

Іванович В.В., Льїн О.Ю., Кучерук С.М.

ПРОГНОЗУВАННЯ БЕЗВІДМОВНОСТІ ОБЛАДНАННЯ ЗАСОБІВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ МЕТОДАМИ СТАТИСТИЧНОГО АНАЛІЗУ ЧАСОВИХ РЯДІВ

Стаття присвячена проблемі переведення засобів водного транспорту на експлуатацію за технічним станом. Запропоновано підхід до прогнозування безвідмовності обладнання засобів водного транспорту у процесі експлуатації. Даний підхід базується на використанні методів статистичного аналізу часових рядів. Наведено результати прогнозування параметра потоку відмов з використанням комбінованої моделі авторегресії та ковзаючого середнього.

Ключові слова: *засоби водного транспорту, безвідмовність, параметр потоку відмов, авто регресія, ковзаюче середнє*

Постановка проблеми. Ефективність функціонування складних технічних систем (СТС) як відомо, визначається, поряд з іншими факторами, технічним станом СТС та їх елементів. До класу СТС відноситься також і засоби водного транспорту (ЗВТ), однією з компонентів якого є бортове обладнання.

Необхідність визначення технічного стану таких систем в процесі експлуатації з метою підтримання справності та готовності до застосування, значно зросла за останні двадцять років у зв'язку з вичерпанням календарних термінів експлуатації ЗВТ радянського виробництва, та жорстким обмеженням фінансових можливостей виконання капітальних ремонтів. Одним з перспективних шляхів розвитку та удосконалення технічної експлуатації ЗВТ є перехід на експлуатацію за технічним станом. Це у свою чергу передбачає вирішення широкого кола наукових та практичних завдань, серед яких є удосконалення методів та засобів контролю технічного стану ЗВТ та їх елементів [1].

Відомо, що ознаками технічного стану системи можуть бути: значення наробітку або терміну служби, значення відповідних діагностичних параметрів та значення показників надійності (безвідмовності) [2]. Конструкція багатьох типів ЗВТ передбачає використання відповідного діагностичного обладнання в умовах експлуатації тільки для обмеженої кількості елементів, що призводить до необхідності використання результатів статистичного контролю надійності. Основною метою контролю надійності в сучасних умовах експлуатації є своєчасне виявлення моментів виникнення деградаційних процесів, обумовлених дією різноманітних факторів. Моменти початку процесів деградації є випадковими та індивідуальними для кожного типу обладнання ЗВТ, що вносить певну долю невизначеності стосовно термінів безпечної та ефективної експлуатації.

Контроль надійності (безвідмовності) передбачає використання деякого нормативного значення (допуску) відповідного показника, яке, у свою чергу, доцільно визначати за результатами прогнозування.

Практика експлуатації окремих типів водного транспорту свідчить про невідповідність прийнятого підходу до контролю рівня надійності умовам експлуатації ЗВТ. Підхід, що існує, заснований на порівняльному аналізі експлуатаційних даних про відмови та несправності з відповідними даними за попередні періоди експлуатації. Це не дозволяє зробити якісні висновки про фактичний рівень надійності виробів по відношенню до її певного граничного рівня. Окрім того, існуючий підхід не передбачає прогнозування відповідного показника.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У науково – технічній літературі [3, 6-8] достатньо добре описані як методи прогнозування, що засновані на моделюванні досліджуваних процесів, так і методи екстраполяції наявної інформації. Серед найбільш поширених методів прогнозування є метод групового врахування аргументів, нейромережеве прогнозування, методи, що засновані на використанні апарату теорії статистичного розпізнавання образів, факторного аналізу тощо. Більшість зазначених методів передбачають підбір моделі прогнозу за допомогою процедур самонавчання з урахуванням декількох факторів (вхідних змінних моделі). Складність використання даних методів в процесі експлуатації обумовлена обмеженістю можливостей отримання статистичної вибірки, що навчає, за багатьма факторами. Окрім цього, зазначені методи є досить трудомісткими, що знижує оперативність прогнозу. Тому, дані методи більшою мірою пристосовані для вирішення завдань наукових досліджень, ніж до умов експлуатації ЗВТ.

