

Модели надёжности сложных технических систем

Виктор Каганов (M.Sc)

viktorkaganov@gmail.com

This article outlines the basic principles of the generalized model for reliability of engineering structures as a viable alternative to the mathematical and physical models.

1. Введение

Прошедший век занимает совершенно особое место в истории человеческой цивилизации как эпоха выдающихся достижений практически во всех областях науки и техники. Познание из области научно-философских изысканий отдельных выдающихся личностей реально перешло в повседневную инженерную практику. При этом инженерные (технологические) разработки переплелись с чисто научными исследованиями, а по актуальности и затратности во много раз превосходили их.

Возникшие обстоятельства явились причиной формирования надёжности как прикладной науки, призванной обеспечить успешность реализации научно-технических проектов, так как прогнозируемые параметры надёжности (безотказность и эффективность) этих объектов рассматриваются нами на этапах разработки как единственные гарантии возможности их практического использования. Этот процесс активно шел по двум основным направлениям :

- во первых как распространение математического аппарата теории вероятностей и статистики на задачи обеспечения надёжности абстрактных (обезличенных) изделий, приведшее к созданию математической модели надёжности ;

- во вторых как накопление и документирование бесценного научного и инженерного опыта конкретных людей (сегодня зачастую уже безвестных), собранного "с бору по сосенке" при исследовании аварий и отказов создаваемых ими изделий, приведшее к формированию физических моделей надёжности „нагрузка – прочность", "параметр – поле допуска" и других.

В конечном счёте (в 60-е – 70-е годы) оба эти направления сформировались, причём доминирующее положение в плане научной трактовки проблем надёжности заняла математическая (статистическая) модель, ставшая базовой моделью во всех основополагающих нормативных документах (ГОСТ-ах, ОСТ-ах и т.п.) и в подавляющем большинстве учебных пособий всех уровней. Математическая модель с самого начала очень хорошо "легла" на радиотехнические, электронные и т.п. приборы, основу конструкции которых составляют большие количества однотипных (иногда тысячи) электро-радио элементов. Под эту модель была разработана и стандартизована номенклатура нормируемых показателей надёжности и соответствующая терминология, предопределившая круг решаемых задач и логику принятия технических решений [1], [2].

Физические модели оказались за бортом нормативно – технических документов союзного и отраслевого уровней – попросту говоря за бортом "большой науки". В то же время они были освоены профессионалами – практиками таких отраслей как моторостроение, авиастроение, атомная техника, ракетно-космическая техника, энергетика, судостроение и многих других как реальный инструмент обеспечения работоспособности создаваемых изделий. При этом физические модели не приобрели статуса моделей надёжности, а существовали как частные расчётные оценки конкретных видов прочности, устойчивости или эффективности различных технических устройств. По существу сложившаяся ситуация означала, что надёжность как наука не создала единой методологии обеспечения надёжности как важнейшего свойства создаваемых объектов.

В таких условиях при создании сложных объектов, в состав которых входят изделия

различных типов, неизбежно возникали организационно-технические противоречия ("конфликты интересов") между разработчиками, а также между разработчиками и заказчиком. Организационная составляющая разногласий устранялась всегда без особых проблем принятием административных решений, которые фактически развязывали разработчику руки и в то же время не устраняли реально существующих противоречий. Следуя принципу "спасение утопающих – дело рук самих утопающих", разработчики были вынуждены создавать собственные частные методики решения задач обеспечения надёжности – своего рода *know – how* конкретных специалистов, основанные на их видении реальных инженерных проблем надёжности.

2. Модели надёжности

Реальная практика инженерных исследований уже много десятилетий в основном ориентирована на решение проектно-конструкторских и производственных задач, возникающих при разработке объектов (изделий) различного назначения. Не углубляясь в подробности, и вне зависимости от планируемого выходного эффекта, можно уверенно говорить о том, что вся совокупность задач, решаемых разработчиком изделия, направлена на обеспечение его эффективности и безотказности, иными словами на обеспечение надёжности изделия. По существу речь идёт о прогнозировании вероятностных технических характеристик изделия и обеспечении их реального соответствия предъявленным требованиям. Такой подход справедлив как по отношению к изделиям массового (серийного) производства, так и к эксклюзивным объектам штучного изготовления. В любом случае прогноз (расчётный или экспериментальный) относится к конкретному экземпляру изделия как к одному из множества изделий, которые могут быть изготовлены в соответствии с разработанной конструкторской и технологической документацией.

Очевидно, что особенностью положения разработчика изделия на всех этапах разработки является необходимость принятия однозначных (и правильных) решений на базе вероятностных (сомнительных) оценок.

Говоря о факторах, в наибольшей степени влияющих на суть и логику решений, принимаемых разработчиком объекта, следует прежде всего назвать:

1. Техническое задание на разработку. Это документ, задающий в форме технических требований облик изделия, условия его эксплуатации, его параметры и выходной эффект, а также требования к его надёжности.

2. Новизна создаваемого изделия. При создании изделия, обладающего высокой новизной, разработчик сталкивается с существенным дефицитом знаний и опыта, необходимых для решения конкретных проектных и технологических проблем, а также с отсутствием или недостаточностью источников информации. В связи с этим реальный процесс создания такого изделия неизбежно сопровождается на каждом этапе совершением ряда более или менее существенных ошибок, которые вносятся в техническую документацию при её разработке и могут в дальнейшем явиться причиной отказов изделия или его неэффективной работы. Имеются в виду не злонамеренные ошибки, а нормальный процесс проектирования, когда разработчик вынужден принимать решения, опираясь лишь на те знания, которыми он располагает в момент принятия решения.

3. Применяемая разработчиком модель надёжности. О первых двух факторах можно говорить как о факторах, ставящих перед разработчиком задачи, требующие решения, в то время как применённая модель надёжности определяет реальную логику (и даже технологию) принятия решений, включая пути выявления и устранения проектных и конструкторских ошибок.

Рассмотрим гипотетическое простейшее изделие - изделие, обладающее всего одним видом выходного эффекта и лишь одним видом возможного отказа. По отношению к такому изделию можно считать, что его эффективность $E = I$ при нахождении изделия в работоспособном состоянии. В этом случае можно считать, что надёжность изделия равна вероятности его безотказной работы.

