

МЕНЕДЖМЕНТ

УДК 658.5

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2026.1-28.01>

КОНЦЕПЦІЯ ГІБРИДНОГО ПІДХОДУ В УПРАВЛІННІ ПРОЄКТАМИ В ГАЛУЗІ СУДНОБУДУВАННЯ

О.О. Демідюк¹, А.В. Бондар²

¹здобувач вищої освіти третього навчально-наукового рівня (PhD)
кафедри управління логістичними системами та проєктами,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна
ORCID ID: 0009-0003-8761-2180

²доктор технічних наук, професор, професор кафедри управління
логістичними системами і проєктами,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна
ORCID ID: 0000-0003-2228-2726

Анотація

Вступ. Розглядається існуюча методологія управління проєктами в галузі суднобудування. Показано, що традиційна спіраль дизайну суден Дж. Х. Еванса потребує цифрової адаптації. Проаналізовані сучасні технології, що застосовуються в управлінні проєктами в програмній та цивільній інженерії, включаючи Model-Based Systems Engineering (MBSE), Digital Twin та принципи Agile System Engineering (Agile SE). **Мета.** Метою дослідження є формування гібридної концепції у вигляді інтеграції традиційної спіралі дизайну суден з сучасними методологіями управління складними інженерними системами, а саме MBSE, Digital Twin та принципами Agile SE. **Результати.** Проведено аналіз літературних джерел з теми дослідження та порівняння проєктних підходів за основними критеріями. Аналіз показує збільшення кількості робіт із підтримки цифровізації в інженерних галузях, зокрема в суднобудуванні. Проаналізовані переваги та недоліки кожної із складових гібридної концепції. Показано, що гібридний підхід, що поєднує структуру системної інженерії та адаптивність Agile, може значно підвищити ефективність процесів проєктування, скоротити час і забезпечити гнучкість щодо вимог, які швидко змінюються. Від гібридного підходу слід очікувати зниження ризику інтеграції модулів, покращення управління вартісними показниками на етапах розробки та впровадження, дотримання термінів розробки та підвищення адаптивності платформи. Зазначено, що перехід до гібридної концепції (особливо до Agile SE) у суднобудуванні вимагає змін в управлінні, організаційного впровадження MBSE та Digital Twin, а також дотримання архітектурної дисципліни модульності. Наведено приклади успішного застосування гібридних підходів у суднобудуванні, зокрема проєкти Navantia F-110, Rolls-Royce Marine та Hyundai Heavy Industries. **Висновки.** Запропоновано рекомендації щодо



формування цифрової «спіралі проєктування» на основі Agile SE, концепції цифрового двійника та її впровадження в процес управління суднобудівними підприємствами та проєктами в галузі суднобудування.

Ключові слова: спіраль проєктування; гібридні підходи; цифровізація; Agile; Agile SE; суднобудування; MBSE; Digital Twin.

CONCEPT OF A HYBRID APPROACH TO PROJECT MANAGEMENT IN THE SHIPBUILDING INDUSTRY

O. O. Demidiuk¹, A. V. Bondar²

¹student of higher education of the third educational and scientific level (PhD)
Department of Management Logistics Systems and Projects,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine
ORCID ID: 0009-0003-8761-2180

²Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Management Logistics Systems and Projects,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine
ORCID ID: 0000-0003-2228-2726

Summary

Introduction. The existing project management methodology in shipbuilding is considered. It is shown that J. H. Evans' traditional ship design spiral requires digital adaptation. Modern technologies used in project management in software and civil engineering are analyzed, including Model-Based Systems Engineering (MBSE), Digital Twin, and Agile System Engineering (Agile SE) principles. **Purpose.** The purpose of the study is to form a hybrid concept in the form of integrating the traditional ship design spiral with modern methodologies for managing complex engineering systems, namely MBSE, Digital Twin, and Agile SE principles. **Results.** An analysis of literary sources on the research topic and a comparison of design approaches based on key criteria were conducted. The analysis shows an increase in the number of works supporting digitalization in engineering fields, particularly in shipbuilding. The advantages and disadvantages of each component of the hybrid concept were analyzed. It was shown that a hybrid approach, combining the structure of systems engineering and the adaptability of Agile, can significantly improve the efficiency of design processes, reduce time, and provide flexibility in response to rapidly changing requirements. The hybrid approach is expected to reduce the risk of module integration, improve cost management during the development and implementation stages, ensure compliance with development deadlines, and increase platform adaptability. It is noted that the transition to a hybrid concept (especially Agile SE) in shipbuilding requires changes in management, organizational implementation of MBSE and Digital Twin, as well as adherence to the architectural discipline of modularity. Examples of the successful application of hybrid approaches in shipbuilding are given, in particular the Navantia F-110, Rolls-Royce Marine, and Hyundai Heavy Industries projects. **Conclusions.** Recommendations are proposed for the formation of a digital "design spiral" based on Agile SE, the concept of a digital twin, and its implementation in the management process of shipbuilding enterprises and projects in the shipbuilding industry.

