

УДК 629.5.06

В.И. Рудницкий, А.В. Рудницкий

**СТОХАСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ЗНАЧИМОСТИ НАДЁЖНОСТИ  
ЭЛЕМЕНТОВ СУДОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

Изложен метод оценки значимости надёжности элементов судового оборудования с помощью математического моделирования.

*Ключевые слова:* стохастическая модель, надёжность, судовое оборудование, вероятность безопасности плавания, вероятность обитаемости.

Эксплуатационная готовность судна, то есть возможность использовать его по назначению, зависит от уровня надёжности судового оборудования (энергетической установки, судовых устройств, вспомогательных механизмов). Эксплуатационную готовность будем рассматривать с позиций обеспечения безопасности плавания и обитаемости судна [1]. Элементы судового оборудования не все равнозначны по своей безотказности. Уровень безотказности в значительной степени определяет объём информации (состав и количество контролируемых параметров), которые необходимо получить от каждого элемента судового оборудования для оценки технического состояния в целях прогнозирования технических обслуживания и ремонтов, а, в конечном итоге, в целях обеспечения эксплуатационной готовности судна. Кроме того, рассматривая значимость какого-либо элемента судового оборудования в обеспечении безопасности плавания или обитаемости судна (с позиций надёжности безотказности), можно также оценить объём необходимой информации о его работе.

Таким образом, чёткое знание значения каждого элемента судового оборудования для достижения главных целей функционирования (безопасность плавания и обитаемость судна) позволит, с одной стороны, сформулировать требования к надёжности (безотказности) каждого элемента, а с другой – определить для каждого элемента, исходя из его значимости, необходимый объём информации о работе и техническом состоянии, который явится основанием для разработки систем управления, контроля и определения степени их автоматизации в зависимости от продолжительности периода безвахтенной работы, то есть без постоянного присутствия персонала.

Для оценки значимости элементов судового оборудования могут быть использованы различные критерии, например, экономичности, функциональности, надёжности. Однако принципиально необходим один подход – измеряется влияние частного на общее.

**Стохастическая модель функционирования элементов судового оборудования**

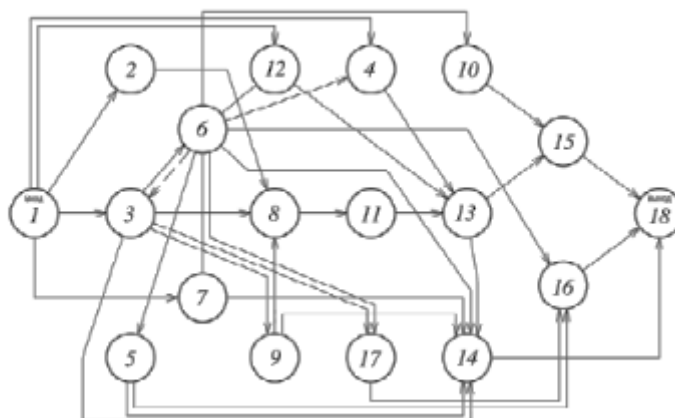
Функциональную значимость каждого элемента судового оборудования будем определять с помощью разработанной нами стохастической модели [1–3]. Термин «судовое оборудование» конкретизируем – судовая энергетическая установка.

Модель функционирования судовой энергетической установки (СЭУ) разработана по таким параметрам, как интенсивность отказов и период безвахтенной работы с использованием теории графов. На рис. 1 представлен граф функционирования СЭУ, ориентированный относительно двух главных целей: безопасность плавания 15 и обитаемость судна 16.

Граф функционирования СЭУ описывает реальный состав элементов установки с частичным резервированием. Система сжатого воздуха 3 и судовая электростанция 6 имеют внутреннее резервирование, которое может учитываться при разработке модели на более низкой ступени иерархии СЭУ.

Модель разработана на уровне целых комплексов механизмов, устройств и систем,

что сделано для упрощения математического описания и допустимо при рассмотрении в СЭУ в целом.



