

УДК 656.614.3

DOI: 10.15587/2706-5448.2020.221653

МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІНИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО СТАНУ СУДНА В ПРОЦЕСІ ТРАНСПОРТУВАННЯ НЕГАБАРИТНИХ І ВЕЛИКОВАГОВИХ ВАНТАЖІВ

Онищенко С. П., Мельник О. М.

Об'єктом дослідження є експлуатаційний стан судна та його зміни, які виникають в процесі транспортування негабаритних і великовагових вантажів під впливом множини випадкових подій. Значною проблемою є негативний вплив системи чинників на морехідне та технічний стан судна, цілісність вантажу. Тому забезпечення безпеки судна, його функціональної надійності як технічного об'єкта є серед пріоритетів, які є вкрай важливими в процесі транспортування негабаритних і великовагових вантажів.

В ході дослідження виконана ідентифікація основних станів досліджуваного судна в процесі експлуатації. Судно у процесі транспортування представлено як сукупність двох об'єктів – «судно – вантаж». Запроваджено декомпозицію зазначеного стану на два варіанти «в нормі» та «наявність проблем», за трьома компонентами: «морехідні якості судна», «технічний стан судна», «вантаж та системи кріплення». Встановлено шість основних експлуатаційних станів судна в процесі транспортування негабаритних і великовагових вантажів. Розроблено імітаційну модель змін експлуатаційного стану судна в процесі транспортування негабаритних і великовагових вантажів. Дана модель дозволяє встановити взаємозв'язок даних станів, який ідентифікований та формалізований у вигляді моделі однорідного марківського процесу. Даний процес розглянуто як процес з дискретним часом і наявністю безповоротного стану з відсутністю властивості ергодичності. Проведено експериментальні дослідження для різних початкових умов і визначено найбільш ймовірні зміни в експлуатаційному стані судна через задане число часових кроків.

Запропонована модель процесу дозволяє здійснювати експериментальні дослідження для різних початкових умов і визначати найбільш ймовірні зміни в експлуатаційному стані судна через задане число часових кроків. Це надає можливість для оцінки ризиків і прийняття рішень щодо підтримки експлуатаційного стану судна в процесі транспортування негабаритних і великовагових вантажів у вигляді теоретичної основи.

Ключові слова: експлуатаційний стан судна, транспортування негабаритних і великовагових вантажів, марківські процеси, управляючі дії.

1. Вступ

Підвищення безпеки експлуатації суден – суттєве завдання, що завжди потребує пильної уваги. Пошкодження судна або вантажу через незадовільні умови достатньої остійності, порушення міцності, надійності обладнання та оснащення

судна – це неповний перелік сценаріїв, в які може потрапити судно у процесі експлуатації. Забезпечення безпеки при експлуатації суден включає у себе цілий комплекс заходів. Основні аспекти, що стосуються безпечної експлуатації сучасних морських суден, повинні враховувати належним чином технічні та експлуатаційні фактори, що мають безпосередній вплив на стан судна в процесі виконання завдань з перевезення вантажів. Найбільш значущими є умови зовнішнього середовища та людський чинник у прийнятті управлінських рішень, як вплив суб'єктивних факторів на безпечну експлуатацію та технічну безпеку суден. Тому забезпечення безпеки судна, його функціональної надійності як технічного об'єкта є серед пріоритетів, які є вкрай актуальними в процесі транспортування негабаритних і великовагових вантажів (НВВ).

При вирішенні завдань, пов'язаних з безпекою морського перевезення значну роль відіграє імітаційне моделювання, яке дозволяє на базі статистичних даних та експертних оцінок спрогнозувати стан судна в певний момент часу.

Питання ймовірнісної оцінки умов переходу судна між портами розглядалися в роботах [1–3]. Зокрема, в роботі [3] оцінювалася ефективність експлуатації судна з урахуванням негативного впливу різних чинників. Зміна стану судна може бути описано за допомогою апарату марковських процесів.

Для вирішення подібних завдань накопичено певний теоретичний та практичний досвід використання апарату теорії марківських процесів, у тому числі в транспортній сфері [4], тобто стохастичної моделі, що має властивість Маркова – специфічного виду випадкових процесів. Зокрема, на застосуванні марківських процесів:

- розроблена процедура оцінка аварійності суден при заході та виході з порту [5, 6];
- здійснюється процес ідентифікації режиму роботи риболовецького судна [7];
- вирішуються інші завдання в сфері морського транспорту, які пов'язані з безпекою [8–10].

