

УДК 656.615: 656.628

**ПРОЕКТУВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ
З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ**

І.О. Лапкіна

д.е.н., професор, завідувач кафедри
«Управління логістичними системами та проектами»
lapkina@ukr.net

М.О. Малаксіано

к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедри
«Управління логістичними системами та проектами»
malax@ukr.net

Одеський національний морський університет

Є.С. Савченко

експерт з управління логістичними системами,
y.savchenko@protein-service.eu

Компанія Project tender information service, GmbH, Гамбург

Анотація. Розглядається задача обґрунтування оптимального варіанта модернізації Ro-Ro терміналу порту Емден з урахуванням тенденцій зміни структури та інтенсивності вантажопотоків, особливостей організації вантажних робіт та специфіки навігаційних умов. Для вирішення поставленої задачі побудовано імітаційну модель. При розробці даної моделі були створені алгоритми оперативного управління рухом суден в гирлі річки Емс, що враховують динаміку приливів і відливів, а також реалізовані алгоритми оперативного розподілу ресурсів буксирного флоту та стивідорних бригад. Завдяки такому підходу вдалося прогнозувати з високою точністю як показники ефективності, так і показники стійкості функціонування терміналу при різних варіантах його модернізації.

Ключові слова: Ro-Ro термінал, імітаційне моделювання, оптимізація транспортної інфраструктури, інтелектуальні транспортні системи.

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

И.А. Лапкина

д.э.н., профессор, заведующая кафедрой
«Управление логистическими системами и проектами»

Н.А. Малаксиано

к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры
«Управление логистическими системами и проектами»

Одесский национальный морской университет

Е.С. Савченко

эксперт по управлению логистическими системами
Компания Project tender information service, GmbH, Гамбург

Аннотация. *Исследуется задача обоснования оптимального варианта модернизации Ro-Ro терминала порта Эмден с учетом тенденций изменения структуры и интенсивности грузопотока, особенностей организации погрузо-разгрузочных работ и специфики навигационных условий. Для решения поставленной задачи построена имитационная модель. При разработке данной модели были созданы алгоритмы оперативного управления движением судов в устье реки Эмс, учитывающие динамику приливов и отливов, а также реализованы алгоритмы оперативного распределения ресурсов буксирного флота и стивидорных бригад. Благодаря такому подходу удалось прогнозировать с высокой точностью как показатели эффективности, так и показатели устойчивости функционирования терминала при различных вариантах его модернизации.*

Ключевые слова: *Ro-Ro терминал, имитационное моделирование, оптимизация транспортной инфраструктуры, интеллектуальные транспортные системы.*

UDK 656.615: 656.628

**DESIGN AND OPTIMIZATION OF TRANSPORT SYSTEMS
BY MEANS OF SIMULATION MODELING**

I.O. Lapkina

Doctor of economic sciences, professor
head of Department of «Management of logistics systems and projects»
lapkina@ukr.net

M.O. Malaksiano

PhD, associate professor
Department of «Management of logistics systems and projects»
malax@ukr.net

Odessa National Maritime University

Y.S. Savchenko

logistics systems expert
y.savchenko@protein-service.eu

Project tender information service, GmbH, Hamburg

***Abstract.** The purpose of the research assignment is to substantiate the optimal variant of modernization for the Port Emden Ro-Ro terminal, taking into account the trends in the intensity and structure of the cargo flow, specifics of cargo handling operations and navigation conditions. To solve the problem, a computer simulation model was designed. In the development of this model, the algorithms for optimal vessel traffic control at the mouth of the River Ems were implemented. When creating the model, the dynamics of tides, rules for operational distribution of the towboat fleet and stevedoring teams, as well as other specific technological features were taken into account. Such approach allowed a very accurate prediction of the performance indicators and indicators of sustainability for various options of terminal modernization.*

