

УДК 004.5

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

Інститут проблем реєстрації інформації НАН України  
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна  
e-mail: dodonov@ipri.kiev.ua

## **Системні дослідження живучості та безпеки складних технічних систем**

*Визначено особливості складних технічних систем і середовища їхнього функціонування, запропоновано використання методології системного аналізу для дослідження та оцінки живучості систем різних класів, виходячи з різних критеріїв. Наведено формалізовані постановки узагальнених задач оцінки живучості з використанням різних математичних методів. Обґрунтовано інформативність і корисність показників живучості при розробці та експлуатації складних технічних систем.*

**Ключові слова:** системні дослідження, складні технічні системи, живучість.

Сучасне ділове середовище важко уявити без створення та розвитку складних технічних і соціотехнічних систем регіонального чи глобального масштабів, для яких характерні розвинуті засоби комунікації, насиченість засобами автоматизації, складна структура ресурсозабезпечення, використання різноманітних інформаційних технологій тощо. Мобільність ділового середовища вимагає зростання чутливості систем до змін, що відбуваються в ньому, до різного роду зовнішніх і внутрішніх впливів, і в той же час вимоги безпеки потребують якомога меншої уразливості систем від впливів стихійного або цілеспрямованого характеру, забезпечення стійкості системи та її сталого функціонування. Визначається певне протиріччя у вимогах, що потребує розв'язання.

У загальному випадку при проектуванні складних технічних систем виникає не зовсім чітко сформульоване теоретично і, на перший погляд, не вирішуване практично завдання створення надійної, стабільно функціонуючої системи з ненадійних складових. Та пам'ятаючи, що властивості складної системи як цілого не є сумою властивостей її складових, що можливе виникнення нових інтегрованих властивостей, застосовуючи спеціальні проектні підходи, відповідні методики та архітектурні рішення досить успішно вже сьогодні можна вирішувати зазначені проблеми [1, 2].

У «глобальному суспільстві ризику» виникають нові вимоги до безпеки технічних систем, які включені у ланцюги життєзабезпечення, пов'язані безпосередньо з повсякденною діяльністю людей. Уже на початковому етапі розробки та впровадження цих систем потрібно якомога правильно визначитися з цілями й необхідним рівнем безпеки, спрогнозувати можливі втрати у разі виникнення нештатних ситуацій, мати можливість попереджувати розвиток небезпечних станів системи, спланувати способи віднов-

лення функціонування або «безпечну зупинку».

Сучасні дослідження з теорії живучості складних технічних систем спрямовані саме на розвиток методологічних основ організації систем із підвищеним рівнем живучості та безпеки упродовж всього життєвого циклу; на вивчення закономірностей збереження системою певної якості при ушкодженні її елементів і способах забезпечення живучості, використання механізмів її підтримки [1, 3].

У теорії живучості термін «якість системи» розуміється як властивість здатності досягати цілі функціонування (реалізувати визначену функцію). Аналогічно у теорії надійності якість системи розуміється лише у властивості гарантувати працездатний стан чи ні.

Ушкодження компонентів — це подія, що призводить до порушення функціонування системи або її складових внаслідок зовнішніх чи внутрішніх впливів. Важлива не природа впливів, а їхні наслідки для системи. Ушкодження можуть бути суттєвими або несуттєвими. Суттєві ушкодження найчастіше призводять до зміни цілі функціонування системи (звужується множина функцій, які виконуються системою), несуттєві — не призводять до зміни цілі.

*Живучість* — властивість, що характеризує, зокрема, і здатність системи ефективно функціонувати за наявності ушкоджень (руйнацій складових) або відновлювати цю здатність за визначений проміжок часу.

Живучість є комплексною властивістю систем. Показники живучості мають відповідати вимогам системного рівня досліджень і в той же час вони мають забезпечити можливість розробки достатньо простих моделей для практичних робочих досліджень та виконання розрахунків. [1, 3]. З поняттям живучості тісно пов'язані також такі властивості системи як адаптивність та стійкість. Адаптивність — це здатність системи змінюватися при зміні умов функціонування заради збереження своїх експлуатаційних показників у визначених межах. Стійкість — властивість системи при незначних змінах умов функціонування зберігати свої експлуатаційні показники.

