

## БЕЗПЕКА ЕРГАТИЧНОЇ СИСТЕМИ

Габрук Р. А., к.т.н., докторант Національного університету «Одеська морська академія», E-mail: grostyslav@yahoo.com

*На основі аналізу ергодичного марківського процесу розроблено математичну модель, що за допомогою системи диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена обчислює ймовірність безпечного функціонування ергатичної системи. Математичну модель було програмним чином реалізовано у системі програмування Matlab з використанням пакету Simulink.*

**Ключові слова:** ергатична система, безпека мореплавання, система динамічного позиціонування, теорія ймовірності.

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.** Подальший розвиток флоту України з метою забезпечення енергонезалежності держави зумовлює використання систем динамічного позиціонування (СДП) при здійсненні рухомими об'єктами водного транспорту (РОВТ) різних типів технологічних робіт по освоєнню ресурсів континентального шельфу, що потребує реалізації процесів високоточної навігації в збуреному локально обмеженому просторі. Процес керування збуреним рухом РОВТ здійснюється оператором системи динамічного позиціонування (ОСДП), який взаємодіє з технічним комплексом керування. ОСДП приймає відповідні ситуативні рішення і знаходиться на вищому рівні ієрархії складної ергатичної системи. Питання безпеки навігації РОВТ напряму пов'язано із коректним функціонуванням ергатичної системи, що проводить збір даних від різних джерел для оцінки поточних ситуацій, що швидко змінюються як від зовнішніх впливів, так і під дією внутрішніх факторів, приймає ситуативні рішення та реалізує прийняті рішення для отримання цільових результатів згідно з визначеними ресурсами і обмеженнями роботи засобів активного керування.

**Аналіз останніх досягнень і публікацій, в яких започатковано вирішення даної проблеми та виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Питання безпеки ергатичних систем визначається у двох основних напрямках. Перший напрям – це коло питань безвідмовної та якісної роботи технічної складової. В цілях підвищення безпеки і зведення до мінімуму наслідків аварій застосовуються технічні і технологічні рішення, впроваджуються нові стандарти безпеки, що націлені на вимоги до конструкції і обладнання РОВТ [1–5].

Аналіз аварій та інцидентів під час ДП змусив міжнародне морське співтовариство звернути увагу на підхід, що враховує роль людини-оператора у безпеці при керуванні процесом навігації. У безпеці функціонування ергатичних систем під людським чинником можна розуміти сукупність можливостей і здатності людини-оператора по прийому, обробці інформації, ухваленню, реалізації і контролю рішень в умовах взаємодії зі складними технічними системами. Оператор системи динамічного позиціонування (ОСДП) має бути компетентною професійною особою згідно з [6].

ОСДП знаходиться у постійному потоці подій, що можуть формувати зони підвищеного ризику подій, що пов'язані з чинниками навколишнього середовища, особливостями технологічної роботи, функціонування самого РОВТ та складних технічних систем.

**Формулювання цілей статті (постановка завдання).** Метою статті є пошук нових шляхів оцінки безпеки функціонування ергатичної системи, в якій аналіз потоків подій та прийняття ситуативних рішень щодо управління процесом динамічного позиціонування рухомого об'єкта водного транспорту здійснюється людиною-оператором.

**Виклад матеріалу дослідження з обґрунтуванням отриманих наукових результатів.** ОСДП знаходиться в потоці подій  $\Lambda$ , який він обробляє для уникнення аварійного розвитку потенційно небезпечних сценаріїв. Під час первинної обробки

в загальному потоці подій ОСДП виділяє важливі події, які викликають необхідність його подальших дій.

Ці події піддаються вторинній обробці. Під час вторинної обробки події поділяються на категорії. Події I категорії важливості є початком ланцюга причинно-взаємопов'язаних подій, які можуть призвести до аварії. Події II категорії важливості не є початком ланцюга причинно-взаємопов'язаних подій, які можуть призвести до аварії і можуть не вимагати першочергової реакції ОСДП.

При здійсненні ДП ергатична система функціонує на досить довгих часових проміжках. Тому для кількісної імовірнісної оцінки станів системи при виконанні ДП РОВТ можна скористатися граничними ймовірностями станів. Застосовувати дане твердження дозволяє оцінка характеру виконуваної технологічної роботи, яка поряд з навколишньою навігаційною обстановкою, особливостями керування процесом високоточної навігації при ДП, формує стаціонарний пуассонівський потік подій  $\Lambda$ . Тобто стаціонарний ординарний потік без післядії. ОСДП при виконанні ним своїх службових обов'язків знаходиться саме в цьому потоці подій, формуючи відповідний потік реакції  $\mu$ . В такому випадку існують граничні ймовірності станів, які виражаються наступним чином:

$$\tilde{P}_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{P}_i(t). \quad (1)$$

Спираючись на (1), можна зробити наступний висновок. З плином часу функціонування в ергатичній системі встановлюється граничний стаціонарний режим, в ході якого вона переходить зі стану в стан, але ймовірності станів вже не змінюються. В цьому граничному стаціонарному режимі кожна фінальна ймовірність може бути виражена як середній відносний час перебування системи в даному стані.