Проте необхідно зауважити, що результати проведених досліджень відображають не повною мірою специфіку експлуатації засобів морського транспорту та надають інструменти для забезпечення безпеки при транспортуванні НВВ. Тому дані питання є актуальними.

Таким чином, *об'єктом дослідження* є експлуатаційний стан судна та його зміни, які виникають в процесі транспортування негабаритних і великовагових вантажів під впливом множини випадкових подій.

Мета дослідження – моделювання зміни експлуатаційного стану судна в процесі транспортування негабаритних і великовагових вантажів.

2. Методика проведення досліджень

Стан судна в процесі транспортування може бути представлений як стан сукупності двох об'єктів «судно – вантаж». Підсумковий експлуатаційний стан судна в процесі транспортування формується саме з урахуванням різних подій, пов'язаних безпосередньо з судном (наприклад, відмова технічних систем) або з вантажем (його зміщення, негативний вплив на палубне обладнання тощо).

Перехід системи «судно – вантаж» з одного стану в інший в процесі виконання рейсу здійснюється під впливом безлічі випадкових факторів, таких

як: погодні умови, «людський фактор», стан судна на момент початку рейсу, якість та кількість кріпильних матеріалів тощо. Тому є підстави та виконуються необхідні умови для ідентифікації процесу зміни експлуатаційного стану судна при транспортуванні НВВ як марківського.

Для ідентифікації основних станів досліджуваного об'єкта «судно – вантаж» пропонується здійснити декомпозицію зазначеного стану на два варіанти («в нормі», «наявність проблем») за трьома компонентами: «морехідні якості судна», «технічний стан судна», «вантаж та системи кріплення». Такий підхід визначається, перш за все, специфікою експлуатації суден при транспортуванні НВВ, що проявляється, наприклад, в особливостях розміщення та кріплення вантажу на судні. Це, відповідно, може призводити до певних порушень як під час процесу завантаження на судно, так і порушення «цілісності» системи «судно – вантаж» в процесі транспортування. Позитивна («в нормі» – 1) та негативна («наявність проблем» – 0) оцінка кожної компоненти формує наступну класифікацію основних варіантів стану судна (табл. 1).

Таблиця 1

Класифікація основних експлуатаційних станів судна при транспортуванні негабаритних і великовагових вантажів

Стан	Морехідні якості судна	Технічний стан судна	Вантаж та системи кріплення	Опис стану
S1	1	1	1	Задовільні умови експлуатації та нормальний стан судна
S2	1	1	0	Пошкодження або/та втрата вантажу
S3	1	0	0	Пошкодження та втрата вантажу, пошкодження структурних елементів набору судна та палубного обладнання
S4	1	0	1	Пошкодження структурних елементів судна та палубного обладнання внаслідок зсуву/зміщення вантажу/руйнування систем кріплення
S5	0	1	1	Поява небезпечного крену, погіршення/втрата остійності судна внаслідок зсуву/зміщення вантажу
S6	0	0	0	Незадовільний умови експлуатації та аварійний стан судна

Два теоретично можливих варіантів: задовільний стан вантажу при незадовільному технічному та морехідному стані судна; втрата морехідних якостей та незадовільний стан вантажу при нормальному технічному стані не мають практичного сенсу.

Наступним етапом дослідження є визначення типу марківського процесу.

Так як кількість розглянутих станів є рахунковою безліччю, то має місце дискретний випадковий процес. Так як фіксування стану судна здійснюється в певні моменти часу, то має місце марківський процес з дискретним часом $t=0, 1, 2, 3, \dots$. Будемо вважати розглянутий ланцюг Маркова однорідним, так як ймовірності переходу зі стану в стан не залежать від часу, а залежать виключно від комплексу випадкових факторів впливу.

В якості моментів часу можуть виступати година, доба або навіть декада, але з урахуванням специфіки динаміки зміни погодних умов і ситуації на судні, за $t=0, 1, 2, 3, \dots$ приймемо добу в рамках часу рейсу.

