

7. Reddy S.C., Fathemi A. Small crack growth in multi-axial fatigue // ASTM SNP. Advances in fatigue lifetime predictive techniques. – 1992. - №1 122. – P. 276-298.
8. P. Hansson, S. Melin, C. Persson, Computationally efficient modelling of short fatigue crack growth using dislocation formulations, Engineering Fracture Mechanics xxx (2008) xxx–xxx.
9. R. Lillbacka, E. Johnson, M. Ekh, A model for short crack propagation in polycrystalline materials, Engineering Fracture Mechanics 73 (2006) 223–232.
10. Krajcinovich D., Rinaldi A. Statistical damage mechanics // Theoretical and applied fracture mechanics – 2005. - №72. – P. 76-81.
11. Bai Y.L., Xia M.F., Ke F.J., Li H.L. Statistical micro damage mechanichanics and damage field evolution // Theoretical and applied fracture mechanics. – 2001. - №37. – P. 1-10
12. B. Kuünkler, O. Düüber, P. Koöster, U. Krupp, C.-P. Fritzen, H.-J. Christ, Modelling of short crack propagation – Transition from stage I to stage II, Engineering Fracture Mechanics 75 (2008) 715–725.
13. Selivanov V.V. Mekhanika deformiruemogo tela: Uchebnik dlya vtuzov. – 2-e izd., ispr. – M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2006. – 424 s., il.
14. Pestrikov V.M., Morozov E.M. Mekhanika razrusheniya tverdyh tel: kurs lekcij. – SPb.: Professiya, 2002. – 320 s., il.
15. Prokopenko A.V., Chernysh O.N. Razvitie korotkikh poverhnostnyh ustalostnyh treshchin v stali 20H13 i splave VT9 // Problemy prochnosti. – 1989. – № 5. s. 12 – 16.
16. Rossijskij morskoy registr sudohodstva. Pravila klassifikacii i postrojki sudov T. 2 – SPb.: 2005. – 638 s.
17. Kondrat'ev S.I., Fajvisovich A.V. Prognozirovanie vliyaniya volnovoï nagruzki na rost treshchin v konstruktivnyh elementah sudna// Morskie intelektual'nye tekhnologii. 2018. № 1-1 (39). S. 140-147.

УДК 62-192÷62-772

DOI: 10.34046/aumsuomt93/20

## КРИТЕРИИ ВЫБОРА ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОТКАЗОВ ПРИ РАСЧЕТЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕРЕГРУЗОЧНЫХ МАШИН

*В. Е. Деружинский, доктор экономических наук, профессор.*

*К.А. Аблязов, кандидат технических наук, доцент,*

*Э. К. Аблязов, кандидат технических наук, доцент,*

В статье рассмотрены основные законы распределения случайных величин, используемых в теории надежности технических объектов. Представлены репрезентативные примеры для различных законов распределения случайных величин. Приведены математические формулировки, используемые при оценке и расчете параметров надежности технических объектов на этапах приработки, нормальной эксплуатации и физического износа изделия. В работе также исследованы критерии выбора закона распределения отказов при расчете надежности элементов перегрузочных машин в течение жизненного цикла. **Ключевые слова:** законы распределения случайных величин, параметры надежности технических объектов, определение закона распределения отказов.

The article discusses the basic laws of the distribution of random variables used in the theory of reliability of technical objects. Representative examples for various distribution laws of random variables are presented. The mathematical formulations used in the assessment and calculation of the reliability parameters of technical objects at the stages of running-in, normal operation and physical wear of the product are given. The paper also explores the criteria for choosing the law of failure distribution when calculating the reliability of elements of reloading machines during the life cycle.

**Keywords:** laws of distribution of random variables, reliability parameters of technical objects, determination of the law of distribution of failures.

Надежность машин закладывается при проектировании, обеспечивается при изготовлении и поддерживается на требуемом уровне в процессе эксплуатации. На практике при эксплуатации машин показатели надежности не всегда ограничиваются сохранением первоначального уровня. Иногда этот уровень оказывается недостаточным вследствие изменения расчетных

условий работы. Поэтому в процессе эксплуатации нередко решаются задачи повышения надежности существующих машин путем модернизации отдельных узлов, агрегатов или системы управления.

Развитие науки и техники в области создания новых конструкционных материалов, методов упрочнения и повышения износостойкости

восстанавливаемых деталей, новых систем привода с благополучными характеристиками, освоения отечественной промышленностью современных устройств автоматического контроля технического состояния машины и блоков автоматического управления, мини-ЭВМ и микропроцессоры, создают необходимые условия для решения задач надежности изделий. При использовании управляемых вычислительных машин в сочетании с теорией оптимального управления не только повышается производительность перегрузочных машин, но стабилизируются их режимы работы, снижается общее число включений в течение рабочего цикла, ограничиваются динамические нагрузки и, следовательно, повышается надежность работы.

Гарантией высокого уровня надежности машины на этапе проектирования являются внедрение уточненных методов расчетов на прочность и долговечность конструкций и деталей, применение многокритериальных методов оптимизации при конструировании машин с учетом всех основных эксплуатационных факторов, использование материалов с улучшенными свойствами, обеспечение благоприятного режима смазывания и употребления высококачественных смазок, введение резервирования, разработка правильной технологии изготовления машин и эффективных методов контроля качества. Большое значение имеет разработка рациональных инструкций по эксплуатации и оптимальных правил поиска неисправностей.

Обеспечение надежности машин в процессе изготовления и в первую очередь достигается в результате строгого соблюдения технологической дисциплины и применение эффективных методов контроля готовых деталей, качества сборки узлов, агрегатов и машин в целом.

