

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ НАВІГАЦІЙНОГО КОМПЛЕКСУ ЗА ДОПОМОГОЮ ДУБЛЮВАННЯ ЙОГО ЕЛЕМЕНТІВ

Абрамов Г. С., к.ф.-м.н., доцент кафедри судноводіння Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: gennadabra@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0333-8819;

Плотніков В. І., аспірант Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: vladplotnikov895@gmail.com, ORCID: 0009-0003-1836-5462.

Метою статті є дослідження та математичне моделювання того, як можна підвищити надійність навігаційного комплексу шляхом дублювання елементів у складі системи. У представленій статті розглядаються деякі питання визначення стійкості технічних систем насамперед з точки зору їх надійності (ймовірності безвідмовної роботи). Розглянуто низку актуальних задач стосовно підвищення надійності систем за рахунок дублювання їх елементів. Проведена оцінка різних схем дублювання елементів систем і здійснено їх математичне моделювання. Для систем, що складаються з нерівнонадійних елементів досліджено правомірність заміни їх надійностей деяким середнім значенням. Показано, що така заміна дає децю завищені значення надійності системи, і має сенс тільки при невеликій дисперсії значень надійностей (ймовірностей безвідмовної роботи) елементів системи. При високих значеннях дисперсії різко зростає відносна помилка розрахунку надійності системи (>10%). Представлено також приклад більш-менш глибокого дублювання найменш надійних елементів системи, що значно (більше ніж удвічі) підвищує надійність системи в цілому. Визначено напрями подальших досліджень, такі як використання поняття повної ймовірності та Байєсових (апостеріорних) ймовірностей відповідних гіпотез.

Ключові слова: дублювання; надійність; ймовірність безвідмовної роботи; навігаційний комплекс; моделювання.

DOI: 10.33815/2313-4763.2024.2.29.164-177

Вступ. Сучасні торговельні судна зараз оснащуються вдосконаленими та складними навігаційними системами, які мають відповідати стандартам продуктивності та бути затвердженими після проходження стандартних випробувань. Їхній обов'язок полягає в забезпеченні безперервної подорожі в умовах жвавого руху по всьому світу, а також безпечного та пунктуального транспортування вантажів до місця призначення. Торговельні судна, які здійснюють глобальні рейси, повинні дотримуватися мінімальних стандартів безпеки для конструкції та обладнання, встановлених Міжнародною конвенцією SOLAS для встановлення єдиних вимог. Конвенція SOLAS встановлює мінімальні вимоги до перевезення, забезпечуючи незмінні навігаційні можливості в межах конкретного класу судна.

Правило 19 глави V Конвенції SOLAS містить необхідні специфікації для навігаційних систем і обладнання на судах. Судна класифікуються на основі їх валового тоннажу або дати побудови верфі з окремими правилами, що застосовуються до кожного класу. Додатковим фактором є основні експлуатаційні особливості суден (наприклад, тип вантажу, що перевозиться на борту). При обговоренні стійкості важливою стає наявність резервних навігаційних систем на борту. Відповідно до Регламенту 19, згаданого вище, навігаційне обладнання повинно мати чітке рекомендоване резервне рішення для конкретних елементів [1, 2].

– ECDIS (Система відображення електронних карт та інформації): або актуальні паперові карти, або вторинний незалежний пристрій ECDIS можна використовувати для його підтримки, усуваючи потребу в паперових картах на борту;

– допоміжний магнітний компас: його можна замінити основним магнітним компасом і він працює без потреби в живленні, показуючи магнітний курс на головному місці керування;

– другий радар, як правило, радар s-діапазону;

– другий автоматичний засіб відстеження: додаткова програма, яка може автоматично відображати відстань і напрямок інших цілей для оцінки потенційної небезпеки зіткнення, що працює окремо від основної автоматичної радіолокаційної допомоги (ARPA).

Необхідно підкреслити, що правила не забороняють додавати додаткове резервування до навігаційного обладнання. Суднобудівники, виробники та постачальники систем мають право пропонувати морякам додаткові копії важливих для безпеки частин системи для підвищення надійності. Правило 19 розділу V Конвенції SOLAS описує необхідні елементи навігаційного обладнання, яке буде встановлено на суднах, тоді як резолюції та стандарти виконання ІМО детально описують технічні характеристики зазначеного обладнання. Юридично обов'язкові стандарти для інтегрованих навігаційних систем (INS) встановлюються функціональними вимогами до навігаційних завдань, вимагаючи резервування та відмовостійкості. Отже, INS в цілому структуровано таким чином, щоб відповідати деяким або всім мінімальним вимогам до навігаційного обладнання.

У даний час технологічний аспект суднової навігаційної системи складається з мережі, що складається з компонентів, підсистем, вузлів і інтерфейсів людина-машина. Команда містка використовує це обладнання для виконання морських завдань, таких як моніторинг, прогнозування та прийняття рішень під час обробки судна, забезпечуючи безпечне судноплавство протягом усього рейсу. Датчики, радіо- та комунікаційне обладнання, джерела даних, засоби обробки даних і інструменти візуалізації є частиною компонентів і підсистем. Їх продуктивність залежить від конфігурації та контролю людини.

Таким чином, використовувані суднові навігаційні системи можна класифікувати або як технологічні системи (без участі людини), або як соціально-технічні системи (з участю людини). Конкретна перспектива навігаційної системи зрештою визначає, які критерії слід використовувати для оцінки наявності стійкості. Якщо безпечна та ефективна навігація судна є пріоритетом, технологічна система та екіпаж повинні розглядатися як єдине ціле, що працює разом із мінливим середовищем, враховуючи як технологію, так і можливості екіпажу.

Виключно технологічна перспектива оцінює технічну стійкість (надійність) шляхом вимірювання того, наскільки добре технічні системи можуть надавати важливу навігаційну інформацію з необхідною ефективністю. Розглядаючи соціально-технічні фактори, важливо визнати роль людей, оскільки вони налаштовують, спілкуються, контролюють і приймають рішення для навігаційної системи. Вони також служать органом, який ініціює та здійснює коригування у відповідь на загрози, що виникають. У цьому контексті стійкість визначається як успішне керування судном під час подорожі з мінімальними ризиками для безпеки [3].