Граф станів і переходів досліджуваного об'єкта представлений на рис. 1.

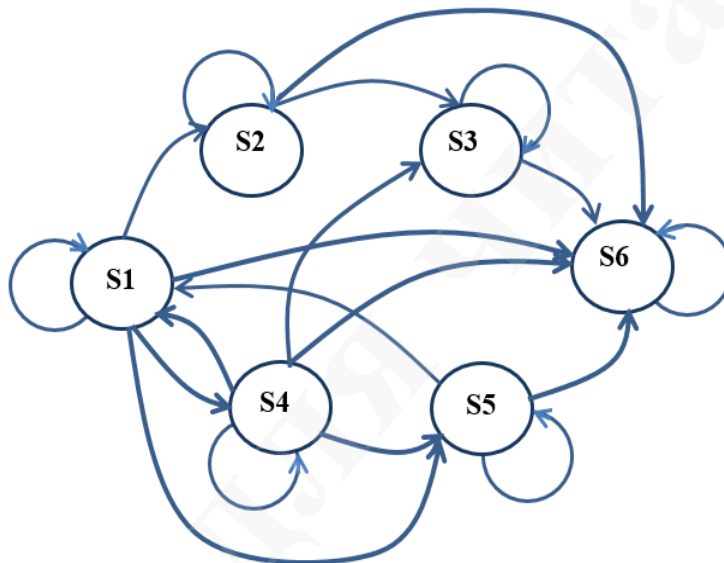


Рис. 1. Граф переходів експлуатаційних станів судна

Відзначимо що, задовільний морехідний стан судна **S1** є поворотним станом, так як до нього судно може повернутися, наприклад, в результаті нормалізації погодних умов навіть при попередньому впливі негативних чинників.

Матриця ймовірностей переходу:

$$P = [p_{ij}] = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & 0 & p_{14} & p_{15} & p_{16} \\ 0 & p_{22} & p_{23} & 0 & 0 & p_{26} \\ 0 & 0 & p_{33} & 0 & 0 & p_{36} \\ p_{41} & 0 & p_{43} & p_{44} & p_{45} & p_{46} \\ p_{51} & 0 & 0 & 0 & p_{55} & p_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де

$$0 \leq p_{ij} \leq 1, i = \overline{1,6}, j = \overline{1,6}. \quad (2)$$

Відзначимо, що в матриці (1) вже проставлені нульові значення ймовірностей для неможливих переходів стану відповідно до графу на рис. 1. При цьому стан **S6** є поглинаючим, тобто з цього стану судно вже не виходить, тому відповідна ймовірність $p_{66}=1$. А це означає, що розглянутий марківський ланцюг не володіє ергодичною властивістю.

Згідно з властивостями марківського процесу елементи матриці задовольняють умові:

$$\sum_{j=1}^6 p_{ij} = 1, i = \overline{1,6}. \quad (3)$$

Для марківського процесу потрібно завдання початкових ймовірностей $p_1(0), p_2(0), p_3(0), p_4(0), p_5(0), p_6(0)$ знаходження даної системи «судно – вантаж» в початковий момент часу $t = 0$:

$$p_1(0) + p_2(0) + p_3(0) + p_4(0) + p_5(0) + p_6(0) = 1. \quad (4)$$

Даним моментом часу ($t=0$) є вихід судна з порту завантаження. По суті, початкові ймовірності оцінюють те, як впливає безліч випадкових факторів у процесі завантаження судна та на стан самого судна до початку завантаження. Таким чином, початковий стан системи «судно – вантаж», який і формує початковий експлуатаційний стан судна в даному рейсі, $p_1(0), p_2(0), p_3(0), p_4(0), p_5(0), p_6(0)$, визначається на ґрунті аналізу можливого впливу системи факторів для конкретного судна. Це здійснюється з урахуванням його характеристик і особливостей попередньої експлуатації, конкретного вантажу порту завантаження (відповідно до експертної думки або статистики).

З урахуванням того, що даний процес не володіє ергодичною властивістю, він не має усталеного режиму (стану). Тому після значного проміжку часу ймовірності станів не прагнуть до граничних значень, які не залежать від початкових станів і поточного моменту часу. Таким чином, марківський процес – система «судно – вантаж» в процесі транспортування – «запускається» від певного стартового стану $p_1(0), p_2(0), p_3(0), p_4(0), p_5(0), p_6(0)$, від якого залежить ймовірність подальшого перебування судна в тому чи іншому стані в процесі виконання рейсу.

