

*Богом'я В.І., Бажак О.В.*

## **МЕТОДИКА ПЛАНУВАННЯ ВИПРОБУВАНЬ ЗРАЗКІВ ОБЛАДНАННЯ ЗАСОБІВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА НА БЕЗВІДМОВНІСТЬ**

*Проаналізовані математичні моделі випробувань, що є співвідношення для визначення ймовірності влучення з початку координат в будь-яку досяжну точку з урахуванням форм областей відповідності і невідповідності контрольованих показників безвідмовності встановленим вимогам; співвідношення для визначення величин ризику споживача, середній тривалості випробувань і так далі.*

*Розроблені математичні моделі випробувань зразків обладнання засобів водного транспорту (ЗВТ) на безвідмовність узагальнюють відомі моделі випробувань технічних об'єктів за показником надійності типу "ймовірність" і "наробіток", та, на відміну моделей послідовних випробувань без урахування апріорної інформації і моделей одноступеневих випробувань з використанням байесовського підходу до обліку апріорної інформації, описують процес замкнутих випробувань будь-якого типу на безвідмовність з використанням байесовського підходу до обліку апріорної інформації про величину показників безвідмовності, накопичену за даними підконтрольної експлуатації зразків обладнання ЗВТ.*

*Дані моделі використовуються надалі при обґрунтуванні параметрів планів випробувань зразків обладнання ЗВТ з метою ухвалення рішень про відповідність (невідповідність) величин показників безвідмовності встановленим вимогам із заданою достовірністю, а у разі ухвалення рішення про відповідність – кількісної оцінки його величини із заданою точністю. Точкові оцінки показників безвідмовності зразків обладнання ЗВТ і їх дисперсії, розраховані за результатами випробувань на безвідмовність, використовуються надалі для побудови регресійної моделі зміни цих показників безвідмовності і обчислення оцінок показників залишкового ресурсу (терміну служби) зразків обладнання ЗВТ.*

***Ключові слова:** засоби водного транспорту, показники надійності, ймовірність, наробіток, планування випробувань, байесовський підхід, безвідмовність*

### **Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями**

Для вирішення задачі планування випробувань зразків обладнання ЗВТ на безвідмовність при заданій стратегії випробувань можливо тільки за наявності відповідних математичних моделей випробувань, що визначають функціональний зв'язок між параметрами плану випробувань [1, 2]. Тому необхідно провести аналіз загальних положень щодо розробки математичних моделей випробувань для визначення параметрів планів випробувань на безвідмовність і розробці методу планування випробувань зразків обладнання ЗВТ на безвідмовність.

При цьому необхідно розглянути характерні особливості контролю і оцінки показників безвідмовності зразків обладнання ЗВТ, проаналізувати методи обліку апріорної інформації і обґрунтувати доцільність застосування байесовських методів статистичного оцінювання безвідмовності.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми, і на які спирається автор, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.**

У науково-технічній літературі [3– 7] розглянуті різні способи об'єднання апріорної інформації і експериментальних даних, наприклад, метод лінійного об'єднання незміщених оцінок показників надійності подібних виробів, використання апріорних оцінок, отриманих з попередніх випробувань виробів-аналогів, регресійний метод лінійного об'єднання оцінок, оцінювання параметрів на основі об'єднання двох вибірок, байесовський підхід і інші. Застосування вищенаведених способів (окрім останнього) вимагає, щоб до моменту планування випробувань була відома так звана “модель перенесення інформації”, що визначає взаємозв'язок між параметрами подібних виробів.

Крім того, більшість цих способів орієнтована на оцінку надійності, а стосовно контролю надійності досліджені недостатньо повно. Якщо прийняти допущення про те, що зміна величини показника безвідмовності з моменту закінчення інтервалу експлуатації, що передує випробуванням на безвідмовність, до моменту завершення цих випробувань нехтуємо мало, а режими експлуатації і випробувань відповідають передбаченим експлуатаційною документацією для даних об'єктів, то результати експлуатації за відповідний інтервал і результати випробувань на безвідмовність можна вважати однорідними [4,5].

