

Прогнозирование вероятностных характеристик технических систем

Виктор Каганов
viktorkaganov@gmail.com

This article discusses the need for predicting the probability characteristics of a technical system for the analysis of possible disrepairs as a way for ensuring system reliability.

На протяжении XX века познание из области научно-философских изысканий отдельных выдающихся личностей реально перешло в повседневную инженерную практику. Появились научно-технические задачи нового типа, ориентированные на создание и организацию функционирования сложных объектов, границы и состав которых априори далеко не очевидны их разработчику вследствие чрезвычайной новизны. При этом инженерные (технологические) разработки переплелись с чисто научными исследованиями, а по актуальности и затратности во много раз превзошли их.

Естественной методологической реакцией на усложнение и многоплановость задач стало формирование и применение системного подхода к их постановке и решению. Системный подход – направление методологии познания, в основе которого лежит исследование объектов как систем. Одним из направлений реализации системного подхода стало интенсивное внедрение в инженерную практику методов обеспечения надёжности создаваемых объектов. Это должно было произойти и произошло, так как прогнозируемые параметры надёжности (безотказность и эффективность) этих объектов рассматриваются нами на этапах разработки как единственные гарантии возможности их практического использования. По определению прогноз – это вероятностное суждение о будущем состоянии интересующего нас объекта (объекта исследования).

Любой создаваемый (разрабатываемый) объект независимо от его сложности и назначения может рассматриваться нами в нескольких различных проявлениях и определяться соответственно несколькими различными терминами. Мы будем пользоваться двумя терминами:

-- термином **изделие**, имея в виду единицу промышленной продукции, количество которой может измеряться в штуках, состав изделия и его иерархическая структура как объекта производства определяются комплектом конструкторской документации;

-- термином **техническая система (система)**, имея в виду некую совокупность взаимодействий между функциональными и конструктивными элементами, входящими в состав объекта, а также с окружающей средой и другими системами, с целью создания требуемого выходного эффекта. Объект как техническая система описывается (документируется) сетевой функциональной схемой – циклограммой (**СФСЦ**).

СФСЦ может иметь различную графическую конфигурацию, раскрывающую "топографию" происходящих в системе взаимодействий с привязкой этих действий к временной шкале τ . Помимо графического образа СФСЦ должна содержать смысловую информацию, раскрывающую физику происходящих взаимодействий и выходной эффект каждого из них (3). Необходимо отметить, что каждое из этих действий осуществляется соответствующей функциональной подсистемой, которая может быть представлена как фрагмент СФСЦ, дополняющий и расширяющий её информативность. Помимо этого в процессе проектирования объекта СФСЦ неизбежно дополняется "сопутствующими" взаимодействиями, без которых можно было бы и обойтись, однако они реально существуют вследствие принятых конструктивно-компоновочных решений и наличия внешних факторов различного происхождения.

Первоначальный вариант СФСЦ как правило носит укрупнённый характер, так как он формируется разработчиком на основе предыдущего опыта и ориентировочных оценок эффективности действий, вводимых в состав СФСЦ, конструкторские проработки на этом этапе носят сугубо предварительный характер в связи с чем оценки безотказности элементов конструкции не могут быть выполнены в нужном объёме. Совершенно естественно, что

СФСЦ должна дополняться и детализироваться непрерывно в процессе разработки проектной и конструкторской документации, а также в процессе отработочных испытаний технической системы и её частей.

Рассмотрим более подробно процедуру прогнозирования, имея в виду необходимость решения двух видов задач – обеспечения безотказности и эффективности системы.

Условия безотказной работы гипотетической системы A описываются (4) совокупностью уравнений работоспособности:

$$R_{AI}(S_1; S_2; \dots; S_n; \tau) \geq Q_{AI}(S_1; S_2; \dots; S_n; \tau)$$

$$R_{AII}(S_1; S_2; \dots; S_n; \tau) \geq Q_{AII}(S_1; S_2; \dots; S_n; \tau)$$

.....

$$R_{AN}(S_1; S_2; \dots; S_n; \tau) \geq Q_{AN}(S_1; S_2; \dots; S_n; \tau)$$

где I, II, \dots, N - символы возможных отказов элементов конструкции; R_A и Q_A - прочность и повреждающая нагрузка, соответствующие отказу каждого вида; τ - длительность работы системы или воздействия нагрузки; $S_1; S_2; \dots; S_n$ - производственные и эксплуатационные факторы, влияющие на прочность элементов конструкции и на уровни повреждающих нагрузок.

