

*Кривошей Ф.О., Моїсєєв В.Я., Кукалець Л.М., Сардак А.Г.*

## МЕТОД ПРОГНОЗУВАННЯ БЕЗВІДМОВНОСТІ АГРЕГАТІВ ТА СИСТЕМ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

*У статті запропоновано підхід статистичного оцінювання і прогнозування параметра потоку відмов агрегатів системи автоматичного управління суднових енергетичних установок за даними експлуатаційних спостережень. Це дозволяє сформулювати управління технічним станом агрегатів, що є суттєвим при вирішенні завдання забезпечення заданого рівня надійності складних систем даного типу.*

*Використання номограми для уточнення статистичних оцінок параметра потоку відмов дозволило побудувати часовий ряд значень даного показника у класичному вигляді, та виконати прогнозування показника з використанням комбінованої моделі авторегресії та проінтегрованого ковзаючого середнього.*

*У результаті прогнозу була виявлена нестационарність характеру функції параметра потоку відмов у залежності від наробітку, що може бути ознакою поступового старіння виробу.*

***Ключові слова:** суднові енергетичні установки, безвідмовність, функціонування, системи, агрегати, модель*

**Вступ.** Аналіз показав, що в сучасних умовах розвитку геодезії, впровадження новітніх технологій в експлуатацію агрегатів та систем сучасних геодезичних засобів вимірювань одним зі наважливих напрямків забезпечення заданого рівня безпеки є автоматизація управління агрегатами та системами. При розробленні та проектуванні автоматичних систем управління агрегатами та системами виникає необхідність розроблення методу прогнозування безвідмовності агрегатів та систем агрегатів та систем суднових енергетичних установок (СЕУ) за даними експлуатаційних спостережень.

Дослідження та аналіз існуючої теорії надійності дозволяють зробити висновок про недосконалість існуючих методів. Наукові дослідження, в цьому напрямку, мають важливе значення для аналітичного забезпечення управління технічним станом агрегатів систем автоматичного управління за рівнем надійності.

Відомо, що теорія надійності виникла як результат спроби розв'язання задач забезпечення заданого рівня надійності складних технічних систем. Вирішенню цих питань присвячена література [1-7], проте реалізація положень теорії надійності у кожному конкретному випадку вимагає удосконалення підходів та методів стосовно особливостей конкретної галузі застосування.

Метою статті є доведення результатів щодо розроблення методу прогнозування безвідмовності агрегатів та систем СЕУ за даними експлуатаційних спостережень.

### **Основна частина**

Для ілюстрації розробленої методики представимо її у вигляді наступної послідовності операцій з додатковим поясненням стосовно методів, способів та прийомів, передбачених даною методикою:

1. Збір статистичних даних про відмови та несправності агрегатів системи автоматичного управління СЕУ  $j$ -го типу, виявлених протягом  $i$ -го періоду експлуатації, підготовка вихідних даних для оцінювання параметра потоку відмов. Вихідними даними є:  $n_{\delta_{ij}}$  - фактична кількість відмов та несправностей агрегатів  $j$ -го типу, виявлених протягом  $i$ -го періоду

експлуатації (тривалістю 6 місяців);  $t_{\Sigma_i}$  - сумарний наробіток агрегатів системи автоматичного управління СЕУ протягом  $i$ -го періоду експлуатації;  $N_i$  – штатна чисельність СЕУ;  $a_j$  – кількість агрегатів системи автоматичного управління СЕУ  $j$ -го типу на одному судні;  $K_{c_i}$  - середній коефіцієнт справності СЕУ протягом  $i$ -го періоду експлуатації.