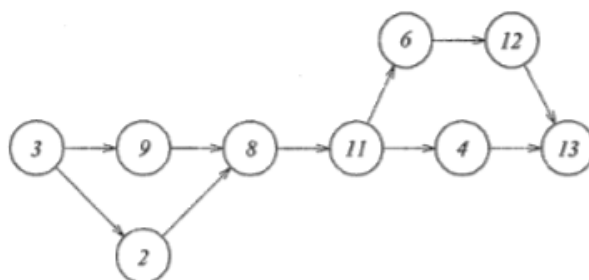
**Рис. 1. Граф функционирования СЭУ:**

1 – входной элемент графа; 2 – ручное управление главным двигателем; 3 – система сжатого воздуха; 4 – система управления ДРК; 5 – котельная установка; 6 – судовая электростанция; 7 – противопожарная система; 8 – главный двигатель; 9 – система дистанционно-автоматизированного управления (ДАУ) главного двигателя; 10 – балластно-осушительная система; 11 – передача мощности от главного двигателя к движителю; 12 – аварийный привод ДРК; 13 – движительно-рулевой комплекс (ДРК); 14 – система контрольно-измерительных приборов; 15 – безопасность плавания; 16 – обитаемость судна; 17 – система санитарной водоподготовки; 18 – выходной элемент графа

При необходимости моделирования СЭУ более подробно представленная модель может быть дополнена отдельными моделями (графами), ориентированными относительно целей, которые стоят перед каждым отдельным комплексом устройств и систем. В этом случае предлагаемый принцип моделирования будет сохранен.

Для количественной оценки функционирования СЭУ взят вероятностный показатель. Вероятность обеспечения хода и маневрирования судна, исходя из рис. 2 будет иметь вид

$$P_{х.м} = P_3 P_8 P_{11} [1 - q_4 (1 - P_6 P_{12})] P_{13} [1 - q_2 q_9].$$



**Рис. 2. Граф обеспечения хода и маневрирования судна**

Вероятность обеспечения непотопляемости, исходя из рис. 3, получим в виде

$$P_n = P_3 P_6 P_{10}.$$



**Рис. 3. Граф обеспечения безопасности плавания судна**

Вероятность обеспечения безопасности плавания судна в целом будет

$$P_{б.п} = P_{х.м}P_n = P_3^2 P_6 P_{10} P_8 P_{11} P_{13} (P_4 + P_6 P_{12} - P_4 P_6 P_{12}) (P_2 + P_9 - P_2 P_9). \quad (1)$$

Согласно рис. 4, вероятность обеспечения нормальной обитаемости судна будет иметь вид

$$P_{об} = P_3 P_6 (1 - q_5 q_{17}) = P_3 P_6 (P_5 + P_{17} - P_5 P_{17}). \quad (2)$$

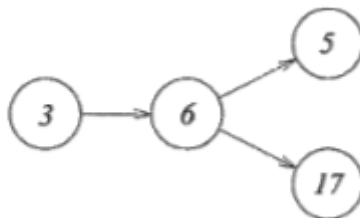


Рис. 4. Граф обеспечения нормальной обитаемости судна

Учитывая постоянство интенсивности отказов элементов СЭУ в период установившейся эксплуатации, выражения (1) и (2) для вероятности безопасности плавания и обитаемости судна будут определяться следующим образом:

$$P_{б.п} = e^{-(2\lambda_3 + \lambda_6 + \lambda_{10} + \lambda_8 + \lambda_{11} + \lambda_{13})t} [e^{-\lambda_4 t} + e^{-(\lambda_6 + \lambda_{12})t} - e^{-(\lambda_4 + \lambda_6 + \lambda_{12})t}] [e^{-\lambda_2 t} + e^{-\lambda_3 t} - e^{-(\lambda_2 + \lambda_4)t}], \quad (3)$$

$$P_{об} = e^{-(\lambda_3 + \lambda_6)t} [e^{-\lambda_5 t} + e^{-\lambda_{17} t} - e^{-(\lambda_5 + \lambda_{17})t}], \quad (4)$$

где  $\lambda = 1/T_{ср}$  — интенсивность отказа элемента СЭУ (индексы при  $\lambda$  соответствуют цифрам вершин графа на рисунках);  $T_{ср}$  — средняя наработка между отказами;  $t$  — период безвахтенной работы СЭУ (необслуживаемого периода).

Под отказом в данном случае (при решении поставленной задачи) мы понимаем отклонение от нормальной работы, требующее вмешательства экипажа.

Из приведённых выражений  $P_{б.п}(t)$  и  $P_{об}(t)$  видно, что математическая модель функционирования СЭУ представляет собой зависимость вероятности достижения главных целей, для которых предназначена установка, от безотказности её элементов и периода её безвахтенной работы.

