi(G) \leq \lambda(G);$$

- *імовірність зв'язності $P_{ij}(t)$ дає можливість брати до уваги надійність комутаційного обладнання, вид фізичного каналу передавання інформації, наявність резервних каналів і маршрутів, а також зв'язність розподіленої структури. Водночас обчислення значення $P_{ij}(t)$ є складною і громіздкою задачею;*

• імовірність зв'язності характеризує лише зв'язність між однією парою вершин. Для того, щоб схарактеризувати зв'язність між усіма парами вершин, потрібно оперувати з матрицею суміжності [8]:

$$A = \|a_{ij}\|, \quad i, j = 1, \dots, n, \quad a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } e_{ij} \in E; \\ 0, & \text{якщо } e_{ij} \notin E. \end{cases}$$

На основі запропонованих ознак і показників можна розробити такі критерії функціональної стійкості структури:

• структура інтелектуальної інформаційної системи буде функціонально стійкою, якщо значення вершинної зв'язності задовольнятиме умову

$$\chi(G) \geq 2; \quad (1)$$

• структура інтелектуальної інформаційної системи буде функціонально стійкою, якщо значення реберної зв'язності задовольнятиме умову

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

• структура інтелектуальної інформаційної системи буде функціонально стійкою, якщо ймовірність зв'язності між кожною парою вершин буде не меншою за задану

$$P_{ij}(t) \geq P_{ij}^{\text{зад}}, \quad i \neq j, \quad i, j = 1, \dots, n, \quad (3)$$

де n — кількість вершин графа $G(V, E)$.

Наведені критерії дають змогу на основі точних розрахунків визначити функціональну стійкість поточної структури інтелектуальної інформаційної системи.

На межі двох зон стійкості і нестійкості існує специфічна ділянка, в якій система не є функціонально стійкою і водночас не є функціонально нестійкою. Таку ділянку, за аналогією з теорією стійкості динамічних систем, називатимемо межею функціональної стійкості структури інтелектуальної інформаційної системи.

Ознакою межі функціональної стійкості є таке положення. Поточна структура інтелектуальної інформаційної системи перебуває на межі функціональної стійкості, якщо граф структури зв'язний, має у своєму складі мости ($N_E > 0$) чи вузли з'єднання ($N_V > 0$):

$$\{K = 1\} \wedge [\{N_V > 0\} \vee \{N_E > 0\}], \quad (4)$$

де K — кількість компонентів графа, а умова $K = 1$ означає, що граф зв'язний; $N_V(N_E)$ — кількість вузлів з'єднання (мостів) графа.

Мостом називається ребро зв'язного графа, що з'єднує два підграфа, після видалення якого граф перетворюється з однокомпонентного у двокомпонентний. У деяких працях із теорії графів міст називають перешийком.

Вузлом з'єднання називається така вершина зв'язного графа, після видалення якої разом з інцидентними їй ребрами граф перетворюється з однокомпонентного у двокомпонентний.

Наявність у структурі інтелектуальної інформаційної системи моста чи вузла, що з'єднують два підграфа, означає, що всі маршрути передавання інформації з вершин одного підграфа у вершини другого будуть містити в собі цей міст чи вузол з'єднання. Така подія істотно знижує структурну надійність і функціональну стійкість інтелектуальної інформаційної системи. Тому для приведення системи у функціонально стійкий стан потрібно вводити в структуру резервні лінії зв'язку, щоб у структурі не було мостів чи вузлів з'єднання. При цьому будуть з'являтися кілька незалежних і альтернативних маршрутів передавання інформації.

З аналізу структур випливає, що коли інтелектуальна інформаційна системи перебуває на межі стійкості, то вона працездатна і виконує покладений на неї обсяг функцій. Проте в разі хоча б однієї відмови моста чи вузла з'єднання система переходить у нестійкий стан.

Ділянки функціональної стійкості і нестійкості можна також подати в декартовому просторі в координатах N_E, N_V (рис. 1). Залежно від параметрів N_E, N_V графа структури визначається точка на площині, що буде характеризувати стан інтелектуальної інформаційної системи. За належністю точки тій чи іншій ділянці можна говорити про функціональну стійкість або нестійкість системи.

У графічному поданні межею функціональної стійкості системи буде геометричне місце точок, розміщених на двох прямих $N_E = 1$ і $N_V = 1$. Геометрична інтерпретація запасу стійкості розраховуватиметься як мінімальна відстань від точки на площині, визначеної параметрами N_E, N_V , до межі стійкості (див. рис. 1).

На підставі введених понять постає питання про те, наскільки далеко поточна структура пролягає від межі стійкості або ж який запас функціональної стійкості. Його можна також визначити в сенсі зв'язності структури. У цьому плані запас характеризуватиметься кількістю відмов (розривом ребер чи виходом із ладу вершин), що можуть зумовити нестійкий стан структури.



