

УДК 623.41.419

DOI: [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2021.2\(30\).73-84](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2021.2(30).73-84)

А. Б. СКОРИК, кандидат технічних наук, доцент
<https://orcid.org/0000-0002-4327-8796>

М. А. ПАВЛЕНКО, доктор технічних наук
професор

<https://orcid.org/0000-0003-3216-1864>

А. В. ТРИСТАН, доктор технічних наук, старший науковий співробітник

<https://orcid.org/0000-0002-2137-5712>

Є. В. МОРГУН

<https://orcid.org/0000-0003-0591-5608>

О. О. ЗВЕРЄВ, кандидат технічних наук, доцент
<https://orcid.org/0000-0003-2274-3115>

(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)

МЕТОД ПРОСТОРОВО- ЧАСОВОГО СИНТЕЗУ СТРУКТУРИ ДАТА-ЦЕНТРИЧНОЇ ЗРС

У статті розглядаються питання просторово-часового синтезу структури дата-центричної ЗРС під час ведення протиповітряного бою у реальному масштабі часу. Аналізуються особливості побудови загальної архітектури дата-центричних систем-систем, розрізнення фізичного і кібернетичного простору існування ЗРС. Приведена загальна схема формування структури ЗРС і схема методу синтезу комплексної моделі функціонування засобів ЗРС в складі контуру наведення ЗКР. Розглянуті питання обліку обмежень просторово-часового синтезу структури ЗРС з урахуванням можливої деградації фізичної топології.

Ключові слова: метаморфізм, система-систем, теорія дата-центричних операцій, просторово-часовий синтез, теорія категорій, поліедральний аналіз.

ВСТУП

Розвиток мережевих технологій призвів до формування понять фізичної та логічної топології. Фізична топологія – це структура зв'язку фізичних пристроїв в мережі. Логічна топологія – це шлях, яким будуть йти пакети даних у фізичній топології. Згідно моделі OSI/ISO в рамках цих двох топологій виділяються сім рівнів, приведених на рис. 1 [1]. Розвиток мереж призвів до появи спочатку мереже-центричних, а пізніше дата-центричних систем-систем (SoS, system of systems) і розвитку теорії дата-центричної операції (DCO, Data-Centric Operations) [2 – 4]. Локусом або простором існування дата-центричних SoS стає мережа. Це призводить до структурної мінливості таких систем – метаморфізму [2]. Для випадку ведення протиповітряного бою метаморфізм дата-центричних ЗРС проявляється в тому, що при порівнянні інформованості повітряно-космічних сил противника і ЗРС, перші мають значно більші маневрені можливості, другі, маючи значно меншу рухливість, парують цю здатність противника, здійснюючи маневр вогнем, для чого відповідно до циклу стрільби (циклу Бойда) постійно перебудовують свою просторово-часову структуру. У зв'язку з чим питання розробки методу адаптивного просторово-часового синтезу структури дата-центричної ЗРС є актуальним.

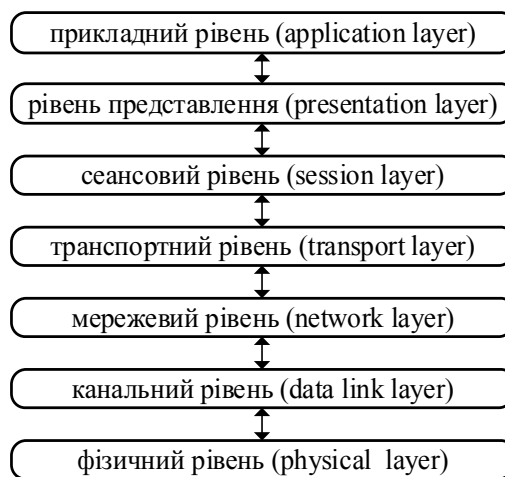


Рис. 1. Модель мережевих протоколів OSI/ISO

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Основи теорії дата-центричних операцій розглянуті в роботах [1 – 4]. Використання сучасних методів моделювання орієнтованої системної інженерії (model based systems engineering, MBSE) при синтезі систем ОВТ описано в роботі [5]. У роботах [6 – 10] розглянуто вплив сучасних мережевих технологій на архітектуру SoS. Структурно-функціональний опис ЗРС і особливості побудови сучасних організаційно-технічних систем ОВТ розглянуті в роботах [11 – 14].

Метою статті є розвиток теорії дата-центричних операцій на основі розробки методу адаптивного просторово-часового синтезу структури дата-центричної ЗРС.

ОПИС ЗАГАЛЬНОЇ АРХІТЕКТУРИ ДАТА-ЦЕНТРИЧНОЇ СИСТЕМИ-СИСТЕМ

Однією з найважливіших відмінностей дата-центричних SoS від C4ISR-систем є те, що оперування здійснюється не тільки інформацією, але й ресурсами [3]. Інтероперабельність (interoperability) дата-центричних SoS полягає в можливості спільного використання інформації та ресурсів компонентами розподіленої системи. При цьому потрібно виділяти три аспекти інтеграції систем у склад SoS:

- інфраструктурна інтеграція характерна для тісно пов'язаних на фізичному рівні систем. Може потребувати використання одного і того ж обладнання, інформаційних ресурсів та загального програмного забезпечення;

- інтеграція інформації, що необхідна для реалізації обміну даними, як правило, базується на використанні єдиної онтологічної моделі;

- інтеграція процесів передбачає, що базові системи, з яких створюється система-систем, не є взаємозалежними (вільні системи) і часто покладаються на гнучке представлення інформації (наприклад, інтернет-браузери) і забезпечують підтримку спільної роботи, робочого процесу (workflow).

У зв'язку з цим побудова архітектури дата-центричних SoS має цілий ряд особливостей (рис. 2). Перш за все необхідно розрізнити фізичний і кібернетичний простір.

Фізичний простір – це 4D-простір існування реальних об'єктів, які поділяються на рівні користувачів і рівні базових елементів системи (БЕЛС), що на фізичному рівні і складають основу побудови SoS.

Кібер-простір – це частина інформаційного простору, що залежить від фізичних доменів, у яких проводиться операція [6].

Для дата-центричних SoS (DSoS) фізична топологія мережі у першу чергу будується, виходячи з рівня (тактичного або оперативного) побудови хмари даних і особливостей її організації (цільової або загального призначення). Крім того, на рівні фізичної топології реалізується “сильна” взаємодія, або “тісне” зв'язування. Тісне зв'язування БЕЛС реалізується при критичних вимогах до швидкодії та синхронізації роботи БЕЛС у складі SoS.

Логічний рівень мережі (логічна топологія) містить розглянуті вище (рис. 1) рівні інкапсуляції і декапсуляції даних. Системи на кожному з рівнів “знають” тільки про існування верхнього і нижнього рівнів, які для них стають “середовищем”. Кожен рівень відділений від іншого рівня визначеним інтерфейсом. Реалізації нижчих рівнів тим самим можуть бути змінені так,

що цільова система цього не помітить. Представлення систем, що входять у склад SoS як БЕЛС, приводить до інкапсуляції функцій і маскуванню особливостей побудови окремих систем.

На прикладному рівні сервісів SoS створюється механізм доступу до можливостей [4], який реалізується за допомогою трьох типів сервісів.

Перший тип сервісу базується на використанні сервіс-орієнтованої архітектури (SOA, Service Oriented Architecture) і реалізується на рівні логічної топології. Для нього характерне те, що користувач “віддає” усі питання реалізації визначеної можливості виконавцю. Функціонал виконання сервісу замаскований від користувача. Зв'язки, що відносяться до логічної топології, слід віднести до категорії “слабких” (loose coupling). В архітектурі SOA [7] функціональність організовується як набір модульних повторно використовуваних загальних сервісів. Ці сервіси мають чітко визначені інтерфейси, що інкапсулюють ключові правила доступу до них. Вони також будуються без будь-яких припущень про те, хто буде використовувати ці сервіси. Таким чином, вони слабо пов'язані зі споживачами. Архітектура SOA залежить від протоколів взаємодії, які за своєю природою є повільними. Такі зв'язки не завжди забезпечують необхідний рівень швидкодії та часової синхронізації.