2. Визначення середнього наробітку  $\Delta t_i$  одного агрегату системи автоматичного управління СЕУ протягом  $i$ -го періоду експлуатації в умовах достовірних спостережень:

$$\Delta t_i = \frac{t_{\Sigma_i}}{N_i \cdot K_{c_i} \cdot a_j} \quad (1)$$

Визначення фактичного значення параметру потоку відмов  $\hat{z}_{\delta_{ij}}$  агрегатів системи автоматичного управління СЕУ  $j$ -го типу за  $i$ -й період експлуатації за виразом (2).

$$\hat{z}_{\delta_{ij}} = \hat{z}_{\delta_{ij}}(t, \Delta t) = \frac{n_{\delta_{ij}}(t, \Delta t)}{t_{\Sigma_i} \cdot \hat{E}_{\bar{n}_i}} = \frac{n_{\delta_{ij}}(t, \Delta t)}{N_i(t, \Delta t) \cdot a \cdot \Delta t_i \cdot K_{c_i}} \quad (2)$$

де  $n_{\delta_{ij}}(t, \Delta t)$  - фактична кількість відмов та несправностей за  $i$ -й контрольний період експлуатації, од.;  $t_{\Sigma_i}$  - сумарний наробіток за період, год.;  $N_i(t, \Delta t)$  - штатна чисельність суден, од.;  $a$  – кількість однотипних виробів на одному судні, од.;  $\Delta t_i$  - середній наробіток одного виробу за період, год.;  $\hat{E}_{\bar{n}_i}$  - середній коефіцієнт справності даного типу суден за період [1].

Використання виразу (1) у даному випадку відповідає непараметричним методам оцінювання, що застосовуються за умов відсутності апріорної інформації про вид закону розподілу наробітку на відмову агрегатів САУ СЕУ.

4. Перевіряється виконання умови  $\Delta t_i = 50 \text{ год}$ . За 6 місяців експлуатації.

5. У випадку, коли  $\Delta t_i \neq 50 \text{ год}$ ., визначається приведені значення оцінки параметру потоку відмов  $\hat{z}_{\delta_{ij}}^{i\delta}$  агрегатів САУ СЕУ  $j$ -го типу за  $i$ -й період експлуатації для умов  $\Delta t_i = 50 \text{ год}$ .

Визначення приведеного значення  $\hat{z}_{\delta_{ij}}^{i\delta}$  здійснюється за номограмою побудованою за результатами імітаційного моделювання.

Статистична імітаційна модель була використана для проведення багатофакторного машинного експерименту з метою кількісного оцінювання впливу на характеристики процесу технічної експлуатації (ПТЕ) наступних факторів:

інтенсивності експлуатації  $K_I$ ;

параметру потоку відмов агрегату СЕУ  $z$ ,  $\text{год}^{-1}$ ;

календарних термінів проведення періодичного обслуговування  $\tau_{\text{ПО}}$ ,  $\text{год}$ .;

календарних термінів проведення робіт зі зберігання  $\tau_{\text{збер.}}$ ,  $\text{год}$ .

З обраних параметрів  $x_p$ ,  $p = \overline{1, 4}$  ( $x_1 = K_I$ ,  $x_2 = z$ ,  $x_3 = \tau_{\text{ПО}}$ ,  $x_4 = \tau_{\text{збер.}}$ ) утворимо вектор контрольованих входів  $\bar{X} = \|x_1, x_2, x_3, x_4\|^T$  для побудованої імітаційної моделі, які називають факторами [2].

Вектор  $\bar{O}$  являє собою точку у просторі змінних  $x_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, p$  (у факторному просторі). Проведемо експеримент з побудованою моделлю, змінюючи на свій розсуд значення (рівні) обраних факторів.

Позначимо:  $i$ -номер досліду ( $i=1, 2, \dots, N$ );  $\bar{x}_i = \|\|x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, x_{i4}\|\|$  - комплекс умов  $i$ -го досліду,  $x_{ij}$  – рівень  $j$ -го фактору в  $i$ -му досліді.

Параметри, що розраховуються під час моделювання, утворюють вектор характеристик  $Y^{<R>}(T)$ , компоненти якого  $y_r(T)$  ( $r = \overline{1, 13}$ ) у свою чергу є скалярними величинами. Складемо план експерименту з побудованою імітаційною моделлю ПТЕ агрегату САУ СЕУ. План експерименту являє собою набір координат точок в обраному факторному просторі ( $x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{1p}$ ), ( $x_{21}, x_{22}, x_{23}, x_{2p}$ ), ( $x_{n1}, x_{n2}, x_{n3}, x_{np}$ ), у яких будуть проведені досліді.

