

*Трофименко І.В., Пліта Л.Л., Федунів В.М., Іваненко В.М.*

## МЕТОДИКА ПОБУДОВИ ЙМОВІРНІСНОЇ ГРАФІЧНОЇ МОДЕЛІ НАВІГАЦІЙНОЇ ОЦІНКИ БЕЗПЕКИ ПЛАВАННЯ

*Метою статті є розробка методики побудови ймовірнісної графічної моделі навігаційної оцінки безпеки плавання під час керування суднами в обмежених умовах як на морських районах, так і на внутрішніх водних шляхах. Поставлена мета досягається шляхом аналізу особливостей математичного апарату байєсівської мережі та нотації схеми функціональної цілісності; визначення основних подій для побудови графу байєсівської мережі для навігаційного оцінювання безпеки плавання та відповідних математичних виразів. Встановлено, що, незважаючи на значні зусилля удосконалення організаційно-технічних заходів для забезпечення безпеки судноплавства, рівень навігаційних аварій залишається високим. Існує протиріччя між ростом вимог до безпеки судноплавства та реальним станом речей. Одним з головних факторів, що перешкоджає вирішенню питань, пов'язаних з навігаційною безпекою плавання, є відсутність формальних методів для опису процесу судноплавства. Це пояснюється труднощами у моделюванні поведінки складних організаційно-технічних систем судноплавства в ймовірнісному просторі станів, оскільки вплив на процес судноплавства є стохастичним, та обмеженнями теоретичного розуміння у цій області. У результаті виникають складнощі при створенні моделей навігаційних ризиків, що можуть бути використані для комплексної оцінки навігаційної безпеки у рамках складних організаційно-технічних систем судноплавства. Розв'язання цих проблем дозволило б застосовувати формальні методи для управління навігаційними ризиками, оцінки значущості компонентів системи та їхнього впливу на загальну величину ризиків. Найбільш суттєвим результатом є методика побудови ймовірнісної графічної моделі навігаційної оцінки безпеки плавання під час керування суднами в обмежених умовах як на морських районах, так і на внутрішніх водних шляхах з використанням математичного апарату теорії байєсівських мереж і нотації схеми функціональної цілісності. Дослідження показали, що можна використовувати основні риси байєсівських мереж та логіко-ймовірнісного методу для математичного опису організаційно-технічних систем управління суднами. Для опису складних організаційно-технічних систем судноводіння можна застосовувати простір ймовірнісних подій та аксіоматику Колмогорова разом з правилами булевої алгебри логіки. Цей підхід дозволяє враховувати особливості та цілісність системи «судно-судноводій-середовище» при оцінюванні навігаційних ризиків.*

**Ключові слова:** судноплавство, навігаційна оцінка, безпека плавання, ймовірнісна графічна модель, байєсівська мережа, схема функціональної цілісності.

**Постановка проблеми.** У світлі важливості водного транспорту у теперішній час вживаються значні заходи для підвищення безпеки плавання, особливо в обмежених умовах як на морських районах, так і на внутрішніх водних шляхах. Одними з найбільш значущих заходів є перегляд існуючих організаційно-технічних вимог, що регулюють безпеку, а також прийняття нових вимог. Додатково спостерігається помітне поліпшення систем забезпечення безпеки плавання в навігаційному плані. Розвиток супутникової навігації та комп'ютерних технологій надав можливість для створення нових систем судноводіння, серед яких особливе місце посідають автоматизовані ідентифікаційні системи, що істотно поліпшили огляд надводної обстановки. Крім того, системи управління рухом суден, що дають змогу безперервного контролю за станом судноплавства в районі підхідних шляхів до морських портів, набули

широкого розвитку.

