УДК 623.41.419
DOI: https://doi.org/1034169/2414-0651.2024.2(42).27-37

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

О. Ф. ГАЛИЦЬКИЙ, *кандидат технічних наук, доцент*
https://orcid.org/0000-0003-1083-8184
(Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків)

О. О. ЗВЄРЄВ, *кандидат технічних наук, доцент*
https://orcid.org/0000-0003-2274-3115

О. О. ГОЛОВІН, *доктор технічних наук, старший науковий співробітник*
https://orcid.org/0000-0003-4662-4559

А. А. ОРЛЯНСЬКИЙ
https://orcid.org/0009-0008-2574-5750
(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)

МЕТОД ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОГО СИНТЕЗУ МОДЕЛІ КОНТУРУ КЕРУВАННЯ БЕЗПІЛОТНИМИ УДАРНИМИ ЗАСОБАМИ В ДАТА-ЦЕНТРИЧНІЙ ЗРС

В статті піднімаються питання розбудови теорії дата-центричних операцій на основі застосування методології архітектурного підходу при створенні зенітних ракетних систем. Запропоновано метод синтезу моделі контуру керування безпілотними ударними засобами в дата-центричній ЗРС, здійснюваний під час її функціонування у реальному масштабі часу. В рамках синтезу здійснюється вибір способу стрільби, трасування операційних станів і процесів при формуванні циклу стрільби ЗРК, просторова і часова декомпозиція ЗРС для визначення структури окремих ЗРК у складі системи зенітного ракетного прикриття (СЗРП) і формування 4D-структури контуру керування. Для визначеної 4D-структури контуру керування здійснюється формування класів, що описують основні системи зі складу зразків ОВТ, розробка функціональних моделей для складових частин (елементів) озброєння. Запропоновано варіант стикування моделей окремих зразків ОВТ в рамках синтезу комплексної моделі контуру керування.

Ключові слова: *контур керування, спосіб стрільби, комплексна модель наведення, ЗРС, архітектура, безпілотний ударний засіб.*

ВСТУП

При порівнянній інформованості повітряно-космічних сил і систем зенітного ракетного прикриття, перші мають значно більші маневрені можливості. Другі, маючи значно меншу рухливість, парирують цю здатність противника, здійснюючи маневр вогнем, для чого, відповідно до циклу стрільби (циклу Бойда) [1], постійно перебудовують свою просторово-часову структуру [2, 3]. Облік досвіду боротьби з військовими повітряно-космічними силами росії показав, що все більшу роль у протистоянні у повітрі займають безпілотні засоби ураження (*UW*, unmanned weapon), що дозволяє казати про використання у складі зенітних ракетних комплексів не тільки ЗКР, а й інших *UW*. Перебудова структури ЗРК для дата-центричних ЗРС [4, 5] відбувається в реальному масштабі часу, що потребує розробки методів просторово-часового синтезу моделі контуру керування безпілотними засобами ураження. Приведений в цій роботі метод синтезу є розвитком методів, викладених в роботах [6, 7]. В роботі часто замість звичного терміну зразки ОВТ використовується термін SCA-системи (Systems-Centric Architecture, SCA) тому, що в дата-центричних системах-систем (data-centric system of systems, DSOS) здійснюється взаємодія з формально незалежними системами-систем (system of systems, SOS), наприклад з супутниковими угрупуваннями.

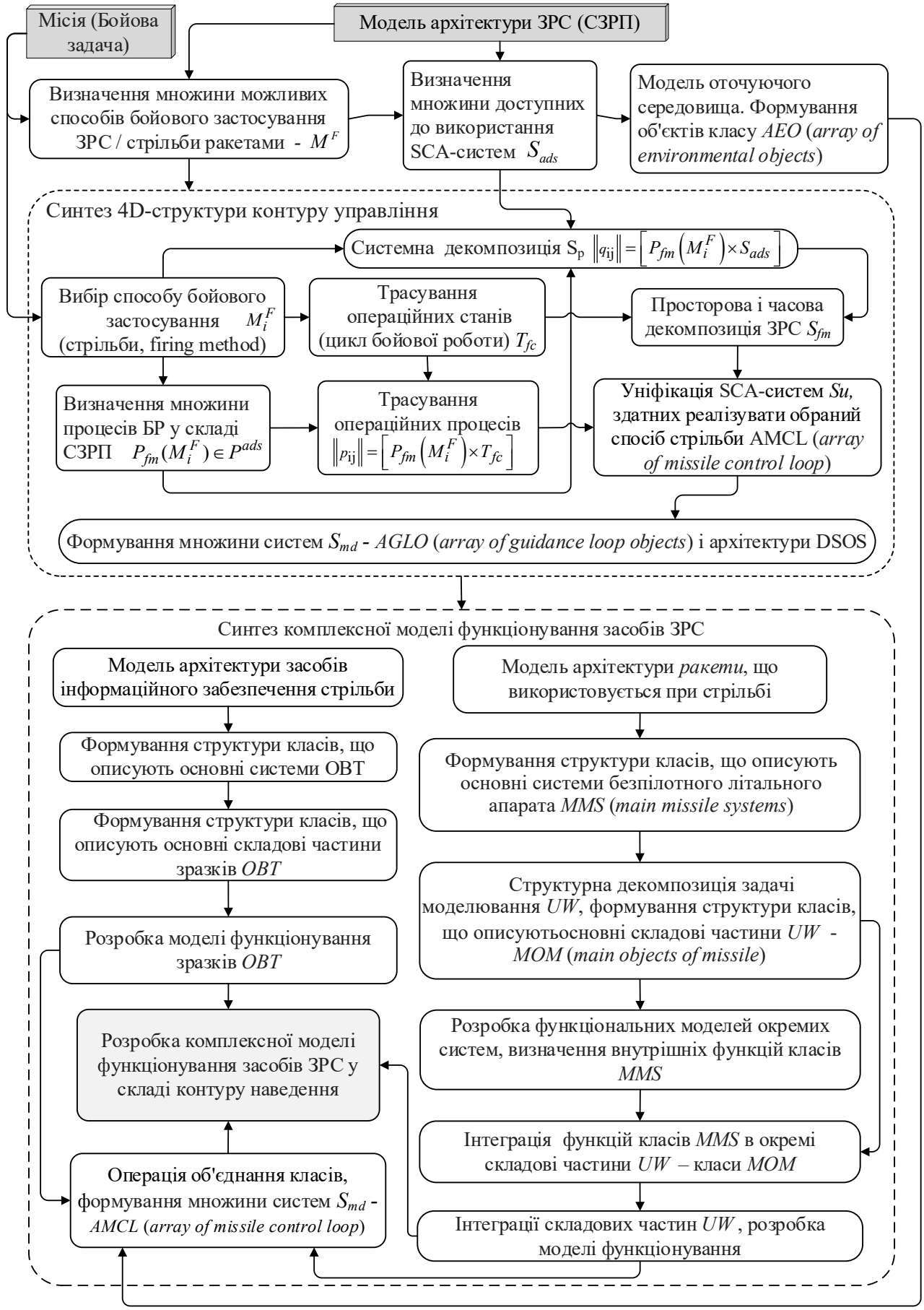
АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Основи теорії дата-центричних операцій розглянуті в роботах [4, 5]. Теоретичні основи побудови та застосування розвідувально-управляючих інформаційних систем протиповітряної оборони і управління структурною динамікою систем ОВТ, опис циклу Бойда приведені в роботах [1–3]. Методи синтезу моделі контуру управління і моделювання реактивних систем розглянуті в роботах [6–8]. Питання побудови моделей ЗРК з використанням поліхроматичних множин приведено в роботі [9]. При написанні статті було використано погляди на математичний опис теорії категорій, приведені у роботах [10–12].

