

АРХІТЕКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНА ОРГАНІЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЖИВУЧОСТІ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ НА МОБІЛЬНІЙ ПЛАТФОРМІ

Розглянуто наукову задачу архітектурно-функціональної організації інформаційної технології забезпечення живучості інформаційних систем на мобільних платформах за переривчастою зв'язністю, змінної доступності ресурсів і неповноти даних про стан. Метою дослідження є визначення складу функціональних компонентів технології, порядку їх взаємодії, операційних режимів і умов завершеності технологічного циклу. Для формального подання використано теоретико-множинний підхід, кортежне подання, відношення відповідності між моделями, методами, функціями та компонентами, контракти взаємодії типу «припущення — гарантія» і засоби функціонального моделювання. Визначено компоненти формування подання стану, оцінювання живучості, прогнозування розвитку порушень, формування та відбору керувальних дій, контролю виконання, резервування, відновлення, підтримання консистентності даних, журналювання і зберігання відомостей. Формалізовано склад передаваних даних і повідомлень, умови їх приймання та використання, властивості результату, допустимий інтервал використання, потребу в ресурсах, ідентифікацію версії та циклу керування, порядок підтвердження оброблення. Встановлено умови сумісності послідовних контрактів і визначено три стани керувальної дії: підтверджене завершення, контрольоване відкладення та відхилення. Сформовано штатний, передкритичний, автономний, відновлювальний режими та режим керованої деградації. Наукова новизна полягає у поєднанні функціонального відображення моделей і методів у компоненти технології, узгодження взаємодії компонентів на основі контрактів, зміни конфігурації залежно від режиму та формальних умов завершеності технологічного циклу. Одержані результати створюють основу для програмної реалізації та експериментального оцінювання технології.

Ключові слова: живучість, інформаційна технологія, мобільна платформа, контракт взаємодії, операційний режим.

V. Tkachov, I. Ruban

ARCHITECTURAL AND FUNCTIONAL ORGANIZATION OF INFORMATION TECHNOLOGY FOR ENSURING THE SURVIVABILITY OF AN INFORMATION SYSTEM ON A MOBILE PLATFORM

The article addresses the scientific problem of the architectural and functional organization of information technology for ensuring the survivability of information systems on mobile platforms under intermittent connectivity, variable resource availability, and incomplete state data. The purpose of the study is to determine the composition of functional components, their interaction, operating modes, and conditions for completing the technological cycle. The formal description uses a set-theoretic approach, tuple representation, a correspondence relation between models, methods, functions, and components, assumption–guarantee contracts, and functional modeling tools. The technology includes components for forming a system-state representation, assessing survivability, forecasting disturbances, generating and selecting control actions, controlling execution, redundancy, recovery, maintaining data consistency, logging, and storing information. The transmitted data, conditions for their acceptance and use, result properties, permissible interval of use, resource requirements, version and control-cycle identification, and processing confirmation procedures are formalized. Conditions for the compatibility of sequential contracts are established, and three states of a control action are defined: confirmed completion, controlled deferral, and rejection. Normal, precritical, autonomous, recovery, and controlled degradation modes are introduced. The scientific novelty lies in combining the mapping of models and methods to technology components, coordination of component interaction through contracts, mode-dependent configuration changes, and formal conditions for completing the technological cycle. Results provide a basis for software implementation and experimental evaluation.

Key words: survivability, information technology, mobile platform, interaction contract, operating mode.

1. Вступ

Інформаційні системи на мобільних платформах (ІСМП) застосовують у безпілотних і робототехнічних комплексах, розподілених сенсорних мережах, мобільних пунктах керування та інших системах, де оброблення даних і формування рішень виконуються безпосередньо на рухомих вузлах [1, 2]. Умови їх функціонування визначаються мобільністю компонентів, переривчастою зв'язністю, частковою спостережуваністю стану системи, змінною доступністю ресурсів платформи, часовими обмеженнями на виконання критичних функцій [3, 4]. Унаслідок цього склад доступних сервісів, повнота телеметричних даних і можливість реалізації керувальних дій можуть змінюватися протягом коротких інтервалів функціонування ІСМП.

За таких умов живучість ІСМП визначається її здатністю зберігати або відновлювати виконання критичних функцій за деструктивних впливів, ресурсної недостатності та порушень зв'язності [5]. Стан даних, перебіг процесів і ресурсне забезпечення утворюють взаємопов'язану структуру. Локальне відхилення на одному рівні може спричинити вторинні порушення, змінити здійсненність керувальних дій і призвести до деградації критичних сервісів. Тому забезпечення живучості потребує узгодженого використання засобів спостереження, оцінювання стану, прогнозування розвитку порушень, вибору керувальних дій, резервування, відновлення та підтримання консистентності даних в ІСМП.

У межах предметної області існують багаторівневі моделі живучості ІСМП [6], підходи до визначення безпечних множин станів і допустимих керувальних траєкторій [7], методи оцінювання та прогнозування порушень в ІСМП [8, 9], керування [10] і резервування ресурсів ІСМП [11], локального відновлення стану та забезпечення неперервності даних [12, 13]. Кожний із зазначених результатів розв'язує визначену задачу та має власні вхідні дані, обмеження й умови застосування. Для їх сумісного використання як складових інформаційної технології необхідно встановити склад функціональних компонентів, відо-

бразити моделі й методи у функції цих компонентів, визначити інформаційні та керувальні потоки, узгодити порядок взаємодії в різних операційних режимах.

Відсутність формалізованої архітектурно-функціональної організації ускладнює використання результатів оцінювання та керування за несталих умов функціонування. Дані про стан системи можуть втратити актуальність до моменту формування рішення, допустима на момент вибору керувальна дія може виявитися незавершеною в межах наявного ресурсу та допустимого часу. Переривання обміну між компонентами може знівелювати процедуру відновлення, реконфігурації чи синхронізації ІСМП. За цих обставин технологія повинна забезпечувати простежуваність зв'язку між виявленим порушенням, ухваленим рішенням, виконаною дією та одержаним результатом.

Отже, актуальною є наукова задача розроблення архітектурно-функціональної організації інформаційної технології забезпечення живучості ІСМП. Її розв'язання передбачає відображення моделей і методів у компоненти інформаційної технології, формалізацію умов їхньої взаємодії, визначення операційних режимів та організацію циклу керування, у якому підтверджені результати виконання використовуються для оновлення стану ІСМП і подальшого формування рішень.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасні дослідження архітектури розподілених інформаційних систем (ІС) значною мірою пов'язані з адаптацією обчислень до змін навантаження, доступності ресурсів і параметрів мережної взаємодії. У роботі [14] аналізуються адаптивні системи кордонних обчислень, систематизовано причини адаптації, рівні її реалізації, час реагування, способи зміни конфігурації та організацію керування. Встановлено, що більшість відомих рішень виконує адаптацію на прикладному рівні, тоді як зміни проміжного програмного забезпечення, комунікаційної інфраструктури та контексту функціонування досліджено менш повно. Для багатьох рішень характерні реактивне керування

та централізоване формування дій, що обмежує їхнє застосування у децентралізованих середовищах зі змінною зв'язністю.

Прикладом адаптації, орієнтованої на задані вимоги, є рішення для керування масштабуванням мікросервісів [15]. У запропонованому рішенні закладено механізм прийняття рішень за поточними значеннями показників рівня обслуговування. Його побудовано як циклічну послідовність спостереження, аналізу, планування та виконання дій зі спільним використанням накопичених відомостей про ІС. Таке рішення забезпечує узгодження ресурсного забезпечення з установленими вимогами до сервісів, проте одиницею керування залишається мікросервіс та його ресурсна конфігурація. Питання відновлення даних і контролю виконання керувальних дій у цій постановці не розглядаються.