Широко визнано, що люди-оператори відіграють вирішальну роль у забезпеченні безпеки навігації, компенсуючи збої або недоліки технічної системи, такі як неправильні або запізнілі сигнали тривоги про зіткнення. З іншого боку, поточні технічні системи ще недостатньо стійкі, щоб компенсувати низьку продуктивність людини-оператора. Сідання на міліну «Costa Concordia» відбулося через кілька сприятливих факторів [4], але жодна з технічних систем не змогла адаптуватися достатньо швидко, щоб протидіяти відсутності поінформованості про ситуацію та неправильному прийняттю рішень людьми-операторами з команди містка.

Концепція застосування принципів стійкості для підвищення безпеки навігації та підвищення судноплавства існує вже деякий час [5–14] і використовується в різних сферах, таких як покращення служб руху суден, перевірка судових інцидентів, впровадження підходу до безпеки II [15] для морської галузі та підвищення обізнаності умов руху для безпечної навігації. Усі документи підкреслюють, що зосередження лише на окремих факторах недостатньо для досягнення стійкості. Крім того, незалежно від того, чи робиться наголос на методології, чи людському факторі, важливо зобразити навігацію судна як серію процесів, беручи до уваги залежності та взаємодії. Прикладом є модель морської перспективи в [3], яка пропонує узагальнену модель процесу для прийняття навігаційних рішень. Основна складність полягає в збалансуванні знань і досвіду початкових параметрів

(профілювання судна) і поточної ситуації (оцінка ситуації) для прийняття навігаційних рішень у невизначених ситуаціях та їх розвитку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Принципи стійкості, як зазначено в [16–18], визначають абстрактні потенційні джерела стійкості в інженерних системах. Успіх потенційного джерела стійкості залежить від того, як воно інтегроване в систему, беручи до уваги використаний підхід і його вплив на інші заходи, реалізовані для підвищення стійкості системи.

Джексон [16, 17] зазначив, що за останні кілька десятиліть для інженерних систем було розроблено понад 40 принципів стійкості. Він запропонував розділити весь масив принципів на 14 основних принципів, а також включити такі підмножини принципів (підпринципи), як маржа, автоматизована функція або підпринципи перегрупування. Реалізація конкретного принципу стійкості допомагає створити або розширити певну здатність системи щодо бажаного атрибута системи [16, 18]. Джексон представив чотири характеристики як цілі стійкості: здатність протистояти загрозі (спроможність), здатність пристосуватися до загрози (гнучкість), збереження функціональності за наявності загрози (толерантність) і залишатися єдиними, коли стикаються з загрозою (згуртованість).

Вудс [19] класифікував низку принципів стійкості на основі чотирьох різних концепцій стійкості, націлених на різні цілі. Початкова ідея (надійність як стійкість) передбачає здатність системи ефективно працювати за типових і дещо погіршених обставин. Друга ідея наголошує на ефективному та дієвому відновленні після травматичних і деструктивних подій (стійке відновлення). Третя ідея розглядає стійкість у ситуаціях, коли система працює поблизу меж або перевищує межі своєї потужності, або стикається з несподіваними та новими загрозами (стійкість на відміну від крихкості). «Стойка адаптивність» стосується управління функціональністю та продуктивністю в мінливому та взаємопов'язаному світі, який включає припущення, вимоги користувачів, рамкові умови, такі як економічні, екологічні та правові аспекти, а також різноманітність їх взаємозв'язків і взаємодій.

Стербенц і його колеги [20–22] розробили ряд рекомендацій для створення потужних інформаційних мереж і систем зв'язку. У цих публікаціях принципи відмовостійкості називаються факторами, що сприяють, і включають як загальні підходи (такі як надмірність і різноманітність), так і підходи до конкретних програм (наприклад, усвідомлення контексту та прозорість).

Незалежно від того, як структуровані та використовуються принципи стійкості, важливі два ключові чинники: стійкість системи або системи систем є метою проектування, яка має бути чітко визначена як якісно, так і кількісно. Це означає, що бажаний рівень надійності повинен визначатися функціональними вимогами та параметрами продуктивності, отриманими з припущень щодо умов експлуатації та сценаріїв загроз. Це також передбачає наявність достатньо запланованих ресурсів, щоб бути готовими до відновлення. Однак забезпечення стійкості є щоденною відповідальністю, якою повинна ефективно керувати як система, так і відповідні органи контролю та управління. Встановлення обізнаності про ситуацію має вирішальне значення з цієї причини, і воно повинно охоплювати як поточну ситуацію (статус, стан), так і будь-які відповідні зміни, пов'язані зі стійкістю (наприклад, нові загрози) [1].

Мета та задачі дослідження. Метою даної роботи є визначення методу підвищення надійності систем навігаційного комплексу за допомогою різних схем дублювання його елементів (агрегатів, блоків, модулів). Основні задачі: 1) оцінка і моделювання надійності різних схем дублювання елементів системи; 2) оцінка надійності системи з рівнонадійними складовими елементами; 3) оцінка надійності системи з нерівнонадійними складовими елементами.

Виклад основного матеріалу. Для визначення рівня надійності навігаційного обладнання методом експертного оцінювання було проведено анкетування 22-ох капітанів та старших помічників капітана з досвідом роботи від 5-ти до 8-ми років. На основі отриманих

відповідей були сформовані діаграми, на яких показано, як часто кожний компонент навігаційного обладнання морського судна виходить із ладу (рис. 1) та чи доцільно було б дублювання того, чи іншого компонента (рис. 2).



