

УДК 623.419:004.5

DOI: [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2026.1\(49\).76-83](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2026.1(49).76-83)**Р. М. ЖИВОТОВСЬКИЙ**, кандидат технічних наук
старший дослідник<https://orcid.org/0000-0002-2717-0603>

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

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИКИ ФОРМАЛІЗАЦІЇ ДАНИХ ДЛЯ ПОБУДОВИ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ ЗАСОБІВ ПОВІТРЯНОГО НАПАДУ

У статті запропоновано методику формалізації даних для побудови цифрових двійників засобів повітряного нападу: балістичних і крилатих ракет, керованих авіабомб та ударних безпілотних літальних апаратів одноразової дії. Теоретично окреслено базові поняття («вихідні дані», «формалізація», «інформаційний контур»), класифіковано дані (тактико-технічні характеристики, бортові системи, сценарії, телеметрія, математичні моделі) та сформовано критерії повноти/достовірності (джерело, узгодженість, похибка). Показано, що запропонована методика формалізації даних забезпечує системність, відтворюваність і масштабованість процесу створення цифрових двійників засобів повітряного нападу.

Ключові слова: методики формалізації даних, цифрові двійники, засоби повітряного нападу, балістичні та крилаті ракети, керовані авіаційні бомби, безпілотні літальні апарати.

ВСТУП

Актуальність теми зумовлена посиленням ролі цифрових двійників як ключового інструменту сучасного інженерного аналізу, моделювання й прийняття рішень у військовій сфері. Удосконалення засобів повітряного нападу (ЗПН) та поширення комплексних «ракетно-дронових» загроз висуває підвищені вимоги до достовірного прогнозування їх поведінки в реальних умовах бою, що неможливо досягти без уніфікованої методики збору, формалізації і верифікації вихідних даних. Розроблення такої методики дозволяє знизити витрати і ризики натурних випробувань, прискорити процес проектування і калібрування моделей, підвищити якість симуляцій для планування ударів, оцінювання уразливості й навчання особового складу. Крім того, уніфіковані формати даних і процедурні підходи сприяють сумісності моделей у межах «цифрового поля бою» та інтеграції з аналітичними і ШІ-інструментами для автоматичного оновлення двій-

ників. На фоні фрагментарності наявної нормативної бази і розрізненості джерел інформації, запропонована методика заповнює методичну прогалину й створює основу для відтворюваних, масштабованих і надійних цифрових моделей ЗПН.

РЕЗУЛЬТАТИ ПРОВЕДЕНОГО АНАЛІЗУ

За останнє десятиліття цифрові двійники (ЦД) (digital twins, DT) перетворилися з окремих дослідницьких ініціатив у фундаментальну парадигму цифрової інженерії та системного моделювання. У воєнно-технічній сфері цю трансформацію очолили ключові оборонні організації – зокрема, Департамент оборонних розробок США, що у своєму стратегічному документі «DoD Digital Engineering Strategy» формалізував прагнення до переходу на цифрові архітектури життєвого циклу озброєнь, уніфікації цифрових клонів та інтеграції моделей для забезпечення повторюваних, керованих інженерних процесів [1]. НАТО через свою організацію з науки і технологій (STO) активно досліджує питання розробки DT-архітектур для багатокомпонентних платформ і проблеми взаємосумісності моделей у багатонаціональному середовищі [2, 3]. Європейське оборонне агентство (EDA) ініціює проекти щодо прикладного застосування ЦД у різних бойових доменах, зосереджуючись на концептах інтеграції, інтероперабельності та обміну даними між службами й країнами-членами [4].

Китайські публікації та аналітичні матеріали свідчать про активну інтеграцію ідей цифрових двійників у концепції «інтелектуалізації» ведення бойових дій та модернізації Збройних Сил КНР, зокрема в контексті підвищення ефективності моделювання та прогнозування результатів застосування високоточної зброї [5]. Водночас, міжнародні підходи відрізняються за ступенем відкритості: у НАТО й ЄС великий наголос робиться на стандартах, сумісності та спільних тест-середовищах; у США – на інтеграції ЦД у процеси закупівель і життєвого циклу; в Китаї – на швидкому впровадженні ЦД як частини національної стратегії «інтелектуалізації» оборони [1-5].

Цивільні кейси у галузі створення цифрових двійників демонструють готові технології й методики, корисні для військового застосування. Такі провідні промислові компанії, як Siemens, GE, Boeing тощо реалізують концепцію цифрових двійників для складних технічних систем, що включає моделювання аеродинаміки, двигунів, їх експлуатаційних режимів і прогнозної діагностики [6, 7]. Галузеві підходи передбачають: формалізовані формати даних і master-data management (методологія та технологічна архітектура для створення єдиного джерела правдивих даних про ключові об'єкти системи, що забезпечує цілісність, сумісність і керованість даних у всіх підсистемах цифрового середовища); інтеграцію CAD/CAE/PLM/ІoT; використання HIL/SIL для тестування програмного забезпечення та алгоритмів; застосування аналітики і ШІ для предиктивного обслуговування. Ці методи є релевантними для побудови ЦД ЗПН, оскільки дозволяють поєднати фізичні моделі (аеродинаміка, термодинаміка), бортові вимірювання (телеметрія) і оперативні сценарії в єдиному інформаційному контурі [6, 8, 9].