У багатьох випадках (наприклад, при організації систем рознесеної радіолокації) перевагу має встановлення “сильного” зв'язку між окремими системами на фізичному рівні, що і характеризує реалізацію другого типу сервісів. Другий тип сервісів можна розглядати як набір взаємопов'язаних функцій, що реалізуються на фізичному рівні дата-центричних SoS. Для нього характерне те, що користувач має безпосередній доступ до управління функціоналом окремих систем на фізичному рівні.

Третій тип сервісу базується на використанні архітектури IoBT (Internet of Battlefield Things) [8, 9]. Цей тип сервісу передбачає можливість користувача управляти функціоналом і доступністю сервісу окремих систем на рівні логічної топології мережі.

Таким чином, структурні і функціональні зв'язки дата-центричної SoS визначаються на рівні сервісів системи-систем (рис. 2), який, у свою чергу, визначає можливі дії DSoS у рамках виконання дата-центричної операції (операційний рівень). При цьому слід відзначити, що при синтезі структури DsoS у цілому ряді випадків потрібна корекція фізичної топології системи-систем (особливо це актуально в умовах радіоелектронного подавлення і вогневого впливу противника). Необхідність такої корекції визначається на операційному рівні DSoS.

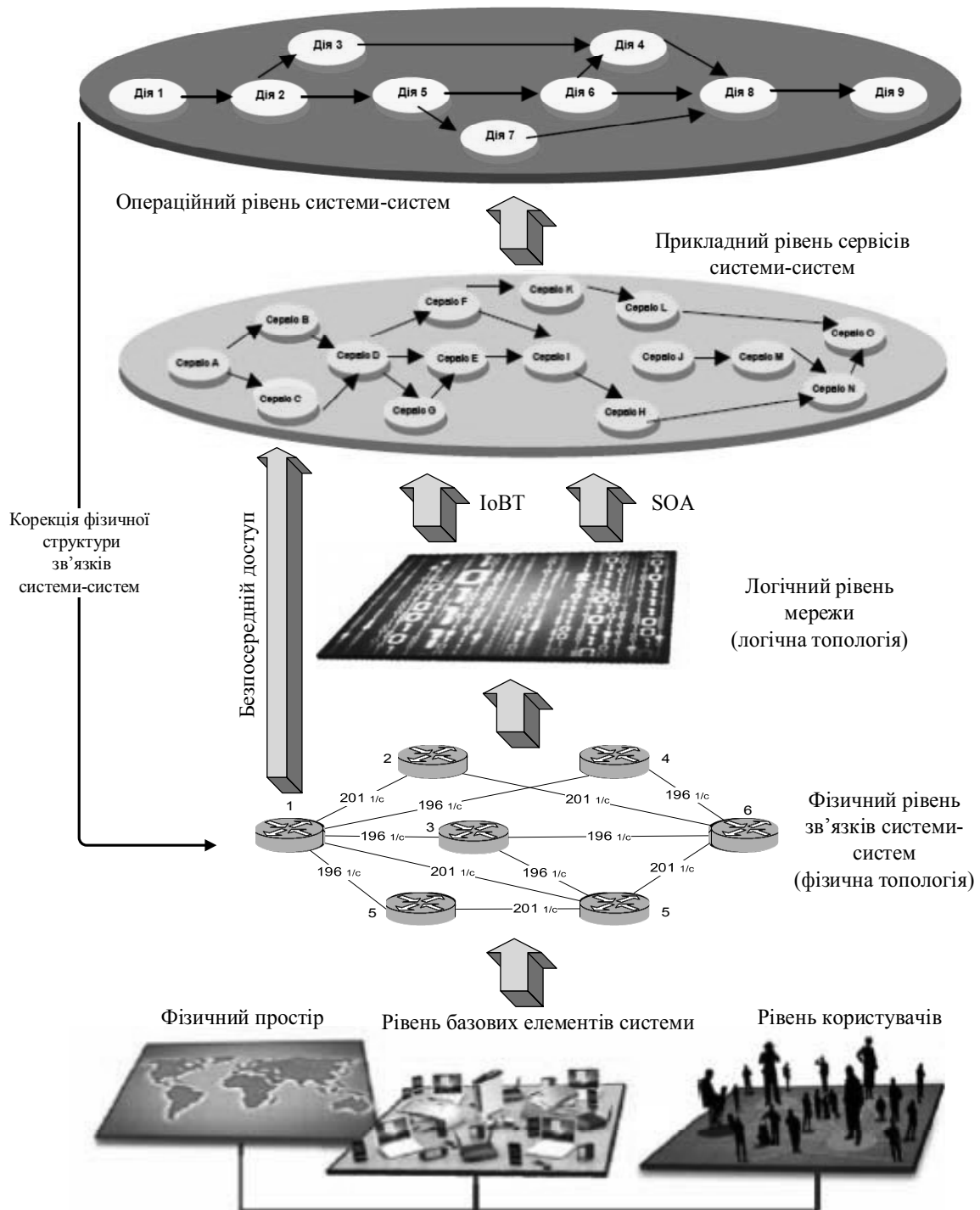


Рис. 2. Загальна архітектура дата-центричної системи-систем. Джерело: розроблено авторами

ЗАГАЛЬНА СХЕМА ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОГО СИНТЕЗУ СТРУКТУРИ ДАТА-ЦЕНТРИЧНОЇ ЗРП

Синтез – це процес породження функцій, структури і параметрів системи за заданими її властивостями, необхідними і достатніми для отримання певних результатів [10]. Динамічний синтез структури системи – це процес, направлений на зміну властивостей системи під час її функціонування і здійснюваний у реальному масштабі часу.

У формалізованій задачі просторово-часового динамічного синтезу структури дата-центричної ЗРП виділяються P – множина можливих способів стрільби ЗКР,

ADS – множина систем ЗРП та систем операційного оточення, що можуть бути задіяні у контурі наведення ЗКР, F – множина функцій, які виконуються системами ЗРП. Елементи множини F відображаються на елементи множини ADS . Це відображення характеризують деяким оператором [10]:

$$H: ADS = H(F).$$

Для конкретних умов стрільби визначається певний набір способів стрільби Π :

$$\Pi \in P. \quad (1)$$

Сукупності способів стрільби Π відповідає деяка множина функцій $F(\Pi)$, необхідна для їх реалізації (рис. 3).

Синтез структури ЗРС здійснюється шляхом вибору деякого способу стрільби, формування моделі контуру наведення і породження структури систем ОВТ, яка у сукупності забезпечує реалізацію необхідних для стрільби функцій:

$$f \in F(\Pi_i). \quad (2)$$

Множина систем ОВТ C , здатних реалізувати обраний спосіб стрільби:

$$C \in ADS. \quad (3)$$

Таким чином, динамічний синтез структури ЗРС полягає у визначенні у реальному масштабі часу оптимального відображення елементів множини, необхідних для стрільби функцій, на множини взаємопов'язаних систем в рамках реалізації вибраного способу стрільби:

$$[C \in ADS] = H[f \in F(\Pi_i)]. \quad (4)$$

Слід вказати, що одна ж та сама функція у різних системах ОВТ може мати різну технічну реалізацію, наприклад, функція супроводження цілі f_j в системі ОВТ C_1 може бути реалізована за допомогою РЛС, а в системі ОВТ C_2 реалізована з використанням оптико-електронної системи. Для уникнення неоднозначного тлумачення, будемо використовувати поняття структури класів і структури об'єктів, які разом утворюють архітектуру системи. Причому класом вважаємо достатньо абстрактне сховище знань про конкретну систему ОВТ, назва якої співпадає з назвою класу. Класи утворюють структурну ієрархію типу «бути частиною». Далі, функції, описані в класі, можуть бути реалізовані за допомогою множини різних варіантів технічної реалізації. Об'єкти породжуються класами і являють собою реалізацію будь-якого варіанту структури, що забезпечує виконання заданих функцій. При синтезі на початкових етапах визначаються класи задіяних систем ОВТ, які далі замінюються об'єктами – системами ОВТ.