Рисунок 1 – Як часто кожний компонент виходить із ладу

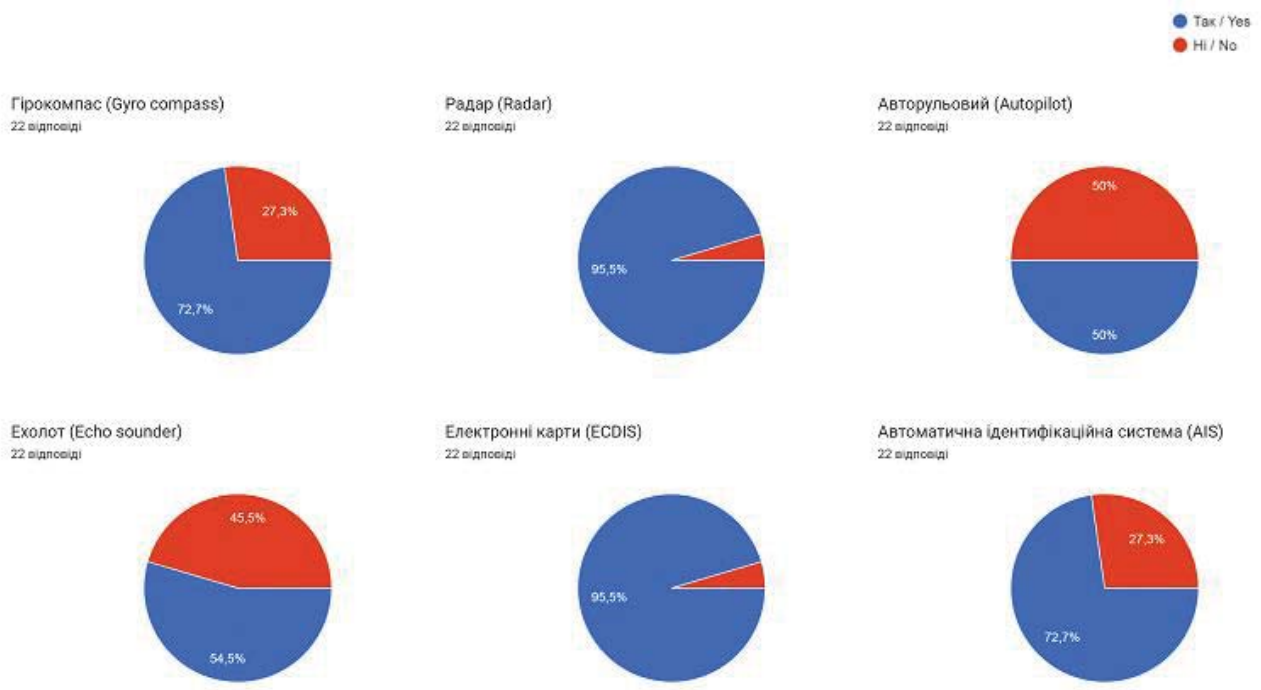


Рисунок 2 – Чи доцільно було б дублювання того, чи іншого компонента

Як можна побачити вище, деякі компоненти навігаційного обладнання мають недостатню надійність і тому потребують підвищення надійності.

Одним із найпоширеніших прийомів підвищення надійності обладнання є більш-менш глибоке дублювання його елементів. Особливо процес дублювання являється актуальним в разі недостатньої первинної надійності елементів комплексу обладнання.

Якщо відсутні принципові технологічні можливості підвищення якості й, тим самим, надійності елементної бази обладнання, то прийоми дублювання є чи не єдиними засобами підвищення експлуатаційної надійності комплексу обладнання в цілому.

Методи теорії ймовірностей [23, 24] дозволяють теоретично обчислити надійність дубльованих систем і оцінити ефективність різних схем дублювання їх елементів.

Розглянемо низку актуальних, на наш погляд, задач стосовно надійності обладнання навігаційного комплексу з точки зору дублювання його складових елементів.

1. Оцінка і моделювання надійності різних схем дублювання елементів системи.

Нехай комплекс (система) деякого навігаційного обладнання містить деяку кількість n елементів, ймовірність безвідмовної роботи яких становить p . Для ефективної роботи обладнання необхідна безвідмовна робота усіх його складових елементів.

З метою підвищення надійності обладнання здійснюється дублювання системи, для чого виділяється ще n елементів.

Розглянемо дві можливі в такій постановці схеми дублювання:

а) дублювання кожного елемента

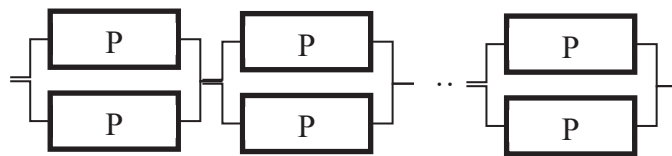


Рисунок 3 – Схема дублювання кожного елемента

б) дублювання всієї системи

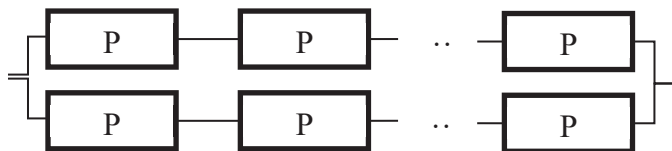


Рисунок 4 – Схема дублювання всієї системи

Здійснимо відповідні розрахунки і чисельне моделювання, щоб виявити, яка схема дублювання дає більш високу експлуатаційну надійність.

Надійність P_a (як ймовірність безвідмовної роботи), яку забезпечує дублювання за схемою «а»), має наступний вигляд:

$$P_a = [1 - (1 - p)^2]^n \tag{1}$$

Відповідний вираз P_b для схеми «б») має вигляд:

$$P_b = 1 - (1 - p^n)^2 \tag{2}$$

Здійснюючи порівняння (1) і (2), покажемо, що $P_a > P_b$.

Переформулюємо вирази (1) і (2):

$$P_a = [1 - (1 - p)^2]^n = p^n(2 - p)^n \tag{3}$$

$$P_b = 1 - (1 - p^n)^2 = p^n(2 - p^n) \tag{4}$$

Доведемо нерівність:

$$(2 - p)^n > 2 - p^n \quad (5)$$

Зважаючи, що $q = 1 - p$, нерівність (5) буде мати наступний вигляд:

$$(2 - 1 + q)^n > 2 - (1 - q)^n, \text{ або} \quad (6)$$

$$(1 + q)^n + (1 - q)^n > 2 \quad (7)$$

Застосовуючи формулу бінома, отримаємо:

$$\begin{aligned} (1 + q)^n + (1 - q)^n &= 1 + nq + \frac{n(n-1)}{2!}q^2 + \frac{n(n-1)(n-2)}{3!}q^3 + \dots \\ \dots + 1 - nq + \frac{n(n-1)}{2!}q^2 - \frac{n(n-1)(n-2)}{3!}q^3 + \dots &= \\ &= 2 + n(n-1)q^2 + 0 \left(\frac{n(n-1)(n-2)(n-3)}{12}q^4 \right) > 2 \end{aligned} \quad (8)$$

Таким чином, $(2 - p)^n > 2 - p^n$, і це означає, що схема «а» краща, більш надійна, ніж схема «б», тобто дублювання кожного елемента системи забезпечує більш високу надійність, ніж дублювання системи в цілому.

Аналіз нерівності (8) показує, що переваги схеми «а» будуть більш очевидними при недостатній первинній надійності елементів, тобто коли значення ймовірності p достатньо віддалені від одиниці.