Якщо досліджується  $p$  факторів і  $j$ -й фактор має  $q$  рівнів, то число комбінацій рівнів факторів буде дорівнювати  $N=q_1 \cdot q_2 \cdot \dots \cdot q_p$ . При великому числі факторів  $p$  та рівнів (значень) квантування кожного з них  $q_j$  застосовуються насичені та наднасичені плани проведення імітаційних експериментів.

У зв'язку з тим, що загальне число факторів, що досліджуються,  $p < 5$ , складемо план повного факторного експерименту (ПФЕ). Відомо [3], що повний факторний експеримент полягає у реалізації усіх можливих комбінацій  $p$ -факторів на  $q$ -рівнях кожний.

В якості центра плану був обраний набір координат точок факторного простору, що відповідає реальному ПТЕ:

$$\bar{x}_0 = \|\| K_I = 0, 0016, z = 6, 82 \cdot 10^{-3} \text{ год.}^{-1}, \tau_{\text{ПО}} = 68 \text{ год.}, \tau_{\text{збер.}} = 720 \text{ год.} \|\| \quad (3)$$

У результаті здійснення приведеного вище плану експериментів з розробленою імітаційною моделлю була отримана матриця спостережень розмірністю  $[(r + p) \times 3888]$ , де  $r = \overline{1, 13}$ ;  $p = \overline{1, 4}$ . Елементами матриці спостережень є:  $x_{ji}$  – значення  $j$ -го фактора ( $j = \overline{1, p}$ ) в  $i$ -му досліді,  $y_{ri}$  – значення  $r$ -ї характеристики ПТЕ в  $i$ -му досліді, де  $N = 3888$  – кількість дослідів,  $p = 4$  – кількість факторів.

При проведенні аналізу результатів експерименту було виявлено наявність залежності між факторами  $K_I$  та  $z$ . Згідно прийнятих методів визначення параметру потоку відмов агрегатів, при незмінних значеннях параметру потоку відмов, що відображує закладений при розробці та забезпечений при виробництві рівень безвідмовності [6].

За результатами експерименту було побудовано номограму для визначення параметру потоку відмов  $z$  агрегатів САУ СЕУ (рис. 1).

Необхідність визначення  $\hat{z}_{\delta_{ij}}^{i\delta}$  для умов  $\Delta t_i = 50 \text{ год.}$  За 6 місяців експлуатації обумовлена наступним: у випадку  $\Delta t_i < 50 \text{ год.}$  За 6 місяців експлуатації, необхідно враховувати вплив інтенсивності експлуатації на статистичну оцінку параметра потоку відмов, про що свідчать результати імітаційного моделювання; у випадку  $\Delta t_i > 50 \text{ год.}$  За 6 місяців експлуатації, вплив інтенсивності експлуатації на статистичну оцінку параметра потоку відмов не є суттєвим, але здійснення прогнозу параметра потоку відмов за допомогою методів статистичного аналізу часових рядів передбачає аналіз часового ряду, побудованого через однакові інтервали часу (наробітку)  $\Delta t_i$ .

6. Здійснюється побудова та попередній аналіз часового ряду значень оцінки параметру потоку відмов  $\hat{z}_{\delta_{ij}}$  (або  $\hat{z}_{\delta_{ij}}^{i\delta}$ ). Необхідними етапами попереднього аналізу є перевірка статистичних гіпотез: гіпотези про наявність тренду, гіпотези про нормальність розподілу значень оцінки параметру потоку відмов  $\hat{z}_{\delta_{ij}}$  (або  $\hat{z}_{\delta_{ij}}^{i\delta}$ ).