Для об'єднання однорідної інформації найбільш універсальним вважається байесовський спосіб обліку апріорної інформації [5, 7]. Тому застосування цього способу є найбільш доцільним з погляду вирішення завдань контролю і оцінки показників безвідмовності зразків обладнання ЗВТ при продовженні призначених ресурсів (термінів служби). Для застосування цього підходу статистична інформація про невідоме значення контрольованого (оцінюваного) показників безвідмовності представляється у вигляді деякого апріорного розподілу, його числових характеристик і так далі.

Оскільки величина конкретного показника безвідмовності невідома, вона формально може бути представлена у вигляді випадкової величини. При цьому апріорний розподіл відображає ступінь визначеності інформації про значення даного показника безвідмовності на початок випробувань [8, 9].

Загальна байесовська процедура оцінювання має такі різновиди як параметричне байесовське оцінювання (задано параметричне сімейство для розподілу випадкової величини), непараметричне байесовське оцінювання (розподіл випадкової величини невідомий або належить деякому класу розподілів), повна апріорна невизначеність (щільність апріорного розподілу показника безвідмовності відома повністю), часткова апріорна невизначеність (задана кінцева кількість обмежень, що накладаються на функціонали від апріорної щільності показника безвідмовності), емпіричне байесовське оцінювання (апріорний розподіл показника безвідмовності повністю невідомий).

#### **Формулювання цілей статті (постановка завдання)**

Метою статті є наведення особливостей розроблення імітаційної моделі процесу контрольних вимірювань технічних об'єктів на безвідмовність, яка використовується для оцінки спостережуваних ризиків і перевірки їх відповідності запланованим значенням при обґрунтуванні параметрів планів випробувань.

Крім того, необхідно обґрунтувати розроблення методу планування випробувань зразків обладнання ЗВТ на безвідмовність при відомих стратегіях випробувань, в якій використовуються розроблені в цьому розділі моделі випробувань.

**Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів**

Методика, що викладається нижче, базується на розроблених в підрозділі 2.1

загальних положеннях методу контролю і оцінки показників надійності зразків обладнання ЗВТ, розроблених в даному розділі математичних і імітаційної моделей випробувань, узагальненні і систематизації нормативно-технічної документації [7, 9, 12], науково-технічної літератури [5–10] по питаннях планування випробувань технічних виробів, контролю і оцінки їх показників надійності.

Розроблена методика розглядає питання планування випробувань зразків обладнання ЗВТ на безвідмовність при відомому типі плану випробувань, а саме: визначення параметрів планів випробувань вибраного типу і вибір оптимального плану випробувань відповідно до початкових даних, які є на момент планування. Положення розробленої методики визначають набір початкових даних, основні завдання, послідовність їх рішення, сукупність використовуваних моделей і вихідні дані методики [11].

Початкові дані. Для застосування методики передбачаються відомими: номенклатура нормованих показників безвідмовності зразків обладнання ЗВТ і їх гранично допустимі значення; стратегії (типи планів) випробувань за кожним показником безвідмовності; вимоги до точності і достовірності контролю і оцінки показників безвідмовності; обмеження, що накладаються на режими використання за призначенням (максимально допустима тривалість перебування у включеному стані, мінімальна тривалість перебування у вимкненому стані і інші); часові і (або) вартісні обмеження на проведення випробувань; результати контролю і оцінки показників безвідмовності зразків обладнання ЗВТ за інтервал підконтрольної експлуатації, передуючий випробуванням [12].

Область застосування методики. Методика призначена для обґрунтування величин параметрів планів випробувань зразків обладнання ЗВТ на безвідмовність, рішень, що проводяться з метою ухвалення, про відповідність (невідповідності) контрольованих показників безвідмовності встановленим вимогам і, у разі їх відповідності, кількісної оцінки величин цих показників із заданою точністю, за результатами підконтрольної експлуатації і випробувань на безвідмовність, які організуються при контролі граничного стану. Розроблена методика є складовою частиною методу контролю і оцінки показників надійності зразків обладнання ЗВТ при вирішенні завдань продовження призначених ресурсів (терміну служби) [13].