Навпроти, коли p наближається до одиниці, різниця між схемами «а» і «б» нівелюється і надійність (ймовірність безвідмовної роботи) обох схем асимптотично наближається до одиниці.

Продемонструємо отримані результати, здійснивши чисельне моделювання по рівняннях (3) і (4) для різних значень n і в широкому діапазоні варіації значень p (від 0,7 до 0,99).

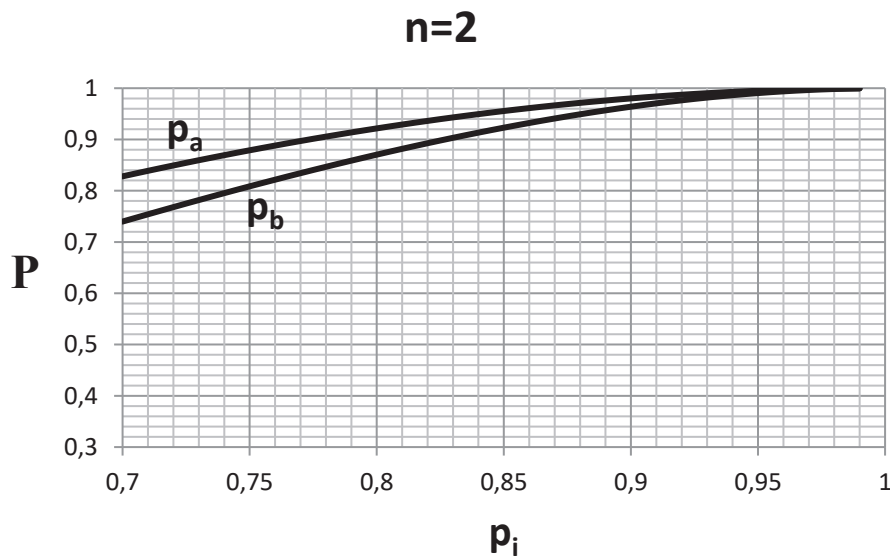


Рисунок 5 – Результати моделювання при $n=2$

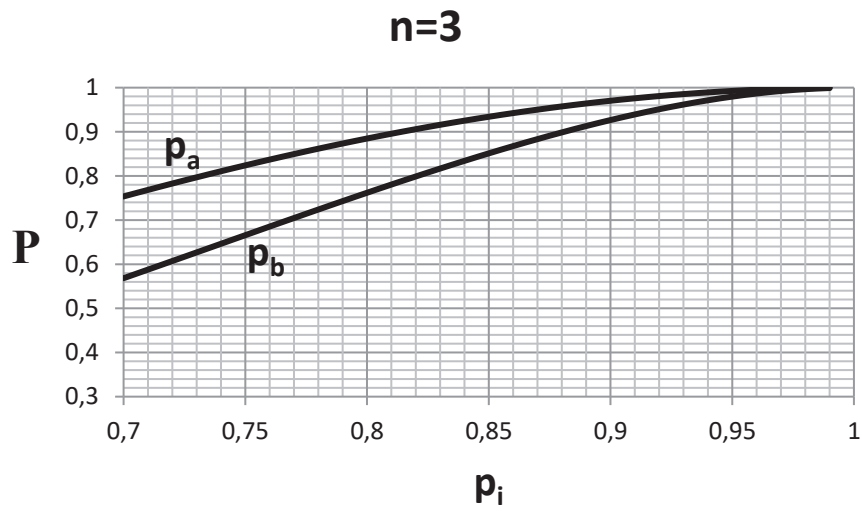


Рисунок 6 – Результати моделювання при n=3

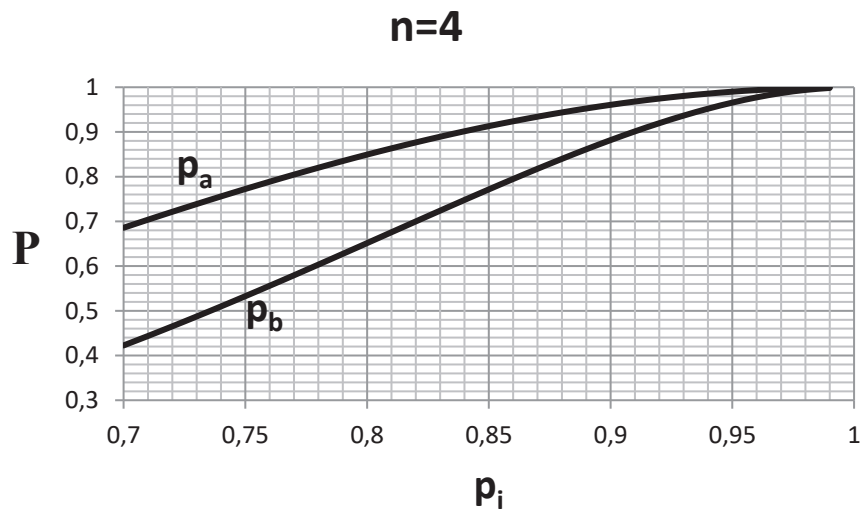


Рисунок 7 – Результати моделювання при n=4

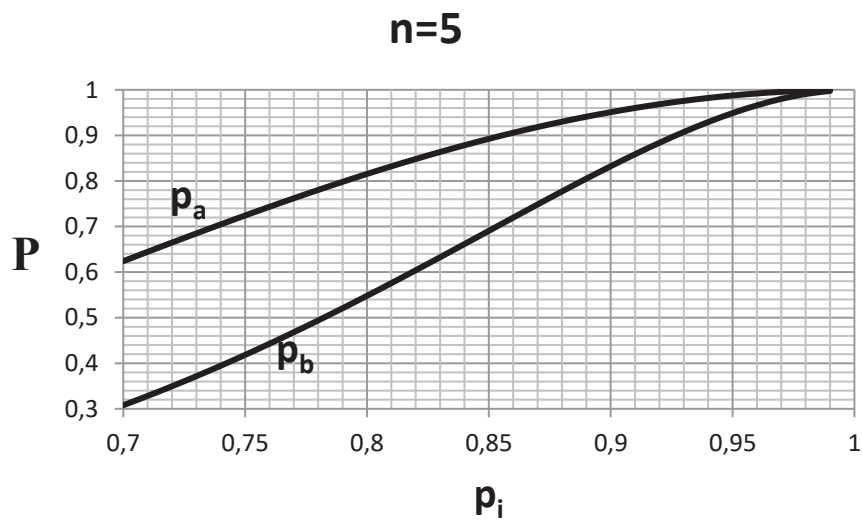


Рисунок 8 – Результати моделювання при n=5

На рис. 5–8 представлені результати моделювання, які підтверджують висновки, що витікають із аналізу нерівності (8), але неочевидним і неочікуваним результатом є та обставина, що при зростанні n схема «б» дає значно нижчу надійність ніж первинна надійність елементів p , якщо остання не перевищує значень 0,85–0,9. Тобто, якщо значення p недостатньо високі, то дублювання за схемою «б» не тільки не підвищить надійність системи, а навпаки, погіршить її.