### Метод исследования значимости надёжности элементов судового оборудования

Для определения функциональной значимости каждого элемента в отдельности используем разработанную нами модель функционирования СЭУ. Исследования заключаются в получении зависимостей  $P_{б.п} = f(\lambda_i)$  и  $P_{об} = f(\lambda_i)$  для того элемента, значимость которого определяется.

Приведем алгоритм исследования значимости:

1. Для каждого элемента берутся характеристики надёжности: средняя наработка между отказами  $T_{ср}$  или интенсивность отказов  $\lambda = 1/T_{ср}$ . При проектировании СЭУ количественные значения этих характеристик берутся для оборудования, которое находится в эксплуатации и по нему накоплена статистика по надёжности. Если же оборудование спроектировано специально для разрабатываемого судна, то используются данные по надёжности оборудования, находящегося в эксплуатации и близкого к спроектированному по основным параметрам и условиям эксплуатации.

2. Для всех элементов количественные значения интенсивности отказов берутся постоянными.

3. Для элемента, значимость которого исследуется, задаются несколькими количественными значениями интенсивности отказов  $\lambda_i$ , варьируя от вычисленного ранее его значения в большую или меньшую сторону.

4. Время периода безвахтенной работы  $t$  принимается постоянной величиной.

5. Исследование значимости для каждого элемента проводится для нескольких значений времени периода безвахтенной работы  $t$ .

6. Исследования значимости проводится в указанной ранее последовательности для всех элементов СЭУ.

В результате исследований для каждого элемента получают зависимости  $P_{б.п} = f(\lambda_i)$  и  $P_{об} = f(\lambda_i)$  при нескольких значениях  $t$ . Из анализа выражений (3) и (4) видно, что указанные зависимости представляют собой убывающую функцию типа  $y = e^{-x}$ .

### Результаты оценки значимости надёжности элементов судового оборудования

На рис. 5 – рис. 8 представлены результаты исследования значимости элементов энергетической установки в обеспечении безопасности плавания и обитаемости судна. Исследования выполнены применительно к составу оборудования речного сухогрузного судна типа «Волго-Дон» (рис. 1). При этом использовались известные за длительную эксплуатацию статистические данные по надёжности основного энергетического оборудования, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Наименование элемента СЭУ	$T_{ср}, ч$
Главный двигатель	150-500
Передача мощности	150-200
Движительно - рулевой комплекс (ДРК)	2400-7200
Ручное управление главным двигателем	2400-7200
Система ДАУ главного двигателя	350-600
Система управления ДРК	100-300
Аварийный привод ДРК	100-300
Судовая электростанция	400-500
Система сжатого воздуха	300-600
Котельная установка	100-150
Противопожарная система	2400-7200
Балластно – осушительная система	2400-7200
Система контрольно измерительных приборов	300-600
Система санитарной водоподготовки	2400-7200

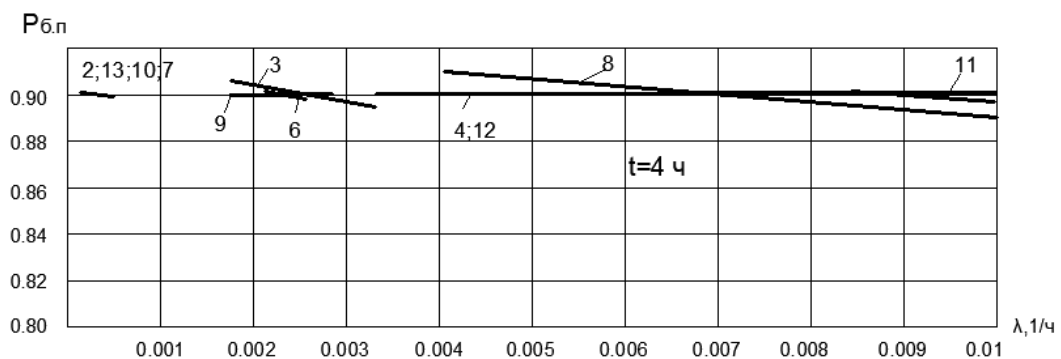


Рис. 5. К исследованию значимости элементов СЭУ в обеспечении безопасности плавания периода безвахтенной работы 4 ч