Інший напрям утворюють архітектури підвищеної стійкості кордонних обчислювальних середовищ. У роботі [16] запропоновано систему RECS, у якій поєднано керування обчислювальними й комунікаційними ресурсами на рівнях даних і керування програмно-керованою інфраструктури. Засоби реконфігурації спрямовано на зменшення наслідків відмов, перевантажень сервісів і порушень роботи каналів зв'язку. Це рішення підтверджує доцільність багатокомпонентної організації засобів стійкого функціонування ІС, однак його архітектура формується переважно навколо інфраструктурних механізмів і не охоплює узгоджене застосування моделей та методів забезпечення живучості на рівнях даних, процесів і ресурсного забезпечення.

Для формалізації взаємодії компонентів складних систем застосовують контракти типу «припущення – гарантія». У роботі [17] визначено реалізацію й уточнення контрактів та умови їх композиції для послідовних структур і структур зі зворотними зв'язками. У дослідженні [18] розглянуто часові вимоги, залежні від режиму функціонування, переходи між режимами й відповідні операції композиції контрактів. Одержані результати створюють формальну основу для перевірки сумісності компонентів, однак не визначають архітектуру інформаційної технології забезпечення живучості

ІСМП, склад її інформаційних потоків і порядок застосування методів керування та відновлення.

У роботах [19, 20] розглянуто архітектури розподіленого виконання застосунків у обчислювальному середовищі «пристрій – туман – хмара». Запропоновані рішення охоплюють розміщення й розгортання сервісів, використання мікросервісних і безсерверних компонентів та координацію обчислень між рівнями середовища. Водночас їх побудова орієнтована на організацію розподіленого виконання застосунків і не визначає функціональне відображення моделей та методів забезпечення живучості у компоненти інформаційної технології.

У розглянутих працях зазначені властивості подано окремо: адаптивні архітектури не визначають відображення різномірних моделей і методів у функціональні компоненти; контрактні підходи не встановлюють операційні режими технології забезпечення живучості; архітектури кордонних обчислень не передбачають формалізованої фіксації стану незавершених керувальних дій. Отже, невирішеною залишається задача їх узгодженого подання у складі єдиної інформаційної технології.

3. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є розроблення архітектурно-функціональної організації інформаційної технології забезпечення живучості ІСМП, яка визначає склад і призначення її компонентів, порядок їх взаємодії та зміну складу залучених компонентів за переривчастою зв'язністю й ресурсних обмежень.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

- визначити склад функціональних компонентів інформаційної технології та встановити відповідність між ними, моделями, методами і функціями забезпечення живучості;

- формалізувати потоки даних, повідомлення про зміни стану, керувальні команди, інтерфейси компонентів та умови їх взаємодії з урахуванням своєчасності й повноти даних, наявності ресурсів для виконання дій та можливості встановити зв'язок

між виявленим порушенням, ухваленим рішенням і результатом його виконання;

- визначити операційні режими інформаційної технології, склад компонентів, залучених у кожному режимі, та умови переходу між режимами за зміни стану ІСМП, доступності ресурсів і параметрів зв'язності;

- побудувати функціональне подання інформаційної технології засобами IDEF0 і сформулювати умови завершеності технологічного циклу та узгодженої взаємодії його компонентів.

4. Результати досліджень та їхнє обговорення

4.1 Вихідні положення архітектурно-функціональної організації інформаційної технології. Спільне використання моделей і методів забезпечення живучості у складі інформаційної технології потребує визначення складу та призначення її компонентів, розподілу функцій між ними. Необхідно встановити порядок обміну результатами та правила зміни складу залучених компонентів відповідно до стану ІСМП, доступності ресурсів і параметрів зв'язності.

Під інформаційною технологією забезпечення живучості ІСМП розуміється організована сукупність функціональних компонентів, інформаційних ресурсів і регламентованих процедур, призначених для формування подання поточного стану ІСМП за доступними даними, оцінювання її живучості, прогнозування порушень критичних функцій, формування керувальних дій, контролю їх виконання та фіксації одержаних результатів. У разі неможливості завершення дії технологія повинна забезпечувати збереження відомостей про виконану частину операції та умови її поновлення.

Побудова інформаційної технології спирається на положення про комплексне застосування організаційних і технологічних засобів забезпечення живучості систем управління [21]. Для формування рішень використовуються відомості про стан сервісів, процесів, даних, засобів зв'язку та доступних ресурсів мобільної платформи.

Узагальнене подання інформаційної технології задається кортежем:

$$T = \langle C, F, D, U, K, M \rangle, \quad (1)$$

де C – скінченна множина функціональних компонентів інформаційної технології, F – множина функцій, які виконують ці компоненти, D – множина даних і повідомлень, якими обмінюються компоненти, U – множина керувальних дій, що формуються інформаційною технологією та виконуються її компонентами або відповідними засобами ІСМП, K – множина формалізованих умов передавання, приймання та використання результатів взаємодії компонентів; M – множина операційних режимів інформаційної технології.

Компоненти кортежу (1) визначають структурну та процесну організацію інформаційної технології. Структурна складова характеризує склад функціональних компонентів і розподіл функцій між ними. Процесна складова визначає обмін даними й повідомленнями, формування та виконання керувальних дій, умови використання результатів взаємодії, зміну складу залучених компонентів відповідно до операційного режиму.

Функціональні межі інформаційної технології охоплюють процес від надходження даних про стан ІСМП до фіксації результату керувальної дії. Таким результатом може бути підтверджене завершення дії, її контрольоване відкладення або формування рішення про перегляд способу реагування. Інформаційна технологія не виконує функції прикладних сервісів ІСМП і не замінює засоби безпосереднього керування ними. Її призначення полягає у виборі моделей і методів, узгодженні послідовності їх застосування та контролі результатів відповідно до поточного стану ІСМП.

Архітектурно-функціональна організація інформаційної технології ґрунтується на чотирьох положеннях. Перше передбачає встановлення відповідності між моделями, методами, функціями та компонентами технології. Друге визначає передавання результатів між компонентами за формалізованими умовами, які враховують повноту і своєчасність даних, наявність ресурсів та належність результату до відповідного керувального циклу. Третє полягає у зміні складу залучених компонентів і функцій відповідно до поточного операційного режиму. Четверте передбачає обов'язкову

фіксацію стану кожної керувальної дії: завершення, контрольованого відкладення або припинення.

Четверте положення має особливе значення за переривчастої зв'язності. Дія, допустима на момент її формування, може не завершитися через зменшення обсягу доступного ресурсу, зміну стану ІСМП або втрату зв'язку між елементами ІСМП. У такому разі повинні бути збережені відомості про виконану частину дії, одержаний проміжний результат і умови, за яких її виконання може бути поновлено.

4.2 Відповідність моделей і методів функціональним компонентам інформаційної технології. Відповідність між моделями, методами, функціями та компонентами, визначена у вихідних положеннях архітектурно-функціональної організації, потребує формального подання. Моделі, методи, критерії та процедури забезпечення живучості відрізняються призначенням, складом вхідних даних, умовами застосування і видом одержуваного результату. Тому для кожного з них необхідно визначити компонент інформаційної технології, у складі якого він використовується, та функцію, виконання якої він забезпечує.

Нехай R – множина моделей, методів, критеріїв і процедур забезпечення живучості. Відповідність між елементами множини R , компонентами інформаційної технології та виконуваними функціями задається відношенням

$$Q \subseteq R \times C \times F, \quad (2)$$

де належність $r_i, c_j, f_k \in Q$ означає, що модель, метод, критерій або процедура r_i використовується компонентом c_j під час виконання функції f_k .

