УДК 614.84

Анализ и обеспечение защищенности объектов критических инфраструктур с учетом рисков и предельных состояний

Н.А.Махутов, Д.О.Резников
Институт машиноведения РАН

В статье рассмотрены особенности основных подходов к обеспечению защищенности сложных технических систем. Проанализированы условия, при которых эти подходы могут считаться эквивалентными и дополнительные возможности, которые дают проектировщику те или иные подходы.

Ключевые слова: защищенность, риск, вероятность отказа, сложная техническая система

1. Введение

При анализе и обеспечении защищенности критических инфраструктур также как и техносферы в целом, принято выделять объекты четырех типов, которые отличаются по уровню потенциальной опасности и требованиям к обеспечению их защищенности:

- объекты технического регулирования, защищенность которых обеспечивается в соответствии с законом о техническом регулировании,
- опасные производственные объекты, защищенность которых обеспечивается в соответствии с законом о промышленной безопасности
- критически важные объекты, защищенность которых обеспечивается по решению Совета Безопасности Российской Федерации,
- стратегически важные объекты, защищенность которых влияет на состояние национальной безопасности и должна обеспечиваться в соответствии со специальными решениями Совета Безопасности.

Указанные объекты относятся к категории сложных технических систем (далее СТС) как с точки зрения сложности их структуры, так и с точки зрения сложного характера взаимодействия их элементов. Для указанных систем характерны различные предельные состояния и механизмы их достижения, для изучения которых используются принципиально различные методы.

Защищенность СТС определяется ее способностью противостоять реализации различных предельных состояний ее элементов, а также не допускать катастрофических разрушений на этапах закритического функционирования системы после достижения предельных состояний ее отдельными элементами. Защищенность СТС приходится обеспечивать в условиях высокого уровня неопределенности относительно интенсивности эксплуатационных нагрузок и внешних воздействий на систему, с одной стороны, а также несущей способности ответственных элементов СТС на различных этапах цикла ее эксплуатации, с другой. Источниками неопределенностей являются: естественная вариативность параметров системы и внешней среды, ограниченность знаний о событиях и процессах, протекающих в сложных технических системах; неточность имеющихся статистических данных и существующих оценок; несовершенство используемого контрольно-измерительного оборудования и математических моделей.

Широкое разнообразие методов обеспечения защищенности при проектировании сложных технических систем разрабатывается в рамках трех принципиально различных подходов [1, 2]:

1) Нормативный подход к обеспечению защищенности, основанный на обеспечении запасов по основным механизмам достижения предельных состояний (далее этот подход для краткости будут именоваться нормативным).

2) Подход к обеспечению защищенности по критерию надежности, основанный на оценке вероятности достижения предельного состояния (далее - вероятностный подход).

3) Подход к обеспечению защищенности по критерию рисков основанный на оценке вероятности реализации предельных состояний и ущерба от такой реализации (далее подход, основанный на управлении риском).

Необходимо отметить, что исторически, начиная с античных времен, в течение многих столетий развивался первый подход, при котором неопределенности, с которыми сталкивались при проектировании, строительстве и эксплуатации технических систем учитывались с помощью введения системы коэффициентов запаса (которые, также иногда называли коэффициентами незнания). Второй подход получил распространение в середине 20 столетия с развитием таких дисциплин как теория вероятности и теория надежности, позволяющих оценивать неопределенности с помощью вероятности достижения системой предельных состояний. Начиная с 70-х годов 20 века с развитием теории риска и вычислительной техники, получает все более широкое распространение третий подход к обеспечению защищенности СТС, который позволяет в математически более корректной форме учитывать как неопределенности, обуславливающие возможность достижения предельных состояний, так и размер ущербов, ожидаемых при реализации предельных состояний.