На базі рівняння Колмогорова-Чепмена (5) можна визначити ймовірності експлуатаційних станів судна в кожен даний момент часу.

$$p_j(k) = \sum_{i=1}^n p_j(k-1) \cdot p_{ij}, j = \overline{1,n}, k = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

Таким чином, вивчення динаміки експлуатаційного стану судна здійснюється на базі запропонованого марківського ланцюга.

3. Результати досліджень та обговорення

Експериментальні дослідження запропонованої імітаційної моделі (граф станів і перехідна матриця саме і утворюють імітацію), що відображає зміну експлуатаційного стану судна, проводилися за допомогою наступних вихідних даних:

– матриці перехідних ймовірностей:

$$P = [P_{ij}] = \begin{bmatrix} 0,99 & 0,0092 & 0 & 0,0004 & 0,0003 & 0,0001 \\ 0 & 0,7 & 0,27 & 0 & 0 & 0,03 \\ 0 & 0 & 0,7 & 0 & 0 & 0,3 \\ 0,1 & 0 & 0,2 & 0,5 & 0,1 & 0,1 \\ 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0,5 & 0,4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (6)$$

– при різних значеннях ймовірностей експлуатаційних станів судна, що розглядаються в початковий момент часу $t=0$:

- 1) $P_1(0)=0,99; P_2(0)=0,01; P_3(0)=0; P_4(0)=0; P_5(0)=0; P_6(0);$
- 2) $P_1(0)=0,95; P_2(0)=0,05; P_3(0)=0; P_4(0)=0; P_5(0)=0; P_6(0);$
- 3) $P_1(0)=0,90; P_2(0)=0,10; P_3(0)=0; P_4(0)=0; P_5(0)=0; P_6(0);$
- 4) $P_1(0)=0,85; P_2(0)=0,15; P_3(0)=0; P_4(0)=0; P_5(0)=0; P_6(0);$ (7)

Чотири варіанти початкового експлуатаційного стану судна визначаються специфікою вантажних операцій та станом судна до початку рейсу. Перший варіант є найсприятливішим з розглянутих, четвертий задає, по суті, 15 % на можливі похибки в процесі завантаження і не зовсім задовільний стан судна до початку вантажних операцій. Таким чином, порт, вантаж і судно визначають ймовірності експлуатаційного стану судна (системи «судно – вантаж»).

Для усіх розглянутих варіантів ймовірностей стану судна в момент часу $t=0$ були проведені за формулою (5) відповідні розрахунки, які дозволили сформулювати такі закономірності (рис. 2, 3).