Відношення Q допускає множинну відповідність між його складовими. Один елемент множини R може використовуватися кількома компонентами, якщо його змінні, обмеження або результати потрібні на різних етапах технологічного циклу. Водночас один компонент може використовувати кілька моделей, методів або процедур, вибір яких визначається станом ІСМП, дос-

тупними ресурсами та поточним операційним режимом.

Подання (1) розмежовує функціональне призначення компонентів інформаційної технології та науково-методичні засоби виконання їхніх функцій. Компонент визначає місце відповідної функції у технологічному циклі, тоді як моделі, методи, критерії та процедури визначають спосіб її реалізації.

Для побудови відношення Q елементи множини R згруповано відповідно до функцій, виконання яких вони забезпечують у технологічному циклі. Відповідність між групами моделей, методів, критеріїв і процедур, функціональними компонентами та результатами їх застосування наведено в табл. 1.

Такий розподіл дає змогу виокремити аналітичну та виконавчу складові інформаційної технології. Компоненти формування подання стану ІСМП, оцінювання живучості та прогнозування розвитку порушень формують інформаційну основу для прийняття керувального рішення. Компонент формування й відбору керувальних дій визначає дію, допустиму за поточного стану ІСМП, наявних ресурсів і встановлених обмежень. Компоненти диспетчеризації, відновлення та підтримання консистентності даних забезпечують виконання обраної дії, контроль її перебігу та фіксацію фактичного результату.

Окремий компонент, задіяний на всіх етапах технологічного циклу, здійснює журналювання та зберігання відомостей про перебіг керування. Він накопичує телеметричні дані, відомості про виявлені порушення, прийняті рішення, проміжні результати виконання, знімки стану даних і підтверджені конфігурації. За переривчастої зв'язності збережені відомості дають змогу визначити виконану частину операції, перевірити умови її поновлення та продовжити виконання після відновлення ресурсів.

Поданий у табл. 1 розподіл конкретизує відношення Q (2) та є основою для визначення складу функціональних компонентів і побудови функціональної структури інформаційної технології.

Таблиця 1.

Розподіл моделей, методів, критеріїв і процедур за функціональними компонентами інформаційної технології

Моделі, методи, критерії та процедури	Компонент технології	Функції компонента	Основні вхідні дані	Результат виконання
Методи оброблення телеметрії, аналізу змін ресурсного забезпечення та раннього виявлення передкритичних станів	Компонент формування подання стану ІСМП (c_1)	Перевірка, нормування та узгодження даних за часом	Телеметрія; журнали виконання; відомості про зв'язність і ресурсне забезпечення	Узгоджене подання стану ІСМП; оцінка повноти і своєчасності даних
Багаторівневі моделі ІСМП, критерії допустимості, інваріанти та інтегральні показники живучості	Компонент оцінювання живучості (c_2)	Обчислення показників живучості; перевірка інваріантів і допустимості стану; визначення відхилень від допустимої області	Узгоджене подання стану ІСМП	Оцінка живучості ІСМП; виявлені порушення; відхилення від допустимої області
Моделі міжрівневих порушень, методи аналізу та прогнозування каскадного поширення	Компонент прогнозування розвитку порушень (c_3)	Визначення джерел порушень; побудова шляхів поширення; оцінювання каскадного ризику	Оцінка живучості ІСМП; виявлені порушення; граф залежностей; параметри зв'язності	Прогноз розвитку порушень; можливі шляхи їх поширення; оцінка ризику каскадних порушень
Методи синтезу політик, прогнозного керування, розподілу ресурсів і диспетчеризації критичних процесів	Компонент формування та відбору керувальних дій (c_4)	Формування допустимих варіантів дій; перевірка обмежень; визначення пріоритетів і порядку виконання	Оцінка стану; прогноз; доступний ресурс; часові обмеження	Обрана керувальна дія або впорядкована послідовність дій
Процедури перевірки умов виконання дій і підтвердження проміжних результатів	Компонент диспетчеризації та контролю виконання (c_5)	Визначення порядку виконання; перевірка умов продовження дії; контроль проміжних результатів; завершення, перебудова або відкладення дії	Обрана керувальна дія; результати перевірки інваріантів; доступні ресурси; залишок допустимого часу	Підтверджений результат; зафіксований стан відкладеної дії; повідомлення про необхідність перебудови дії.
Методи резервування, реконфігурації, відновлення сервісів і процесів, пріоритетного відновлення компонентів та відкату змін	Компонент резервування та відновлення (c_6)	Активація резервного профілю; відновлення критичних функцій; повернення до підтвердженої конфігурації	Обрана керувальна дія; точна конфігурація; резерви; журнали змін	Функціонально допустимий стан ІСМП
Методи керованої деградації даних, післяаварійного відновлення, синхронізації та розв'язання конфліктів	Компонент підтримання консистентності даних (c_7)	Формування знімків; ведення журналів; відновлення критичних даних; відкладена синхронізація	Стан даних; резервні копії; журнали операцій; відомості про зв'язність.	Узгоджений стан даних; відновлені критичні дані; відкладені зміни

4.3 Компонентний склад і функціональна структура інформаційної технології. На підставі відношення Q (2) визначається компонентний склад інформаційної технології. Він охоплює компоненти формування подання стану ІСМП, оцінювання живучості, прогнозування розвитку порушень, формування керувальних дій, організації їх виконання, відновлення функціонального стану, підтримання консистентності даних та зберігання відомостей про перебіг керування.

Множина функціональних компонентів інформаційної технології задається так:

$$C = c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8. \quad (3)$$

Позначення $c_1, \dots, c_7$ у (3) відповідають компонентам, наведеним у табл. 1. Компонент c_8 здійснює журналювання та зберігання відомостей про перебіг керування і використовується на всіх етапах технологічного циклу.

Компонент c_1 отримує телеметричні дані, повідомлення про зміни стану, відомості про доступність вузлів і каналів зв'язку, показники ресурсного забезпечення та записи журналів виконання. Він перевіряє своєчасність і повноту одержаних даних, вилучає непридатні службові дані, нормує показники та узгоджує їх за часом. Результатом його функціонування є подання стану даних, процесів, сервісів і ресурсів ІСМП із зазначенням повноти та часу одержання використаних службових даних. За переривчастості зв'язності таке подання може формуватися на основі неповного складу телеметричних даних, що враховується під час подальшого оцінювання живучості.

Компонент c_2 використовує сформоване компонентом c_1 подання стану ІСМП для обчислення показників живучості, перевірки інваріантів і допустимості поточного стану. За результатами обчислень визначаються виявлені порушення та відхилення від допустимої області.

Компонент c_3 використовує одержану оцінку живучості ІСМП, відомості про виявлені порушення, граф залежностей між її складовими, прогнозовані зміни ре-

сурсного забезпечення та зв'язності. На основі цих даних визначаються можливі шляхи поширення порушень, оцінюється ризик їх каскадного розвитку та встановлюється, які керувальні дії можуть бути виконані в межах доступних ресурсів і допустимого часу.

Компонент c_4 формує множину керувальних дій, допустимих за поточного стану ІСМП, та виконує їх відбір. Під час відбору враховуються критичність порушень функцій, доступні ресурси, допустима тривалість виконання, очікувана зміна показників живучості та умови застосування відповідних методів. Результатом функціонування компонента є обрана керувальна дія або впорядкована послідовність дій.

Компонент c_5 визначає порядок виконання обраної дії, перевіряє початкові умови її виконання та контролює проміжні результати. Такий контроль необхідний, оскільки після початку виконання можуть змінитися стан ІСМП, обсяг доступних ресурсів або тривалість вікна зв'язності. Якщо подальше виконання дії за змінених умов стає неможливим або недоцільним, компонент c_5 формує рішення про її перебудову, контрольоване відкладення або припинення.