Для технічних систем зі складною архітектурою, з великою кількістю гетерогенних компонентів оцінити живучість є складним завданням, навіть якщо відомі необхідні метрики для всіх складових системи, проте існує нагальна потреба у простих і достатньо ефективних для практики методиках адекватної достовірної оцінки основних характеристик живучості. Зрозуміло, що при дослідженні живучості та побудові оцінок необхідно провести аналіз інтегральних багатофакторних (багатокритеріальних) показників, які враховують як кількісні, так і якісні характеристики.

Сучасні дослідження живучості складних технічних систем спираються на принципи системного аналізу, що забезпечує формування цілісного системного погляду на об'єкт аналізу і дозволяє врахувати наступні особливості, які, згідно із загальною теорією систем, притаманні складним системам [1]:

— *вкладеність* — значна кількість зв'язаних і взаємодіючих між собою складових системи, які в свою чергу складаються з великої кількості зв'язаних і взаємодіючих між собою складових (елементів, підсистем, компонентів) і т.д.;

— *наявність загальносистемної цілі функціонування*, яка домінує над цілями функціонування будь-яких складових системи;

— *непередбачуваність*, що виявляється у поведінці складної системи, яка є результатом взаємодії і взаємовідношень між її компонентами;

— *відсутність повної інформації* про систему в цілому у будь-якого з компонентів складної системи, оскільки зв'язки між компонентами досить короткі, інформацію елемент системи отримує від найближчих сусідів, а при передачі на відносно великі від-

стані (при передачі інформації через певну кількість елементів) вона зазнає змін (а іноді взагалі втрачається);

— *нелінійність відношень між компонентами*, внаслідок чого незначний збурюючий вплив може викликати помітний ефект, і навпаки, значний впливаючий імпульс може бути не результативним;

— *наявність зворотних зв'язків* як позитивних, так і негативних, що визначають функціонування системи;

— *відкритість* (межі системи залежно від її природи мають бути проникні або для інформації, або для енергії, через що система постійно змінюється, але засобами управління утримується в стабільному стані);

— *наявність історії*, причому незначні зміни в теперішньому можуть призвести до значних змін у майбутньому;

— *активна взаємодія* із зовнішнім середовищем в умовах невизначеності факторів впливу на складові системи і мінливості стану зовнішнього і внутрішнього середовищ.

Живучість зазвичай виявляється в разі накопичення в системі критичної кількості відмов, коли повернення до стандартного режиму функціонування через зміну внутрішнього стану та зовнішнього середовища малоімовірно [2, 4]. Наявність живучості забезпечує динамічну функціональну відповідність системи змінним умовам експлуатації на досить тривалому проміжку часу. Більш живучою можна вважати технічну систему, яка найбільш відповідатиме задекларованим цілям свого функціонування в умовах поступового накопичення відмов, погіршення умов експлуатації і наявності небажаних впливів. Якщо існує декілька альтернативних варіантів за зазначеним вище критерієм, серед них більш живучою може вважатися система, що спроможна витримати на заданому інтервалі часу більшу кількість відмов або спроможна функціонувати з якістю не нижче визначеної впродовж більш тривалого часу і в найнесприятливіх умовах.

Комплексний характер проблеми аналізу та оцінки живучості робить неможливим рішення цієї проблеми на основі будь-якого одного параметра, необхідним стає розгляд інтегральних багатофакторних (багатокритеріальних) показників. Бажано, передбачаючи можливість використання властивості живучості, ще на початковому етапі розробки системи визначитися з критеріями оцінки системних якостей. Критерії повинні враховувати певні принципи, що характеризують різні конструктивно-технологічні аспекти, фактори й механізми забезпечення та підтримки живучості. Наприклад, для складних комп'ютерних систем можна визначити наступні критерії [1, 2, 4]:

— критерії відповідності системи заданим показникам якості функціонування і/або оцінки ступеню її функціональної деградації;

— критерії оцінки ефективності динамічної реконфігурації і перерозподілу ресурсів;

— критерії оцінки ступеню відновлення системи після збоїв і відмов завдяки механізмам реорганізації чи реконструкції;

— критерії, які характеризують зміни продуктивності, реактивності, чутливості системи в умовах деградації системних ресурсів;

— критерії оцінки адаптивності системи до зовнішніх і внутрішніх змін;

— критерії економічної ефективності використання наявних ресурсів.