***Keywords:** Ro-Ro terminal, simulation, transport infrastructure optimization, intelligent transport systems.*

Вступ. Підвищення ефективності функціонування транспортних систем має велике значення для багатьох підприємств і регіонів. Тому, як на рівні стратегій розвитку окремих держав, так і на рівні міжнародних організацій наголошується на необхідність розвитку інноваційних технологій в сфері транспорту, в тому числі, створення умов для планування і проведення наукових досліджень з метою розвитку і впровадження інноваційних технологій та інтелектуальних транспортних систем [1; 2]. Розвиток і впровадження інтелектуальних транспортних систем (ІТС) (Intelligent transportation system) передбачає інтеграцію сучасних інформаційних і комунікаційних технологій та засобів автоматизації з транспортною інфраструктурою, транспортними засобами і користувачами, та спрямовано на підвищення безпеки та ефективності транспортного процесу [2]. Впровадження інноваційних методів планування і управління дозволяє в ряді випадків істотно покращити показники роботи транспортних систем за рахунок підвищення координації вантажопотоків і оптимізації використання наявних ресурсів.

Для обґрунтування стратегічних планів довгострокового розвитку багатьох складних транспортних систем високу ефективність показують методи імітаційного моделювання.

Дослідженню шляхів підвищення ефективності функціонування сучасних високотехнологічних транспортних систем останнім часом приділяється все більше уваги в наукових виданнях. Так, питання стійкого функціонування транспортних систем в умовах нерівномірного вантажопотоку були досліджені в роботах [3; 4]. Також в [3] було обґрунтовано вибір оптимальної структури парку обладнання з використанням методів імітаційного моделювання.

В [5] проводиться огляд і пропонується класифікація сучасних методів і результатів наукових досліджень інтермодальних транспортних систем, а також аналізуються тенденції і перспективи розвитку в цьому напрямку. Питання визначення оптимальних термінів ремонтів перевантажувального обладнання з використанням методів теорії випадкових

процесів були вивчені в роботах [6; 7]. В [8-10] досліджуються різні підходи до проектування і організації роботи інтелектуальних транспортних систем. Питання визначення оптимальних термінів служби устаткування транспортних систем в умовах невизначеності з урахуванням можливостей його реставрації досліджені в [11-14]. В роботі [15] використані багатокритеріальні оцінки для зменшення ризиків при плануванні ремонтів і заміні складного перевантажувального обладнання, яке функціонує в умовах неповністю передбачуваного вантажопотоку.

Одним з найбільш перспективних та затребуваних на практиці напрямків наукових досліджень в сфері проектування та оптимізації сучасних складних транспортних систем є дослідження, що базуються на застосуванні методів та алгоритмів імітаційного моделювання.

Мета статті. Метою даної роботи є дослідження проблеми оцінки показників ефективності і стійкості роботи Ro-Ro терміналу порту Емден при визначенні оптимального варіанту його модернізації з урахуванням тенденцій зміни структури та інтенсивності вантажопотоку, особливостей організації вантажних робіт і специфіки умов навігації. Для вирішення даної проблеми пропонується використовувати методи імітаційного моделювання.

Викладення основного матеріалу. Ro-Ro термінал порту Емден є великим транспортним вузлом, через який щодоби перевантажується більше ніж 5 тис. автомобілів. До складу терміналу входить чотири глибоководні причали, дві станції навантаження потягів і більше ніж 1,5 млн. м² складських площ. Порт Емден знаходиться в гирлі річки Емс (рис. 1, 2).