В период эксплуатации можно выделить следующие основные пути обеспечения и повышения надежности перегрузочных машин:

- создание благоприятных условий в процессе хранения и транспортирования машин к месту эксплуатации;
- строгое выполнение требований правил использования машины с целью обеспечения соответствия фактических нагрузок и режимов работы расчетным, своевременное и качественное выполнение технического обслуживания и ремонта (ТО и Р), в частности строгое соблюдение регулировочных параметров (геометрия кинематических пар, допуски и посадки, зазоры и т. п.),

использование новых, высококачественных смазочных материалов, соответствующих конкретным условиям работы машины;

- защита машины от вредных воздействий окружающей среды. В частности, поддержание в хорошем состоянии защитных кожухов, обшивки машинного отделения и кабины оператора, галерей конвейерных линий и т.п.; установка дополнительных вентиляторов или обогревателей для обеспечения благоприятного температурного режима двигателей, тормозов, блоков управления; использование надежных антикоррозионных покрытий; обеспечение герметичности узлов и агрегатов; поддержание работоспособности фильтров для очистки топлива, масла или воздуха; важным фактором повышения надежности машин в процессе эксплуатации является создание высокого качества фундаментов и оснований (стационарные перегрузочные установки, самоходные стреловые краны), дорожных покрытий (колесные погрузчики) и рельсовых путей (машины на рельсовом ходу);

- проведение ремонтов с использованием новейших достижений науки и техники в области создания материалов с улучшенными эксплуатационными свойствами, методов упрочнения и повышения износостойкости восстанавливаемых деталей, совершенствование организации и материальной базы ремонтной службы портов;

- внедрение эффективных методов контроля качества деталей в процессе ремонта, а также современных методов комплексного безразборного диагностирования отдельных агрегатов или машины в целом при производстве технических осмотров и освидетельствований;

- сбор достоверной информации об условиях использования машин, режимах работы и фактической долговечности отдельных узлов, ее обработка и анализ с целью разработки организационных, технологических и технических мероприятий по повышению надежности используемых и вновь выпускаемых машин;

- модернизация узлов с недостаточной надежностью, установка дополнительных приборов безопасности, а также устройств текущего контроля технического состояния и автоматической сигнализации выхода параметров машины за установленные пределы;

- модернизация привода и системы управления машиной, включая внедрение элементов

автоматического управления, с целью уменьшения динамических нагрузок и оптимизации режимов работы машины;

- уточнения правил использования и режима ТО применительно к данным условиям работы машины на основе накопленного опыта, новых научных исследований в области эксплуатации машин в морских портах и других отраслях народного хозяйства;

- повышение квалификации обслуживающего персонала, обобщение и распространение передового опыта сохранения и увеличения надежности машин;

- внедрение научной организации труда операторов, бригад ТО и Р, повышение персональной ответственности за техническое состояние машины и материальной заинтересованности в эффективности ее использования в течение всего срока службы;

- совершенствование структуры и содержания служб технического надзора на всех этапах эксплуатации машины: монтажа, использования, ТО и Р.

Показатели надежности по своему влиянию на результаты эксплуатации машин являются такими же техническими характеристиками, как производительность, геометрические параметры, потребление энергии, стоимость и др. Без учета этих показателей невозможно эффективное планирование использования машин, их технического обслуживания и ремонта, разработка оптимальной структуры отдельных перегрузочных линий и парка машин в целом. Однако методы решения производственных задач - прогнозирование производительности во время эксплуатации, суммарной выработки, стояночного времени транспортных средств, потребного числа машин и т. д. с учетом показателей надежности в настоящее время очень редко применяются в оперативной работе инженерно-технических служб портов.

Ограниченное использование достижений теорий надежности машин в эксплуатационные практики во многом объясняется тем, что в опубликованных работах преимущественно рассматриваются вопросы прогнозирования и нормирования показателей надежности оборудования в процессе его проектирования и изготовления, сравнительно мало уделяется внимание влиянию этих показателей на эффективность эксплуатации машин. Кроме того, большинство книг предназначены для научных работников и не всегда доступны читателям без специальной математической подготовки. Итоговые расчеты формулы не

редко «теряются» в математических доказательствах и преобразованиях [1-7, 9].

В теории вероятности имеются различные законы распределения случайных величин, которые могут быть использованы для решения задач надежности. При исследовании надежности машин чаще всего используют следующие законы распределения случайных величин: экспоненциальное (показательное) распределение, что характерно для внезапных отказов в период нормальной эксплуатации; закон равномерного распределения, что характерно для внезапных отказов в период нормальной эксплуатации, когда отказы являются весьма редкими событиями; нормальный закон распределения (закон Гаусса), что характерно для постепенных (износных) отказов; распределение Вейбулла, что является универсальным законом для описания хода отказов при эксплуатации изделий и пригоден для описания поведения изнашивающихся или стареющих изделий; закон распределения Пуассона, который применяют при решении многих практических задач для дискретных случайных величин.

*Интенсивность отказов.* В ряде случаев в условиях эксплуатации удобнее пользоваться интенсивностью отказов, которая определяется из выражения:

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n}{\Delta t \cdot N(t)},$$

где  $N(t)$  - число остающихся работоспособными элементов к моменту времени  $t$ ;  $\Delta n$  - число элементов, отказавших в период  $\Delta t$ . Интенсивность отказов, представленную в виде функции времени, называют  $\lambda$  - характеристикой;  $\lambda$  - характеристики имеют обычно три ярко выраженных участка (рис. 1).



Рисунок 1 - Зависимость частоты и интенсивности отказов от времени

Участок I характерен для начального времени эксплуатации, в течение которого возникают приработочные отказы, возникающие в ре-

зультате скрытых дефектов, несовершенства производства, ошибок проектирования, а также ошибок эксплуатации [8]. Этот участок характерен резким скачком увеличения интенсивности отказов, хотя он иногда и отсутствует. Закон Вейбулла удовлетворительно оценивает надёжность машин в процессе их приработки [15].

Участок II является основным и учитывает интенсивность отказов в процессе длительной эксплуатации системы. Интенсивность здесь примерно одинакова  $\lambda = const$  и соблюдается экспоненциальный закон надежности ( $P(t) = e^{-\lambda t}$ ), который удовлетворительно описывает распределение наработки на отказ сложных изделий [15]. В том случае, когда внезапные отказы являются редкими событиями ( $P(t) \approx 1$ ), то для их описания можно использовать закон равномерного распределения [14]. Появление внезапных отказов оборудования не связана с изменением состояния изделия и временем его предыдущей работы, а зависит от уровня внешних воздействий (случайные перегрузки, преждевременное старение и другими причинами) [14]. В конце этого участка наряду со случайными перегрузками на ход отказов уже сильно влияет износ и экспоненциальный закон надежности нарушается.