В Україні нарощується нормативна підтримка окремих компонентів технологій цифрового двійника: прийняття національних версій міжнародних стандартів щодо BIM (Building Information Modeling), обміну даними та архітектурних підходів, що засвідчує наявність технічної бази для формалізації деяких класів метаданих і структури даних (наприклад, впровадження національних варіантів ISO/TS 12911 та суміжних документів) [10]. Академічні та прикладні дослідження українських закладів (наприклад, дисертаційні роботи та наукові огляди) вже розглядають особливості реалізації DT-технологій у наших умовах, зокрема питання подання мультимодальних тимчасових даних і інтеграції локальних телеметричних джерел [11, 12]. Проте в українських нормативних документах поки відсутні спеціалізовані документи, які б детально регламентували формалізацію технічних даних для озброєння та військової техніки (ОВТ) або задавали міжсекторні правила обміну критеріями довіри до даних у контексті ЦД. Наявні ДСТУ частково регламентують окремі аспекти (BIM, GIS, формати даних), але не забезпечують повного набору правил і процедур, необхідних для створення та валідації ЦД зразків ОВТ у масштабах підрозділу чи об'єднаного поля бою [9–11].

На основі проведеного аналізу можна виділити наступні слабкі місця щодо стандартизації ЦД для ОВТ: відсутність уніфікованих національних стандартів щодо метаданих телеметрії та тактикотехнічних характеристик ОВТ; недостатня нормативна база для верифікації та сертифікації DT-моделей у військовому застосуванні; обмежена робота над питаннями міжоперабельності ЦД між різними постачальниками та союзними партнерами (інтероперабельність моделей, форматів, семантики даних); недостатній акцент на процедурній частині оброблення класифікованих даних у DT-контексті (політика доступу, еталони довіри тощо) [2, 3, 9]. Зазначені слабкі місця уможливають ситуацію, коли технічні інструменти існують, але їх прикладне застосування в оборонній сфері уніфіковано не регламентоване, що підвищує ризики помилок при інтеграції моделей і зменшує довіру до результатів симуляцій.

Отже, поточний аналіз демонструє, що попри наявність потужних методологічних підходів та технічних рішень у провідних країнах, існує суттєва потреба у формалізації вітчизняних методик з чіткою специфікацією форматів даних, процедур валідації/верифікації та правил інтеграції телеметрії й експериментальних даних у ЦД для ОВТ. Відсутність таких прикладних методик ускладнює відтворюваність і достовірність моделей, обмежує можливості масштабного використання ЦД в інтересах Сил оборони України і вимагає системного підходу до розроблення стандартів, що поєднують міжнародні практики з національними вимогами безпеки та доступності даних.

Метою статті є розроблення методики формалізації даних для побудови цифрових двійників ЗПН, що забезпечує достовірне моделювання та інтеграцію з цифровим бойовим простором.

Теоретичні аспекти формалізації даних для побудови цифрових двійників засобів повітряного нападу

Відповідно логіки викладення наведених в статті результатів дослідження розглянемо визначення наступних понять: «вихідні дані», «формалізація» та «інформаційний контур цифрового двійника».

Вихідні дані – це сукупність параметрів, характеристик і вимірювань, які відображають фізичні, технічні та функціональні властивості реального об'єкта, у даному випадку ЗПН (ракети, безпілотний літальний апарат, пускової установки тощо) та використовуються для створення її цифрової копії [14].

Формалізація означає упорядкування, кодування і представлення цих даних у структурованому, машинно-читабельному вигляді, який дозволяє здійснювати математичне моделювання, симуляцію та аналітичні розрахунки без втрати семантики і точності [15].

Під інформаційним контуром цифрового двійника розуміється інтегрована система зв'язків між підсистемами збирання, оброблення, зберігання, передавання й аналізу даних, що забезпечує безперервний обмін інформацією між реальним об'єктом і його цифровою моделлю [16]. Такий контур охоплює сенсорні джерела (телеметрія, датчики), програмно-аналітичні модулі (моделі аеродинаміки, управління, РЕБ) та інтерфейси з системами командування, логістики і технічного забезпечення.

Вище наведений аналіз науково-методичних розробок та нормативної бази дозволив визначити інструменти та підходи, які можуть бути використані у подальшому. Наступним завданням стає формалізація вихідних даних та технічних характеристик ЗПН, що досліджуються, оскільки саме цей етап відкриває можливість переходу до практичного моделювання.

Формалізація вихідних даних та тактико-технічних характеристик (ТТХ) досліджуваних зразків зброї є ключовим етапом у процесі побудови цифрових клонів. Саме на цьому етапі здійснюється систематизація та уніфікація інформації щодо конструктивних параметрів, функціональних можливостей і режимів застосування балістичних і крилатих ракет (БР, КР), керованих авіаційних бомб (КАБ) та ударних безпілотних літальних апаратів (БпЛА) одноразового використання. Визначення чіткої структури даних забезпечує коректність подальшого математичного та програмного моделювання, а також дозволяє узгодити параметри цифрових моделей із реальними зразками озброєння.

З огляду на складність і багатокomпонентність об'єктів дослідження, формалізація даних включає встановлення єдиних форматів представлення ТТХ, визначення критичних параметрів, що впливають на бойову ефективність, та врахування обмежень, пов'язаних із доступністю інформації. Такий підхід дозволяє не лише підвищити достовірність майбутніх розрахунків, а й створює основу для багаторазового використання цифрових моделей у різних сценаріях бойового застосування.

Зазвичай, у межах формалізації даних для ЦД ЗПН важливим є створення стандартизованої моделі даних, яка б дозволяла забезпечити узгодженість між фі-

зичними вимірюваннями, математичними моделями та операційними сценаріями їх застосування. Процес формалізації даних для побудови ЦД ЗПН передбачає розподіл вхідної інформації за категоріями, що відображають функціональну структуру ЗПН. В табл. 1 наведено типовий структурований перелік вихідних даних, їх приклади та джерела отримання, на основі яких можна будувати цифрові клони та моделі застосування ЗПН.