З іншого боку, найбільш простим та зручним для застосування є метод лінійної регресії, що є одним з методів екстраполяції. Але, застосування даного методу пов'язане з великою помилкою прогнозу (20-30%). Зниження помилки прогнозу при достатній оперативності та зручності процедури прогнозування, що є досить важливим для умов експлуатації ЗВТ, можна досягти при використанні методів статистичного аналізу часових рядів.

Постановка завдання та його вирішення. Виходячи з викладених обставин, завдання, що підлягає вирішенню, полягає в удосконаленні процедури прогнозування безвідмовності бортового обладнання літальних апаратів у процесі експлуатації. Підхід, що пропонується, базується на використанні методів статистичного аналізу часових рядів. Більшість методів аналізу часових рядів реалізовані у статистичних пакетах типу SAS, SUSTAT, SPSS, STSC, Statistika, Minitab, WinSTAT, STADIA, ЭВРИСТА, ОЛИМП та Excel [9].

Застосування запропонованого методу проілюструємо на статистичних даних про відмови та несправності блоку логіки системи бортового контролю суден з 2005 по 2012 рік (табл. 1).

Оцінка фактичного значення параметру потоку відмов за i -й контрольний період (півріччя) експлуатації визначається за формулою

$$\hat{z}_{\phi_i} = \frac{n_{\phi_i}}{t_{\Sigma_i} \cdot a}, \quad (1)$$

де n_{ϕ_i} – фактична кількість відмов та несправностей за i -й контрольний період експлуатації, од.; t_{Σ_i} – сумарний наліт парку ЗВТ за період, год.; a – кількість однотипних виробів на одному ЗВТ, од.;

Таблиця 1

Значення параметру потоку відмов за періодами експлуатації

період	2005, I	2005, II	2006, I	2006, II	2007, I	2007, II	2008, I	2008, II
$\hat{z}_{\phi_i}, \text{год.}^{-1}$	0,0012	0,0012	0,001	0,0015	0,0015	0,0016	0,0016	0,0013
період	2009, I	2009, II	2010, I	2010, II	2011, I	2011, II	2012, I	2012, II
$\hat{z}_{\phi_i}, \text{год.}^{-1}$	0,0016	0,0017	0,0012	0,0015	0,0019	0,0019	0,0014	0,0022

Графік часового ряду за даними табл. 1 наведений на рис. 1.

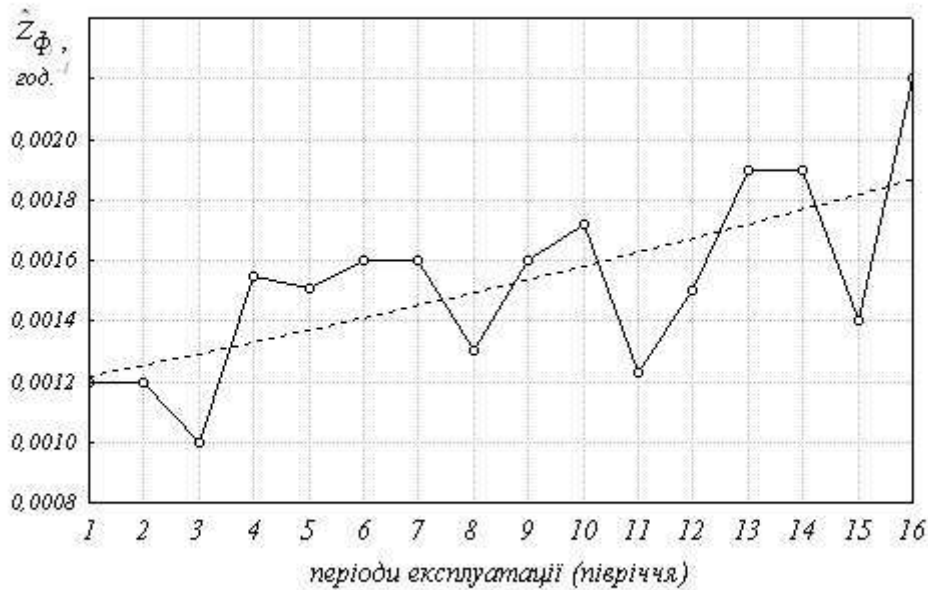


Рис.1. Графік часового ряду оцінки \hat{Z}_{ϕ} .