Незважаючи на значні зусилля з удосконалення організаційно-технічних заходів, спрямованих на забезпечення навігаційної безпеки судноплавства, рівень навігаційних аварій залишається високим. Існує об'єктивне протиріччя між постійно зростаючими вимогами до безпеки судноводіння та його реальним станом. Відсутність формальних методів опису процесу судноводіння є однією з головних причин, що перешкоджають розв'язанню багатьох питань, пов'язаних із навігаційною безпекою плавання. Це пов'язано, зокрема, з труднощами опису поведінки складної організаційно-технічної системи судноводіння в імовірнісному просторі станів, спричиненими стохастичним характером чинників, що впливають на процес судноводіння, та обмеженнями теоретичного розуміння. Тобто, виникають складнощі під час визначення моделей навігаційних ризиків, що можуть використовуватися для комплексної оцінки навігаційної безпеки в рамках якісно складної організаційно-технічної системи судноводіння. Розв'язання цих труднощів дало б змогу застосовувати формальні методи для управління навігаційними ризиками, оцінки значущості компонентів системи та їхнього впливу на загальну величину ризиків. У зв'язку з цим, наявність протиріч між вимогами до навігаційної безпеки і реальним рівнем аварійності на флоті робить цю статтю актуальною.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Стаття [1] спрямована на вивчення сучасних проблем електронної навігації та оцінку відповідних поправок, якщо технологія автономних суден набуде значного поширення в найближчому майбутньому. Системи керування суднами та морський зв'язок мають важливе значення, а надсилання й отримання сигналів тривоги мають вирішальне значення для сучасної суднової навігації. В останні десятиліття для підвищення безпеки судноплавства з'явилося багато інформаційних систем визначення місця розташування і судноплавства: GPS, Loran-C і Decca. Інші системи, зокрема VHF і Inmarsat, були розроблені для підвищення ефективності морського зв'язку на борту і передавання даних про ризики та безпеку. Крім того, для безпечної навігації необхідні такі системи, як Navtex, EGS, DSC, Epirb та ін.

У роботі [2] досліджується безпека безпілотних надводних апаратів (БНА), що активно розвиваються. Для практичного використання БНА необхідно забезпечити безпеку, не допускаючи зіткнень із кораблями загального призначення. З цією метою БНА повинні уникати зустрічних суден відповідно до міжнародних правил запобігання зіткненням у морі (МППСС). У статті пропонується алгоритм запобігання зіткненням БНА з суднами, що протистоять, на основі правил МППСС. Пропонований алгоритм прогнозує небезпечні ситуації на основі відстані до найближчої точки зближення і часу до найближчої точки зближення. Це дозволяє БНА уникати інших суден на основі підходу з динамічним вікном (DWA). DWA було покращено відповідно до МППСС, реалізовано моделювання та виконано порівняння стандартного DWA з DWA, сумісного з МППСС (CCDWA), запропонованим у цій статті.

У статті [3] з урахуванням сучасних тенденцій розвитку ергатичних морських транспортних систем визначено фактори впливу штурмана на процеси управління судном. У рамках дослідницької гіпотези для підвищення безпеки судноплавства необхідне застосування прогнозних моделей інтелектуального аналізу даних і автоматизованого управління суднами. У роботі запропоновано схему ергатичної системи керування судном і модель виявлення впливу штурманського «людського фактору» під час плавання. У рамках моделі, заснованої на принципах навігаторських дерев рішень, застосовується прогнозування виникнення критичної ситуації засобами інтелектуального аналізу даних з урахуванням ідентифікаторів. За результатами прогнозу розроблено метод оптимального керування судном у критичних ситуаціях, який спрацьовує у вузлах дерева рішень штурмана, що знижує ймовірність критичного впливу на керування судном. Запропоновані підходи пройшли апробацію в науково-дослідній лабораторії «Розроблення систем підтримки ухвалення рішень, ергатичних і автоматизованих систем керування суднами». Використання навігаційного тренажера Navi Trainer 5000 (Wärtsilä Corporation, Фінляндія) і моделювання системи управління безпекою мореплавства у критичних ситуаціях підтвердили свою ефективність. У результаті тестування встановлено, що активація системи дала змогу знизити ймовірність виникнення критичних

ситуацій на 18-54%. В 11% випадків система переводила процеси керування судном в автоматичний режим і, як наслідок, знижувала ризик виникнення аварійних ситуацій. Використання засобів автоматизованого інтелектуального аналізу даних дало змогу нейтралізувати негативний вплив «людського чинника» судноводія і скоротити середній час маневрування під час плавання судна до 23%.