Рис. 1. Геометрична інтерпретація ділянок функціональної стійкості і нестійкості

Запас функціональної стійкості кількісно можна визначити на підставі таких показників:

- реберний запас стійкості — значення N_E , яке дорівнює потужності мінімального розрізу, що переводить граф з однокомпонентного у двокомпонентний;
- вершинний запас стійкості — мінімальна кількість вершин N_V графа, після видалення яких разом з інцидентними їм ребрами граф переходить з однокомпонентного у двокомпонентний.

Запас функціональної стійкості інтелектуальної інформаційної системи також можна обчислювати за ймовірністю зв'язності, як різницю між заданим значенням $P_{ij}^{\text{зад}}$ і поточним P_{ij} . Очевидно, що в цьому разі запас буде подаватися квадратною матрицею, в якій кожен елемент набуватиме значення $(P_{ij}^{\text{зад}} - P_{ij})$.

Для того, щоб обчислити цю різницю, доцільно розрахувати поточну ймовірність зв'язності.

Обчислення ймовірності зв'язності можна здійснювати на основі кількох методів. До найбільш поширених належать такі:

- метод повного перебору [8];
- метод структурних перетворень [9; 10];
- метод Литвака-Ушакова [8; 11].

Для прикладу, розглянемо інформаційну систему, зображену на рис. 2, та обрахуємо для неї P_{16} .

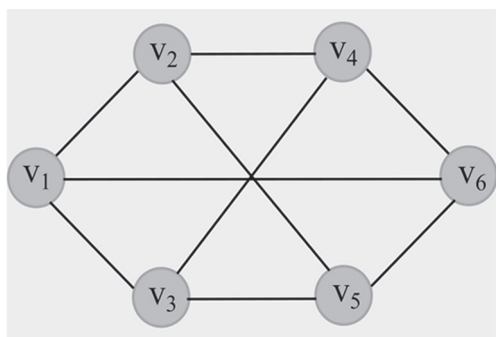


Рис. 2. Приклад моделі інформаційної системи

Нехай вузли комутації абсолютно надійні, а лінії зв'язку працюють з ймовірністю p . Тоді, якщо P_{16} обчислити методом повного перебору, дістанемо

$$P_{16} = P_{16}(p) = 1 - (1 - p)(1 - p^3)^4(1 - p^5)^2. \quad (5)$$

Як можна бачити, розрахунок поточної ймовірності зв'язності на основі поточної ймовірності працездатності ліній зв'язку потребує чимало обчислень навіть для невеликих розподілених систем, зокрема наведених на рис. 2. Тому застосуємо ще так званий метод Литвака-Ушакова. Здійснивши потрібні розрахунки, здобудемо такий графік (рис. 3).

На цьому графіку суцільною лінією зазначено результати обчислень методом повного перебору, а пунктирними лініями — результати обчислень нижньої та верхньої меж ймовірності зв'язності за методом Литвака-Ушакова.

Аналіз розрахунків ймовірності зв'язності P_{16} показав, якщо $0 \leq p \leq 0,6$, то P_{16} має залежність, подібну до лінійної, а при $p > 0,6$ спостерігається відчутний спад приросту ймовірності зв'язності P_{16} . Також із рис. 3 випливає, що коли ймовірність справності ліній зв'язку системи, поданої на рис. 2, перевищує 0,8, то таку систему можна вважати близькою до абсолютно надійної.

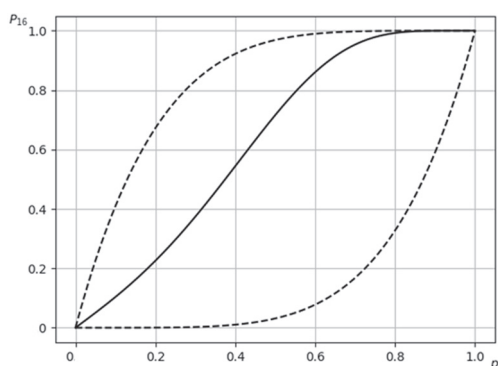


Рис. 3. Залежність P_{16} від p за методом повного перебору та методом Литвака-Ушакова

Отже, на підставі ознак функціональної стійкості після визначення запропонованих параметрів можна окреслити стан інтелектуальної інформаційної системи, а саме перебування системи в функціонально стійкому стані чи функціонально нестійкому. Ступінь функціональної стійкості визначає запас функціональної стійкості, який можна обчислити як аналітично за запропонованими формулами, так і графічно (див. рис. 1). На підставі цих досліджень з'являється можливість обґрунтувати вимоги до систем обміну даних, що будуть проектуватись, розв'язувати задачі синтезу оптимальної структури за критерієм максимуму функціональної стійкості з обмеженням на вартість побудови та експлуатації інтелектуальної інформаційної системи підприємства, а також умотивовано нарощувати структуру інтелектуальної інформаційної системи даних у процесі експлуатації.