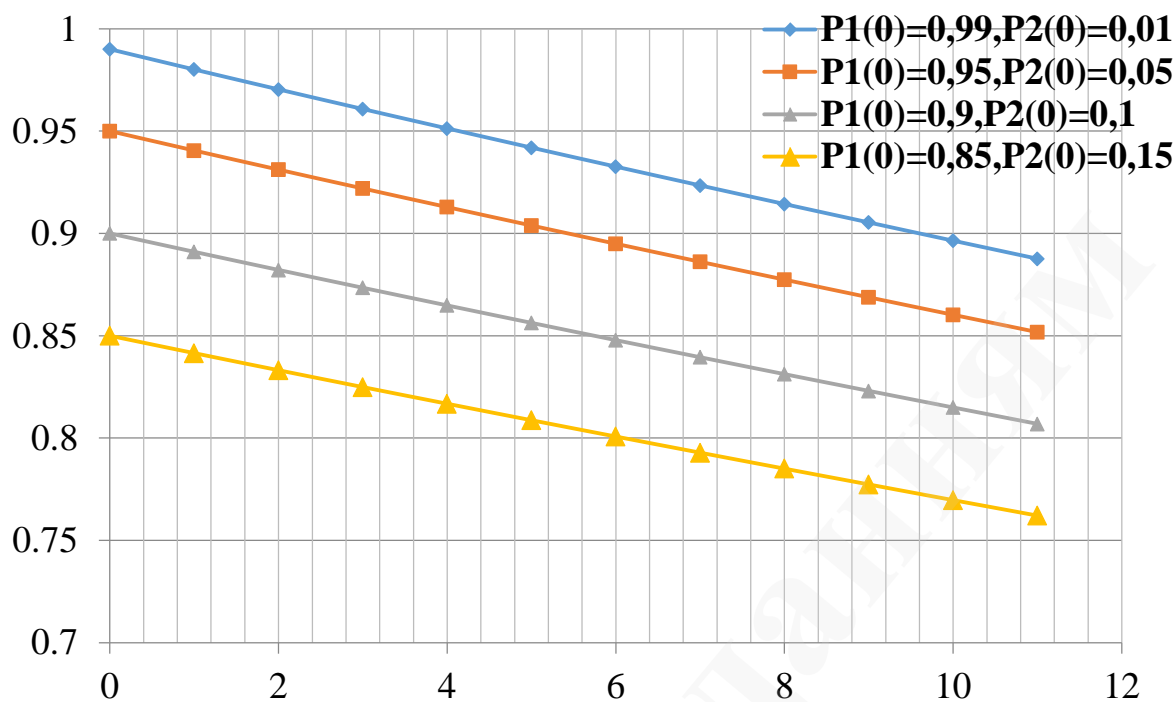


Рис. 2. Динаміка ймовірності **S1** для різних варіантів початкових ймовірностей (момент часу $t=0$)

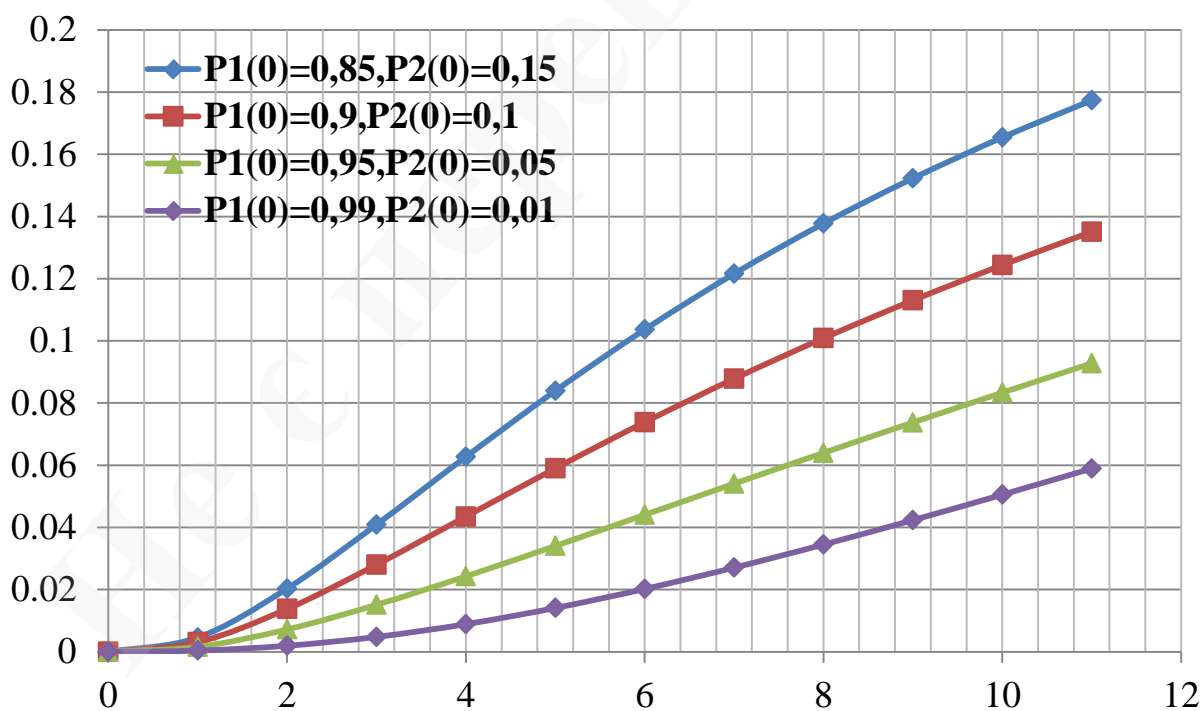


Рис. 3. Динаміка ймовірності **S6** для різних варіантів початкових ймовірностей (момент часу $t=0$)