В вероятностной форме совокупность уравнений работоспособности имеют вид :

$$r_{AI} = \text{Вер}\{Q_{AI} > R_{AI}\} < [r_{AI}]_{lim}$$

$$r_{AII} = \text{Вер}\{Q_{AII} > R_{AII}\} < [r_{AII}]_{lim}$$

.....

$$r_{AN} = \text{Вер}\{Q_{AN} > R_{AN}\} < [r_{AN}]_{lim}$$

где $r_{AI}; r_{AII}; \dots; r_{AN}$ - риски отказов различного вида и $[r_{A..}]_{lim}$ - нормативные значения рисков отказа.

Аналогичной совокупностью уравнений описывается эффективность стемемы, с той лишь разницей, что в них рассматривается не превышение прочности над нагрузкой, а отклонение параметра, характеризующего выходной эффект системы, за допустимые пределы:

$$r_{EI.min} = \text{Вер}\{E_{I.min} < [E_{I.min}]_{lim}\} < [r_{EI.min}]_{lim}$$

$$r_{EI.max} = \text{Вер}\{E_{I.max} > [E_{I.max}]_{lim}\} < [r_{EI.max}]_{lim}$$

$$r_{EII.min} = \text{Вер}\{E_{II.min} < [E_{II.min}]_{lim}\} < [r_{EII.min}]_{lim}$$

$$r_{EII.max} = \text{Вер}\{E_{II.max} > [E_{II.max}]_{lim}\} < [r_{EII.max}]_{lim}$$

.....

$$r_{EN.min} = \text{Вер}\{E_{N.min} < [E_{N.min}]_{lim}\} < [r_{EN.min}]_{lim}$$

$$r_{EN.max} = \text{Вер}\{E_{N.max} > [E_{N.max}]_{lim}\} < [r_{EN.max}]_{lim}$$

где $r_{EI}; r_{EII}; \dots; r_{EN}$ - риск неэффективной работы исправной системы по различным оцениваемым параметрам выходного эффекта E и $[r_{E..}]_{lim}$ - нормативное значение риска неэффективной работы исправной системы.

Будем считать, что каждое уравнение работоспособности и соответствующее уравнение эффективности описывает действие одной из локальных функциональных подсистем, входящих в состав объекта. При разработке проекта эти уравнения должны быть решены, что по существу и является прогнозированием технических (эксплуатационных) характеристик создаваемого изделия, если условия обеспечения эффективности или безотказности какой-либо подсистемы не выполняются, разработчик должен принять необходимые меры.

Наиболее эффективным практическим приёмом прогнозирования эксплуатационно – технических характеристик системы является **анализ возможных отказов (АВО)**. В связи с этим следует обратить внимание на то обстоятельство, что СФСЦ как документ является визуализированным перечнем возможных отказов технической системы. Любое из

формирующих СФСЦ действий может не состояться (или произойти несвоевременно) – и это будет отказом, возможные причины и последствия которого требуют детального анализа, так как локальный отказ подсистемы может привести к отказу системы в целом.

Необходимо особо отметить, что разработчика (так же как и заказчика) интересуют технические характеристики всего множества изделий (систем) данного типа, которые могут быть изготовлены и использованы по назначению в будущем. Определив закон распределения выходного эффекта, разработчик тем самым получает прогноз интересующей его вероятностной характеристики изделия.

В рамках АВО прогнозирование осуществляется для каждой локальной подсистемы и достоверность такого прогноза зависит от двух условий :

условие первое – правильность математического описания зависимости выходного эффекта от параметров (свойств) элементов конструкции и действующих нагрузок (при оценке безотказности подсистемы выходным эффектом считаем запас прочности);

условие второе – достоверность исходных данных, используемых при решении уравнений, их соответствие реальным эксплуатационным значениям.

Можно считать, что первое условие соблюдено и уравнения, формирующие алгоритм вычисления выходного эффекта системы (подсистемы) идеально описывают её функционирование.

