

## АНАЛІЗ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТАБІЛЬНОСТІ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ З ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМ КЕРУВАННЯМ

Швидке зростання інформатизації діяльності людини й автоматизації критичних функцій керування визначає стійке зростання кількості випадків дестабілізації критичних інформаційних систем (далі – КІС) і, як наслідок, підвищення вимог до функціональної стабільності (далі – ФС) інформаційних процесів. Забезпечення ФС ІС є складною проблемою, яка потребує системного вирішення комплексу взаємопов'язаних завдань щодо розробки теоретичних положень, методів автоматизованого моделювання і аналізу складних інформаційних систем [1; 2]. КІС можна віднести до складноорганізованих ергатичних інформаційних систем, які використовують біологічні й комп'ютерні технології обробки інформації і для яких характерна наявність технологічних ділянок з автоматичним, автоматизованим та інтелектуальним керуванням. Останнє ускладнює аналіз проблемної галузі, оскільки властивості функціональної стабільності неоднозначні для інформаційних систем із різним рівнем складності структурної організації [3].

Аналіз ФС ІС обмежений аспектами інформаційної безпеки з урахуванням вимог до функціональності та надійності. Управління ФС ІС можливо, в основному, на системному рівні. Аналіз ФС на системному рівні полягає в тому, що необхідно визначити траєкторії переходу системи в небезпечні стани, що є основною проблемою під час проектування, експлуатації та модернізації КІС, які повинні мати зазначений рівень ФС. Для знаходження всіх або майже всіх (тобто відносно повної множини) траєкторій переходу системи в небезпечний стан був розроблений метод, який дозволяє моделювати архітектуру й інформаційні процеси систем, формалізувати стани будь-яких інформаційних систем, проводити аналіз ФС [2]. Для знаходження всіх можливих траєкторій інформаційного процесу, які приводять систему в небезпечний стан, необхідно:

описати об'єкти, їх інтерфейси, безпечні й небезпечні стани, правила переходу системи в той чи інший стан у вигляді аксіом і теорем мовою числення предикатів першого порядку; виключити квантори спільності та існування і перетворити аксіоми на розширену мову клауз Хорна, які складаються не більше ніж з одного висновку; знайти мінімальну кінцеву підмножину диз'юнктивів для Ербранівського універсуму методом резолюцій з метою зменшення розміру області пошуку доведень; описати речення мовою логічного програмування; знайти розв'язок, використовуючи низхідний вивід і семантичний метод, який демонструє несумісність множини клауз за допомогою того, що жодна інтерпретація не робить усі клаузи істинними [3]. Згідно з першим пунктом, об'єкти та їх інтерфейси описуються за допомогою логіки числення предикатів першого порядку, а для формульного запису предикатів використовується алгебра предикатів [4].

**Мета** статті – застосувати апарат алгебри предикатів та предикатних операцій у методі, розробленому для аналізу функціональної стабільності інформаційних систем з інтелектуальним керуванням. Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі *задачі*: 1) задати формальний стан системи у момент часу  $t$ ; 2) задати початковий безпечний стан системи; 3) сформулювати формальні правила переходу системи з одного стану в інший під час інформаційного процесу.

**1. Формальний опис інформаційної архітектури системи за допомогою алгебри предикатів. модель стану модулів.** Формальний стан системи  $S_t^W$  в момент часу  $t$  визначаємо як відображення множини фізичних і абстрактних модулів  $M^W$  системи  $W$  на множини контрольованих  $Z^W$  та суміжних із ними неконтрольованих зон доступу  $Z^H$  усіх рівнів взаємодії, а також множиною можливих

відношень між активними абстрактними модулями  $M_a^A$  та іншими модулями системи, які визначаються кортежами парних інтерфейсів модулів, які знаходяться в одній фізичній (синтаксичній, семантичній) зоні у момент часу  $t$  [3].