На рис. 1 продемонстровано, що ймовірність стану судна **S1** практично лінійно зменшується з будь-якої початкової точки, і, наприклад, для 4-го варіанта початкових умов:

$$P_1(0)=0,85; P_2(0)=0,15; P_3(0)=0; P_4(0)=0; P_5(0)=0; P_6(0),$$

на 11-му часовому кроці доходить практично до 0,75. Це пояснюється, перш за все, специфікою матриці (6). При цьому для першого початкового стану:

$$P_1(0)=0,99; P_2(0)=0,01; P_3(0)=0; P_4(0)=0; P_5(0)=0; P_6(0),$$

на цьому ж 11-му часовому кроці ймовірність стану **S1** практично дорівнює 0,9.

На рис. 2 показано динаміку ймовірності найгіршого стану судна **S6**. На 11-му часовому кроці для першого початкового стану $P_1(0)=0,99; P_2(0)=0,01; P_3(0)=0; P_4(0)=0; P_5(0)=0; P_6(0)$ ймовірність даного стану близько 0,06, що може бути прийнято як припустима ситуація. При цьому для четвертого початкового стану $P_1(0)=0,85; P_2(0)=0,15; P_3(0)=0; P_4(0)=0; P_5(0)=0; P_6(0)$, ймовірність стану **S6** наближається до 0,18, що не може вважатися припустимим.

Наступним етапом експериментальних досліджень матриця перехідних ймовірностей була змінена на більш «оптимістичний» варіант:

$$P = [P_{ij}] = \begin{bmatrix} 0,99 & 0,00925 & 0 & 0,00045 & 0,0003 & 0,00001 \\ 0 & 0,85 & 0,149 & 0 & 0 & 0,001 \\ 0 & 0 & 0,95 & 0 & 0 & 0,05 \\ 0,1 & 0 & 0,17 & 0,7 & 0,02 & 0,01 \\ 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0,6 & 0,3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

У цій матриці ймовірності переходу до стану **S6** значно нижче, ніж для попереднього варіанту. Крім того, збільшилися ймовірності перебування судна в станах 2, 3, 5. Тобто з більшою ймовірністю забезпечується деякий фіксований стан судна.

Відповідні графіки зміни ймовірностей станів судна **S1**, **S6** представлені на рис. 4, 5. Відзначимо, що динаміка ймовірностей стану **S1** залишилася попередньою, що пояснюється відсутністю змін в матриці перехідних ймовірностей щодо даного стану. Проте, зміни в (8) торкнулися всіх інших станів судна.

Зокрема, динаміка для **S6** є більш «оптимістичною» і, зокрема, на 11-му часовому кроці ймовірність стану **S6** для першого варіанту початкових ймовірностей: $P_1(0)=0,99; P_2(0)=0,01; P_3(0)=0; P_4(0)=0; P_5(0)=0; P_6(0)$ становить трохи більше 0,01 (в порівнянні з 0,06 у попередній ситуації). Також на 11-му часовому кроці ймовірність стану **S6** для четвертого варіанту початкових ймовірностей: $P_1(0)=0,85; P_2(0)=0,15; P_3(0)=0; P_4(0)=0; P_5(0)=0; P_6(0)$ складає трохи менше 0,04 (у порівнянні з 0,18 у попередній ситуації).