Аналізуючи живучість технічної системи, яка знаходиться у постійно змінному зовнішньому середовищі і досить часто зазнає модернізації для покращення показників якості її функціонування, можна отримати найбільш об'єктивний і адекватний показник, оскільки саме при дослідженні живучості з'ясовується здатність системи виконувати свої функції впродовж довготривалого періоду, а не можливість продовження фу-

нкціонування по відновленню після окремих збоїв чи відмов (показники надійності та відмовостійкості).

Кількісна оцінка живучості складної технічної системи, як правило, виконується на основі конкретних метрик, які характеризують втрату функціональності (функціональну деградацію) за певний часовий період [2, 4]. Можливі різні методичні підходи до обчислення таких метрик, наприклад, через кількісні оцінки здатності системи виконувати критично важливі функції, через ступінь деградації системи тощо. Наприклад, для аналізу живучості та оцінки функціональної деградації можна використати інтегральний показник функціональної живучості  $\Phi$ , який визначається через середньозважену суму оцінок показників якості функціонування наступним чином [2]:

$$\Phi = \frac{1}{S} \sum_{j=1}^S z_j(k),$$

де значення унормованих показників  $z_j(k)$ ,  $j = \overline{1, S}$ , що обчислюється як

$$z_j(k) = a_j \frac{q_j^*(k) - q_j^{TB}}{q_j^{TB}}, j = \overline{1, l}, \quad \text{для } TB \text{ вигляду } q_j \geq q_j^{TB},$$

або

$$z_j(k) = a_j \frac{q_j^{TB} - q_j^*(k)}{q_j^{TB}}, j = \overline{l+1, S} \quad \text{для } TB \text{ вигляду } q_j \leq q_j^{TB};$$

де  $a_j$  — ваговий коефіцієнт, що характеризує ступінь значимості  $j$ -го показника функціональної живучості для інтегральної оцінки якості функціонування системи в цілому;  $k$  — число накопичених відмов у системі за заданий період часу (з урахуванням відновлення);  $q_j \in Q = \{q_1, q_2, \dots, q_S\}$  — елемент множини показників, які мають знаходитись у відповідних межах, що визначаються технічними вимогами  $TB$ , які формулюються у технічному завданні (ТЗ) на технічну систему;  $q_j^*(k)$  — «найгірше» у розумінні виконання умов ТЗ значення  $j$ -го показника якості функціонування при накопичення у системі  $k$  відмов компонентів.

Зрозуміло, що якщо для всіх заданих показників функціональної живучості за заданий період часу має місце обмеження  $q_j \geq q_j^{TB}$  або  $q_j \leq q_j^{TB}$ ,  $j = \overline{1, S}$ , то  $\min_j z_j(k) \geq 0$ ,  $j = \overline{1, S}$ , і, відповідно, значення інтегрального показника  $\Phi$  буде не нижче деякої критичної нижчої межі  $\Phi_{kp}$ . Її конкретне значення може бути задане спочатку при певних функціональних можливостях системи на деякий період експлуатації, а також як і початкове значення інтегрального показника  $\Phi$ .

Як кількісна оцінка ступеню деградації функціональних можливостей системи у цьому випадку може використовуватися величина:

$$S_d = \frac{\Phi_n - \Phi_{nom}}{\Phi_n} \times 100 \% = \frac{\Phi_{emp}}{\Phi_n} \times 100 \% ,$$

де  $\Phi_n$  — кількісна оцінка початкових (повних) функціональних можливостей системи з урахуванням вагових коефіцієнтів значимості показників функціональної живучості;  $\Phi_{nom}$ ,  $\Phi_{emp}$  — кількісна оцінка для поточних (наявних) та втрачених функціональних можливостей системи відповідно.