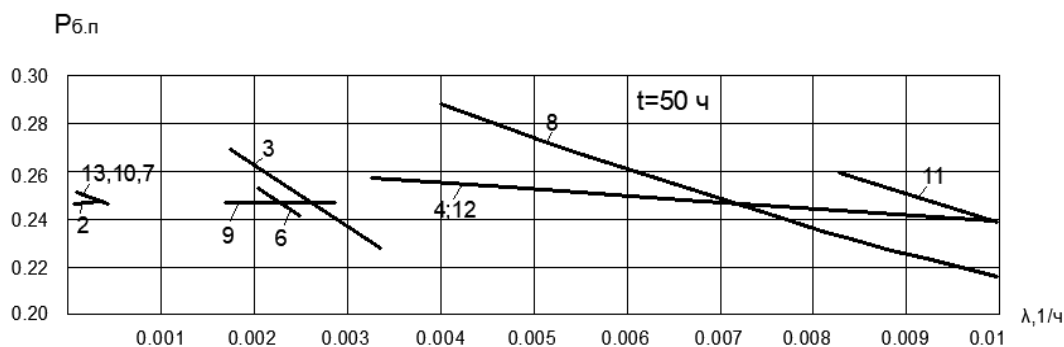


Рис. 6. К исследованию значимости элементов СЭУ в обеспечении безопасности плавания периода безвахтенной работы 50 ч

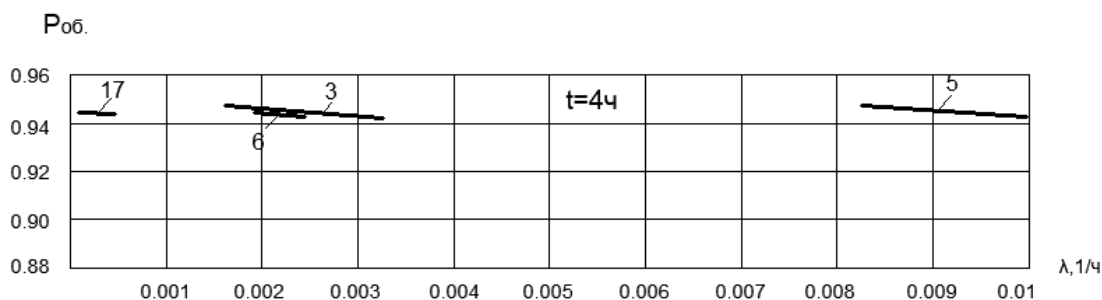


Рис. 7. К исследованию значимости элементов СЭУ в обеспечении обитаемости периода безвахтенной работы 4 ч

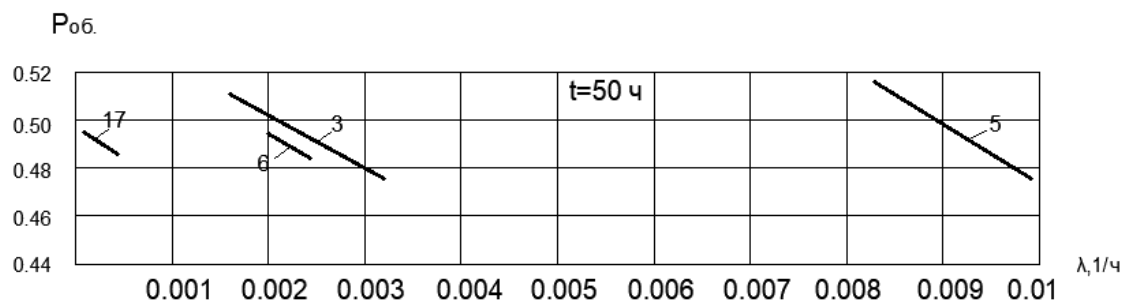


Рис. 8. К исследованию значимости элементов СЭУ в обеспечении обитаемости периода безвахтенной работы 50 ч

Характер полученных зависимостей показывает, что с увеличением интенсивности отказов каждого элемента вероятность безопасности плавания или обитаемости судна уменьшается в большей или меньшей степени. Для некоторых элементов, как видно из рис. 5, эти вероятности практически остаются постоянной величиной. Отмеченная закономерность наблюдается при разном времени периода безвахтенной работы, но только проявляется в большей или меньшей степени, т.е. значимость элементов изменяется с изменением периода безвахтенной работы.