Теоретико-множинний опис кластер-системи ЗРС як системи-систем представляється у вигляді кортежу:

$$SoS = \{C, R, Q_{\tilde{n}}, X, Y, T\}, \quad (5)$$

де $R, Q_{\tilde{n}}$ – відношення на множині систем C і властивості окремих систем ОВТ; X, Y – множина вхідних впливів і множина вихідних результатів; T – час.

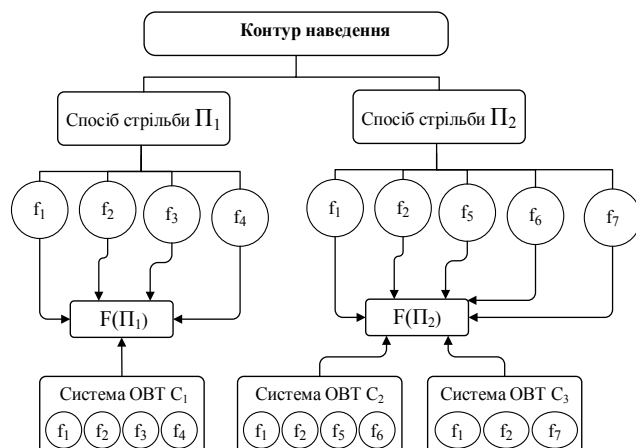


Рис. 3. Загальна схема формування структури ЗРС

Відображення $R : C \times C \rightarrow C$ є бієктивним, а множини R можна розглядати як групу перестановок. Можна відмітити, що відношення R на кінцевій множині елементів C задає динамічно сформовану на момент часу T структуру кластер-системи контуру наведення. Щоб мати повне уявлення про систему-систем, необхідно знати стан кожної з систем $c_i \in C$, її зв'язки у структурі системи-систем SoS і принципи взаємодії з іншими системами.

Для опису класу будемо використовувати поліхроматичну множини, в якій представляються не тільки склади абстрактних елементів, а й склади властивостей множини і її елементів [11]. Для опису того факту, що системи ОВТ (об'єкти) є елементами множини, можна використовувати запис:

$$NKS = R \{c_1, c_2, \dots, c_n\}. \quad (6)$$

Теоретико-множинне відношення R встановлює, що системи c_i належать класу NKS (navigation cluster-system) – «кластер система наведення». Слід розуміти, що властивості будь-якого об'єкта – це його поведінка у зовнішньому середовищі, зміни, здійснювані об'єктом у навколишньому середовищі. Таким чином, множини вихідних результатів Y можна розглядати як системні властивості об'єкта. Властивості об'єктів, що використовуються при синтезі, поділяються на функції і сервіси. Сервіси – це функції, які можуть надаватися в рамках запиту зовнішніх систем. Множина сервісів AS (array of services) належить до множини системних функцій ASF (array of system functions), які у свою чергу належать множині властивостей AP (array of properties):

$$AS \subset ASF \subset AP.$$

Власними називаються персональні властивості системи c_i , що існують незалежно від наявності або відсутності взаємозв'язку даної системи з будь-якими іншими системами.

Системно-системними (унітарними) називаються властивості, існування яких взаємопов'язане з існуванням властивостей інших систем зі складу SoS [11].

При синтезі кластер-системи наведення важливо враховувати зв'язки, які динамічно створюються між окремими системами ЗРС, системами операційного оточення та навколишнім середовищем. При цьому розрізняють множини об'єктів $ANKSO$ (array of navigation cluster-system objects), які і створюють кластер-систему наведення і клас об'єктів, що описують навколишнє середовище AEO (array of environmental objects). Клас AEO , як і розглянуті вище класи, може бути представлений як множина об'єктів, що мають відповідні властивості. Окремо будемо розглядати ЗРС, як систему з незмінною структурою:

$$AM = R_m \{m_1, m_2, \dots, m_k\}, \quad (7)$$

де R_m означає, що між об'єктами множини $\{m_1, m_2, \dots, m_k\}$ існує теоретико-множинне відношення, наявність якого дозволяє розглядати ці об'єкти як елементи, що належать класу AM (array of missile) – «зенітна керована ракета».

Операція системної декомпозиції ЗРС і систем операційного оточення передбачає визначення множини

систем ОВТ, з якими взаємодіє ракета, інкапсуляцію їх у класі ANKSO (array of navigation cluster-system objects). Системна декомпозиція ЗРС і систем операційного оточення призводить до того, що виділяється множина, яка складається з окремих компонент – одиниць озброєння та військової техніки (ОВТ):

$$C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}. \quad (8)$$

Функціональна декомпозиція здійснюється так. Для кожної з одиниць техніки можна визначити множину її сервісних функцій:

$$AS(S_i) = \{AS_{i1}, AS_{i2}, \dots, AS_{im}\}. \quad (9)$$

Наступні дії щодо синтезу структури ЗРС зручно проводити з використанням теорії категорій, в якій визначаються об'єкти, роблячи акцент не на описі їх внутрішньої реалізації, а на описі їх зовнішнього поведіння, взаємодії з іншими об'єктами. З інженерної точки зору, категорія – це все, що завгодно, для чого визначені: клас об'єктів, клас морфізмів (стрілок) між об'єктами. Причому, для кожного об'єкта існує тотожний морфізм), операція композиції морфізма, яка є асоціативною:

$$(h \bullet g) \bullet f = h \bullet (g \bullet f),$$

для якої тотожні морфізми є нейтральними елементами:

$$f \bullet id_A = id_B \bullet f = f.$$

Для формування певної категорії необхідно: визначити весь спектр об'єктів і морфізмів цієї категорії; врахувати тотожні морфізми; визначити, що представляє собою операція композиції морфізма; довести, що композиція володіє необхідними властивостями.

При визначенні систем ОВТ, що можуть входити до складу контуру наведення, згідно з 4D-екстенціональним підходом до опису операції здійснюваної ЗРС [3, 4], необхідно визначити сукупність систем ОВТ у 3D-просторі, які є вільними і можуть бути задіяні в контурі наведення у проміжок часу, що відводиться на проведення операції стрільби ЗКР. Схема виконання операції системної декомпозиції ЗРС приведена на рис. 4. При цьому розглядаються три об'єкти:

1) системи ОВТ C , що входять до складу ЗРС (на рис. 4, кількість систем $n = 5$);

2) $A = \{1,2\}$ – наявність просторової можливості використання системи ОВТ у контурі наведення.

Спочатку відсіюються методом виключення системи ОВТ, які не попадають в зону прикриття об'єкту (1 – можливість не існує), об'єкти, що залишилися, утворюють групу 2 – можливість існує;

3) $B = \{a,b\}$ – наявність часової можливості використання системи ОВТ у контурі наведення. Спочатку виключаються вже задіяні системи ОВТ: a – можливість не існує, а потім формується група ОВТ за ознакою: b – можливість існує. Результатом є $A \times B$ – добуток об'єктів категорії множин. Відомо, що добуток об'єктів X_j – це об'єкт X і морфізм:

$$\pi_j: X \rightarrow X_j,$$

звані канонічними проєкціями, такі, що для будь-якого об'єкта Y і морфізма:

$$f_j: Y \rightarrow X_j,$$

існує єдиний морфізм:

$$u: Y \rightarrow X,$$

такий, що:

$$\pi_j \circ u = f_j.$$

Для розглянутого випадку морфізм:

$$f_1: C \rightarrow A$$

описує результат формування структури контуру наведення, виходячи з методики f_1 просторової оцінки засобів ЗРС. Аналогічно морфізм:

$$f_2: C \rightarrow B$$

описує результат формування структури контуру наведення, виходячи з методики f_2 , часової оцінки задіяння засобів ЗРС.