Вид кривих надійності за схемою «б» на рис. 5–8 наводить на думку про існування точок перегину. Як відомо, для їх визначення необхідно знайти другу похідну виразу (4) і дорівняти її нулю.

$$P'_6 = 2np^{n-1}(1 - p^n) \tag{9}$$

$$P''_6 = 2n[(n - 1)p^{n-2}(1 - p^n) - np^{2(n-1)}] \tag{10}$$

Дорівнюючи останній вираз нулю, маємо:

$$p^{2n}(2n - 1) - (n - 1)p^n = 0 \tag{11}$$

Таким чином:

$$p^n(2n - 1) = n - 1 \tag{12}$$

Тобто вираз для точки перегину має вигляд:

$$P = \left(\frac{n - 1}{2n - 1}\right)^{\frac{1}{n}} \tag{13}$$

Таким чином: $n = 2; p = \sqrt{\frac{1}{3}} \approx 0,577; n = 3; p = \left(\frac{2}{5}\right)^{\frac{1}{3}} \approx 0,737; n = 4; p = \left(\frac{3}{7}\right)^{\frac{1}{4}} \approx 0,809;$
 $n = 5; p = \left(\frac{4}{9}\right)^{\frac{1}{5}} \approx 0,850$

Порівняння отриманих координат точок перегину з кривими для P_6 на рис. 5–8 показує, що проведений вище розрахунок є вірним. Знання координати точки перегину для схеми «б» може слугувати певним критерієм, починаючи з якого надійність цієї схеми буде асимптотично наближатися до одиниці.

Видається необхідним розглянути дві задачі про надійність технічної системи з n елементів за умови рівно надійності складових її елементів і за відсутності такої.

2. Оцінка надійності системи з рівнонадійними складовими елементами.

Схема технічної системи з рівно надійних елементів, робота кожного з яких необхідна для успішної роботи системи в цілому, представлена на рис. 9:



Рисунок 9 – Система з рівнонадійних складових елементів

Якщо технічна система складається з n рівнонадійних елементів, вихід з ладу кожного з яких означає вихід з ладу системи в цілому, то загальна надійність системи (імовірність безвідмовної роботи) P :

$$P = p^n, \tag{14}$$

звідки, надійність p кожного елемента для забезпечення загальної надійності P повинна дорівнювати:

$$p = \sqrt[n]{P} \tag{15}$$

Можна знайти й обмеження для числа елементів n з надійністю p для забезпечення заданої надійності системи P :

$$n = \text{int} \left[\frac{\ln P}{\ln p} \right] \quad (16)$$

де $\text{int}[x]$ – ціла частина x .

Проілюструємо наведену залежність:

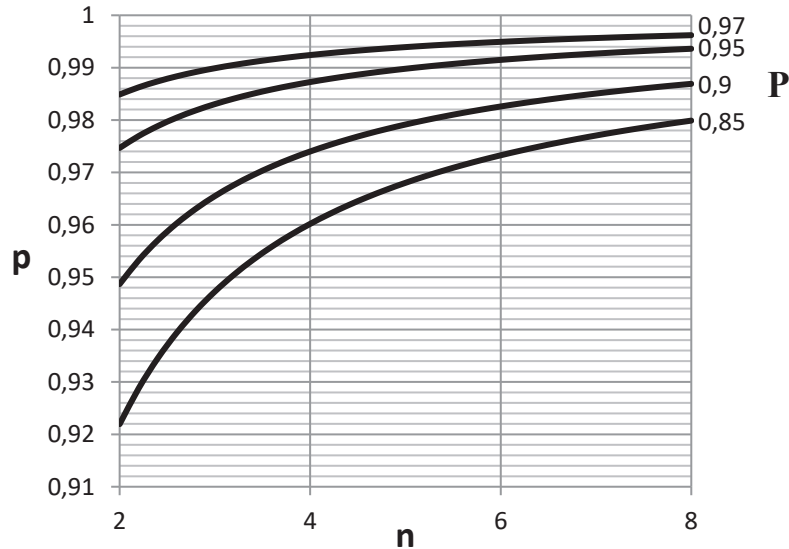


Рисунок 10 – Залежність (15) необхідної надійності елементів p від загальної (заданої) надійності системи P і числа елементів у ній n

Видно, що зі збільшенням заданої надійності системи P та числа елементів n у ній, потрібна все більш висока надійність складових елементів системи p .

3. Оцінка надійності системи з нерівнонадійними складовими елементами.

Якщо система складена з нерівнонадійних елементів (що ймовірно найчастіше і трапляється на практиці), то оцінити ймовірність безвідмовної роботи окремо кожного елемента досить важко, і тоді часто їх замінюють приблизно деяким середнім значенням:

$$\bar{p} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i \quad (17)$$

Оцінимо, наскільки правомочною є така заміна і як відрізнятимуться ймовірності безвідмовної роботи системи, які обчислені за істинними значеннями p_i та за їх середнім значенням.

Якби були відомі ймовірності p_i безвідмовної роботи кожного елемента, то за умови незалежності відмови кожного елемента, точне значення ймовірності безвідмовної роботи системи в цілому $P = \prod_{i=1}^n p_i$.

Наближене значення \bar{P} , обчислене за середньою ймовірністю \bar{p} , матиме вигляд:

$$\bar{P} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i \right)^n \quad (18)$$

Таким чином, потрібно порівняти величини $\prod_{i=1}^n p_i$ та $\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i \right)^n$.

Відомо, що середнє геометричне позитивних (не рівних між собою) величин менше, ніж їх середнє арифметичне:

$$\sqrt[n]{\prod_{i=1}^n p_i} < \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i \quad (19)$$

звідки випливає, що:

$$\prod_{i=1}^n p_i < \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i \right]^n \quad (20)$$

тобто $P < \bar{P}$, а це означає, що оцінка ймовірності безвідмовної роботи системи \bar{P} – за середніми значеннями для p_i завжди буде дещо завищеною в порівнянні з істинною.