Компоненти c_6 і c_7 забезпечують безпосереднє виконання дій, сформованих на попередніх етапах. Компонент c_6 активує резервні профілі, відновлює критичні функції, виконує пріоритетне відновлення компонентів і повернення до підтвердженої конфігурації. Компонент c_7 формує знімки стану даних, веде журнали операцій, відновлює критичні дані, здійснює відкладену синхронізацію та розв'язання конфліктів. Залежно від складу керувальної дії компоненти c_6 і c_7 можуть залучатися окремо або спільно.

Компонент c_8 використовується на всіх етапах технологічного циклу. Він зберігає телеметричні дані, повідомлення про виявлені порушення, оцінки живучості, результати прогнозування, обрані керувальні дії, проміжні результати їх виконання, знімки стану даних і підтверджені конфігурації. Якщо виконання дії переривається, компонент c_8 фіксує виконану частину, одер-

жаний проміжний результат і умови поновлення. Після відновлення необхідних ресурсів або зв'язку збережені відомості використовуються для продовження, перебування чи припинення дії.

Функціональна структура інформаційної технології подається множиною укрупнених функцій:

$$F_0 = f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, \quad F_0 \subseteq F, \quad (4)$$

де f_1 – функція формування подання стану ІСМП, f_2 – функція оцінювання живучості та прогнозування розвитку порушень, f_3 – функція формування і відбору керувальної дії, f_4 – функція організації та контролю виконання керувальної дії, f_5 – функція відновлення функціонально допустимого стану ІСМП і консистентності даних, f_6 – функція фіксації результату та оновлення відомостей про стан ІСМП для наступного циклу керування.

Відповідність між функціями (4) і компонентами (3) задається відображенням:

$$\begin{aligned} \Phi: F_0 &\rightarrow 2^C, \\ \Phi(f_k) &= c_j \in C \mid \exists r_i \in R: (r_i, c_j, f_k) \in Q. \end{aligned} \quad (5)$$

де $\Phi(f_i)$ – підмножина компонентів інформаційної технології, залучених до вико-

нання функції f_i , 2^C – множина всіх підмножин множини C .

Відображення (5) враховує можливість залучення одного компонента до виконання кількох функцій. Наприклад, компонент c_8 використовується під час формування подання стану ІСМП, контролю виконання керувальної дії та фіксації її результату. Компонент c_5 організовує виконання обраної дії, контролює його перебіг і бере участь у підтвердженні результату.

Контекстне подання інформаційної технології засобами IDEF0 наведено на рис. 1. Основна функція діаграми А-0 формулюється як «Забезпечити живучість інформаційної системи на мобільній платформі». Входами є телеметричні дані, повідомлення про виявлені порушення, відомості про доступність вузлів, каналів зв'язку та ресурсів, поточна конфігурація ІСМП. Керувальними впливами є модель живучості, інваріанти, допустимі межі показників функціонування, обмеження на використання ресурсів і час виконання дій, пріоритети критичних функцій, умови застосування методів. Результатами виконання функції є оцінка живучості ІСМП, обрана керувальна дія, команди на виконання дії, підтверджений результат виконання, зафіксований стан відкладеної дії.

Механізмами виконання основної функції є компоненти інформаційної технології (3), обчислювальні засоби мобільної платформи, локальні сховища, журнали журналювання, доступні канали зв'язку.

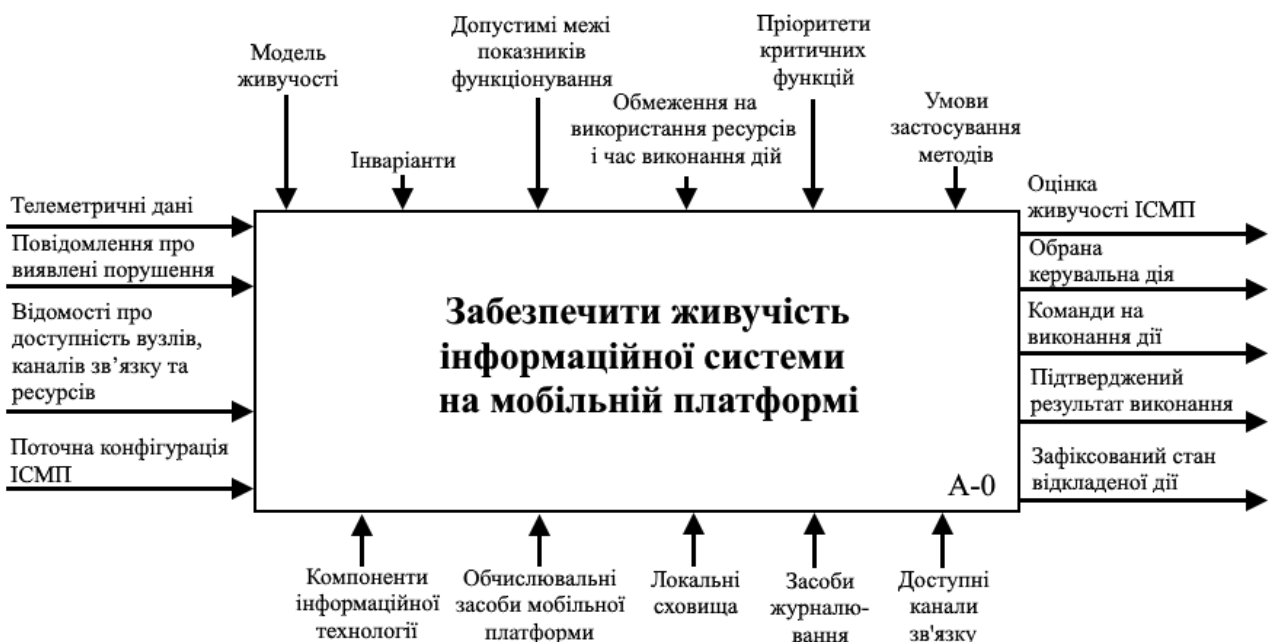


Рис. 1. Контекстна IDEF0-діаграма А-0 інформаційної технології забезпечення живучості ІСМП

Виходами є оцінка живучості ІСМП, обрана керувальна дія, команди на її виконання, підтверджений результат або зафіксований стан відкладеної дії.

Контекстну функцію, подану на діаграмі А-0 (рис. 1), декомпозовано відповідно до множини функцій (4). На діаграмі А0 (рис. 2) функції $f_1, \dots, f_6$ представлено блоками А1–А6. Блок А1 формує подання стану ІСМП. Блок А2 оцінює живучість ІСМП та прогнозує розвиток виявлених порушень. Блок А3 формує і відбирає керувальну дію, допустиму за поточного стану системи та встановлених обмежень. Блок А4 організовує виконання обраної дії та контролює його перебіг. Блок А5 забезпечує відновлення функціонально допустимого стану ІСМП і консистентності даних. Блок А6 фіксує фактичний результат виконання та оновлює відомості про стан ІСМП.

Результати виконання функцій передаються послідовно від блока А1 до блока А6. Поряд із прямою послідовністю на діаграмі передбачено зворотні інформаційні потоки. Проміжні результати виконання, сформовані блоком А4, та відомості про стан ІСМП після виконання дії, сформовані блоком А5, надходять до блока А2 для повторного оцінювання живучості та прогнозування розвитку порушень. Якщо продовження дії стає неможливим, блок А4 передає до блока А6 відомості про її відкладення або припинення. Оновлені відомості, сформовані блоком А6, використовуються блоками А1–А3 у наступному циклі керування.