Система, для якої існують фінальні ймовірності, називається ергодичною і відповідний випадковий процес - ергодичним. Для існування фінальних ймовірностей станів необхідно, щоб потік подій, який впливає на ергатичну систему, був стаціонарним, що визначає наступне:

$$\Lambda = const. \quad (2)$$

При кінцевій множині існування фінальних ймовірностей необхідно і достатньо, щоб з кожного суттєвого стану системи можна було за якесь число кроків перейти в кожний інший суттєвий стан.

Несуттєві стани при розгляді функціонування ергатичної системи на великих часових проміжках не мають визначального значення. Це пояснюється тим, що з кожного такого стану, в який система потрапить на будь-якому з проміжків розглянутого часового інтервалу, вона рано чи пізно піде в якийсь з суттєвих станів і більше в несуттєвий стан не повернеться. Виходячи з цього, граничні ймовірності для несуттєвих станів дорівнюють нулю.

Для знаходження фінальних ймовірностей станів ергатичної системи при протіканні випадкового ергодичного марківського процесу необхідно скласти адекватну систему рівнянь, що складається з диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена.

Перехідні стани марківських процесів, що характеризують функціонування ергатичної системи, яка знаходиться під керуванням ОСДП, зручно описувати використовуючи розмічений граф станів. Сформуємо розмічений граф станів для ергатичної системи, до складу якої входить один ОСДП (рис. 1).

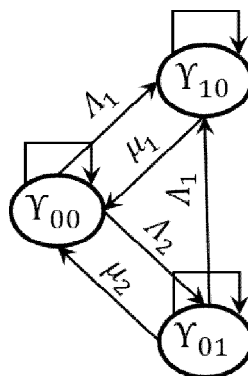


Рисунок 1 – Розмічений граф станів ергатичної системи

На графі відображені наступні стани ергатичної системи:  $Y_{00}$  – важливі події не відбулися;  $Y_{10}$  – відбулася одна подія I категорії важливості і не відбулося жодної події II категорії важливості;  $Y_{01}$  – не відбулося жодної події I категорії важливості, але відбулася одна подія II категорії важливості.

Відповідно до розміченого графа станів ергатичної системи керування ДП складемо систему диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена, враховуючи, що

$$\sum_{i=1}^{\tilde{n}} \tilde{P}_i(t) = 1.$$

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{P}_{00}}{dt} = \mu_1\tilde{P}_{10} + \mu_2\tilde{P}_{01} - (\Lambda_1 + \Lambda_2)\tilde{P}_{00}, \\ \frac{d\tilde{P}_{10}}{dt} = \Lambda_1\tilde{P}_{00} + \Lambda_1\tilde{P}_{01} - \mu_1\tilde{P}_{10}, \\ \frac{d\tilde{P}_{01}}{dt} = \Lambda_2\tilde{P}_{00} - (\Lambda_1 + \mu_2)\tilde{P}_{01}, \\ \tilde{P}_{00} + \tilde{P}_{10} + \tilde{P}_{01} = 1, \end{cases} \quad (3)$$

де  $\Lambda_1, \Lambda_2$  – інтенсивності стаціонарних пуассонівських потоків подій I і II категорії важливості відповідно,  $\frac{1}{c}$ ;  $\mu_1, \mu_2$  – інтенсивності потоків реакції одного ОСДП на події I і II категорії важливості відповідно,  $\frac{1}{c}$ ;  $\tilde{P}_{00}, \tilde{P}_{10}, \tilde{P}_{01}$  – ймовірності, що відповідають станам  $Y_{00}, Y_{10}, Y_{01}$ .

