

УДК 621.657

DOI 10.47049/2226-1893-2025-4-161-168

РОЗРОБКА СИСТЕМИ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ПОРТОВОГО ТЕРМІНАЛУ

А.В. Ремінь

аспірант кафедри «Підйомно-транспортні машини та інжиніринг портового
технічного обладнання»
rem2204@icloud.com

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

Анотація. Імітаційне моделювання – практичний інструмент для інженерів портової інфраструктури, який дозволяє оптимізувати операційні процеси, зменшити витрати та підвищити пропускну здатність портів і терміналів. За допомогою моделювання можна дослідити роботу системи без ризиків, в цифровому середовищі, де кожен елемент – від місць швартування до навантажувальної техніки – відтворюється максимально наближено до реальних умов.

Програмне забезпечення дає змогу створити модель, яка враховує особливості роботи контейнерних, наливних і насипних терміналів:

- інфраструктуру (причали, склади, резервуари),
- логістику вантажопотоків (наземний, залізничний, водний транспорт),
- роботу обладнання (мостові крани, навантажувачі, транспортні системи),
- людський фактор (зміни персоналу, продуктивність, графіки роботи),
- екологічні аспекти (шумове та екологічне навантаження).

Завдяки моделі інженери можуть дослідити слабкі місця та перевірити альтернативні сценарії без втручання у реальні процеси. Наприклад:

- Чи обмежує ефективність порту пропускну здатність автотранспорту або резервуарного парку?
- Які наслідки матиме збільшення кількості швартових місць?
- Як вплине на продуктивність зміна графіка роботи мостового крана?
- Чи є потреба у реконфігурації внутрішньої логістики або зміні алгоритмів обробки вантажів?

Інженерні переваги використання сучасного програмного забезпечення:

- можливість проводити детальний аналіз статистичних даних роботи терміналу;
- створення візуалізованих 2D та 3D-моделей для наочної демонстрації;
- оцінка ефективності нових проєктів до їх реалізації;
- тестування стресових навантажень і «аварійних» сценаріїв;
- підтримка прийняття обґрунтованих технічних рішень щодо інфраструктури та процесів.

Програмне забезпечення вже містить спеціалізовані бібліотеки для портового сектору, включно з інструментами моделювання:

- контейнерних терміналів;
- нафтоналивних і насипних вантажів;
- ЗПГ-терміналів;
- мультимодальних перевезень (залізнична та дорожня бібліотеки).

Розроблена імітаційна модель – це не просто візуалізація, а робочий інструмент інженера для проектування, оптимізації та управління портовими процесами. Вона допомагає зменшити простой, скоротити експлуатаційні витрати та збільшити ефективність використання інфраструктури.

Ключові слова: імітаційна модель, оптимізація роботи терміналу, оптимізація портових операцій, підвищення пропускної здатності, візуалізовані моделі, оцінка ефективності рішень, програмне забезпечення, зменшення витрат.

UDC 621.657

DOI 10.47049/2226-1893-2025-4-161-168

DEVELOPMENT OF A SIMULATION MODELING SYSTEM FOR PORT TERMINAL OPERATIONS

A.V. Remin

PhD student of the Department of Lifting and Transport Machines
And Engineering of Port Technical Equipment
rem2204@icloud.com

Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine

Abstract. *Simulation modeling is a practical tool for port infrastructure engineers that enables the optimization of operational processes, cost reduction, and increased throughput capacity of ports and terminals. Through modeling, system performance can be studied in a risk-free digital environment where each element – from berths to handling equipment – is reproduced as close to real conditions as possible.*

The software allows the creation of a model that accounts for the specific features of container, liquid bulk, and dry bulk terminals, including:

- *infrastructure (berths, warehouses, storage tanks);*
- *cargo flow logistics (land, rail, and water transport);*
- *equipment operation (gantry cranes, forklifts, transport systems);*
- *human factors (shift schedules, productivity, workforce availability);*
- *environmental aspects (noise and ecological impact).*