Понятием, наиболее полно выражающим суть нашего понимания надёжности, является ресурсная характеристика изделия. величиной, формирующей эту характеристику, является продолжительность работы изделия до отказа (время безотказной работы). В качестве ресурсной характеристики, как правило, рассматривается функция плотности распределения времени безотказной работы $f(\tau)$ изделий множества, к которому принадлежит интересующее нас изделие. На рис.1 приведена ресурсная характеристика гипотетического изделия, имеющая в своём составе типичные для многих видов изделий участки начальных (Н), случайных (С) и износных (И) отказов. Ресурсные характеристики такого типа хорошо известны по статистическим исследованиям технических и биологических объектов.

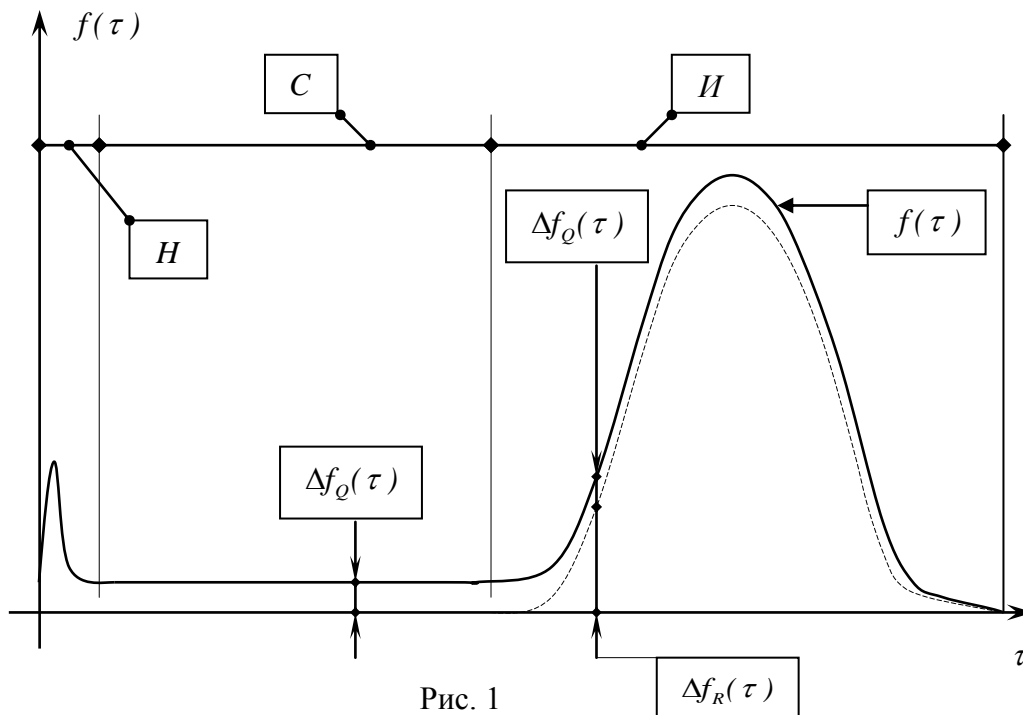


Рис. 1

Ресурсная характеристика сложного изделия имеет точно такой же вид и обладает аналогичными участками (Н, С, И), но формируется за счёт различных отказов, которые могут возникать в процессе работы такого изделия.

2.1 Математическая модель надёжности

В качестве базовой функции, используемой при проведении расчётных оценок надёжности создаваемых объектов, а также при формировании логики принятия инженерных решений, математическая модель использует зависимость интенсивности отказов от времени $\lambda(\tau)$. Можно считать, что эта зависимость определённым образом имитирует ресурсную характеристику, обладающая также как и $f(\tau)$ тремя характерными участками.

Интенсивность отказов численно равна числу объектов, отказавших в единицу времени, отнесенному к числу объектов, безотказно проработавших в течение контролируемого интервала времени:

$$\lambda_{\tau} = \frac{n_{\tau}}{[N - n_{\tau}] \cdot \Delta\tau}$$

- интенсивность отказов объектов некоего множества в контролируемом интервале времени $\Delta\tau$, где N – общее число объектов, функционировавших в контролируемом интервале времени, n_{τ} -- число объектов, вышедших из строя в контролируемом интервале времени.

