

УДК 62-192:52

С.В. Белодеденко, В.И. Гануш, С.В. Филипченков, Ю.Г. Цыбанёв

**МОДЕЛИ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ И
БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ОЦЕНКЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ**

Рассмотрены инженерные методы определения показателей надёжности и безопасности. Предложены ресурсные модели для определения вероятности безотказной работы при отказах внезапного и постепенного типа. Показано формирование функции безопасности для контроля технического состояния.

Ключевые слова: надёжность, безопасность, техническое состояние, ресурс оборудования.

Надёжность является важнейшим свойством технических систем, определяющим их качество. Существует пять групп показателей для характеристики этого свойства, что свидетельствует о его комплексности. Несмотря на это, большинство специалистов для количественной оценки надёжности используют вероятность безотказной работы (ВБР) R . Для оценки технического состояния дорогостоящих объектов длительного ресурса применяют оперативные показатели риска ρ и безопасности R_p : $\rho = 1 - R_p$. Они также определяются при помощи ВБР: $\rho = R^{-1} - 1$. В область практически интересных уровней надёжности, порядка 0.001...0.05, когда требуется принимать решение о продлении или прекращении эксплуатации объекта, для определения риска с ошибкой не более 5% можно использовать формулу $\rho = 1 - R$. Таким образом, ВБР может характеризовать как надёжность, так и безопасность технических систем.

Настоящие исследования посвящены анализу методов определения ВБР и имеют своей целью выбор алгоритма её нахождения, который был бы пригоден для диагностирования технического состояния объектов, эксплуатация которых связана со значительным потенциальным ущербом от отказа. К таковым объектам, как правило, относятся уникальные технические системы, для которых не существует, представительной информации об их отказах, невозможно провести испытания на надёжность такого объекта как единой системы. Следовательно, нормативные

апробированные математико-статистические методы для них непригодны. Поэтому оценка ВБР должна базироваться на минимальной апостериорной информации об эксплуатации объекта и должна учитывать изменение ВБР во времени. Подобным требованиям соответствуют вероятностно-физические методы исследования надёжности, связанные с природой отказа. С их помощью можно провести анализ надёжности отдельных структурных элементов технической системы, что экономнее, чем её отработка в целом. Кроме этого, появляется больше информации о слабых звеньях системы.

Однако, природа отказов существенно различна, деградиционные процессы в структурных элементах подчиняется разнообразным, в том числе противоречивым, закономерностям. Возникает опасность нарушения единой методологии надёжности, основанной на теории множеств. Избежать это позволяет ресурсный подход к оценке ВБР, который тесно связан с концепцией приемлемого риска [1].

Методы нахождения ВБР

В общем случае безотказная работа определяется условием непревышения действующего диагностического показателя x своих допустимых значений X , следующих из свойств технической системы:

$$R = P\{X > x\} = P\{X - x > 0\} = \int_{-\infty}^{\infty} f_x(x) \left[\int_x^{\infty} f_X(X) dX \right] dx, \quad (1)$$

где f_x и f_X – плотности вероятности распределений величин $F(x)$ и $F(X)$

Для различных сочетаний законов $F(x)$ и $F(X)$ имеются готовые решения для (1), которыми пользуются при вычислении ВБР.

В инженерной практике механических систем получил распространение метод, при котором ВБР оценивается по площади перекрытия графиков плотностей распределения $f(X)$ и $f(x)$ (A_1 и A_2) (штриховка, рис.1) [2]:

$$A_1 = \int_0^{x_0} f(x) dx, \quad A_2 = \int_{x_0}^{\infty} f(X) dX \quad (2)$$

Тогда ВБР определяется неравенством:

$$1 - A_1 - A_2 + A_1 \cdot A_2 < R < 1 - A_1 \cdot A_2 \quad (3)$$

Данный метод удобен, поскольку позволяет с минимальным риском установить предельную при диагностике величину x_0 [3]. Также для инженерных задач удобен метод нахождения ВБР из

графиков $F(x)$ и $F(X)$, тогда значение R устанавливается из условия $x_{\max} = X_{\min}$ (рис. 2). Этот метод целесообразно применять при недостаточном объёме эмпирических данных, а также когда выборка формируется, например, методом Монте-Карло и закон её распределения произвольный. Поскольку практический интерес представляет правая ветвь графика $f(x)$ и правая ветвь графика $f(X)$, то для оценки ВБР используют асимптотические распределения максимальных значений x и минимальных значений X [4].