Уведемо на множині  $M^W$  (множина фізичних і абстрактних модулів, ідентифікованих у системі) змінну  $m$ , яка приймає значення з множини  $M^W$ . Предикат, який описує множини  $M^W$ , має вигляд:

$$M^W(m) = \bigvee_{v \in M^W} m^v.$$

Уведемо змінну  $t$ , яка приймає значення з множини  $T$  – класи системи, до яких належать інформаційні об'єкти (модулі). Область зміни змінної  $t: \bigvee_{i \in T} t^i = 1$ . Активні абстрактні модулі ( $M_a^A$ ) системи  $W$  на момент часу  $t$  утворюють клас системи типу  $i = a$ .

Для формалізації поняття «парні інтерфейси модулів» за допомогою алгебри предикатів множини модулів  $M^W$  потрібно розбити на два класи (не обов'язково на такі, які не перетинаються):  $I \subset M^W$  (вхід інтерфейсу) та  $A \subset M^W$  (вихід). Задамо на цих множинах змінні  $i$  та  $a$  відповідно, які приймають значення з однойменних множин. Зв'язок інформаційних об'єктів із класами системи, яким вони належать, формально описують за допомогою предикатів:

$$P(i, t) = \bigvee_{\substack{i \in T \\ v_j \in M^W}} i^{v_j} t^i,$$

$$P(a, t) = \bigvee_{\substack{i \in T \\ v_j \in M^W}} a^{v_j} t^i.$$

Процеси (відношення), які відбуваються (виникають) між двома об'єктами в ході роботи інформаційної системи, утворюють множини  $D$  із заданою на ній змінною  $d$ , область зміни якої задається предикатом  $D(d) = \bigvee_{\delta \in D} d^\delta$ , де  $\delta$  – елементи множини  $D$ .

Множина будь-яких відношень між модулями системи, що визначаються кортежами парних інтерфейсів модулів, описуються за допомогою предикатів:

$$P(a, i, d) = \bigvee_{\substack{\delta \in D \\ v_i, v_j \in M^W}} a^{v_i} i^{v_j} d^\delta.$$

Необхідно також ввести множини:  $Z^W$  – множини контрольованих зон системи та  $Z^H$  – множини суміжних зон, неконтрольованих системою, зі змінними  $z_W$  та  $z_H$  відповідно, та задати області їх зміни.

Згідно з парадигмою трьохрівневої інформаційної взаємодії [3; 5] введемо множини  $F$ ,  $L$  та  $C$  із заданим на них змінними  $f, l$  та  $c$  відповідно. Їх області зміни мають вигляд:

$$F(f) = \bigvee_{k=1, \overline{n}} f^k,$$

де  $k = \overline{1, n}$  – порядковий номер фізичного інтерфейсу в переліку типових фізичних інтерфейсів системи.

$$L(l) = \bigvee_{h=1, \overline{m}} l^h,$$

де  $h = \overline{1, m}$  – порядковий номер синтаксичного інтерфейсу в переліку типових синтаксичних інтерфейсів системи.

$$C(c) = \bigvee_{g=1, \overline{p}} c^g,$$

де  $g = \overline{1, p}$  – порядковий номер семантичного інтерфейсу у переліку типових семантичних інтерфейсів системи. Для формалізації поняття «парні інтерфейси модулів, які знаходяться в одній зоні» введемо предикати (1)–(3):

$$P(a, i, f) = \bigvee_{\substack{k=1, \overline{n} \\ v_i, v_j \in M^W}} a^{v_i} i^{v_j} f^k; \quad (1)$$

$$P(a, i, l) = \bigvee_{\substack{h=1, \overline{m} \\ v_i, v_j \in M^W}} a^{v_i} i^{v_j} l^h; \quad (2)$$

$$P(a, i, c) = \bigvee_{\substack{g=1, \overline{p} \\ v_i, v_j \in M^W}} a^{v_i} i^{v_j} c^g. \quad (3)$$