Отже, формалізація вихідних даних та ТТХ ЗПН є незаперечною передумовою для побудови адекватних цифрових клонів: систематизований, уніфікований і

верифікований набір параметрів забезпечує коректність математичних моделей, відтворюваність симуляцій та співставність результатів між різними програмними середовищами. Виділені категорії даних, від детальних ТТХ і описів бортових систем до геоданих, експериментальної телеметрії та нормативно-довідкової інформації, покривають весь інформаційний контур, необхідний для повноцінного представлення фізичної системи у цифровому просторі. Кожна з категорій має свою роль і вагу при моделюванні (наприклад, точність навігаційних моделей прямо залежить від якості даних INS/GNSS, а

Таблиця 1. Систематизація структури вихідних даних для цифрових двійників ЗПН

| Категорія даних | Приклади | Джерела отримання |
|--|---|---|
| ТТХ зразків | Класи/типи (БР, КР, КАБ, БпЛА-камікадзе); маса/габарити; дальність/швидкість/висота; двигун і паливо; тип/маса БЧ; профіль польоту | Виробники (datasheet, брошури), оборонні каталоги (Jane's, SIPRI Yearbook), публічні оборонні контракти, відкриті технічні описи (CSIS Missile Threat), наукові статті |
| Бортові системи та канали | INS/GNSS/астронавігація; автопілот і алгоритми керування; РЛС (активна/пасивна), радіовисотомір; телеметрія, протоколи зв'язку; завадостійкість | STANAG/MIL-STD, технічні мануали та патенти, наукові публікації з навігації/РЕБ, звіти про науково-технічну експертизу та оперативні завдання командування ЦНДІОВТ ЗСУ, звіти НАТО/EDA/DoD, матеріали конференцій ION/IEEE/AIAA |
| Сценарії бойового застосування | Типи цілей (стаціонарні/рухомі); рівень захищеності (укріплені, ППО/РЕБ); профілі ударів (одиначні/масовані/комбіновані); умови ТВД | Польові настанови та доктрини (NATO AJP, JP), відкриті аналітичні огляди, звіти про конфлікти, тренувальні сценарії, навчально-методичні матеріали |
| Геодані та середовище | Рельєф (SRTM/DTED), карти місцевості, тип поверхні; метео (ERA5, GFS); магнітне/гравітаційне поле; морські умови (хвилювання, вітер) | Відкриті геопортали (USGS, Copernicus), метеослужби (ECMWF, NOAA), наукові реєстри, національні геодезичні служби |
| Експериментальні/польові дані | Телеметрія випробувань; траєкторії; відхилення/СЕР; журнали подій; дані вібро- та температурних навантажень | Полігонні звіти та протоколи, реєстратори бортових систем, стрілецькі/льотні випробування, стендові тести, ГНСС-трекінг |
| Математичні/фізичні моделі | 3DOF/6DOF динаміка; аеродинаміка; моделі двигунів (Брегета, імпульс/витрата); моделі наведення/фільтрації; РЛ-розсіювання/RCS | Підручники/монографії з балістики/аеродинаміки, AIAA/IEEE/ASME публікації, довідники, відкриті бібліотеки (NASA, NRL), академічні курси |
| Моделі навігації/керування | Алгоритми INS/GNSS-інтеграції (Kalman/UKF), автопілот/трекінг, guidance & control, компенсація вітру/похибок, логіка переходів | Наукові статті ION/AIAA/IEEE, дисертації, відкриті реалізації (MATLAB/Simulink toolboxes), патенти, навчальні матеріали виробників сенсорів |
| Моделі РЛС/РЕБ та зв'язку | Виявлення/супроводження (CFAR, трекари), канали даних (link budget), моделі перешкод, завадозахищені протоколи, антиперешкодні GNSS | STANAG/MIL-STD, підручники з РЛС/РЕБ, NATO STO звіти, IEEE RadarConf, матеріали виробників РЛ-станцій і приймачів |
| Валідація/верифікація цифрового двійника | Порівняння з полігонними пусками; калібрування параметрів; чутливісний аналіз; Monte-Carlo; оцінка точності (СЕР, σ) | Стандарти V&V (IEEE/AIAA), методичні рекомендації DoD/NASA, результати контрольних пусків, незалежні аудити/рев'ю |
| Інструменти ПЗ та цифровий контур | MATLAB/Simulink, Modelica, ANSYS/CFD/FEA, STK/AGI, OpenFoam, ROS; PLM/MBSE (SysML), digital thread/data lake | Вендорна документація (MathWorks, Ansys, AGI), керівництва MBSE (INCOSE), репозиторії GitHub, навчальні курси |
| Нормативно-довідкова база | STANAG, MIL-STD, AOP; довідники з балістики/аеродинаміки; технічні регламенти; настанови з експлуатації | NATO Standardization Office, DoD ASSIST, нац. стандартизація, бібліотеки університетів/МО, виробники |
| Обмеження/вихідні умови | Діапазони похибок сенсорів; енергетичні/масові ліміти; часові затримки каналів; класифікаційні обмеження даних | Технічні ТЗ/SoR, паспорти виробів, стандарти якості/безпеки, політики доступу до даних |
| Цивільні аналоги та best practices | Авіаційні ДТ (двигуни/планер), автопілот авто/БпЛА, цифрові полігони (HIL/SIL), predictive maintenance | Boeing/GE/Rolls-Royce кейси, Siemens/Simcenter/PLM, ISO/IEC 30182/30147, галузеві журнали та кейс-стаді |
| Джерела відкритої інформації про ракети | Missile Threat (CSIS), Jane's, The Drive/WarZone (аналітика), SIPRI, офіційні релізи МО/вендорів | CSIS, Janes, SIPRI, прес-релізи ВПЦ/ВМС/вендорів, наукові бази (IEEE/AIAA/Scopus) |

адекватність моделі ураження – від достовірності параметрів бойової частини та профілю траєкторії).