Ниже будет проведена сопоставительная оценка перечисленных подходов и рассмотрены условия, при которых эти подходы могут считаться эквивалентными. Введем следующие обозначения: пусть при рассматриваемом механизме достижения предельных состояний функция предельных состояний СТС записывается в виде[1]:

$$g(x_1, x_2, \ldots, x_n) = 1 \tag{1}$$

где $g(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ - функция состояния системы. Разделим переменные состояния системы $x_1, x_2, \ldots, x_n$ на две группы: $y_1, y_2, \ldots, y_m$ - случайные переменные состояния системы, $\chi_1, \chi_2, \ldots, \chi_k$ - варьируемые параметры, значения которых выбираются при проектировании. Эти параметры могут считать детерминированными.

Тогда функция предельных состояний будет записываться в виде

$$g(y_1, y_2, \ldots, y_m, \chi_1, \chi_2, \ldots, \chi_k) = 1 \tag{2}$$

причем условие обеспечения защищенности принимает вид:

$$g(y_1, y_2, \ldots, y_m, \chi_1, \chi_2, \ldots, \chi_k) \le 1 \tag{3}$$

а условие разрушения

$$g(y_1, y_2, \ldots, y_m, \chi_1, \chi_2, \ldots, \chi_k) > 1 \tag{4}$$

Для краткости записи вводятся также векторы случайных переменных состояния $\overline{Y} = \{y_1, y_2, \ldots, y_m\}$ и варьируемых параметров проектирования $\overline{\chi} = \{\chi_1, \chi_2, \ldots, \chi_k\}$. Тогда условия (2)-(4) могут также быть записаны в краткой форме:

$g(\overline{Y}, \overline{\chi}) = 1$ - функция предельных состояний, $g(\overline{Y}, \overline{\chi}) \le 1$ - условие обеспечение защищенности и $g(\overline{Y}, \overline{\chi}) > 1$ - условие разрушения

2. Нормативный подход к обеспечению защищенности

Суть нормативного подхода заключается в следующем:

1) Случайные переменные $y_1, y_2, \ldots, y_m$ в функции состояний $g(y_1, y_2, \ldots, y_m, \chi_1, \chi_2, \ldots, \chi_k)$ заменяются на известные детерминированные величины, характеризующие их распределения. В частности, для этой цели могут быть использованы математические ожидания: $E(y_1), E(y_2), \ldots, E(y_m)$. При подобном преобразовании функция случайных аргументов $g(y_1, y_2, \ldots, y_m, \chi_1, \chi_2, \ldots, \chi_k)$ заменяется на детерминированную функцию:

$$g_0\left(\chi_1, \chi_2, \ldots, \chi_k\right) = g\left(E(y_1), E(y_2), \ldots, E(y_m),\ \chi_1, \chi_2, \ldots, \chi_k\right). \tag{5}$$

2) Учитывая неопределенности, которые присутствовали в условии обеспечения защищенности (31) до замены переменных $y_1, y_2, \ldots, y_n$ на их математические ожидания, в правую

---

[1] Такой вид функции предельных состояний, несколько отличающийся от традиционной записи функции предельных состояний вида $g(x_1, x_2, \ldots, x_n) = 0$, более удобен для дальнейших преобразований.

часть неравенства вводится, как множитель, предписанный нормативный (предельно допустимый) запас $[n]>1$.

Таким образом, условие обеспечения защищенности при нормативном подходе записывается в виде:

$$[n]\cdot g_0\left(\chi_1,\chi_2,\ldots,\chi_k\right)\le 1 \qquad (6)$$

Это означает, что обеспечение защищенности при нормативном подходе предполагает такой выбор параметров $\chi_1,\chi_2,\ldots,\chi_k$, чтобы при заданном предельно-допустимом нормативном запасе $[n]$ обеспечить выполнение неравенства (6).