Результат $A \times B$, наведений на рис. 4, показує, що четверта і п'ята системи ОВТ можуть бути задіяні у контурі наведення ЗКР. Таким чином, формується сукупність систем, що входять до кластеру наведення ЗРС класу $ANKSO = (C_p, C_s)$.

Підкреслимо, що для систем C і класу $ANKSO$, як правило, вказується не тільки можливість (або неможливість) інтеграції C до $ANKSO$, але і сукупність всіх способів інтеграції, яка породжує множину морфізмів $Mor(C, ANKSO)$. Композиція морфізмів відповідає багатокроковим діям (процесам), причому їх результат не залежить від порядку простеження кроків (властивість асоціативності).

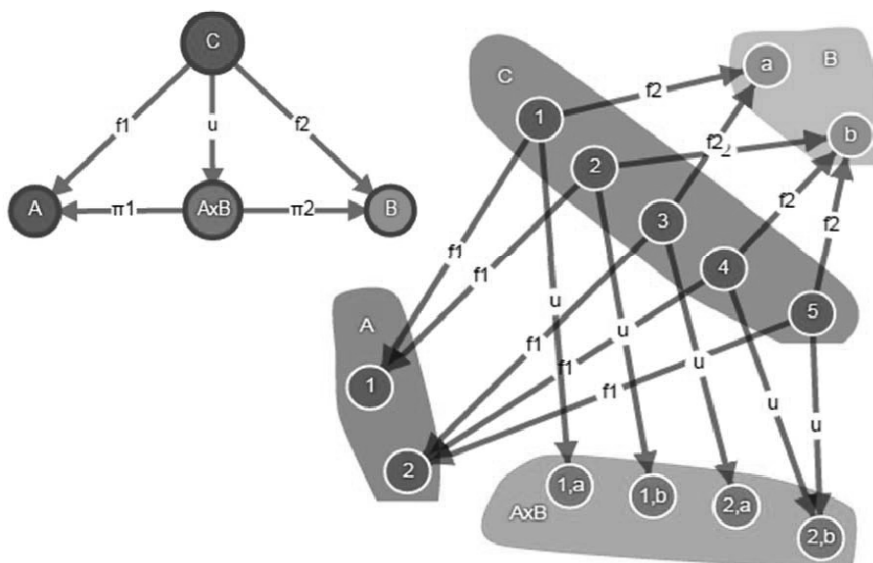


Рис. 4. Схема виконання операції системної декомпозиції ЗРС

Системна декомпозиція ЗРК і виділення з її складу ЗКР передбачає визначення типу ракет, які можуть бути використані при стрільбі і інкапсуляції їх у класі *AM*. Взаємозв'язок між системними функціями зразка ОВТ і множиною вхідних впливів X_m ракети можна представити матрицею бінарних співвідношень:

$$\|c_{j(k)}\| = [FS(A_i) \times X_m] = \begin{bmatrix} c_{1(1)} & \dots & c_{1(k)} & \dots & c_{1(m)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{j(1)} & \dots & c_{j(k)} & \dots & c_{j(m)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{m(1)} & \dots & c_{m(k)} & \dots & c_{m(l)} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$c_{j(k)} = \begin{cases} 1, & \langle AS_{ik}, x_j \rangle \in R^s \\ 0, & \langle AS_{ik}, x_j \rangle \notin R^s \end{cases}$$

В залежності від вибраного способу стрільби і типу ЗКР можна визначити множину вхідних впливів XM на ЗКР:

$$XM = \{x_1, x_2, \dots, x_l\}. \quad (11)$$

При виконанні умови $\exists \langle AS_{ik}, x_j \rangle \in R^s$ – наявності відношень між хоча б однією сервісною функцією зразка ОВТ і вхідним впливом для ЗКР, даний зразок ОВТ входить в контур наведення ЗКР. Функціональна декомпозиція задачі моделювання ЗКР забезпечує формування множини системних функцій SF_{am} , які описують поведінку ЗКР у зовнішньому середовищі:

$$SF_{am} = \{f_{s1}, f_{s1}, \dots, f_{sm}\}. \quad (12)$$

Функціональна декомпозиція проводиться шляхом описання етапів польоту ракети і формування вектору вихідних параметрів. Операції синтезу структури контуру наведення добре відображаються з використанням

декартового квадрату морфізма (розширований добуток), приведеного на рис. 5. Декартів квадрат морфізмів:

$$f: F \rightarrow Z, \quad g: C \rightarrow Z,$$

це – об'єкт P і морфізми:

$$p: P \rightarrow F, \quad q: P \rightarrow C,$$

такі що: $f \circ p = g \circ q$.

Тобто для будь-якого об'єкта Q і морфізмів:

$$m: Q \rightarrow F, \quad n: Q \rightarrow C,$$

якщо: $f \circ m = g \circ n$, існує унікальний морфізм:

$$u: Q \rightarrow P,$$

такий, що: $p \circ u = m, \quad q \circ u = n$.

Декартів квадрат обчислюється наступним чином. Спочатку отримуємо добуток об'єктів F і C , а потім виконуємо порівняння для двох паралельних морфізмів:

$$f \circ \pi_1, \quad g \circ \pi_2.$$

Об'єкт порівняння – це і є об'єкт P декартового квадрата. Морфізми p і q обчислюється, як:

$$\pi_1 \circ eq = p, \quad \pi_2 \circ eq = q.$$

З рис. 5 видно, що множина P , за допомогою якої задається спосіб стрільби, містить пари елементів з множин C (системи) і F (функції), але не всі можливі пари «система/функція», а тільки такі, складові елементи яких є функціями f і g і відображаються на одні й ті ж елементи множини Z . При цьому елементи множини Z демонструють наявність власних і появу унітарних функцій. Так на рис. 5 елемент $a \in Z$ є кодомом (codom a) для системи C_1 і функцій f_1, f_2 , що вказує на те, що ці функції є власними для цієї системи. Елементи $\{b, c\} \in Z$ є кодами відповідно для систем C_2, C_3 і функції f_3 , та систем C_4, C_5 і функції f_4 , що вказує на унітарний характер утворення цих функцій, відсутніх окремо у кожній з систем.