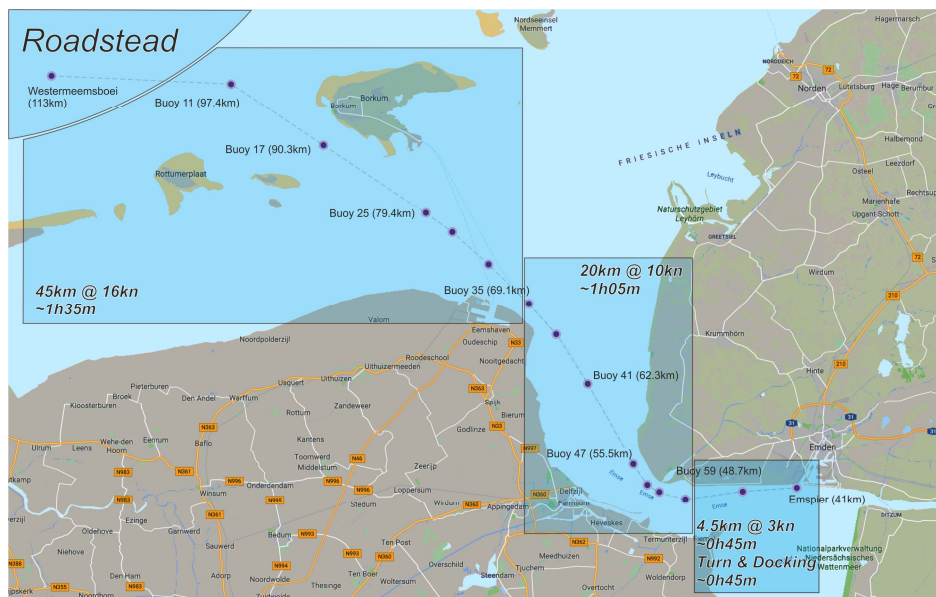


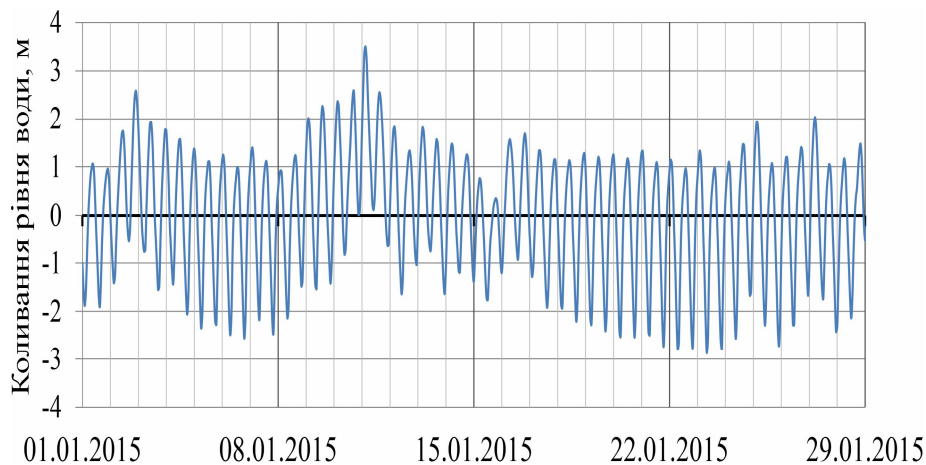
Рис. 1. Схема руху суден до Ro-Ro терміналу порту Емден [16]



Рис. 2. Глибоководні причали Ro-Ro терміналу порту Емден [17]

Внаслідок відливів рух суден з великим осіданням по річці Емс обмежений протягом значної частини доби. При оцінці роботи терміналу необхідно враховувати тенденції зміни вантажопотоків, що проходять через термінал, і пов'язані з цим зміни графіків руху суден, що здійснюють як лінійні, так і трампові перевезення, а також враховувати специфіку організації стивідорних робіт та ряд інших чинників. Рух суден від місця якорної стоянки до причалів терміналу в середньому займає близько 3,5 годин (рис. 1). Глибина по фарватеру варіюється від 14,23 до 10,5 м. При цьому амплітуда коливань рівня води, що пов'язані з приливами і відливами, протягом доби може перевищувати 4 м, а в перебігу тижня – 6 м (рис. 3). Тому під час відливів рух суден з великим осіданням в гирлі річки Емс обмежений. Це істотно впливає як на пропускну спроможність терміналу, так і на показники часу стоянки суден. Крім того, це ускладнює прогнозування значень показників ефективності та стійкості функціонування терміналу в умовах збільшення інтенсивності і нерівномірності вантажопотоків, а також при збільшенні осідання суден, що заходять до терміналу.

З огляду на тенденції зміни структури та інтенсивності вантажопотоку, а також зважаючи на збільшення місткості та осідання оброблюваних суден, адміністрація терміналу розглядала декілька альтернативних варіантів модернізації інфраструктури терміналу. При обґрунтуванні вибору оптимального варіанту модернізації терміналу виникла необхідність оцінки показників ефективності та стійкості функціонування терміналу при кожному з варіантів модернізації, які розглядалися, та для різних можливих сценаріїв змін структури і інтенсивності вантажопотоку.