Етапи методики. У методиці планування випробувань зразків обладнання ЗВТ на безвідмовність можна виділити основні етапи (див. рис. 1).

1. Аналіз початкових даних: результатів підконтрольної експлуатації зразків обладнання ЗВТ за інтервал передуючий випробуванням; номенклатури контрольованих показників безвідмовності і їх гранично допустимі значень; вимог до достовірності і точності контролю та подальшої оцінки показників безвідмовності; обмежень, що накладаються на режими застосування за призначенням в процесі експлуатації (максимальна тривалість перебування у включеному стані, мінімальна тривалість перебування у вимкненому стані і таке інше) і інші (блоки 1 – 6) [14].

Зміст першого етапу методики, зокрема, обмеження, що накладаються на режими застосування зразків обладнання ЗВТ за призначенням, викладені в експлуатаційній документації відповідного об'єкту випробувань і наведені вище при аналізі зразків обладнання ЗВТ як об'єктів випробувань на надійність. Порядок уточнення номенклатури контрольованих показників безвідмовності, обґрунтування їх гранично допустимих значень, вимог до достовірності і точності контролю та подальшої оцінки показників безвідмовності викладені при розробці методу обґрунтування початкових характеристик для планування випробувань зразків обладнання ЗВТ на надійність. Суть аналізу початкових даних про результати підконтрольної експлуатації зразків обладнання ЗВТ за період передуючий випробуванням полягає у виключенні аномальних спостережень і

класифікації тих, що залишилися як таких, що характеризують безвідмовність в тому або іншому режимі застосування за призначенням, тобто віднесення спостережень до того або іншого контрольованого показника безвідмовності [15].

2. Розробка математичних моделей, що описують процес випробувань зразків обладнання ЗВТ за кожним показником безвідмовності (блок 7). Роботи цього етапу проводяться у разі, коли для заданого типу плану випробувань відсутні відомі математичні моделі випробувань.

3. Обґрунтування виду апріорних розподілів кожного з показників безвідмовності зразків обладнання ЗВТ і оцінки їх параметрів за результатами контролю і оцінки показників безвідмовності за період підконтрольної експлуатації, передуючий випробуванням (блоки 8, 9). В рамках цього етапу проводиться представлення результатів підконтрольної експлуатації зразків обладнання ЗВТ як результатів випробувань на безвідмовність з фіксованим об'ємом вибірки, визначення параметрів законів розподілу величин показників безвідмовності [10].