Множина всіх відношень на фізичному рівні між активними абстрактними модулями  $M_a^A$  та іншими модулями системи, що визначаються кортежами парних інтерфейсів модулів, які знаходяться в одній зоні у момент часу  $t$ , визначаємо таким чином:

$$(\exists(t = a) \Gamma(t) \wedge P(a, t)) \wedge P(a, i, f) \wedge P(a, i, d).$$

Множина всіх відношень на синтаксичному рівні:

$$(\exists(t = a) \Gamma(t) \wedge P(a, t)) \wedge P(a, i, f) \wedge P(a, i, l) \wedge P(a, i, d)$$

Множина всіх відношень на семантичному рівні:

$$(\exists(t = a) \Gamma(t) \wedge P(a, t)) \wedge P(a, i, f) \wedge P(a, i, l) \wedge P(a, i, c) \wedge P(a, i, d)$$

Таким чином, стан системи яка складається з множини модулів  $M^W$ , у момент часу  $t$ , на кожному з інформаційних рівнів (фізично-

му  $S_{t,F}^W(M^W)$ , синтаксичному  $S_{t,L}^W(M^W)$  та семантичному  $S_{t,C}^W(M^W)$  визначається:

$$S_{t,F}^W(M^W) = P(m,t) \wedge (\exists t = a)T(t) \wedge P(a,t) \wedge P(a,i,f) \wedge ; \\ \wedge P(a,i,d) \wedge Z^W(z_W) \wedge Z^H(z_H) \quad (4)$$

$$S_{t,L}^W(M^W) = P(m,t) \wedge (\exists t = a)T(t) \wedge P(a,t) \wedge P(a,i,f) \wedge ; \\ \wedge P(a,i,l) \wedge P(a,i,d) \wedge Z^W(z_W) \wedge Z^H(z_H) \quad (5)$$

$$S_{t,C}^W(M^W) = P(m,t) \wedge Z^W(z_W) \wedge Z^H(z_H) \wedge (\exists t = a)T(t) \wedge P(a,t) \wedge ; \\ \wedge P(a,i,f) \wedge P(a,i,l) \wedge P(a,i,c) \wedge P(a,i,d) \quad (6)$$

**2. Формальний аналіз станів та оцінки функціональної стабільності інформаційної архітектури.** Для проведення формального аналізу станів та оцінки функціональної стабільності інформаційної архітектури необхідно:

– сформулювати формальні ознаки небезпечних станів системи з множини  $S^O$ , у яких можлива дестабілізація системи;

– сформулювати формальні ознаки безпечних станів системи з множини  $S^A$ , у яких система вважається функціонально стабільною;

– задати початковий безпечний стан із множини  $S^I$  ;

– сформулювати формальні правила переходу системи з одного стану в інший у ході інформаційного процесу  $S_x \rightarrow S_y$  ;

– довести методом відносно повного перебору станів, що траєкторія інформаційних процесів не приводить систему в небезпечний стан, або знайти ці стани, що доведе функціональну нестабільність архітектури системи.

Початковий стан системи  $S^I$  вважається безпечним, якщо всі об'єкти  $M^W$  системи  $W$  знаходяться в дозволені для них інформаційною політикою зонах доступу  $Z_f^F, Z_l^L, Z_c^C$ , визначених на відповідних трьох рівнях інформаційної взаємодії. Об'єкти контролю ФС  $M^{\hat{O}\hat{N}} \in M^W$ , які реалізують функції контролю доступу й ізоляції зон, мають статус «активний»:  $M^{\hat{O}\hat{N}} \in M_a^A$ ; у системі немає інформаційних об'єктів  $M^H$  з недеklarованими інформаційними функціями:  $M^I \not\subset M^W$  [3; 6].