Уніфікація форматів представлення і виокремлення критичних параметрів дають змогу перейти від розрізнених технічних описів до єдиної інформаційної моделі. Це спрощує обмін даними між модулями цифрового двійника, дозволяє автоматизувати процедури калібрування та валідації, а також створює передумови для масштабування (масової серії симуляцій, інтеграції в цифрове поле бою, об'єднання з двійниками інших систем). Одночасно, системний підхід до класифікації вихідних даних дозволяє чітко формулювати припущення і межі застосовності моделі – що критично для трактування результатів симуляцій і прийняття інженерних рішень.

Практична ефективність цифрових двійників значною мірою залежить від наявності емпіричних і полігонних даних для калібрування: без регулярного підживлення моделей реальною телеметрією і результатами випробувань ризик невідповідності між віртуальним і фізичним поведінками залишається суттєвим. Тому запропонована методика має включати не лише формалізацію статичних ГТХ, а й процедури збору, попереднього оброблення й інтеграції польотної телеметрії, журналів подій і стендових тестів; окрему увагу слід приділити документуванню джерел і ступеню довіри до кожного набору даних.

Окремою складовою формалізації є врахування обмежень: технічних (похибки сенсорів, часові затримки каналів), організаційних (доступність і класифікація даних) та фізичних (енергетичні ліміти, масові обмеження). Явне включення цих обмежень у структуру вихідних даних дозволяє коректно формулювати сценарії “worst-case” та виконувати чутливий аналіз (наприклад, Monte-Carlo), необхідний для оцінки стійкості рішень у реальних умовах. Формалізація вихідних даних створює не лише технічну, але й методичну платформу для подальших етапів дослідження: розробки математичних моделей руху і аеродинаміки, реалізації модулів навігації і РЕБ, інтеграції в програмне середовище симуляції та валідації цифрових клонів. Рекомендовано на цьому етапі затвердити єдиний набір метаданих і форматів, визначити мінімальний «обов'язковий» перелік параметрів для кожного класу зразків і закласти процедурні вимоги до джерел даних та їхньої верифікації – це забезпечить системність, відтворюваність і надійність подальших наукових та інженерних результатів.

Процес формалізації можна представити у вигляді структурної схеми, де кожен клас даних є окремим блоком із визначеними зв'язками. Умовно її можна подати як багаторівневу систему (рис. 1): рівень 1 – первинні дані: ГТХ, експериментальні вимірювання, телеметрія; рівень 2 – аналітичні моделі: аеродинамічні, баллістичні, навігаційні, енергетичні; рівень 3 – інтеграційні модулі: алгоритми керування, симуляція сценаріїв, прогнозні моделі; рівень 4 – інтерфейс взаємодії: візуалізація, обмін із цифровим полігоном, зворотний зв'язок у реальному часі.

Ця схема (рис. 1) ілюструє потенційну можливість узгодженості між блоками: дані телеметрії слугують



Рис. 1. Структурна схема формалізації даних для побудови ЦД ЗПН

базою для уточнення моделей, моделі – для прогнозування поведінки системи, а сценарії – для верифікації достовірності прогнозів [17].

Відомо, що повнота даних визначається наявністю всіх необхідних параметрів, що впливають на функціонування системи (наприклад, для ракети – коефіцієнтів підйомної сили, маси палива, характеристик системи керування). Тому достовірність пропонуємо оцінювати за трьома основними критеріями: джерело походження – наявність перевірених або сертифікованих джерел (військові стандарти, результати випробувань); рівень узгодженості – відсутність суперечностей між різними наборами даних (наприклад, між польотними логами і моделями динаміки); оцінка похибок – статистичне порівняння прогнозованих і вимірених параметрів. В цьому випадку доцільно використовувати методи чутливого аналізу та багатофакторного порівняння (Monte Carlo, RMSE, NRMSE) для кількісного оцінювання відповідності моделей реальним даним [18].

Побудована структурна схема формалізації даних (рис. 1) відображає логіку перетворення вихідної інформації в уніфікований цифровий контур, що забезпечує узгодженість параметрів на всіх етапах створення ЦД ЗПН. Наступним кроком є розуміння алгоритму узгодження даних між різними джерелами – телеметрія ↔ модель ↔ сценарій бойового застосування. Такий алгоритм забезпечує цілісність інформаційного простору, коректність симуляцій і достовірність результатів моделювання. Для забезпечення точності ЦД ЗПН формується цикл узгодження даних, який охоплює такі етапи: попередня інтеграція: збирання телеметричних і статичних параметрів, їх перетворення у єдиний формат (наприклад, JSON/XML); нормалізація: перерахунок одиниць виміру, фільтрація шумів, синхронізація часових міток; калібрування моделі: коригування параметрів математичних моделей на основі реальних польотних даних; валідація: порівняння результатів симуляцій зі спостережуваними даними для оцінювання похибок; зворотне оновлення: внесення змін у сценарії або моделі відповідно до результатів аналізу відхилень.

Слід відзначити, що такий підхід відповідає сучасним принципам Digital Thread і Model-Based Systems Engineering (MBSE), які реалізуються у стандартах ISO 23247 та рекомендаціях INCOSE SE Handbook [19, 20]. Узгодженість між телеметрією, моделлю і сценарієм забезпечує можливість автоматичного оновлення цифрового двійника при надходженні нових даних, що підвищує його адаптивність та аналітичну цінність.

Після теоретичного осмислення понять, класифікації даних та критеріїв їх достовірності логічним продовженням є виклад практичної методики – покрокового опису основних етапів і процедур формалізації даних, необхідних для побудови придатних до валідації ЦД ЗПН.