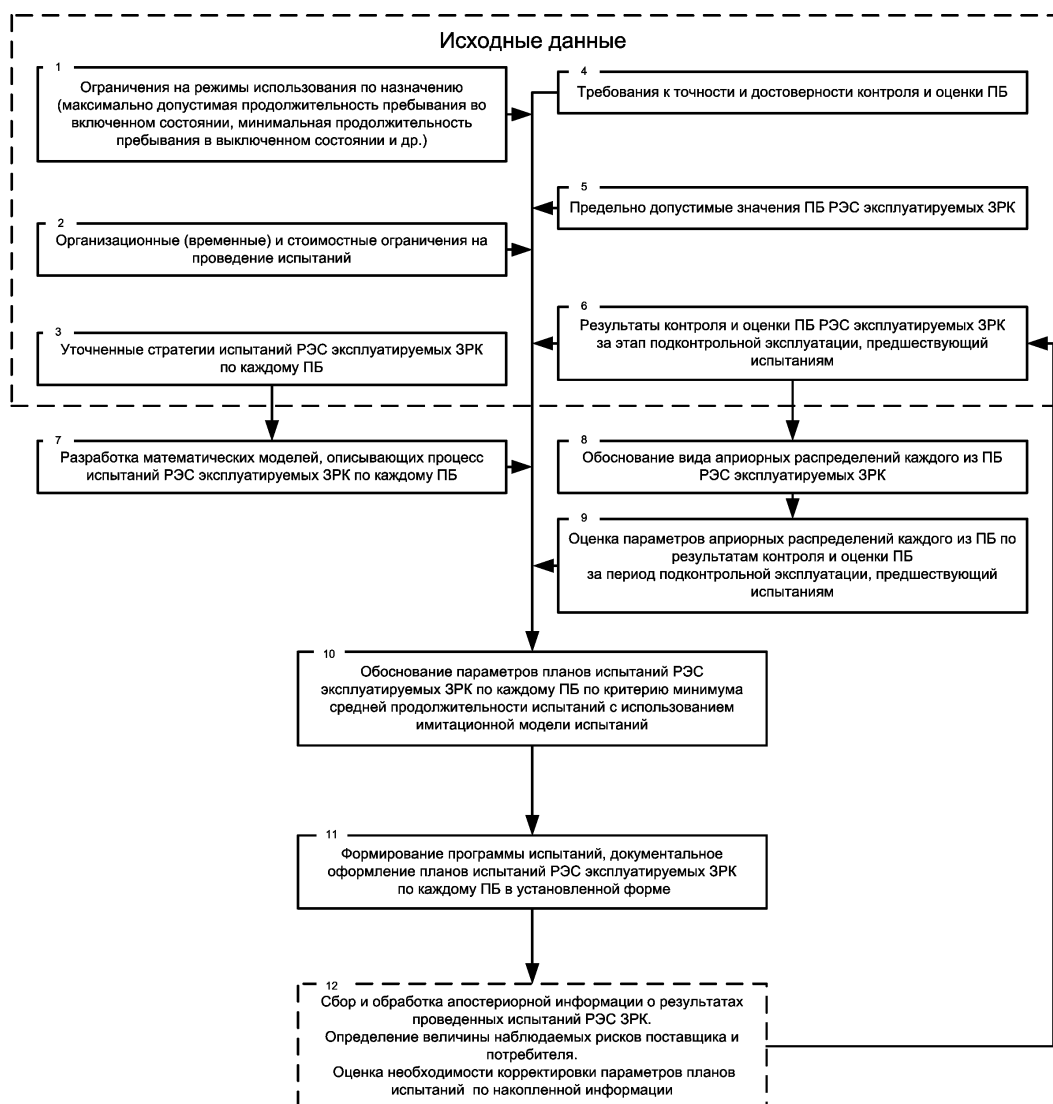


Рисунок 1 – Структурна схема методики планування випробувань зразків обладнання ЗВТ на безвідмовність при відомій стратегії (типі плану) випробувань

4. Обґрунтування параметрів планів випробувань зразків обладнання ЗВТ за кожним показником безвідмовності за критерієм мінімуму середньої тривалості випробувань з використанням розробленої імітаційної моделі випробувань (блоки 10, 11).

Класифікація конкретних точок в системі координат за приналежністю областям відповідності (невідповідності) контрольованого показника безвідмовності встановленим вимогам і визначення ймовірності припинення випробувань за ознакою влучення траєкторії послідовних випробувань на межу відповідних областей визначає безліч допустимих планів випробувань. При обґрунтуванні параметрів планів випробувань використовуються результати, приведені в [11–13], в яких показано, що для всіх послідовних критеріїв перевірки гіпотез сили  $(\alpha, \beta)$  той, у якого межі областей ухвалення рішень вибрані так, що ймовірність влучення траєкторії послідовних випробувань на ці межі при будь-якому числі відмов постійна і рівна деякому значенню  $q$ , забезпечує найбільші коефіцієнти довіри, що гарантуються, які дорівнюють  $(1-q)$  для найбільш точних довірчих меж. Крім того, передбачається корегування (при необхідності) параметрів планів випробувань на основі апріорної (на етапі планування) і (або) апостеріорної (після проведення випробувань) оцінки величин спостережуваних ризиків споживача і постачальника.