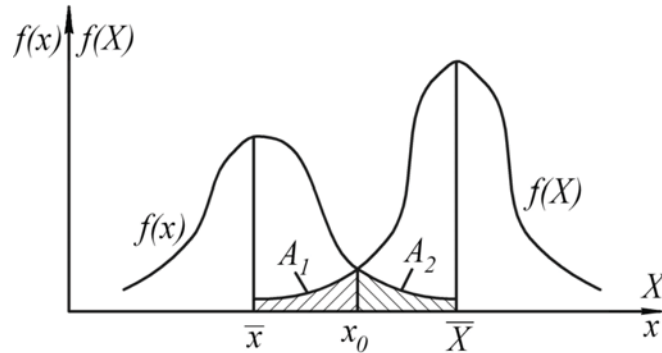


Рис. 1 – Плотность вероятности распределения величин x и X

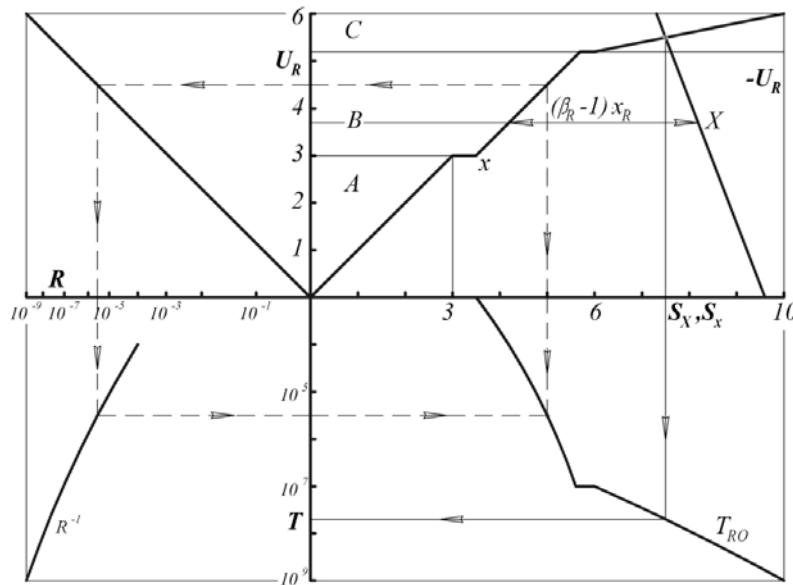


Рис. 2 – Схема формирования:

- а) показателей безопасности R и β_R при внезапных отказах для периодически-случайных процессов изменения величины x , распределение которой линейризовано в областях нормальных (проектных) (А), запроектных (В) и экстремально-аварийных (С) условий эксплуатации;
- б) кривой периодичности появления выбросов T_{RO} (пунктирные стрелки) и долговечности T_R при однократном воздействии для распределения допустимой величины X (сплошные стрелки).