Using the model, engineers can identify bottlenecks and test alternative scenarios without interfering with real-world operations. For example:

- *Does the efficiency of the port depend on the throughput of forklifts or the storage tank capacity?*
- *What are the implications of increasing the number of berthing places?*

- *How will changes to gantry crane schedules affect productivity?*
- *Is there a need to reconfigure internal logistics or modify cargo handling algorithms?*

Engineering advantages of using modern simulation software include:

- *the ability to perform detailed statistical analysis of terminal operations;*
- *creation of visualized 2D and 3D models for clear demonstration;*
- *evaluation of new project efficiency before implementation;*
- *testing of stress loads and emergency scenarios;*
- *support for data-driven technical decisions on infrastructure and processes.*

The software already includes specialized libraries for the port sector, with modeling tools for:

- *container terminals;*
- *liquid and dry bulk cargo handling;*
- *LNG terminals;*
- *multimodal transport (rail and road libraries).*

The developed simulation model is not just a visualization but a functional engineering tool for designing, optimizing, and managing port operations. It helps reduce downtime, minimize operational costs, and increase infrastructure utilization efficiency.

Keywords: *simulation model, terminal operation optimization, port operation efficiency, throughput increase, visualized models, performance assessment, software, cost reduction.*

Вступ. На сьогодні катастрофічно не вистачає інструмента, який дозволить швидко оптимізувати операційні процеси, зменшити витрати та підвищити пропускну здатність портів і терміналів. Не вистачає інструмента, який врахує в собі особливості роботи будь-якого портового терміналу: інфраструктуру, логістику вантажопотоків, роботу обладнання, людський фактор, екологічні аспекти. Введення програмного забезпечення в роботу портових терміналів дозволить максимально швидко вирахувати слабкі місця та перевірити альтернативні сценарії без втручання в робочий процес.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сьогодні абсолютна вся виробнича діяльність морських портів залежить від роботи всіх видів транспорту, яка, на жаль, є нерівномірною. Ця робота характеризується випадковими величинами та процесами. Для вирішення завдань, що включають в себе випадкові події, використовують аналітичні та імітаційні моделі. Імітаційні моделі застосовуються в тому випадку, коли аналітичні моделі застосувати неможливо. Питанню введення програмного забезпечення для оптимізації операційних процесів морського терміналу присвячено дослідженню Лапкіної І.А, Малаксіано Н.А. [1], в якому використовуються імітаційні моделі для оцінки виробничих потужностей морського терміналу. Результати цих моделювань дозволили авторам з високою точністю прогнозувати показники ефективності функціонування терміналу щодо різних варіантів його стратегічного розвитку. Ще один вітчизняний автор Малаксіано О.А. досліджував у своїй роботі співвідношення між показниками рівня завантаження терміналу і показниками обробки суден за допомогою відповідної

математичної моделі, заснованої на застосуванні теорії масового обслуговування. Отримані результати можуть бути використаними для дослідження оптимального рівня завантаження, що приносить максимальний прибуток для системи портоператор-клієнт. У статті Salem M. AL-YAKOOB, Hanif D. SHERAL [3] автор, використовуючи цілочисельну модель нелінійного програмування та гібридний двоступеневий алгоритм, який об'єднав у собі розумні розташування об'єктів та раніше розроблений підхід генерування колонок.

Метою статті є розробка системи імітаційного моделювання роботи, знайдення недоліків та збільшення пропускної спроможності в роботі портового терміналу (на прикладі контейнерного терміналу).

Виклад основного матеріалу. Проблема.

Державний морський торговельний порт мав на меті збільшити пропускну спроможність, шляхом вибору оптимального рішення для модернізації одного зі своїх об'єктів – контейнерного залізничного терміналу. Завдання полягало у визначенні максимальної пропускної спроможності контейнерного терміналу, а також окремих його складових, таких як:

- перевантажувальна техніка;
- залізнична інфраструктура;
- контейнерний майданчик.