Вопрос о выборе $[n]$ является весьма сложным . Нормативный запас по рассматриваемому предельному состоянию назначается исходя из опыта эксплуатации подобных систем; уровня неопределенности (т.е. характера распределений переменных $y_1,y_2,...,y_n$ и количестве имеющейся информации об этих переменных); социально-экономических условий страны; точности расчетных моделей и величины ущерба, ожидаемого в случае достижения предельных состояний. Таким образом, величины запасов определяются как объективными факторами (уровень неопределенности относительно нагрузок и несущей способности конструкции; критичность последствий, связанных с достижением предельного состояния) так и субъективными обстоятельствами (культура безопасности в отдельных отраслях и стране в целом, восприятие угроз в обществе). Современные значения нормативных запасов для элементов СТС, относящихся к различным отраслям, изменяются в следующих диапазонах (таблица 1).

Таблица 1.

Количественные значения нормативных запасов прочности

Отрасль, тип технической системы	**Диапазон значений $[n]$**
Авиационная техника	1.25-2.0
Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок	1.07-3.0
Металлургическое оборудование	2.07-8.0
Железнодорожный транспорт	3.33-5.56
Подъемно-транспортные машины	1.3-1.6
Сосуды и аппараты, работающие под давлением	1.5-4.0

Из представленных в таблице 1 данных следует, что значения нормативных запасов варьируются в весьма широких диапазонах (как внутри отдельных отраслей, так и между отраслями). Это свидетельствует об отсутствии единой методологической базы их обоснования. Использование подобного подхода при проектировании новых (уникальных) объектов сопряжено с большими сложностями и высоким уровнем неопределенности, связанным с отсутствием опыта назначения допустимых запасов по предельным состояниям, которые могут реализовываться в системе.

Следует иметь в виду, что для сложных систем характерно наличие различных предельных состояний $ПС_i, i=1,2,...,q$, соответствующих различным механизмам разрушения (однократные перегрузки, кумулятивные механизмы усталостного разрушения и т.д.). В этом случае принято вводить систему запасов $n_1,n_2,...,n_q$ по основным механизмам достижения предельных состояний. Причем запасы по различным предельным состояниям оказываются не связанными между собой, при этом система может обладать избыточной защищенностью по одним предельным состояниям и недостаточной по другим. Для создания защищенной системы при нормативном подходе организуется итерационная процедура (рис. 1), при которой параметры проектирования χ_i варьируются до тех пор, пока условие обеспечения вида (6) не будет выполнено.