Говоря о достоверности исходных данных, мы имеем в виду прежде всего то обстоятельство, что их значения могут быть как детерминированными, так и случайными величинами. Это в равной степени относится и к параметрам элементов конструкции, и к нагрузкам, действующим в изделии. Именно в связи с тем, что в составе исходных данных имеются случайные величины, результаты проводимых расчётов не могут быть детерминированными величинами, а должны иметь характер вероятностных оценок.

Рассмотрим более подробно механизм формирования выходного эффекта и его расчёта как вероятностной характеристики изделия.

В общем случае получение какого-либо выходного эффекта является следствием взаимодействия двух (как минимум) функциональных элементов или элементов конструкции. В качестве взаимодействующих элементов следует рассматривать не только детали системы, но и всевозможные силовые и энергетические факторы как природного, так и искусственного происхождения. При вычислении значений выходного эффекта мы используем величины, характеризующие свойства взаимодействующих элементов (их параметры). В случае, когда эти свойства не являются детерминированными величинами, мы имеем дело с множествами, элементами которых являются случайные величины значений этих свойств. Очевидно, что в этом случае взаимодействие функциональных элементов (или элементов конструкции) выражается через эквивалентное (соответствующее) ему взаимодействие элементов множеств значений их свойств, это взаимодействие в дальнейшем будем называть **функциональным (парным) объединением множеств**. В результате такого объединения возникает множество значений выходного эффекта, соответствующего исследуемому взаимодействию. Необходимо отметить, что по сути дела единственным условием возможности функционального объединения двух множеств является наше понимание (математическое описание) механизма их взаимодействия, приводящего к получению какого-либо выходного эффекта, а также знание законов распределения свойств (параметров) взаимодействующих множеств.

Рассмотрим решение задачи по определению выходного эффекта простейшей системы, образующейся при функциональном объединении двух множеств элементов A_i и B_i с параметрами π_{Ai} и π_{Bi} . Множество элементов A характеризуется функцией плотности распределения вероятности параметра $f(\pi_A)$ в диапазоне значений $(\pi_A)_{min} \dots (\pi_A)_{max}$, и множество элементов B – функцией $f(\pi_B)$ в диапазоне значений $(\pi_B)_{min} \dots (\pi_B)_{max}$.

Считаем, что объединение элементов производится случайным образом (без какого-либо отбора), в результате чего возникает множество систем AB , характеризуемое функцией

плотности распределения вероятности выходного эффекта $f(E_{AB})$ в диапазоне значений $[E_{(AB)}]_{\min} \dots [E_{(AB)}]_{\max}$, конкретное значение которого для каждого экземпляра системы определяется уравнением $E_{AiBi} = E(\pi_{Ai}, \pi_{Bi})$.

Для решения задачи воспользуемся возможностью преобразования функции плотности распределения в сходящийся ряд с конечным числом членов. Характеристики одиночных элементов $f(\pi_A)$ и $f(\pi_B)$ разбиваются на U интервалов $\Delta\pi_{A(B)}$, каждый из которых характеризуется значением параметра $\pi_{A(B)1,2,\dots,U}$, соответствующим середине интервала, и долей элементов $\gamma_{A(B)1,2,\dots,U}$, вошедших в этот интервал – иными словами мы преобразуем функции плотности распределения параметров в гистограммы распределений.

Полученные при этом две совокупности долей элементов представляют собой два сходящихся ряда с конечным числом членов - $\gamma_{A1}, \gamma_{A2}, \dots, \gamma_{AU}$ и $\gamma_{B1}, \gamma_{B2}, \dots, \gamma_{BU}$, для которых

$$\sum_{i=1}^U \gamma_{Ai} = \gamma_{A1} + \gamma_{A2} + \dots + \gamma_{AU} = \int_{(\pi_A)_{\min}}^{(\pi_A)_{\max}} f(\pi_A) \cdot d\pi_A = 1,$$

$$\sum_{i=1}^U \gamma_{Bi} = \gamma_{B1} + \gamma_{B2} + \dots + \gamma_{BU} = \int_{(\pi_B)_{\min}}^{(\pi_B)_{\max}} f(\pi_B) \cdot d\pi_B = 1.$$

В результате перемножения рядов A и B формируется массив долей множества элементов систем AB , возникающих при попарном объединении и обладающих различными значениями выходного эффекта.