Участок III характеризуется возрастанием интенсивности отказов вследствие появления массового износа и старения элементов системы, снижения сопротивляемости случайным перегрузкам. Для этого участка наиболее универсальным и широко применяемым для практических расчетов является нормальный закон надежности [13].

Участок I иногда удается исключить из эксплуатации путем проведения приработки агрегатов системы перед эксплуатацией в заводских условиях для отбраковки наиболее слабых элементов.

Форма кривой интенсивности отказов  $\lambda$  показывает, что функционирование устройства на протяжении всего жизненного цикла можно описать распределением Вейбулла (участок I), комбинацией показательного закона и равномерного закона распределения (участок II) и нормальным законом распределения (участок III) [12].

Экспоненциальное (показательное) распределение - одно из основных распределений в теории надежности, так как он прост для практического использования и описывается плотностью  $f(x) = \lambda e^{-\lambda x}$ , где  $\lambda$  - постоянная положительная величина. Экспоненциальный закон в теории надежности нашёл широкое применение из-за того, что при экспоненциальном законе вероятность безотказной работы зависит только от длительности интервала и не зависит от времени предшествующей работы [15].

Функция распределения экспоненциального закона:  $F(x) = 1 - e^{-\lambda x}$ .

Функция надёжности  $P(x) = 1 - F(x) = e^{-\lambda x}$ .

Графики плотности и функции экспоненциального закона распределения изображены на рис. 2 и 3.

Математическое ожидание:

$$m_x = \int_0^{\infty} x f(x) dx = \int_0^{\infty} x \cdot \lambda e^{-\lambda x} dx = \frac{1}{\lambda}$$

Дисперсия и среднее квадратическое отклонение соответственно:

$$D_x = \int_0^{\infty} (x - m_x)^2 f(x) dx = \int_0^{\infty} (x - \frac{1}{\lambda})^2 \cdot \lambda e^{-\lambda x} dx = \frac{1}{\lambda^2}$$

$$\sigma_x = \sqrt{D_x} = \sqrt{\frac{1}{\lambda^2}} = \frac{1}{\lambda}$$

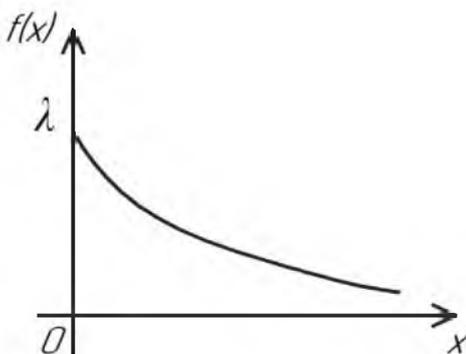


Рисунок 2 - График плотности экспоненциального закона

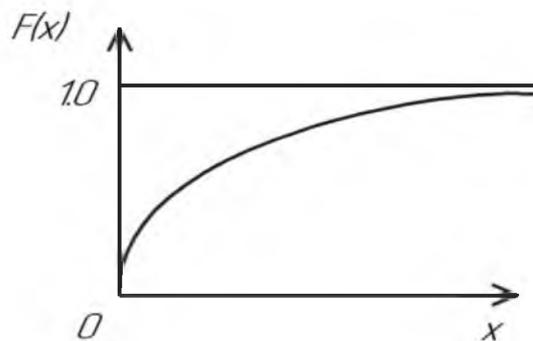


Рисунок 3 - График функции экспоненциального закона

**Репрезентативный пример 1.** Испытывают три элемента, которые работают независимо один от другого. Вероятность безотказной работы элементов распределена по экспоненциальному (показательному) закону: для первого элемента  $P_1(t) = 1 - e^{-0,01t}$ ; для второго  $P_2(t) = 1 - e^{-0,02t}$ ; для третьего  $P_3(t) = 1 - e^{-0,03t}$ . Найти вероятность того, что в интервале времени (0,50) откажут все три элемента.

*Решение.* Вероятность отказа первого элемента

$$P_1(t) = 1 - e^{-0,01t} = 1 - e^{-0,01 \cdot 50} = 0,3935.$$

Вероятность отказа второго элемента

$$P_2(t) = 1 - e^{-0,02t} = 1 - e^{-0,02 \cdot 50} = 0,6321.$$

Вероятность отказа третьего элемента

$$P_3(t) = 1 - e^{-0,03t} = 1 - e^{-0,03 \cdot 50} = 0,7769.$$

$$P = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot P_3(t) = 0,3935 \cdot 0,6321 \cdot 0,7769 = 0,1932.$$

**Закон равномерного распределения.**

Внезапные отказы возникают в результате сочетания неблагоприятных факторов и случайных внешних воздействий, превышающих несущую способность элемента. Отказ возникает через некоторый промежуток времени  $t$ , который является случайной величиной.

Основным признаком внезапного отказа является независимость вероятности его возникновения  $Q(t)$  в течение заданного интервала времени от  $t_0$  до  $t_1$  от длительности предыдущей работы элемента. Примерами таких отказов могут быть разрушения подшипников, отрыв лопатки турбины, деформация или разрушение деталей энергоустановок под воздействием вибраций или пульсаций.

Выход из строя при этом происходит, как правило, внезапно, без предшествующих симптомов разрушения (рис. 4).

Согласно рис. 4 скорость распространения повреждения  $\gamma$  равна

$$\gamma = \frac{dU}{dt} \approx \frac{U_{\text{дон}}}{\Delta t}, \text{ где } U - \text{степень повреждения; } \Delta t - \text{интервал нарастания повреждения.}$$

При внезапном отказе  $\gamma$  стремится к бесконечности. Для внезапного отказа  $t_0$  является случайной величиной и подчиняется некоторому закону распределения  $f(t)$ , не зависящему от состояния изделия, но зависящему от уровня внешних воздействий.