Формалізуємо поняття початкового безпечного стану системи за допомогою алгебри пре-

дикатів. Для предикатної моделі необхідно визначити предикати  $M^{\hat{O}\hat{N}}(m)$ , ( $M^{\hat{O}\hat{N}} \subset M^W$ ),  $M^H(m_H)$  та  $P(m_H, f)$ ,  $P(m_H, l)$ ,  $P(m_H, c)$ , які вказують на те, в яких зонах знаходяться об'єкти з недеklarованими інформаційними функціями. Належність  $M^W \in Z_f^F, Z_l^L, Z_c^C$  мовою алгебри предикатів описуємо за допомогою виразів:

$$P(i, a, f) = P'(i, a, f), P(i, a, l) = P'(i, a, l),$$

$$P(i, a, c) = P'(i, a, c),$$

де  $P'(i, a, f), P'(i, a, l), P'(i, a, c)$  – предикати, які вказують на те, в яких зонах повинні знаходитися модулі системи. Вираз  $M^{\hat{O}\hat{N}} \in \dot{I}_a^A$  у предикатній моделі означає, що виконується рівність:

$$(\exists t = a)P(m, t) \wedge M^{\hat{O}\hat{N}}(m) = M^{\hat{O}\hat{N}}(m).$$

Умова  $M^I \notin Z_f^F, Z_l^L, Z_c^C$  означає:

$$(\exists i \in I)I(i)(\exists a \in A)A(a)P(i, a, f) \wedge P(m_H, f) = 0 ;$$

$$(\exists i \in I)I(i)(\exists a \in A)A(a)P(i, a, l) \wedge P(m_H, l) = 0 ;$$

$$(\exists i \in I)I(i)(\exists a \in A)A(a)P(i, a, c) \wedge P(m_H, c) = 0 .$$

Таким чином, безпечний початковий стан системи мовою алгебри предикатів має вигляд:

$$\forall n[S_n^H \subset S_m^A] \Leftrightarrow \forall f \forall l \forall c [P(i, a, f) = P'(i, a, f);$$

$$P(i, a, l) = P'(i, a, l);$$

$$P(i, a, c) = P'(i, a, c);$$

$$(\exists t = a)P(m, t) \wedge M^{\hat{O}\hat{N}}(m) = M^{\hat{O}\hat{N}}(m);$$

$$(\exists i \in I)I(i)(\exists a \in A)A(a)P(i, a, f) \wedge P(m_H, f) = 0 ;$$

$$(\exists i \in I)I(i)(\exists a \in A)A(a)P(i, a, l) \wedge P(m_H, l) = 0 ;$$

$$(\exists i \in I)I(i)(\exists a \in A)A(a)P(i, a, c) \wedge P(m_H, c) = 0 ] ;$$

де  $S_n^H$  – множина початкових станів сис-

теми  $W$ ,  $S_m^A$  – множина небезпечних станів системи  $W$ .

Статичну модель станів ІС на кожному з трьох інформаційних рівнів (4)–(6) необхідно доповнити предикатами  $P(m_H, f)$ ,  $P(m_H, l)$ ,  $P(m_H, c)$ , які вказують на те, в яких зонах зна-

ходяться об'єкти з недеklarованими інформаційними функціями, і  $P(m, t)$ . Таким чином, стан ІС в момент часу  $t$  на кожному з інформаційних рівнів (4)–(6) з урахуванням означення безпечного початкового стану системи:

$$S_{i,F}^W(M^W) = P(m, t) \wedge (\exists(t = a)T(t) \wedge P(a, t)) \wedge P(a, i, f) \wedge ; \quad (7)$$

$$\wedge P(a, i, d) \wedge Z^W(z_W) \wedge Z^H(z_H) \wedge P(m_H, f)$$

$$S_{i,L}^W(M^W) = P(m, t) \wedge (\exists(t = a)T(t) \wedge P(a, t)) \wedge P(a, i, f) \wedge P(a, i, l) \wedge ; \quad (8)$$

$$P(a, i, d) \wedge Z^W(z_W) \wedge Z^H(z_H) \wedge P(m_H, f) \wedge P(m_H, l)$$

$$S_{i,C}^W(M^W) = P(m, t) \wedge Z^W(z_W) \wedge Z^H(z_H) \wedge (\exists(t = a)T(t) \wedge P(a, t)) \wedge P(a, i, f) \wedge \quad (9)$$

$$\wedge P(a, i, l) \wedge P(a, i, c) \wedge P(a, i, d) \wedge P(m_H, f) \wedge P(m_H, l) \wedge P(m_H, c)$$

Для відображення динаміки процесу функціонування, окрім множини формул станів системи, необхідно мати множину формул, яка описує перехід системи з одного стану в інший [3; 5; 6].