Основні етапи та сутність методики формалізації даних для створення цифрових двійників засобів повітряного нападу

Методика формалізації даних для створення ЦД ЗПН спрямована на забезпечення повноти, узгодженості та відтворюваності цифрового представлення складних технічних систем – зокрема, балістичних і крилатих ракет, КАБ та ударних БпЛА одноразового використання. Її структура побудована на принципах системного підходу, цифрової інженерії та наскрізної інтеграції даних у межах життєвого циклу зразка озброєння.

Запропонована методика складається з шести логічно взаємопов'язаних етапів (рис. 2): ідентифікації об'єкта моделювання; збору і класифікації даних; формалізації уніфікованих форматів представлення; створення бази даних і цифрового інтерфейсу обміну; валідації та верифікації даних; реалізації програмно-алгоритмічного забезпечення. Важливо розуміти, що кожен етап виконує окрему функцію в логіці переходу від реального зразка ЗПН до цифрової моделі (ЦД), здатної до симуляції, аналітики й інтеграції в середовище цифрових полігонів. Розглянемо більш детально сутність та особливості кожного з етапів методики.

На першому етапі здійснюється системна ідентифікація ЗПН – визначення його типу, складу, рівня деталізації та меж моделі. Наприклад, для ракет класу «земля-земля» визначається структура комплексу (ракета, пускова установка, система управління, ТЗМ, КП), фізико-механічні параметри корпусу, бойова частина, двигун, аеродинамічна схема та система наведення. Для ударного БпЛА – конфігурація планера, тип рушія, тип бойової частини, система автопілоту, телеметричний блок, канали зв'язку, навігаційна підсистема.

На основі аналізу завдань моделювання визначається рівень деталізації ЦД: макрорівень – загальна динаміка польоту, профіль траєкторії; мікрорівень – моделі систем керування, аеродинамічні коефіцієнти, поведінка двигуна. Вибір рівня залежить від мети: навчання, балістичне моделювання, дослідження РЕБ або аналіз стійкості до відмов.

Другий етап передбачає збір та класифікацію даних. Дані формуються з кількох категорій джерел – відкриті джерела: технічні паспорти, довідники Jane's, Missile Threat (CSIS), STANAG, MIL-STD, ISO 23247, публікації IEEE/AIAA, аналітичні звіти оборонних відомств; експериментальні результати: телеметричні записи, журнали полігонних випробувань, дані стендових тестів, результати випробувань електроніки й навігації; нормативні

документи: національні стандарти (ДСТУ ISO 19650, ДСТУ 3973), військові технічні умови, документи системи допусків і перевірок.

Для кожного типу ЗПН створюється класифікаційна матриця параметрів, що охоплює: масо-габаритні, аеродинамічні, енергетичні характеристики; параметри систем навігації та управління (INS/GNSS, автопілот, фільтри Калмана); телеметричні показники (висота, швидкість, перевантаження, оберти, температура); сценарні змінні (тип цілі, відстань, умови ППО, метеофактори). На цьому етапі також формується паспорт об'єкта моделювання, який описує джерела, формат, точність і достовірність кожного набору даних.

Третій етап є ключовим для побудови інтероперабельної інформаційної бази. Дані перетворюються у стандартизовані структури – XML, JSON, CSV або SQL-таблиці, які забезпечують сумісність із CAD/PLM/CAE-середовищами.

Для ТТХ застосовується формат XML з тегами: <mass>, <range>, <speed>, <payload>, <engine_type>, <guidance_system>. Для телеметрії та навігаційних параметрів – JSON-структури, наприклад: {time: "02:35:20", altitude: 1389, velocity: 180, heading: 174.6, pitch: 11.1}. Для результатів випробувань – CSV-формати, придатні для аналітичної обробки у MATLAB або Python.

На цьому етапі формується словник метаданих (metadata schema), який визначає одиниці вимірювання, типи даних, точність, часові мітки та рівень довіри до джерела. Це створює основу для побудови «цифрової нитки» (*Digital Thread*), що об'єднує всі елементи життєвого циклу системи.

На четвертому етапі формалізовані дані інтегруються у базу даних ЦД, побудовану за принципом наскрізного управління даними (*Product Lifecycle Management*). Структура бази включає такі рівні: рівень фізичних параметрів (ТТХ, геометрія, матеріали); рівень функціональних моделей (динаміка, алгоритми керування, профілі польоту); рівень сценаріїв застосування (бойові умови, метео, ППО/РЕБ); рівень результатів моделювання і телеметрії.

Обмін даними може бути реалізований через інтерфейси Digital Thread, що забезпечують взаємодію з CAD (CATIA, SolidWorks), симуляційними системами (MATLAB/Simulink, ANSYS, STK/AGI) та платформами аналітики. Для оперативного моніторингу передбачено REST API з підтримкою JSON та MQTT протоколів.

П'ятий етап гарантує достовірність цифрової моделі через багаторівневу перевірку: верифікація – перевірка відповідності формалізованих даних технічній документації та фізичним параметрам; валідація – порівняння результатів моделювання з телеметриєю або полігонними пусками; чутливісний аналіз (*Sensitivity analysis*) – оцінка впливу похибок окремих параметрів (наприклад, по-



Рис. 2. Основні етапи методики формалізації даних для створення ЦД ЗПН

хибки датчиків $INS \pm 0,05^\circ/\text{год.}$) на траєкторію польоту; статистичне тестування – перевірка розподілу похибок (методи χ^2 , t-тест), оцінка кореляційних залежностей між параметрами швидкості, висоти, кута атаки. Результатом цього етапу є паспорт достовірності моделі, який фіксує ступінь відповідності ЦД реальному об'єкту.