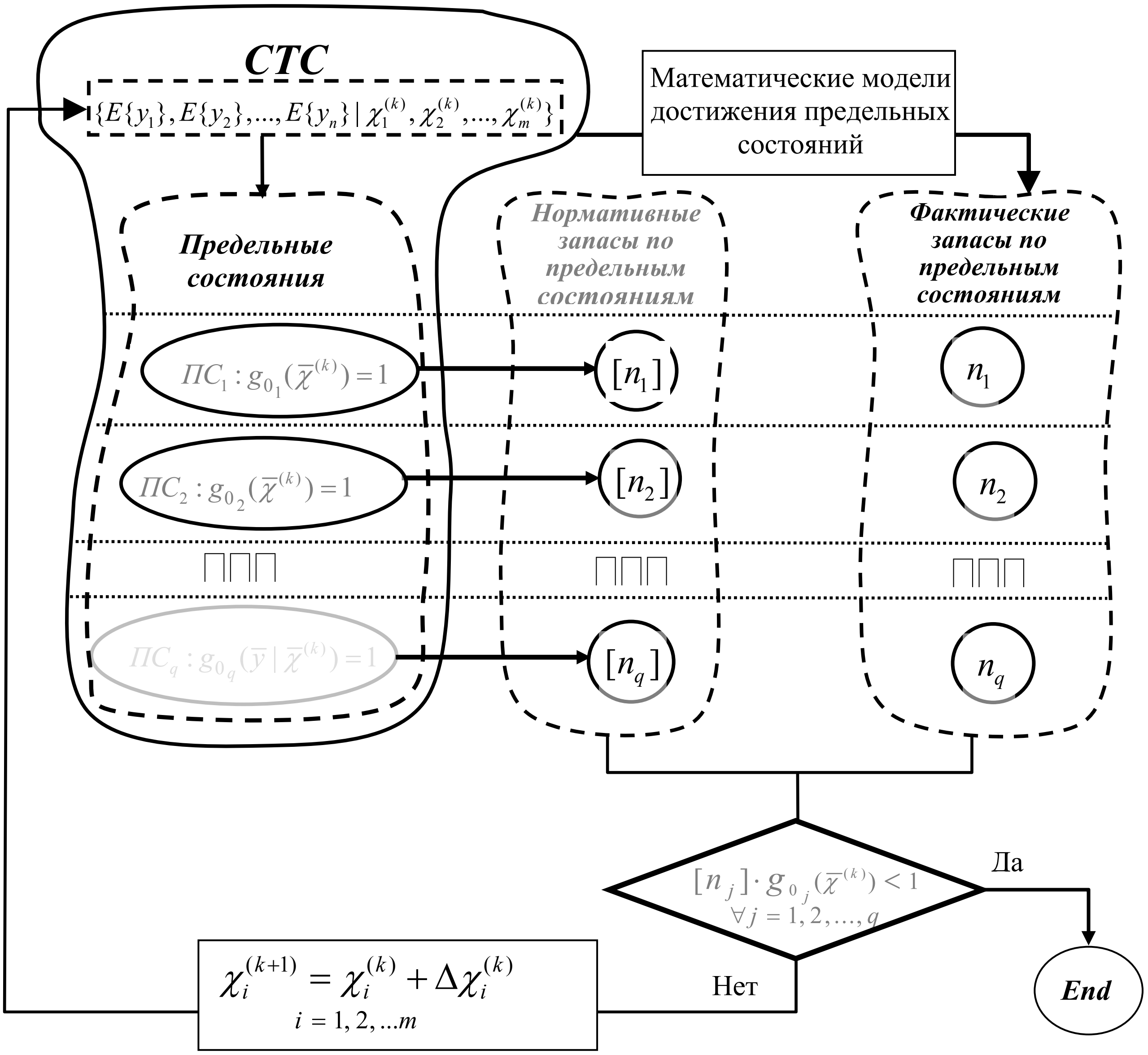


Рис. 1. Алгоритм проектирования систем при нормативном подходе к обеспечению защищенности

3. Вероятностный подход к обеспечению защищенности СТС

Начиная со второй половины XX века при обеспечении защищенности сложных технических систем все более широко используются подходы теории надежности. При этом система считается защищенной, если выполняется условие:

$$P_\phi < \left[P_\phi\right], \tag{7}$$

где P_ϕ - расчетная вероятность отказа (разрушения) системы, а $\left[P_\phi\right]$ - предписанное предельно допустимое значение вероятности отказа СТС данного типа.

Будем считать, что для рассматриваемой системы известны функция предельных состояний (2) и функция плотности распределения вероятности (8).

$$f(y_1, y_2, \ldots, y_n \mid \chi_1, \chi_2, \ldots, \chi_m) \tag{8}$$

Тогда расчетная вероятность отказа будет записана в виде:

$$P_\phi = P\left\{g(y_1, y_2, \ldots, y_n, \chi_1, \chi_2, \ldots, \chi_m) > 1 \mid \chi_1, \chi_2, \ldots, \chi_m\right\} = \int\limits_{g(Y|\chi)>1} f(y_1, y_2, \ldots, y_n \mid \chi_1, \chi_2, \ldots, \chi_m) dy_1 dy_2 \ldots dy_n$$

или в краткой форме:

$$P_\phi = P\left\{g(\overline{Y},\overline{\chi}) > 1 \mid \overline{\chi}\right\} = \int\limits_{g(Y,\chi)>1} f(\overline{Y} \mid \overline{\chi}) d\overline{Y} \tag{9}$$