Зовнішні входи, керувальні впливи, виходи та механізми контекстної діаграми А-0 збережено на діаграмі А0, що забезпечує узгодженість рівнів функціональної декомпозиції.

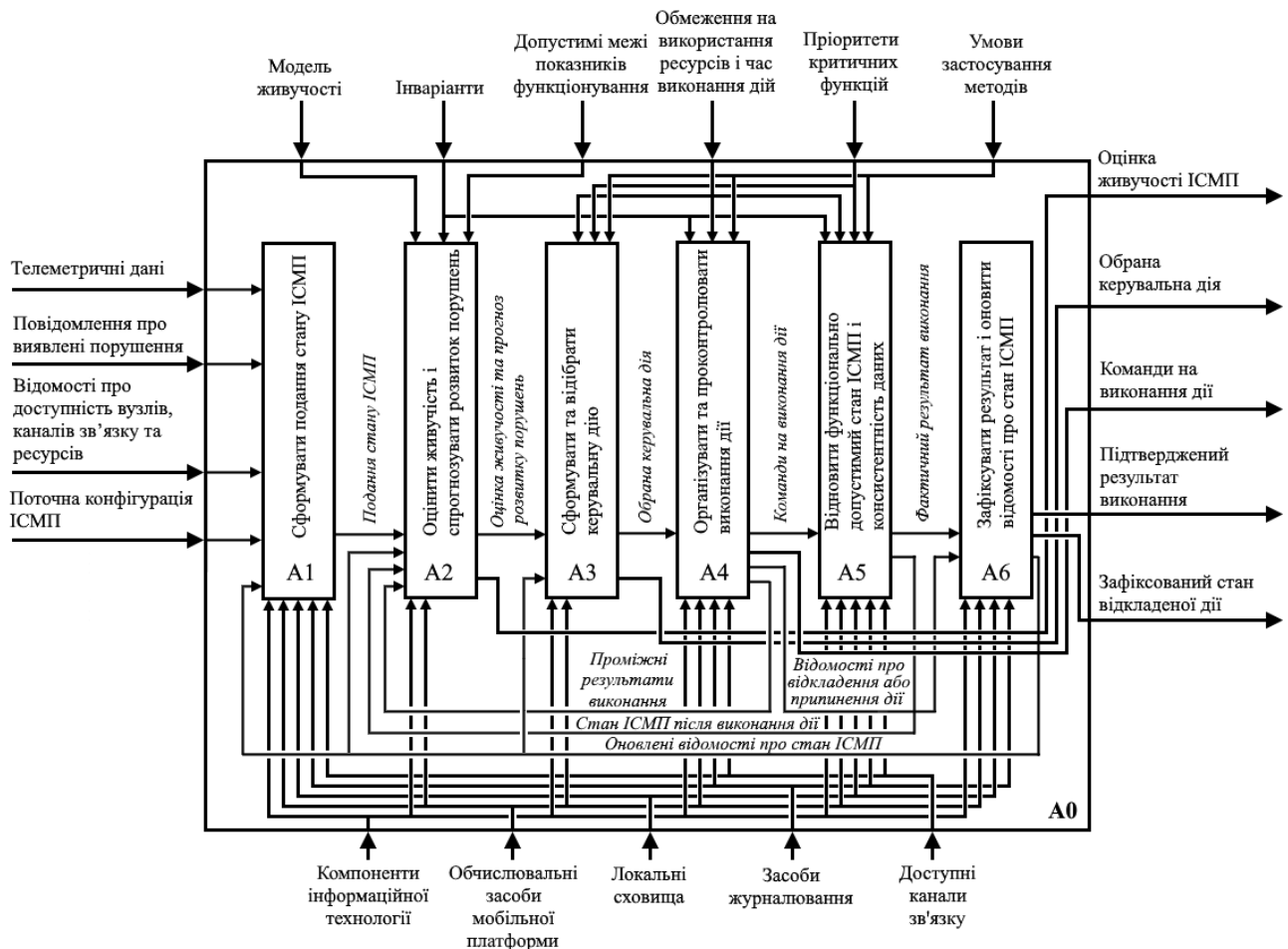


Рис. 2. Діаграма А0 декомпозиції контекстної функції інформаційної технології забезпечення живучості ІСМП

Отже, компонентний склад (3), множина основних функцій (4), відображення (5) та діаграми на рис. 1 і 2 визначають функціональну організацію інформаційної технології. Побудована структура охоплює послідовність від формування подання стану ІСМП до фіксації результату керувальної дії та оновлення відомостей, що використовуються в наступному циклі керування.

4.4 Інтерфейси та контракти взаємодії компонентів. Функціональні зв'язки між компонентами, подані на діаграмі А0 (рис. 2), реалізуються шляхом передавання даних, повідомлень про зміни стану та команд на виконання дій. Для кожної взаємодії визначаються компонент-джерело, компонент-одержувач, склад передаваних даних, умови їх приймання і використання, порядок підтвердження результату оброблення.

Інтерфейс між компонентами визначає склад і структуру даних та повідомлень, якими вони обмінюються. Формалізований опис умов формування, передавання, приймання і використання цих даних надалі називається контрактом взаємодії. Його застосування запобігає використанню результату після зміни стану ІСМП, доступних ресурсів або умов зв'язності, за яких цей результат було сформовано.

Для компонентів $c_i, c_j \in C$ контракт взаємодії $K_{ij} \in K$ задається кортежем:

$$K_{ij} = \langle D_{ij}, A_{ij}, G_{ij}, \tau_{ij}, \vec{\rho}_{ij}, V_{ij}, P_{ij} \rangle, \quad (6)$$

де D_{ij} – дані та повідомлення, що передаються від компонента c_i до компонента c_j , A_{ij} – умови приймання і використання даних, зокрема вимоги до стану ІСМП та доступності необхідного каналу зв'язку, G_{ij} – властивості результату, дотримання яких забезпечує компонент c_i , зокрема його повнота, цілісність і відповідність установленому формату, τ_{ij} – інтервал часу, протягом якого результат може бути використаний без повторної перевірки, $\vec{\rho}_{ij}$ – вектор мінімально необхідних ресурсів для формування, передавання та оброблення даних, V_{ij} – ідентифікатор версії даних і події або

порушення, з яким пов'язане їх формування, P_{ij} – порядок підтвердження приймання даних і завершення їх оброблення.

Складові контракту (6) дають змогу розмежувати одержання даних і можливість їх подальшого використання. Дані можуть бути прийняті компонентом c_i , але не використані, якщо після їх формування змінився стан ІСМП, завершився встановлений інтервал використання або наявних ресурсів стало недостатньо для подальшого оброблення. У такому разі факт одержання даних фіксується, а їх використання дозволяється після повторної перевірки умов A_{ij} або повторного формування результату.

Послідовне використання результатів потребує сумісності контрактів. Для передавання результату від компонента c_i через компонент c_j до c_k контракти K_{ij} і K_{jk} вважаються сумісними, якщо виконуються умови:

$$G_{ij} \models A_{jk}, \quad \tau_{ij} \cap \tau_{jk} \neq \emptyset, \quad \vec{\rho}_{jk} \preceq \vec{\rho}_j^a, \quad (7)$$

де $\vec{\rho}_j^a$ – вектор ресурсів, доступних компоненту c_j під час формування і передавання результату, знак $\preceq$ означає, що вимоги до кожного виду ресурсу не перевищують його доступного обсягу.

Перша умова (7) означає, що властивості результату, гарантовані контрактом K_{ij} , задовольняють умови його використання, визначені контрактом K_{jk} . Друга умова встановлює наявність спільного інтервалу, протягом якого результат попереднього компонента залишається придатним для подальшого оброблення. Третя умова визначає достатність доступних ресурсів для виконання наступної технологічної операції.

