

УДК 658.5

DOI 10.47049/2226-1893-2025-4-184-192

ІНТЕГРАЦІЯ СПІРАЛЬНОЇ МОДЕЛІ ПРОЄКТУВАННЯ СУДНА ТА ГНУЧКИХ СИСТЕМ ІНЖЕНЕРІЇ В СУЧАСНОМУ СУДНОБУДУВАННІ

О.О. Демідюк

здобувач вищої освіти третього навчально-наукового рівня (PhD)

кафедри управління логістичними системами та проєктами

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8761-2180>

e-mail: s.demidiuk00@gmail.com

А.В. Бондар

доктор технічних наук, професор,

професор кафедри управління логістичними системами та проєктами

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2228-2726>

e-mail: ocheretyankaalla@gmail.com

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

Анотація. У статті досліджується інтеграція класичної спіралі дизайну суден Дж. Х. Еванса з сучасними методологіями управління складними інженерними системами, включаючи *Model-Based Systems Engineering (MBSE)*, *Digital Twin* та принципи *Agile System Engineering (Agile SE)*.

Показано, що гібридний підхід, що поєднує структуру системної інженерії та адаптивність *Agile*, може значно підвищити ефективність процесів проєктування, скоротити час і забезпечити гнучкість перед обличчям вимог, що швидко змінюються.

Наведено приклади успішного застосування гібридних підходів у суднобудуванні, зокрема проєкти *Navantia F-110*, *Rolls-Royce Marine* та *Hyundai Heavy Industries*. Проведено аналіз літературних джерел з теми дослідження та порівняння проєктних підходів за основними критеріями.

Запропоновано рекомендації щодо формування цифрової «спіралі проєктування» на основі концепції цифрового двійника та простежуваності вимог та її впровадження в процес управління суднобудівними підприємствами.

Ключові слова: *Agile, Agile System Engineering; Systems Engineering; суднобудування; MBSE; Digital Twin; спіраль проєктування; гібридні підходи; цифровізація.*

UDC 658.5

DOI 10.47049/2226-1893-2025-4-184-192

INTEGRATION OF THE SPIRAL MODEL OF SHIP DESIGN AND AGILE SYSTEMS ENGINEERING IN MODERN SHIPBUILDING

O. Demidiuk

student of higher education of the third educational and scientific level (PhD)

Department of Logistics Systems and Project Management

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8761-2180>

e-mail: s.demidiuk00@gmail.com

A. Bondar

doctor of technical sciences, professor,

professor of the Department of Management logistics systems and projects

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2228-2726>

e-mail: ocheretyankaalla@gmail.com

Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine

Abstract. *The article explores the integration of the classical ship design spiral of J.H. Evans with modern methodologies for managing complex engineering systems, including Model-Based Systems Engineering (MBSE), Digital Twin and the principles of Agile System Engineering (Agile SE). It is shown that a hybrid approach, combining the structure of systems engineering and the adaptability of Agile, can significantly increase the efficiency of design processes, reduce time and provide flexibility in the face of rapidly changing requirements. Examples of successful application of hybrid approaches in shipbuilding are given, including the Navantia F-110, Rolls-Royce Marine and Hyundai Heavy Industries projects. An analysis of literary sources on the topic of research and a comparison of project approaches according to the main criteria was carried out. Recommendations for the formation of a digital «design spiral» based on the concept of a digital double and the traceability of requirements and its implementation in the management process of shipbuilding enterprises are proposed.*

Keywords. *Agile, Agile System Engineering; Systems Engineering; shipbuilding; Model-Based Systems Engineering; Digital Twin; design spiral; hybrid approaches; digitalization.*

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

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 суден. Класична спіральна модель, запропонована Дж. Х. Евансом (1959) [1], була знаковою, оскільки в ній проектування було

представлено як ітеративний процес. Розроблена для проєктування торговельних суден, ця спіраль пізніше була адаптована до військово-морських проєктів з урахуванням впливу бойових систем, живучості та 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 проєктування, розробка цифрових прототипів і тісна цифрова взаємодія стають нормою.

Застосування класичної спіралі проєктування (далі – КСП) 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 проєктування 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.

Класична спіраль проєктування 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 наблизитися до оптимальних характеристик шляхом повторних ітерацій (циклів) із постійним системним покращенням параметрів.

Типовий вигляд спіралі проєктування показаний на рис. 1.

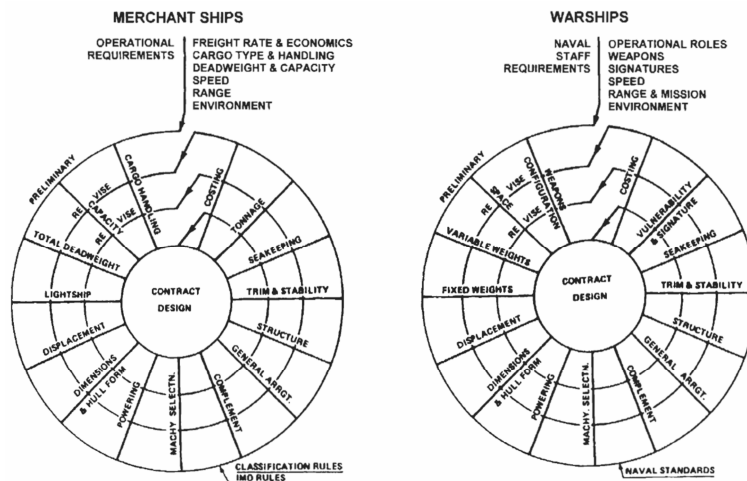


Рис. 1. Дизайн спіралі, запропонований Дж. Х. Евансом
для цивільних суден (ліворуч) і військових кораблів (праворуч) [2]

Незважаючи на системний підхід, використання класичних каскадних схем і проектних 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.