*Аксиома 1.* Якщо два модуля  $m_x$  та  $m_y$  знаходяться в одній фізичній зоні  $Z_f^F$  і мають парні фізичні інтерфейси  $F_{x,k}^{\hat{a}\hat{e}\hat{d}\hat{\delta}} = F_{y,k}^{\hat{a}\hat{d}}$ , то можлива їх фізична взаємодія  $I^F$  типу  $k$ , де  $k = \overline{1, n}$  – порядковий номер фізичного інтерфейсу в переліку типових фізичних інтерфейсів системи.

Мовою алгебри предикатів:

$$(\exists a \in A)A(a)(\exists i \in I)I(i)P(a, i, f)P(a, i, d) = P(f, d).$$

*Аксиома 2.* Можлива синтаксична взаємодія  $I^L$  типа  $h$  за умови виконання  $k$ , де  $h = \overline{1, m}$  – порядковий номер синтаксичного інтерфейсу у переліку типових синтаксичних інтерфейсів системи:

$$(\exists a \in A)A(a)(\exists i \in I)I(i)P(a, i, f)P(a, i, l) \times \\ \times P(a, i, d) = P(f, l, d).$$

*Аксиома 3.* Можлива семантична взаємодія  $I^c$  типу  $g$  за умови виконання  $k$  та  $h$ , де

$g = \overline{1, p}$  – порядковий номер семантичного інтерфейсу в переліку типових семантичних інтерфейсів системи, або:

$$(\exists a \in A)A(a)(\exists i \in I)I(i)P(a, i, f)P(a, i, l) \times \\ \times P(a, i, c)P(a, i, d) = P(f, l, c, d).$$

Правила формалізованого опису переходу

станів системи полягають в описі семантики всіх  $k$ ,  $h$  і  $g$  інформаційних взаємодій на трьох рівнях за умови виконання аксіом 1, 2, 3.

*Аксиома 4.* Семантика інформаційної взаємодії на фізичному рівні полягає в трансляції з фізичної зони в суміжну фізичну зону  $Z_f^F \rightarrow Z_{f,i}^F$  фізичного (носії інформації) чи абстрактного (алгоритм або дані) модуля  $M_y^{A,F}$  під дією активного модуля  $M_x^a \in M^{A,F}$  за умови виконання аксіоми 1.

Існує 2 типи фізичної взаємодії:

1) трансляція m-move :

$$\bar{m} \equiv (((\exists t = a)T(t)P(a, t)) \wedge (\exists i \in I)I(i)) \wedge P(a, i, f);$$

2) копіювання c-soru,

$$\bar{c} \equiv (((\exists t = a)T(t)P(a, t)) \wedge (\exists f \in F)F(f))P(a, i, f).$$

*Аксиома 5.* Семантика інформаційної взаємодії на синтаксичному рівні полягає в перекладі синтаксису t-translation абстрактного модуля іншою мовою:

$$\bar{t} \equiv (((\exists t = a)T(t)P(a, t)) \wedge (\exists i \in I)I(i)) \times \\ \times P(a, i, f)P(a, i, l).$$

*Аксиома 6.* Інформаційна взаємодія на семантичному рівні полягає в активізації  $\alpha$  – action активним модулем-алгоритмом  $M_x^A$  другого абстрактного модуля-алгоритма, тобто

$$\bar{a} \equiv (((\exists t = a)T(t)P(a, t)) \wedge (\exists i \in I)I(i)) \times \\ \times P(a, i, f)P(a, i, l)P(a, i, c)P(a, i, d).$$