Якщо хоча б одна з умов (7) не виконується, результат не передається до наступного етапу технологічного циклу. Залежно від причини порушення виконується повторна перевірка вхідних даних, повторне формування результату або фіксація відкладеного стану операції.

Конкретизацію контрактів передавання результатів між компонентами інформаційної технології наведено в табл. 2.

Для кожної взаємодії визначено передаваний результат, умови його використання та результат оброблення.

Таблиця 2.

Основні контракти передавання результатів між компонентами інформаційної технології

Взаємодія компонентів	Передаваний результат	Умови використання результату	Результат взаємодії
$c_1 \rightarrow c_2$	Подання стану ІСМП	Достатня повнота і своєчасність даних; визначене джерело	Допуск даних до оцінювання живучості
$c_2, c_3 \rightarrow c_4$	Оцінка живучості та прогноз розвитку порушень	Відповідність поточній конфігурації ІСМП; незавершений інтервал використання	Формування множини допустимих керувальних дій
$c_4 \rightarrow c_5$	Обрана керувальна дія	Виконання початкових умов; наявність потрібних ресурсів і допустимого часу	Приймання дії до виконання
$c_5 \rightarrow c_2, c_3$	Проміжний результат виконання	Визначена дія; зафіксовані виконана частина, поточний стан і залишок ресурсів	Продовження, перебудова, відкладення або припинення дії
$c_6, c_7 \rightarrow c_8$	Фактичний результат виконання	Завершення передбачених перевірок; виконання умов підтвердження результату	Фіксація підтвердженого стану
$c_8 \rightarrow c_1, c_2, c_3, c_4$	Оновлені відомості про стан ІСМП	Узгодженість версій; зв'язок із відповідною подією та керувальною дією	Формування початкових даних наступного циклу

Дані передаються до наступного етапу технологічного циклу лише за виконання умов відповідного контракту та умов сумісності (7). Якщо ці умови порушено, виконується повторне формування результату, перебудова керувальної дії або фіксація її відкладеного стану.

За результатами перевірки умов контракту для технологічної операції фіксується один із трьох станів: підтверджене завершення, контрольоване відкладення або відхилення. Підтверджене завершення означає виконання керувальної дії та фіксацію фактичного результату. Контрольоване відкладення застосовується, якщо дія залишається допустимою, але не може бути завершена через недостатність ресурсів, часу або втрату необхідного зв'язку. В такому разі зберігаються виконана частина дії, проміжний стан, ідентифікатор пов'язаної події та умови поновлення. Відхилення застосовується, якщо зміна стану ІСМП або встановлених обмежень робить подальше виконання дії недопустимим чи недоцільним; після цього формується підстава для вибору іншої керувальної дії.

Отже, контракти (6), умови їх сумісності (7) та конкретизація взаємодій, наведена в табл. 2, визначають порядок передавання і використання результатів між компонентами та забезпечують однозначну фіксацію стану кожної технологічної операції.

4.5 Операційні режими та зміна активної конфігурації інформаційної технології. Склад компонентів і функцій, залучених до забезпечення живучості, визначається поточним станом ІСМП, повнотою доступних даних, наявними ресурсами та параметрами зв'язності. Для формального подання цих змін вводяться операційні режими інформаційної технології. Кожному режиму відповідає конфігурація, яка визначає компоненти, функції, дані, керувальні дії та контракти, що можуть використовуватися за відповідних умов функціонування.

Множина операційних режимів задається так:

$$M = m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, \quad (8)$$

де m_1 – штатний режим, m_2 – передкритичний режим, m_3 – режим керованої деградації.

дації, m_4 – режим автономного функціонування за переривчастої зв'язності, m_5 – відновлювальний режим.

Для кожного режиму $m_i \in M$ конфігурація інформаційної технології визначається кортежем:

$$\Gamma_i = \langle C_i, F_i, D_i, U_i, K_i \rangle, \quad i \in 1, \dots, 5, \quad (9)$$

де $C_i \subseteq C$ – компоненти, залучені в режимі m_i , $F_i \subseteq F_0$ – функції технологічного циклу, обов'язкові для цього режиму, $D_i \subseteq D$ – дані та повідомлення, що використовуються компонентами, $U_i \subseteq U$ – керувальні дії, допустимі за умов режиму, $K_i \subseteq K$ – контракти взаємодії, умови яких можуть бути виконані.

Конфігурація Γ_i не змінює загальної архітектури інформаційної технології, визначеної множиною C . Вона встановлює, які її компоненти та функції використовуються в поточному режимі, які дані доступні для оброблення і які керувальні дії можуть бути виконані. Перехід між режимами реалізується зміною відповідних підмножин у кортежі (9).

Штатний режим m_1 відповідає стану, за якого показники функціонування ІСМП перебувають у допустимих межах, доступні дані є достатніми для оцінювання живучості, а наявні ресурси забезпечують виконання основних і службових функцій. Конфігурація Γ_1 передбачає формування подання стану ІСМП, періодичне оцінювання живучості, ведення журналів та виконання дій, спрямованих на підтримання поточної конфігурації й недопущення накопичення відхилень.

Передкритичний режим m_2 встановлюється за наближення показників до допустимих меж, зростання швидкості погіршення стану або прогнозування каскадного поширення порушень. У конфігурації Γ_2 скорочується інтервал між послідовними оцінюваннями, оновлюється прогноз і формуються випереджальні керувальні дії. До них належать резервування ресурсів, зміна пріоритетів процесів, підготовка резервної конфігура-

ції та обмеження навантаження, що не пов'язане з виконанням критичних функцій.

Режим керованої деградації m_3 застосовується, якщо повний склад функцій ІСМП не може підтримуватися в межах наявних ресурсів або допустимого часу. Конфігурація Γ_3 забезпечує збереження критичних функцій і передбачає обмеження, спрощення або призупинення некритичних функцій та процесів. За подальшого погіршення стану склад виконуваних функцій звужується до критичного функціонального ядра, а відкладені й припинені операції фіксуються компонентом c_8 .

Режим автономного функціонування m_4 використовується за втрати зв'язку з віддаленими компонентами або недостатньої тривалості доступного інтервалу зв'язності. Конфігурація Γ_4 спирається на локальні відомості про стан ІСМП, збережені конфігурації, журнали операцій і ресурси мобільної платформи. Дані, які неможливо передати, зберігаються локально із зазначенням версії та часу формування. Їх передавання, синхронізація і подальше оброблення виконуються після відновлення зв'язку або переводяться у стан контролюваного відкладення.

Відновлювальний режим m_5 охоплює виконання дій, спрямованих на повернення критичних сервісів, процесів, даних і конфігурацій до функціонально допустимого стану. Конфігурація Γ_5 передбачає використання засобів резервування, відновлення, підтримання консистентності даних і контролю виконання. Перехід до наступного режиму здійснюється після перевірки фактичного стану ІСМП, виконання встановлених інваріантів та оновлення відомостей, що використовуються для подальшого керування.

Перехід між операційними режимами здійснюється за результатами оцінювання стану ІСМП, доступних ресурсів і параметрів зв'язності. Зміна режиму супроводжується формуванням відповідної конфігурації Γ_i , яка визначає склад залучених компонентів, виконуваних функцій, доступних даних, допустимих керувальних дій і чинних контрактів взаємодії. Відкладена дія після відновлення необхідних умов може бути

поновлена з урахуванням уже виконаної частини, якщо вона залишається допустимою; в іншому разі виконується її відхилення та повторний вибір керувальної дії.