Послідовність вирішення задачі прогнозування є наступною: визначення типу теоретичного розподілу часового ряду; побудова графіка і цензурування або вінзоризація часового ряду; перевірка гіпотези про наявність тренда; аналіз корелограм та періодограми часового ряду; ідентифікація моделі часового ряду; виконання прогнозування і перевірка адекватності моделі [10].

Обробка даних таблиці 1 за вказаною послідовністю дозволила обрати модель часового ряду з класу моделей ARIMA (Autoregression and Integrated Moving Average) та визначити параметри моделі.

Модель ARIMA (АРПКС – авторегресії та проінтегрованого ковзаючого середнього) передбачає моделювання двох видів процесів: процесу авторегресії і процесу ковзаючого середнього [4, 5, 8]. У загальному вигляді модель авторегресії та ковзаючого середнього описується рівнянням:

$$\sum_{j=0}^q \phi(j)x(n-j) = \sum_{k=0}^s \mu(k)\varepsilon(n-k), \quad (2)$$

де $x(n)$ - значення випадкової величини x , що відповідає n - му спостереженню; $x(n-j)$ - значення випадкової величини x , що відповідають попереднім j спостереженням ($j = \overline{0, q}$; $q=1, 2, 3, \dots$); $\phi(j)$ - параметри авторегресії; $\varepsilon(n)$ - значення випадкової складової, що відповідає n - му спостереженню випадкової величини x ; $\varepsilon(n-k)$ - значення випадкової складової, що відповідають попереднім k спостереженням ($k = \overline{0, s}$; $s=1, 2, 3, \dots$) випадкової величини x ; $\mu(k)$ - параметри ковзаючого середнього.

Якщо $s=0$, то вираз (2) є рівнянням авторегресії. В цьому рівнянні кожне спостереження є лінійною комбінацією попередніх спостережень. У випадку, якщо $q = 0$, то вираз (2) є рівнянням ковзаючого середнього, а поточне спостереження є лінійною комбінацією випадкових впливів у попередні моменти часу.

Загальна модель, запропонована Боксом і Дженкінсом, включає як параметри авторегресії так і параметри ковзаючого середнього, а саме, є три типи параметрів моделі: параметри авторегресії (p), порядок різниці (d), параметри ковзаючого середнього (q).

При проведенні аналізу часового ряду (рис.1) було виявлено його нестационарність, що може бути ознакою поступового старіння виробу. Для здійснення прогнозу вихідний ряд був приведений до стаціонарного шляхом однократного диференціювання (взяття кінцевих різниць). Після прогнозу одержаного стаціонарного процесу було виконано однократне підсумовування (інтегрування) для відновлення характеру зміни вихідного ряду. Підібрана модель ARIMA (1,1,1) має параметри: $p=1$, $d=1$, $q=1$, що означає наявність у складі моделі одного параметру авторегресії, одного параметру ковзаючого середнього, та проведення однократного диференціювання вихідного ряду.

Графіки результатів прогнозування диференційованого та проінтегрованого рядів представлені на рис. 2, 3.