Висновки

У статті розглянуто переваги застосування кількісних методів оцінювання функціональної стійкості за такими показниками, як межа та запас функціональної стійкості.

На основі цього оцінювання можна давати рекомендації з побудови інтелектуальної інформаційної системи підприємства. Також таке оцінювання допоможе більш чітко формулювати вимоги до структури інтелектуальної інформаційної системи, яка проектуватиметься для безперебійного передавання даних.

З огляду на результати досліджень запропонованих структурних та ймовірнісних показників функціональної стійкості можна дійти висновку, що їх поведінка так чи інакше залежить від самих різних параметрів досліджуваної системи: від її структури до ймовірності справності елементів системи. Приклад впливу останнього було продемонстровано графічно.

Стосовно практичного застосування, важливо проектування інформаційних систем здійснювати із заданим запасом функціональної стійкості. Для цього слід попередньо прорахувати показники функціональної стійкості та дослідити наявність запасу та його достатність. Також у процесі експлуатації системи важливо відстежувати зазначені показники та вводити в систему структурну, апаратну, програмну та інші види надмірності з метою підвищення якості та тривалості експлуатації системи.

Список використаної літератури

1. Sobchuk A. V., Barabash O. V., Musienko A. P. Assessment methods of functional stability of wireless sensor networks // *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2019. №3 (64). С. 46–54.
2. Sobchuk V., Barabach O., Musienko A. The algorithm of control pricing policy in trade networks on the market of ferrous metals // *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2020. №1 (66). С. 120–128.
3. *Unconventional Approach to Unit Self-diagnosis* / V. Mashkov, J. Bicanek, Y. Bardachov, M. Voronenko // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. 1020. P. 81–96.
4. *Diagnosis of intermittently faulty units at system level* // V. Mashkov, J. Fiser, V. Lytvynenko, M. Voronenko // *Data*. 2019. 4(1). P. 44–50.
5. *Self-Diagnosis of the Systems with Intermittently Faulty Units* / V. Mashkov, V. Lytvynenko, J. Fiser, M. Voronenko // *Proceedings of the 2018 IEEE 2nd International Conference on Data Stream Mining and Processing, DSMP 2018*. 2018. P. 411–414.
6. Zhang H., Shen H. Balancing Energy Consumption to Maximize Network Lifetime in Data-Gathering Sensor Networks // *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.* 2009. Vol. 20, No. 10. P. 1526–1539.
7. *Making sensor networks immortal: An energyrenewal approach with wireless power transfer* / L. Xie, Y. Shi, Y. T. Hou, H. D. Sherali // *IEEE/ACM Trans. on Networking*. Dec. 2012. Vol. 20, No. 6. P. 174–176.
8. Филлин Б. П. Методы анализа структурной надежности сетей связи. М.: Радио и связь, 1988. 208 с.
9. Райншке К., Ушаков И. А. Оценка надежности систем с использованием графов. М.: Радио и связь, 1988. 208 с.
10. Машков О. А., Барабаш О. В. Оцінка функціональної стійкості розподілених інформаційно-керуючих систем // *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології*. 2005. Вип. 1. С. 157–163.
11. Барабаш О. В., Кравченко Ю. В. Функціональна стійкість — властивість складних технічних систем // *Зб. наук. праць Національної академії оборони України*. 2002. Бюл. №40. С. 225–229.

M. Myroniuk, O. Maistrov, A. Musienko, A. Makarchuk

**ANALYSIS OF THE STRUCTURE OF AN INTELLECTUAL INFORMATION SYSTEM
BASED ON THE CONCEPT OF FUNCTIONAL STABILITY**

The development of modern society requires intensive development of information technologies with a high degree of autonomy. This issue is especially acute for production enterprises that operate under the influence of destabilizing factors. In this work, research on the property of functional stability continues. Functional stability means the property of an information system to maintain its functioning, possibly with a decrease in quality, during the specified time under the influence of external and internal destabilizing factors. External and internal destabilizing factors mean failures, failures of system modules, mechanical damage, thermal effects, errors of service personnel. The main stages of ensuring functional stability are the detection of the module that failed during control, the diagnosis of the module that failed, and the restoration of the functioning of the intelligent information system. A feature of intelligent information systems is that they must function autonomously. With their help, it is possible to ensure an increase in the labor productivity of all production centers while reducing the number of people employed in production. The purpose of the work is to build a mathematical apparatus for quantitative assessment of the functional stability of the data exchange system of the intelligent information system. In addition, this article shows the advantages of using quantitative methods of assessing functional stability based on such indicators as the limit and margin of functional stability. On the basis of these assessments, recommendations can be made for building an intelligent information system. In addition, the evaluation data will help to more clearly formulate the requirements for the structure of the intelligent information system, which will be designed for uninterrupted data transmission.

Keywords: intelligent systems; functional stability; diagnosis; completeness; mathematical model.