У роботі [4] визначено, що відстеження шляху і запобігання зіткненням, чи то для безпілотних надводних суден, чи то для інших автономних транспортних засобів, є двома фундаментальними проблемами наведення в робототехніці. Протягом багатьох десятиліть вони були предметом академічного вивчення, що призвело до величезної кількості запропонованих підходів. Однак здебільшого їх розглядали як окремі проблеми і зазвичай покладалися на нелінійні моделі із параметрами, які можна визначити тільки експериментально. Зростання глибокого навчання з підкріпленням в останні роки пропонує альтернативний підхід: наскрізне вивчення оптимальної політики керівництва з нуля за допомогою підходу, що ґрунтується на пробах і помилках. У цій статті досліджено потенціал Proximal Policy Optimization, алгоритм глибокого навчання з підкріпленням, що демонструє сучасну продуктивність у завданнях безперервного управління, стосовно двоцільової задачі управління автономним надводним транспортним засобом згідно з МППСС таким чином, щоб він слідував заздалегідь відомим бажаним шляхом, уникаючи при цьому зіткнень з іншими суднами на цьому шляху. Ґрунтуючись на високоточних даних про морське дно і даних стеження АІС у Тронхейм-фіорді, вході в Норвезьке море, оцінено роботу навченого агента у складних динамічних сценаріях реального світу (неоднорідний морський рельєф під час складних, але реалістичних зіткнень із суднами), де кінцевий успіх агента залежить від його здатності орієнтуватися в нестандартних умовах.

У статті [5] зазначено, що найважливішою глобальною проблемою, яку розв'язує сьогодні вся світова спільнота, є забезпечення сталого розвитку людства. Водночас сталий розвиток неможливий як система, що слугує для задоволення господарських, культурних, наукових, рекреаційних та інших потреб людини без забезпечення безпеки. Важливою умовою ефективного функціонування судноплавства є забезпечення його безпеки. «Приписний» підхід до забезпечення безпеки мореплавства, який застосовують у теперішній час у світовій морській галузі, ґрунтується на багаторічному досвіді та результатах розслідування судових пригод. Таким чином, цей підхід відіграв велику роль у зменшенні кількості аварій на морі. З ухваленням Міжнародного кодексу з управління безпекою вся діяльність, пов'язана з розв'язанням проблем безпеки мореплавства, була переведена на більш високий якісний рівень. Дедалі більшого значення набувають пошук і розробка нових підходів і методів запобігання аваріям суден під час їх експлуатації. Однак концепція морської безпеки ще не сформована і не описана. Стаття містить короткий огляд основних положень Концепцій безпеки мореплавства, які сприяють зниженню кількості аварій та інцидентів на морі.

**Метою статті** є розробка методики побудови ймовірнісної графічної моделі навігаційної оцінки безпеки плавання під час керування суднами в обмежених умовах як на морських районах, так і на внутрішніх водних шляхах.

**Основні результати дослідження.** Як імовірнісну графічну модель (ІГМ) навігаційного оцінювання безпеки плавання у статті запропоновано використовувати байєсівську мережу, що являє собою множину змінних й їхніх імовірнісних залежностей за Байєсом [6 - 9].

Формально, байєсівська мережа – це орієнтований ациклічний граф, кожній вершині якого відповідає випадкова змінна, а дуги графа кодують відносини умовної незалежності між цими змінними. Вершини можуть представляти змінні будь-яких типів, бути зваженими параметрами, прихованими змінними або гіпотезами.

За графічну нотацію ІГМ використовуємо схему функціональної цілісності, яка являє собою логічно універсальний графічний засіб структурного представлення досліджуваних властивостей системних об'єктів. За побудовою апарат схеми функціональної цілісності реалізує всі можливості алгебри логіки у функціональному базисі «І», «АБО» і «НІ». Ці схеми дають змогу коректно представляти традиційні види структурних схем (блок-схеми, дерева

відмов, дерева подій, графи зв'язності з циклами) і принципово новий клас немонотонних (некогерентних) структурних моделей різних властивостей досліджуваних систем. Нині схеми функціональної цілісності застосовують для побудови структурних схем для розрахунку показників надійності, стійкості, живучості, технічного ризику, реальної ефективності систем.

Усі образотворчі засоби розглянутої ІГМ можна представити одним узагальненим фрагментом на рис. 1, де у загальному вигляді наведено всі можливі варіанти графічного подання умов функціонального забезпечення вершини, які існують у схемах функціональної цілісності. Кожен елемент ІГМ графічно являє одну з логічних операцій «І», «АБО», «НІ», що дає змогу відображати всі умови функціонування елементів системи, які можна представити засобами алгебри логіки.