Досліджуючи живучість обчислювальних систем, як прикладу складних технічних систем, у рамках поданої вище моделі можна обрати за показник живучості число компенсованих функціональних відмов [3, 4].

У разі функціональної однорідності компонентів обчислювальної системи  $F_k$ , якість функціонування можна визначати через заданий рівень продуктивності системи, який забезпечується завдяки наявності відповідної кількості працездатних функціональних компонентів [5]

$$\mathfrak{R}(F_k, t) \geq \mathfrak{R}^* = \text{const} ,$$

де  $\mathfrak{R}(F_k, t)$  — середнє число працездатних функціональних компонентів у системі в момент часу  $t \geq 0$ ;  $\mathfrak{R}^*$  — мінімально припустиме число працездатних функціональних компонентів, при якому продуктивність системи не менше необхідної, тоді оцінкою функціональної живучості може слугувати функція

$$N(F_k, t) = \overline{\Omega}(F_k, t) / (N\omega) ,$$

де  $\overline{\Omega}(F_k, t)$  — математичне сподівання продуктивності системи в момент часу  $t \geq 0$ ;  $N\omega$  — сумарна продуктивність усіх функціональних компонентів.

Якщо за показник живучості комп'ютерної системи обрати, наприклад, такий якісний показник як підтримка певної інформаційної інфраструктури технічними засобами системи, тобто наявність певних комунікацій у системі, тоді моделлю комп'ютерної системи може слугувати граф, вузли якого — суть функціональні компоненти, а дуги — різні канали зв'язку (провідні, бездротові, комбіновані) [6]. Функціонування системи можна розглядати як послідовність інформаційних процесів (паралельно-послідовну роботу сукупності функціональних компонентів), між якими має місце обмін інформацією каналами зв'язку. Якщо мають місце часові обмеження, а саме, інформаційний процес має завершитись за час  $T_z$ , який не перевищує  $T_{don}$  (максимально допустимий час опрацювання інформації, який залежить від прикладної сфери), тоді

$$T_z = (T_f + T_{ob}) \leq T_{don} ,$$

де  $T_f$  — час, який витрачається на опрацювання інформації функціональними компонентами,  $T_{ob}$  — час, витрачений на інформаційний обмін.

Зміни зовнішнього чи внутрішнього середовища, небажані впливи на комп'ютерну систему можуть призвести до збільшення часу реалізації інформаційного процесу на

$T_{\text{доп}}$ . За показник функціональної живучості у таких умовах можна обрати ймовірність виконання інформаційного процесу, що реалізує ціль функціонування, тобто ймовірність існування необхідної сукупності функціональних компонентів і каналів зв'язку, при обмеженнях:

$$(T_f + T_{\text{об}} + T_{\text{доп}}) \leq T_{\text{доп}}.$$

У разі наявності декількох розробок комп'ютерних систем одного функціонального призначення за критерій переваги можна обрати живучість, зокрема, показник функціональної живучості — наявна кількість структур, які дозволяють реалізувати «критичний» інформаційних процес.

При аналізі живучості складних технічних систем використовують різні підходи, на основі теорії ймовірностей, теорії масового обслуговування, дослідження операцій, методів дослідження моделей з використанням апарата ланцюгів Маркова, стохастичних мереж Петрі [1, 3, 7, 8]. Як правило, на основі теоретико-ігрових моделей проводять дослідження живучості складних технічних і соціотехнічних систем військового призначення, які функціонують в умовах цілеспрямованого впливу супротивника, наявності зовнішніх і внутрішніх уразливих факторів, коли компенсувати нештатні ситуації, потоки відмов і збоїв можна лише за рахунок внутрішніх резервів системи [4, 9]. Функціонування системи розглядається як серія обмінів деякої кількості  $V$  ресурсів, що витрачають, на деяку кількість  $W$  споживаних ресурсів. Для одержання кількісної оцінки живучості систем, які описуються моделями такого типу, конкретизується зміст  $(V, W)$ -обмінів. Оптимальність поведінки систем досягається за рахунок оптимізації  $(V, W)$ -обмінів. Живучість систем оцінюється наявністю в них життєво важливих елементів, які визначаються на основі експертних оцінок у кожному конкретному випадку за відповідними правилами.