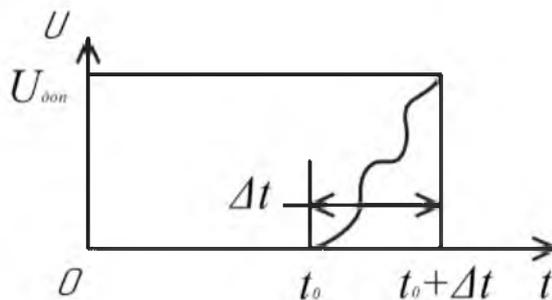


Рисунок 4 - Схема возникновения отказа: U - степень повреждения; t - текущее время;  $U_{\text{дон}}$  - допустимое предельное значение

Вероятность возникновения внезапного отказа наиболее широко оценивают через интенсивность отказов  $\lambda(t)$ . Так как на 2-ом участке кривой интенсивности отказов  $\lambda(t) = const$  (интенсивность отказов имеет постоянное значение), то вероятность безотказной работы  $P(t) = e^{-\lambda t}$  и  $\omega(t) = \lambda e^{-\lambda t}$ .

Внезапные отказы в общем случае наиболее приемлемо описываются экспоненциальным законом распределения:  $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$ .

Вероятность безотказной работы в условиях случайных отказов можно выразить зависи-

$$\text{мостью } P(t) = e^{-\frac{t}{T_{cp}}}, \text{ так как } \lambda = \frac{1}{T_{cp}}.$$

Таким образом, можно сделать вывод, что внезапные отказы, когда они являются весьма редкими событиями (при очень высоких значениях вероятности безотказной работы ( $P(t) \approx 1$ ), возможно описывать законом равномерного распределения.

Примерами реальных ситуаций, связанных с необходимостью рассмотрения равномерно распределенных случайных величин, могут служить: анализ ошибок округления при проведении числовых расчетов (такая ошибка, как правило, называется равномерно распределенной на интервале от -5 до +5 единиц округляемого десятичного знака); время ожидания «обслуживания» при точно периодическом, через каждые T единиц времени, включении (прибытии) «обслуживаемого устройства» и при случайном поступлении (прибытии) заявки на обслуживание в этом интервале (например, время ожидания пассажиром прибытия поезда метро при условии точных трехминутных интервалов движения метро и случайного момента появления пассажира на платформе будет распределено приблизительно равномерно на интервале [0 мин, 3 мин]).

**Нормальный закон распределения.** Постепенные (износные) отказы возникают в результате протекания того или иного процесса старения, износа, коррозии и т. д. Основным признаком постепенного отказа является то, что вероятность его возникновения  $Q(t)$  в течение заданного периода времени от  $t_0$  до  $(t_0 + \Delta t)$  зависит от длительности  $t_0$  предыдущей работы элемента. Чем больше работал элемент, тем выше вероятность возникновения отказа.

Постепенные отказы имеют неравномерный характер распределения. Вначале они имеют низкую плотность распределения, затем отмечается повышение плотности до максимума и далее - падение плотности распределения, связанное с уменьшением числа работоспособных элементов. Постепенные отказы зависят от большого числа различных факторов, причем невозможно указать, какой из факторов влияет на постепенный отказ больше других.

В связи с этим для описания надежности в период постепенных отказов наиболее универсальным, удобным и широко применяемым является закон нормального распределения, для которого плотность распределения

$$f(t) = \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(t-m_t)^2}{2\sigma_t^2}},$$

где  $\sigma_t$  - среднее квадратическое отклонение;  $m_t$  - математическое ожидание времени отказа.

Значения  $\sigma_t$  и  $m_t$  оценивают по результатам испытаний:

$$\sigma_t \approx S_t = \sqrt{\frac{1}{N_0 - 1} \sum (t_i - m_t)^2},$$

где  $N_0$  - число испытанных элементов;

$$m_t \approx T_{cp} = \frac{\sum t_i}{N_0};$$

на  $i$ -м испытании.

Функция распределения постепенных отказов выражается формулой

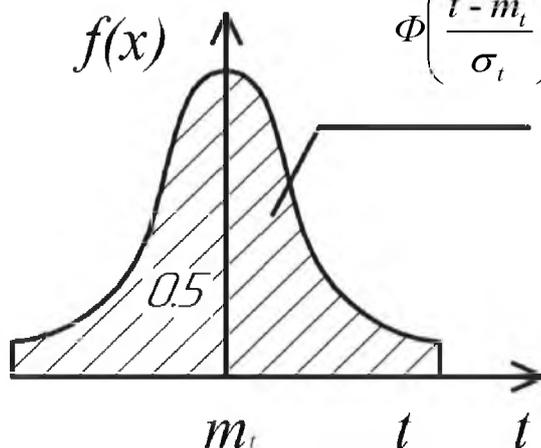
$$F(t) = \int_{-\infty}^t f(t) dt = \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(t-m_t)^2}{2\sigma_t^2}} dt.$$

Графическая плотность распределения при нормальном законе выражается кривой Гаусса

(рис. 5). Комплекс  $U_p = \frac{t - m_t}{\sigma_t}$  выражает долю

среднеквадратического отклонения значений параметра элемента с вероятностью  $P(t)$ . Вероятность отказа и вероятность безотказной работы, выраженные через функцию Лапласа, имеют вид

$$Q(t) = \Phi\left(\frac{t - m_t}{\sigma_t}\right), \quad P(t) = 1 - \Phi\left(\frac{t - m_t}{\sigma_t}\right).$$



исунок 5 - Нормальный закон распределения постепенных отказов

Необходимо обратить внимание на то, что вышеприведенные выражения для  $P(t)$  и  $Q(t)$  справедливы только в случаях, когда нижний предел интегрирования функции  $\Phi(t)$  составляет  $-\infty$ .

В практике расчетов надежности часто принимают нижний предел интегрирования равным нулю, так как рассматривают случайную величину в виде наработки до отказа, не имеющей отрицательных значений.

Тогда, учитывая, что

$$\int_{-\infty}^x \varphi(x) dx = \int_{-\infty}^0 \varphi(x) dx + \int_0^x \varphi(x) dx$$

и в силу симметрии  $P(-\infty < X < 0) = 0,5$ , получаем зависимости для  $P(t)$  и  $Q(t)$  от функции:

$$\Phi_0(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt.$$

$$P(t) = 0,5 - \Phi_0\left(\frac{t - m_t}{\sigma_t}\right), \quad Q(t) = 0,5 + \Phi_0\left(\frac{t - m_t}{\sigma_t}\right).$$

Комплекс  $U_p = \frac{t - m_t}{\sigma_t}$  называют квантилем нормального распределения. Значения  $\Phi_0(t)$  и

$P(t)$  в зависимости от квантиля  $U_p = \frac{t - m_t}{\sigma_t}$  приводятся в таблице 1.