A B	γ_{A1}	γ_{A2}	γ_{A3}		γ_{Ai}		γ_{Au}
	π_{A1}	π_{A2}	π_{A3}		π_{Ai}		π_{Au}
γ_{B1} π_{B1}	$\gamma_{A1}\gamma_{B1}$ E_{A1B1}	$\gamma_{A2}\gamma_{B1}$ E_{A2B1}	$\gamma_{A3}\gamma_{B1}$ E_{A3B1}		$\gamma_{Ai}\gamma_{B1}$ E_{AiB1}		$\gamma_{Au}\gamma_{B1}$ E_{AuB1}
γ_{B2} π_{B2}	$\gamma_{A1}\gamma_{B2}$ E_{A1B2}	$\gamma_{A2}\gamma_{B2}$ E_{A2B2}	$\gamma_{A3}\gamma_{B2}$ E_{A3B2}		$\gamma_{Ai}\gamma_{B2}$ E_{AiB2}		$\gamma_{Au}\gamma_{B2}$ E_{AuB2}
γ_{B3} π_{B3}	$\gamma_{A1}\gamma_{B3}$ E_{A1B3}	$\gamma_{A2}\gamma_{B3}$ E_{A2B3}	$\gamma_{A3}\gamma_{B3}$ E_{A3B3}		$\gamma_{Ai}\gamma_{B3}$ E_{AiB3}		$\gamma_{Au}\gamma_{B3}$ E_{AuB3}
γ_{Bi} π_{Bi}	$\gamma_{A1}\gamma_{Bi}$ E_{A1Bi}	$\gamma_{A2}\gamma_{Bi}$ E_{A2Bi}	$\gamma_{A3}\gamma_{Bi}$ E_{A3Bi}		$\gamma_{Ai}\gamma_{Bi}$ E_{AiBi}		$\gamma_{Au}\gamma_{Bi}$ E_{AuBi}
γ_{Bu} π_{Bu}	$\gamma_{A1}\gamma_{Bu}$ E_{A1Bu}	$\gamma_{A2}\gamma_{Bu}$ E_{A2Bu}	$\gamma_{A3}\gamma_{Bu}$ E_{A3Bu}		$\gamma_{Ai}\gamma_{Bu}$ E_{AiBu}		$\gamma_{Au}\gamma_{Bu}$ E_{AuBu}

Рис. 1

Массив парных произведений членов этих рядов образует прямоугольную матрицу попарного объединения взаимодействующих элементов в систему. Не представляет труда сформировать ещё один интересующий нас массив данных – это массив значений выходного эффекта множества возникших систем AB , почленно соответствующий массиву долей этого множества. Для удобства практического применения объединяем оба массива в одну рабочую таблицу, имеющую структуру прямоугольной матрицы попарного объединения, см. Рис. 1. В этой таблице $\gamma_{Ai} \cdot \gamma_{Bi} = \gamma_{AiBi}$ - доля систем, обладающих выходным эффектом $E_{AiBi} = E(\pi_{Ai}, \pi_{Bi})$, образовавшихся в результате объединения элементов с параметрами $\pi_{Ai} \pm \Delta\pi_A/2$ и $\pi_{Bi} \pm \Delta\pi_B/2$. Таблица содержит полную информацию о функции плотности распределения выходного эффекта множества систем AB .

Однако такая форма записи этой функции не удобна как для визуального восприятия и интерпретации, так и для практического использования в последующих расчётах, поэтому мы проводим некоторую реорганизацию имеющейся информации о распределении выходного эффекта.