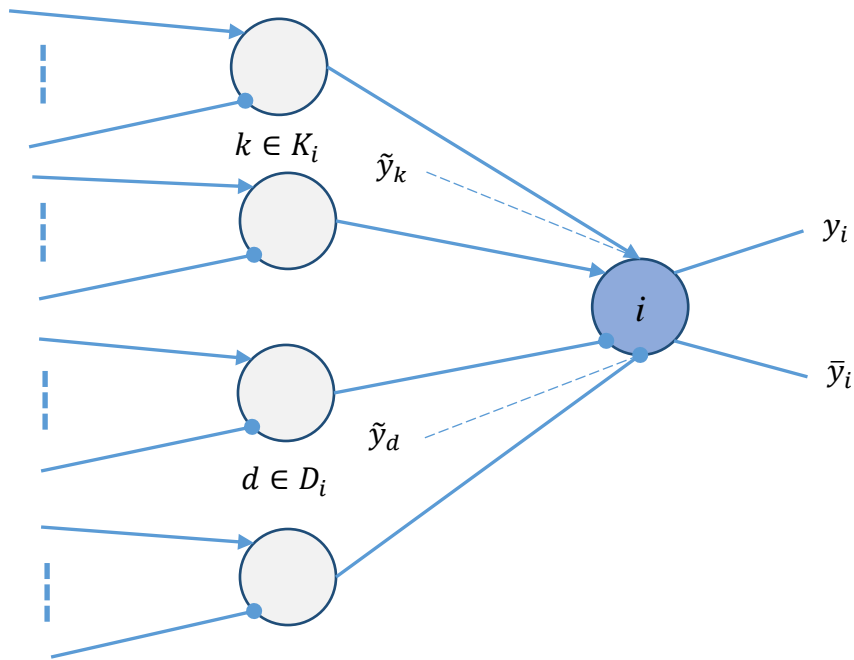


Рисунок 1 – Узагальнений фрагмент ВГМ у нотації схеми функціональної цілісності

Узагальнені логічні рівняння, що відповідають різним окремим фрагментам рис. 1 подано нижче. Для прямої вихідної інтегративної функції маємо

$$y_i = x_i(V_{d \in D_i} \tilde{y}_d)(V_{k \in K_i} \tilde{y}_k), \tag{1}$$

де  $i$  у цьому випадку – функціональна вершина;

$$y_i = (V_{d \in D_i} \tilde{y}_d)(V_{k \in K_i} \tilde{y}_k), \tag{2}$$

де  $i$  у цьому випадку – фіктивна вершина.

Для інверсної вихідної інтегративної функції

$$\bar{y}_i = \bar{x}_i \vee (\Pi_{d \in D_i} \tilde{y}_d)(\Pi_{k \in K_i} \tilde{y}_k), \tag{3}$$

де  $i$  у цьому випадку – функціональна вершина;

$$\bar{y}_i = (\Pi_{d \in D_i} \tilde{y}_d)(\Pi_{k \in K_i} \tilde{y}_k), \tag{4}$$

де  $i$  у цьому випадку – фіктивна вершина.

Перехід від логічного рівняння функціонування якісно складної системи судноводіння до ймовірнісної функції забезпечується використанням аксіом Колмогорова:

1. Значення ймовірності обмежено  $0 \leq P(x_i) \leq 1$ .
2. Безумовна істинність висловлювань має ймовірність 1.
3. Ймовірність диз'юнкції задається виразом

$$P(x_i \vee x_j) = P(x_i) + P(x_j) - P(x_i x_j).$$

Семантика байєсівських мереж спирається на два способи опису сутності мереж. Мережу слід вважати одним із подань спільного розподілу ймовірностей подій, включених у мережу. Також вона має розглядатися як опис сукупності тверджень про умовну незалежність елементів мережі. Математично це твердження описується так:

$$P(X_1, \dots, X_n) = \prod P(X_i / \text{parents}(X_i)). \quad (5)$$

Крім безпосередніх ймовірностей звершення вихідних подій апарат логіко-ймовірнісного моделювання передбачає проведення аналізу ролі окремих елементів. Оцінку може бути виконано як на підставі аналізу відповідного логічного рівняння, так і методом аналізу ймовірнісної функції.

Під час аналізу логічного рівняння використовують поняття булевої різниці

$$\Delta_{x_i} Y = Y(x_1, \dots, x_m) \oplus Y(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_m), \quad (6)$$

де  $Y(x_1, \dots, x_m)$  – функція алгебри логіки;

$Y(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_m)$  – функція алгебри логіки, в якій аргументи  $x_i$  замінені їхніми запереченнями  $\bar{x}_i$ .