Таблица 1 - Значения  $\Phi_0(t)$  и  $P(t)$  в зависимости от квантиля  $U_p = \frac{t - m_t}{\sigma_t}$

$U_p$	$\Phi_0(t)$	$P(t)$	$U_p$	$\Phi_0(t)$	$P(t)$
0,00	0,00	0,5000	-0,80	-0,288 1	0,788 1
-0,10	-0,031 8	0,5398	-0,90	-0,315 9	0,815 9
-0,20	-0,079 3	0,579 3	-1,0	-0,341 3	0,841 3
-0,30	-0,1179	0,617 9	-2,0	-0,477 2	0,977 2
-0,40	-0,155 4	0,655 4	-2,5	-0,493 8	0,993 8
-0,50	-0,1915	0,691 5	-3,0	-0,498 6	0,998 6
-0,60	-0,225 7	0,725 7	-3,5	-0,499 8	0,999 8
-0,70	-0,258 0	0,758 0	-3,719	-0,499 9	0,999 9

Из таблицы 1 видно, что для обеспечения достаточно высоких значений вероятности безотказной работы ( $P(t) > 0,5$ ) квантиль нормального распределения должен быть отрицательной величиной, а  $t < m_t$ .

Математическое ожидание  $m_t$  определяет на графике положение кривой, а среднее квадратическое отклонение  $\sigma_t$  - ширину. Кривая плотности распределения тем острее и выше, чем меньше  $\sigma_t$ . Следует отметить, что начало кривой при  $U_p = -\infty$  и ее распространение до  $U_p = +\infty$  не являются существенным недостатком, так как практически в расчетах надежности используется интервал  $U_p = \pm 3,719$ , соответствующий значениям вероятностей безотказной работы от 0,9999 до 0,0001.

**Репрезентативный пример 2.** Оценить вероятность безотказной работы энергетической установки в течение  $t = 1,5 \cdot 10^4$  ч, если ее рабочий ресурс подчиняется нормальному закону распределения с параметрами  $m_t = 4,6 \cdot 10^4$  и  $\sigma_t = 10^4$  ч.

*Решение.* Находим квантиль

$$U_p = \frac{t - m_t}{\sigma_t} = \frac{1,5 \cdot 10^4 - 4,6 \cdot 10^4}{10^4} = -3,1.$$

По табл. 1. определяем, что  $P(t) = 0,999$ .

Помимо задачи определения оценки вероятности безотказной работы за данное время или за данную наработку, в практике встречается обратная задача - определение времени или наработки, соответствующих заданной вероятности безотказной работы. Значения этой наработки определяют с помощью квантиля нормированного нормального распределения  $t = m_t + U_p \sigma_t$ .

**Репрезентативный пример 3.** Оценить 80 %-ный ресурс  $t_{0,8}$  двигателя автомобиля, если известно, что долговечность двигателя ограничена по износу, ресурс подчиняется нормальному распределению с параметрами

$$m_t = 10^4 \text{ ч, } \sigma_t = 6 \cdot 10^3 \text{ ч.}$$

*Решение.* При  $P(t) = 0,8$  по табл. 4.6 определяем  $U_p = -0,842$ . Исходя из зависимости  $U_p = (t_{0,8} - m_t) / \sigma_t$ , получаем  $t_{0,8} = m_t + U_p \sigma_t = 10^4 - 0,842 \cdot 6 \cdot 10^3 = 4950$  ч.

**Репрезентативный пример 4.** При испытании агрегата установлено, что наработка на отказ  $T$  (случайная величина) распределена по нормальному закону с параметрами: среднее значение  $m_t = 12$  ч, а среднее квадратическое отклонение наработки на отказ  $\sigma_t = 0,8$  ч.

Найти вероятность безотказной работы агрегата в пределах не более  $t = 10$  ч.

*Решение.* Вероятность безотказной работы агрегата определим по формуле

$$P(t) = 0,5 - \Phi_0\left(\frac{t - m_t}{\sigma_t}\right).$$

По табл. 1 находим значение  $P(t)$  при  $U_p = -2,5$ :  $P(t) = 0,9938$ . По заданным значениям:

$$U_p = \frac{t - m_t}{\sigma_t} = \frac{10 - 12}{0,8} = -2,5$$

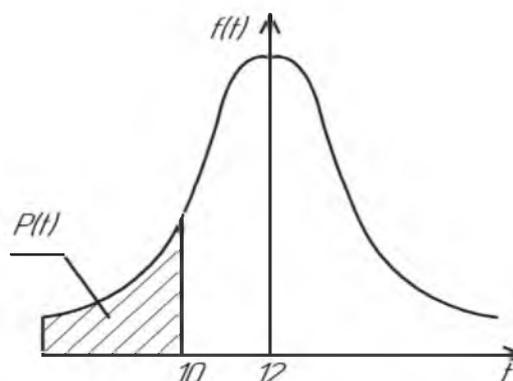


Рисунок 6 - График к задаче 5

**Репрезентативный пример 5.** Найти вероятность безотказной работы агрегата при  $t = 10$  ч, если среднее квадратическое отклонение наработки до отказа будет равно  $\sigma_t = 1,2$  ч, а средняя величина  $m_t = 12$  ч (рис. 6).

Решение.

$$U_p = \frac{t - m_t}{\sigma_t} = \frac{10 - 12}{1,2} = -1,667.$$

Из табл. 1 находим значение  $P(t)$  при  $U_p = -1,667$ ,  $P(t) = 0,9525$ .