Суть реорганизации заключается в том, что из имеющегося в таблице массива значений $E_{A..B..}$ и $\gamma_{A..B..}$ мы формируем гистограмму распределения выходного эффекта системы AB , для чего:

- разбиваем диапазон значений выходного эффекта системы $[E_{(AB)}]_{\min} \dots [E_{(AB)}]_{\max}$ на w интервалов шириной ΔE_{AB} со средними значениями выходного эффекта $E_{(AB)1}, E_{(AB)2}, \dots, E_{(AB)w}$, где $E_{(AB)1} < E_{(AB)2} < \dots < E_{(AB)i} < \dots < E_{(AB)w}$;

- в каждый интервал делается выборка соответствующих ему значений долей систем, их сумма $\sum \gamma_{E_{(AB)i}} = \gamma_{\Sigma i}^*$ представляет собой долю систем, образованных случайным образом из элементов A и B , и имеющих выходной эффект $E_{(AB)i} \pm \Delta E_{AB}/2$.

Совокупность полученных значений $\gamma_{\Sigma 1}^*, \gamma_{\Sigma 2}^*, \dots, \gamma_{\Sigma w}^*$ совместно с имеющейся совокупностью (шкалой) значений выходного эффекта $E_{(AB)1}, E_{(AB)2}, \dots, E_{(AB)w}$ представляет собой гистограмму распределения выходного эффекта множества систем AB .

Не требует особых пояснений то обстоятельство, что полученная гистограмма является по своей сути разложением в ряд функции плотности распределения выходного

эффекта $f(E_{AB})$ и $\int_{[E_{(AB)}]_{\min}}^{[E_{(AB)}]_{\max}} f(E_{AB}) \cdot dE_{AB} = \gamma_{\Sigma 1}^* + \gamma_{\Sigma 2}^* + \dots + \gamma_{\Sigma w}^* = 1$. Получение интересующей нас

вероятностной характеристики системы позволяет считать поставленную задачу решённой. Более того, полученная функция (её гистограмма) может быть в свою очередь использована для расчета вероятностных характеристик более сложной системы, в состав которой система AB входит как составная часть (подсистема).

Как пример фнкционального объединения представляет интерес случай, когда в качестве системы рассматриваются элемент конструкции и действующая на него повреждающая нагрузка.

В этом случае $f(\pi_A) = f(Q)$ - функция плотности распределения повреждающей нагрузки и соответственно $f(\pi_B) = f(R)$ - функция плотности распределения прочности элементов конструкции. В гистограммах этих функций мы имеем π_{Ai} - нагрузка, соответствующая i -тому интервалу распределения повреждающей нагрузки, π_{Bi} - прочность элементов конструкции i -того интервала прочностной характеристики, при ширине интервалов $\Delta\pi_A = \Delta\pi_B$.

Выходным эффектом в такой системе является запас прочности $E_{AB} = \Delta R = \pi_B - \pi_A$. Функция плотности распределения запаса прочности является той самой вероятностной характеристикой, которую нам необходимо определить.

На рис. 2 приведена схема, иллюстрирующая процесс формирования функции плотности распределения запаса прочности элемента конструкции.