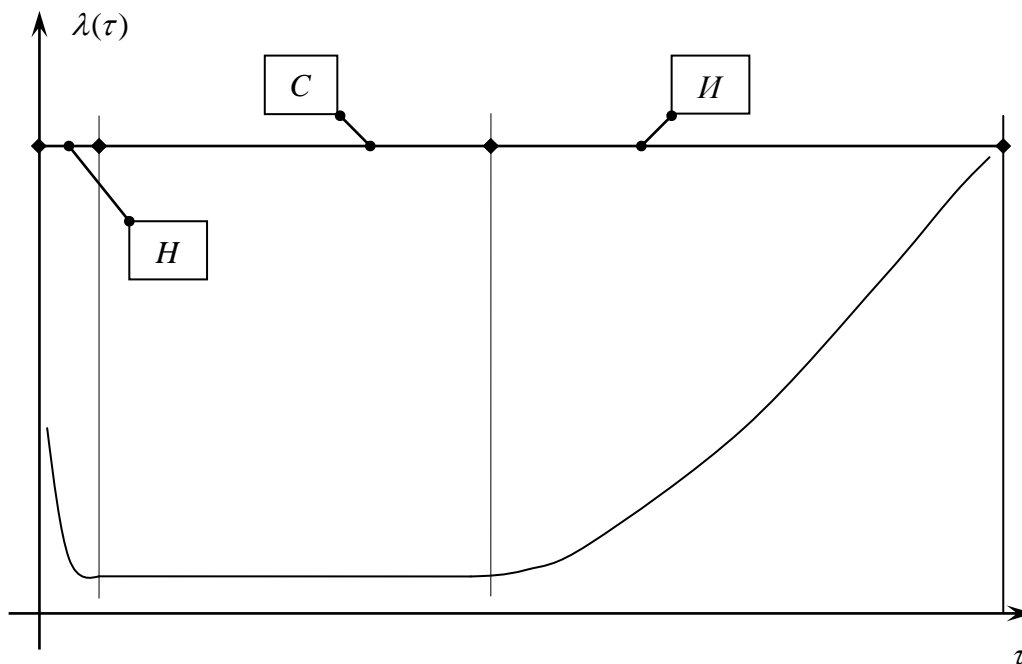


Рис. 2

На рис. 2 приведена зависимость интенсивности отказов гипотетического множества объектов от времени их функционирования. К зависимости такого вида в сложившейся практике прогнозирования надёжности принято относиться как к канонизированной ресурсной характеристике, неизбежно реализуемой при эксплуатации любых объектов. Для разработчика объекта, обладающего существенной новизной, это означает, что он априори убеждён в неизбежности реализации зависимости $\lambda(\tau)$ именно такого вида при испытаниях и эксплуатации создаваемого им объекта, и эта убеждённость является для него главным фактором при решении задач обеспечения надёжности.

Участок начальных отказов трактуется как "период приработки", при этом имеется в виду, что он может быть устранён из состава эксплуатационной ресурсной характеристики путём контрольных испытаний и "тренировки" изготовленных образцов объекта.

Участок случайных отказов рассматривается как "период нормальной эксплуатации объекта". Особенностью этого периода считается постоянство интенсивности отказов $\lambda = const$, якобы подтверждённое многолетней статистикой эксплуатации различных изделий. Это допущение, в сочетании с информацией о значениях реально достижимой интенсивности отказов конструктивных и функциональных элементов, позволяет проводить достаточно простые расчётные оценки надёжности создаваемых

объектов, так как в этом случае $q = \lambda\tau$ и $P=1-q$. Именно для этого участка разработчик проводит расчёт надёжности [2].

Участок износных отказов ("период старения") как не поддающийся расчётному исследованию выносится за пределы назначенного ресурса, то есть исключается из ресурсной характеристики объекта.

Расчёт проводится с целью прогнозирования надёжности работы создаваемого объекта и базируется на представлении объекта в виде структурной схемы, при этом имеется в виду, что объект поддаётся разукрупнению на элементы (узлы, сборочные единицы, детали), показатели надёжности которых в момент проведения расчёта известны или могут быть определены другими методами.

Структурная схема объекта характеризуется двумя типами соединения функциональных и конструктивных элементов: **последовательным соединением и параллельным соединением**. Структурная схема объекта высокой сложности формируется как объединение нескольких (многих) узлов с параллельными и последовательными структурами соединения элементов.

В узле с последовательной структурой соединений отказ любого элемента приводит к отказу всего узла, вероятность безотказной работы такого узла равна произведению вероятностей безотказной работы формирующих его элементов

$$P_{п.с} = p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_i.$$

В узле с параллельной структурой соединений отказ узла происходит только при отказе всех формирующих его элементов. Вероятность безотказной работы такого изделия равна $P_{п.с} = 1 - q_1 \cdot q_2 \cdot \dots \cdot q_i$, где q_1, q_2, \dots, q_i - вероятности отказов элементов, формирующих параллельную структуру.

В рамках математической модели наиболее важным приёмом повышения надёжности (фактически единственным) является резервирование. Резервирование – это способ обеспечения надёжности изделия за счет введения в его состав дополнительных элементов, избыточных по отношению к минимально необходимым для выполнения требуемых функций. Резервирование, позволяет получить $P_{рез} = 1 - q_s^m \geq P_{норм}$, где m - кратность резервирования, q_s - вероятность отказа резервируемого элемента. Простота применения этого приёма привела к тому, что зачастую разработчик применяет резервирование не как вынужденный технический приём, а как организационную норму, базирующуюся на привлекательной, но весьма сомнительной идее о том, что резервирование позволяет без особых затруднений создать надёжное изделие из ненадёжных элементов конструкции. Во многих случаях резервирование оказывается неэффективным и отказ изделия происходит совершенно независимо от кратности резервирования элементов конструкции и неожиданно для разработчика – это происходит в тех случаях, когда по каким-то причинам эффективное ограничение нагрузок или повышение прочностных характеристик было подменено резервированием.

Проблемы практического применения математической модели неизбежно возникают у разработчика сложного изделия, обладающего высокой новизной. Рассмотрим вкратце суть возникающих проблем:

1. Математический аппарат расчёта надёжности может быть использован разработчиком только после проведения проектно – конструкторских работ в объёме, позволяющем сформировать структурную схему объекта;

2. Показатели надёжности заимствуемых элементов (в первую очередь интенсивность отказов) являются величинами, определёнными статистически, и необходимость их повышения (вследствие изменившихся условий применения) может требовать существенных материальных и временных затрат, а для вновь разрабатываемых элементов необходимой статистики просто не существует. В реальных условиях такая проблема

может возникнуть по отношению к сотням (и даже тысячам) функциональных и конструктивных элементов одновременно в рамках одного разрабатываемого объекта;

3. Расчёт надёжности предусматривает лишь один приём повышения надёжности объекта – резервирование, что может дезориентировать разработчика и способствовать принятию неоптимальных (мягко говоря) решений;

4. Для подтверждения якобы достигнутых показателей надёжности создаваемого изделия, математическая модель предполагает проведение испытаний на безотказность и долговечность при номинальных нагрузках (лежащих в заданном диапазоне или с незначительным его превышением), что предопределяет их низкую информативность.

Ограниченные возможности применения математической модели неизбежно приводят к тому, что практические действия разработчика по обеспечению надёжности создаваемого объекта зачастую не дают желаемого результата.