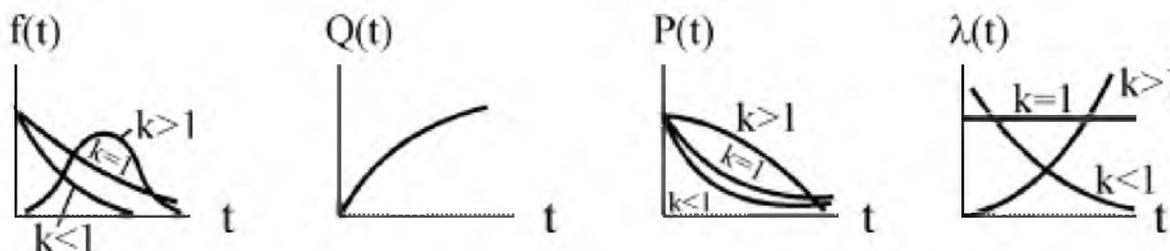


Рисунок 7 - Распределение Вейбулла

Плотность вероятности отказов этого распределения:  $f(t) = \lambda_0 t^{\alpha-1} \exp(-\lambda_0 t^\alpha)$ . Вероятность отсутствия отказа за время  $t$ :  $P(t) = \exp(-\lambda_0 t^\alpha)$ . Интенсивность отказов:  $\lambda(t) = \alpha \lambda_0 t^{\alpha-1}$ .

В выражениях выше  $\alpha$  и  $\lambda_0$  параметры закона распределения. Параметр  $\lambda_0$  определяет масштаб, при его изменении кривая распределения сжимается или растягивается. При  $\alpha = 1$  функция распределения Вейбулла совпадает с экспоненциальным распределением и может использоваться для описания хода отказов на 2-ом участке эксплуатации; при  $\alpha < 1$  интенсивность отказов будет монотонно убывающей функцией удовлетворительно подходит для описания хода отказов изделий, имеющих скрытые дефекты, но которые длительное время не стареют, опасность отказа имеет наибольшее значение в начальный период, а потом быстро падает; при  $\alpha > 1$  - монотонно возрастающей и подходит для описания 3-го участка (при  $\alpha = 3,3$  распределение Вейбулла близко к нормальному) эксплуатации изделия [10, 15].

Это обстоятельство дает возможность подбирать для опытных данных наиболее подходящие параметры  $\alpha$  и  $\lambda_0$ , с тем чтобы уравнение функции распределения наилучшим образом совпадало с опытными данными. Распределение Вейбулла имеет место для отказов, возникающих по причине усталости тела детали или поверхностных слоев (подшипники качения ( $\alpha = 1,4 - 1,7$ ), зубчатые передачи). Этот случай связан с развитием усталостной трещины в зоне

Анализируя результаты решения примеров 4 и 5, следует сделать вывод, что с точки зрения обеспечения надежности, параметры, имеющие меньшее рассеяние, более предпочтительны.

**Распределение Вейбулла.** Это распределение является универсальным законом надежности для случая, когда поток отказов не стационарный, т.е. плотность потока изменяется с течением времени (рис. 7). Используется для оценки надежности деталей и узлов машин, в частности, автомобилей, подъемно-транспортных и других машин [13].

местной концентрации напряжений, технологического дефекта или начального повреждения. Период времени до зарождения микротрещины характеризуется признаками внезапного отказа, а процесс разрушения - признаками износового отказа. Это распределение применяется также для отказов устройства, состоящего из последовательно соединенных дублированных элементов и других подобных случаев [11].

**Закон распределения Пуассона** применяют при решении многих практических задач для дискретных случайных величин. Этот закон применим там, где какие-либо точки или другие элементы независимо друг от друга занимают случайные положения и подсчитывается количество этих точек, попавших в некоторую область, т.е. он проявляется там, где имеет место поток событий. Примерами потоков служат запросы в справочном бюро, заправка автомобилей на бензоколонке, поступление вызовов на АТС, последовательность отказов элементов и многие другие.

Если количество испытаний  $n$  достаточно велико, а вероятность  $p$  появления события  $A$  в отдельном испытании весьма мала ( $0,05-0,1$  и меньше), то вероятность того, что в данной серии испытаний событие  $A$  появится ровно  $m$  раз, можно приближенно вычислить по формуле Пуассона:

$$P_m \approx \frac{\lambda^m}{m!} \cdot e^{-\lambda},$$

где  $\lambda$  - параметр распределения (некоторая положительная величина);  $t = 0, 1, 2, \dots$  - число появлений события  $A$ .

При больших значениях числа испытаний  $n$  и малых значениях вероятности  $p$  появлений события  $A$  параметр распределения равен  $\lambda = np$ . Закон Пуассона выражает распределение массовых ( $n$  велико) и редких ( $p$  мало) событий. Математическое ожидание и дисперсия для закона распределения Пуассона равны параметру распределения  $\lambda$ :  $m_x = D_x = \lambda$ .

**Репрезентативный пример 6.** Изделие содержит 10000 гаек. Вероятность выхода из строя одной гайки в течение месяца равна 0,0002. Найти вероятность того, что за месяц откажет ровно 1 гайка.

В данном случае количество «испытаний»  $n=10000$  велико, а вероятность «успеха» в каждом из них – мала:  $p=0,00002$ , поэтому используем формулу Пуассона:

$$P_m \approx \frac{\lambda^m}{m!} \cdot e^{-\lambda}$$

Вычислим:  $\lambda = 10000 \cdot 0,0002 = 2$  – по существу, это среднее ожидаемое количество вышедших из строя гаек.

Таким образом:

$$P_1 \approx \frac{2^1}{1!} \cdot e^{-2} = 2e^{-2} \approx 0,2707$$

– вероятность того, что за месяц из строя выйдет ровно  $m=1$  одна гайка (из 10 тысяч).

Ответ:  $\approx 0,2707$

**Репрезентативный пример 7.** Энергоустановка состоит из большого числа независимо работающих элементов с одинаковой вероятностью отказа за время  $T$ . Вероятность отказа одного элемента за время  $T$  равна 0,002. Найти вероятность того, что за время  $T$  откажут ровно 3 элемента, если число элементов  $n$  равно 1 000.