Отмеченные свойства функций  $P_{б.п} = f(\lambda_i)$  и  $P_{об} = f(\lambda_i)$  позволяют в качестве критерия оценки значимости  $i$ -го элемента принять производную вероятности безопасности плавания судна (или вероятности обитаемости судна) по его интенсивности отказов, т.е.

$$P_{б.п} = f(\lambda_i) = \lim_{\Delta\lambda_i \rightarrow 0} \frac{\Delta P_{б.п}}{\Delta\lambda_i}. \quad (5)$$

Этот критерий оценки будем называть коэффициентом значимости  $i$ -го элемента СЭУ и обозначим его

$$K_{3i}^{б.п} = \frac{dP_{б.п}}{d\lambda_i} \quad (6)$$

для случая, когда исследуется значимость  $i$ -го элемента для обеспечения безопасности плавания судна, и для обеспечения обитаемости судна.

$$k_{zi}^{об} = \frac{dP_{об}}{d\lambda_i}. \quad (7)$$

Рассмотрим свойства коэффициента значимости.

- при  $\Delta\lambda_i = 0$   $k_{zi} = \frac{dP}{d\lambda_i} = \infty$ ;
- при  $\Delta P = 0$   $k_{zi} = \frac{dP}{d\lambda_i} = 0$ .

Таким образом, для экстремальных условий, когда, например, вероятность безопасности плавания или обитаемости судна не зависит от надежности какого-то  $i$ -го элемента, его  $k_{zi} = 0$ .

Случай, когда вероятность безопасности плавания или обитаемости судна увеличивается без изменения надежности  $i$ -го элемента ( $\Delta\lambda=0$ ), практически не имеет смысла, т.е.  $k_{zi} = \infty$ .

Для практического вычисления коэффициентов значимости каждого элемента по результатам исследований можно пользоваться выражениями:

$$k_{zi}^{б.п} = \left| \frac{P_{б.п}^{(1)} - P_{б.п}^{(2)}}{\lambda_i^{(1)} - \lambda_i^{(2)}} \right|; \quad (8)$$

$$k_{zi}^{об} = \left| \frac{P_{об}^{(1)} - P_{об}^{(2)}}{\lambda_i^{(1)} - \lambda_i^{(2)}} \right|. \quad (9)$$

Такая запись выражений (8) и (9) принята ввиду того, что для оценки значимости нас интересует абсолютная величина  $k_{zi}^{б.п}$  и  $k_{zi}^{об}$ .

По результатам вычисления  $k_{zi}^{б.п}$  и  $k_{zi}^{об}$  можно сделать выводы о значимости элементов СЭУ, проводя их сравнению. Чем больше  $k_{zi}^{б.п}$  и  $k_{zi}^{об}$ , тем более значим  $i$ -й элемент СЭУ в обеспечении безопасности плавания или обитаемости судна. Анализ результатов исследования значимости элементов СЭУ в обеспечении безопасности плавания судна типа "Волго-Дон" (рис. 5–6) показывает, что наибольшее влияние оказывает: комплекс главный двигатель 8 – передача мощности 11 – ДРК 13,; судовая электростанция 6; система сжатого воздуха 3.

Для перечисленных элементов определены коэффициенты значимости в зависимости от периода безвахтенной работы, величины которых даны в табл. 2.

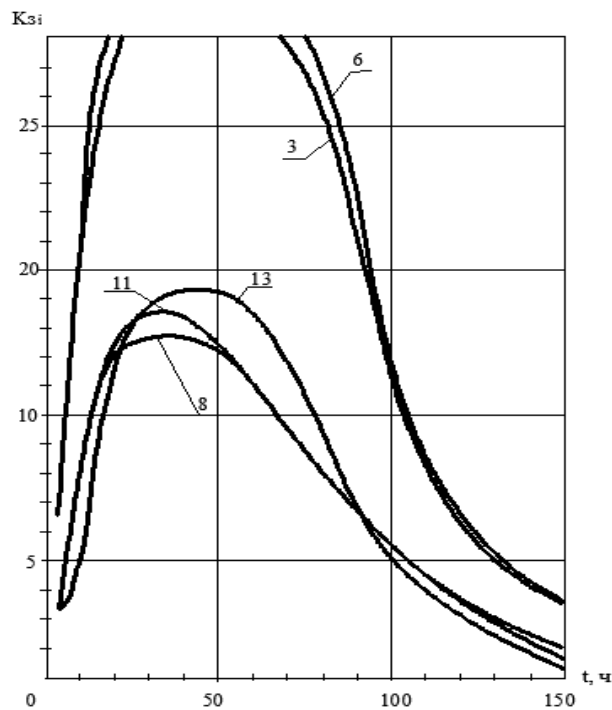
Таблица 2

Наименование элемента СЭУ	$k_{zi}^{б.п}$					
	4 ч	8 ч	25 ч	50 ч	100 ч	150 ч
Главный двигатель	3,38	6,40	12,50	12,30	5,50	2,04
Передача мощности	3,40	6,25	13,40	12,30	5,60	1,65
Двигательно-рулевой комплекс	3,30	4,34	13,30	14,30	5,00	1,33
Судовая электростанция	6,60	12,60	25,40	25,60	11,60	3,60
Система сжатого воздуха	7,30	12,20	24,80	24,60	11,00	3,56

По данным этой таблицы построены зависимости коэффициентов значимости от периода безвахтенной работы (рис. 9).