З апріорних міркувань видається, що ця різниця має залежати від дисперсії масиву значень p_i .

Виконаємо чисельні експерименти на прикладі наступного масиву:

p_i : 0,55; 0,6; 0,65; 0,7; **0,75**; 0,8; 0,85; 0,9; 0,95.

Будемо послідовно досліджувати набори з 3-х, 5-ти, 7-и та 9-ти елементів із середнім значенням $\bar{p} = \mathbf{0,75}$.

Дисперсії обчислимо за відомими формулами:

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{x}^2 \quad (21)$$

Відповідно середньоквадратичне відхилення (стандартна помилка):

$$s = \sqrt{s^2} \quad (22)$$

Обчислимо також коефіцієнт варіації $\gamma = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100\%$, як відносне значення помилки та відносну помилку δ між значеннями \bar{P} та P :

$$\delta = \frac{\bar{P} - P}{P} \cdot 100\% \quad (23)$$

Отримані результати наведено у таблиці 1.

Наведемо приклад обчислення першого рядка таблиці $n = 3$: 0,7; 0,75; 0,8.

$$P = 0,7 \cdot 0,75 \cdot 0,8 = 0,42; \bar{P} = 0,75^3 = 0,422$$

$$s^2 = \frac{1}{3} (0,49 + 0,5625 + 0,64) - 0,5625 = 0,00167$$

$$s = 0,041; \gamma = \frac{0,041}{0,75} \cdot 100\% = 5,47\%$$

$$\delta = \frac{0,422 - 0,42}{0,42} \cdot 100\% = 0,48\%$$

Таблиця 1 – Значення P , \bar{P} та помилок s , γ і δ для наборів з 3-х, 5-ти, 7-и та 9-ти елементів

n	P	\bar{P}	s	$\gamma, \%$	$\delta, \%$
3	0,42	0,422	0,041	5,47	0,48
5	0,232	0,237	0,071	9,47	2,16
7	0,1253	0,1335	0,1	13,3	6,54
9	0,0655	0,0751	0,1292	17,23	14,7

Видно, що при зростанні дисперсії значень p_i різко зростає відносна помилка δ , її значення перевищують 10%, що ставить під сумнів правомірність заміни масиву p_i їх середнім значенням.

4. Приклад схеми дублювання системи нерівнонадійних елементів.

Якщо система складається з нерівнонадійних елементів, необхідно розглядати задачу дублювання елементів, надійність яких недостатньо висока, оскільки вони лімітують надійність системи загалом. Ефективність дублювання найменш надійних елементів системи можна показати на наступному прикладі.

Нехай технічна система складається із п'яти елементів, надійність яких (імовірність безвідмовної роботи) дорівнює: $p_1 = 0,85$; $p_2 = 0,75$; $p_3 = p_4 = 0,95$; $p_5 = 0,75$. Видно, що 1-й, 2-й та 5-й елементи потребують дублювання як недостатньо надійні, причому 2-й та 5-й елементи повинні мати, мабуть, триразове дублювання (рис. 11).

Без дублювання надійність системи складає:

$$\bar{P} = [1 - (1 - p_1)] \cdot [1 - (1 - p_2)] \cdot [1 - (1 - p_3)] \cdot [1 - (1 - p_4)] \cdot [1 - (1 - p_5)] \\ = 0,85 \cdot 0,75 \cdot 0,95 \cdot 0,95 \cdot 0,75 = 0,418$$

До речі, якщо визначити надійність за середнім значенням $\bar{p} = 0,85$, то вона буде, як і слід очікувати, трохи вище:

$$\bar{P} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i\right)^n = 0,85^5 = 0,444$$

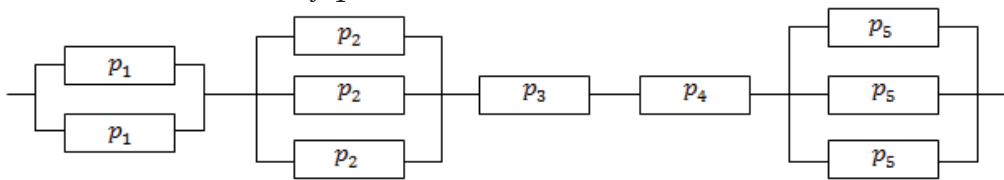


Рисунок 11 – Схема дубльованої системи

Надійність дубльованої системи (рис. 11) складає:

$$P = [1 - (1 - p_1)^2] \cdot [1 - (1 - p_2)^3] \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot [1 - (1 - p_5)^3] \\ = 0,9775 \cdot 0,984 \cdot 0,95 \cdot 0,95 \cdot 0,984 = 0,854$$

Як бачимо, надійність системи, елементи якої продубльовані відповідним чином, збільшується більш ніж удвічі і перевищує 85%.

Висновки. У даній роботі була проведена оцінка ефективності різних схем дублювання елементів систем навігаційного комплексу і їх математичне моделювання. Отримані результати дозволили зробити низку висновків щодо ймовірності безвідмовної роботи системи при використанні тієї чи іншої схеми дублювання.

Якщо система складається з рівнонадійних елементів, то дублювання кожного елемента є більш ефективним методом підвищення надійності, ніж дублювання всієї системи. Більше того, якщо значення первинної надійності елементів дорівнює 0,85 або нижче, то дублювання всієї системи з кожним зростанням кількості дублюючих елементів значно знизить надійність системи. Тоді як підвищення надійності системи шляхом дублювання кожного елемента при недостатній первинній надійності елементів буде більш істотно при значеннях надійності елементів нижче 0,85.

Якщо система складається з нерівнонадійних елементів, то при неможливості оцінки ймовірності безвідмовної роботи окремо кожного елемента заміна їх значень деяким середнім значенням виявляється сумнівною (при істотній дисперсії їх значень), оскільки при високій дисперсії значень ймовірності безвідмовної роботи елементів системи різко зростає значення відносної помилки, яка може перевищувати 10%.

Дублювання найменш надійних елементів системи, що складається з нерівнонадійних елементів, може збільшити надійність системи більш ніж удвічі, за умови якщо воно виконане з урахуванням значення ймовірності безвідмовної роботи кожного елемента.