7. Здійснюється ідентифікація та оцінка параметрів моделі авторегресії та ковзаючого середнього часового ряду  $\hat{z}_{\delta_{ij}}^{i\delta}$ , перевірка адекватності підбраної моделі. Для ідентифікації параметрів моделі застосовуються методи аналізу автокореляційної та часткової автокореляційної функцій часового ряду. Оцінка параметрів моделі здійснюється за допомогою методів зважених найменших квадратів для лінійних моделей, та методами максимізації правдоподібності для нелінійних моделей.

8. Здійснення прогнозу часового ряду  $\hat{z}_{\delta_{ij}}$ , визначення заданого значення параметра потоку відмов  $\hat{z}_{\delta_{ij}}$  агрегатів  $j$ -го типу для  $(i+1)$ -го періоду експлуатації за результатами прогнозування.

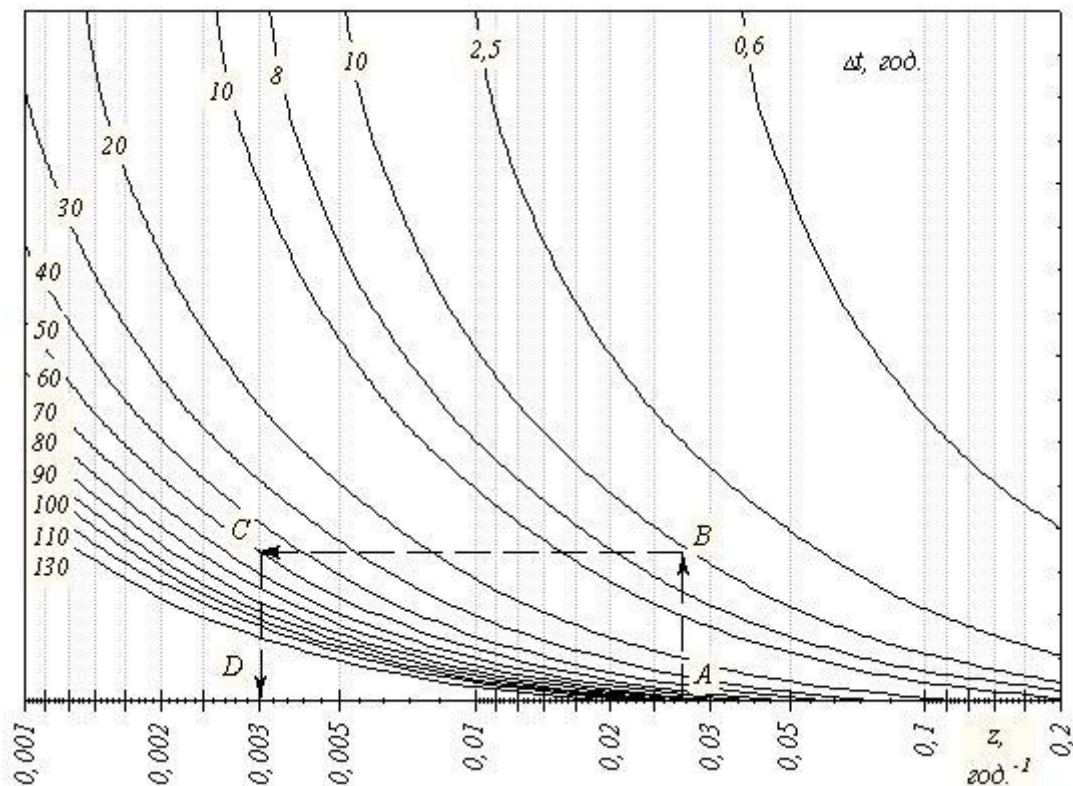


Рисунок 1 – Номограма залежності параметру потоку відмов агрегатів САУ СЕУ від наробітку за період експлуатації

### Висновки

Запропонований підхід статистичного оцінювання і прогнозування параметра потоку відмов агрегатів системи автоматичного управління СЕУ за даними експлуатаційних спостережень дозволяє сформулювати управління технічним станом агрегатів, що є суттєвим при вирішенні завдання забезпечення заданого рівня надійності складних систем даного типу.