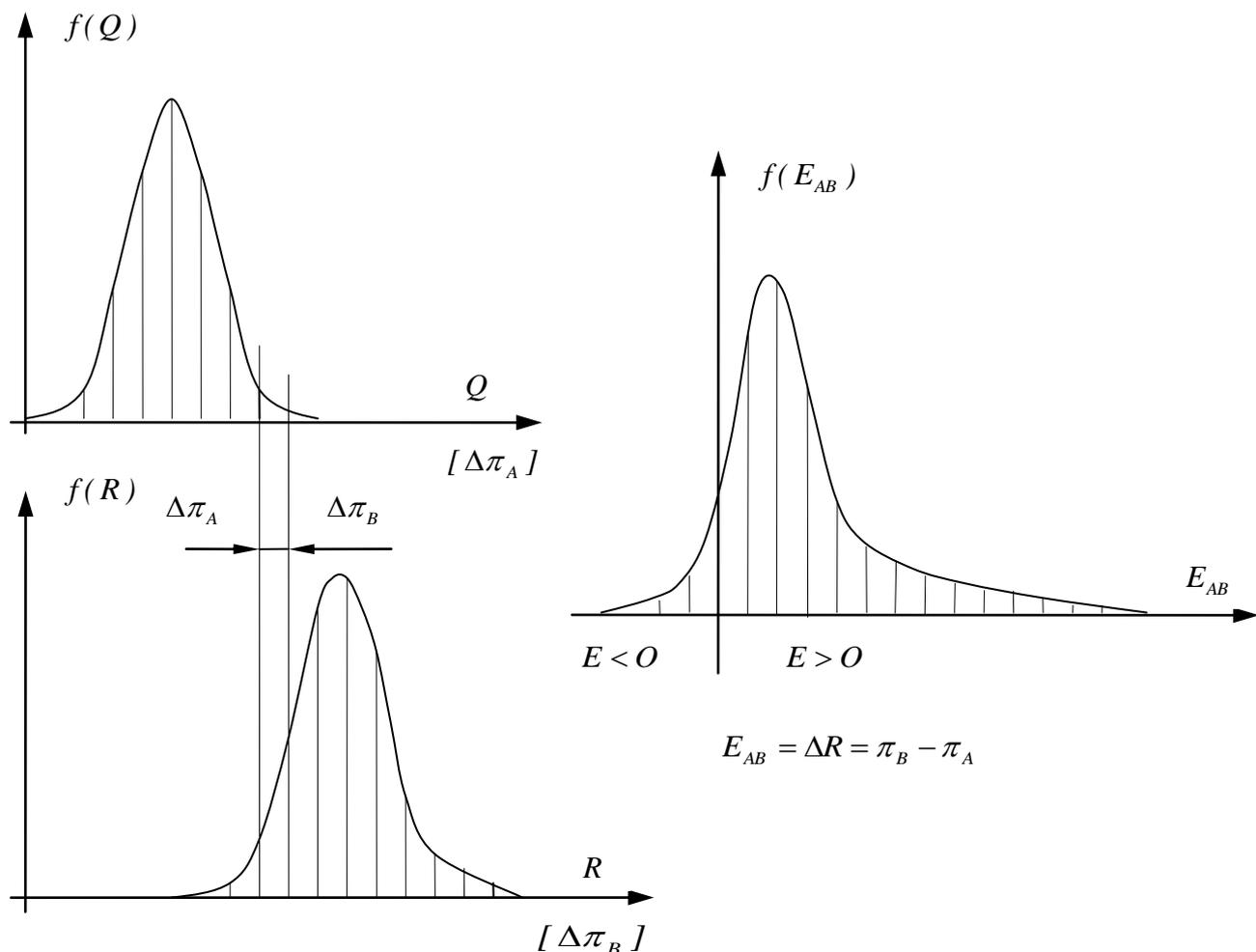


Рис. 2. Схема формирования функции плотности распределения запаса прочности элемента конструкции.

На рис.3 приведена таблица функционального объединения двух множеств – множества значений прочности элементов конструкции B и множества значений повреждающей нагрузки A , действующей на эти элементы. В этой таблице $\gamma_{Ai} \gamma_{Bj} = \gamma_{Ai, Bj}$.