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. Digital Twin [4] дозволяє створити динамічну цифрову копію судна для аналізу поведінки та оптимізації рішень. Перевагами цих підходів є формалізація, відстежуваність і швидке прийняття рішень. До недоліків можна віднести високу вартість впровадження та необхідність змінити менталітет членів команди проекту (потреба культурних змін), що становить головну загрозу для впровадження Agile.

Agile SE являє собою зміну парадигми від традиційних підходів послідовної розробки до ітеративних, адаптивних методологій. Основні принципи Agile [5] 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 проекту іспанської державної суднобудівної корпорації Navantia F-110 [6]. Це проект сучасного фрегата (дивись рис. 2), на етапах проектування, 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 [7] 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 [8], яка використовує цифрові моделі та спринти для розробки автономних суден.

Проект Hyundai NHI Smart Shipyard [9] впроваджує PLM і Agile в управління виробничими циклами. Окрім того Hyundai Heavy Industries оголосила про спільний проект із фінськими компаніями з виробництва морського програмного забезпечення NAPA та CADMATIS для прискорення цифрової трансформації суднобудівної галузі [10].



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.

Таблиця 1

Порівняння проєктних підходів

Параметр	Класична спіраль	MBSE	Agile SE	Гібридна структура
Відстежуваність вимог	Обмежена	Висока	Середня	Дуже висока
Адаптивність	Низька	Середня	Висока	Дуже висока
Складність впровадження	Низька	Середня	Висока	Висока
Вартість впровадження	Середня	Висока	Середня	Висока
Зрілість технологій	Висока	Середня	Середня	Зростаюча
Підтримка життєвого циклу	Середня	Висока	Середня	Повна

У галузі суднобудування особливий інтерес мають роботи по зчепленню SE і «спіралі» проєктування судна. Дослідження JMSE/MDPI [11] демонструє

концептуальне поєднання V-моделі SE та традиційної моделі в єдину архітектуру. Публікації Design Society [12] 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 [13] і галузевих дослідженнях. Практичні реалізації модульного підходу демонструють проєкти StanFlex [14] і опціональні модулі до патрульних кораблів Австралійського флоту класу Arafura [15].

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

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

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[81], 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 СП / 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.

1. Класична 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 заводи все частіше впроваджують інтегровані підходи з позитивними результатами. Navantia, Rolls-Royce і Hyundai демонструють реальну ефективність інтеграції SE та Agile.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Evans, J.H. Basic Design Concepts. Journal of the American Society of Naval Engineers, 1959, Vol. 71(4), P. 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://llsra.lt/wp-content/uploads/2023/04/DNV_Maritime_Forecast_2050_2022-final.pdf.
5. 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/>
6. Navantia. F-110 Digital Shipbuilding Programme Report. Madrid, 2021.
7. Siemens reconfirms commitment to Shipbuilding 4.0 with CESENA opening. Доступно за посиланням: <https://news.siemens.com/en-us/siemens-cesena-shipbuilding-xcelerator/>
8. 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>.
9. 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/><https://www.offshore-energy.biz/abs-hd-hyundai-join-forces-on-ai-backed-smart-shipyard-vision/>
10. MDPI JMSE (2024): Systems Engineering for Naval Ship Design Evolution. Доступно за посиланням: <https://www.mdpi.com/2077-1312/12/2/210>.
11. 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.
12. RAND (2016): Modularity and Flexibility in Future Ship Designs. Доступно за посиланням: https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR696.html.
13. Standard Flex 300 The True Multi-role Ship. Доступно за посиланням: <https://www.marinehist.dk/orlogsbib/h/StanFlex.pdf>.
14. 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.

REFERENCE

1. Evans, J.H. Basic Design Concepts. Journal of the American Society of Naval Engineers, 1959, Vol. 71(4), P. 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://llsra.lt/wp-content/uploads/2023/04/DNV_Maritime_Forecast_2050_2022-final.pdf.
5. 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/>
6. Navantia. F-110 Digital Shipbuilding Programme Report. Madrid, 2021.
7. Siemens reconfirms commitment to Shipbuilding 4.0 with CESENA opening. Available at: <https://news.siemens.com/en-us/siemens-cesena-shipbuilding-xcelerator/>
8. 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>
9. 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/>
10. MDPI JMSE (2024): Systems Engineering for Naval Ship Design Evolution. Available at: <https://www.mdpi.com/2077-1312/12/2/210>.
11. Dahlke, Mantwill (DSM 2023): Towards Agile Systems Engineering in Early Stage Design for Complex Naval Vessels. Available at: https://www.design-society.org/download-publication/46878/towards_agile_systems_engineering_in_early_stage_design_for_complex_naval_vessels.
12. RAND (2016): Modularity and Flexibility in Future Ship Designs. Available at: https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR696.html.
13. Standard Flex 300 The True Multi-role Ship. Available at: <https://www.marinehist.dk/orlogsbib/h/StamFlex.pdf>.
14. 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.

Стаття надійшла до редакції 05.11.2025

Посилання на статтю: Демідюк О.О., Бондар А.В. Інтеграція спіральної моделі проектування судна та гнучких систем інженерії в сучасному суднобудуванні // *Вісник Одеського національного морського університету*: Зб. наук. праць, 2025. № 4 (78). С. 184-192. DOI 10.47049/2226-1893-2025-4-184-192.

Article received 05.11.2025

Reference a Journal Artic: Demidiuk O., Bondar A. Integration of the spiral model of ship design and agile systems engineering in modern shipbuilding // *Herald of the Odesa National Maritime University*: Coll. scient. works, 2025. № 4 (78). P. 184-192. DOI 10.47049/2226-1893-2025-4-184-192.