*Рис. 3. Фрагмент графіка змін рівня води
біля Ro-Ro терміналу порту Емден*

Як можливий варіант модернізації терміналу розглядалося будівництво додаткового глибоководного причалу, різні варіанти проведення комплексу днопоглиблювальних робіт, збільшення інтенсивності стивдорних робіт, а також різні комбінації цих заходів. Оскільки класичні аналітичні методи теорії масового обслуговування і методи оптимального управління не дозволяють досліджувати поставлену задачу в повному обсязі, були застосовані методи імітаційного моделювання. Нами була створена імітаційна модель Ro-Ro терміналу порту Емден. Ця модель реалізована у вигляді окремого прикладного програмного забезпечення з графічним інтерфейсом, засобами вводу, верифікації та виводу даних, а також тривимірною анімацією. Відразу після запуску програма зчитує вхідні параметри моделі з відповідним чином структурованого файлу. У цьому файлі міститься вся інформація щодо параметрів модернізації терміналу, сценарію змінення вантажопотоку, графіків суднозаходів, кількості і потужності буксирів, інтенсивності та розкладу роботи стивдорних бригад та загальних параметрів роботи імітаційної моделі. Запропонована імітаційна модель здатна працювати як в режимі одиночного прогону з відображенням 3D анімації, так і в режимі високошвидкісних багаторазових прогонів без візуалізації. При роботі в режимі 3D презентації модель відображає анімацію, яка дозволяє в реальному часі спостерігати за процесами, що відбуваються на терміналі. На рис. 4, 5 представлені вікна імітаційної моделі, яка працює в режимі одиночного прогону з відображенням 3D презентації для базового і одного з проектних варіантів модернізації терміналу.

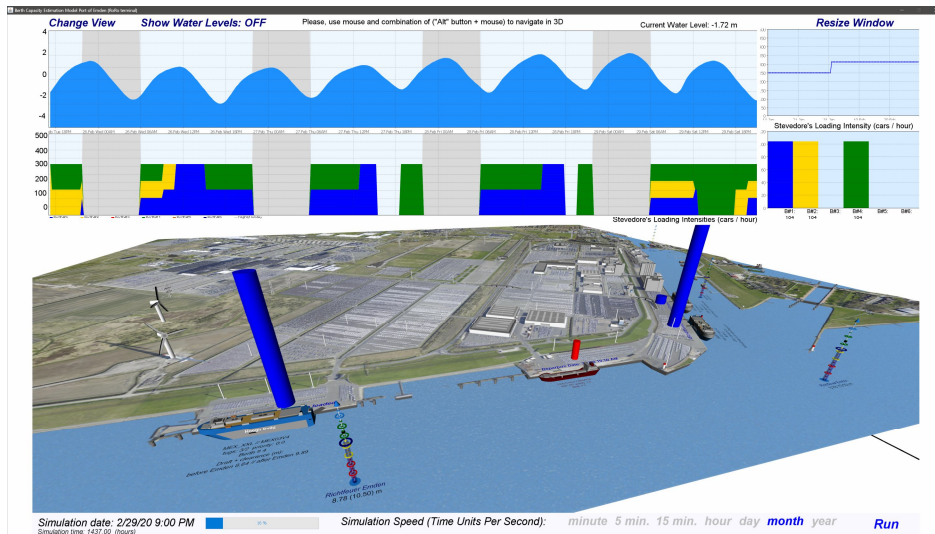


Рис. 4. Вікно імітаційної моделі під час прогону в режимі 3D презентації – базовий варіант

У верхній частині вікна моделі наведено графік зміни рівня води та діаграму розподілу стивідорних бригад між причалами. Циліндричні стовпчики синього і червоного кольору, які розташовані над причалами у вікні 3D презентації, відображають стан процесу обробки суден. Індикатори, що зображені над буями вздовж фарватеру, показують зміни поточних рівнів води в різних частинах маршруту руху суден з похибкою $\pm 0,01$ м.