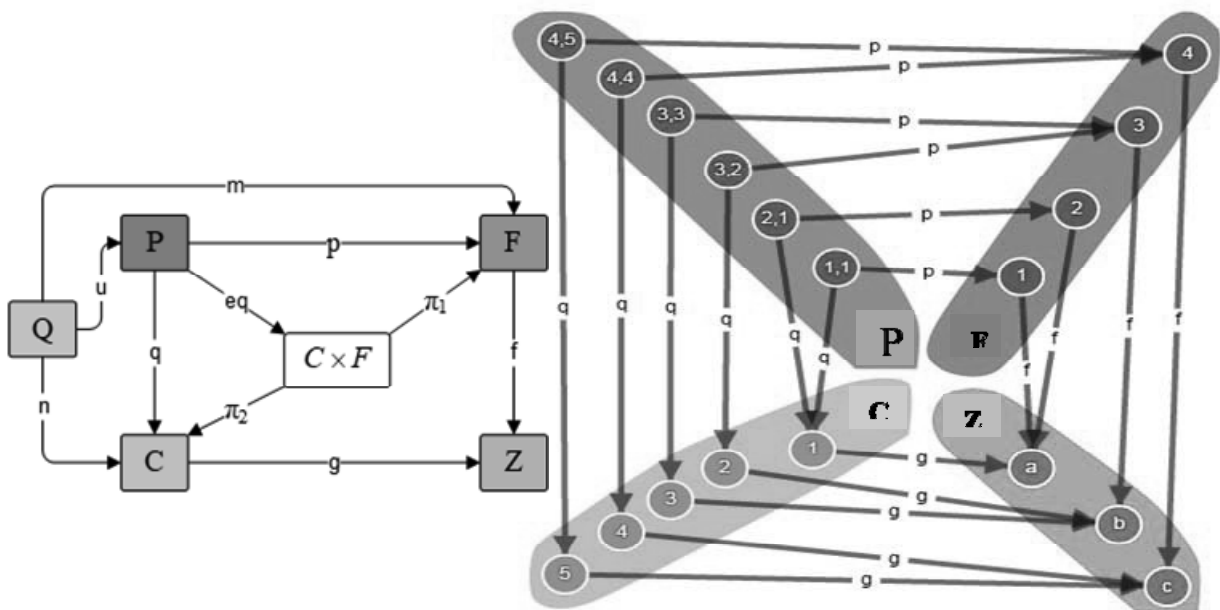


Рис. 5. Операція синтезу структури контуру наведення з використанням декартового квадрату морфізма

Результатом синтезу контуру наведення ЗКР є об'єкт Q , який для заданого способу стрільби задає перелік базових елементів дата-центричної ЗРС і структуру інформаційних зв'язків, що забезпечують реалізацію необхідних для здійснення стрільби сервісних функцій (рис. 2).

Загальна архітектура дата-центричної ЗРС (рис. 2) передбачає, що інформаційні потоки не прив'язані до конкретних абонентів, а функціональні зв'язки не обмежуються структурою зв'язків на рівні фізичної топології. Тому в дата-центричній ЗРС виникає задача розподілу прав доступу абонентів до тієї чи іншої інформації. З використанням специфікації Data Distribution Service (DDS) формується DDS-домен спільного доступу до інформаційних потоків (рис. 6).

Згідно із специфікацією DDS, кожен з абонентів мережі може бути одночасно підписаний на велику кількість різних тем, при цьому організація відповідних DDS-доменів призводить до формування в складі ЗРС

як системи-систем тимчасових тактичних кластерів, які за призначенням розділяються на дві групи: тактичні розвідувально-інформаційні кластери (ТРИК), що вирішують завдання інформаційної підтримки функціонування ЗРС, та тактичні вогневі інформаційні кластери (ТВІК), що вирішують завдання управління стрільбою ЗКР. Разом кластери ТРИК і ТВІК утворюють кластер-систему контуру наведення.

Динамічний синтез структури ЗРС повинен здійснюватися згідно з сучасними підходами моделювання системної інженерії [5], що передбачає необхідність формування комплексної моделі функціонування засобів ЗРС в складі кластер-системи контуру наведення ЗКР (рис. 7). Особливість використання комплексної моделі (рис. 7) полягає у тому, що більшість складових елементів розробляються завчасно, але представлення їх як структури класів забезпечує можливість легкої модифікації комплексної моделі при задіянні (приєднанні до ЗРС) нових зразків ОБТ.

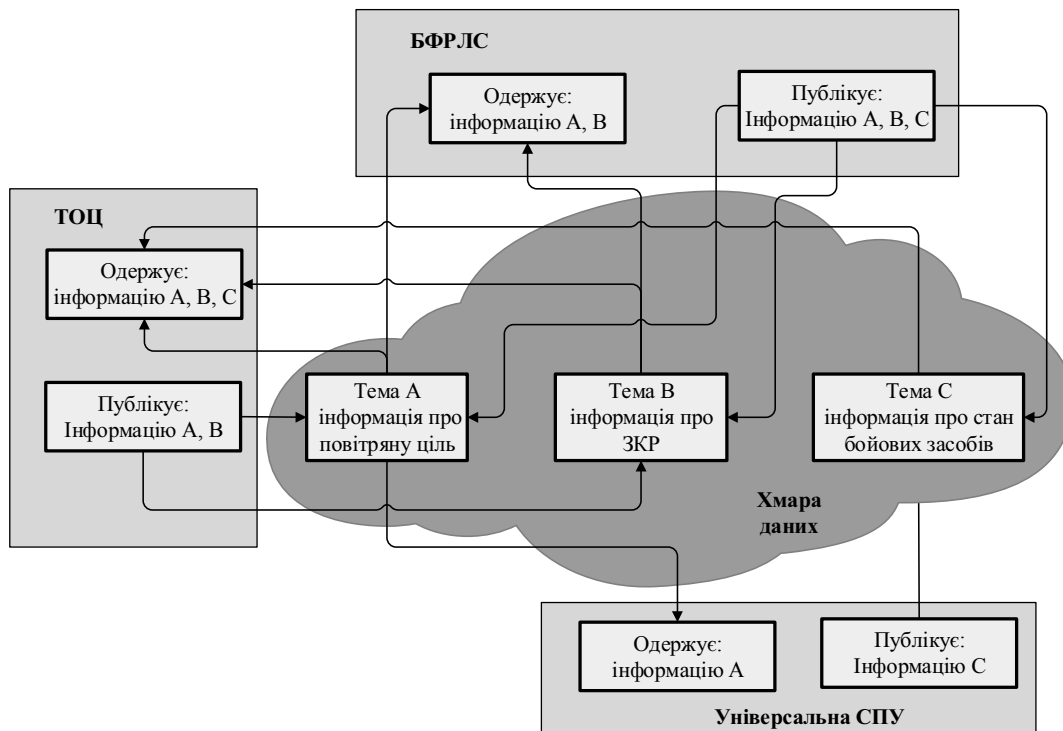


Рис. 6. Загальний принцип роботи DDS-домену

ОБМЕЖЕННЯ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОГО СИНТЕЗУ СТРУКТУРИ ДАТА-ЦЕНТРИЧНОЇ ЗРС З УРАХУВАННЯМ ДЕГРАДАЦІЇ ФІЗИЧНОЇ ТОПОЛОГІЇ

В процесі ведення протиповітряного бою ЗРС відбуваються два взаємо-протилежні процеси. Перший процес – це оптимізація фізичної топології тактичної мережі ЗРС згідно з вимогами операційного рівня SoS. Другий процес – це деградація фізичної топології мережі внаслідок дій противника.

Процес оптимізації фізичної топології повинен підтримувати можливості інформаційного обміну з системами, функціональність яких критична для виконуваних завдань. Подібна задача розглядалася в [12] з використанням полієдрального аналізу. Для дата-центричних

ЗРС розглянута в роботі [12] методика має деякі особливості. Ці особливості пов'язані з тим, що система сервісів в більшій мірі залежить від логічної топології мережі. Це призводить до того, що спочатку повинна аналізуватися структура сервісів системи, виділятися критичні сервіси, а потім аналізуватися деградація системи на фізичному рівні і можливості щодо підтримки інформаційного обміну з цими системами.

Для коректного здійснення переходу від структури сервісів до її симпліціального подання, необхідно задати множину вершин симпліціального комплексу та визначити відношення або правило, відповідно до якого вихідна множина вершин буде розбита на множину непустих підмножин, які перетинаються – симплекси [12].