Key words: design spiral; hybrid approaches; digitalization; Agile; Agile System Engineering; shipbuilding; MBSE; Digital Twin.

Постановка проблеми. Проектування суден давно визнано одним із найскладніших інженерних процесів через його міждисциплінарний характер і тривалий життєвий цикл.

Як і інші інженерні області, сучасне суднобудування стикається із зростанням складності систем, складністю їх інтеграції, вимогами сталого розвитку, необхідністю ефективного управління процесом проектування та наступними етапами виробництва, експлуатації, модернізації та утилізації. Традиційна спіральна модель, запропонована Дж. Х. Евансом (1959) [1], стала знаковою, оскільки в ній проектування представлено як ітеративний процес. Розроблена для проектування торговельних суден, ця спіраль пізніше була адаптована до військово-морських проєктів з урахуванням впливу специфічних бойових систем, більш жорсткіших вимог до живучості та застосування нових технологій. Як і в інших галузях, у суднобудівній промисловості наразі триває етап цифрової трансформації. У ситуації, коли команда розробників може бути географічно розкидана по всьому світу, безпаперове проектування, розробка цифрових прототипів і тісна цифрова взаємодія стають нормою.

Застосування традиційної спіралі проектування (далі – ТСП) в сучасних умовах потребує цифрової адаптації. Інтеграція системної інженерії (SE), методів Model-Based Systems Engineering (MBSE) і гнучких підходів Agile відкриває нові можливості для підвищення ефективності та керованості суднобудівних проєктів.

Метою дослідження є розробка концепції інтеграції класичної спіралі проектування з Agile System Engineering та сучасними цифровими підходами до управління проєктами. Завдання включають аналіз переваг та обмежень спірального методу, розгляд сучасних методологій MBSE, Digital Twin та Agile, а також визначення напрямів їх ефективного поєднання в суднобудуванні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Традиційна спіраль проектування Дж. Х. Еванса [1] – це ітераційний процес, у якому кожен виток відповідає циклу уточнення параметрів судна – від формування вимог до конструкторської документації. Процес включає етапи розробки концепції, вибору архітектурно-конструктивного типу, визначення головних розмірів, вибору оптимальної форми корпусу, оцінки фундаментальної конструкції корпусу, загальної та локальної міцності, стійкості, потужності та вартості. Сильними сторонами спірального підходу є системність та ітераційність, що дозволяє наближатися до оптимальних характеристик шляхом повторних ітерацій (циклів) із постійним системним покращенням параметрів.

Типовий вигляд спіралі проектування показаний на рис. 1.

Незважаючи на системний підхід, використання класичних каскадних схем і проєктних спіралей виявляється недостатнім для своєчасної адаптації в умовах різкого скорочення часу (з 2÷2,5 років до 1÷1,5 років)

і укрупнення етапів проектування. В найбільш екстремальних випадках початкові етапи побудови судна йдуть паралельно із кінцевими етапами проектування.