2.2 Физические модели

Все так называемые физические модели („нагрузка – прочность”, „параметр – поле допуска” и др.) по сути своей выражают одну простую истину – отказ объекта или его неэффективное функционирование (что равносильно отказу) происходит лишь в случае, если какая-либо повреждающая нагрузка, действующая в объекте, или между объектом и окружающей средой, превышает соответствующую прочность. **Используемый нами термин нагрузка это воздействие любой физической природы, которое может приводить к отказу объекта или влиять на его выходной эффект. Соответственно прочность это свойство объекта противостоять действующей на него нагрузке.**

Условия безотказной работы объекта A описываются совокупностью уравнений работоспособности:

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

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

$$\dots \dots \dots$$

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

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

Аналогичной совокупностью уравнений описывается эффективность объекта с той лишь разницей, что в них рассматривается не превышение нагрузки над прочностью, а отклонение параметров, характеризующих выходной эффект объекта, за допустимые пределы:

$$E_{I.min} \geq [E_{I.min}]_{lim}; \quad E_{I.max} \leq [E_{I.max}]_{lim};$$

$$E_{II.min} \geq [E_{II.min}]_{lim}; \quad E_{II.max} \leq [E_{II.max}]_{lim};$$

$$\dots \dots \dots$$

$$E_{N.min} \geq [E_{N.min}]_{lim}; \quad E_{N.max} \leq [E_{N.max}]_{lim}$$

где I, II, \dots, N – символы различных оцениваемых параметров выходного эффекта и $[E_{\dots}]_{lim}$ - допустимый предел значения параметра, характеризующего выходной эффект.

Именно эти совокупности (фактически совокупность решаемых разработчиком инженерных задач) являются физической моделью создаваемого объекта, сформированной разработчиком в соответствии с его представлениями о зависимости надёжности и

эффективности изделия от конкретных параметров физических процессов, протекающих в изделии (между изделием и окружающей средой), а также от параметров конструктивных и функциональных элементов изделия.

Физическая модель надёжности также как и математическая базируется на структурной схеме объекта – привязана к комплексу конструкторской документации (КД), более того проводимые расчёты входят в состав комплекта КД.

Независимо от того насколько добросовестно относится разработчик к расчётам эффективности и работоспособности физическая модель как модель надёжности обладает определёнными недостатками, которые могут самым негативным образом влиять на весь процесс и результаты разработки объекта. К их числу можно отнести:

1. Модель формируется как расчётное обеспечение конкретных конструкторских разработок и как правило не затрагивает вопросов правильности принимаемых разработчиком принципиальных схемных и компоновочных решений;

2. Начальный уровень некомпетентности разработчика, несомненно существующий при создании объекта, обладающего высокой новизной, неизбежно влияет на правильность принимаемых им решений и полноту перечня задач, входящих в состав модели, при этом возникает опасность некачественного планирования спецификаций;

3. Оцениваемые в рамках физической модели такие свойства объекта как запасы прочности (работоспособности) и эффективности, фактически определяющие его надёжность, не фигурируют в числе стандартизованных нормативных показателей надёжности, что создаёт для разработчика серьёзную методологическую и организационную проблему – проблему интерпретации полученных результатов с точки зрения их соответствия требованиям технического задания.

2.3 Обобщённая модель

Очевидные недостатки математической и физических моделей надёжности, проявляющиеся на практике, вынуждали разработчиков сложных технических объектов создавать собственные методики обеспечения надёжности в виде специальных технических условий или стандартов предприятия. Далее мы рассмотрим более детально направленность и логику действий разработчика, позволяющих ему создавать надёжные изделия, обладающие высокой новизной. Будем считать, что разработчик в своих действиях руководствуется *обобщённой моделью надёжности*, устанавливающей зависимость безотказности и эффективности изделия от параметров конкретных физических процессов, протекающих в изделии (между изделием и окружающей средой), а также от параметров конструктивных и функциональных элементов изделия [6]. Обобщённая модель по своей сути является объединением в едином методологическом пространстве теоретических положений и прикладных (инженерных) приёмов обеспечения надёжности сложных технических объектов, обладающих высокой новизной. Принципиальное отличие обобщённой модели от математической и физических моделей состоит в том, что базовым понятием, характеризующим создаваемый объект, для этой модели является функциональная схема объекта.

Исследуем более детально физическую основу взаимосвязи ресурсной характеристики изделия с его прочностной характеристикой и действующей на изделие нагрузкой. Для этого воспользуемся понятием **риск отказа** $r = \text{Вер}\{Q > R\}$. Этот термин имеет смысл вероятности отказа изделия (доли вышедших из строя изделий), обладающего прочностной характеристикой $f(R)$, при реализации эксплуатационной (повреждающей) нагрузки $f(Q)$, при этом необходимо иметь в виду, что изначально существует определённое наложение распределения нагрузки на прочностную характеристику изделия, прямым подтверждением такого наложения является

существование в ресурсной характеристике участка начальных отказов. Помимо функции $f(\tau)$, которую мы считаем ресурсной характеристикой изделия, нам также известно, что прочность изделий, образующих исследуемое множество, характеризуется функцией плотности распределения прочности $f(R)$, и на изделия действует повреждающая нагрузка, имеющая функцию плотности распределения $f(Q)$ в любой момент времени, распределённая между изделиями множества случайным образом. Рассмотрим механизм формирования ресурсной характеристики. Поскольку отказ любого изделия, входящего в множество, происходит только в случае превышения действующей на него нагрузки над его прочностью $Q > R$, то очевидно, что ресурсная характеристика является статистическим отображением изменений, происходящих с течением времени в распределениях $f(Q)$ и $f(R)$, приводящих к многократному повторению ситуации $Q > R$ и к выходу из строя в конечном счёте всех изделий, образующих наше множество. В соответствии с этим ресурсная характеристика может быть представлена как $f(\tau) = \Delta f_Q(\tau) + \Delta f_R(\tau)$. У нас есть основания относиться к этому выражению как к уравнению обобщённой модели надёжности. В этом выражении $\Delta f_Q(\tau)$ - составляющая, характеризующая отказы, возникающие вследствие изменений, происходящих в распределении нагрузок, а также $\Delta f_R(\tau)$ -- составляющая, характеризующая отказы, возникающие вследствие изменений прочностной характеристики изделия.

Необходимо особо отметить, что использование понятия **риск отказа** позволяет нам представить в вероятностной форме уравнения, составляющие физическую модель объекта, а это фактически открывает возможность в рамках обобщённой модели прогнозировать вероятностные технические характеристики объекта как расчётным, так и экспериментальным путём [3], [5].