На рис. 8 стрілками позначені зв'язки окремих сервісів при виконанні операції. Вважаємо, що λ відзначатиметься відношенням «на реалізацію сервісу впливає пов'язаний з ним сервіс» і задається на множині сервісів системи-систем: (13)

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_{10}\}. \quad (13)$$

Множині сервісів X буде відповідати множина вершин Y , кожна з яких описує конкретний вузол структури сервісів з позиції інших сервісів, що знаходяться з ними в заданому відношенні. Кожне відношення між двома кінцевими множинами X і Y є підмножиною декартового добутку, що дозволяє записати: $\lambda \in X \times Y$. Відношення зручно подати матрицею інцидентності

[12]: $\Lambda = [\lambda_{ij}]$, де $\lambda_{ij} = 1$, якщо $(x_i, y_j) \in \lambda$, інакше $\lambda_{ij} = 0$. Можна записати, що:

$$s(x_i) = \{x_j \in Y : (x_i, x_j) \in \lambda\}. \quad (14)$$

Для прикладу наведеного на рис. 6 та обраного відношення λ , маємо таку множину симплексів:

$$\begin{aligned} s(x_1) &= s(x_2) = \{\emptyset\}; s(x_3) = \{x_1\}; s(x_4) = \{x_1, x_2, x_5\}; \\ s(x_5) &= \{x_2, x_8\}; s(x_6) = \{x_3, x_7, x_{10}\}; s(x_7) = \{x_1, x_3, x_5\}; \\ s(x_8) &= \{x_4\}; s(x_9) = \{x_6, x_8\}; s(x_{10}) = \{x_7, x_8\}. \end{aligned}$$

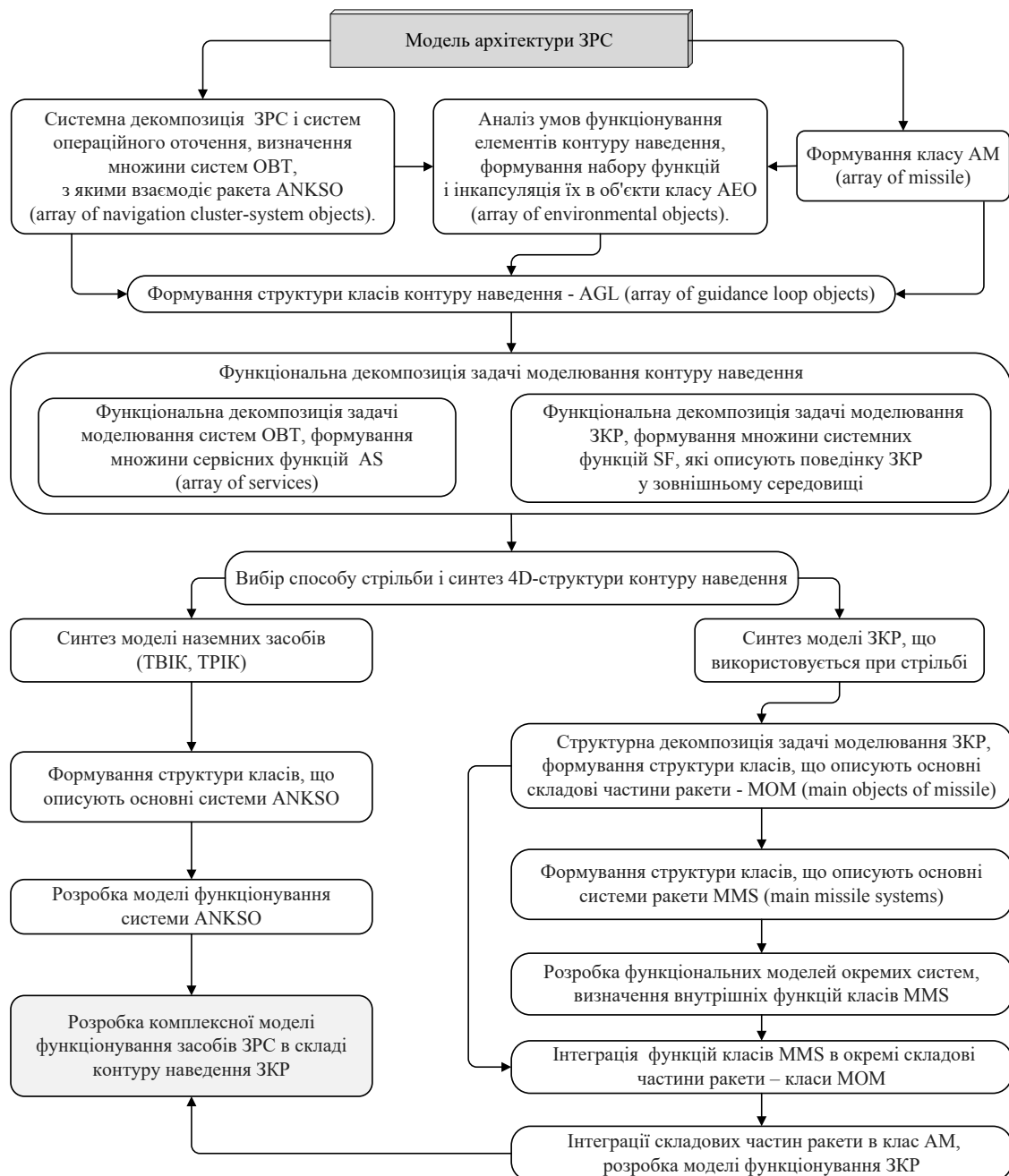


Рис. 7. Загальна структурна схема синтезу комплексної моделі функціонування засобів ЗРК в складі кластер-системи контуру наведення ЗРК

Набір усіх наведених симплексів задає симпліціальний комплекс $K_X(Y, \lambda)$, що може бути поданий за допомогою матриці інцидентності:

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}
$\sigma(x_3)$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\sigma(x_4)$	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
$\sigma(x_5)$	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
$\lambda = \sigma(x_6)$	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1
$\sigma(x_7)$	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0
$\sigma(x_8)$	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
$\sigma(x_9)$	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
$\sigma(x_{10})$	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0

У симпліціальній моделі кожному сервісу ставиться у відповідність симплекс, який характеризує його з точки зору зв'язку з іншими сервісами. Отже, це дозволяє вирішувати завдання визначення важливості сервісів для забезпечення стійкості функціонування всієї SoS та досягнення нею мети. Для прикладу: сервіс щодо розпізнавання типу цілі значно менше пов'язаний з іншими сервісами, ніж сервіс по визначенню координат цілі.

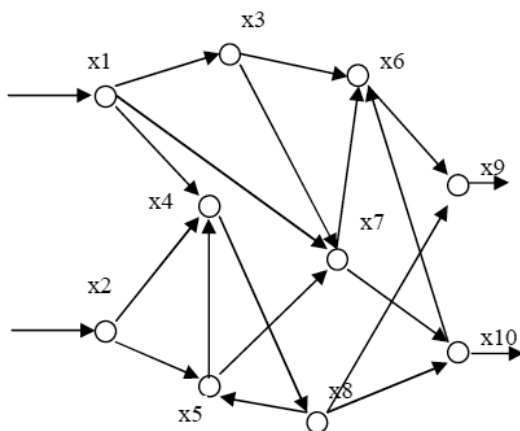


Рис. 8. Графова структура сервісів системи-систем

Відносну важливість окремого симплекса в комплексі відображає показник ексцентриситету, який дозволяє оцінити щільність вкладення кожного симплекса до комплексу, і тим самим характеризує локальні особливості структури. Формула для обчислення ексцентриситету має вигляд [12]:

$$ecc(s^k) = 1 - \frac{card(s^k) - card(v^k)}{(n^k + 1) \cdot card(s^k)}, \quad (15)$$

де $card(s^k)$ – кількість елементів, що утворюють симплекс s^k , n^k – кількість симплексів у комплексі, що мають $card(v^k)$ загальних вершин з комплексом s^k .