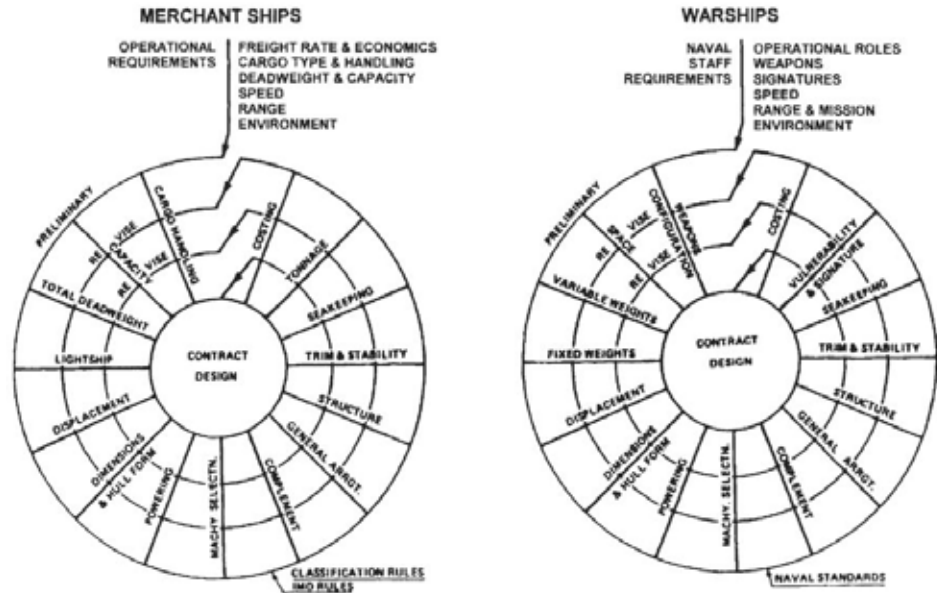


Рис. 1. Дизайн спіралі, запропонований Дж. Х. Евансом для цивільних суден (ліворуч) і для військових кораблів (праворуч) [2]

Сучасні методології, які забезпечують ефективне управління проектами та цифрову трансформацію суднобудування, включають Model-Based Systems Engineering (MBSE), Digital Twin.

MBSE [3] переводить проектування в модельно-орієнтоване середовище, забезпечуючи вимоги та відстежуваність архітектури. MBSE виникла як відповідь на обмеження традиційних спіральних методів. Вона використовує формальні моделі для відображення вимог, архітектур і поведінки. MBSE тісно пов'язана з мовами моделювання, такими, як SysML та UML. MBSE притаманна краща узгодженість, цифрова спадкоємність, раннє виявлення конфліктів при проектуванні та інтеграція з інструментами моделювання. Серед негативних наслідків використання MBSE слід зазначити круту криву складності навчання (за аналогією з Об'єктно Орієнтованим Програмуванням), опір з боку традиційних спільнот фахівців та ризик надмірної формалізації там, де потрібна гнучкість.

Технологія Digital Twin [4] є однією з найпередовіших розробок у галузі проектування суден. Підтримуючи віртуальне представлення судна, яке розвивається разом із фізичним активом, «цифрові двійники» забезпечують предиктивне обслуговування, моніторинг продуктивності та оптимізацію життєвого циклу.

Digital Twin дозволяє створити динамічну цифрову копію судна для аналізу поведінки та оптимізації рішень. Перевагами цих підходів є формалізація, відстежуваність і швидке прийняття рішень, покращений зворотний зв'язок під час експлуатації, інтеграція життєвого циклу, покращене планування технічного обслуговування та оптимізація на основі даних. До недоліків можна віднести високу вартість впровадження та необхідність змінити менталітет членів команди проєкту (потреба культурних змін) а також залежність від високоякісних даних, вразливість з точки зору кібербезпеки та значні обчислювальні вимоги. Значна кількість всесвітньо відомих класифікаційних товариств (Lloyd Register, ABS, DNV GL, NKK та ін.) розробляють вимоги до впровадження технології Digital Twin в свою діяльність. Наближаються часи, коли кожне сучасне судно матиме цифрового двійника.

Недавні дослідження підтверджують ефективність впровадження цифрових двійників [5, 6 та 7].

Agile SE являє собою зміну парадигми від традиційних підходів послідовної розробки до ітеративних, адаптивних методологій. Основні принципи Agile [8] включають інкрементальну розробку, пріоритет взаємодії та адаптацію до змін.

Принципи Agile SE, спочатку розроблені для розробки програмного забезпечення, були успішно адаптовані до складних інженерних систем у різноманітних галузях. Гнучка системна інженерія Agile Systems Engineering (Agile SE) поєднує принципи гнучкості Agile та структурність системної інженерії. Відповідно до INCOSE [3], Agile SE не замінює класичний SE, але розширює його, додаючи ітеративність і швидкий зворотний зв'язок.