В вероятностной форме совокупность уравнений работоспособности имеют вид :

$$\begin{aligned} r_{AI} &= \text{Вер}\{ Q_{AI} > R_{AI} \} < [r_{AI}]_{lim} \\ r_{AII} &= \text{Вер}\{ Q_{AII} > R_{AII} \} < [r_{AII}]_{lim} \\ &\dots\dots\dots \\ r_{AN} &= \text{Вер}\{ Q_{AN} > R_{AN} \} < [r_{AN}]_{lim} \end{aligned}$$

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 объекта, с той лишь разницей, что в них рассматривается не превышение нагрузки над прочностью, а отклонение параметра, характеризующего выходной эффект объекта, за допустимые пределы:

$$\begin{aligned} r_{EI.min} &= \text{Вер}\{ E_{I.min} < [E_{I.min}]_{lim} \} < [r_{EI.min}]_{lim} \\ r_{EI.max} &= \text{Вер}\{ E_{I.max} > [E_{I.max}]_{lim} \} < [r_{EI.max}]_{lim} \\ r_{EII.min} &= \text{Вер}\{ E_{II.min} < [E_{II.min}]_{lim} \} < [r_{EII.min}]_{lim} \\ r_{EII.max} &= \text{Вер}\{ E_{II.max} > [E_{II.max}]_{lim} \} < [r_{EII.max}]_{lim} \\ &\dots\dots\dots \\ r_{EN.min} &= \text{Вер}\{ E_{N.min} < [E_{N.min}]_{lim} \} < [r_{EN.min}]_{lim} \\ r_{EN.max} &= \text{Вер}\{ E_{N.max} > [E_{N.max}]_{lim} \} < [r_{EN.max}]_{lim} \end{aligned}$$

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

2.3.1 Переадресация нагрузки

В качестве фактора, обуславливающего существование составляющей $\Delta f_Q(\tau)$, принимаем процесс **переадресации нагрузки** между изделиями, входящими в исследуемое множество. Термин **переадресация нагрузки** следует понимать буквально, так как именно переадресация нагрузки между изделиями множества в процессе их эксплуатации фиксируется исследователем как изменение нагрузки, действующей на какое-либо конкретное изделие, при неизменной во времени функции плотности распределения нагрузки $f(Q)$. Вследствие переадресации время от времени может возникать (и даже существовать непрерывно) ситуация $Q > R$ для некоторых изделий множества, выходя из строя, эти изделия формируют участок так называемых "случайных" отказов, причём сама по себе переадресация нагрузки не имеет никакой причинно-следственной связи с продолжительностью функционирования изделий, а существует как результат процессов, происходящих в окружающей среде, или как результат организационных воздействий, регламентирующих условия эксплуатации изделий.

На рис. 3 иллюстрируется процесс переадресации нагрузки между изделиями множества в рамках неизменного распределения $f(Q)$. На этом рисунке приведены гистограммы распределения нагрузки между изделиями одной и той же выборки в различные моменты времени τ_g и τ_h . В этих гистограммах высота столбцов измеряется не обезличенным количеством изделий, а количеством конкретных адресов изделий, к которым в этот момент приложена нагрузка данного интервала.

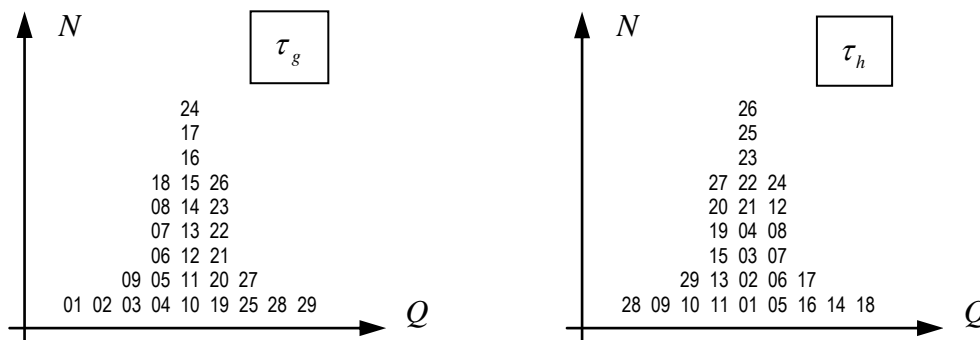


Рис. 3 Логика переадресации нагрузки.

Для обоих моментов времени выборка сохраняет репрезентативность по отношению к исходному множеству изделий при существенной переадресации нагрузки между вошедшими в выборку изделиями.

К моменту τ_g риск отказа изделия за счёт переадресации нагрузки составит $r_{\tau_g} = \text{Вер}\{Q > R\}_{\Pi_{\tau_g}}$, после чего в момент $\tau_h = \tau_g + \Delta\tau$ риск отказа изделия составит уже $r_{\tau_h} = \text{Вер}\{Q > R\}_{\Pi_{\tau_h}}$. Мы не считаем эти отказы случайными, так как условие возникновения отказа $Q > R$ справедливо во всех без исключения случаях. Случайный характер имеет процесс переадресации нагрузок, этот процесс может протекать с различной интенсивностью.

2.3.2 Дрейф прочностной характеристики

В качестве фактора, обуславливающего существование составляющей $\Delta f_R(\tau)$ принят **дрейф прочностной характеристики** изделия $f(R)$, связанный с существующими при хранении и эксплуатации изделия процессами старения и износа, приводящими к понижению прочности изделий. В результате дрейфа прочностной характеристики происходит увеличение наложения распределения повреждающей нагрузки на прочностную характеристику, что приводит к прогрессирующему во времени увеличению риска отказа. В этом случае мы имеем $r_{\tau_i} = \text{Вер}\{Q > R\}_{D_{\tau_i}}$ - риск отказа изделия в момент τ_i , $r_{\tau_k} = \text{Вер}\{Q > R\}_{D_{\tau_k}}$ - риск отказа изделия в момент $\tau_k = \tau_i + \Delta\tau$, где $\Delta\tau$ - интервал времени в течение которого происходил дрейф прочностной характеристики. За это время доля вышедших из строя вследствие дрейфа прочностной характеристики изделий множества составляет

$$\Delta r_D = r_{\tau_k} - r_{\tau_i} = \text{Вер}\{Q > R\}_{D_{\tau_k}} - \text{Вер}\{Q > R\}_{D_{\tau_i}} = \int_{\tau_i}^{\tau_k} \Delta f_R(\tau) \cdot d\tau$$

Таким образом с течением времени дрейф прочностной характеристики приводит к формированию участка износных отказов.