Формула (15) досить повно враховує властивості симплексу, оскільки крім розмірності симплексів і кількості загальних вершин у формулі присутня кількість симплексів, з якими досліджуваний симплекс здатен встановлювати зв'язок на максимальному рівні зв'язності, результат формули (15) лежить у діапазоні $[0, 1]$. Для практичних розрахунків важливості сервісів використовується чітка градація інтервалу $[0, 1]$ важливості для значень ексцентриситету [12]:

- діапазон А $[0; 0,2]$ – малий ступінь;
- діапазон В $[0,2; 0,5]$ – незначний ступінь;
- діапазон С $[0,5; 0,8]$ – середній ступінь;
- діапазон D $[0,8; 1]$ – високий ступінь.

Ця шкала ексцентриситетів може модифікуватися та уточнюватися, оскільки границі шкали є дещо розмитими, то можна казати про доцільність застосування теорії нечітких множин. Слід також відмітити, що сервіси, які мають високий ступінь ексцентриситету, як правило є унітарними функціями і потребують особливого контролю наявності каналів зв'язку на фізичній топології і можливості регулювання інформаційних потоків на логічній топології.

Далі фізична топологія тактичної мережі ЗРС розглядається у вигляді графу (кількість вершин графу – V ; кількість ребер графу – E), аналізуються показники зв'язності SoS і показники структурного руйнування. Основними показниками структурного руйнування мережі SoS є показники вершинної деградації і показники реберної деградації. Вершинна деградація означає зменшення кількості базових елементів, що можуть бути задіяні для формування тактичних кластерів. Це потребує повторення операцій системної декомпозиції ЗРС (рис. 5). Реберна деградація більш повільно впливає на якість функціонування ЗРС, тому що втрата фізичних каналів зв'язку у рамках мережі може компенсуватися перенаправленням трафіку на рівні логічної топології. При цьому контролюється у першу чергу формування унітарних сервісів (рис. 6). При значній деградації тактичної мережі можливе обмеження реалізації окремих способів стрільби ЗРС.

ВИСНОВКИ

Запропонований метод динамічного просторово-часового синтезу структури дата-центричної ЗРС на основі теорії дата-центричних операцій забезпечує в реальному масштабі часу формування тактичних розвідувально-інформаційних і вогневих інформаційних кластерів для просторово-розподіленої ЗРС. Синтез структури ЗРС здійснюється шляхом вибору способу стрільби, формування моделі контуру наведення і породження структури SoS, яка у сукупності забезпечує реалізацію необхідних для стрільби функцій з урахуванням можливої деградації фізичної топології ЗРС.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Скорик А.Б. Методологічні основи створення архітектури дата-центричної екосистеми ЗРС. *Зб. наук. пр. Харківського нац. ун-ту Повітряних Сил імені Івана Кожедуба*. 2021. № 1(67). С. 119—133. <https://doi.org/10.30748/nitps.2021.67.16>.
2. Скорик А.Б., Ярош С.П. Еволюційний розвиток концепції мережево-центричних війн, системно-концептуальні основи теорії дата-центричних операцій. *Зб. наук. пр. Харківського нац. ун-ту Повітряних Сил імені Івана Кожедуба*. 2020. № 4(66). С. 26—34. <https://doi.org/10.30748/zhups.2020.66.03>.
3. Скорик А.Б., Ярош С.П., Меленті Д.О. Вплив руйнівних технологій на розвиток архітектури

- C4ISR систем. Концептуальні основи побудови архітектури дата-центричної системи-систем. *Системи озброєння і військова техніка*. 2020. № 4(64). С. 107—119. <https://doi.org/10.30748/soivt.2020.64.14>.
4. Скорик А.Б. Дата-центрична операція, принципи системо-системного мислення і концепція створення архітектурного фреймворку зенітних ракетних систем AFADS. *Системи обробки інформації*. 2020. № 4(163). С. 77—86. <https://doi.org/10.30748/soi.2020.163.08>.
 5. Meredith, H. (2014). An Analysis of SE and MBSE Concepts to Support Defence Capability Acquisition. Edinburgh South Australia 5111. Australia. September, 2014. 260 p.
 6. Scott, K. (2018). Cyberspace Operations. United States. *Joint Chiefs of Staff. Joint Publication*. 8 June. 2018. № 3—12. P. 104.
 7. Abusharekh, A. & Levis, A. (2016). Performance Evaluation Of SOA In Clouds. *30th European Conf. on Modelling and Simulation*. Regensburg Germany. May 31st – June 3rd. <https://doi.org/10.7148/2016-0614>.
 8. Russell, S. & Abdelzاهر, T. (2018). The Internet of Battlefield Things: The Next Generation of Command, Control, Communications and Intelligence (C3I) Decision-Making. *IEEE Military Communications Conf. (MILCOM 2018)*. <https://doi.org/10.1109/milcom.2018.8599853>.
 9. Tonin, M. The internet of things: promises and perils of a disruptive technology. *Report, NATO Parliamentary Assembly. Science and technology committee*. October, 2017.
 10. Turinskyi, O.V. & Skoryk, A.B. (2019). Design method of surface-to-air missiles using the object-oriented approach and electronic launch technology. *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*. № 2(35). Pp. 133—142. <https://doi.org/10.30748/nitps.2019.35.17>.
 11. Доска О.М., Скорик А.Б. Структурно-функціональне описання ЗРС з використанням математичного апарату поліхроматичних множин. *Системи озброєння і військова техніка*. 2011. № 2(26). С. 117—121.
 12. Смірнов С.Б., Ткаченко В.І., Рубан І.В., Малюга В.Г., Тристан А.В. Теоретичні основи побудови та застосування розвідувально-управляючих інформаційних систем протиповітряної оборони: монографія. Харків: ФОП Панов А.М. 2018. 162 с.
 13. Бортновський С.А., Зверев О.О., Животовський Р.М., Базіло С.М. Розробка принципів спряження різнотипних систем телекодового зв'язку зенітного ракетного озброєння з метою побудови сучасних мережецентричних систем бойового управління. *Озброєння та військова техніка*. 2020. № 3(27). С. 56—63.
 14. Бортновський С.А., Зверев О.О., Животовський Р.М., Петрук С.М., Рамшов Д.В. Обґрунтування технічних пропозицій щодо спряження сучасних ПЕОМ зі спеціалізованими обчислювальними засобами зенітного ракетного озброєння з метою модернізації та підвищення обчислювального ресурсу. *Озброєння та військова техніка*. 2020. № 4(28). С. 48—56.

REFERENCES

1. Skoryk, A. (2020), “Metodolohichni osnovy stvorennia arkhitektury data-tsentrychnoi ekosystemy ZRS”. [Methodological fundamentals of creating the ADS data-centric ecosystem architecture], *Scientific Works of Kharkiv Nat. Air Force Univ.* No 1(67). Pp. 119—133. <https://doi.org/10.30748/nitps.2021.67.16>.
2. Skoryk, A. & Yarosh, S. (2020), “Evolutsiyni rozvytok kontseptsii merezhevo-tsentrychnykh viin, systemno-kontseptualni osnovy teorii data-tsentrychnykh operatsii” [Evolutionary development of the concept of network-centric wars, system-conceptual bases of the theory of data-centric operations], *Scientific Works of Kharkiv Nat. Air Force Univ.* No. 4(66). Pp. 26—34. <https://doi.org/10.30748/zhups.2020.66.03>.
3. Skoryk, A., Yarosh, S. & Melenti, D. (2020), “Vplyv ruiniivnykh tekhnolohii na rozvytok arkhitektury S4ISR system. Kontseptualni osnovy pobudovy arkhitektury data-tsentrychnoi systemy-system” [Impact of disruptive technologies on the development of C4ISR systems. Conceptual framework of data-centric system of systems architecture], *Systems of Arms and Military Equipment*. No. 4(64). Pp. 107—119. <https://doi.org/10.30748/soivt.2020.64.14>.
4. Skoryk, A. (2020), “Data-tsentrychna operatsiia, pryntsyipy systemo-systemnoho myslennia i kontseptsii stvorennia arkhitekturnoho freimvorku zenitnykh raketykh system AFADS” [Date-centric operation, principles of system of system thinking and the concept of development an architectural framework air defense system AFADS], *Information Processing Systems*. No. 4(163). Pp. 77—86. <https://doi.org/10.30748/soi.2020.163.08>.
5. Meredith, H. (2014). An Analysis of SE and MBSE Concepts to Support Defence Capability Acquisition. Edinburgh South Australia 5111. Australia. September, 2014. 260 p.
6. Scott, K. (2018). Cyberspace Operations. United States. *Joint Chiefs of Staff. Joint Publication*. 8 June. 2018. № 3—12. P. 104.
7. Abusharekh, A. & Levis, A. (2016). Performance Evaluation Of SOA In Clouds. *30th European Conf. on Modelling and Simulation*. Regensburg Germany. May 31st – June 3rd. <https://doi.org/10.7148/2016-0614>.
8. Russell, S. & Abdelzاهر, T. (2018). The Internet of Battlefield Things: The Next Generation of Command, Control, Communications and Intelligence (C3I) Decision-Making. *IEEE Military Communications Conf. (MILCOM 2018)*. <https://doi.org/10.1109/milcom.2018.8599853>.
9. Tonin, M. The internet of things: promises and perils of a disruptive technology. *Report, NATO Parliamentary Assembly. Science and technology committee*. October, 2017.
10. Turinskyi, O.V. & Skoryk, A.B. (2019). Design method of surface-to-air missiles using the object-oriented approach and electronic launch technology. *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*. № 2(35). Pp. 133—142. <https://doi.org/10.30748/nitps.2019.35.17>.