Для оцінки одночасного і різночасового впливу двох аргументів на систему використовуються відповідно подвійна (7) і дворазова (8) булева різниця

$$\Delta_{x_i x_j} Y = \left| \begin{array}{l} x_i x_j \\ \bar{x}_i \bar{x}_j \\ \bar{x}_i x_j \\ x_i \bar{x}_j \end{array} \right| \left( \begin{array}{l} Y_{11}^{(i,j)} \oplus Y_{00}^{(i,j)} \\ Y_{01}^{(i,j)} \oplus Y_{10}^{(i,j)} \end{array} \right), \quad (7)$$

де  $Y_{11}^{(i,j)}$  – функція, отримана з вихідної заміною аргументів  $x_i$  та  $x_j$  на одиниці;

$Y_{01}^{(i,j)}$  – функція, отримана з вихідної заміною аргументів  $x_i$  на одиницю, а  $x_j$  – на нуль;

$Y_{10}^{(i,j)}$  – функція, отримана з вихідної заміною аргументів  $x_i$  на нуль, а  $x_j$  – на одиницю;

$Y_{00}^{(i,j)}$  – функція, отримана з вихідної заміною аргументів  $x_i$  та  $x_j$  на нулі.

При цьому

$$\Delta \Delta_{x_i x_j} Y = \left| \begin{array}{l} Y_{11}^{(i,j)} Y_{01}^{(i,j)} Y_{10}^{(i,j)} \\ Y_{00}^{(i,j)} Y_{01}^{(i,j)} Y_{10}^{(i,j)} \end{array} \right|. \quad (8)$$

Основними показниками ролі аргументу в системі на основі аналізу ймовірнісних функцій є значущість і внесок.

Значущість  $\zeta$  окремого елемента розглянутої системи визначається виразом

$$\zeta = \frac{P_Y}{P_{X_i=1}} - \frac{P_Y}{P_{X_i=0}}; \quad i = \overline{1, N}. \quad (9)$$

У виразі (9)  $\frac{P_Y}{P_{X_i=1}}$  – це значення ймовірності звершення вихідної події системи за абсолютної надійності елемента  $x$ , а  $\frac{P_Y}{P_{X_i=0}}$  – при достовірній відмові елемента  $x$  на розглянутому інтервалі часу.

У реальних системах значення ймовірності звершення окремого елемента змінюватимуться стосовно якогось їхнього наявного значення. Оцінити таку зміну коректно можливо за допомогою позитивного  $\beta_i^+$  і негативного  $\beta_i^-$  внесків елементів

$$\beta_i^+ = \frac{P_Y}{P_{X_i=1}} - P_Y,$$

$$\beta_i^- = P_Y - \frac{P_Y}{P_{X_i=0}}.$$

З урахуванням практики управління судном, граф байєсівської мережі ІГМ для навігаційного оцінювання безпеки плавання має включати такі основні події:

$X_1$  – подія, що визначає здатність вахтового помічника утримувати судно на осі суднового ходу;

$X_2$  – подія, що визначає можливість вахтового помічника визначати місце судна;

$X_3$  – подія, що визначає керованість судна з урахуванням його технічного стану;

$X_4$  – подія, що визначає мінливість маневреної смуги руху судна під впливом гідрометеорологічних факторів;

$X_5$  – подія, що визначає мінливість габаритів суднового ходу за маршрутом плавання;

$X_6$  – подія, що характеризує наявність візуальних полів елементів стаціонарного та плавучого огороження системи навігаційного обладнання району плавання;

$X_7$  – подія, що характеризує наявність систем радіолокаційних орієнтирів і сукупності полів відбитих РЛС-сигналів;

$X_8$  – подія, що характеризує повторюваність сприятливих умов видимості;

$X_9$  – подія, що характеризує мінливість течій у районі плавання.