Таким образом, условие обеспечения защищенности системы в постановке теории надежности (7) может быть записано в виде:

$$P\left\{g(\overline{Y},\overline{\chi}) > 1 \mid \overline{\chi}\right\} < \left[P_\phi\right] \tag{10}$$

То есть обеспечение защищенности элементов СТС по критерию надежности предполагает, что при проектировании системы параметры $\overline{\chi}$ выбираются таким образом, чтобы обеспечить выполнение условия (10).

Предельная величина вероятности отказа $\left[P_\phi\right]$ устанавливается в зависимости от таких факторов как величина ущерба, который может наступить в случае отказа, социальной значимости системы и срока ее эксплуатации. В частности, Международной научно-информационной ассоциацией строительной индустрии (CIRIA-Constraction Industry Research and Information Assosiation) для сложных инженерных сооружений (плотин, мостов, шельфовых платформ) принята следующая формула для оценки предельно допустимой расчетной вероятности отказа (разрушения) системы:

$$\left[P_\phi\right] = \frac{10^{-4}\xi_S \cdot t}{L \cdot k_{HF}}, \tag{11}$$

где t - расчетный срок эксплуатации системы; L - среднее количество людей, которые могут погибнуть в случае разрушение системы; k_{HF} - коэффициент, учитывающий отказы, связанные с человеческим фактором (обычно принимают $k_{HF} = 10$); ξ_S - коэффициент социальной значимости системы (см. таблицу 2) [4]. Таким образом, величина $\left[P_\phi\right]$ обычно оказывается в диапазоне $1 \cdot 10^{-5} \div 1 \cdot 10^{-7}$.

Таблица 2

Коэффициент социальной значимости для различных типов технических систем

Тип системы	ξ_S
Объекты массового скопления людей (спортивные комплексы, торговые центры)	0,005
Плотины	0,005
Жилые здания, офисные центры, промышленные объекты	0,05
Мосты	0,5
Буровые вышки, шельфовые установки	5

Следует иметь в виду, что формула (11) учитывает неопределенности, связанные не только со случайным характером нагрузок и несущей способности конструкций, но также и неопределенности, связанные с человеческим фактором. Это достигается путем введения коэффициента k_{HF} , который, как правило, принимается равным 10. Часто в нормативных документах фигурирует, так называемая, теоретическая предельно допустимая вероятность отказа $\left[P_\phi^T\right]$, которая оценивается без учета возможных ошибок или несанкционированных воздействий со стороны человека и оказывается существенно ниже, чем $\left[P_\phi\right]$. Принято считать, что эти величины различаются на порядок: $\left[P_\phi\right] \approx 10 \cdot \left[P_\phi^T\right]$. Т есть, сама теоретическая предельно-допустимая вероятность отказа оценивается как:

$$\left[P_\phi^T\right] = \frac{10^{-5}\xi_S \cdot t}{L} \tag{12}$$

В настоящее время вероятностный подход к обеспечению защищенности все больше внедряется в практику нормирования ряда отраслей, в частности, при проектировании объектов атомной энергетики, гидротехнических сооружений, шельфовых нефтегазодобывающих платформ, судостроении и др. При этом в качестве нормируемого параметра часто используется не предельная вероятность разрушения, а индекс надежности.

Необходимо отметить, что наличие коэффициента социальной значимости системы ξ_S в формуле (11) позволяет, в неявной форме и весьма приближенно, учесть масштаб возможных последствий отказа при принятии решений о том, можно ли считать рассматриваемую систему защищенной. Более полный и математически корректный способ учета последствий отказа сложных технических систем реализуется в рамках подхода к обеспечению защищенности СТС, который базируется на теории рисков.