**Висновки.** Удосконалено метод побудови моделей та аналізу функціональної стабільності

інформаційних систем з інтелектуальним керуванням, який ґрунтується на логіці предикатів першого порядку. Оскільки для формульного запису предикатів використовується алгебра предикатів та предикатних операцій, то модель станів інформаційної системи у момент часу  $t$ , небезпечні та безпечні стани системи, правила переходу системи в інший стан формалізовані засобами цієї алгебри. Це дозволило значно спростити процес визначення всіх або майже усіх траєкторій переходу системи у небезпечні стани. Для моделі, формалізованої засобами логіки предикатів першого порядку необхідно:

– описати об’єкти, їх інтерфейси, безпечні та небезпечні стани і правила переходу системи у той чи інший стан у вигляді аксіом і теорем мовою числення предикатів першого порядку;

– виключити квантори спільності та існування і перетворити аксіоми на розширену мову клауз Хорна, які складаються не більше ніж з одного висновку;

– знайти мінімальну кінцеву підмножину диз’юнктив для Ербранівського універсуму методом резолюцій з метою зменшення розміру області пошуку доведень;

– описати речення мовою логічного програмування;

– знайти розв’язок, використовуючи низхідний вивід і семантичний метод, який демонструє несумісність множини клауз за допомогою того, що жодна інтерпретація не робить усі клаузи істинними.

У разі ж формалізації моделі за допомогою алгебри предикатів та предикатних операцій, необхідно:

– описати об’єкти, їх інтерфейси, безпечні та небезпечні стани і правила переходу системи в той чи інший стан мовою алгебри предикатів та предикатних операцій;

– виконати програмну реалізацію предикатної моделі;

– знайти розв’язок шляхом завдання знань про окремі змінні та отриманням інформації про інші змінні.

#### Література

1. Сундеев П. В. Разработка научно-методического аппарата анализа функциональной стабильности критических информационных систем : дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.01. – Краснодар, 2007. – 349 с.
2. Сундеев П. В. Функциональная стабильность критических информационных систем: основы анализа [Электронный ресурс] / П. В. Сундеев // Научный журнал КубГАУ. – 2004. – № 5 (7). – Режим доступа: <http://www.ej.kubagro.ru/2004/05/03/p03.asp>.
3. Сундеев П. В. Автоматизация анализа функциональной стабильности критических информационных систем [Электронный ресурс] / П. В. Сундеев // Научный журнал КубГАУ. – 2004. – № 3 (5). – Режим доступа: <http://www.ej.kubagro.ru/2004/03/05/p05.asp>.
4. Бондаренко М. Ф. Об алгебре предикатов / М. Ф. Бондаренко, Ю. П. Шабанов-Кушнаренко // Бионика интеллекта. – 2005. – № 1. – С. 25–34.
5. Симанков В. С. Системный анализ функциональной стабильности критических информационных систем : монография / В. С. Симанков, П. В. Сундеев ; под ред. В. С. Симанкова. – Краснодар : Ин-т со-врем. технологий и экономики, 2004. – 204 с.
6. Сундеев П. В. Построение информационной модели функционирования обобщенной системы управления и обоснование фундаментальных принципов информационного взаимодействия сложных систем / П. В. Сундеев // Межвузовский сборник научных трудов. – Краснодар : Краснодар. воен. ин-т, 2000. – С. 80–83.

*Надійшла до редколегії 07.03.2010*

#### Анотації

Удосконалено метод побудови моделей і аналізу функціональної стабільності інформаційних систем за допомогою апарату алгебри предикатів та предикатних операцій, що дозволяє значно спростити процес знаходження множини траєкторій, які приводять систему в нестабільний стан.

Усовершенствован метод построения моделей и анализа функциональной стабильности информационных систем посредством применения языка алгебры предикатов и предикатных операций, что позволяет значительно упростить процесс поиска множества траекторий, приводящих систему в опасные состояния.

The method of model development and analysis of information systems functional stability is perfected via the use of predicative algebra language and predicative operations. This allows to simplify the procedure of search of trajectories setting the system in dangerous states.