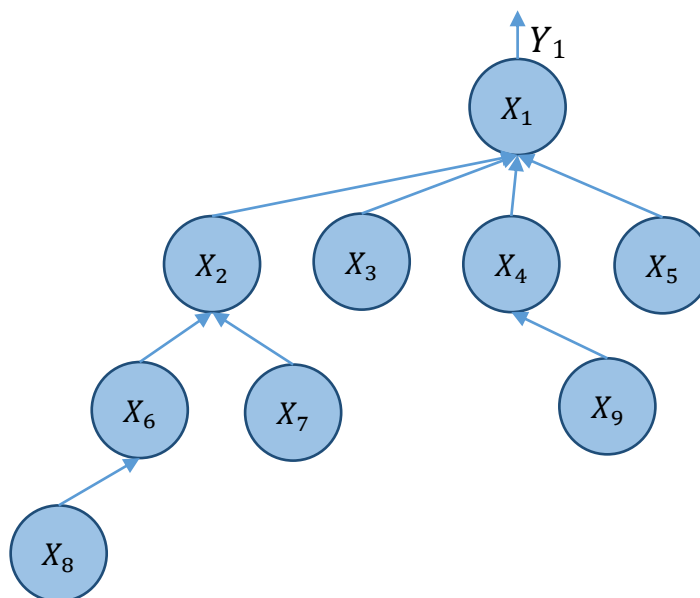


Рисунок 2 – Граф ІГМ для навігаційної оцінки безпеки плавання

Логічне рівняння звершення вихідної події набуває вигляду

$$Y_1 = ((X_8 X_6 \vee X_7) \wedge X_2 \vee X_3 \vee X_5 \vee X_4 X_9) \vee X_1.$$

Загальний вираз для навігаційного ризику при судноплавстві, який проявляється в разі не здійснення хоча б однієї з часткових подій, матиме вигляд

$$P_{risk} = Q_9 + Q_4P_9 + P_4Q_7P_9 + P_4P_7Q_8P_9 + P_4Q_6P_7P_8P_9 + Q_2P_4P_6P_7P_8P_9 + P_2Q_3P_4P_6P_7P_8P_9 + P_2P_3P_4Q_5P_6P_7P_8P_9 + Q_1P_2P_3P_4P_5P_6P_7P_8P_9, \quad (10)$$

де  $P_i, i = 1 - n$  – ймовірності здійснення відповідних подій;

$Q_i, i = 1 - P_i$  – ймовірності звершення зворотних подій.

Представляє науковий і практичний інтерес отримання кількісних значень виразу (10). Для цього використовується рівнопараметричний метод чисельного аналізу, за якого часткові значення ймовірностей появи подій, що включені до логіко-ймовірнісного графа системи, набувають однакових значень. Результати обчислень за виразом (10) наведено на рис. 3.

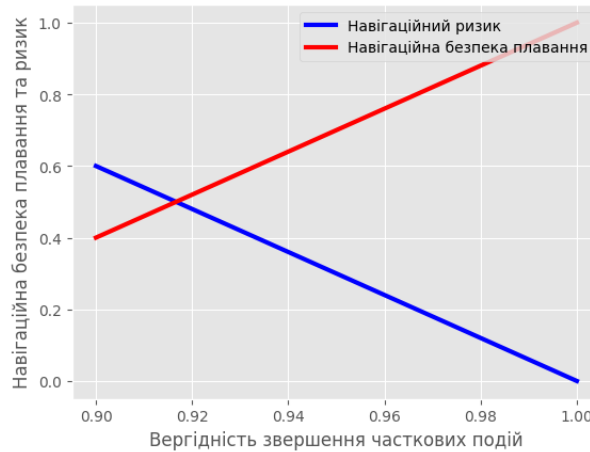


Рисунок 3 – Залежність навігаційної безпеки плавання і ризику від ймовірності звершення часткових подій

Отримані результати моделювання показують, що судноводій має розв'язувати задачі з оцінювання обстановки та керування судном з ймовірністю не гірше 0,99. Система навігаційного обладнання району плавання має забезпечувати сприятливі умови для координування суден з ймовірністю не гірше 0,95.

**Висновки.** У статті запропоновано методику побудови ймовірнісної графічної моделі навігаційної оцінки безпеки плавання під час керування суднами в обмежених умовах як на морських районах, так і на внутрішніх водних шляхах з використанням математичного апарату теорії байєсівських мереж і нотації схеми функціональної цілісності. Було продемонстровано, що основні характеристики байєсівських мереж і логіко-ймовірнісного методу можуть бути використані для математичного опису організаційно-технічних систем управління суднами. Для опису якісно складних організаційно-технічних систем судноводіння можна використовувати простір ймовірнісних подій та аксіоматику Колмогорова в поєднанні з правилами булевої алгебри логіки. Цей підхід дає змогу враховувати особливості та цілісність системи «судно-судноводій-середовище» під час оцінювання навігаційних ризиків.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Polemis D., Darousos E. F., Boviatsis M. A Theoretical Analysis of Contemporary Vessel Navigational Systems: Assessing the Future Role of the Human Element for Unmanned Vessels. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2022. Vol. 16, no. 4. P. 637–646. URL: <https://doi.org/10.12716/1001.16.04.05> (date of access: 02.02.2024).
2. Collision Avoidance Algorithm Based on COLREGs for Unmanned Surface Vehicle / H.-G. Kim et al. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9, no. 8. P. 863. URL: <https://doi.org/10.3390/jmse9080863> (date of access: 02.02.2024).