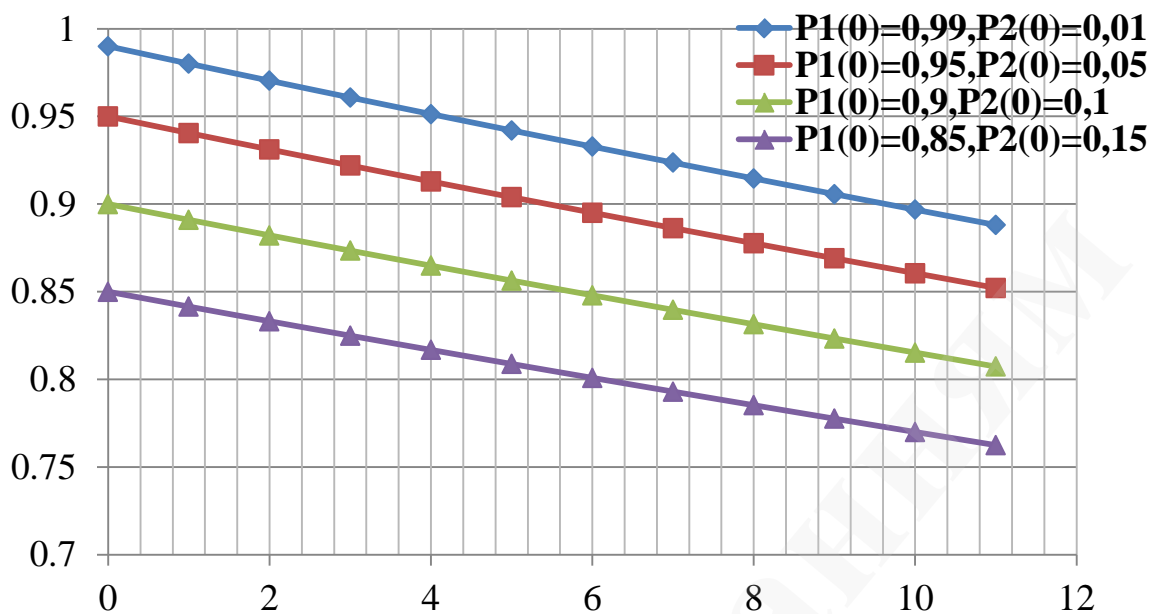


Рис. 4. Динаміка ймовірності стану **S1** для різних варіантів початкових ймовірностей (момент часу $t=0$)

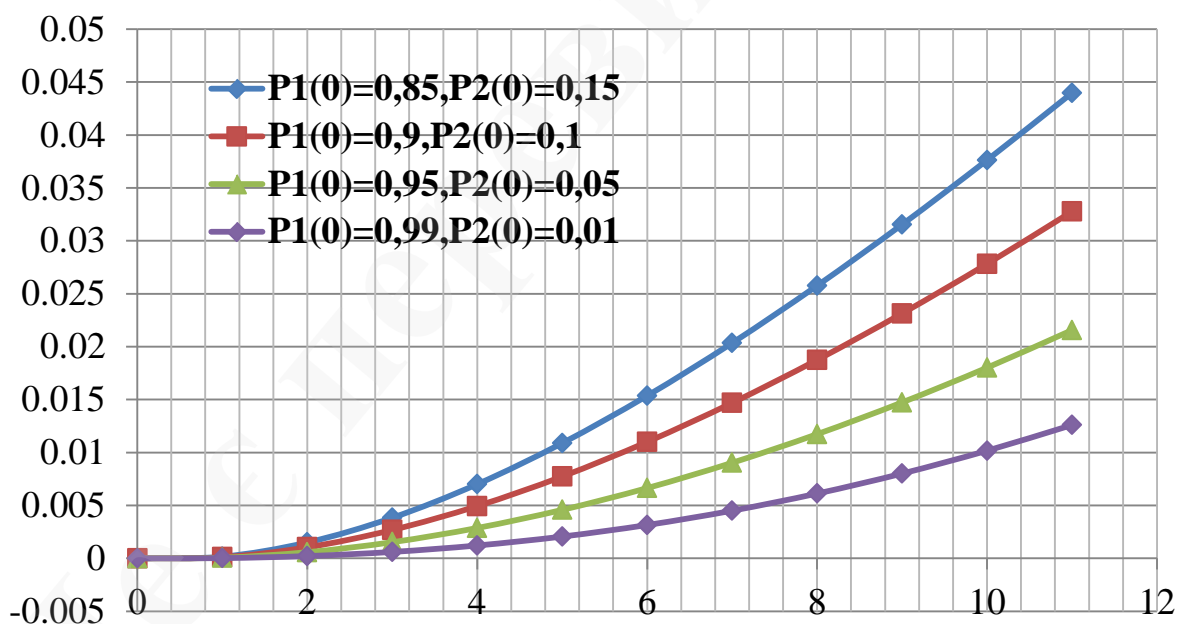


Рис. 5. Динаміка ймовірностей стану **S6** для різних варіантів початкових ймовірностей (момент часу $t=0$)

Таким чином, розроблено імітаційну модель зміни експлуатаційного стану судна в процесі транспортування НВВ, що дозволяє здійснювати експериментальні дослідження для різних початкових умов і визначати найбільш ймовірні зміни в експлуатаційному стані судна.