5. Документальне оформлення планів випробувань зразків обладнання ЗВТ по кожному показнику безвідмовності у встановленій формі (блок 12). При цьому оформляється підсумковий документ, що містить параметри оптимального плану випробувань, порядок і правила їх проведення і так далі [13].

Співвідношення для визначення ймовірності влучення графіка послідовних випробувань з початку координат в досягну точку з координатами  $(T; d_T)$  з урахуванням обмежень області блукань, що накладаються лініями приймання і бракування, може бути записано у вигляді

$$P_{T_0}(O; T, d_m) = Z(O; T, d_m) \times (T_0)^{-d_m} \times \exp\left(-\frac{T}{T_0}\right), \quad (1)$$

де  $Z(O; T, d_m)$  – функція, що описує кількість можливих траєкторій в області блукань, обмеженого лініями приймання і бракування, з початку координат  $(t, 0)$  в точку з координатами  $(T, dt)$ , яке для одноступеневої схеми випробувань дорівнює  $\frac{T^i}{(d_T)!}$  [14].

При багатоступневих і послідовних випробуваннях величина  $Z(O; T, d_m)$  може бути знайдена з використанням наступного співвідношення

$$Z(O; T, d_m) = \left[ \prod_{j=1}^m \sum_{i_j=Y(j)}^{H(j)-I(j)} \frac{(\mu_i)^{i_j}}{i_j!} \right] \times \frac{(T - T_{yn}(m))^{(d_m - I(j) - i_m)}}{(d_m - I(j) - i_m)!}, \quad (2)$$

а розрахункові співвідношення для визначення  $\hat{T}_0(i)$  і  $\hat{T}_0^2(i)$  значно спростяться

$$\hat{P}_{T_0}(i) = \frac{Z(t, 0; T(i), i)}{Z(O; T(i), i)}, \quad i > 0. \quad (3)$$

де  $Z(t, 0; T(i), i)$  – функція, що описує кількість можливих траєкторій в області блукань,

обмеженого лініями приймання і бракування, із точки з координатами (t,0) в точку з координатами (T(i), i) [15].

Співвідношення для визначення точкової оцінки середнього наробітку на відмову при прогоні має вигляд [9]

$$\hat{T}_o(i) = \int_0^{T(i)} \frac{Z(t,0;T(i),i)}{Z(O;T(i),i)} dt, i > 0. \quad (4)$$

Тоді співвідношення для обчислення дисперсії точкової оцінки середнього наробітку на відмову перетвориться до вигляду [11]

$$D[\hat{T}_o(i)] = 2 \int_0^{T(i)} t \frac{Z(t,0;T(i),i)}{Z(O;T(i),i)} dt - \left[ \int_0^{T(i)} \frac{Z(t,0;T(i),i)}{Z(O;T(i),i)} dt \right]^2. \quad (5)$$

Отриманими співвідношеннями (1)–(5) є математичні моделі випробувань зразків обладнання ЗВТ на безвідмовність за показником “середній наробіток на відмову”. Ці математичні моделі узагальнюють відомі моделі випробувань технічних об’єктів за показником надійності типу “наробіток” і в окремих випадках зводяться до них.

На відміну від моделей послідовних випробувань без урахування апріорної інформації і моделей одноступеневих випробувань з використанням байєсовського підходу до обліку апріорної інформації, розроблені математичні моделі описують процес замкнутих випробувань за показником надійності типу “наробіток” з використанням байєсовського підходу до обліку апріорної інформації про величину даного показника, накопичену за даними підконтрольної експлуатації зразків обладнання ЗВТ [7–11].

Дані моделі використовуються в подальшому при обґрунтуванні параметрів планів випробувань зразків обладнання ЗВТ з метою ухвалення рішень про відповідність (невідповідність) показників безвідмовності “середній наробіток на відмову” встановленим вимогам із заданою достовірністю, а у разі ухвалення рішення про відповідність кількісної оцінки його величини із заданою точністю.