Застосування гнучких принципів до складних інженерних систем продемонструвало значні переваги в таких галузях, як аерокосмічна, автомобільна та промислова автоматизація. Ці успіхи служать підставою для розгляду можливості їх використання в суднобудуванні.

Як приклад використання гнучких принципів, можна навести приклад із військового суднобудування – реалізацію проєкту іспанської державної суднобудівної корпорації Navantia F-110 [9]. Це проєкт сучасного фрегата (дивись рис. 2), на етапах проєктування, будівництва та життєвого циклу якого використовуються цифрові двійники. Siemens і Navantia підписали угоду про просування цифрової трансформації до «Верфи 4.0». Це дозволило комплексно впровадити Digital Twin в нову програму [10] фрегатів F-110. Для інтеграції програмного забезпечення та автоматизованих систем управління було застосовано Agile-принципи та Scrum-команди.

Компанія Rolls-Royce просуває ініціативу Intelligent Ship [11], яка використовує цифрові моделі та спринти для розробки автономних суден.

Проєкт Hyundai NHI Smart Shipyard [12] впроваджує PLM (Project Lifecycle Management) і Agile в управління виробничими циклами. Окрім того, Hyundai Heavy Industries оголосила про спільний проєкт із

фінськими компаніями з виробництва морського програмного забезпечення NARA та CADMATIS для прискорення цифрової трансформації суднобудівної галузі [13].



Рис. 2 – Фрегат проекту F-110

Інтеграція класичної спіралі, MBSE та Agile SE формує гібридний підхід, у якому кожен виток спіралі супроводжується цифровими моделями, зворотним зв'язком і швидкою перевіркою гіпотез. Ця «цифрова спіраль» поєднує інженерну ретельність із гнучкістю управління змінами.

Таблиця 1 демонструє особливості різних проєктних підходів.

У галузі суднобудування особливий інтерес мають роботи по зчепленню SE і «спіралі» проєктування судна. Дослідження JMSE/MDPI [14] демонструє концептуальне поєднання V-моделі SE та традиційної моделі в єдину архітектуру. Публікації Design Society [15] підкреслюють важливість ранніх етапів проєктування військового корабля: невизначені вимоги, аморфні процедури та зростаюча складність; пропонується інтегрувати різні методи (спіраль, модель V-модель, Agile, архітектури) у цілісний підхід. Модульність для забезпечення більшої гнучкості одиниць флоту розглядається у звіті RAND [16] і галузевих дослідженнях. Практичні реалізації модульного підходу демонструють проєкти StanFlex [17] і опціональні модулі до патрульних кораблів Австралійського флоту класа Arafura [18].

Викладання основного матеріалу. Аналіз літературних джерел дозволяє описати гібридну методологію як синтез спіралі проєктування (ТСП), Agile SE (модель Agile + MBSE + V-модель) і модульності. У цьому випадку гібридна методологія використовуватиме:

1) ТСП – як доменну карту ітерацій за напрямками проєктування корпусу, потужності головної енергетичної установки, морехідності, конструкції, міцності тощо; в Agile SE спіраль стає «портфоліо експериментів» із зворотними зв'язками;