Метою статті є розвиток теорії дата-центричних операцій на основі розробки методу і моделі синтезу контуру керування безпілотними засобами ураження в дата-центричній ЗРС у реальному масштабі часу.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Просторово-часовий синтез контуру керування безпілотними засобами ураження в дата-центричній ЗРС – це процес породження функцій, структури і параметрів SOS за заданими її властивостями, здійснюваний під час її функціонування у реальному масштабі часу. Загальна структурна схема методу синтезу приведена на рис. 1. Згідно з концептуальною моделлю розробки архітектури [6, 12], на початковому етапі формування структури СЗРП відбувається визначення доступних до використання SCA-систем і об'єднання їх у множину S_{ads}. Далі визначається множина способів стрільби (проведення операції) ЗРС – M^F множина процесів бойової роботи (БР) P^{ads}.



Р и с . 1. Загальна структурна схема методу просторово-часового синтезу моделі контуру керування дата-центричної ЗРС

Кожен спосіб стрільби M_i^F являє собою певний набір процесів бойової роботи (БР) $P_{fm}\left(M_i^F\right) \in P^{ads}$, який реалізується створюваною в реальному масштабі часу DSOS. Варіант схеми бойового застосування ЗРС приведено на рис. 2. Взаємозв'язок між множиною процесів БР і способами стрільби можна представити як бінарне відношення P_{mf}. Для варіанту, приведеного на рис. 2, матриця бінарних співвідношень g_{ij}:

$$M^F = \left\{M_1^F, M_2^F\right\},$$
$$P^{ads} = \left\{P_1^{ads}, P_2^{ads}, ..., P_7^{ads}\right\}, S_{ads} = \{s_1, s_2, ..., s_7\},$$
$$\left\|g_{ij}\right\| = \left[P^{ads} \times M^F\right] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$
$$g_{ij} = \begin{cases} 1, & g_{ij} \in P_{mf} \\ 0, & g_{ij} \notin P_{mf} \end{cases}.$$

При синтезі важливо враховувати зв'язки, які створюються між ракетою, окремими системами ЗРС та оточуючим середовищем (клас *AEO*, array of environmental objects, рис. 1), що описуються з використанням моделей: цілі (*Target*), оточуючого середовища (*ENV* – environment), кінематичної ланки (*Klink – kinematic link*) і кінематики 6-мірного руху (*6DOF missile board kinematic*):

$$AEO = T\,arg\,et \cup ENV \cup Klink \cup 6DOF. \quad (2)$$

Синтез 4d-структури контуру керування

Синтез 4D-структури контуру керування (рис. 1) здійснюється на основі оцінки бойової задачі, згідно з якою вибирається спосіб стрільби (firing method) M_i^F і здійснюється операція системної декомпозиції, яка забезпечує формування множини SCA-систем S_p, здатних реалізувати множину необхідних для стрільби процесів $P_{fm}\left(M_i^F\right)$. На рис. 3 показано варіант формування $DSOS_1$, що забезпечує реалізацію способу стрільби M_1^F на базі використання окремих SCA-систем ЗРК (ADS): РЛС, ТОЦ (тактичний операційний центр), СПУ (самохідна пускова установка) і літака розвідки й управління (Plane): РЛС, КМ (командний модуль). Схема операції системної декомпозиції (рис. 3) отримана з використанням діаграми суми об'єктів, в якому канонічні проекції суми можна розглядати як конструктори, а універсальний морфізм M_1^F – як деструктор:

$$f_1 : ADS \to M_1^F, \quad i_1 : ADS \to S_{ads1},$$
$$f_2 : Plane \to M_1^F, \; i_2 : Plane \to S_{ads1}, \; u : S_{ads1} \to M_1^F. \quad (3)$$

Взаємозв'язок між множиною SCA-системами S_{ads} і процесами $P_{fm}\left(M_i^F\right)$ можна представити як бінарне відношення P_s. Для варіанту, приведеного на рис. 3, матриця бінарних співвідношень q_{ij}:

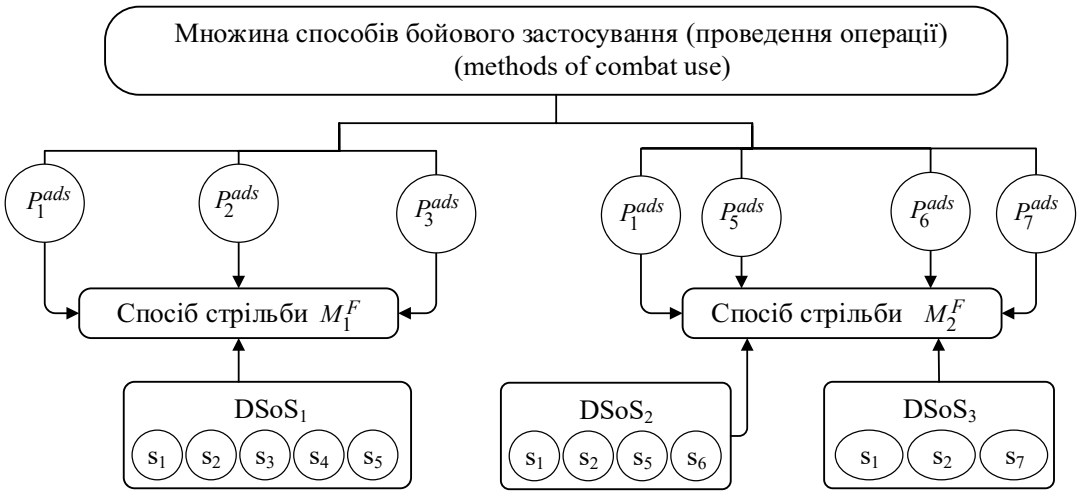
$$P_{fm}\left(M_1^F\right) = \left\{P_1^{ads}, P_2^{ads}, P_3^{ads}\right\},$$
$$S_{ads} = \{S_{ca1}, S_{ca2}\},$$
$$\left\|q_{ij}\right\| = \left[P_{fm}\left(M_i^F\right) \times S_{ads}\right] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$
$$q_{ij} = \begin{cases} 1, & \left(P_i^{ads} \quad S_{caj}\right) \in P_s \\ 0, & \left(P_i^{ads} \quad S_{caj}\right) \notin P_s \end{cases}.$$

При виконанні умови $\exists\left(P_i^{ads} \quad S_{caj}\right) \in P_s$ – можливості реалізації SCA-системою хоча б одного процесу, ця система належить множині $S_p \in S_{ads}$.