Рассмотренные методы пригодны лишь для отказов внезапного (однократного) типа и не годятся для отказов постепенного типа, что хорошо понимают специалисты по общей теории надёжности [5]. Несмотря на это, представители вероятностно-физического направления надёжности пытаются адаптировать данные методы поиска ВБР для кумулятивных процессов, например, усталостного разрушения. В подобном случае неясно, что же принимать за величину \bar{x} . Очевидно, что медианное значение спектра напряжений для этого не подходит. Разработчики методов расчёта деталей машин на ограниченную долговечность считают, что отказ связан с вариациями предела выносливости σ_R (в качестве свойства механической системы X) и только максимальных (а не всех действующих, как в спектре) напряжений блока σ_{max} [6]. Тогда в качестве значений \bar{x} следует принимать медианное значение σ_{max} , что носит условный характер. Но самое главное, это максимальное значение может десятки тысяч раз превышать минимально возможные значения σ_R , а разрушения не произойдёт. Для преодоления этой коллизии предложено последовательно снижать предел выносливости, придав вероятностную трактовку характеристике $n_R = \sigma_{max}/\sigma_R$ и связав её со временем наработки t [2]. В такой методике, получившей название «метод квантиля» [6], устанавливается сразу ВБР, хотя продуктивнее было бы предварительно получить функцию распределения долговечностей. Последняя, являясь обратной функции вероятности отказа, служит исходной для получения изменения ВБР во времени $R(t)$.

Проблема могла бы решаться довольно просто, если в качестве значения \bar{x} принять некое эквивалентное напряжение σ_e , методы получения которого хорошо отработаны. Но тогда возникает вопрос, как установить его вариацию. Предлагается коэффициент вариации этого внешнего фактора принимать по вариации величины σ_{max} равной 0,1, или же приравнять его вариации предела выносливости [6]. Оба варианта безосновательны.

Наряду с нелогичностью подхода, основной недостаток метода оценки надёжности при постепенных отказах как вероятностной прочности связан с невозможностью корректного учёта фактора времени деградационного процесса предполагается не случайными процессами, а случайными величинами [7]. Поэтому целесообразно

оценивать ВБР по кинетическому процессу накопления повреждений посредством сравнения их текущих и допускаемого значений [8]. Подобный метод эффективен, когда диагностический показатель x напрямую связан с природой отказа (износ, трещина). Тогда допустимая величина X (предельный износ, критический размер трещины) постоянна. В общем случае величина X связана с процессом $x(t)$, кроме этого, остаётся для процесса усталости неоднозначной.

В связи с этим широко употребляемы математико-статистические методы оценки ВБР по интенсивности потока отказов. Например, при независимости случайных процессов изменения факторов x и X распространены непараметрические экспоненциальные модели:

$$R(t) = \exp[-a(1 - R_0)t], \quad (4)$$

где a – накопленное повреждение в виде относительной долговечности, R_0 – ВБР при мгновенном отказе.

Данная модель расходится с экспериментальными данными о распределении долговечностей при значительных повреждениях, порядка $a = 0.1$ и выше. То есть, когда объект по времени входит в зону эксплуатации с риском, близким к предельному, и необходимо решать вопрос о его эксплуатации или восстановлении.

Подобные модели могут быть построены на основании распределений Вейбулла, Эрланга, усечённому слева, обратному гауссовскому, но для их обоснования необходимо большое количество статистических данных об эксплуатационных отказах. Применительно к уникальным объектам длительного ресурса и повышенного риска такая информация отсутствует.

Ресурсная трактовка ВБР при мгновенных отказах реализуется посредством его вычисления через среднее число выбросов в единицу времени, которое выражается двумерной функцией плотности вероятности диагностического показателя x и его интенсивности [7]. Тогда ресурс (долговечность) $T = R^{-1}$ связан с периодами появления выбросов, кривую которых $T_{\text{НО}}$ (рис. 2) можно получить, зная их закон распределения.

Для этого используют асимптотические распределения экспоненциального и двойного экспоненциального типа [9]:

$$\left. \begin{aligned} P &= \exp[-0.5 \cdot (x/S_x)^2] \text{ область } B, \\ P &= \exp[-9 \cdot \ln(x/S_x)] \text{ область } C, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где P – вероятность, S_x – среднее квадратическое отклонение (СКО) показателя x в нормальных условиях эксплуатации.