Коротко про об'єкт оптимізації:

- контейнерний залізничний термінал має залізничну інфраструктуру загальною довжиною близько 3 000 м і власний парк маневрових локомотивів.

- склад тимчасового зберігання займає площу понад 22 000 м².

- на території терміналу розташований відкритий майданчик місткістю 2 500 TEU для складування та зберігання великотоннажних контейнерів, з можливістю розміщення 20- та 40-футових контейнерів у зоні митного контролю та на складі тимчасового зберігання.

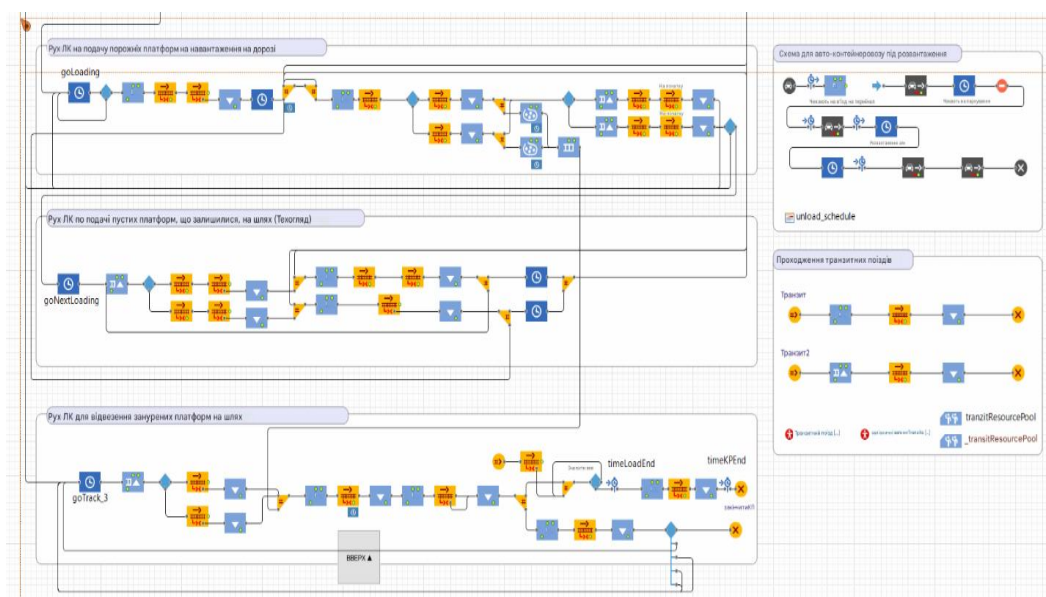
- контейнерний термінал має можливості з обробки (приймання/ відправлення, навантаження/розвантаження) фітінгових платформ, універсальних платформ, критих вагонів, напіввагонів тощо.

- термінал експлуатує два козлові крани, вилкові навантажувачі, власний парк автомобільних тягачів та іншу допоміжну техніку.

Для пошуку оптимального варіанту модернізації об'єкта було вирішено змодельовати кілька різних сценаріїв розвитку терміналу.

Рішення.

Було прийнято рішення розробити цифрового двійника терміналу у вигляді імітаційної моделі з високим рівнем відповідності реальному фізичному об'єкту, де розбіжність між результатами віртуальної експлуатації та фактичними даними не перевищує 5 %. Цифровий двійник дозволяє досягти високої точності моделювання та врахувати велику кількість параметрів, нелінійні, неочевидні або невідомі залежності й причинно-наслідкові зв'язки.



Модель з/д контейнерного терміналу

Окрім точності, технологія імітаційного моделювання, на відміну від аналітичного, дозволяє розгортати процеси у часі, наприклад, прискорюючи їх: за кілька хвилин можна змодельовати кілька місяців або років та провести велику кількість експериментів [4].