Фінальні ймовірності знаходяться шляхом перетворення системи диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена в наступну систему лінійних рівнянь:

$$\begin{cases} (\Lambda_1 + \Lambda_2)\tilde{P}_{00} = \mu_1\tilde{P}_{10} + \mu_2\tilde{P}_{01}, \\ \mu_1\tilde{P}_{10} = \Lambda_1\tilde{P}_{00} + \Lambda_1\tilde{P}_{01}, \\ (\Lambda_1 + \mu_2)\tilde{P}_{01} = \Lambda_2\tilde{P}_{00}, \\ \tilde{P}_{00} + \tilde{P}_{10} + \tilde{P}_{01} = 1, \end{cases} \quad (4)$$

Виходячи з усіх можливих детермінованих станів ергатичної системи, ймовірності її перебування в безпечних та потенційно аварійних станах виражаються наступним чином:

$$\begin{cases} \tilde{P}_{BI} = \tilde{P}_{00} + \tilde{P}_{01}, \\ \tilde{P}_{BII} = \tilde{P}_{00}, \\ \tilde{P}_{AI} = \tilde{P}_{10}, \\ \tilde{P}_{AII} = \tilde{P}_{10} + \tilde{P}_{01}, \end{cases} \quad (5)$$

де  $\tilde{P}_{BI}, \tilde{P}_{BII}$  – ймовірності знаходження ергатичної системи у безпечному стані по відношенню до подій I або II категорії важливості відповідно;  $\tilde{P}_{AI}, \tilde{P}_{AII}$  – ймовірності знаходження ергатичної системи в потенційно аварійному стані по відношенню до подій I або II категорії важливості відповідно.

Остаточна шукана ймовірність безпеки  $\tilde{P}_B$  виражається:

$$\tilde{P}_B = \frac{\Lambda_1}{\Lambda_1 + \Lambda_2} \tilde{P}_{BI} + \frac{\Lambda_2}{\Lambda_1 + \Lambda_2} \tilde{P}_{BII} \quad (6)$$

Система (4) має наступне рішення:

$$\begin{cases} \tilde{P}_{00} = \frac{\mu_1(\Lambda_1 + \mu_2)}{\Lambda_1(\mu_1 + \mu_2 + \Lambda_1 + \Lambda_2) + \mu_1(\mu_2 + \Lambda_2)}, \\ \tilde{P}_{10} = \frac{\Lambda_1(\Lambda_1 + \mu_2 + \Lambda_2)}{\Lambda_1(\mu_1 + \mu_2 + \Lambda_1 + \Lambda_2) + \mu_1(\mu_2 + \Lambda_2)}, \\ \tilde{P}_{01} = \frac{\Lambda_2\mu_1}{\Lambda_1(\mu_1 + \mu_2 + \Lambda_1 + \Lambda_2) + \mu_1(\mu_2 + \Lambda_2)}, \\ \tilde{P}_{00} + \tilde{P}_{10} + \tilde{P}_{01} = 1. \end{cases} \quad (7)$$

Рішення (7) системи (4) з урахуванням (5) та (6) було програмним чином реалізовано в середовищі програмування Matlab з використанням пакету Simulink. Алгоритм розрахунку представлено на рис. 2.

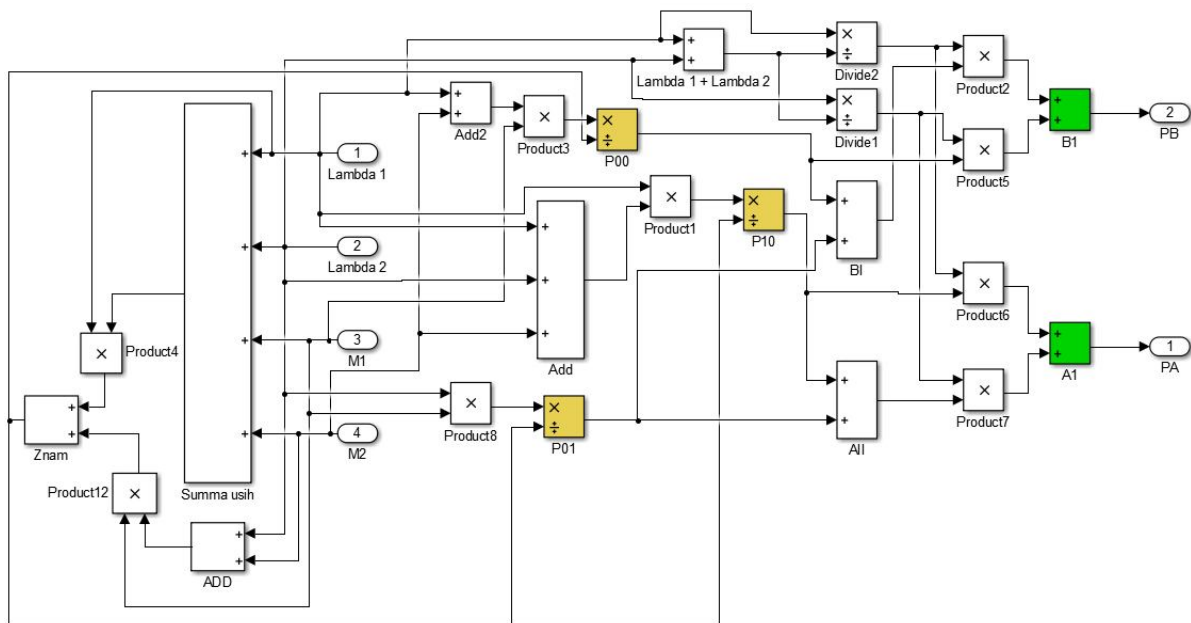


Рисунок 2 – Структура алгоритму розрахунку ймовірностей знаходження ергатичної системи у безпечному й потенційно аварійному станах