В координатах квантиль нормального распределения вероятности U_R – СКО S_i графики распределения выбросов могут быть аппроксимированы прямыми участками (рис. 2), из которых ВБР может быть найдена по квантилям как:

$$\left. \begin{aligned} U_R &= \frac{X - \bar{x} - 0,5 \cdot S_x}{S_x + S_X} \text{ область B } (3 < U_R \leq 5.25), \\ U_R &= \frac{X - \bar{x} + 22 \cdot S_x}{\frac{16}{3} \cdot S_x + S_X} \text{ область C } (U_R > 5.25). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Предложенный график распределения $x(P)$ по форме вполне соответствует решению для функции распределения деформаций трубопроводов при землетрясениях, полученному методом интерполяционных полиномов [7]. Правомерность использования данной аппроксимации для выбросов подтверждено путём сравнения прогнозируемых и фактических сроков службы деталей механической системы пилигримового трубопрокатного стана, эксплуатация которой характеризуется перегрузками [10].

Избежать противоречий при получении функций надёжности и безопасности для отказов постепенного типа возможно, если в качестве показателей x и X использовать непосредственно время наработки t и ресурс (долговечность, срок службы) T . Тогда ВБР определяется при сравнении пары наработка t - ресурс T по их функциям распределения (рис. 3). В принципе, при таком подходе нет необходимости оценивать надёжность по средством ВБР, которая на протяжении большего периода эксплуатации нереальна (хоть и высока, но не проверяема и имеется шанс отказа).

По концепции приемлемого риска на основании принятой для отрасли частоты аварий устанавливается требуемый уровень безопасности $[R]$. Для него определяется индекс безопасности, как $\beta_R = X_{R-1}/x_R$, являющейся, по существу, гарантированным ресурсом. В логарифмических координатах функция $\beta_R(t)$ представляет прямую линию, чувствительную к наработке (рис. 4). Поэтому индекс безопасности удобен в качестве информативной характеристики технического состояния и до значений $\beta_R \approx 1$ гарантирует безопасную эксплуатацию. Пользователю не следует думать, что при использовании концепции приемлемого риска авария обязательно

произойдёт на его предприятии. Она произойдёт, если объект эксплуатируется бесконтрольно. При $\beta_R \rightarrow 1$ объект попадает в зону риска, его функцией безопасности становится функция распределения срока службы (рис. 4) и следует разрабатывать более глубокий план диагностики.

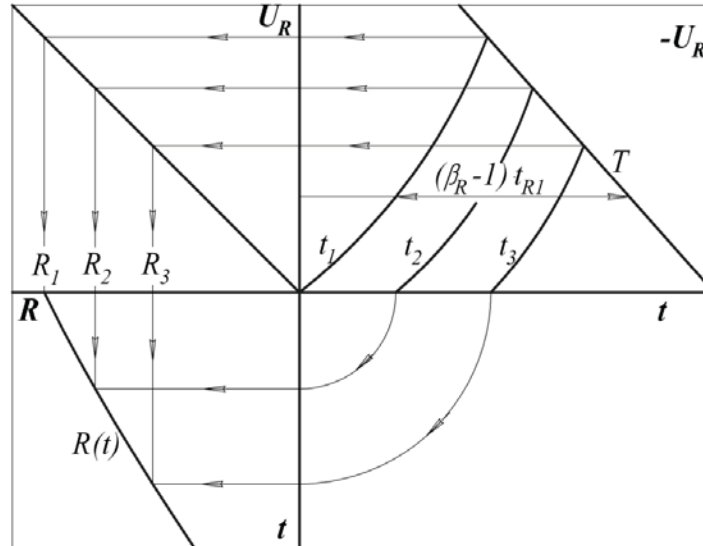


Рис. 3 – Схема формирования показателей R , β_R и функции безопасности $R(t)$ при постепенных отказах по функциям распределения фактического времени наработки t_i и прогнозируемого срока службы T