A \ B	γ_{A1}	γ_{A2}	γ_{A3}	γ_{A4}	γ_{A5}	γ_{A6}	γ_{A7}	γ_{A8}	γ_{A9}	γ_{A10}
	π_{A1}	π_{A2}	π_{A3}	π_{A4}	π_{A5}	π_{A6}	π_{A7}	π_{A8}	π_{A9}	π_{A10}
γ_{B6} π_{B6}	$\gamma_{A1,B6}$ $5\Delta\pi$	$\gamma_{A2,B6}$ $4\Delta\pi$	$\gamma_{A3,B6}$ $3\Delta\pi$	$\gamma_{A4,B6}$ $2\Delta\pi$	$\gamma_{A5,B6}$ $\Delta\pi$	$\gamma_{A6,B6}$ 0	$\gamma_{A7,B6}$ $-\Delta\pi$	$\gamma_{A8,B6}$ $-2\Delta\pi$	$\gamma_{A9,B6}$ $-3\Delta\pi$	$\gamma_{A10,B6}$ $-4\Delta\pi$
γ_{B7} π_{B7}	$\gamma_{A1,B7}$ $6\Delta\pi$	$\gamma_{A2,B7}$ $5\Delta\pi$	$\gamma_{A3,B7}$ $4\Delta\pi$	$\gamma_{A4,B7}$ $3\Delta\pi$	$\gamma_{A5,B7}$ $2\Delta\pi$	$\gamma_{A6,B7}$ $\Delta\pi$	$\gamma_{A7,B7}$ 0	$\gamma_{A8,B7}$ $-\Delta\pi$	$\gamma_{A9,B7}$ $-2\Delta\pi$	$\gamma_{A10,B7}$ $-3\Delta\pi$
γ_{B8} π_{B8}	$\gamma_{A1,B8}$ $7\Delta\pi$	$\gamma_{A2,B8}$ $6\Delta\pi$	$\gamma_{A3,B8}$ $5\Delta\pi$	$\gamma_{A4,B8}$ $4\Delta\pi$	$\gamma_{A5,B8}$ $3\Delta\pi$	$\gamma_{A6,B8}$ $2\Delta\pi$	$\gamma_{A7,B8}$ $\Delta\pi$	$\gamma_{A8,B8}$ 0	$\gamma_{A9,B8}$ $-\Delta\pi$	$\gamma_{A10,B8}$ $-2\Delta\pi$
γ_{B9} π_{B9}	$\gamma_{A1,B9}$ $8\Delta\pi$	$\gamma_{A2,B9}$ $7\Delta\pi$	$\gamma_{A3,B9}$ $6\Delta\pi$	$\gamma_{A4,B9}$ $5\Delta\pi$	$\gamma_{A5,B9}$ $4\Delta\pi$	$\gamma_{A6,B9}$ $3\Delta\pi$	$\gamma_{A7,B9}$ $2\Delta\pi$	$\gamma_{A8,B9}$ $\Delta\pi$	$\gamma_{A9,B9}$ 0	$\gamma_{A10,B9}$ $-\Delta\pi$
γ_{B10} π_{B10}	$\gamma_{A1,B10}$ $9\Delta\pi$	$\gamma_{A2,B10}$ $8\Delta\pi$	$\gamma_{A3,B10}$ $7\Delta\pi$	$\gamma_{A4,B10}$ $6\Delta\pi$	$\gamma_{A5,B10}$ $5\Delta\pi$	$\gamma_{A6,B10}$ $4\Delta\pi$	$\gamma_{A7,B10}$ $3\Delta\pi$	$\gamma_{A8,B10}$ $2\Delta\pi$	$\gamma_{A9,B10}$ $\Delta\pi$	$\gamma_{A10,B10}$ 0
γ_{B11} π_{B11}	$\gamma_{A1,B11}$ $10\Delta\pi$	$\gamma_{A2,B11}$ $9\Delta\pi$	$\gamma_{A3,B11}$ $8\Delta\pi$	$\gamma_{A4,B11}$ $7\Delta\pi$	$\gamma_{A5,B11}$ $6\Delta\pi$	$\gamma_{A6,B11}$ $5\Delta\pi$	$\gamma_{A7,B11}$ $4\Delta\pi$	$\gamma_{A8,B11}$ $3\Delta\pi$	$\gamma_{A9,B11}$ $2\Delta\pi$	$\gamma_{A10,B11}$ $\Delta\pi$
γ_{B12} π_{B12}	$\gamma_{A1,B12}$ $11\Delta\pi$	$\gamma_{A2,B12}$ $10\Delta\pi$	$\gamma_{A3,B12}$ $9\Delta\pi$	$\gamma_{A4,B12}$ $8\Delta\pi$	$\gamma_{A5,B12}$ $7\Delta\pi$	$\gamma_{A6,B12}$ $6\Delta\pi$	$\gamma_{A7,B12}$ $5\Delta\pi$	$\gamma_{A8,B12}$ $4\Delta\pi$	$\gamma_{A9,B12}$ $3\Delta\pi$	$\gamma_{A10,B12}$ $2\Delta\pi$
γ_{B13} π_{B13}	$\gamma_{A1,B13}$ $12\Delta\pi$	$\gamma_{A2,B13}$ $11\Delta\pi$	$\gamma_{A3,B13}$ $10\Delta\pi$	$\gamma_{A4,B13}$ $9\Delta\pi$	$\gamma_{A5,B13}$ $8\Delta\pi$	$\gamma_{A6,B13}$ $7\Delta\pi$	$\gamma_{A7,B13}$ $6\Delta\pi$	$\gamma_{A8,B13}$ $5\Delta\pi$	$\gamma_{A9,B13}$ $4\Delta\pi$	$\gamma_{A10,B13}$ $3\Delta\pi$
γ_{B14} π_{B14}	$\gamma_{A1,B14}$ $13\Delta\pi$	$\gamma_{A2,B14}$ $12\Delta\pi$	$\gamma_{A3,B14}$ $11\Delta\pi$	$\gamma_{A4,B14}$ $10\Delta\pi$	$\gamma_{A5,B14}$ $9\Delta\pi$	$\gamma_{A6,B14}$ $8\Delta\pi$	$\gamma_{A7,B14}$ $7\Delta\pi$	$\gamma_{A8,B14}$ $6\Delta\pi$	$\gamma_{A9,B14}$ $5\Delta\pi$	$\gamma_{A10,B14}$ $4\Delta\pi$
γ_{B15} π_{B15}	$\gamma_{A1,B15}$ $14\Delta\pi$	$\gamma_{A2,B15}$ $13\Delta\pi$	$\gamma_{A3,B15}$ $12\Delta\pi$	$\gamma_{A4,B15}$ $11\Delta\pi$	$\gamma_{A5,B15}$ $10\Delta\pi$	$\gamma_{A6,B15}$ $9\Delta\pi$	$\gamma_{A7,B15}$ $8\Delta\pi$	$\gamma_{A8,B15}$ $7\Delta\pi$	$\gamma_{A9,B15}$ $6\Delta\pi$	$\gamma_{A10,B15}$ $5\Delta\pi$
γ_{B16} π_{B16}	$\gamma_{A1,B16}$ $15\Delta\pi$	$\gamma_{A2,B16}$ $14\Delta\pi$	$\gamma_{A3,B16}$ $13\Delta\pi$	$\gamma_{A4,B16}$ $12\Delta\pi$	$\gamma_{A5,B16}$ $11\Delta\pi$	$\gamma_{A6,B16}$ $10\Delta\pi$	$\gamma_{A7,B16}$ $9\Delta\pi$	$\gamma_{A8,B16}$ $8\Delta\pi$	$\gamma_{A9,B16}$ $7\Delta\pi$	$\gamma_{A10,B16}$ $6\Delta\pi$