4.6 Умови функціональної завершеності технологічного циклу та узгодженості взаємодії компонентів. Конфігурація Γ_i визначена для операційного режиму m_i відповідно до (9), вважається функціонально завершеною, якщо вона забезпечує виконання всіх обов'язкових функцій режиму, сумісне передавання результатів між компонентами та однозначну фіксацію стану кожної керувальної дії. Залучення всіх компонентів множини C для цього не є обов'язковим. Достатнім є такий склад C_i , за якого зберігається послідовність операцій від формування подання стану ІСМП до фіксації результату виконання дії.

Для оцінювання конфігурації Γ_i вводяться чотири булеві умови. Їх одночасне виконання визначається виразом:

$$H_i = H_i^{(1)} \wedge H_i^{(2)} \wedge H_i^{(3)} \wedge H_i^{(4)} = 1, \quad (10)$$

де $H_i^{(1)}$ – умова покриття обов'язкових функцій, $H_i^{(2)}$ – умова сумісності контрактів взаємодії, $H_i^{(3)}$ – умова збереження зв'язку між виявленим порушенням, обраною керувальною дією та результатом її виконання, $H_i^{(4)}$ – умова однозначної фіксації стану керувальної дії.

Покриття обов'язкових функцій означає, що для кожної функції, яка має виконуватися в режимі m_i , у складі конфігурації Γ_i наявний щонайменше один компонент і відповідний модельний, методичний або процедурний засіб її реалізації:

$$\forall f_k \in F_i \quad \exists c_j \in C_i \quad \exists r_\ell \in R: \quad (11)$$

$$r_\ell, c_j, f_k \in Q.$$

Умова (11) встановлює функціональну достатність складу C_i . Її невиконання означає, що для принаймні однієї обов'язкової функції режиму відсутній компонент або засіб її реалізації, а тому конфігурація не забезпечує завершення технологічного циклу.

Умова $H_i^{(2)}$ виконується, якщо для кожної послідовної пари взаємодій, контракти яких належать множині K_i , дотримано умови сумісності (7). Її невиконання унеможливилює використання результату попереднього компонента на наступному етапі технологічного циклу.

Умова $H_i^{(3)}$ передбачає збереження зв'язку між початковою подією, оціненим станом ІСМП, обраною керувальною дією та фактичним результатом її виконання. Такий зв'язок забезпечується спільним ідентифікатором відповідного циклу керування:

$$v(e) = v(x) = v(u) = v(y), \quad (12)$$

де e – початкова подія або виявлене порушення, x – оцінений стан ІСМП, u – обрана керувальна дія, y – фактичний результат її виконання, $v(\cdot)$ – ідентифікатор циклу керування.

Умова (12) дає змогу встановити, на підставі якого стану сформовано дію та до якої початкової події належить одержаний результат.

Умова $H_i^{(4)}$ виконується, якщо для кожної керувальної дії зафіксовано один із визначених станів:

$$s(u) = s_1, s_2, s_3, \quad (13)$$

де s_1 – підтверджене завершення, s_2 – контрольоване відкладення, s_3 – відхилення дії.

Стан s_3 означає припинення подальшого виконання обраної дії та необхідність формування іншої керувальної дії.

Одночасне виконання умов (10) означає, що конфігурація Γ_i охоплює обов'язкові функції режиму, забезпечує сумісне використання результатів компонентів, зберігає зв'язок між подією, керувальною дією та результатом її виконання, визначає стан кожної операції. За цих умов технологічний цикл є функціонально завершеним, а взаємодія компонентів – узгодженою.

У межах запропонованої архітектурно-функціональної організації умови (10)–(13) приймаються як достатні умови функціональної завершеності технологічного циклу.

4.7 Обговорення результатів. Запропонована архітектурно-функціональна організація визначає порядок спільного використання моделей, методів, критеріїв і процедур у складі інформаційної технології забезпечення живучості ІСМП. На відміну від рішень, орієнтованих на окремі задачі адаптації, резервування або відновлення, вона встановлює склад компонентів, розподіл функцій, правила передавання результатів, операційні режими та допустимі стани керувальних дій. Унаслідок цього результат кожного компонента має визначене місце у технологічному циклі та використовується відповідно до встановлених умов.

Відношення $Q(2)$ розмежовує функціональні компоненти технології та науково-методичні засоби реалізації їхніх функцій. Це дає змогу замінювати або уточнювати окремі моделі й методи без зміни загальної структури технології за умови збереження вимог до вхідних даних, результатів і умов застосування. Множина компонентів (3), множина основних функцій (4) та відображення (5) формують послідовність від подання стану ІСМП до фіксації результату керувальної дії. Зворотні потоки на рис. 2 забезпечують повторне оцінювання стану та використання оновлених відомостей у наступному циклі керування.

Контракти (6), умови сумісності (7) та конкретизація взаємодій у табл. 2 визначають, за яких умов результат одного компонента може бути використаний наступним. Перевіряються передумови використання, допустимий інтервал, достатність ресурсів і належність результату до відповідного циклу керування. За порушення цих умов результат формується повторно, а керувальна дія відкладається або відхиляється.

Множина режимів (8) і конфігурації Γ_i (9) дають змогу змінювати склад залучених компонентів, функцій, даних, керувальних дій і контрактів відповідно до стану ІСМП, ресурсного забезпечення та параметрів зв'язності. За деградації або втрати зв'язку зберігаються функції критичного ядра, локальне журналювання та можливість поновлення відкладених дій після відновлення необхідних умов.

Умови (10)–(13) формалізують критерії функціональної завершеності технологічного циклу: покриття обов'язкових функцій, сумісність контрактів, збереження зв'язку між подією, керувальною дією та результатом її виконання, однозначну фіксацію стану дії. Запропонована організація не усуває фізичних обмежень мобільної платформи й не гарантує виконання дій за недостатніх ресурсів. Її призначення полягає у визначенні допустимого порядку використання наявних засобів і запобіганні невизначеному стану технологічних операцій.

Одержані результати формують архітектурну основу інформаційної технології та визначають умови її функціонування в різних операційних режимах. Кількісне оцінювання результативності, ресурсних витрат і тривалості переходів між режимами є предметом подальших експериментальних досліджень.

Таким чином, уперше розроблено архітектурно-функціональну організацію інформаційної технології забезпечення живучості ІСМП, яка відрізняється від відомих поєднанням функціонального відображення моделей і методів у компоненти технології, узгодженням їх взаємодії на основі контрактів, зміною конфігурації залежно від операційного режиму та формальними умовами завершеності технологічного циклу, що забезпечує однозначну фіксацію стану керувальних дій за переривчастою зв'язністю й ресурсних обмежень.

5. Висновки і перспективи подальших досліджень

Розроблено архітектурно-функціональну організацію інформаційної технології забезпечення живучості ІСМП. Визначено склад її функціональних компонентів і встановлено відповідність між ними, моделями, методами, критеріями, процедурами та функціями забезпечення живучості. Запропоноване подання розмежовує функціональне призначення компонентів і засоби реалізації їхніх функцій, що дає змогу змінювати або уточнювати окремі моделі й методи без перебудови загальної структури технології.

Формалізовано інтерфейси та контракти взаємодії компонентів. Контракт ви-

значає склад передаваних даних і повідомлень, умови їх приймання та використання, властивості результату, допустимий інтервал його використання, потребу в ресурсах, ідентифікатори версії та циклу керування, порядок підтвердження оброблення. Сформульовано умови сумісності послідовних контрактів, за яких результат одного компонента може використовуватися наступним компонентом. Для керувальної дії передбачено три стани: підтверджене завершення, контрольоване відкладення та відхилення.