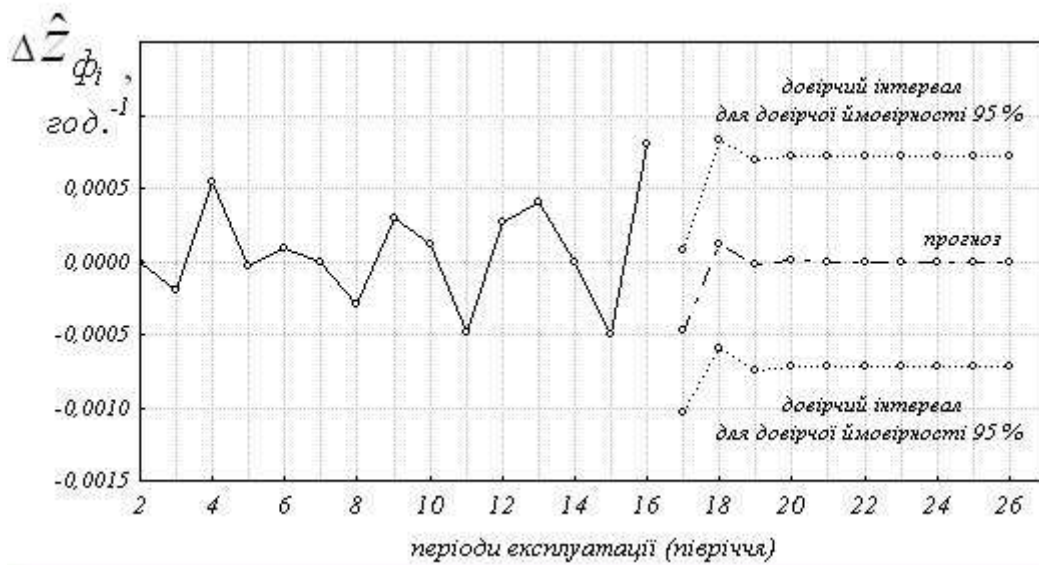


Рис. 2. Графік прогнозу значень $\Delta \hat{z}_{\phi_i}$ для диференційованого ряду

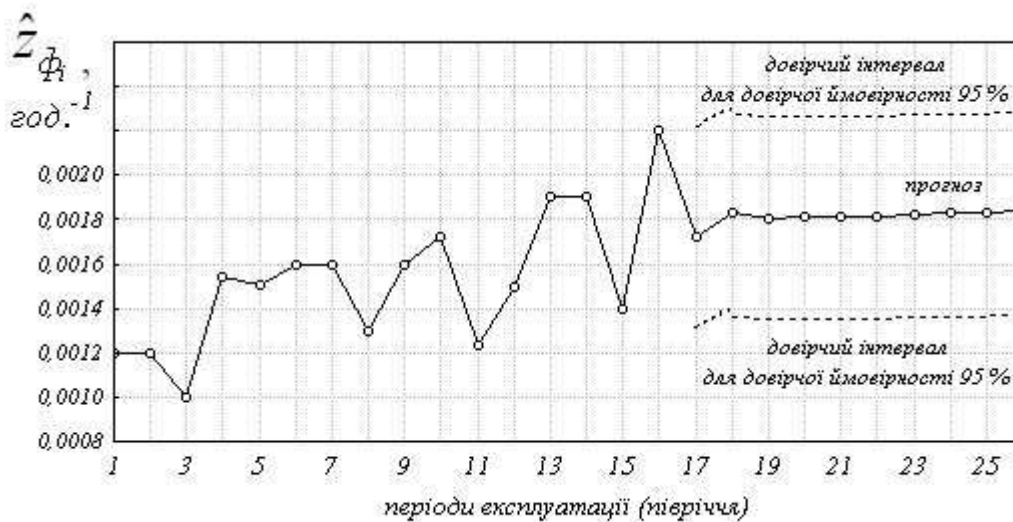


Рис. 3. Графік прогнозу значень \hat{z}_{ϕ_i} для вихідного ряду

Далі, була перевірена адекватність підбраної моделі. Необхідною (але недостатньою) умовою адекватності моделі є виконання вимоги обмеження коефіцієнтів p -value, що характеризують рівень довіри до обчислених параметрів моделі, величинами 0,05...0,1 [9, 10]. Це відповідає рівню довіри не менше, ніж 95...90% відповідно. Для підбраної моделі коефіцієнт p -value менше, ніж 0,05, що свідчить про відповідність моделі сформульованій вимозі.