Експериментальні дослідження продемонстрували можливості практичного використання розробленої моделі марківського процесу. Дана модель описує зміну експлуатаційного стану судна в процесі транспортування

НВВ. Експериментальні дослідження дозволили зробити висновок про адекватність запропонованого підходу реальним процесам експлуатації суден і достовірності одержуваних на його основі результатів.

Отже, в залежності від безлічі факторів формуються початкові ймовірності для шести виділених експлуатаційних станів судна. Взаємозв'язок даних станів ідентифікований та формалізований у вигляді моделі однорідного марківського процесу з дискретним часом, наявністю безповоротного стану **S6** (тобто з відсутністю властивості ергодичності).

4. Висновки

Виявлено основні експлуатаційні зміни стану судна в процесі експлуатації негабаритних і великовагових вантажів. Розроблено імітаційну модель зміни експлуатаційного стану судна в процесі транспортування НВВ. Взаємозв'язок даних станів ідентифікований та формалізований у вигляді моделі однорідного марківського процесу з дискретним часом, наявністю безповоротного стану (тобто з відсутністю властивості ергодичності). Запропонована модель процесу дозволяє здійснювати експериментальні дослідження для різних початкових умов і визначати найбільш ймовірні зміни в експлуатаційному стані судна через задане число часових кроків. А це, в свою чергу, дає можливість для оцінки ризиків і прийняття рішень щодо експлуатаційного стану судна в процесі транспортування НВВ у вигляді теоретичної основи.

Проведено експериментальні дослідження для різних початкових умов і визначено найбільш ймовірні зміни в експлуатаційному стані судна через задане число часових кроків.

Література

1. Onyshchenko, S., Vyshnevskaya, O. (2016). Assessment method for deviation of the work's results for vessel under the influence of risk factors. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: Mechanical-technological systems and complexes*, 7, (1179), 25–32.
2. Onyshchenko, S. P., Koskina, Y. A. (2019). Estimation of the time of the vessel's arrival at port. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 1 (79), 39–50. doi: <http://doi.org/10.15802/stp2019/158478>
3. Schneider, T., Armingaud, F., Tabarre, M., (1999). *Statistical Analysis of Accident Data Associated with Sea Transport (Data from 1994–1997)*. Rep. CEPN-IPSN, NTE/99/02. Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire. Fontenay-aux-Roses.
4. Ovchinnikova, N. I., Kosareva, A. V., Bonnet, V. V., Eltochkina, E. V. (2019). A simple semi-Markov model of functioning of agricultural cleaning and transport system. *Journal of Physics: Conference Series*, 1333, 032061. doi: <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1333/3/032061>
5. Girtler, J. (2013). Application of theory of semi-Markov processes to determining distribution of probabilistic process of marine accidents resulting from collision of ships. *Polish Maritime Research*, 21 (1), 9–13. doi: <http://doi.org/10.2478/pomr-2014-0002>
6. Guze, S., Smolarek, L. (2012). Semi-Markov Approach to the Shipping Safety Modelling. *Archives of Transport*, 23 (4), 475–488. doi:

<http://doi.org/10.2478/v10174-011-0032-7>

7. Peel, D., Good, N. M. (2011). A hidden Markov model approach for determining vessel activity from vessel monitoring system data. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 68 (7), 1252–1264. doi: <http://doi.org/10.1139/f2011-055>

8. Guze, S., Kołowrocki, K. (2017). Safety modeling of port, shipping and ship traffic and port operation information critical infrastructure join network related to its operation process. *Safety and Reliability – Theory and Applications*. doi: <http://doi.org/10.1201/9781315210469-98>

9. Mageirou, E. (2012). *Stochastic Optimal Positioning of Tramp Vessels: A Markovian Approach*.

10. Korolyuk, V. S., Brodi, S. M., Turbin, A. F. (1975). Semi-markov processes and their applications. *Journal of Soviet Mathematics*, 4 (3), 244–280. doi: <http://doi.org/10.1007/bf01097184>