Таблиця 1

Порівняння проєктних підходів

Параметр	Традиційна спіраль	MBSE	Agile SE	Гібридна структура
Відстежуваність вимог	Обмежена (doc-centric) Трасованість переважно через документи; для наскрізного зв'язку потрібні додаткові RM/SE-артефакти. <i>Джерела: [1], [3], [23]</i>	Висока (model-centric) Зв'язує вимоги з архітектурою/аналізами та V&V у межах системної моделі. <i>Джерела: [24], [23], [19]</i>	Середня (change-centric) Фокус на інкрементах і змінах; рівень формальної трасованості залежить від практик і інструментів. <i>Джерела: [8], [22], [21]</i>	Дуже висока SysML-зв'язки + V-модель = наскрізна «вимоги – V&V»; digital thread/twin підсилює керуваність змін. <i>Джерела: [14], [15], [24], [20]</i>
Адаптивність	Низька Класична спіраль важче масштабується під часті зміни та паралельне виконання стадій. <i>Джерела: [15]</i>	Середня Моделі підтримують impact analysis і керування змінами, але потребують governance та дисципліни моделювання. <i>Джерела: [24], [23]</i>	Висока Responding to change, короткі ітерації, швидкий зворотний зв'язок і переоцінка пріоритетів. <i>Джерела: [8], [22], [21]</i>	Дуже висока Agile cadence + модульність + модельна узгодженість між дисциплінами прискорюють адаптацію. <i>Джерела: [14], [15], [16]</i>
Складність впровадження	Низька Усталений доменний процес у проєктуванні суден; мінімальні організаційні зміни. <i>Джерела: [1], [2]</i>	Середня Потрібні інструменти/репозиторій моделей, навчання та перебудова процесів під model-based підхід. <i>Джерела: [3], [24], [23]</i>	Висока Потребує дисциплінованої інтеграції SE-активностей (архітектура, V&V, CM) з agile-каденцією. <i>Джерела: [22], [21]</i>	Висока Інтеграція кількох методів (SE/спіраль/Agile/MBSE/DT) та єдина toolchain і governance. <i>Джерела: [14], [15]</i>
Вартість впровадження	Середня Витрати здебільшого в інженерних ітераціях і документації; без обов'язкового шару MBSE/DT-інфраструктури. <i>Джерела: [1], [2]</i>	Висока Вартість model toolchain (ліцензії/інтеграції/підтримка) та навчання персоналу. <i>Джерела: [24], [23]</i>	Середня Основні витрати – організаційна трансформація, навчання і координація багатодисциплінарних команд. <i>Джерела: [21]</i>	Висока Сумарна вартість MBSE + digital twin/data + кіберзахист та обчислювальні ресурси. <i>Джерела: [20], [19]</i>
Зрілість технологій	Висока Застосовується десятиліттями у проєктуванні суден; багато усталених практик і кадрів. <i>Джерела: [1], [2]</i>	Середня Усталена рамка в SE-спільноті, але рівень впровадження залежить від організації та зрілості toolchain. <i>Джерела: [3], [24], [23]</i>	Середня Поширюється в SE, але потребує адаптації під домен та регуляторні/якісні вимоги. <i>Джерела: [22], [21]</i>	Зростаюча Інтеграція SE/spiral/Agile у суднобудуванні активно розвивається у публікаціях і кейсах. <i>Джерела: [14], [15], [16]</i>
Підтримка життєвого циклу	Середня Сильніше на стадії дизайну; слабший зв'язок з експлуатаційною петлею даних без цифрової інфраструктури. <i>Джерела: [1], [2]</i>	Висока Підтримує моделювання від концепції до пізніх фаз ЖЦ, V&V та керування змінами. <i>Джерела: [24], [23], [19]</i>	Середня Може охоплювати operations/sustainment, але глибина ЖЦ-підтримки залежить від реалізації. <i>Джерела: [21]</i>	Повна Digital twin формус data feedback loop (monitoring/predictive maintenance) + SE/V&V для підтримки ЖЦ. <i>Джерела: [20], [19]</i>

2) Agile як стратегію управління невизначеністю та цінністю з короткими ітераціями, пріоритезацією ризиків, безперервною перевіркою та демонстрацією системи на рівні архітектурних інкрементів;

3) MBSE як засіб формалізації знань і вимог у моделях SysML, що пов'язують потреби, варіанти використання, функції, архітектуру, інтерфейси та тести; цифровий двійник – як засіб перевірки адекватності рішень.

4) V-модель як основу для наскрізної відстежуваності «вимоги – перевірка / валідація»;

5) Модульність – як архітектурний механізм адаптації до нових умов (опціональні модулі, відкриті інтерфейси, резерви маси / потужності / об'єму), що підтримує еволюційний розвиток і оновлення без радикальних змін конструкції судна.