Точкові оцінки середнього наробітку зразків обладнання ЗВТ на відмову і їх дисперсії, розраховані за результатами випробувань на тривалу безперервну роботу (прогін), використовуються надалі для побудови регресійної моделі зміни цього показника безвідмовності і обчислення оцінок показників залишкового ресурсу (терміну служби) зразків обладнання ЗВТ [12].

Таким чином, методика планування випробувань зразків обладнання ЗВТ на безвідмовність уточнює відомі аналогічні методики стосовно даного об’єкту випробувань. На відміну від відомих методик, що передбачають обґрунтування параметрів планів випробувань конкретного типу, дана методика дозволяє обґрунтовувати параметри замкнутих планів випробувань на безвідмовність будь-якого типу з урахуванням апріорної інформації про невідому величину контрольованого (оцінюваного) показника безвідмовності і, при необхідності, корегувати ці параметри на основі апріорної (на етапі планування) оцінки величини спостережуваних ризиків споживача і постачальника.

**Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямку.** 1. Розглянуті загальні положення щодо розроблення моделей випробувань зразків обладнання ЗВТ на безвідмовність включають обґрунтування доцільності застосування байєсовського підходу, що узгоджується з практикою проведення випробувань зразків обладнання ЗВТ на безвідмовність, для обліку апріорної інформації про невідому величину показника безвідмовності в припущенні, що з моменту завершення інтервалу підконтрольної експлуатації, що передував випробуванням і до їх закінчення зміною величин показників безвідмовності можна нехтувати, оскільки ця тривалість несутірно мала в порівнянні з терміном служби (ресурсом) об’єкту випробування.

2. Застосування розроблених математичних моделей випробувань не обмежується контролем безвідмовності за одним рівнем. Після незначного їх доопрацювання і корегування оптимізаційного завдання визначення параметрів планів випробувань ці моделі можуть бути застосовані і при контролі безвідмовності за двома рівнями.

3. Розроблена імітаційна модель процесів контрольних випробувань будь-якого типу (одноступеневих, багатоступеневих, послідовних і інші) виробів на надійність, яка конкретизує відомі методи і способи імітаційного моделювання стосовно нового об'єкту моделювання процесу контрольних випробувань технічних об'єктів на надійність. Застосування розробленої моделі дозволяє оцінювати величини спостережуваних ризиків на етапі планування та, у свою чергу, зіставляти їх із запланованими значеннями як для планів контрольних випробувань на надійність, приведених в нормативних документах, так і для тих, що розробляються. Результати даної перевірки використовуються при корегуванні (уточненні) параметрів планів контрольних випробувань на надійність, що, у свою чергу, дозволяє забезпечити прийнятну достовірність рішень, що приймаються за результатами випробувань.

4. Розроблена методика планування випробувань на безвідмовність уточнює відомі аналогічні методики стосовно зразків обладнання ЗВТ. На відміну від відомих методик, що передбачають обґрунтування параметрів планів випробувань конкретного типу, запропонована методика дозволяє обґрунтовувати параметри замкнутих планів випробувань на безвідмовність будь-якого типу з урахуванням апріорної інформації про невідому величину контрольованого (оцінюваного) показника безвідмовності і, при необхідності, корегувати ці параметри на основі апріорної (на етапі планування) оцінки величин спостережуваних ризиків споживача і постачальника.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Кравченко Ю.В. та ін. за ред. О.М. Тимошук. Моделювання та оптимізація інформаційних систем в судноводінні. Київ. ДУІТ. 2019. 312 с.
2. Богом'я В.І. та ін. Навігаційне забезпечення управління рухом суден. Київ .ДВВП «Компас». 2012. 336 с.
3. Національної доповіді про стан техногенної природної безпеки в Україні у 2013 році. URL:[http://www.mns.gov.ua/files/prognoz/report/2013/2\\_5.pdf](http://www.mns.gov.ua/files/prognoz/report/2013/2_5.pdf) (дата звернення 12.12.2018).
4. Нечаев Ю. И., Сизов В. Г. Принятие решений при управлении судном в экстремальных ситуациях на основе современной теории катастроф. Судовождение. 2010. Вып. 20. С. 130–142.
5. Богом'я В.І. та ін. ; за ред. О. М. Тимошук. Основи технічної експлуатації автоматизованої системи управління судном. Київ. ДУІТ. 2018. 305 с.
6. Богом'я В.І. та ін. ; за ред. О. М. Тимошук. Особливості системного підходу до вирішення наукових завдань експлуатації суднового обладнання. Київ. ДУІТ. 2018. 305 с.
7. Пятаков Э. Н. Требование к процедуре формирования второго уровня иерархической системы управления взаимодействием судов. Судовождение. Вып.13. 2007. С. 145 – 148.
8. Пліта Л.Л., Шевченко А.П., Дакі О.А. Особливості організації процесу експлуатації засобів річкового та морського транспорту. Новітні технології. 2019. Вип. 3(10). С. 6–12.