Рис. 3. Таблица функционального объединения двух множеств – множества значений прочности элементов конструкции π_{Ai} и множества значений повреждающей нагрузки π_{Bi}

Имеющаяся в таблице информация легко преобразуется в гистограмму распределения запаса прочности элемента конструкции по отношению к действующей на него повреждающей нагрузке. Полученная гистограмма имеет $u = m + n - 1$ интервалов $\Delta E_{AB} = \Delta \pi_A = \Delta \pi_B$, где m – количество интервалов $\Delta \pi_B$ в прочностной характеристике элемента конструкции, n – количество интервалов $\Delta \pi_A$ в распределении повреждающей нагрузки. Доля $\gamma_{E_{AB}i}^*$ систем „элемент конструкции-нагрузка”, формирующих i -тый интервал гистограммы запаса прочности равна сумме долей соответствующего диагонального „нисходящего” ряда.

Распределение запаса прочности делится на две области:

- область работоспособных состояний $E_{AB} = \Delta R \geq 0$;
- область аварийных состояний $E_{AB} = \Delta R < 0$.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Зажигаев Л.С., Кишьян А.А., Романиков Ю.И.** Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента.- М.: Атомиздат, 1978.-230с.
2. **Каганов В.Л.** Применение обобщённой модели надёжности к решению задач оптимального резервирования.- В сб. Вибрационная прочность и надёжность двигателей и систем летательных аппаратов.- Куйбышев, КуАИ, 1986.- с.55-61.
3. **Каганов В.Л.** Инженерная логика обеспечения надёжности технических систем. Вестник Дома учёных Хайфы, том XX, июнь 2010,-с.34-42.
4. **Каганов В.Л.** Инженерная логика обеспечения надёжности сложных систем. Кфар-Саба, 2007.-55с.
5. **Ларичев О.И.** Наука и искусство принятия решений. М.: Наука, 1979.-200с.
6. **Хевиленд Р.** Инженерная надёжность и расчёт на долговечность.- Пер. с англ.- М.-Л.: Энергия, 1966.-231с.