2.3.3 Обеспечение надёжности

При разработке нового изделия разработчик неизбежно сталкивается с различными проблемами обеспечения надёжности, большая или меньшая острота этих проблем обуславливается степенью новизны изделия, а также требованиями заказчика, финансирующего разработку. В связи с этим необходимо отметить, что сегодня ни один серьёзный заказчик не может безоговорочно согласиться с поставкой ему изделий, имеющих ресурсную характеристику аналогичную приведенной на рис.1 -- с ярко выраженными участками начальных и случайных отказов.

Для неремонтируемых изделий наличие таких участков в ресурсной характеристике недопустимо, так как оно означает, что часть изготовленных изделий попросту не пригодна для практического применения.

Для ремонтируемых изделий наличие в их ресурсной характеристике таких участков на первый взгляд менее критично, но может привести к развёртыванию переразмеренной сети ремонтных предприятий и к необоснованным дополнительным затратам в период эксплуатации изделий. Однако и для ремонтируемых изделий эта ситуация чревата тяжёлыми последствиями, так как отказ изделия в процессе работы может привести к возникновению аварийной ситуации, ведущей к гибели людей и (или) к экологической катастрофе.

Таким образом, исходя из практических интересов заказчика, можно утверждать, что стратегическим направлением обеспечения надёжности вновь создаваемого изделия является получение ресурсной характеристики, не имеющей в своём составе участков начальных и случайных отказов. Именно с этой целью при разработке обобщённой модели надёжности в её состав автором были введены методика проведения анализа возможных отказов (АВО) объекта на базе его сетевой функциональной схемы – циклограммы (СФСЦ) [7] и алгоритм функционального (попарного) объединения множеств [8].

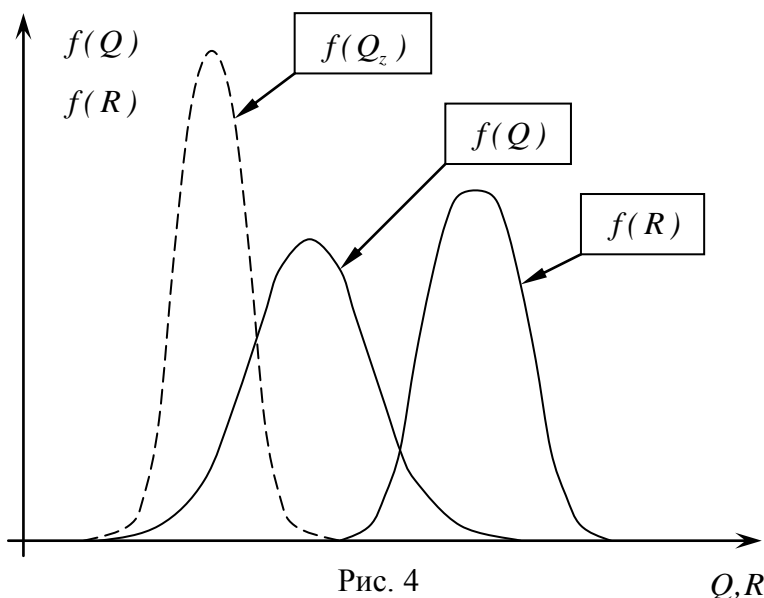
Само по себе наличие этих участков в составе ресурсной характеристики изделия является следствием существенного наложения распределения повреждающей нагрузки на прочностную характеристику и интенсивной переадресации нагрузки. Исключение их из

состава ресурсной характеристики возможно лишь при наличии верхнего ограничения повреждающей нагрузки на уровне более низком, чем нижнее ограничение прочностной характеристики.

2.3.3.1 Ограничение нагрузок

Вся современная техника насыщена разнообразными защитными устройствами (ЗУ), начиная от простейших предохранителей в бытовых приборах и кончая сложными системами защиты ядерных реакторов, транспортных средств и т.п. [4]. Однако при всём своём многообразии ЗУ могут быть поделены на два класса в соответствии с логикой их "посреднических" функций между нагрузкой и прочностью:

- преобразовательные ЗУ (демпферы, регуляторы и стабилизаторы различных параметров, фильтры, изоляционные и экранирующие устройства, и т.п.) назначением которых является преобразование исходного распределения нагрузки $f(Q)$ в распределение $f(Q_z)$, при котором обеспечивается надёжная работа изделия;
- предельные ЗУ, отключающие изделие или изменяющие режим (логику) его работы при достижении нагрузкой некоторого опасного предела.



На рис. 4 показана логика работы преобразовательных ЗУ. Она может быть описана следующим образом:

$$q_0 = \text{Вер}\{Q > R\} > [q]$$

$$q_z = \text{Вер}\{Q_z > R\} \leq [q]$$

где q_0 - исходный уровень вероятности отказа изделия (при отсутствии ЗУ); q_z - вероятность отказа изделия, имеющего ЗУ; $[q]$ - нормативный (допустимый) уровень вероятности отказа изделия.

Логика работы предельных ЗУ приведена на рис. 5. Она может быть описана следующим образом:

$$q_0 = \text{Вер}\{Q > R\} > [q]$$

$$q_{1z} = \text{Вер}\{Q_{\max} > R\} \leq [q]$$

$$q_{2z} = \text{Вер}\{Q_z^* > R\} \cdot \text{Вер}\{Q > Q_{\max}\} \leq [q_2]$$

Введением предельного ЗУ исходное распределение нагрузки $f(Q)$ усекается на уровне Q_{max} (настройка защиты), чем ограничивается основной участок нагружения изделий (участок 1). На этом участке q_{1z} имеет обычный смысл вероятности отказа незащищённого изделия.

При срабатывании ЗУ пропускает на вход в изделие нагрузку, имеющую функцию плотности распределения $f(Q_z^*)$, чем ограничивается участок максимальных нагрузок (участок 2). На этом участке q_{2z} имеет смысл вероятности нарушения работоспособности изделия при срабатывании ЗУ.

Срабатывание предельного ЗУ позволяет перевести изделие на облегчённый (безопасный) режим работы или отключить его.