На шостому етапі для реалізації методики формалізації може бути використований комплекс наступних інструментальних засобів: MATLAB/Simulink – побудова математичних моделей динаміки польоту, систем керування, фільтрів навігації; Python (NumPy, Pandas, SciPy) – оброблення масивів телеметричних даних, валідація, візуалізація; Ansys, COMSOL – моделювання аеродинаміки, теплових навантажень, структурної міцності; STK/AGI – візуалізація траєкторій, аналіз покриття сенсорів, прогноз результатів місії; PostgreSQL / MongoDB – реалізація баз даних для Digital Twin; Unity3D / Unreal Engine – 3D-візуалізація цифрових полігонів. Сукупність цих засобів утворює програмно-алгоритмічний контур ЦД, який інтегрує математичні, інформаційні й симуляційні моделі.

Таким чином, запропонована методика формалізації даних забезпечує системність, відтворюваність і масштабованість процесу створення ЦД ЗПН. Її реалізація дозволяє: інтегрувати дані з різнорідних джерел у єдиний цифровий контур; забезпечити верифікованість і достовірність параметрів; створити базу для аналітичного моделювання, прогнозування та навчання персоналу у віртуальному середовищі. Методика є універсальною і може адаптуватися для різних класів засобів ураження – від балістичних ракет до ударних БпЛА дальньої дії – з урахуванням специфіки їхніх систем управління, навігації та профілів польоту.

Напрямами подальших досліджень є експериментальна валідація цифрових двійників на полігоні, кількісне оцінювання невизначеності та стійкості моделей (UQ, sensitivity analysis) та розроблення єдиного мета-даного-шаблону (schema) та національних рекомендацій з формалізації ТТХ.

ВИСНОВКИ

1. В статті встановлено, що формалізація вихідних даних і ТТХ ЗПН забезпечує єдину інформаційну основу для побудови цифрових двійників і коректного моделювання. Визначено повний перелік необхідних категорій даних – від детальних ТТХ та описів бортових систем до геоданих, сценаріїв застосування, емпіричної телеметрії й нормативно-довідкової бази – що дозволяє репрезентувати реальні зразки у цифровому просторі без втрати суттєвих характеристик. Уніфікація форматів та виокремлення критичних параметрів підвищують відтворюваність симуляцій, спрощують калібрування й валідацію моделей та готують підґрунтя для масштабування експериментів і інтеграції з іншими цифровими системами. Показано важливість регулярного підживлення моделей даними випробувань і реальної експлуатації, без чого зростає ризик розходжень між віртуальною та фізичною поведінкою. Окремо враховано технічні, організаційні й фізичні обмеження, що дозволяє коректно формувати «найгірші» сценарії та

виконувати чутливий аналіз. Сукупно це створює методичну і технічну платформу для наступних етапів – розроблення математичних моделей, модулів навігації та РЕБ, побудови контурів верифікації – й дозволяє рекомендувати затвердження єдиного набору метаданих, мінімального обов'язкового переліку параметрів та процедур верифікації джерел як стандарту подальших робіт.

2. Визначено, що теоретичні аспекти формалізації даних визначають концептуальний каркас побудови ЦД ЗПН. Системна класифікація, структурна схема взаємодії підсистем, критерії повноти та достовірності, а також алгоритм узгодження між різними джерелами дозволяють забезпечити єдність фізичної, аналітичної та симуляційної реальностей. Розроблена теоретична база створює підґрунтя для практичної реалізації ЦД у військово-технічних дослідженнях і для подальшого впровадження у стандартизовані процеси цифрової інженерії оборонних систем.

3. Показано, що запропонована методика формалізації даних забезпечує системність, відтворюваність і масштабованість процесу створення ЦД ЗПН. Її реалізація дозволяє: інтегрувати дані з різнорідних джерел у єдиний цифровий контур; забезпечити верифікованість і достовірність параметрів; створити базу для аналітичного моделювання, прогнозування та навчання персоналу у віртуальному середовищі. Методика досить універсальна та адаптивна для різних класів засобів ураження – від балістичних ракет до ударних БпЛА дальньої дії – з урахуванням специфіки їхніх систем управління, навігації та профілів польоту.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Office of the Under Secretary of Defense for Research and Engineering. Digital Engineering Strategy (Approved Print Version). Washington, D.C. 2018. Available at: https://ac.cto.mil/wp-content/uploads/2019/06/2018-Digital-Engineering-Strategy_Approved_PrintVersion.pdf (accessed: 01.10.2025).
2. NATO Science & Technology Organization. Digital Twin Technology Development and Application for Tri-Service Platforms and Systems (STO report). Available at: <https://www.sto.nato.int/document/digital-twin-technology-development-and-application-for-tri-service-platforms-and-systems/> (accessed: 01.10.2025).
3. NATO STO. Working on the problem of digital twin interoperability (STO publication). Available at: <https://www.sto.nato.int/document/working-on-the-problem-of-digital-twin-interoperability> (accessed: 01.10.2025).
4. European Defence Agency (EDA). EDDI – EDA study on the use of digital twins for military use (project materials/news). Available at: <https://www.flysiht.it/explore-defence-digital-twins-eddi-eda-study-for-the-next-four-years/> (огляд) (accessed: 01.10.2025).
5. Baughman, J. (2024). The Path to China's Intelligentized Warfare (analytical article). The Cyber Defense Review, Fall. Available at: https://cyberdefensereview.army.mil/Portals/6/Documents/2024-Fall/Baughman_CDRV9N3-Fall-2024.pdf (accessed: 01.10.2025).
6. Siemens, A.G. Digital Twin (official product/technology overview). Available at: <https://www.siemens.com/digital-twin> (accessed: 01.10.2025).