Анализируя представленные зависимости, нужно еще раз подчеркнуть, что значи-

мость элементов СЭУ изменяется с изменением периода безвахтенной работы. Характер зависимостей  $k_{zi} = f(t)$  показывает, что для определенного периода безвахтенной работы значимость некоторых элементов СЭУ проявляется в наибольшей степени. Так, для периодов безвахтенной работы 25 и 50 ч наибольшую значимость в обеспечении безопасности плавания имеют судовая электростанция и система сжатого воздуха.



**Рис. 9. Зависимость коэффициента значимости элемента СЭУ от периода безвахтенной работы.**

Таким образом, вспомогательные элементы, от которых зависит функционирование средств управления, контроля и автоматизации и, следовательно, возможность обеспечить безопасность плавания судна при малочисленном экипаже, играют решающую роль при увеличении периода безвахтенной работы. Поэтому обоснованным будет вывод о том, что при создании речного судна с периодом безвахтенной работы энергетической установки более 8 ч необходима развитая система автоматизированного управления и контроля за работой судовой электростанции и системы сжатого воздуха.

Сравнение  $k_{zi}$  разных элементов дает возможность выделить главные и провести обоснованную классификацию, т.е. построить иерархию значимостей элементов СЭУ. Это позволяет обосновать требования к информативности (количеству и составу контролируемых параметров) каждого элемента СЭУ для разработки судовых систем контроля с различной степенью автоматизации в зависимости от времени периода безвахтенной работы и количества экипажа.

### Выводы

Предлагаемый метод оценки значимости надёжности элементов судового оборудования позволяет:

- обосновать объем необходимой информативности каждого элемента и по экономическим показателям проводить сравнение вариантов, соответствующих разным периодам безвахтенной работы (при разном составе экипажей). Период безвахтенной работы фактически определяет степень автоматизации судовых систем контроля;

- обосновать требования к надежности (безотказности) судового оборудования на этапе проектирования при известном  $k_{zi}$  для каждого  $i$ -го элемента.

Разработанный метод может быть реализован при оптимизации и нормировании надежности и разработке средств оценки технического состояния судового оборудования.

#### Библиографический список

1. Рудницкий, А.В. Моделирование функционирования судового оборудования с позиций надёжности (безотказности) // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Морская техника и технология. – Астрахань: АГТУ, 2011. – С. 63–66.
2. Клейнрок, Л. Теория массового обслуживания / Л. Клейнрок. – М.: Книга по требованию, 2013. – 429 с.
3. Половко, А.М. Основы теории надёжности / А.М. Половко, С.В. Гуров. – М.: BHV, 2008. – 704 с.

*Дата поступления  
в редакцию 31.01.2018*

**V.I. Rudnitsky, A.V. Rudnitsky**

#### STOCHASTIC MODELS FOR ASSESSING THE SIGNIFICANCE OF THE RELIABILITY OF ELEMENTS OF SHIP EQUIPMENT

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

**Subject:** The method for assessing the significance of the reliability of ship equipment elements using mathematical modeling is described.

**Methods:** The development of the model of the functioning of ship equipment from the viewpoint of ensuring the safety of the vessel's navigation and ensuring the habitation of the vessel uses graph theory. Assessment of the importance of elements of ship equipment to ensure the safety of the vessel's navigation and ensure the dwelling of the vessel is carried out from the standpoint of the reliability (safety) of each element. The general theory of reliability and queuing theory are used.

**Results:** It is shown that with sufficient accuracy for engineering calculations it is possible to consider the flow of failures of elements of ship equipment as the simplest. The developed method for assessing the significance of the reliability of elements of ship equipment can be implemented in the optimization and normalization of reliability and the development of means for assessing the technical condition of ship equipment.

*Key words:* stochastic model, reliability, ship equipment, probability of safe navigation, probability of habitation.