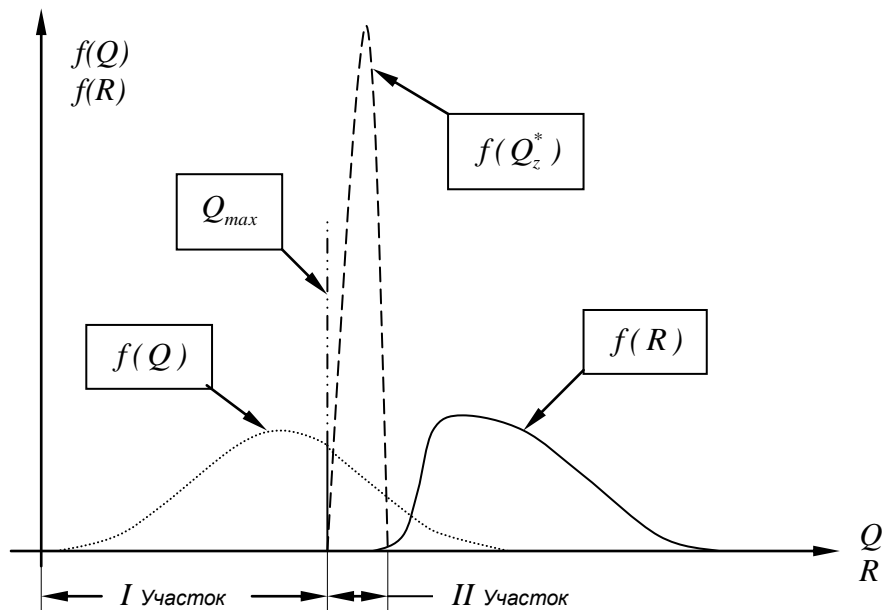


Рис. 5

Насыщенность создаваемого изделия защитными устройствами это прерогатива разработчика и естественно, что он заинтересован в максимальном снижении нагрузок при минимальном усложнении функциональной и конструктивно-компоновочной схем изделия.

2.3.3.2 Повышение прочностных характеристик

Помимо задач ограничения нагрузок, действующих на изделие и элементы его конструкции, разработчик решает широкий круг задач фактического обеспечения всех видов запасов прочности и устойчивости необходимых для эффективного функционирования изделия. Это достигается как за счёт применения качественных материалов, стойких к действующим нагрузкам, так и за счёт совершенствования схемных и конструктивных решений, реализуемых разработчиком изделия.

В условиях, когда резервы обеспечения надёжности и эффективности создаваемого изделия за счёт ограничения нагрузок, применения высококачественных материалов и

прогрессивных конструктивных решений уже исчерпаны, единственным путём решения стоящих перед разработчиком изделия задач становится улучшение соответствующих прочностных характеристик элементов конструкции за счёт их усечения снизу. Усечение прочностной характеристики на необходимом уровне производится путём нагружения каждого элемента, входящего в множество, нормативной испытательной нагрузкой Q_{lim} при контрольных диагностических испытаниях. В результате из исходного множества элементов конструкции отбраковывается некоторая их часть $r_{Q_{lim}} = \text{Bep}\{Q_{lim} > R_o\}$, а оставшиеся образуют множество, имеющее прочностную характеристику $f(R)_{\tau_o}$, как это показано на Рис. 6.

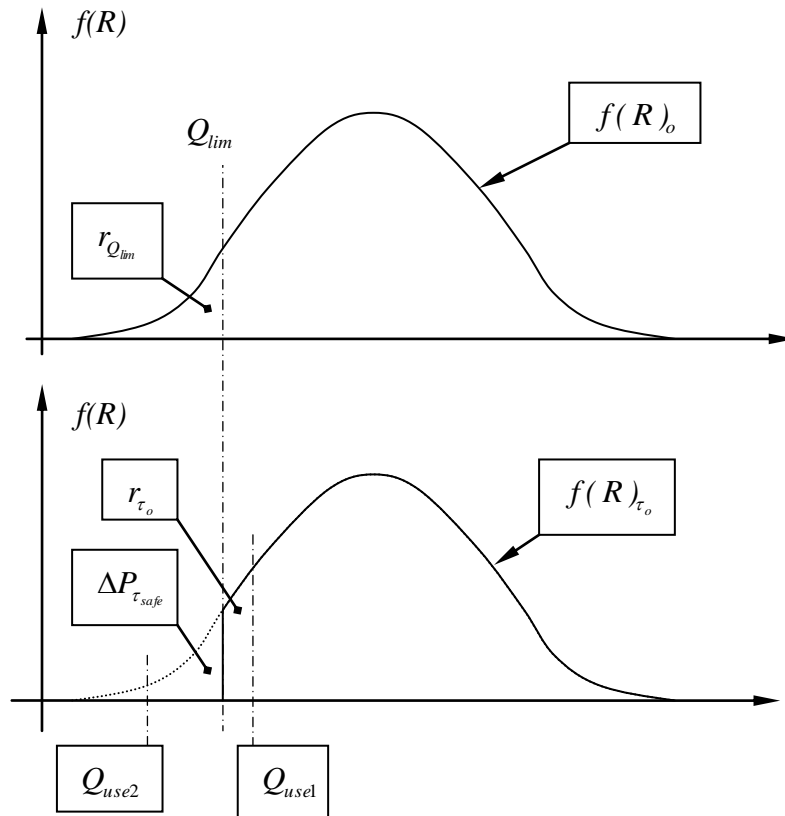


Рис. 6

Необходимо иметь в виду, что контрольные диагностические испытания должны проводиться как отбраковка "слабых" элементов конструкции по контролируемому при нагружении параметру, прямо или косвенно характеризующему прочность элемента конструкции, при этом испытательная нагрузка не должна быть повреждающей для остальных элементов с точки зрения их последующего использования [9].

При последующей эксплуатации изделий, изготовленных из элементов конструкции, имеющих улучшенные прочностные характеристики, возможны два различных по своим последствиям варианта нагружения изделий эксплуатационной нагрузкой Q_{use} .