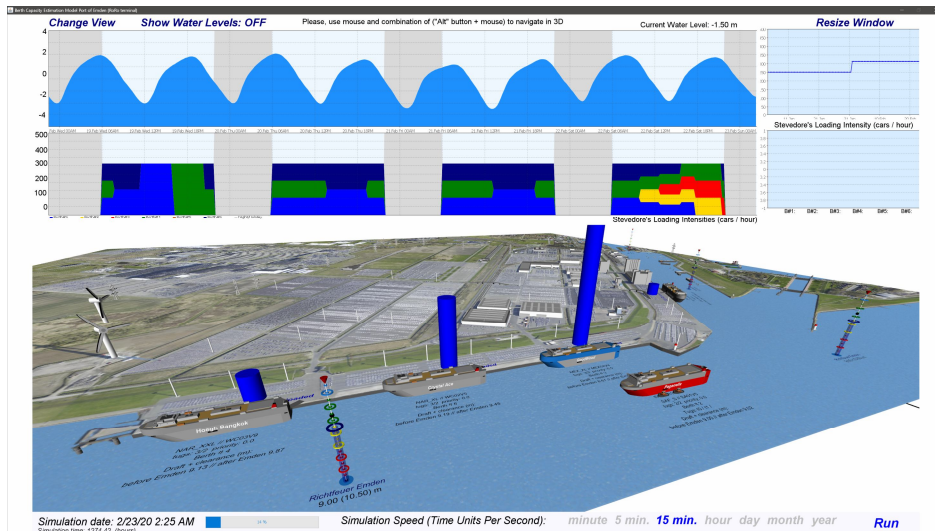


Рис. 5. Вікно імітаційної моделі під час прогону в режимі 3D презентації – проектний варіант з додатковим причалом

При створенні імітаційної моделі були розроблені алгоритми, що моделюють роботу диспетчерських служб терміналу. Ці алгоритми дозволили ефективно регулювати рух суден по річці Емс з урахуванням змін рівня води на кожній ділянці фарватеру, а також керувати роботою буксирного флоту. Велику увагу в даній моделі було приділено тому, щоб максимально точно відтворити графіки суднозаходів, врахувати характеристики і показники завантаження суден, а також врахувати сезонні зміни вантажопотоків і впливи випадкових факторів. Була реалізована можливість моделювання як руху суден, що здійснюють рейси відповідно до фіксованих графіків, так і руху трампових суден. Передбачено механізм пріоритетів вибору причалів і черговості обслуговування суден.

Модель дозволяє налаштовувати генератори випадкових чисел таким чином, щоб всі випадкові процеси, які відбуваються на терміналі, відтворювалися ідентично від прогону до прогону. Завдяки цьому можна спостерігати, наскільки успішно система здатна долати ті ж самі кризові ситуації при різних варіантах модернізації терміналу. Також можна налаштувати генератори випадкових чисел так, щоб при кожному прогоні створювалася унікальна послідовність випадкових подій. Цей режим дозволяє дослідити стійкість показників ефективності роботи терміналу з огляду на можливі випадкові коливання зовнішніх факторів. Алгоритми імітаційної моделі оптимізовані так, що прогін одного сценарію протягом одного року модельного часу з виключеною анімацією займає менше однієї секунди роботи сучасного персонального комп'ютера. Це дає можливість проводити серії з великою кількістю випробувань і на їх основі робити статистично обґрунтовані висновки або застосовувати різні чисельні алгоритми для спрямованого пошуку оптимальних параметрів модернізації терміналу.

Важливим аспектом при створенні даної імітаційної моделі був вибір структури вхідних даних та організація вводу і виводу даних. З одного боку, обрана структура вхідних даних дозволила досить точно відтворювати задані графіки суднозаходів так, щоб була можливість перевірки адекватності роботи моделі на фактичних даних минулих років, а також можна було досліджувати роботу терміналу в найближчій короткостроковій перспективі. З іншого боку, запропонована структура вхідних даних дала можливість зручно описувати сценарії вантажопотоків, які можливі у віддаленому майбутньому і для яких немає точних графіків руху суден, а є лише загальний опис тенденцій.

Для того, щоб зробити введення даних зручним і інтуїтивно зрозумілим для користувача, були використані різні візуальні засоби. Разом з тим була реалізована дворівнева перевірка інформації, що вводиться. Перший рівень перевірки був реалізований ще на етапі редагування файлу вхідних даних. На цьому рівні забезпечено виявлення більшості явних помилок вводу, що лежать на поверхні.

Другий рівень перевірки вхідних даних здійснюється імітаційною моделлю безпосередньо перед стартом прогону. На другому рівні проводиться серія більш складних перевірок і тестових розрахунків, які спрямовані на виявлення глибинних невідповідностей і логічних протиріч.