Перспективи подальших досліджень. Застосування поняття повної ймовірності та Байєсівських (апостеріорних) ймовірностей відповідних гіпотез для розрахунків ймовірності відмов або ймовірності безвідмовної роботи як окремих елементів, так і навігаційного комплексу в цілому.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Engler E., Baldauf M., Banyś P., Heymann F., Gucma M., Torres, F. S. Situation Assessment – An Essential Functionality for Resilient Navigation Systems. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2019. Vol. 8(1):17. <https://doi.org/10.3390/jmse8010017>.
2. International Maritime Organization (IMO). International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS). 1974.
3. Wahlström M., Forster D., Karvonen A., Puustinen R., Saariluoma P. Perspective-Taking in Anticipatory Maritime Navigation – Implications for Developing Autonomous Ships. In *Proceedings of the 18th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries*, Tullamore, Ireland, 25–27 March 2019. P. 191–200.
4. Wreathall J. Monitoring – A critical ability in Resilience Engineering. In *Resilience Engineering in Practice: A Guidebook*; Hollnagel E., Paries J., Woods D. D., Wreathall J., Eds.; Ashgate Pub Co.: Surrey, UK. 2011.
5. Praetorius G., Hollnagel E. Control and Resilience Within the Maritime Traffic Management Domain. *J. Cogn. Eng. Decis. Mak.* 2014. Vol. 8, P. 303–317.
6. Praetorius G. Vessel Traffic Service (VTS): A Maritime Information Service or Traffic Control System? Understanding Everyday Performance and Resilience in a Socio-Technical System under Change. *Ph.D. Thesis*, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden. 2014.
7. Schröder-Hinrichs J.-U., Praetorius G., Graziano A., Kataria A., Baldauf M. Introducing the Concept of Resilience into Maritime Safety. In *Proceedings of the 6th Resilience Engineering Association Symposium*, Lisboa, Portugal, 22–25 June 2015.
8. Smith D., Veitch B., Khan F., Taylor R. Using the FRAM to Understand Arctic Ship Navigation: Assessing Work Processes During the Exxon Valdez Grounding. *TransNav Int. J. Mar. Navig. Saf. Sea Transp.* 2013. Vol. 12, P. 447–457.
9. Wahlström M. Resilience on the seven seas: perspective-taking in anticipatory ship navigation. In *Proceedings of the 8th REA Symposium Embracing Resilience: Scaling Up and Speeding Up*, Kalmar, Sweden, 24–27 June 2019.
10. Van Westrenen F., Praetorius G. Maritime traffic management: a need for central coordination? *Cognition, Technology & Work*. 2014. Vol. 16(1), P. 59–70.
11. Aven T., Andersen H. B., Cox T., Droguett E. L., Greenberg M., Guikema S., Kröger W., Renn O., Zio E. Risk Analysis Foundations. *Soc. Risk Anal.* 2015.
12. Ayyub B. M. Practical Resilience Metrics for Planning, Design, and Decision Making. *ASCE-ASME J. Risk Uncertain. Eng. Syst. Part Civ. Eng.* 2015. Vol. 1. <https://doi.org/10.1061/AJRUA6.0000826>.
13. Ayyub B. M. Systems resilience for multihazard environments: definition, metrics, and valuation for decision making. *Risk Anal. Off. Publ. Soc. Risk Anal.* 2014. Vol. 34, P. 340–355. <https://doi.org/10.1111/risa.12093>.
14. Smith D., Veitch B., Khan F., Taylor R. An Accident Model for Arctic Shipping, in: *Proceedings of the ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. Presented at the OMAE 2015, St. John's, NL, Canada.
15. Hollnagel E. RAG – The resilience analysis grid. In *Resilience Engineering in Practice: A Guidebook*; Hollnagel E., Paries J., Woods D. D., Wreathall J., Eds.; Ashgate Pub Co.: Surrey, UK. 2011.
16. Jackson S., Ferris T. L. J. Resilience Principles for Engineered Systems. *Syst. Eng.* 2013. Vol. 16, P. 152–164.
17. Jackson S., Ferris T. L. J. Designing Resilient Systems. In *Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Resilience-Based Approaches to Critical Infrastructures Safeguarding*, Azores, Portugal, 26–29 June 2016. P. 121–144.
18. Madni A. M., Jackson S. Towards a Conceptual Framework for Resilience Engineering. *IEEE Syst. J.* 2009. Vol. 3, P. 181–191.
19. Woods D. D. Four concepts for resilience and the implication for the future resilience. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2015. Vol. 141, P. 5–9.

20. Sterbenz J. P. G., Hutchison D., Cetinkaya E. K., Jabbar A., Rohrer J., Schöller M., Smith P. Resilience and survivability in communication networks: Strategies, principles, and survey of disciplines. *Comput. Netw.* 2010. Vol. 54, P. 1245–1265.
21. Sterbenz J. P. G., Hutchison D., Cetinkaya E. K., Jabbar A., Rohrer J., Schöller M., Smith P. Redundancy, diversity, and connectivity to achieve multilevel network resilience, survivability, and disruption tolerance. *Telecommun. Syst.* 2014. Vol. 56, P. 17–31.
22. Cheng Y., Todd Gardner M., Li J., May R., Medhi D., Sterbenz J. P. G. Optimised heuristics for a geodiverse routing protocol. In *The 10th IEEE/IFIP international conference on Design of Reliable Communication Networks (DRCN)*, 2014, Ghent, Belgium.
23. Феллер В. Введення в теорію ймовірностей та її застосування. У 2-х томах. М.: Світ, 1984. Т.1: 528 с., Т.2: 738 с.
24. Гече Ф. Е. Теорія ймовірностей і математична статистика: навч. посібн. Ужгород: ПП «АУТДОР-ШАРК», 2019. 235 с.