Реалізація концепції гібридного ТСП / Agile SE / MBSE підходу передбачає наступні етапи:

– Ініціація та архітектурні гіпотези: визначається обсяг завдань (capability епіки) та системні «історії» (user stories); розробляються альтернативні архітектури з інтерфейсами для опціональних модулів;

– Конкурентне прототипування: для ключових ризиків (сумісність модулів, інтеграція БПЛА різних типів, тощо) запускаються паралельні прототипи / макети; результати оперативно вводяться у модель;

– Інтеграційні інкременти: кожні 6–8 тижнів – системні демонстрації (model in the loop, HIL/софт стенди), уточнення вимог і домовленостей з постачальниками / верфями;

– Архітектурні рішення з модульності: закладаються стандартизовані фундаментні місця, роз'єми для підключення живлення та сигнальних кабелів, кріплення, резерв за масою та центруванням; створюються шаблони сертифікаційних випробувань модулів;

– Оновлена спіраль: розрахунки морехідності, міцності, потужності інтегруються з MBSE-архітектурою; кожна ітерація зменшує невизначеність; V-зв'язки забезпечують можливість перевірки вимог.

За результатом від гібридного підходу слід очікувати зниження ризику інтеграції модулів, покращення управління вартісними показниками на етапах розробки та впровадження, дотримання термінів розробки та підвищення адаптивності платформи (судна чи корабля). Перехід до Agile SE у суднобудуванні вимагає змін в управлінні, організаційного впровадження MBSE та Digital Twin, а також дотримання архітектурної дисципліни модульності. Використання модульності має свою ціну – вона вимагає певних об'єму, маси, потужності, використання стандартизованих інтерфейсів, процедур сертифікації та логістики. Рішення повинні прийматися на основі аналізу витрат і гнучкості життєвого циклу та інших параметрів, що стосуються конкретного проекту.

Висновки. Отримані результати підтверджують наступне:

1. Традиційна спіраль Еванса залишається цінною як структурна основа для системного проектування суден.
2. Сучасні цифрові технології (MBSE, PLM, Digital Twin) посилюють спіраль, підвищуючи відстежуваність і адаптивність. Можлива ефективна інтеграція: спіраль проектування корабля та розробку гнучких систем можна успішно інтегрувати для створення більш ефективної методології проектування.
3. Використання Agile SE в суднобудуванні забезпечує швидші ітерації, гнучкість і більшу залученість команд.
4. Гібридний підхід поєднує найкращі аспекти класичного та цифрового проектування, знижуючи ризики та підвищуючи стійкість рішень.
5. Значні покращення продуктивності: інтегровані підходи демонструють суттєве покращення ефективності проектування, задоволеності зацікавлених сторін і результатів проекту.
6. Переваги переважають ризики: хоча інтеграція передбачає певні ризики, потенційні переваги значно переважають ці занепокоєння.
7. Зростання кількості впроваджень в промисловості: провідні суднобудівні підприємства все частіше впроваджують інтегровані підходи з позитивними результатами. Navantia, Rolls-Royce і Hyundai демонструють реальну ефективність інтеграції SE та Agile.
8. В галузі цивільного та транспортного суднобудування в сучасних умовах ефективність гібридного (гнучкого) підходу буде найбільшою для складних комплексних задач на кшталт проектів пасажирських, автопасажирських та швидкісних автопасажирських суден, суден-заводів з переробки газу або нафти, суден для перевезення великогабаритних та великогазових вантажів, багатоцільових рятувальних, суден забезпечення підводних будівельних робіт та інших. В цьому випадку проектувальник та будівельник стикаються із задачею, яка має характер складності близький до складності проектів сучасних військових кораблів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Evans, J.H. Basic Design Concepts. *Journal of the American Society of Naval Engineers*, 1959, Vol. 71 (4), pp. 671–678.
2. Watson, D.G.M. (1998). *Practical Ship Design*. Elsevier Ocean Engineering Book Series. Volume 1. Доступно за посиланням: <https://www.elsevier.com/books/practical-ship-design/watson/978-0-08-042999-1>
3. INCOSE. (2015). *Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities*. 4th ed. Wiley, 2015. Доступно за посиланням: <https://www.incose.org/products-and-publications/publications/se-handbook>; <https://download.e-bookshelf.de/download/0003/6422/62/L-G-0003642262-0007580512.pdf>