Після закінчення прогону модель генерує файл, в який записуються як загальні статистичні показники функціонування терміналу протягом заданого відрізка часу, так і детальний протокол з щосекундною фіксацією всіх подій, які сталися на терміналі під час прогону моделі. Аналізуючи цей файл, можна відстежити виникнення кризових подій, спостерігати появу черг і аналізувати обставини, що їх зумовили. Також можна оцінювати те, наскільки швидко система здатна долати кризові ситуації і яких ресурсів при цьому бракує.

На підставі аналізу статистичних даних, отриманих в результаті багаторазових прогонів імітаційної моделі, були встановлені як оцінки середніх значень показників ефективності функціонування терміналу в різних ситуаціях, так і оцінки стійкості цих показників до можливих коливань вантажопотоку і випадкових відхилень в графіках руху суден. Були визначені вузькі місця даної транспортної системи. Для різних сценаріїв зміни вантажопотоків і різних варіантів модернізації терміналу були отримані оцінки середнього часу простою суден на рейді, значення коефіцієнтів зайнятості причалів та інших ресурсів, а також побудовані відповідні функції щільності розподілів. Для значень різних показників функціонування терміналу були визначені довірчі інтервали.

Висновки. Головні задачі, що стояли перед даним дослідженням, насамперед стосувалися оцінки та обґрунтування стратегічних планів довгострокового розвитку терміналу. Однак рішення цих задач виявилось неможливим без урахування та глибокого аналізу специфіки ряду процесів, управління якими має здійснюватися на операційному рівні. Основні складнощі, що виникли при створенні даної імітаційної моделі, стосувалися саме розробки та реалізації алгоритмів оптимального управління процесами, які відбуваються на операційному рівні. Отже, при розробці цієї моделі були створені алгоритми оперативного управління рухом суден в гирлі річки Емс з урахуванням динаміки припливів і відливів, реалізовані алгоритми оперативного розподілу ресурсів буксирного флоту і стивідорних бригад, та ін. Завдяки тому, що в запропонованій імітаційній моделі були реалізовані алгоритми, здатні на оперативному рівні адекватно виконувати функції диспетчерських служб, результати моделювання дозволили з високою точністю прогнозувати показники ефективності функціонування терміналу для різних варіантів його стратегічного розвитку.

При моделюванні транспортних систем велике значення має адекватність моделювання графіків руху транспортних засобів, точний опис всіх технологічних операцій, пов'язаних з обслуговуванням транспортних засобів і обробкою вантажів, врахування можливих впливів випадкових факторів. Однак, не менш важливим, і в ряді випадків набагато складнішим аспектом створення адекватних імітаційних моделей сучасних транспортних систем, є моделювання роботи диспетчерських служб у рамках інтелектуальних транспортних систем. Диспетчерські служби займаються оптимізацією руху транспортних засобів, координують різні процеси, що паралельно протікають, а також здійснюють оперативний перерозподіл наявних виробничих ресурсів. Від ефективності роботи цих служб істотно залежить продуктивність і стійкість роботи більшості транспортних систем. Тому моделювання роботи диспетчерських служб в складі ІТС є важливою й, як правило, найбільш складною частиною досліджень, які спрямовані на проектування сучасних транспортних систем та прогнозування значень їх показників ефективності. Зазвичай моделювання роботи диспетчерських служб вимагає розробки складних алгоритмів та індивідуальний підхід для кожної окремої ситуації. Але, незважаючи на складність проектування і створення імітаційних моделей, а також трудомісткість збору і аналізу вхідних і вихідних даних, доцільність використання такого підходу в багатьох випадках обумовлена його високою точністю і можливістю ефективного використання при дослідженні сучасних складних транспортних систем.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Intelligent Transport Systems – Concept Note. United Nations. Inland Transport Committee. 78-th session / Geneva, 23-26 February 2016 // <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2016/itc/ECE-TRANS-2016-10e.pdf>*
2. *Об основных направлениях и этапах реализации скоординированной транспортной политики государств-членов Евразийского экономического союза / Решение Высшего евразийского экономического совета от 26 декабря 2016 г. № 19 // https://docs.eaeunion.org/docs/ru-ru/01112853/cncd_13012017_133_att.zip*
3. *Lapkina I.O. Optimization of the structure of sea port equipment fleet under unbalanced load / I.O. Lapkina, M.O. Malaksiano, M.O. Malaksiano // Actual Problems of Economics. – 2016. – Vol. 9. – Issue 183. – P. 364-371.*
4. *Lapkina I.O. Modelling and optimization of perishable cargo delivery system through Odesa port / I.O. Lapkina, M.O. Malaksiano // Actual Problems of Economics. – 2016. – Vol. 3. – Issue 177. – P. 353-365.*