REFERENCES

1. Engler, E., Baldauf, M., Banyś, P., Heymann, F., Gucma, M., Torres, F. S. (2019). Situation Assessment – An Essential Functionality for Resilient Navigation Systems. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(1):17; <https://doi.org/10.3390/jmse8010017>.
2. International Maritime Organization (IMO). International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), 1974.
3. Wahlström, M., Forster, D., Karvonen, A., Puustinen, R., Saariluoma, P. (2019). Perspective-Taking in Anticipatory Maritime Navigation – Implications for Developing Autonomous Ships. In *Proceedings of the 18th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries*, Tullamore, Ireland, 25–27 March 2019; 191–200.
4. Wreathall, J. (2011). Monitoring – A critical ability in Resilience Engineering. In *Resilience Engineering in Practice: A Guidebook*; Hollnagel, E., Paries, J., Woods, D. D., Wreathall, J., Eds.; Ashgate Pub Co.: Surrey, UK.
5. Praetorius, G., Hollnagel, E. (2014). Control and Resilience Within the Maritime Traffic Management Domain. *J. Cogn. Eng. Decis. Mak.*, 8, 303–317.
6. Praetorius, G. (2014). Vessel Traffic Service (VTS): A Maritime Information Service or Traffic Control System? Understanding Everyday Performance and Resilience in a Socio-Technical System under Change. *Ph.D. Thesis*, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.
7. Schröder-Hinrichs, J.-U., Praetorius, G., Graziano, A., Kataria, A., Baldauf, M. (2015). Introducing the Concept of Resilience into Maritime Safety. In *Proceedings of the 6th Resilience Engineering Association Symposium*, Lisboa, Portugal, 22–25 June 2015.
8. Smith, D., Veitch, B., Khan, F., Taylor, R. (2013). Using the FRAM to Understand Arctic Ship Navigation: Assessing Work Processes During the Exxon Valdez Grounding. *TransNav Int. J. Mar. Navig. Saf. Sea Transp.*, 12, 447–457.
9. Wahlström, M. (2019). Resilience on the seven seas: perspective-taking in anticipatory ship navigation. In *Proceedings of the 8th REA Symposium Embracing Resilience: Scaling Up and Speeding Up*, Kalmar, Sweden, 24–27.
10. Van Westrenen, F., Praetorius, G. (2014). Maritime traffic management: a need for central coordination? *Cognition, Technology & Work*, 16(1), 59–70.
11. Aven, T., Andersen, H. B., Cox, T., Droguett, E. L., Greenberg, M., Guikema, S., Kröger, W., Renn, O., Zio, E. (2015). Risk Analysis Foundations. *Soc. Risk Anal.*
12. Ayyub, B. M. (2015). Practical Resilience Metrics for Planning, Design, and Decision Making. *ASCE-ASME J. Risk Uncertain. Eng. Syst. Part Civ. Eng. I.* <https://doi.org/10.1061/AJRUA6.0000826>.
13. Ayyub, B. M. (2014). Systems resilience for multihazard environments: definition, metrics, and valuation for decision making. *Risk Anal. Off. Publ. Soc. Risk Anal.* 34, 340–355. <https://doi.org/10.1111/risa.12093>.

14. Smith, D., Veitch, B., Khan, F., Taylor, R. (2015). An Accident Model for Arctic Shipping, in: *Proceedings of the ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. Presented at the OMAE 2015, St. John's, NL, Canada.
15. Hollnagel, E. (2011). RAG – The resilience analysis grid. In *Resilience Engineering in Practice: A Guidebook*; Hollnagel, E., Paries, J., Woods, D. D., Wreathall, J., Eds.; Ashgate Pub Co.: Surrey, UK.
16. Jackson, S., Ferris, T. L. J. (2013). Resilience Principles for Engineered Systems. *Syst. Eng.*, 16, 152–164.
17. Jackson, S., Ferris, T. L. J. (2016). Designing Resilient Systems. In *Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Resilience-Based Approaches to Critical Infrastructures Safeguarding*, Azores, Portugal, 26–29 June 2016; 121–144.
18. Madni, A. M., Jackson, S. (2009). Towards a Conceptual Framework for Resilience Engineering. *IEEE Syst. J.*, 3, 181–191.
19. Woods, D.D. (2015). Four concepts for resilience and the implication for the future resilience. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 141, 5–9.
20. Sterbenz, J. P. G., Hutchison, D., Cetinkaya, E. K., Jabbar, A., Rohrer, J., Schöller, M., Smith, P. (2010). Resilience and survivability in communication networks: Strategies, principles, and survey of disciplines. *Comput. Netw.*, 54, 1245–1265.
21. Sterbenz, J. P. G., Hutchison, D., Cetinkaya, E. K., Jabbar, A., Rohrer, J., Schöller, M., Smith, P. (2014). Redundancy, diversity, and connectivity to achieve multilevel network resilience, survivability, and disruption tolerance. *Telecommun. Syst.*, 56, 17–31.
22. Cheng, Y., Todd Gardner, M., Li, J., May, R., Medhi, D., Sterbenz, J. P. G. (2014). Optimised heuristics for a geodiverse routing protocol. In *The 10th IEEE/IFIP international conference on Design of Reliable Communication Networks (DRCN)*, Ghent, Belgium.
23. Feller, V. (1984). *Vvedennia v teoriyu ymovirnostei ta yii zastosuvannia*. (Vols. 1–2). M.: Svit.
24. Heche, F. E. (2019). *Teoriia ymovirnostei i matematychna statystyka*. Uzhhorod: PP «AUTDOR-ShARK».

Abramov G. S., Plotnikov V. I. SIMULATION OF THE PROCESSES OF INCREASING THE RELIABILITY OF THE NAVIGATION COMPLEX WITH THE HELP OF DUPLICATION OF ITS ELEMENTS

The article discusses challenges in evaluating the stability of technical systems, primarily focusing on their reliability in terms of trouble-free operation. The aim of this study is to investigate and mathematically model the enhancement of reliability through different duplication schemes in navigation system components.

Various pressing issues related to enhancing the dependability of systems through duplicating their components were discussed. Different methods for duplicating system components were assessed and their mathematical representation was developed. Research has been conducted on the feasibility of substituting the reliabilities of elements in systems with varying levels of reliability with an average value.

It was found that duplicating each element in a system of equally reliable elements is a more effective way to improve reliability than duplicating the entire system. Additionally, if the primary reliability value of the elements is 0.85 or less, duplicating the entire system with each addition of duplicate elements will greatly decrease the system's reliability. Enhancing the system's reliability through duplicating elements with low primary reliability becomes more important when element reliability is below 0.85. Also, it has been demonstrated that this substitution results in slightly higher system reliability estimates, and is only logical when there is minimal variation in the reliability values of system elements. For high dispersion values, the system reliability calculation's relative error sharply increases by more than 10%.

An instance of substantially duplicating the least dependable components of the system is shown, resulting in a more than double increase in the overall reliability of the system. Future research should focus on utilizing the concept of full probability and Bayesian probabilities for related hypotheses.

Key words: duplication; reliability; probability of failure-free operation; navigation complex; modeling.

© Абрамов Г. С., Плотников В. І.

Статтю прийнято до редакції 21.09.2024