3. Navigation safety control system development through navigator action prediction by data mining means / P. Nosov et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 2, no. 9 (110). P. 55–68. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.229237> (date of access: 02.02.2024).
4. COLREG-Compliant Collision Avoidance for Unmanned Surface Vehicle Using Deep Reinforcement Learning / E. Meyer et al. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 165344–165364. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2020.3022600> (date of access: 02.02.2024).
5. Torskiy V., Topalov V. P., Chesnokova M. Conceptual Grounds of Navigation Safety. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2016. Vol. 10, no. 1. P. 79–82. URL: <https://doi.org/10.12716/1001.10.01.08> (date of access: 02.02.2024).
6. Heckerman D. A Tutorial on Learning with Bayesian Networks. *Learning in Graphical Models*. Dordrecht, 1998. P. 301–354. URL: [https://doi.org/10.1007/978-94-011-5014-9\\_11](https://doi.org/10.1007/978-94-011-5014-9_11) (date of access: 02.02.2024).
7. Robinson R. W. Counting unlabeled acyclic digraphs. *Lecture Notes in Mathematics*. Berlin, Heidelberg, 1977. P. 28–43. URL: <https://doi.org/10.1007/bfb0069178> (date of access: 02.02.2024).
8. Tversky A., Kahneman D. Judgment under uncertainty: Heuristics and biases. *Judgment under Uncertainty*. 1982. P. 3–20. URL: <https://doi.org/10.1017/cbo9780511809477.002> (date of access: 02.02.2024).
9. Chow C., Liu C. Approximating discrete probability distributions with dependence trees. *IEEE Transactions on Information Theory*. 1968. Vol. 14, no. 3. P. 462–467. URL: <https://doi.org/10.1109/tit.1968.1054142> (date of access: 02.02.2024).
10. Grandmaster level in StarCraft II using multi-agent reinforcement learning / O. Vinyals et al. *Nature*. 2019. Vol. 575, no. 7782. P. 350–354. URL: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1724-z> (date of access: 02.02.2024).
11. Taming an Autonomous Surface Vehicle for Path Following and Collision Avoidance Using Deep Reinforcement Learning / E. Meyer et al. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 41466–41481. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2020.2976586> (date of access: 02.02.2024).
12. Implementation Matters in Deep Policy Gradients: A Case Study on PPO and TRPO. *Under review as a conference paper at ICLR 2019* / Logan Engstrom, Andrew Ilyas, Shibani Santurkar, Dimitris Tsipras, Firdaus Janoos. 2019. URL: <https://openreview.net/forum?id=r1etN1rtPB> (date of access: 02.02.2024).

## REFERENCES

1. Polemis, D., Darousos, E. F., & Boviatsis, M. (2022). A Theoretical Analysis of Contemporary Vessel Navigational Systems: Assessing the Future Role of the Human Element for Unmanned Vessels. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 16(4), 637–646. <https://doi.org/10.12716/1001.16.04.05>
2. Kim, H.-G., Yun, S.-J., Choi, Y.-H., Ryu, J.-K., & Suh, J.-H. (2021). Collision Avoidance Algorithm Based on COLREGs for Unmanned Surface Vehicle. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(8), 863. <https://doi.org/10.3390/jmse9080863>
3. Nosov, P., Zinchenko, S., Ben, A., Prokopchuk, Y., Mamenko, P., Popovych, I., Moiseienko, V., & Kruglyj, D. (2021). Navigation safety control system development through navigator action prediction by data mining means. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(9 (110)), 55–68. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.229237>
4. Meyer, E., Heiberg, A., Rasheed, A., & San, O. (2020). COLREG-Compliant Collision Avoidance for Unmanned Surface Vehicle Using Deep Reinforcement Learning. *IEEE Access*, 8, 165344–165364. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3022600>
5. Torskiy, V., Topalov, V. P., & Chesnokova, M. (2016). Conceptual Grounds of Navigation Safety. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 10(1), 79–82. <https://doi.org/10.12716/1001.10.01.08>
6. Heckerman, D. (1998). A Tutorial on Learning with Bayesian Networks. *Learning in Graphical Models* (pp. 301–354). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-011-5014-9\\_11](https://doi.org/10.1007/978-94-011-5014-9_11)