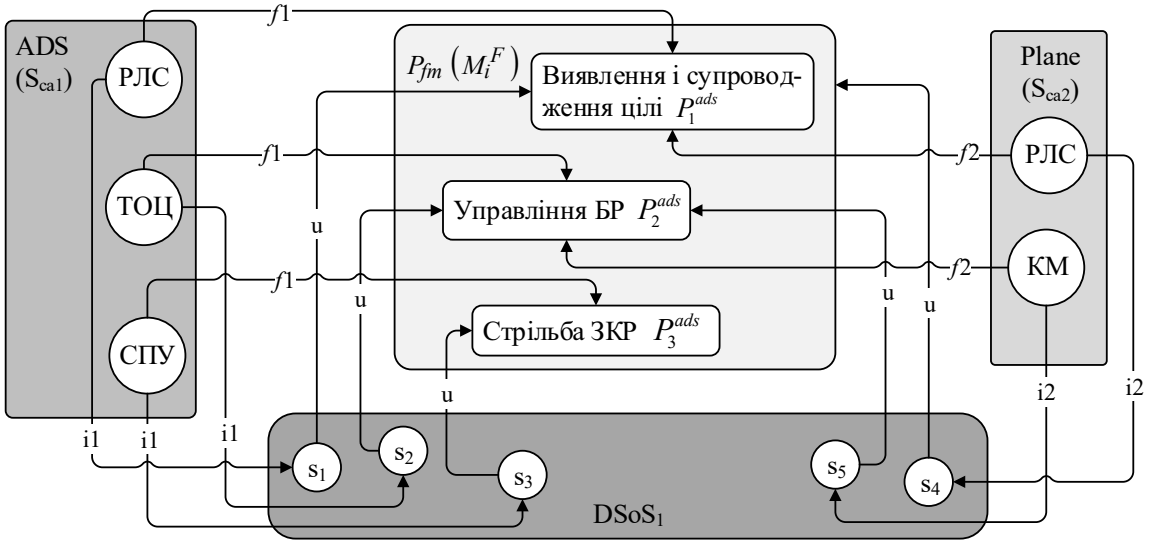
Цикл бойової роботи ЗРС (firing cycle) [1, 3] реалізується шляхом трасування операційних станів шляхом визначення множини фаз циклу стрільби T_{fc} і операційних процесів $P_{fm}(M_i^F)$. Взаємозв'язок між множиною процесів і фазами стрільби $T_{fc} = \left\{t_1^{fc}, t_2^{fc}, t_3^{fc}\right\}$ «підготовка», «стрільба», «оцінка стрільби», можна представити як бінарне відношення P_T. Матриця бінарних співвідношень p_{ij} може бути визначена за правилом:

$$\left\|p_{ij}\right\| = \left[P_{fm}\left(M_i^F\right) \times T_{fc}\right], \; p_{ij} = \begin{cases} 1, & p_{ij} \in P_T \\ 0, & p_{ij} \notin P_T \end{cases}. \quad (5)$$

При визначенні SCA систем, що можуть входити до складу контуру керування ЗРС, на множині S_p відбира-



Р и с . 2. Варіант схеми бойового застосування ЗРС



Р и с . 3. Схема операції системної декомпозиції з використанням діаграми суми об'єктів

ються доступні у 3D-просторі SCA-системи, які є вільними на відповідній фазі БР і можуть бути задіяні в контурі керування.

Схема операції просторової і часової декомпозиції, приведена на рис. 4, одержана з використанням універсального морфізму добутку об'єктів, канонічні проекції якого можна розглядати як деструктори DSoS, а універсальний морфізм – як конструктор [8, 9]. Згідно з рис. 4 розглядаються [6]:

1) системи ОВТ $S_p = (s_1 \quad s_2 \quad s_3 \quad s_4 \quad s_5)$;

2) $A = \{0,1\}$ – наявність просторової можливості використання систем ОВТ у контурі керування. Спочатку відсіюються методом виключення системи, які не попадають в зону функціонування СЗРП (0 – можливість не існує), об'єкти, що залишилися, утворюють групу (1 – можливість існує);

3) $B = \{a,b\}$ – наявність часової можливості використання системи ОВТ у контурі керування. Спочатку виключаються вже задіяні системи ОВТ: a – можливість не існує, а потім формується група зразків ОВТ за ознакою: b – можливість існує.

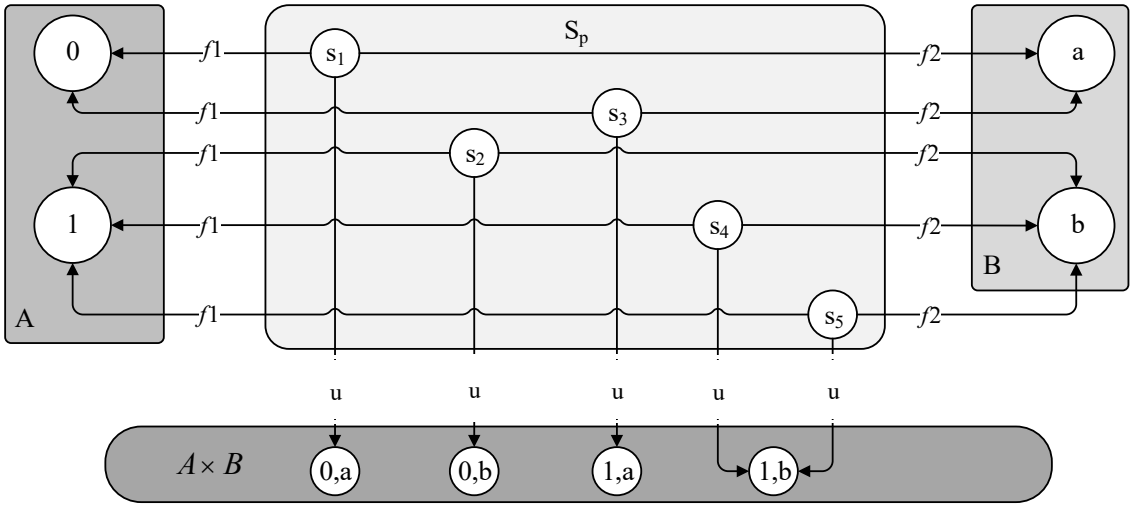
Результатом є добуток об'єктів категорії множин $A \times B$. Для розглянутого випадку морфізми:

$$f_1: S_p \to A, \quad f_2: S_p \to B$$

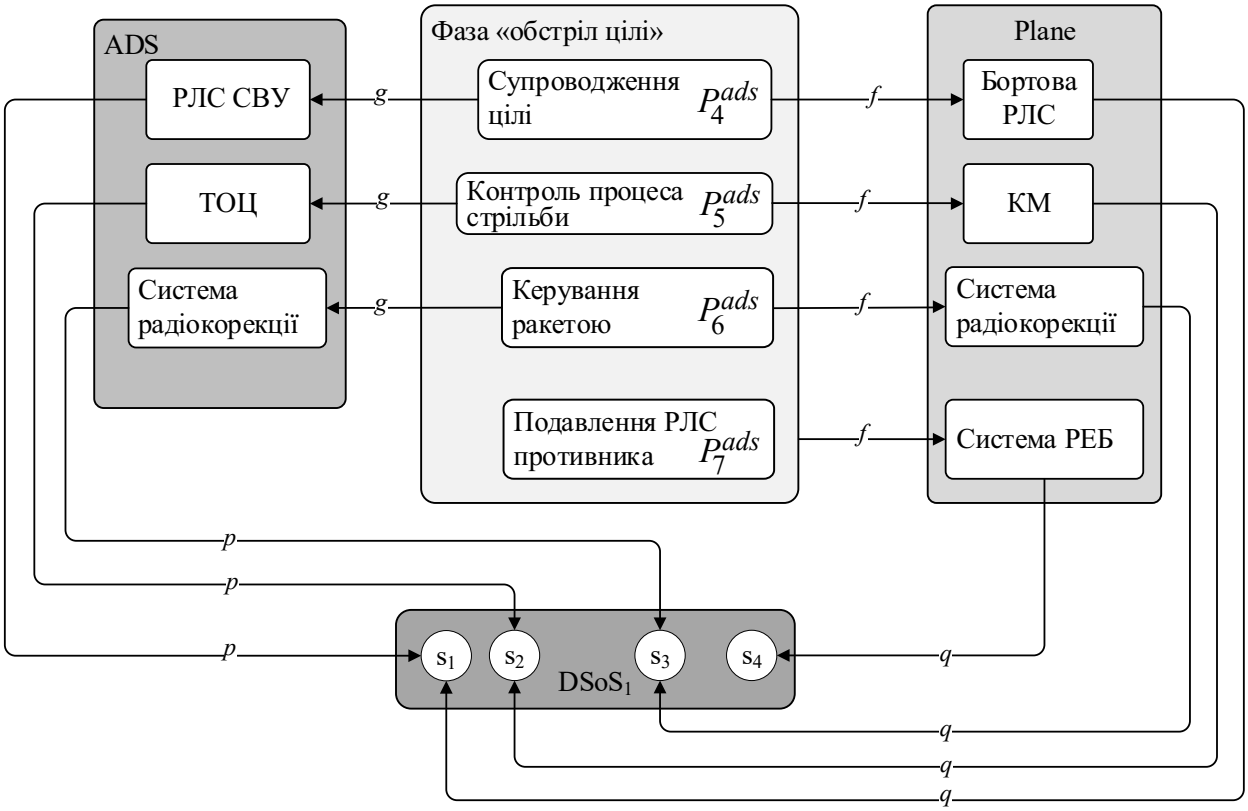
описують результат формування структури контуру керування, виходячи з методики f_1 просторової оцінки засобів ЗРС і результат формування структури контуру керування, виходячи з методики f_2, часової оцінки задіяння засобів ЗРС. Результат $A \times B$, наведений на рис. 4, показує, що 4-та і 5-та SCA-системи можуть бути задіяні в контурі керування $S_{fm} = (s_4, s_5)$.

Окремі фази циклу стрільби реалізуються за допомогою побудови системи-систем, яка відтворює процеси, визначені в бінарній матриці p_{ij}. Відповідно, множина SCA-систем, здатних реалізувати обраний спосіб стрільби AMCL (array of missile control loop), створюється шляхом упорядкування (уніфікації) систем S_{fm}, за можливістю реалізації процесів на відповідній фазі БР.

Схема операції уніфікації SCA-систем приведена на рис. 5, одержана з використанням ко-декартового квадрату морфізмів. На рис. 5 приведено варіант реалізації



Р и с . 4. Схема операції просторової і часової декомпозиції з використанням універсального морфізму добутку об'єктів



Р и с . 5. Схема операції уніфікації SCA-систем з використанням кодекартового квадрату морфізмів

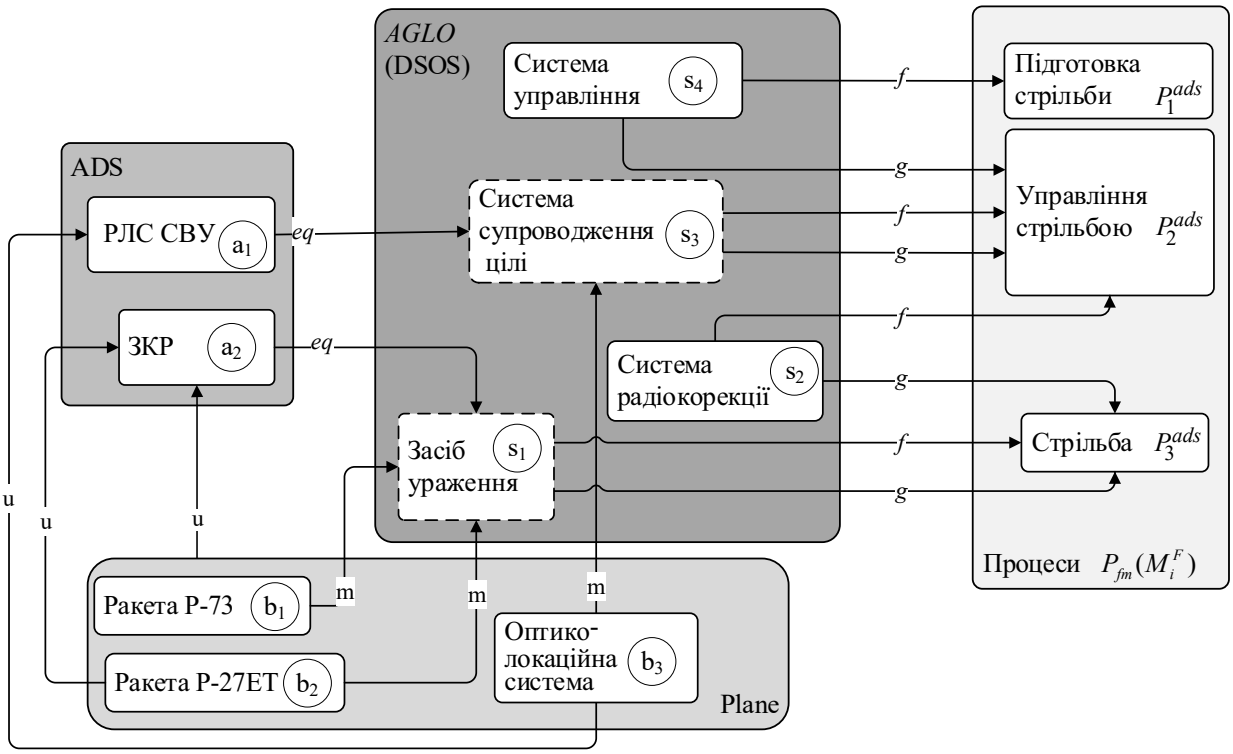
структури AMCL для фази бойової роботи «обстріл цілі» з використанням окремих SCA-систем ЗРК (ADS): РЛС, ТОЦ, СПУ і літака: РЛС, КМ, АПУ (авіаційна пускова установка), модуль РЕБ. На схемі на рис. 5 структура $DSOS_1$ – це диз'юнктивне об'єднання SCA-систем (ЗРК і літака), причому таких, що реалізують однакові процеси в множині $P_{fc}(t_2^{fc})$ (мають однакові прообрази на фазі t_2^{fc} – «обстріл цілі»):

$$f : P_{fc}(t_2^{fc}) \to Plane,\ g : P_{fc}(t_2^{fc}) \to ADS,$$
$$q : Plane \to DSOS_1,\ p : ADS \to DSOS_1. \quad (6)$$

В результаті виконання операції уніфікації виділяється множина SCA-систем $S_u(t_i^{fc}) \in S_{fm}$, яка забезпечує реалізацію необхідних на відповідній фазі БД процесів. Слід вказати, що однакові процеси у різних ВТС можуть мати різну технічну реалізацію, наприклад, супроводження цілі P_4^{ads} (рис. 5) може бути реалізована за допомогою РЛС, або оптико-локаційної системи (рис. 6). Тому створювана на множині $S_u(t_i^{fc})$ структура може бути надмірна.

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-систем, назва якої співпадає з назвою класу. Класи утворюють структурну ієрархію типу «бути частиною» [12]. Далі системи, 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.