Визначено штатний, передкритичний, автономний, відновлювальний режими та режим керованої деградації. Для кожного режиму сформовано конфігурацію Γ_i , яка задає склад залучених компонентів, обов'язкових функцій, доступних даних і повідомлень, допустимих керувальних дій та контрактів взаємодії. Перехід між конфігураціями здійснюється за результатами оцінювання стану ІСМП, наявних ресурсів і параметрів зв'язності.

Побудовано контекстну IDEF0-діаграму А-0 та діаграму А0 декомпозиції основної функції інформаційної технології. Вони визначають межі технології, послідовність виконання функцій, входи, керувальні впливи, механізми, виходи та зворотні інформаційні потоки. Сформульовано умови покриття обов'язкових функцій, сумісності контрактів, збереження зв'язку між подією, керувальною дією і результатом її виконання, однозначної фіксації стану дії. Одночасне виконання цих умов визначає функціональну завершеність технологічного циклу та узгодженість взаємодії компонентів.

References

1. Fesenko, H., Illiashenko, O., Kharchenko, V., Kliushnikov, I., Morozova, O., Sachenko, A. & Skorobohatko, S. (2023), Flying Sensor and Edge Network-Based Advanced Air Mobility Systems: Reliability Analysis and Applications for Urban Monitoring, *Drones*, 7(7), article 409. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones7070409>.
2. Jacobsen, R.H., Matlekovic, L., Shi, L., Malle, N., Ayoub, N., Hageman, K., Hansen, S., Nyboe, F.F. and Ebeid, E. (2023), Design of an Autonomous Cooperative Drone Swarm for Inspections of Safety Critical Infrastructure, *Applied Sciences*, 13(3), article 1256. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13031256>.
3. Singh, R., Sukapuram, R. & Chakraborty, S. (2023), A Survey of Mobility-Aware Multi-Access Edge Computing: Challenges, Use Cases and Future Directions, *Ad Hoc Networks*, 140, article 103044. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2022.103044>.
4. Koukis, G., Safouri, K. & Tsaoussidis, V. (2024), All about Delay-Tolerant Networking (DTN) Contributions to Future Internet, *Future Internet*, 16(4), article 129. DOI: <https://doi.org/10.3390/fi16040129>.
5. Ergenç, D., Memedi, A., Fischer, M. & Dressler, F. (2025), Resilience in Edge Computing: Challenges and Concepts, *Foundations and Trends in Networking*, 14(4), pp. 254–340. DOI: <https://doi.org/10.1561/13000000074>.
6. Tkachov, V. & Ruban, I. (2025), Integral Survivability Metric of an Information System on a Mobile Platform under Functional Cascading and Secondary Failures, *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, 4(34), pp. 78–100. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.4.078>.
7. Massiani, P.-F., Heim, S., Solowjow, F. & Trimpe, S. (2023), Safe Value Functions, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 68(5), pp. 2743–2757. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAC.2022.3200948>.
8. Shaikh, S. & Jammal, M. (2024), Survey of Fault Management Techniques for Edge-Enabled Distributed Metaverse Applications, *Computer Networks*, 254, article 110803. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2024.110803>.
9. Zhu, L., Fu, X., Liu, X. & Du, S. (2025), Modeling and Analysis of Cascade Failures in Industrial Internet of Things Based on Task Decomposition and Service Communities, *Computers & Industrial Engineering*, 206, article 111177. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2025.111177>.
10. Tkachov, V. & Ruban, I. (2026), Development of a Predictive Adaptive Resource Reallocation Method with Critical Process Dispatching in Information Systems on Mobile Platforms, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(3(139)), pp. 6–23. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2026.350796>.
11. Alomari, Z., Zhani, M.F., Aloqaily, M. & Bouachir, O. (2023), On Ensuring Full Yet Cost-Efficient Survivability of Service

- Function Chains in NFV Environments, *Journal of Network and Systems Management*, 31, article 45. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10922-023-09734-3>.
12. Takdir, Kitagawa, H. & Amagasa, T. (2025), Local Recovery and Partial Snapshot in Distributed Stateful Stream Processing, *Knowledge and Information Systems*, 67, pp. 9407–9435. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10115-025-02509-z>.
 13. Boluda-Prieto, M., Mateo-Casali, M.A., Fraile, F. & Alarcón, F. (2026), Resilient Edge-to-Cloud Architecture with Self-Healing and Self-Correcting Mechanisms for Industrial Data Continuity, *Computers & Industrial Engineering*, 213, article 111795. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2025.111795>.
 14. Golpayegani, F., Chen, N., Afraz, N., Gyamfi, E., Malekjafarian, A., Schäfer, D. & Krupitzer, C. (2024), Adaptation in Edge Computing: A Review on Design Principles and Research Challenges, *ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems*, 19(3), Article 19, pp. 1–43. DOI: <https://doi.org/10.1145/3664200>.
 15. Nunes, J.P.K.S., Nejati, S., Sabetzadeh, M. & Nakagawa, E.Y. (2024), Self-Adaptive, Requirements-Driven Autoscaling of Microservices, in *Proceedings of the 19th International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems*. New York: Association for Computing Machinery, pp. 168–174. DOI: <https://doi.org/10.1145/3643915.3644094>.
 16. Moura, J. & Hutchison, D. (2022), Resilience Enhancement at Edge Cloud Systems, *IEEE Access*, 10, pp. 45190–45206. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3165744>.
 17. Shali, B.M., van der Schaft, A. & Besselink, B. (2023), Composition of Behavioural Assume–Guarantee Contracts, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 68(10), pp. 5991–6006. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAC.2022.3233290>.
 18. Kröger, J., Koopmann, B., Stierand, I. & Fränzle, M. (2024), Contract-Based Specification of Mode-Dependent Timing Behavior, *Innovations in Systems and Software Engineering*, 20, pp. 31–47. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11334-023-00531-4>.
 19. Loconte, D., Ieva, S., Pinto, A., Loseto, G., Scioscia, F. & Ruta, M. (2024), Expanding the Cloud-to-Edge Continuum to the IoT in Serverless Federated Learning, *Future Generation Computer Systems*, 155, pp. 447–462. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2024.02.024>.
 20. Roda-Sanchez, L., Garrido-Hidalgo, C., Royo, F., Maté-Gómez, J.L., Olivares, T. & Fernández-Caballero, A. (2023), Cloud–Edge Microservices Architecture and Service Orchestration: An Integral Solution for a Real-World Deployment Experience, *Internet of Things*, 22, Article 100777. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.100777>.
 21. Horbulin, V.P. & Dodonov, O.G. (2026), On the Survival of Automated Organizational Management Systems, *Electronic Modeling*, 48(2), pp. 24–50. DOI: <https://doi.org/10.15407/elmodel.48.02.024>.

Дата першого надходження до видання:

15.07.2026

Внутрішня рецензія отримана: 02.08.2026

Зовнішня рецензія отримана: 07.08.2026

Дата прийняття статті до друку: 10.08.2026

Дата публікації: 29.08.2026

Про авторів:

Ткачов Віталій Миколайович,

кандидат технічних наук, доцент,

докторант

Tkachov Vitalii

Candidate of Technical Sciences, Associate

Professor, Doctoral Candidate

ORCID: 0000-0002-6524-9937

Рубан Ігор Вікторович,

доктор технічних наук, професор

Ruban Ihor

Doctor of Technical Sciences, Professor

ORCID: 0000-0002-4738-3286

Місце роботи авторів:

Харківський національний університет

радіоелектроніки,

просп. Науки, 14, Харків, Україна, 61023

Kharkiv National University of Radio

Electronics

Nauky Ave., 14, Kharkiv, UA, 61023