7. Li, L. et al. (2021). Digital Twin in Aerospace Industry: A Gentle Introduction. White Rose Research Online. Available at: https://eprints.whiterose.ac.uk/id/eprint/226986/1/Digital_Twin_in_Aerospace_Industry_A_Gentle_Introduction.pdf (accessed: 01.10.2025).
8. Siemens. Smart Manufacturing – White Paper (Digital Twin applications in manufacturing). Available at: https://www.plm.automation.siemens.com/media/global/it/Smart%20Manufacturing%20-%20White%20paper_tcm56-104562.pdf (accessed: 01.10.2025).
9. NATO Modelling and Simulation Group. Modelling and Simulation guidance and CPoW materials (overview). Available at: <https://www.sto.nato.int/the-collaborative-programme-of-work-cpow/modeling-and-simulation/nato-modelling-simulation-group/> (accessed: 01.10.2025).
10. ДП «УкрНДНЦ». DSTU ISO/TS 12911:2020. Структура стандартів будівельного інформаційного моделювання (BIM) (національна адаптація). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=96207 (дата звернення: 01.10.2025).
11. Сулема С.С. Цифрові двійники: подання та обробка темпоральних мультимодальних даних. Дис. ... канд. техн. наук. НТУ України «КПІ». 2020. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/37251/1/Sulema_diss.pdf (дата звернення: 01.10.2025).
12. Розроблення моделі застосування (створення цифрових клонів) балістичних та крилатих ракет (наземного, повітряного та морського базування), керованих авіаційних бомб, ударних БпЛА одноразового використання далекої дії в ході ураження наземних об'єктів при різних комбінаціях роботи бортових систем навігації, радіолокації, телеметрії та управління. Звіт щодо виконання оперативного завдання № 1В-25-041. Київ: ЦНДІ ОВТ ЗСУ. 2025. 161 с.
13. Liu, Y., et al. (2024). A review of digital twin capabilities, technologies, and applications. *J. of Manufacturing Systems*. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1474034624002404> (accessed: 01.10.2025).
14. Grieves, M. & Vickers, J. (2017). Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. Cham: Springer. 27 p.
15. Tao, F., Qi, Q., Liu, A. & Kusiak, A. (2019). Data-driven smart manufacturing. *J. of Manufacturing Systems*. Vol. 48. Pp. 157–169. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.01.006>.
16. ISO 23247-1:2021. Automation systems and integration – Digital Twin framework for manufacturing. Geneva: Intern. Organization for Standardization. 2021. 36 p.
17. Siemens, A.G. Digital Twin Integration Framework. Available at: <https://www.siemens.com/digital-twin>.
18. Montgomery, D.C. & Runger, G.C. (2018). Applied Statistics and Probability for Engineers. Hoboken: Wiley. 792 p.
19. INCOSE Systems Engineering Handbook. Hoboken: Wiley. 2023. 672 p.
20. ISO/IEC 30182:2017. Smart city concept model — Guidance for establishing a model for data interoperability. Geneva: Intern. Organization for Standardization. 2017. 28 p.

REFERENCES

1. Office of the Under Secretary of Defense for Research and Engineering. Digital Engineering Strategy (Approved Print Version). Washington, D.C. 2018. Available at: https://ac.cto.mil/wp-content/uploads/2019/06/2018-Digital-Engineering-Strategy_Approved_PrintVersion.pdf (accessed: 01.10.2025).
2. NATO Science & Technology Organization. Digital Twin Technology Development and Application for Tri-Service Platforms and Systems (STO report). Available at: <https://www.sto.nato.int/document/digital-twin-technology-development-and-application-for-tri-service-platforms-and-systems/> (accessed: 01.10.2025).
3. NATO STO. Working on the problem of digital twin interoperability (STO publication). Available at: <https://www.sto.nato.int/document/working-on-the-problem-of-digital-twin-interoperability> (accessed: 01.10.2025).
4. European Defence Agency (EDA). EDDI – EDA study on the use of digital twins for military use (project materials/news). Available at: <https://www.flysight.it/explore-defence-digital-twins-eddi-eda-study-for-the-next-four-years/> (огляд) (accessed: 01.10.2025).
5. Baughman, J. (2024). The Path to China's Intelligentized Warfare (analytical article). *The Cyber Defense Review*, Fall. Available at: https://cyberdefensereview.army.mil/Portals/6/Documents/2024-Fall/Baughman_CDRV9N3-Fall-2024.pdf (accessed: 01.10.2025).
6. Siemens, A.G. Digital Twin (official product/technology overview). Available at: <https://www.siemens.com/digital-twin> (accessed: 01.10.2025).
7. Li, L. et al. (2021). Digital Twin in Aerospace Industry: A Gentle Introduction. White Rose Research Online, 2021. Available at: https://eprints.whiterose.ac.uk/id/eprint/226986/1/Digital_Twin_in_Aerospace_Industry_A_Gentle_Introduction.pdf (accessed: 01.10.2025).
8. Siemens. Smart Manufacturing – White Paper (Digital Twin applications in manufacturing). Available at: https://www.plm.automation.siemens.com/media/global/it/Smart%20Manufacturing%20-%20White%20paper_tcm56-104562.pdf (accessed: 01.10.2025).
9. NATO Modelling and Simulation Group. Modelling and Simulation guidance and CPoW materials (overview). Available at: <https://www.sto.nato.int/the-collaborative-programme-of-work-cpow/modeling-and-simulation/nato-modelling-simulation-group/> (accessed: 01.10.2025).
10. ДП «УкрНДНЦ». DSTU ISO/TS 12911:2020. Структура стандартів будівельного інформаційного моделювання (BIM) (національна адаптація) [SE «УкрНДНЦ». DSTU ISO/TS 12911:2020. Structure of building information modeling (BIM) standards (national adaptation)]. Available at: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=96207 (accessed: 01.10.2025).
11. Sulema, E.S. (2020). “Tsyfrovі dviinyky: podannia ta obrobka temporalnykh multymodalnykh danykh (kandydatska/dysertatsiina robota – analiz tekhnolohii tsyfrovyykh dviinykyv)” [Digital twins: presentation and processing of temporal multimodal data (candidate/dissertation work – analysis of digital twin technologies)]. NTU of Ukraine «KPI». 2020. Available at: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/37251/1/Sulema_diss.pdf (дата звернення: 01.10.2025).