Схема операції щодо оптимізації архітектури контуру керування *UW* – формування класу *AGLO* (array of guidance loop objects), одержана з використанням діаграми вирівнювача паралельних морфізмів, приведена на рис. 6. В цій схемі *AGLO* задається як клас систем, без прив'язки до особливостей їх технічної реалізації. При синтезі архітектури визначаються класи задіяних систем, які далі заміняються об'єктами – SCA-системами. Згідно з рис. 6, відображення *AGLO* на множину процесів $P_{fm}(M_i^F)$, що забезпечують реалізацію *i*-го способу стрільби, можливе з використанням функцій *f*, *g*. Причому у складі *AGLO* можна виділити системи s_2, s_4, які реалізовані зразками ОВТ, що не мають надмірності, і системи s_1, s_2, у якості яких можуть бути задіяні як системи ЗРК (ADS), так і винищувача (Plane). Відображення цих систем здійснюється з використанням функцій *eq*, причому згідно з визначенням [10], зрівняних паралельних морфізмів $f, g : AGLO \to P_{fm}(M_i^F)$ – це об'єкт ADS та морфізм $eq : ADS \to AGLO$ такі, що $f \circ eq = g \circ eq$ і для будь-якого об'єкта *Plane* та морфізму $m : Plane \to AGLO$, якщо $f \circ m = g \circ m$, існує унікальний морфізм $u : Plane \to ADS$ такий що $eq \circ u = m$, тобто діаграма комутативна. Відзначимо, що незалежно від варіантів функціонування, об'єкти РЛС СВУ і ЗКР відображаються на одні й ті ж процеси (рис. 6), але при цьому об'єкт ADS не є унікальним. Вибір здійснюється з використанням універсальної властивості. Зворотне відображення процесів на системи a_1, a_2 для ЗРК дає однозначний результат, а ось для винищувача відображення на b_1, b_2 не є однозначним. Таким чином, використання діаграми вирівнювача паралельних морфізмів дозволяє перевіряти оптимальність використання окремих



Р и с . 6. Схема оптимізації архітектури контуру керування з використанням діаграми вирівнювача паралельних морфізмів

SCA-систем у складі дата-центричної SoS. Одержана множина систем ОВТ $S_{md} \in S_u$ використовується для формування контуру керування ЗКР. Підкреслимо, що для систем S_{md} і класу *AGLO*, як правило, вказується не тільки можливість (або неможливість) інтеграції до *AGLO*, але і сукупність всіх способів інтеграції, яка породжує множину морфізмів *Mor*(S_{md}, *AGLO*). Композиція морфізмів відповідає багатокроковим діям (процесам), причому їх результат не залежить від порядку простеження кроків (властивість асоціативності).

Синтез комплексної моделі функціонування засобів ЗРС

Оптимізація архітектури контуру керування ракетою (рис. 1, 6) одночасно з породженням класу *AGLO* породила архітектуру дата-центричної системи-систем DSOS (*ось в чому «сила» абстрагування, прим. авт.*), яку можна представити як кортеж [12]:

$$DSOS = \{S,\ R_c,\ Q_c, X,\ Y, T_{fc}\}, \qquad (7)$$

де R_c, Q – бінарне відношення на множині систем C (входять до складу DSOS) і їх властивості.

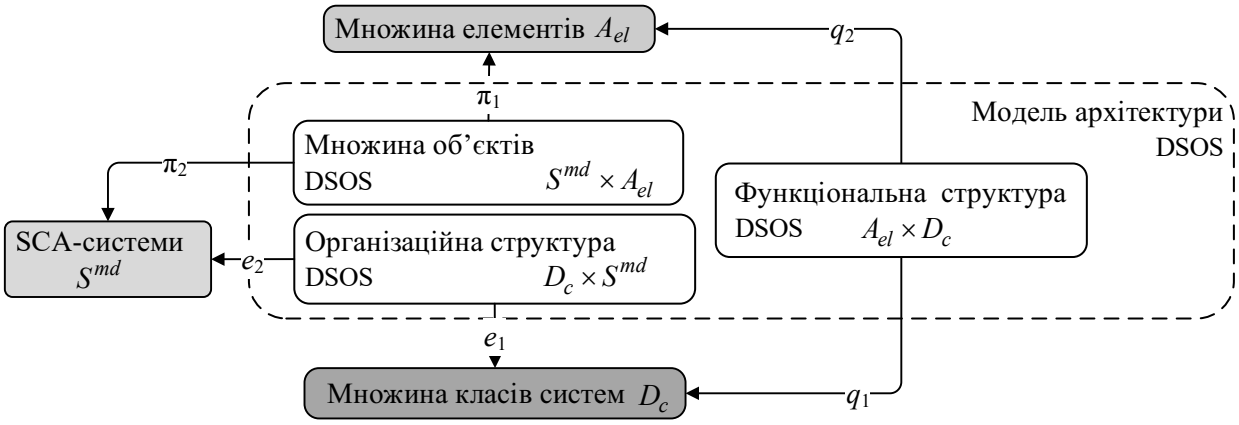
Відношення R_c задає динамічно сформовану на момент часу T_{fc} структуру DSOS. Фактично, системи S (на рис. 5, 6 системи: s_1… s_4) розподілені по окремим SCA-системам множини S_{md}, але це не заважає на цьому етапі побудови моделі розглядати DSOS як звичайну SCA-систему. Щоб мати повне уявлення про SCA-систему як SOS, необхідно знати стан кожної з систем $s_i \in S$, її зв'язки у структурі SoS і принципи взаємодії з іншими системами. Згідно з рис. 5, 6 можна представити відображення систем S на множину Q_c, і далі на множину процесів $P_{fm}(M_i^F)$ БР як морфізми, причому необхідна перевірка вимоги універсальності того, що відображення є ізоморфним:

$$Q_c(S_i) = \{Q_{ci1}, Q_{ci2}, ..., Q_{cim}\},$$
$$H_1 : S_i \to Q_c(S_i),\quad H_2 : Q_c(S_i) \to S_i, \qquad (8)$$
$$H_3 : Q_c(S_i) \to P_{fm}(M_i^F),\ H_4 : P_{fm}(M_i^F) \to Q_c(S_i).$$

Слід розуміти, що властивості будь-якого об'єкта – це його поведінка у зовнішньому середовищі, зміни, здійснювані об'єктом у навколишньому середовищі. Властивості, корисні для цілей функціонування системи, називаються власними функціями (own functions) $F_s \in Q_c(S_i)$. Унітарними функціями (unitary functions) називаються властивості $F_u \in Q_c(S_{md})$, існування яких взаємопов'язане з існуванням інших систем зі складу SoS [12]. Фактично мова йде про рекурсію. На рівні організаційно-технічної системи окремі SCA-системи реалізують «процеси» на нижчому рівні, властивості систем S проявляються як функції.

Архітектура контуру керування *UW* (рис. 1), може бути представлена як поліхроматична множина, до складу якої входять: множина SCA-систем, які у свою чергу складаються з систем і елементів. Відповідно існує відображення, що задає модель архітектури DSOS, приведену на рис. 7.

$$S_{md} = \{s_1, s_2, ..., s_{md}\},\ A_{el} = \{a_1, a_2, ..., a_{el}\},$$
$$D_c = \{d_1, d_2, ..., d_c\}, md \in Md, el \in L, c \in C,$$
$$e_1 : D_c \times S^{md} \to D_c,\ e_2 : D_c \times S^{md} \to S^{md}, \qquad (9)$$
$$q_1 : A_{el} \times D_c \to D_k,\ q_2 : D_c \times S^{md} \to A_{el},$$
$$\pi_1 : S^{md} \times A_{el} \to D_c,\ \pi_2 : S^{md} \times A_{el} \to S^{md}.$$



Р и с . 7. Модель архітектури DSOS

Відображення (9) складових архітектури DSOS на елементи окремих SCA-систем характерно тим, що для засобів ураження модель функціонування розроблюється як для окремої SCA-системи, а моделювання функцій інших систем здійснюється відповідно до їх участі у функціонуванні DSOS, тому їх моделі об'єднуються в модель архітектури засобів інформаційного забезпечення стрільби (рис. 1).