4. DNV GL. (2022). “Maritime Forecast to 2050. Energy Transition Outlook, 2022”. DNV GL Group Technology & Research. Доступно за посиланням: https://lra.lt/wp-content/uploads/2023/04/DNV_Maritime_Forecast_2050_2022-final.pdf
5. Kunkera, Z., Opetuk, T., Hadzic, N., & Tosanovic, N. (2022). Using Digital Twin in a Shipbuilding Project. *Applied Sciences*, 12 (24), 12721. <https://doi.org/10.3390/app122412721>
6. ScienceDirect (2022). Digital Twin for Ship Life-Cycle: A Critical Systematic Review. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801822027627>
7. ScienceDirect (2024). Digital twins enable shipbuilding. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016824010226>
8. Beck, K., Beedle, M., van Bennekum, A., Cockburn, A., Cunningham, W., Fowler, M., ... & Thomas, D. (2001). “Manifesto for Agile Software Development”. Доступно за посиланням: <https://agilemanifesto.org/>
9. Navantia. F-110 Digital Shipbuilding Programme Report. Madrid, 2021.
10. Siemens reconfirms commitment to Shipbuilding 4.0 with CESENA opening. Доступно за посиланням: <https://news.siemens.com/en-us/siemens-cesena-shipbuilding-xcelerator/>
11. Rolls-Royce. Intelligent Ship Programme: Digital Twin Initiative Report. London, 2020. Доступно за посиланням: <https://www.rolls-royce.com/~media/Files/R/Rolls-Royce/documents/annual-report/2020/2020-full-annual-report.pdf>
12. Hyundai Heavy Industries. Smart Shipyard Initiative. Seoul, 2022. Доступно за посиланням: <https://www.offshore-energy.biz/abs-hd-hyundai-join-forces-on-ai-backed-smart-shipyard-vision/>
13. <https://www.offshore-energy.biz/abs-hd-hyundai-join-forces-on-ai-backed-smart-shipyard-vision/>
14. MDPI JMSE (2024): Systems Engineering for Naval Ship Design Evolution. Доступно за посиланням: <https://www.mdpi.com/2077-1312/12/2/210>
15. Dahlke, Mantwill (DSM 2023): Towards Agile Systems Engineering in Early Stage Design for Complex Naval Vessels. Доступно за посиланням: https://www.designsociety.org/download-publication/46878/towards_agile_systems_engineering_in_early_stage_design_for_complex_naval_vessels
16. RAND (2016): Modularity and Flexibility in Future Ship Designs. Доступно за посиланням: https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR696.html
17. Standard Flex 300 The True Multi-role Ship. Доступно за посиланням: <https://www.marinehist.dk/orlogsbib/h/StanFlex.pdf>
18. Australian National Audit Office (ANAO) (2024): Major Projects Report (Arafura-class OPV). Доступно за посиланням: https://www.anao.gov.au/sites/default/files/2024-02/Auditor-General_Report_2023-24_14_pds.pdf
19. Australian National Audit Office (ANAO) (2024): Major Projects Report (Arafura-class OPV). Доступно за посиланням: <https://www.anao.gov.au/>

- sites/default/files/2024-02/Auditor-General_Report_2023-24_14_pdss.pdf
20. NASA. (2016). NASA Systems Engineering Handbook (NASA/SP-2016-6105 Rev2). Доступно за посиланням: https://soma.larc.nasa.gov/lws/pdf_files/12%20NASA_SP-2016-6105%20Rev%202.pdf
 21. ISO. ISO 23247-1:2021 Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing – Part 1: Overview and general principles. Доступно за посиланням: <https://www.iso.org/standard/75066.html>
 22. MITRE. Agile Systems Engineering. Доступно за посиланням: <https://aida.mitre.org/agile/agile-systems-engineering/>
 23. SEBoK. Agile Systems Engineering. Доступно за посиланням: https://sebokwiki.org/wiki/Agile_Systems_Engineering
 24. SEBoK. Model-Based Systems Engineering (MBSE). Доступно за посиланням: https://sebokwiki.org/wiki/Model-Based_Systems_Engineering_%28MBSE%29
 25. INCOSE. (2015). MBSE Overview. Доступно за посиланням: <https://www.incose.org/docs/default-source/delaware-valley/mbse-overview-incose-30-july-2015.pdf>