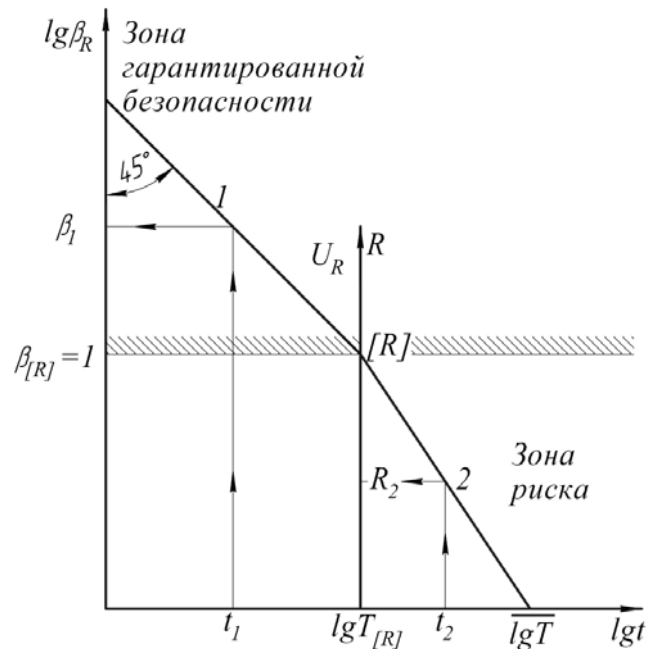


Рис. 4 - Схема оценки показателей безопасности при контроле технического состояния в моменты t_1 и t_2 по функциям индекса безопасности 1 и распределения срока службы 2

Благодаря ресурсным моделям ВБР гармонизируется оценка показателей надёжности и безопасности при постепенных и внезапных отказах. Для первых – формальный подход дополняется физическим смыслом, а для вторых – безопасность становится функцией времени эксплуатации. Тогда риск и безопасность можно использовать для оценки технического состояния силовых систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мониторинг состояния технологического оборудования и ресурсные подходы к диагностическим моделям /С.В. Белодеденко, В.Ю. Богдан, Е.И. Хребто, А.В. Ларионцев. //Металлург. и горноруд. пром-сть.- 2007. - №6. – С. 94-98.
2. Гребеник В.М., Цапко В.К. Надёжность металлургического оборудования (оценка эксплуатационной надёжности и долговечности): справочник – М.: Металлургия, 1980. – 344 с.
3. Техническая диагностика. Контроль и прогнозирование. / А.Я. Жук, Г.П. Малышев, Н.К. Желябина, О.М. Клевцов – Запорожье: Изд-во ЗГИА, 2008. – 500 с.
4. Болотин В.В., Чирков В.П. Асимптотические оценки для вероятности безотказной работы по модели типа нагрузка-сопротивление // Пробл. машиностроения и надёжности машин.- 1992.- №6.- с.3-10.
5. Александровская Л.Н., Афанасьев А.П., Лисов А.А. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем / М.: Логос, 2001.- 208 с.
6. Когаев В.П. Расчёты на прочность при напряжениях, переменных во времени / Под. ред. А.П. Гусенкова; 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Машиностроение, 1993.- 364 с.
7. Перов С.Н. Разработка методов оценки показателей надёжности трубопроводных систем при проектировании и эксплуатации: автореф. дисс. на соискание науч. степени докт. техн. наук: спец. 01.02.06. «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры» / С.Н. Перов.- Самара,- 2009.- 39 с.
8. Прогнозирование надёжности тракторов / В.Я. Анилович, А.С. Гринченко, В.Л. Литвиненко, И.Ш. Чернявский.- М.: Машиностроение, 1986.- 224 с.
9. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / М.: Машиностроение, 1984.- 312с.
10. Белодеденко С.В., Угрюмов Д.Ю. Эффективность прогнозирования долговечности узлов прокатного оборудования и деформационные критерии усталости // Metallurg. i gornorud. prom-st'.- 2003.- №5.- С. 86-90.