Далі приведено варіант синтезу моделі *UW*, прив'язаний до особливостей архітектури ракети. В цілому, схема синтезу виступає як рекурсія розглянутих вище етапів (рис. 1). Опис взаємодії засобів авіоніки ЗКР здійснюється в рамках формування структури класів, що визначає основні системи ракети $MMS \in D_c$ (*main missile systems*):

$$MMS = \{s_{m1}, s_{m2}, s_{m3}, s_{m4}, s_{m5}\}, \tag{10}$$

де s_{m1} – система наведення, s_{m2} – система стабілізації; s_{m3} – система навігації; s_{m4} – енергетична система; s_{m5} – система бойового спорядження. Структурна декомпозиція задачі моделювання ЗКР здійснюється на основі моделі архітектури ракети і забезпечує формування структури класів, що описує складові авіоніки ЗКР – $MOM \in A_{el}$ (*main objects of missile*) і відображення M_1:

$$MOM = \{a_{m1}, a_{m2}, a_{m3}, a_{m4}, a_{m5}, a_{m6}\}; \quad M_1 : MMS \to MOM, \tag{11}$$

де a_{m1} – планер ракети, a_{m2} – реактивний двигун, a_{m3} – головка самонаведення, a_{m4} – бортовий обчислювач, a_{m5} – бойове спорядження, a_{m6} – навігаційна система.

Кожному з елементів a_{m_i} ставимо у відповідність множину власних функцій F_i^a, причому $F^a \in F_s$. Розробка функціональних моделей окремих систем і визначення внутрішніх функцій класів *MMS* пов'язана з переходом від структури класів до структури об'єктів, що описують особливості побудови ЗКР. Інтеграція функцій класів *MMS* в окремі складові частини ракети – класи MOM і інтеграція складових частин ракети в клас AM, розробка моделі функціонування пов'язані відповідно з моделюванням інформаційних зв'язків на рівні авіоніки і інформаційних зв'язків з іншими моделями контуру наведення. Моделювання функціонування бортового обчислювача здійснюється з використанням візуального формалізму Д. Харела [8]. Наступним кроком є функціональна декомпозиція задачі моделювання ЗКР, формування множини системних функцій SF_m, що описують поведінку ЗКР у зовнішньому середовищі і відображення їх на множини входів X_m і виходів ракети Y_m:

$$M_2 : F^a \to SF_m,\ M_3 : SF_m \to X_m, M_4 : SF_m \to Y_m,$$
$$SF_m = \{f_{s1}, f_{s1}, ..., f_{sl}\},$$
$$X_m = \{x_1, x_2, ..., x_m\},\ Y_m = \{y_1, y_2, ..., y_n\}, \tag{12}$$
$$l \in L, m \in M, n \in N.$$

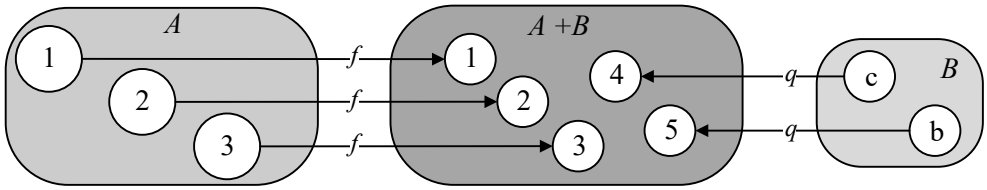
Аналогічно синтезу моделі ЗКР, здійснюється синтез моделей функціонування інших *SCA*-систем *AGLO*. Для прикладу, в моделі контуру керування можуть бути задіяні наступні ВТС: S_1 – багатофункціональна (БФ) РЛС; S_2 – комплекс радіозв'язку з UW (КРЗР); S_3 – самохідна пускова установка (СПУ); S_4 – супутникова навігаційна система (СНС).

Розробка комплексної моделі функціонування засобів ЗРС у складі контуру наведення ЗКР передбачає операцію об'єднання *SCA*-систем *AGLO* і об'єктів класу *AEO* (модель оточуючого середовища) (рис. 1) в рамках одного класу *AMCL* (array of missile control loop). Таке об'єднання доцільно здійснювати з використанням діаграми суми об'єктів, що приведена на рис. 8. У категорії множин сума об'єктів − це диз'юнктивне об'єднання множин. Тобто, якщо в множинах, що об'єднуються, є об'єкти, що збігаються, то ці об'єкти не будуть зливатись, а будуть певним чином позначені, щоб можна було зрозуміти, з якої множини кожен об'єкт. В прикладі, приведеному на рис. 8, множина класу *AMCL* (операція *A*+*B*) пов'язана з елементами вихідних множин *A*, *B* морфізмами *f*, *g*, і саме ці морфізми «позначають» елементи класу. Аналогічно розглянутому вище відображенню «SCA-*системи*» → «*процеси*», клас *AMCL* пов'язує множину систем S_{qf} (незалежно від їх природи) з множиною їх «власних» функцій F_Σ^s. З обліком перевірки універсальності, це відображення можна представити як:

$$H_5 : S_{qf} \to F_\Sigma^s,\ H_6 : F_\Sigma^s \to S_{qf}. \tag{13}$$

Теоретико-множинне відношення R^{sf} встановлює, що системи S_{qf}, належать класу *AMCL*:

$$AMCL = R^{sf}\{s_{qf1}, s_{qf2}, ..., s_{qfn}\}. \tag{14}$$



Р и с . 8. Модель операції об'єднання класів

При здійснені операції синтезу структури контуру керування додатково, внаслідок інтегративних процесів, виникають «унітарні» функції F_{Σ}^{u}. Сукупність усіх функцій системи в цілому і її компонентів з їх відносинами утворює функціональну структуру системи.