Точкою входу моделі став прихід залізнодорожних складів із завантаженими контейнерами на сортувальну станцію ЗД, після чого, з урахуванням розкладу руху транзитних поїздів, виконувалися маневрові роботи з переміщення вагонів на залізничні колії об'єкта замовника. Точка виходу – відправлення складів із порожніми контейнерами із сортувальної станції ЗД.

У межах проєкту моделювалися всі основні процеси залізничного терміналу:

- внутрішня та прилегла залізнична логістика;
- автоперевезення завантажених і порожніх контейнерів;
- складська логістика;
- митне оформлення.

Завдяки можливостям програмного забезпечення до моделі було додано 2D- та 3D-анімацію. Вона дозволяла наблизити окремі ділянки моделі або спостерігати роботу її окремих компонентів, що допомагало візуально контролювати перебіг процесів на кожній ділянці.

За допомогою кольорової анімації позначався різний статус контейнерів:

- червоні контейнери – ті, що не пройшли митне очищення;
- зелені – розмитнені та готові до відвантаження;
- жовті – порожні.

Крім того, була розроблена система «віртуальних датчиків», за допомогою якої було організовано процес збору даних із цифрового двійника. Операційні дані оновлювалися в режимі реального часу. Вони дозволяли відстежувати поточні показники терміналу, а також виконувати калібрування моделі. Саме завдяки такій ретельній роботі зі збору даних вдалося досягти високого рівня відповідності цифрового двійника терміналу реальному об'єкту.

Після створення та калібрування цифрового двійника було визначено максимальну пропускну спроможність термінала, а показники порівнювали з даними аналітичної моделі. Під час порівняння результатів роботи моделей терміналу в режимі «як є» точність аналітичної моделі становила 72 %, тоді як імітаційної – 96 %.

Також були проведені віртуальні випробування роботи основного перевантажувального механізму терміналу – порталного крана: з різною тривалістю для кожної кранової операції у тривісному переміщенні основи та спредера. Таким чином були виявлені «слабкі місця» в роботі крана та запропоновано варіанти оптимізації його роботи, підтверджені даними експериментів. В програмному забезпеченні за моделювання навантажувально-розвантажувальних робіт відповідає спеціалізована Бібліотека виробничих систем. Вона дозволяє створювати точні моделі транспортування вантажів на складах і підприємствах, у портах і терміналах, спрощує управління матеріальними потоками та дає змогу виявляти слабкі місця у технологічних процесах.

Інша група експериментів стосувалася моделювання роботи терміналу за різної організації внутрішньої логістики. Показники ефективності роботи терміналу, відображені в моделі, дали змогу проаналізувати значення вихідних параметрів за різних налаштувань експериментів. У результаті моделювання були розроблені рекомендації щодо модернізації інфраструктури та реорганізації бізнес-процесів терміналу, також засновані на даних моделювання [2].

Після проведення необхідних експериментів і отримання вихідних даних було виявлено слабкі місця в роботі та оптимальні сценарії модернізації. Визначено, що за наявних потужностей і оптимізації окремих операцій пропускну спроможність терміналу можна підвищити на 57 %.

Висновки. Імітаційне моделювання дає змогу знаходити відповіді за допомогою аналізу статистики роботи порту та наочної візуалізації. Програмне забезпечення може без спрощень відтворювати динаміку бізнес-процесів, зокрема внутрішню логістику портів або терміналів.

Сучасне програмне забезпечення дає змогу підвищити пропускну здатність порту, скоротити час простою, знизити витрати та забезпечити максимальну віддачу від капіталовкладень. У моделі можна тестувати сценарії «що, якщо», перевіряти стійкість системи до навантажень і вдосконалювати управління для безперервної та оптимальної роботи порту чи терміналу.