Використання номограми для уточнення статистичних оцінок параметра потоку відмов дозволило побудувати часовий ряд значень даного показника у класичному вигляді, та виконати прогнозування показника з використанням комбінованої моделі авторегресії та проінтегрованого ковзаючого середнього. У результаті прогнозу була виявлена нестационарність характеру функції параметра потоку відмов у залежності від наробітку, що може бути ознакою поступового старіння виробу.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Барлоу Р. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность / Р. Барлоу, Ф. Прошан ; пер. С англ. И. А. Ушакова. – М.: Наука, 1985. – 328 с.
2. Диллон Б. Инженерные методы обеспечения надежности систем / Б. Диллон, Ч. Сингх; пер. С англ. Е.Г. Коваленко. – М.: Мир, 1984. – 318 с.
3. Гнеденко Б.В. Математические методы в теории надежности / Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. – М.: Наука, 1965. – 524 с. – (Серия: “Физико-математическая библиотека инженера”).

- 
4. Анализ надёжности технических систем по цензурированным выборкам / [Скрипник В.М., Назин А.Е., Приходько Ю.Г., Благовещенский Ю.Н.]. – М.: Радио и связь, 1988. – 184 с.
  5. Шор Я.Б. Статистические методы анализа и контроля качества и надёжности / Яков Борисович Шор. – Издательство “Советское Радио”, 1962. – 552 с.
  6. Справочник по теории вероятностей и математической статистике / [В.С.Королюк, Н.И.Портенко, А.В.Скороход, А.Ф.Турбин]. – М.: Наука, 1985. – 640 с.
  7. Павленко А.Г. Алгоритм статистичного контролю надійності бортового обладнання літальних апаратів військового призначення при нестабільних умовах спостережень/ Павленко А.Г., Соловійов В.І., Хижун В.В. // Тези доповідей та виступів на наук. – практ. Конф. “Актуальні проблеми розвитку авіаційної техніки”. – К.: ДНДІА України, 2011. – С. 81.

**Кривошей Ф.А., Моисеев В.Я., Кукалец Л.М., Сардак А.Г.**

#### **МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ БЕЗОТКАЗНОСТИ АГРЕГАТОВ И СИСТЕМ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

*В статье предложен подход статистического оценивания и прогнозирования параметра потока отказов агрегатов системы автоматического управления судовых энергетических установок по данным эксплуатационных наблюдений. Это позволяет сформировать управления техническим состоянием агрегатов, является существенным при решении задачи обеспечения заданного уровня надежности сложных систем данного типа.*

*Использование номограммы для уточнения статистических оценок параметра потока отказов позволило построить временной ряд значений данного показателя в классическом виде, и выполнить прогнозирования показателя с использованием комбинированной модели авторегрессии и проинтегрирована скользящего среднего.*

*В результате прогноза была обнаружена нестационарность характера функции параметра потока отказов в зависимости от наработки, что может быть признаком постепенного старения изделия.*

**Ключевые слова:** судовые энергетических установки, безотказности, функционирования, системы, агрегаты, модель

**Krivoshey F.O., Moiseyev V.Ya., Kukalets L.M., Sardak A.G.**

#### **METHOD OF FORECASTING THE UNCERTAINTY OF ANALYSIS AND SYSTEMS OF VESSELS OF ENERGY INSTALLATIONS**

*In the article the approach of statistical estimation and forecasting of the parameter of the failure of the units of the automatic control system of ship power plants according to the operational observation data is proposed. This allows us to form the management of the technical state of the aggregates, which is essential in solving the problem of providing a given level of reliability of complex systems of this type.*

*The use of nomograms to refine the statistical estimates of the bounce flow parameter made it possible to construct a time series of values of this indicator in the classical form, and to perform the forecasting of the indicator using the combined autoregressive model and the integrated sliding average.*

*As a result of the forecast, the non-stationary nature of the function of the parameter of the flow of failures was detected, depending on the work, which may be a sign of the gradual aging of the product.*

**Key words:** marine energy installations, faultlessness, functioning, systems, units, model.