9. Пліта Л.Л., Богом'я В.І., Давидов В.С., Доронін В.В. Деякі питання підвищення безпеки мореплавства великотоннажних суден. Водний транспорт. 2020. Вип.3(31). С.67–73.
10. Абрамов О.В. Контроль и прогнозирование технического состояния систем ответственного назначения. Надежность и качество сложных систем. 2018. № 4 (24). С. 108–115.
11. Бенькович Е. С. Колесов Ю. Б., Сениченков Ю. Б. Практическое моделирование динамических систем: учебное пособие. Петербург, 2002. 464 с.
12. Вагущенко Л. Л., Цымбал Н. Н. Системы автоматического управления движением судна: учебное пособие. 3-е издание перераб.и доп. Одесса: Феникс, 2007. 376 с.
13. Вычужанин В.В., Рудниченко Н.Д. Технические риски сложных комплексов функционально взаимосвязанных структурных компонентов судовых энергетических установок. Вісник Одеського національного морського університету. 2014. № 2. С. 68–77.
14. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. URL: [https://dnaop.com/html/2273/doc\\_2860-94](https://dnaop.com/html/2273/doc_2860-94) (дата звернення: 03.07.2019).
15. Колесников А. В. Кириков И. А. Методология и технология решения сложных задач методами функциональных гибридных интеллектуальных систем. Москва: ИПИ РАН, 2007. 387 с.

**V.Bohomia, O. Bzhak**

#### **METHODS OF PLANNING TESTS OF SAMPLES OF EQUIPMENT OF WATER TRANSPORT VEHICLES FOR FAILURELESSNESS**

*Mathematical test models are analyzed, which is a ratio to determine the probability of hitting from the origin at any achievable point, taking into account the forms of areas of compliance and non-compliance of controlled indicators of failure to the established requirements; ratios to determine the magnitude of consumer risk, the average duration of the test and so on.*

*The developed mathematical models of tests of samples of equipment of water transport equipment (FTA) for failure generalize the known models of tests of technical objects on reliability indicators of type "probability" and "operating time", and, unlike models of consecutive tests without a priori information and models of one-stage tests. using the Bayesian approach to accounting for a priori information, describe the process of closed tests of any type for reliability using the Bayesian approach to accounting for a priori information on the value of failure rates accumulated according to the controlled operation of FTA equipment samples.*

*These models are further used to substantiate the parameters of test plans for samples of FTA equipment in order to decide on compliance (non-compliance) of failure rates with the established requirements with a given reliability, and in case of a decision on compliance - quantify its value with a given accuracy. Point estimates of failure rates of FTA equipment samples and their variances, calculated from the results of failure tests, are further used to build a regression model of changes in these failure rates and calculate estimates of residual life (service life) samples of FTA equipment samples.*

*Keywords: means of water transport, reliability indicators, probability, operating time, test planning, Bayesian approach, reliability*