Вже досить давно використовуються і дають хороші результати в галузі радіоелектроніки, економіки, військової техніки логіко-ймовірнісні моделі для аналізу живучості та надійності структурно-складних систем [10]. Тут використовується апарат теорії графів для аналізу топології і взаємного впливу компонентів системи, а за допомогою теорії ймовірностей моделюються результати несприятливих зовнішніх впливів на систему.

Живучість складних технічних систем у рамках зазначених вище моделей може досліджуватися в різних аспектах, але гетерогенність компонентів складних систем ніяк не враховується у цих моделях, не враховується динамічність характеристик зовнішнього середовища, складність зворотних зв'язків. Крім того, досвід системних досліджень свідчить, що складні технічні системи є більш багатогранним явищем, ніж можна розкрити у канонічній схемі дослідження. Отже, для повноцінного практично корисного аналізу і оцінки живучості вже сьогодні потрібні більш змістовні моделі, що враховували б не тільки функціональне призначення системи, а й особливості архітектурних рішень та нюанси технічних реалізацій.

1. Додонов О.Г. Живучість складних систем: аналіз та моделювання: навч. посіб. у 2-х ч. / О.Г. Додонов, М.Г. Кузнецова, О.С. Горбачик. — К.: НТУУ «КПІ», 2009. — 264 с. — Бібліогр.: С. 137–138; 259–261.

2. Зиновьев П.А. Анализ факторов и механизмов живучести в корпоративных информационных системах / П.А. Зиновьев // Исследования по информатике. — 2007. — Вып. 12. — Казань: Отечество. —

С. 3–30. — Библиогр.: С. 28–30.

3. *Стекольников Ю.И.* Живучесть систем. Теоретические основы / Ю.И. Стекольников. — СПб.: Политехника, 2002. — 168 с. — Библиогр.: С. 152–155.

4. *Додонов А.Г.* Введение в теорию живучести вычислительных систем / А.Г. Додонов, М.Г. Кузнецова, Е.С. Горбачик; отв. ред. В.А. Гуляев. — К.: Наук. думка, 1990. — 184 с. — Библиогр.: С. 173–180.

5. *Павский В.А.* Вычисление показателей живучести распределенных вычислительных систем и осуществимости решения задач / В.А. Павский, К.В. Павский, В.Г. Хорошевский // Искусственный интеллект. — 2006. — № 4. — С. 28–34.

6. *Додонов О.Г.* Живучість інформаційно-аналітичних систем: понятійний апарат, моделі аналізу та оцінки / О.Г. Додонов, О.С. Горбачик, М.Г. Кузнецова // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 2007. — Т. 9, № 3. — С. 61–72.

7. *Зайченко Е.Ю.* Сети АТМ: моделирование, анализ и оптимизация / Е.Ю. Зайченко. — К.: ЗАТ «ВППОЛ», 2003. — 216 с. — Библиогр.: С. 198–206.

8. *Барабаш О.В.* Построение функционально устойчивых распределенных информационных систем / О.В. Барабаш. — К.: НАУ, 2004. — 226 с. — Библиогр.: С. 223–225.

9. *Крапивин В.Ф.* О теории живучести сложных систем / В.Ф. Крапивин — М.: Наука, 1978. — 248 с. Библиогр.: С. 243–246.

10. *Рябинин, И.А.* Надежность и безопасность структурно-сложных систем / И.А. Рябинин. — СПб.: Политехника, 2000. — 248 с. — Библиогр.: С. 242–248.

Надійшла до редакції 15.06.2010