Решение. По условию  $n = 1\ 000$ ,  $p = 0,002$ ,  $m = 3$ . По формуле

$$P_m = \frac{\lambda^m}{m!} e^{-\lambda}$$

и  $\lambda = np$  определяем:

$$P_m = \frac{(P \cdot n)^m}{m!} e^{-P \cdot n} = \frac{(0,002 \cdot 1000)^3}{1 \cdot 2 \cdot 3} \cdot e^{-0,002 \cdot 1000} = 0,1804.$$

**Заключение.** Определение закона распределения отказов имеет большое значение при исследованиях и оценках надежности. Определение  $P(t)$  по одной и той же исходной информации о средней наработке до первого отказа  $T$ , но при различных предположениях о законе распределения может привести к существенно отличающимся результатам. Закон распределения отказов можно определить по экспериментальным данным, но для этого необходимо проведение большого числа опытов в идентичных условиях. Практически эти условия, как правило, трудно обеспечить.

За время эксплуатации успевает отказать лишь незначительная доля первоначально имевшихся объектов. Поэтому изучение условий, физических процессов при которых возникает тот или иной отказ весьма важен. При этом составляются модели возникновения отказов и соответствующие им законы распределения времени до появления отказа, что позволяет делать обоснованные предположения о законе распределения.

Изложенный выше материал относится к невосстанавливаемым изделиям, однако его также можно отнести и к первым отказам восстанавливаемых изделий, т.к. на течение этих отказов не влияет наличие или отсутствие ремонта после них.

Опасность отказов повышена в начале эксплуатации и быстро снижается по мере устранения скрытых дефектов, что характерно для участка I графика кривой интенсивности отказа  $\lambda$  и удовлетворительно описывается надёжность машин в процессе их приработки законом Вейбулла.

На 2-ом участке экспоненциальный закон надежности  $P(t) = e^{-\lambda t}$  приемлемо описывает распределение наработки на отказ сложных изделий. В период нормальной работы устройства, когда  $\lambda = const$ , законом равномерного распределения можно описывать внезапные отказы, когда они являются весьма редкими событиями (при очень высоких значениях вероятности безотказной работы  $P(t) \approx 1$ ), что характерно для участка II. Прогнозировать вероятный ход отказов на будущее и выявлять потребность в запасных частях для замены отказавших изделий можно при использовании экспоненциального закона надежности [13].

По окончании 2-го участка эксплуатации техники вследствие износа техники снижается ее сопротивляемость случайным перегрузкам и интенсивность отказов начинает расти – начинается 3-ий участок эксплуатации – стадия износовых от-

казов. С возрастанием интенсивности отказов изнашивающихся элементов без скрытых дефектов вследствие появления массового износа и старения элементов системы (участок III) приемлемо описывается нормальным законом распределения. Закон Вейбулла подходит для описания 2-го (когда  $\alpha = 1$ ) и 3-го участков (при  $\alpha = 3,3$ ) эксплуатации изделия.

Распределение Пуассона используется там, где имеет место поток событий, т.е. последовательность событий, которые наступают в случайные моменты времени. Примерами потоков служат запросы в справочном бюро, заправка автомобилей на бензоколонке, поступление вызовов на автоматическую телефонную станцию, последовательность отказов элементов и многие другие. Репрезентативные примеры наглядно показывают приемлемость применения законов распределения случайных величин для каждого конкретного случая.

Опытные данные должны служить средством проверки обоснованности прогноза, а не единственным источником данных о законе распределения. Такой подход необходим для оценки надежности новых изделий, для которых статистический материал весьма ограничен.

#### Литература

1. Байхельт Ф., Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход. Пер. с нем. – М.: Радио и связь, 1988. – 392 с.
2. Барлау Р., Прошан Ф. Математическая теория надежности. Пер. с англ. – М.: Сов. радио, 1969. – 488 с.
3. Брауде В.И., Семенов Л. Н. Надежность подъемно-транспортных машин: учебн. пособие для вузов. – М.: Высш. школа, 1979. – 400 с.
4. Волков Д. П., Николаев С. Н. Надежность строительных машин и оборудования: учебн. пособие для вузов. – М.: Высш. школа, 1979. – 400 с.
5. Вопросы математической теории надежности / Е. Ю. Барзилович, Ю. К. Беляев, В. А. Каптанов и др.: Под ред. Б. В. Гнеденко. – М.: Радио и связь, 1983. – 376 с.
6. Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. Математические методы в теории надежности. – М.: Наука, 1965. – 524 с.
7. Ивлев В. В. Надежность систем из однотипных элементов. – М.: Радио и связь, 1986. – 96 с.
8. Аблязов К.А., Катрюк И.С., Попов В.В. Основы теории надежности и диагностики: учебное пособие. – Новороссийск, 2009.
9. ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Основные понятия, термины определения».
10. Кокушин Н.Н. Надежность машин и оборудования / А.А. Тихонов, С.Г.Петров, В.Е.Головко, И.В. Ключкин. – СПб.: ГТУРП-СПб., 2013. – 67с.
11. Интернет-ресурс: Надежность технических систем и техногенный риск. URL: <http://www.obzh.ru/nad/4-2.html> (дата обращения 27.11.2019)
12. Сердцев Г.И. Метод расчета интенсивности отказов восстанавливаемых систем на этапе приработки: Межвуз. сб. науч. тр. Вып. 2. – Пенза: Пенз. политехн. ин-т, 1990. – 132 с.: 31 ил., 2 табл., библиогр. 93 назв.
13. Решетов Д.Н., Иванов С.А., Фадеев В.З. Надежность машин – М.: Высшая школа, 1988. – 238с.
14. Проников А.С. Надежность машин – М.: Машиностроение, 1978. – 592 с.
15. Шубин Р.А. Надёжность технических систем и техногенный риск: учебное пособие / Р.А. Шубин. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012.
16. Интернет-ресурс: Основные факторы эксплуатационной надежности мощных передающих установок. URL: <http://engjournal.ru/articles/1148/1148.pdf> (дата обращения 28.11.2019)