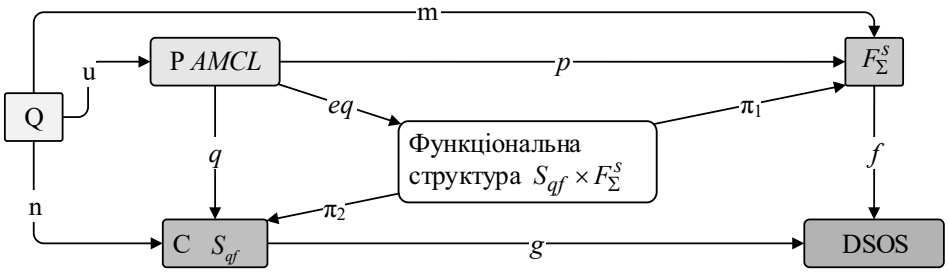
Операція синтезу функціональної структури, приведена на рис. 9, одержана з використанням декартового квадрату морфізму (розшарований добуток):

$$p : AMCL \to F_{\Sigma}^{S},\ q : AMCL \to S_{qf},$$
$$такі\ що :\ f \circ p\ =\ g \circ q$$
$$g : S_{qf} \to DSOS,\ \ f : F_{\Sigma}^{S} \to DSOS,$$
$$якщо :\ f \circ m = g \circ n \qquad (15)$$
$$m : Q \to F_{\Sigma}^{S}, n : Q \to S_{qf},$$
$$такі\ що :\ \ p \circ u = m,\ \ q \circ u = n\ .$$

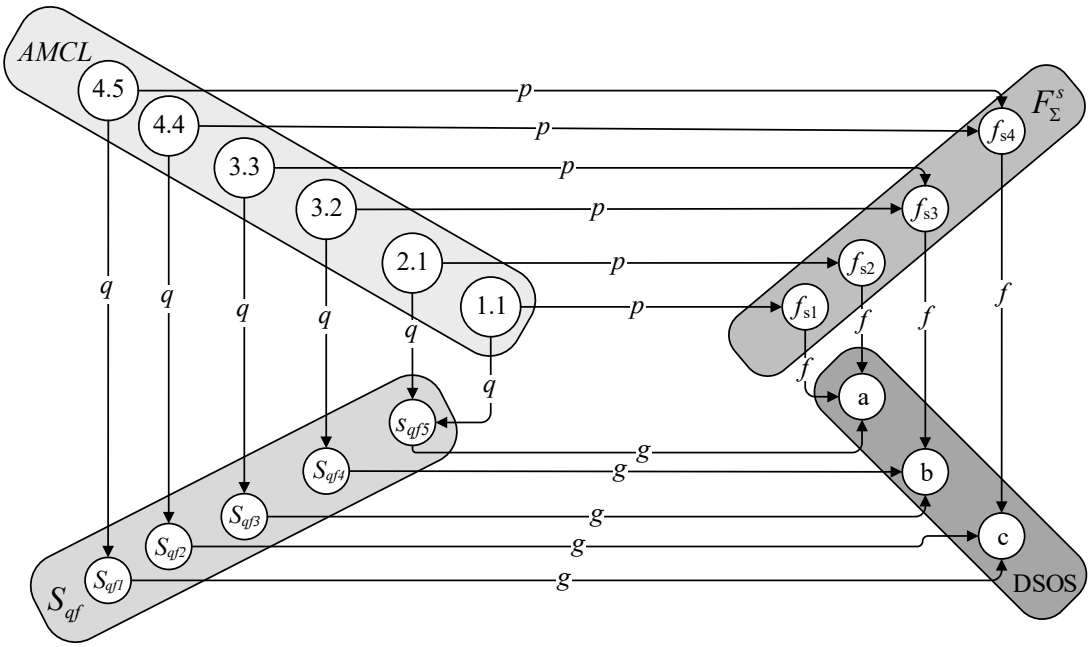
Декартів квадрат обчислюється наступним чином. Спочатку отримуємо варіант побудови функціональної структури (ФС) як добуток об'єктів $S_{qf} \times F_{\Sigma}^{s}$, а потім виконуємо порівняння для двох паралельних морфізмів: $f \circ \pi_1$, $g \circ \pi_2$. Об'єкт порівняння – це і є клас *AMCL*.

Морфізми p і q обчислюються як: $\pi_1 \circ eq = p$, $\pi_2 \circ eq = q$, тобто перевіряється відображення одержаної ФС на множини вихідних системи і потрібних для реалізації функцій.

На рис. 10 приведено варіант синтезу ФС. Клас *AMCL* містить пари елементів з множин S_{qf} (системи) і F_{Σ}^{s} (власні функції), але не всі можливі пари, а тільки такі, складові елементи яких функціями f і g відображаються на одні й ті ж елементи множини створюваної дата-центричної системи-систем *DSoS*. При цьому елементи множини *DSoS* демонструють наявність власних і появу унітарних функцій. Так на рис. 10, елемент $a \in DSoS$ є кодомом (codom a) для системи s_{qf5} і функцій f_{s1}, f_{s2}, що вказує на те, що дані функції є власними для цієї системи. Елементи $\{b,c\} \in DSoS$ є кодомами відповідно для систем s_{qf4}, s_{qf3} і функції f_{s3}, та систем s_{qf1}, s_{qf2} і



Р и с . 9. Модель операції синтезу функціональної структури з використанням декартового квадрату морфізму



Р и с . 10. Варіант синтезу функціональної структури

функції f_{s4}, що вказує на унітарний характер утворення цих функцій, відсутніх окремо у кожної з систем. Результатом синтезу є об'єкт *DSoS*, який задає перелік систем дата-центричної ЗРС і структуру інформаційних зв'язків, що забезпечують реалізацію необхідних для здійснення стрільби функцій.

Останнім шагом синтезу (рис. 1) є операція комплексування моделі контуру керування ракетою шляхом знаходження добутку об'єктів $F_{\Sigma}^{s} \times X_m$, $F_{\Sigma}^{s} \times Y_m$, тобто відображення множини функцій наземних засобів ЗРС на входи і виходи ракети:

$$\left\| c_{\text{ij}} \right\| = \left[F_s(S) \times X_m \right],\ c_{\text{ij}} = \begin{cases} 1, c_{\text{ij}} \in R^{sf} \\ 0, c_{\text{ij}} \notin R^{sf} \end{cases},$$
$$\left\| r_{\text{ij}} \right\| = \left[F_s(S) \times Y_m \right],\ r_{\text{ij}} = \begin{cases} 1, r_{\text{ij}} \in R^{sf} \\ 0, r_{\text{ij}} \notin R^{sf} \end{cases}. \quad (16)$$

де $c_{\text{j(k)}}$, $r_{\text{j(k)}}$ – відповідно відображення функцій засобів інформаційного забезпечення стрільби r_{ij} на входи та виходи моделі ракети.

ВИСНОВКИ

1. Сучасні дата-центричні ЗРС мають динамічно створювані вогневі і інформаційні канали, що потребує синтезу контуру керування безпілотними засобами ураження в реальному масштабі часу.

2. Динамічне формування контуру керування *UW* в залежності від вибраного способу стрільби потребує перебудови організаційно-технічної системи ЗРС у складі СЗРП.

3. В залежності від сформованої 4D-структури контуру керування *UW* і способу стрільби здійснюється трасування операційних станів і процесів при формуванні циклу стрільби ЗРК.

4. Створювана в реальному масштабі часу модель контуру керування використовується у процесі бойової роботи ЗРС.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Boyd, J. A Discourse on Winning and Losing. (2018). Available at: https://www.coljohnboyd.com/static/documents/2018-03__Boyd_John_R__edited_Hammond_Grant_T__A_Discourse_ on_Winning_and_Losing.pdf.
2. Гриб Д.А., Демідов Б.О., Довбня О.В. Управління структурною динамікою складних систем військового призначення у оперативно-тактичній обстановці, що динамічно змінюється. Наука і техніка Повітряних Сил ЗСУ. 2019. № 2(35). С. 16–26. https://doi.org/10.30748/nitps.2019.35.02.
3. Теоретичні основи побудови та застосування розвідувально-управляючих інформаційних систем протиповітряної оборони: монографія / Смірнов Є.Б., Ткаченко В.І., Рубан І.В., Малюга В.Г., Тристан А.В. Харків: ФОП Панов А.М. 2018. 162 с.
4. Skoryk, A., Niziienko, B., Dudush, A., Shulezhko, V. & Romanchenko, I. (2021). Evolution from the Network-Centric Warfare Concept to the Data-Centric Operation Theory. Advances in Military Technology. № 16(2). Pp. 219–234. https://doi.org/10.3849/aimt.01430.
5. 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.
6. Метод формування концептуальної моделі архітектури дата-центричної зенітної ракетної системи / А.Б. Скорик, С.П. Ярош, М.А. Павленко, О.Ф. Галицький, Д.О. Меленті, С.В. Осієвський. Системи обробки інформації. 2021. № 1(164). С. 89–103. https://doi.org/10.30748/soi.2021.164.10.
7. 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.
8. Harel, D. & Politi, M. (1998). Modeling reactive systems with statecharts. NY: McGraw-Hill. 258 p.
9. Category of sets. Available at: https://aresekb.github.io/categoricaljs/Set.html.
10. Computational Category Theory. Available at: https://www.cs.man.ac.uk/~david/categories/book/book.pdf.
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. Теория категорий на JavaScript. Ч. 1. Категория множеств. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://habr.com/ru/companies/cit/articles/313254.