11. Doska, O. & Skoryk, A. (2011), "Strukturno-funktsionalne opysannia ZRS z vykorystanniam matematychnoho aparatu polikhromatychnykh mnozhyh". [Structural-functional description of SAMS with use the mathematical vehicle of polychromatic ensembles]. *Systems of Arms and Military Equipment*. № 2(26). Pp. 117—121.
12. Smirnov, Y., Tkachenko, V., Ruban I., Malyuha, V. & Trystan, A. (2018), "Teoretychni osnovy pobudovy ta zastosuvannia rozvidualno-upravliaiuchykh informatsiinykh system protypovitrianoi oborony: monohrafiia". [Theoretical bases of construction and application of reconnaissance and control information systems of air defense: monograph], FOP Panov A.M. Kharkiv. 162 p.
13. Bortnovskiy, S.A., Zvieriev, O.O., Zhyvotovskiy, R.M. & Bazilo, S.M. (2020), "Rozrobka pryntsyypiv spriazhennia riznotypanykh system telecodovogo zviazku zenitnoho raketnoho ozbroiennia z metoiu pobudovy suchasnykh merezhecentrychnykh sistem boyovogo upravlinnia" [Development of principles for pairing between different telecode communication systems of anti-aircraft missile armament with the purpose of construction of modern network-centric combat control systems], *Weapons and Military EQUIPMENT*. No 3(27). Pp. 56–63.
14. Bortnovskiy, S.A., Zvieriev, O.O., Zhyvotovskiy, R.M., Petruk, S.M. & Ramshov, D.V. (2020), "Obgruntuvannia tekhnichnykh propozyzii schodo spriazhennia suchasnykh PEOM zi specializovannymy obchyslyvalnymy zasobamy zenitnoho raketnoho ozbroiennia z metoiu modernizatsii ta pidvyschennia obchyslyvalnogo resursu" [Development and justification of technical proposals for the introduction of modern personal computers in the composition of standard specialized computer means of complexes of automation of communication companies of windows and windows their general computer resource], *Weapons and Military Equipment*. No 4(28). Pp. 48–56.

Skoryk A., Pavlenko M., Tristan A., Morhun Y., Zvieriev O.

METHOD OF ADAPTIVE SPACE-TIME SYNTHESIS OF DATA-CENTRIC ADS STRUCTURE

This article discusses the space-time synthesis of the data-centric ADS structure during the conduct of anti-aircraft warfare on a real-time scale. The article analyzes the peculiarities of building of the general architecture of data center system of systems (SoS), the differentiation of the physical and cybernetic space of SoS. The architecture of data-centric ADS construction provides for division of the physical space of ADS existence into the level of basic system elements, the level of users and the physical level of system-system links (physical topology).

The cybernetic space includes the logical level of the measure (logical topology), the applied level of the system-systems services and the operational level of the SoS.

It is concluded that at the application level of the SoS services, a mechanism of access to capabilities is created, which is realized through the use of three types of services. The first type of service is based on the use of server-oriented architecture (SOA) and is implemented on a logical topology level. The second type of services can be regarded as a set of interconnected functions, which are implemented on the physical level of data-centric SoS. The third type of service is based on IoBT (Internet of Battlefield Things) architecture. Thus, the structural and functional links of data-centric SoS are defined at the system of systems level, which in turn defines the possible actions of DSoS within the framework of data-centric operation (operational level).

The article contains: the ADS structure formation general scheme; the general structural scheme of the method of synthesis of the complex model of functioning of the ADS facilities in the composition of the ADS guidance loop; the system decomposition operation scheme; the scheme of the synthesis operation of the guidance loop structure using the Cartesian square morphism. Using the polydial analysis, the space-hour synthesis limits of the data-centric ADS structure for the possible degradation of the physical topology are evaluated.

Keywords: SAM, metamorphism, system of systems, theory of data-centric operations, space-time synthesis, theory of categories, polydimensional analysis

Відомості про авторів:

Скорик Анатолій Борисович

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри Харківського національного
університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба,
м. Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-4327-8796>
e-mail: anatolii.skoryk.65@gmail.com

Information about the authors:

Anatolii Skoryk

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Associate Professor of Ivan Kozhedub Kharkiv National
Air Force University, Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-4327-8796>
e-mail: anatolii.skoryk.65@gmail.com

Павленко Максим Анатолійович

доктор технічних наук, професор
начальник кафедри Харківського національного
університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба,
м. Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-7864-213X>
e-mail: bpgpma@ukr.net

Maksim Pavlenko

Doctor of Technical Sciences, Professor
Chief of Department of Ivan Kozhedub Kharkiv National
Air Force University, Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-3216-1864>
e-mail: bpgpma@ukr.net

Тристан Андрій Вікторович

доктор технічних наук, старший науковий співробітник
начальник науково-дослідного управління Харківського
національного університету Повітряних Сил імені
Івана Кожедуба, м. Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-2137-5712>
e-mail: andr.tristan@gmail.com

Andrii Tristan

Doctor of Technical Sciences, Senior Research
Chief of Scientific Research Management of Ivan
Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv,
Ukraine <https://orcid.org/0000-0002-2137-5712>
e-mail: andr.tristan@gmail.com

Моргун Євгеній Валерійович

Старший викладач кафедри Харківського
національного університету Повітряних Сил імені
Івана Кожедуба,
м. Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-0591-5608>
e-mail: morgun303@ukr.net

Yevhenii Morhun

Senior lecturer Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force
University, Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-0591-5608>
e-mail: morgun303@ukr.net

Зверев Олексій Олексійович

кандидат технічних наук, доцент
науковий співробітник відділу розвитку зенітних
ракетних систем та комплексів науково-дослідного
управління розвитку озброєння та військової техніки
Повітряних Сил Центрального науково-дослідного
інституту озброєння та військової техніки Збройних
Сил України, м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-2274-3115>
e-mail: gans7995@gmail.com

Oleksii Zvieriev

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Researcher of Scientific Research Department of
Development of Surface-to-Air Missile Systems and
Complexes of Scientific Research Management of Central
Research Institute of Armaments and Military Equipment
of the Armed Forces of Ukraine,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-2274-3115>
e-mail: gans7995@gmail.com

Стаття надійшла до редколегії 05.04.2021