5. Crainic T.G. *Simulation of intermodal freight transportation systems: a taxonomy* // T.G. Crainic, G. Perboli, M. Rosano / *European Journal of Operational Research*. – 2018. – Vol. 270. – Issue 2. – P. 401-418.
6. Малаксиано Н.А. *Об оптимальных сроках ремонтов сложного портового оборудования* / Н.А. Малаксиано // *Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Економіка*. – 2012. – № 6. – Вип. 3. – С. 186-195.
7. Malaksiano M.O. *On the optimal repairs and retirement terms planning for complex port equipment when forecast level of employment is uncertain* / M.O. Malaksiano // *Economic cybernetics*. – 2012. – № 4-6 (76-78). – P. 49-56.
8. Bézivin J. *Model Driven Engineering: An Emerging Technical Space. In Generative and Transformational Techniques in Software Engineering; Lecture Notes in Computer Science* / R. Lämmel, J. Saraiva, J. Visser, Eds. – Heidelberg: Springer, 2006. – Vol. 4143. – P. 36-64.
9. Müller J.P. *Modeling Reactive Behaviour in Vertically Layered Agent Architectures. In Intelligent Agents; Lecture Notes in Computer Science* / J.P. Müller, M. Pischel; M. Thiel / Wooldridge, M.J., Jennings, N.R., Eds. – Heidelberg: Springer, 1995. – Vol. 890. – P. 261-276.
10. Faouzi N.-E.E. *Data fusion in intelligent transportation systems: Progress and challenges-A survey* / N.-E.E. Faouzi, H. Leung, A. Kurian // *Inf. Fusion*. – 2011. – № 12. – P. 4-10.
11. Malaksiano N.A. *On the stability of economic indicators of complex port equipment usage* / N.A. Malaksiano // *Actual Problems of Economics*. – 2012. – Vol. 12. – Issue 138. – P. 226-233.
12. Lapkina I. *Estimation of fluctuations in the performance indicators of equipment that operates under conditions of unstable loading* / I. Lapkina, M. Malaksiano // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2018. Vol. 1. – Issue 3(91). – P. 22-29.
13. Lapkina I. *Elaboration of the equipment replacement terms taking into account wear and tear and obsolescence* / I. Lapkina, M. Malaksiano // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2018. – Vol. 3. – Issue 3 (93). – P. 30-39.
14. Лапкина И.А. *О повышении устойчивости показателей эффективности при планировании сроков обновления сложного оборудования* / И.А. Лапкина, Н.А. Малаксиано // *Вісник ОНМУ: Зб. наук. праць*. – Одеса: ОНМУ, 2018. – № 1. – Вип. 54. – С. 207-217.

15. Малаксиано Н.А. Использование многокритериальных оценок для уменьшения рисков при планировании ремонтов и замен сложного портового оборудования, функционирующего в условиях неполнотью определенного грузопотока / Н.А. Малаксиано // Методи та засоби управління розвитком транспортних систем: Зб. наук. праць. ОНМУ. – 2013. – № 1 (20). – С. 7-27.
16. Google Maps // <https://www.google.com/maps/@53.3932007,6.754134,11z?hl=en&authuser=0>
17. Port of Emden // <http://www.seaports.de/virthos.php?en//HOME/HAFENSTANDORTE/Emden>

Стаття надійшла до редакції 08.11.2018

Рецензенти:

доктор технічних наук, професор, проректор з навчально-організаційної роботи Одеського національного морського університету
А.В. Шахов

кандидат технічних наук, доцент, ректор Інституту морегосподарства і підприємництва **О.В. Яценко**