REFERENCES

1. Boyd, J. A Discourse on Winning and Losing. (2018). Available at: https://www.coljohnboyd.com/static/documents/2018-03__Boyd_John_R__edited_Hammond_Grant_T__A_Discourse_ on_Winning_and_Losing.pdf.
2. Hryb, D., Demidov, B. & Dovbnia, O. (2019), "Upravlinnia strukturnoiu dynamikoiu skladnykh system viiskovogo pryznachennia u operatyvno-taktychnii obstanovtsi, shcho dynamichno zminiuietsia" [On the issue of a descriptive definition of the air defense system], Science and Technology of the Air Force of Ukraine. № 2(35). Pp. 16–26. https://doi.org/10.30748/nitps.2019.35.02.
3. Smirnov, Y., Tkachenko, V., Ruban, I., Malyuha, V. & Trystan, A. (2018). "Teoretychni osnovy pobudovy ta zastosuvannia rozviduvalno-upravliaiuchykh informatsiinykh system protypovitrianoi oborony: monografiia" [Theoretical bases of construction and application of reconnaissance and control information systems of air defense: monograph], FOP Panov A.M. Kharkiv. 162 p.
4. Skoryk, A., Niziienko, B., Dudush, A., Shulezhko, V. & Romanchenko, I. (2021). Evolution from the Network-Centric Warfare Concept to the Data-Centric Operation Theory. Advances in Military Technology. № 16(2). Pp. 219–234. https://doi.org/10.3849/aimt.01430.
5. Skoryk, A. & Yarosh, S. (2020), "Evoliutsiinyi 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], Scient. Works of Kharkiv Nat. Air Force Univ. № 4(66). Pp. 26–34. https://doi.org/ 10.30748/zhups.2020.66.03.
6. Skoryk, A., Yarosh, S., Pavlenko, A., Halyts'kyy, O., Melenti, D. & Osiyevs'kyy, S. (2021), "Metod formuvannia kontseptualnoi modeli arkhitektury data-tsentrychnoi zenitnoi raketnoi systemy" [Method of forming a conceptual architecture model for a data-centric air defense system], Information Processing Systems. № 1(164). Pp. 89–103. https://doi.org/10.30748/soi.2021.164.10.
7. 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.
8. Harel, D. & Politi, M. (1998). Modeling reactive systems with statecharts. NY: McGraw-Hill. 258 p.
9. Category of sets. Available at: https://aresekb.github.io/categoricaljs/Set.html.
10. Computational Category Theory. Available at: https://www.cs.man.ac.uk/~david/categories/book/book.pdf.
11. Doska, O. & Skoryk, A. (2011). "Strukturno-funktsionalne opysannia ZRS z vykorystanniam matematychnogo aparatu polikhromatychnykh mnozhyn" [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. Teoriia kategorii na JavaScript. Ch. 1. Kategoriia mnozhestv" [Category theory in JavaScript. P. 1. Category of sets]. Available at: https://habr.com/ru/companies/cit/articles/313254.

Skoryk A.B., Halytskyi O.F., Zvieriev O.O., Holovin O.O., Orlianskyi A.A.

METHOD OF SPATIAL-TEMPORAL SYNTHESIS OF THE CONTROL LOOP MODEL OF UNMANNED FLYING VEHICLES INTO A DATA-CENTRIC ADS

The article raises issues of development of the theory of data-oriented operations based on the methodology of the architectural approach in the creation of anti-aircraft missile systems. A method and model of synthesis of the model of unmanned aerial vehicle (UAV) control loop in the context of creating air defence missile systems (ADMS), unmanned weapons in an information-oriented automated control system, which is carried out during its operation in real time, are proposed.

The synthesis involves the selection of a firing method, tracking of operational states and processes during the formation of the SAM firing cycle, spatial and temporal decomposition of SAMs to determine the organisational and technical system of SAMs as part of an air defence missile system and the formation of a 4D control loop structure. For the defined 4D structure of the control loop, classes describing the main systems of the WME samples are formed, and functional models for the component parts (elements) of the WME are developed. A variant of docking models of individual samples of weapons and military equipment within the framework of synthesis of a complex model of the control scheme is proposed.

The article presents a general structural diagram of the method of spatio-temporal synthesis of the model of the control loop of an information-oriented automated control system, according to which the following are proposed 4D guidance loop structure synthesis scheme; system decomposition operation scheme; spatio-temporal decomposition operation scheme; spatio-temporal decomposition operation scheme (Systems-Centric Architecture, SCA); system integration operation scheme; missile control loop architecture optimisation scheme; SCA system architecture model; class association operation model; functional structure synthesis operation model.

Keywords: *control circuit, firing method, complex guidance model, air defense systems, architecture, unmanned aerial vehicle.*

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

Галицький Олег Феліксович
кандидат технічних наук, доцент
професор кафедри Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба
м. Харків, Україна
https://orcid.org/0000-0003-1083-8184
e-mail: olgalitsky@gmail.com

Звєрєв Олексій Олексійович
кандидат технічних наук, доцент,
заслужений винахідник України
провідний науковий співробітник науково-дослідного відділу розвитку радіотехнічних засобів 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

Головін Олексій Олександрович
доктор технічних наук, старший науковий співробітник
заступник начальника Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
https://orcid.org/0000-0003-4662-4559
e-mail: a_a_golovin@ukr.net

Орлянський Андрій Анатолійович
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/0009-0008-2574-5750
e-mail: orlyansky@ukr.net

Information about the authors:

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

Oleh Halytskyi
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Professor of the Department of Kharkiv National Air Force University named after Ivan Kozhedub
Kharkiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0003-1083-8184
e-mail: olgalitsky@gmail.com

Zvieriev Oleksii
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Honoured Inventor of Ukraine
Lead Researcher of Scientific Research Department of Development of Radio Equipment of Scientific Research Management of Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0003-2274-3115
e-mail: gans7995@gmail.com

Oleksii Holovin
Doctor of Technical Sciences, Senior Research
Deputy Chief of Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0003-4662-4559
e-mail: a_a_golovin@ukr.net

Orlianskyi Andrii
Research Associate of Scientific Research Department of Development of Surface-to-Air Missile Systems and Complexes of Scientific Research Management of Armament and Military Equipment of the Air Forces of Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
https://orcid.org/0009-0008-2574-5750
e-mail: orlyansky@ukr.net

Стаття надійшла до редколегії 14.05.2024.