В первом варианте эксплуатации, при $Q_{lim} < Q_{usel}$, можно говорить о возможности существования участков начальных и случайных отказов в составе ресурсной характеристики, при этом выражение $r_{\tau_o} = \text{Bep}\{Q_{usel} > R_o\} - \text{Bep}\{Q_{lim} > R_o\}$ характеризует риск отказа изделий в начальный момент времени.

Во втором варианте эксплуатации, при $Q_{lim} > Q_{use2}$, имеем $r_{\tau_o} = 0$ и выражение $P_{\tau_{safe}} = \text{Вер}\{Q_{lim} > R_o\} - \text{Вер}\{Q_{use2} > R_o\}$ характеризует запас работоспособности изделий в пределах дрейфа прочностной характеристики от Q_{lim} до Q_{use2} . Это означает, что **ресурсная характеристика изделия имеет начальный участок безотказной работы, продолжительность которого τ_{safe} может быть оценена по результатам ресурсных испытаний.**

На рис. 7 приведены три принципиально возможных варианта ресурсных характеристик:

- исходного множества изделий, элементы конструкции которых не подвергались контрольным диагностическим испытаниям - $f(R)_o$, $Q_{lim} = 0$;
- множества изделий, имеющих $f(R)_{\tau_o}$, при эксплуатации в условиях $Q_{lim} < Q_{use1}$;
- множества изделий, имеющих $f(R)_{\tau_o}$, при эксплуатации в условиях $Q_{lim} > Q_{use2}$.

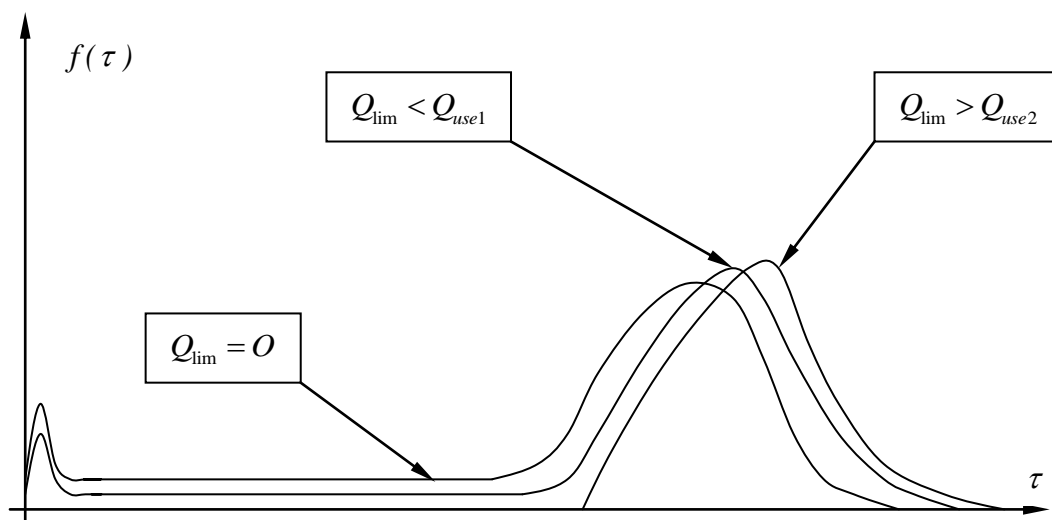


Рис. 7

Выше показана принципиальная возможность создания сложных технических объектов с ресурсной характеристикой, имеющей в своём составе участок безотказной работы – временной интервал, в пределах которого обеспечивается выполнение условия $R > Q$ в отношении всех взаимодействий, происходящих в системе и исследованных разработчиком объекта, что несомненно характеризует обобщённую модель надёжности с наилучшей стороны. Однако вследствие объективных обстоятельств как организационного, так и технического характера, может возникнуть ситуация, при которой разработчик не в состоянии предотвратить наложение распределений повреждающих нагрузок на прочностные характеристики некоторых элементов конструкции объекта, а следовательно может существовать реальный риск отказа этих элементов $r > 0$. При создании объектов, обладающих высокой новизной, возникновение такой ситуации почти неизбежно как следствие обоюдной начальной некомпетентности заказчика и разработчика объекта, которая может быть в какой-то степени погашена только за счёт проведения специальных исследовательских и отработочных испытаний при повышенных и предельных нагрузках. В связи с этим даже в том случае, когда разработчик провёл в

полном объёме анализ возможных отказов (АВО) в соответствии с максимально детализированной сетевой функциональной схемой – циклограммой (СФСЦ) объекта, формально обеспечив $R > Q$ для всех известных ему взаимодействий, мы тем не менее должны понимать, что участок "безотказной работы" фактически является участком "кажущейся безотказности".

Литература

1. *Герцбах И.Б., Кордонский Х.Б.* Модели отказов.- Советское радио, 1966,-167с.
2. *Епифанов А.Д.* Надёжность автоматических систем.- М.: Машиностроение, 1964,- 336с.
3. *Зажигаев Л.С., Кишьян А.А., Романиков Ю.И.* Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента.- М.: Атомиздат, 1978.-230с.
4. *Каганов В.Л.* К вопросу обеспечения надёжности изделий путём ограничения нагрузки.- В сб. Вибрационная прочность и надёжность двигателей и систем летательных аппаратов, вып. 9.- Куйбышев, КуАИ, 1982.- с.83-90.
5. *Каганов В.Л., Капитонов В.А.* Обобщённая модель надёжности и отработочные испытания.- В сб. Вибрационная прочность и надёжность двигателей и систем летательных аппаратов, вып. 10.- Куйбышев, КуАИ, 1984.-с.83-90.
6. *Каганов В.Л.* О возможности применения обобщённой модели надёжности.....- ЦНТИ „Поиск”, ПТО, вып. 7-8, 1987.
7. *Каганов В.Л.* Инженерная логика обеспечения надёжности сложных систем.- Вестник Дома учёных, Хайфа, том XX, 2010.- с.34 – 42.
8. *Каганов В.Л.* Прогнозирование вероятностных характеристик технических систем.- Вестник Дома учёных, Хайфа, том XXVII, 2012.- с.27 – 35.
9. *Хевиленд Р.* Инженерная надёжность и расчёт на долговечность.- Пер. с англ.- М.-Л.: Энергия, 1966.-231с.