#### References

1. Bajhel't F., Franken P. Nadezhnost' i tekhnicheskoe obsluzhivanie. Matematicheskij podhod. Per. s nem. M.: Radio i svyaz', 1988.392 s.
2. Barlau R., Proshan F. Matematicheskaya teo-riya nadezhnosti. Per. s angl. M.: Sov. radio, 1969. 488 s.
3. Braude V.I., Semenov L. N. Nadezhnost' pod"-emno-transportnyh mashin: Uchebn. posobie dlya vuzov. M.: Vyssh. shkola, 1979. 400 s.
4. Volkov D. P., Nikolaev S. N. Nadezhnost' stroitel'nyh mashin i oborudovaniya: Uchebn. posobie dlya vuzov. M.: Vyssh. shkola, 1979. 400 s.
5. Voprosy matematicheskoy teorii nadezhnosti / E. YU. Barzilovich, YU. K. Belyaev, V. A. Kashtanov i dr.: Pod red. B. V. Gnedenko. M.: Radio i svyaz'. 1983. 376 s.
6. Gnedenko B. V., Belyaev YU. K., Solov'ev A. D. Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti. M.: Nauka, 1965. 524 s.
7. Ivlev V. V. Nadezhnost' sistem iz odnotip-nyh elementov. M.: Radio i svyaz'. 1986. 96 s.
8. Ablyazov K.A., Katryuk I.S., Popov V.V. Os-novy teorii nadezhnosti i diagnostiki. Uchebnoe poso-bie. Novorossiysk, 2009.
9. GOST 27.002-89 «Nadezhnost' v tekhnike. Os-novnye ponyatiya, terminy opredeleniya».
10. Kokushin N.N. Nadezhnost' mashin i oboru-dovaniya / Tihonov A.A., Petrov S.G., Golovko V.E., Klyushkin I.V.: SPbGTURP- SPb.:2013. - 67s.
11. Internet-resurs: Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem i tekhnogennyj risk. URL: <http://www.obzh.ru/nad/4-2.html> (data obrashcheniya 27.11.2019)
12. Serdcev G.I. Metod rascheta intensivnosti otkazov

- vosstanavlivaemyh sistem na etape prirabotki. Mezhvuz. sb. nauch. tr. Vyp. 2. – Penza: Penz. politekhn. in-t, 1990. – 132 s.: 31 il., 2 tabl., bibliogr. 93 nazv.
13. Reshetov D.N., Ivanov S.A., Fadeev V.Z. Nadezhnost' mashin – M.: Vysshaya shkola, 1988. – 238s.
14. Pronikov A.S. Nadezhnost' mashin – M.: Mashinostroenie, 1978. – 592 s.
15. SHubin R.A. Nadyozhnost' tekhnicheskikh sistem i tekhnogennyj risk: uchebnoe posobie / R.A. SHubin. – Tambov: Izd-vo FGBOU VPO «TGTU», 2012.
16. Internet-resurs: Osnovnye faktory eks-pluatacionnoj nadezhnosti moshchnyh peredayushchih usta-novok. URL: <http://engjournal.ru/articles/1148/1148.pdf> (data obrashcheniya 28.11.2019)

УДК 620.197.5

DOI: 10.34046/aumsuomt93/21

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ МОРСКИХ СООРУЖЕНИЙ С ПИТАНИЕМ ОТ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ

*В. М. Ву, аспирант*

*Б. Б. Чернов, доктор химических наук, профессор*

*А. М. Нугманов, научный сотрудник*

Приведена оценка экономической эффективности использования солнечных панелей для катодной защиты морских сооружений при различных источниках постоянного тока в сравнении с протекторной защитой. Такой анализ строится на примерерасчетаэлектрохимическойзащиты ппунтовой стенки с площадью защищаемой поверхности 2000 м<sup>2</sup>с оценкой стоимости катодных защит с питанием от выпрямительного устройства, с питанием от солнечных панелей с аккумуляторами, с питанием от солнечных панелей без аккумуляторов ипротекторной защиты. Результаты работы показали, что стоимость катодной защиты с питанием от солнечных панелей без аккумуляторов самая низкаяпосле 10лет эксплуатации.Катодная защита с питанием только от солнечных панелей без использования аккумуляторов наиболее выгодна в холодном климате, когда сроки службы аккумуляторов снижаются, и для сооружений, удаленных от централизованных источников электроэнергии, где оценка стоимости подвода стационарных источников электропитания к защищаемому сооружению затруднена из-за учета конкретных ситуаций.

**Ключевые слова:** катодная защита, коррозия, плотность тока, солнечная панель, гальваностатический режим, солевые катодные осадки, защитное покрытие, морская вода

Economic efficiency of using solar panels for the impressed current cathodic protection of offshore structures with various direct current sources was compared with the sacrificialanode cathodic protection. Such an analysis was based on the example of calculating the electrochemical protection of a sheet pile wall with a surface area of 2000 m<sup>2</sup> with an estimate of the cost of impressed currentcathodic protection powered by a rectifier device, powered by solar panels with batteries, powered by solar panels without batteries and sacrificialanode cathodic protection. The results showed that the cost of impressed currentcathodic protection powered by solar panels without batteries is the lowest after 10 years of operation. Cathodic protection powered only by solar panels without the use of batteries is most beneficial in cold climates, when battery life is reduced, and for facilities that are remote from centralized power sources, where the power supplying cost to the protected structure is difficult to estimate due to specific situations.

**Key words:** cathodic protection, corrosion, current density, solar panel, galvanostatic mode, calcareous deposits, protective coating, seawater

Самой эффективной защитой морских металлических сооружений является электрохимическая защита [1, 2]. Часто такие сооружения оказываются удаленными от стационарных источников электрического тока, а подвод к ним электропитания стоит очень дорого или затруднен, поэтому часто встает вопрос о целесообразности использования автономных источников постоянного тока. Одним из таких надежных источников постоянного тока являются солнечные панели, срок службы которых превышает 25 лет. Они имеют один существенный недостаток –не генерируют электроэнергию ночью и для непрерывности работы катодной защиты в состав таких

устройств должны входить аккумуляторы, которые имеют значительно меньший срок службы по сравнению с солнечными панелями и требуют периодической замены и обслуживания. Катодная защита морских сооружений сопровождается образованием на металлической поверхности солевых катодных осадков [3-6], которые обладают защитной способностью [7, 8], что позволяет отключать на определенный период ток катодной защиты, например, для ремонта или для замены анодов. В работах [9, 10] показано, чтокатодная защита от устройств, питающихся только от солнечных батарей обладает достаточной защитой при плотностях тока более 0,2 А/м<sup>2</sup>. Такая защита не