- kpi.ua/bitstream/123456789/37251/1/Sulema_diss.pdf (accessed: 01.10.2025).
12. “Rozroblennia modeli zastosuvannia (stvorennia tsyfrovyykh kloniv) balistychnykh ta krylatykh raket (nazemnoho, povitrianoho ta morskoho bazuvannia), kerovanykh aviatsiinykh bomb, udarnykh BpLA odnorazovoho vykorystannia dalekoi dii v khodi urazhennia nazemnykh ob'ektiv pry riznykh kombinatsiakh roboty bortovykh system navihatsii, radiolokatsii, telemetrii ta upravlinnia. Zvit shchodo vykonannia operatyvnoho zavdannia № 1V-25-041” [Development of a model for the application (creation of digital clones) of ballistic and cruise missiles (ground, air, and sea-based), guided aerial bombs, and long-range single-use strike UAVs during the destruction of ground targets using various combinations of onboard navigation, radar, telemetry, and control systems. Report on the completion of operational task №. 1B-25-041]. K.: Central Research Institute of Instrument Engineering of the Armed Forces of Ukraine. 2025. 161 p.
 13. Liu, Y., et al. (2024). A review of digital twin capabilities, technologies, and applications. *J. of Manufacturing Systems*. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1474034624002404> (accessed: 01.10.2025).
 14. Grieves, M. & Vickers, J. (2017). *Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems*. Cham: Springer. 27 p.
 15. Tao, F., Qi, Q., Liu, A. & Kusiak, A. (2019). Data-driven smart manufacturing. *J. of Manufacturing Systems*. Vol. 48. Pp. 157—169. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.01.006>.
 16. ISO 23247-1:2021. Automation systems and integration – Digital Twin framework for manufacturing. Geneva: Intern. Organization for Standardization. 2021. 36 p.
 17. Siemens, A.G. Digital Twin Integration Framework. Available at: <https://www.siemens.com/digital-twin>.
 18. Montgomery, D.C. & Runger, G.C. (2018). *Applied Statistics and Probability for Engineers*. Hoboken: Wiley. 792 p.
 19. INCOSE Systems Engineering Handbook. Hoboken: Wiley. 2023. 672 p.
 20. ISO/IEC 30182:2017. Smart city concept model — Guidance for establishing a model for data interoperability. Geneva: Intern. Organization for Standardization. 2017. 28 p.

Zhivotovsky R.M.

**DEVELOPING A DATA FORMALIZATION
METHODOLOGY FOR BUILDING DIGITAL
TWINS OF AIR ATTACK SYSTEMS**

The article proposes a practical, end-to-end methodology for data formalization to build digital twins of air attack systems – ballistic and cruise missiles, guided aerial bombs, and one-way attack unmanned aerial vehicles. The relevance of digital twins is substantiated: unified models reduce the volume of live testing, increase simulation fidelity, accelerate design, and support integration into the «digital battlespace». The paper outlines core concepts («source data», «formalization», «information contour»),

classifies data (tactical-technical characteristics, onboard systems, scenarios, telemetry, mathematical models), and establishes completeness/credibility criteria (provenance, consistency, error). A structural scheme is proposed in which telemetry refines models, models predict behavior, and scenarios serve for verification. The methodology comprises six stages: (1) object identification and selection of the level of detail; (2) collection and classification of data from open, experimental, and regulatory sources; (3) formalization into unified formats (XML/JSON/CSV), creation of a metadata dictionary and MDM rules; (4) creation of a database and digital thread (PLM/REST/MQTT) for exchange with CAD/CAE/simulators; (5) validation and verification with sensitivity/statistical analysis (χ^2 , t-test, RMSE, Monte Carlo); (6) software-algorithmic implementation (MATLAB/Simulink, Python, Ansys/COMSOL, STK/AGI, PostgreSQL/MongoDB, Unity/Unreal). Examples are shown for a «surface-to-surface» missile (aerodynamics, control, guidance) and a strike UAV (trajectory, INS/GNSS, telemetry), illustrating alignment of telemetry↔model↔scenario and automatic twin updates under the Digital Thread/MBSE paradigm. Practical value: the methodology ensures simulation reproducibility, experiment scalability, improved strike-planning and training quality; it lays the groundwork for interagency interoperability and metadata standardization. The following directions for further research are identified: range-based validation, quantitative uncertainty (QU) and sensitivity assessment, and development of a national metadata schema and methodological guidelines for digital twins of air attack systems.

Keywords: data formalization methodologies; digital twins; air attack systems; ballistic and cruise missiles; guided aerial bombs; unmanned aerial vehicles.

Відомості про автора:

Животовський Руслан Миколайович

кандидат технічних наук, старший дослідник
начальник науково-дослідного управління розвитку озброєння та військової техніки Повітряних Сил
Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-2717-0603>
e-mail: ruslan_zhyv@ukr.net

Information about the author:

Zhivotovsky Ruslan

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
Head of the Research Department for the Development of Armament and Military Equipment of the Air Force
Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-2717-0603>
e-mail: ruslan_zhyv@ukr.net

Стаття надійшла до редколегії 03.11.2025.

Стаття прийнята до друку після рецензування 13.02.2026.

Стаття опублікована 30.03.2026.