REFERENCES

1. Evans, J.H. Basic Design Concepts. *Journal of the American Society of Naval Engineers*, 1959, Vol. 71 (4), pp. 671–678.
2. Watson, D.G.M. (1998). Practical Ship Design. Elsevier Ocean Engineering Book Series. Volume 1. Available at: <https://www.elsevier.com/books/practical-ship-design/watson/978-0-08-042999-1>
3. INCOSE. (2015). Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities. 4th ed. Wiley, 2015. Available at: <https://www.incose.org/products-and-publications/publications/se-handbook> <https://download.e-bookshelf.de/download/0003/6422/62/L-G-0003642262-0007580512.pdf>
4. DNV GL. (2022). “Maritime Forecast to 2050. Energy Transition Outlook, 2022”. DNV GL Group Technology & Research. Available at: https://l1sra.lt/wp-content/uploads/2023/04/DNV_Maritime_Forecast_2050_2022-final.pdf
5. Kunkera, Z., Opetuk, T., Hadzic, N., & Tosanovic, N. (2022). Using Digital Twin in a Shipbuilding Project. *Applied Sciences*, 12 (24), 12721. <https://doi.org/10.3390/app122412721>
6. ScienceDirect (2022). Digital Twin for Ship Life-Cycle: A Critical Systematic Review. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801822027627>
7. ScienceDirect (2024). Digital twins enable shipbuilding. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016824010226>
8. Beck, K., Beedle, M., van Bennekum, A., Cockburn, A., Cunningham, W., Fowler, M., ... & Thomas, D. (2001). “Manifesto for Agile Software Development”. Available at: <https://agilemanifesto.org/>

9. Navantia. F-110 Digital Shipbuilding Programme Report. Madrid, 2021.
10. Siemens reconfirms commitment to Shipbuilding 4.0 with CESENA opening. Available at: <https://news.siemens.com/en-us/siemens-cesena-shipbuilding-xcelerator/>
11. Rolls-Royce. Intelligent Ship Programme: Digital Twin Initiative Report. London, 2020. Available at: <https://www.rolls-royce.com/~media/Files/R/Rolls-Royce/documents/annual-report/2020/2020-full-annual-report.pdf>
12. Hyundai Heavy Industries. Smart Shipyard Initiative. Seoul, 2022. Available at: <https://www.offshore-energy.biz/abs-hd-hyundai-join-forces-on-ai-backed-smart-shipyard-vision/>
13. <https://www.offshore-energy.biz/abs-hd-hyundai-join-forces-on-ai-backed-smart-shipyard-vision/>
14. MDPI JMSE (2024): Systems Engineering for Naval Ship Design Evolution. Available at: <https://www.mdpi.com/2077-1312/12/2/210>
15. Dahlke, Mantwill (DSM 2023): Towards Agile Systems Engineering in Early Stage Design for Complex Naval Vessels. Available at: https://www.designsociety.org/download-publication/46878/towards_agile_systems_engineering_in_early_stage_design_for_complex_naval_vessels
16. RAND (2016): Modularity and Flexibility in Future Ship Designs. Available at: https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR696.html
17. Standard Flex 300 The True Multi-role Ship. Available at: <https://www.marinehist.dk/orlogsbib/h/StanFlex.pdf>
18. Australian National Audit Office (ANAO) (2024): Major Projects Report (Arafura-class OPV). Available at: https://www.anao.gov.au/sites/default/files/2024-02/Auditor-General_Report_2023-24_14_pdss.pdf
19. NASA. (2016). NASA Systems Engineering Handbook (NASA/SP-2016-6105 Rev2). Available at: https://soma.larc.nasa.gov/lws/pdf_files/12%20NASA_SP-2016-6105%20Rev%202.pdf
20. ISO. ISO 23247-1:2021 Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing – Part 1: Overview and general principles. Available at: <https://www.iso.org/standard/75066.html>
21. MITRE. Agile Systems Engineering. Available at: <https://aida.mitre.org/agile/agile-systems-engineering/>
22. SEBoK. Agile Systems Engineering. Available at: https://sebokwiki.org/wiki/Agile_Systems_Engineering
23. SEBoK. Model-Based Systems Engineering (MBSE). Available at: https://sebokwiki.org/wiki/Model-Based_Systems_Engineering_%28MBSE%29
24. INCOSE. (2015). MBSE Overview. Available at: <https://www.incose.org/docs/default-source/delaware-valley/mbse-overview-incose-30-july-2015.pdf>

Дата першого надходження статті до видання: 26.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026