Імітаційне моделювання за допомогою програмного забезпечення сьогодні – це незамінний інструмент для управління контейнерними терміналами та портами сипучих або наливних вантажів. Імітаційна модель відкриває можливості для детального аналізу роботи підприємства та оптимізації його діяльності.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лапкіна І.О., Малаксіано М.О. Использование методов имитационного моделирования для оценки пропускной способности морского терминала // Зб. наук. праць УПІ-ї міжнародної науково-практичної конференції «Транспорт і логістика: проблеми та рішення». До 100-річчя Національної акад. наук України. 23-25 травня 2018 р. Одеса: Куприєнко С.В. С. 34-35 URL: https://snu.edu.ua/wpcontent/uploads/2018/05/k_05_18.pdf.
2. Malaksiano O.A., Malaksiano M.O. The relationship between the loading level and capacity of the sea port terminal // Економіка: реалії часу. Науковий журнал. 2014. № 2(12). С. 21-27. URL: <http://economics.opu.ua/files/archive/2014/n2.html>
3. Salem M. AL-YAKOOB, Hanif D. SHERALI . A Mathematical Modelling and Optimization Approach for a Maritime Facility Location Transshipment Problem. INFORMATICA, 2018, Vol. 29, No. 4, С. 609-632 609 2018 Vilnius University DOI: <http://dx.doi.org/10.15388/Informatica.2018.184>

4. Немчук О.О., Стрельцов П.М., Леґецька І.П. Розробка методів підвищення продуктивності перевантажувального обладнання в портах Чорноморсько-Балтійського басейну з метою забезпечення економічної сталості країн регіону. Збірник тез Міжнародної наукової конференції «Морська безпека Балтійсько-Чорноморського регіону: виклики та загрози «3 грудня 2021 р.», Одеса, Україна.

REFERENCES

1. Lapkina I.O., Malaksiano M.O. *Use of Simulation Modeling Methods to Assess the Throughput Capacity of a Seaport Terminal* // Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference «Transport and Logistics: Problems and Solutions». Dedicated to the 100th Anniversary of the National Academy of Sciences of Ukraine. May 23-25, 2018. Odesa: Kupriyenko S.V. P. 34-35. URL: https://snu.edu.ua/wpcontent/uploads/2018/05/k_05_18.pdf.
2. Malaksiano O.A., Malaksiano M.O. The relationship between the loading level and capacity of the sea port terminal // Economics: Realities of the Time. Scientific Journal. 2014. № 2(12). С. 21-27. URL: <http://economics.opu.ua/files/archive/2014/n2.html>.
3. Salem M. AL-YAKOOB, Hanif D. SHERALI . A Mathematical Modelling and Optimization Approach for a Maritime Facility Location Transshipment Problem. INFORMATICA, 2018, Vol. 29, No. 4, P. 609-632 609 2018 Vilnius University DOI: <http://dx.doi.org/10.15388/Informatica.2018.184>.
4. Nemchuk O.O., Streltsov P.M., Lehetska I.P. (2021). Rozrobka metodiv pidvyshchennia produktyvnosti perevantazhuvalnoho obladdannia v portakh Chornomorsko-Baltiiskoho baseinu z metoiu zabezpechennia ekonomichnoi staloosti krain rehionu. Zbirnyk tez Mizhnarodnoi naukovoï konferentsii «Morska bezpeka Baltiisko-Chornomorskoho rehionu: vyklyky ta zahrozy» Odesa, Ukraina.

Стаття надійшла до редакції 03.11.2025

Посилання на статтю: Ремінь А.В. Розробка системи імітаційного моделювання роботи портового терміналу // *Вісник Одеського національного морського університету*: Зб. наук. праць, 2025. № 4 (78). С. 161-168. DOI 10.47049/2226-1893-2025-4-161-168.

Article received 03.11.2025

Reference a Journal Article: Remin A.V. Development of a simulation modeling system for port terminal operations // *Herald of the Odesa National Maritime University*: Coll. scient. works, 2025. № 4 (78). P. 161-168. DOI 10.47049/2226-1893-2025-4-161-168.