7. Robinson, R. W. (1977). Counting unlabeled acyclic digraphs. *У Lecture Notes in Mathematics* (pp. 28–43). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/bfb0069178>
8. Tversky, A., & Kahneman, D. (1982). Judgment under uncertainty: Heuristics and biases. *In Judgment under Uncertainty* (pp. 3–20). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511809477.002>
9. Chow, C., & Liu, C. (1968). Approximating discrete probability distributions with dependence trees. *IEEE Transactions on Information Theory*, 14(3), 462–467. <https://doi.org/10.1109/tit.1968.1054142>
10. Vinyals, O., Babuschkin, I., Czarnecki, W. M., Mathieu, M., Dudzik, A., Chung, J., Choi, D. H., Powell, R., Ewalds, T., Georgiev, P., Oh, J., Horgan, D., Kroiss, M., Danihelka, I., Huang, A., Sifre, L., Cai, T., Agapiou, J. P., Jaderberg, M., ... Silver, D. (2019). Grandmaster level in StarCraft II using multi-agent reinforcement learning. *Nature*, 575(7782), 350–354. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1724-z>
11. Meyer, E., Robinson, H., Rasheed, A., & San, O. (2020). Taming an Autonomous Surface Vehicle for Path Following and Collision Avoidance Using Deep Reinforcement Learning. *IEEE Access*, 8, 41466–41481. <https://doi.org/10.1109/access.2020.2976586>
12. Engstrom, L., Ilyas, A., Santurkar, S., Tsipras, D., & Janoos, F. (2019). *Implementation matters in deep policy gradients: A case study on PPO and TRPO* [Preprint]. OpenReview. <https://openreview.net/forum?id=r1etN1rtPB>

**Trofymenko I.V., Plita L.L., Fedunov V.M., Ivanenko V.M.**

#### **A METHODOLOGY FOR CONSTRUCTING A PROBABILISTIC GRAPHICAL MODEL OF NAVIGATIONAL SAFETY ASSESSMENT**

*The purpose of the article is to develop a methodology for constructing a probabilistic graphical model of navigational safety assessment when navigating ships in limited conditions both in marine areas and inland waterways. This goal is achieved by analysing the features of the mathematical apparatus of the Bayesian network and notation of the functional integrity scheme, determining the main events for building a graph of the Bayesian network for navigational safety assessment and the corresponding mathematical expressions. It is established that, despite significant efforts to improve organisational and technical measures to ensure navigation safety, the level of navigation accidents remains high. There is a contradiction between the growth of requirements for shipping safety and the actual situation. One of the main factors hindering the resolution of issues related to navigational safety is the lack of formal methods for describing the navigation process. This is due to the difficulties in modelling the behaviour of complex organisational and technical shipping systems in the probabilistic state space, as the impact on the shipping process is stochastic, and the limitations of theoretical understanding in this area. As a result, there are difficulties in creating models of navigation risks that can be used for a comprehensive assessment of navigation safety within complex organisational and technical shipping systems. The solution to these problems would allow the use of formal methods for managing navigation risks, assessing the significance of system components and their impact on the overall risk. The most significant result is a methodology for constructing a probabilistic graphical model of navigational safety assessment when navigating ships in restricted conditions both in offshore areas and inland waterways using the mathematical apparatus of Bayesian network theory and functional integrity scheme notation. The research has shown that it is possible to use the main features of Bayesian networks and the logical-probabilistic method for the mathematical description of organisational and technical ship management systems. The space of probabilistic events and Kolmogorov's axiomatics together with the rules of Boolean logic algebra can be used to describe complex organisational and technical systems of ship management. This approach makes it possible to consider the peculiarities and integrity of the «ship-shipman-environment» system when assessing navigation risks.*

**Keywords:** shipping, navigation assessment, navigation safety, probabilistic graphical model, Bayesian network, functional integrity scheme.