Представлений алгоритм розрахунку включає в себе пошук ймовірностей знаходження ергатичної системи у безпечному й потенційно аварійному станах. На підставі аналізу фінальних ймовірностей може бути проведено поточну оцінку безпеки функціонування ергатичної системи.

**Висновки і перспектива подальшої роботи по даному напрямку.** Сформовано математичну модель оцінки безпеки ергатичної системи, що знаходиться під керуванням одного ОСДП. Ефективним засобом дослідження процесів функціонування ергатичних систем, підвищення продуктивності науково-дослідницької праці є дослідження на основі математичних моделей, яке набуло подальшого розвитку в комп'ютерному моделюванні. Застосування розробленого алгоритму в середовищі програмування Matlab забезпечує оперативний розрахунок та надання візуальної інформації щодо стану ергатичної системи та має широкі можливості для аналізу системи.

Перспективою є розробка інтегрованого з технічною складовою ергатичної системи комплексу підтримки прийняття рішень щодо безпеки.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. IMCA M 182. International Guidelines for The Safe Operation of Dynamically Positioned Offshore Supply Vessels. – IMCA, London, 2006. – 52 p.
2. Det Norske Veritas. DNV Rules for Classification of Ships [Електронний ресурс] : Det Norske Veritas, Oslo, Norway: 2005. – електрон. опт. диск (CD-ROM): цв; 12 см. – Систем. вимоги: Windows 95/98/NT/2000/XP. Acrobat Reader – Заголовок з титул. екрану.
3. Safe Management and Operation of Offshore Support Vessel. – UK Offshore Operators Association/Chamber of Shipping, London, 2002. – 100 p.
4. IMCA M 178. FMEA Management Guide. / IMCA, London, 2005. – 16 p.
5. IMCA M 103. Guidelines for The Design and Operation of Dynamically Positioned Vessels. / Rev. 1. – IMCA, London, 2007. – 70 p.
6. IMCA M 117 The Training and experience of Key DP Personnel. – IMCA, London, 2006. – 42 p.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. IMCA M 182. International Guidelines for The Safe Operation of Dynamically Positioned Offshore Supply Vessels. – IMCA, London, 2006. – 52 p.
2. Det Norske Veritas. DNV Rules for Classification of Ships [Електронний ресурс] : Det Norske Veritas, Oslo, Norway: 2005. – електрон. опт. диск (CD-ROM): цв; 12 см. – Систем. вимоги: Windows 95/98/NT/2000/XP. Acrobat Reader.
3. Safe Management and Operation of Offshore Support Vessel. – UK Offshore Operators Association/Chamber of Shipping, London, 2002. – 100 p.
4. IMCA M 178. FMEA Management Guide. / IMCA, London, 2005. – 16 p.
5. IMCA M 103. Guidelines for The Design and Operation of Dynamically Positioned Vessels. / Rev. 1. – IMCA, London, 2007. – 70 p.
6. IMCA M 117 The Training and experience of Key DP Personnel. – IMCA, London, 2006. – 42 p.

**Габрук Р. А. БЕЗОПАСНОСТЬ ЭРГАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

*На основе анализа эргодического марковского процесса разработана математическая модель, которая с помощью системы дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена вычисляет вероятность безопасного функционирования эргатической системы. Математическая модель была программным образом реализована в системе программирования Matlab с использованием пакета Simulink.*

**Ключевые слова:** эргатическая система, безопасность мореплавания, система динамического позиционирования, теория вероятности.

**Gabruk R. A. SAFETY OF ERGATIC SYSTEM**

*Based on the ergodic Markov process analysis, it was developed a mathematical model, that using the Kolmogorov-Chapman's differential equations system to calculate the safe operation probability of ergatic system. A mathematical model has been implemented in the programming system Matlab using Simulink.*

**Keywords:** ergatic system, safety of navigation, dynamic positioning system, probability theory.

© Габрук Р. А.

Статтю прийнято  
до редакції 21.10.16