Подальший аналіз пов'язаний з дослідженням залишків, які представляють собою різниці значень, що спостерігались, та прогнозних значень. Для правильно обраної моделі характер зміни залишків схожий на білий шум: відсутні періодичні коливання, систематичні зміщення та сильні кореляції. Наявність або відсутність цих ознак перевіряється шляхом аналізу автокореляційної та часткової автокореляційної функції залишків (рис. 4, 5). Наявність значень автокореляційних функцій, що виходять за межі 95% довірчих границь, буде свідчити про неадекватність моделі.

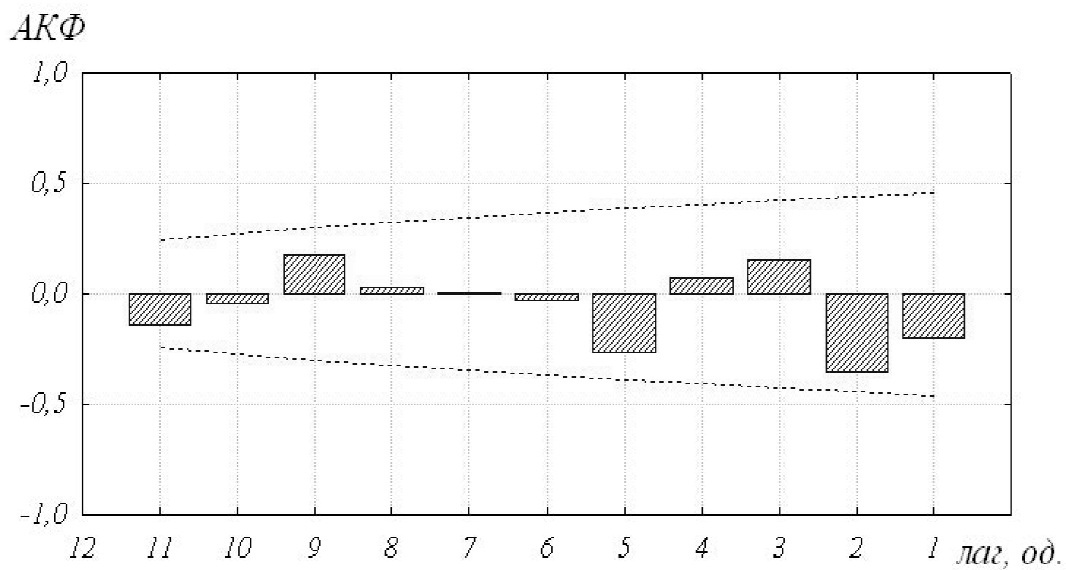


Рис. 4. Графік автокореляційної функції залишків часового ряду

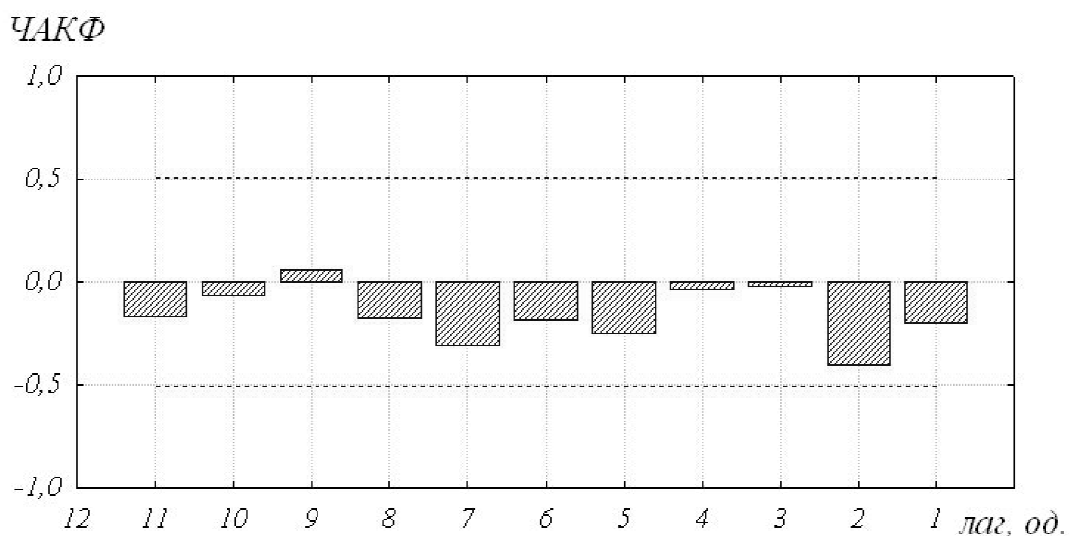


Рис. 5. Графік часткової автокореляційної функції залишків часового ряду

З графіків на рис. 4, 5 видно, що отримані оцінки лежать всередині довірчого інтервалу для нульових значень функцій, тому немає підстави вважати залишки корельованими.

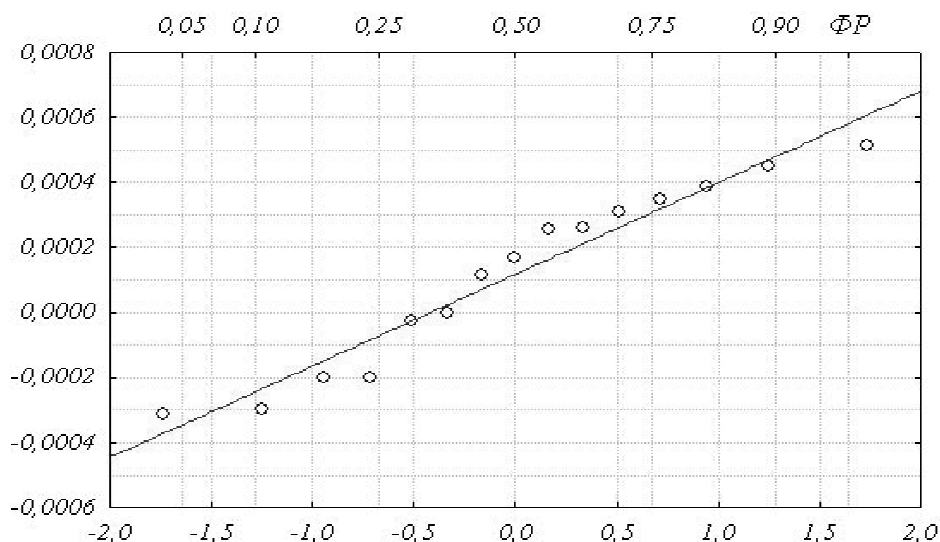


Рис. 6. Графік квантіль-квантіль залишків часового ряду

Далі перевіряється остання умова адекватності моделі: залишки повинні бути розподілені за нормальним законом. Для перевірки цієї умови можна використати графіки квантіль-квантіль [7, 8]. Для часового ряду, що аналізується, відповідний графік представлений на рис. 6.

Таким чином, визначене за допомогою запропонованої процедури прогнозне значення параметру потоку відмов може бути використано в якості нормативного значення показника безвідмовності при подальшому здійсненні статистичного контролю надійності (безвідмовності) обладнання ЗВТ. Окрім цього, застосування даної процедури дозволить визначати тенденцію зміни параметра потоку відмов бортового обладнання, виявляти процеси старіння за статистичними даними, що отримуються у процесі експлуатації.

Висновки: Підхід, що запропонований для прогнозування безвідмовності обладнання ЗВТ в процесі експлуатації, ґрунтується на статистичному аналізі часових рядів з використанням моделей класу авторегресії та проінтегрованого ковзаючого середнього.

Результати прогнозування можуть бути використані при проведенні статистичного контролю надійності (безвідмовності) обладнання ЗВТ з метою підтримки прийняття обґрунтованих рішень щодо продовження експлуатації бортового обладнання ЗВТ поза межами встановлених термінів служби.

ЛІТЕРАТУРА

1. Рабочая книга по прогнозированию / [Араб-Оглы Э.А., Бестужев-Лада И.В., Гаврилов Н.Ф. и др.]; под ред. И.В. Бестужева-Лады. – М.: Мысль, 1982. – 430 с.
2. Хеннан Э. Многомерные временные ряды / Э. Дж. Хеннан; пер. с англ. А.С. Холево. – М.: “Мир”, 1974. – 576 с.
3. Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов / Т. Андерсон; пер. с англ. И.Г. Журбенко и В.П. Носко. – М.: “Мир”, 1976. – 756 с.
4. Гаскаров Д.В. Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры / Гаскаров Д.В., Голинкевич Т.А., Мозгалеvский А.В. – М.: “Советское радио”, 1974. – 224 с.
5. Абрамов О.В., Розенбаум А.Н. Прогнозирование состояния технических систем / О.В. Абрамов, А.Н. Розенбаум. – М.: Наука, 1990. – 126 с.
6. Журбенко И.Г. Стохастическое моделирование процессов / И.Г. Журбенко, И.А. Кожевникова. – М.: Издательство МГУ, 1990. – 148 с.

7. Тюрин Ю.П., Макаров А.А. Анализ данных на компьютере / Ю.П. Тюрин, А.А. Макаров. – М.: “Инфра-М”, 2003. – 544 с.
8. Боровиков В. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: для профессионалов / Боровиков В. – СПб.: Питер, 2003. – 688 с.

УДК 621.311.25.002.5.019

Свиридов В.И.

РАЗРАБОТКА СПОСОБА ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СУДОВЫХ НАСОСОВ

В статье приводится разработанный способ вибродиагностирования судовых насосов, основанный на измерении и сравнении уровней спектральных составляющих вибрации, измеренных на одной и той же частоте, но в разных направлениях. Если результат сравнения не превышает установленной величины $\Delta L_{\text{Нн}} \leq 6$ дБ (не более чем в два раза), то судовой насос в исправном состоянии.

Постановка проблемы и ее связь с научно-техническими задачами. Техническое диагностирование, являясь одним из важнейших направлений в повышении эффективности и качества эксплуатации судовых насосов, увеличивает межремонтную наработку, своевременно предотвращает отказы и соответственно сокращает затраты труда и средств на их техническое обслуживание и ремонт.

Анализ литературы. Вибрационная диагностика, основанная на измерении и анализе параметров сигнала вибрации, является одним из самых эффективных методов технической диагностики судовых насосов (СН). Под СН в статье подразумеваются насосы центробежного типа с электроприводом. В качестве электропривода судовых насосов, как правило, используются электрические машины (ЭМ) в основном асинхронные двигатели (АД).

Анализ научных трудов [1-6] показал, что проведение диагностирования различных машин и механизмов, в частности СН, в эксплуатационных условиях по их вибрационным характеристикам (ВХ) является сложной задачей, для решения которой требуются нормы вибраций, которые жестко привязаны к конкретным режимам работы СН и поэтому не всегда возможно их использовать.

Цель исследований – упростить и повысить эффективность диагностирования СН по их ВХ. Научная новизна исследования заключается в том, что предлагается способ вибродиагностирования СН, который позволяет упростить процесс постановки диагноза по результатам анализа их ВХ и не требует норм и ретроспективных данных по ВХ.

Основная часть. Был проведен эксперимент в стендовых условиях и на 20 насосных агрегатах в эксплуатационных условиях с целью измерения и анализа их ВХ в реперных точках, в различных направлениях и режимах работы, при исправном и неисправном техническом состоянии. В результате получены данные, которые показаны на рисунке 1.

На рисунке 1 представлена ВХ электропривода (ЭМ) СН, измеренная в одной и той же реперной точке, в $1/3$ – октавных полосах частот, по параметру виброускорения в децибелах (дБ), в диапазоне частот от 5 Гц до 10000 Гц, в двух направлениях: ВХ №1 – радиальная составляющая вибрации L_R ; ВХ №2 – тангенциальная составляющая вибрации L_T .