3.Сопоставление нормативного и вероятностного подходов

Следует отметить, что проектирование и обеспечение защищенности СТС на основе нормативного подхода, базирующегося на назначении запасов является менее трудозатратным, поскольку для того чтобы убедиться, что выражение (6) справедливо, необходимо лишь один раз оценить $g_0(\overline{\chi})$, в то время как расчет по критерию надежности (10) требует проведения многократной оценки $g(\overline{Y}, \overline{\chi})$. К сожалению, нормативному подходу, несмотря на его простоту, недостает строгости и точности анализа и учета неопределенностей. Существенное влияние при оценке защищенности играют субъективный фактор и наличие опыта эксплуатации систем данного класса в сходных условиях внешней среды. Возможности применения нормативного подхода при проектировании уникальных объектов, для которых отсутствует релевантная статистическая информация, оказываются весьма ограниченными. Кроме того, нормативный подход не позволяет решать вопрос оптимизации проектируемой системы поскольку не дает возможность сопоставить затраты на создание системы с заданным запасом и положительный эффект, связанный с повышением защищенности, который невозможно подсчитать не ответив на вопрос: *До какого уровня может быть снижена вероятность отказа, если обеспечить выполнение назначенного запаса*? Следовательно, нормативный подход не позволяет осуществлять выбор оптимального из ряда возможных вариантов системы.

Проектирование и обеспечение защищенности СТС по критерию надежности, напротив, представляет собой достаточно строгую математическую процедуру учета неопределенностей, связанных с нагрузками и несущей способностью системы. Он позволяет принимать обоснованные решения при проектировании системы в условиях неопределенности, производить сопоставительные оценки уровня защищенности при различных параметрах $\overline{\chi}$ проектируемой системы и осуществлять оптимизацию системы. Однако использование вероятностного подхода сопряжено со значительными трудозатратами и требует высокой квалификации проектировщика.

Поэтому было бы весьма полезно объединить достоинства обоих подходов, получив, в тех случаях, когда это возможно, зависимость между запасом и вероятностью отказа. Это позволило бы, в частности, спроектировав систему с заданным запасом, оценить ее защищенность по критериям надежности. Сопоставление областей защищенных состояний Ω_n и Ω_P , полученных соответственно по критерию запаса и критерию надежности, является отдельной актуальной задачей.

Исходя из интуитивных соображений, естественно предположить, что, по крайней мере, в некоторых случаях между предписанным запасом $[n]$ и предельно допустимой вероятностью отказа $\left[P_\phi\right]$ существует монотонно убывающая зависимость. В тех случаях, когда это предположение оказывается справедливым, можно говорить об эквивалентности нормативного и вероятностного подходов. К сожалению, в общем случае произвольной функции состояний $g(\overline{Y}, \overline{\chi})$ не существует взаимно-однозначного соответствия между величинами $[n]$ и $\left[P_\phi\right]$, и, следовательно, нельзя говорить об эквивалентности этих двух подходов.

3.1. Эквивалентность нормативного и вероятностного подходов для простейшего частного случая

Рассмотрим вопрос об эквивалентности двух подходов для следующего частного случая: Пусть функция предельных состояний системы задается следующим соотношением некоррелированных и распределенных по нормальному закону величин нагрузки $\Sigma^Э$ и несущей способности Σ^C:

$$g(\Sigma^C, \Sigma^Э) = \Sigma^Э / \Sigma^C - 1 = 0 . \qquad (13)$$

Условие обеспечения защищенности записывается в виде[2]:

$$\Sigma^Э / \Sigma^C \le 1 .$$

При нормативном подходе неопределенные величины $\Sigma^Э$ и Σ^C в условии (14) заменяются на их математические ожидания $E\left\{\Sigma^Э\right\}$ и $E\left\{\Sigma^C\right\}$, а для учета связанных с этой заменой неопределенностей вводится нормативный предельно допустимый запас $[n] > 1$.

$$[n] \cdot E\left\{\Sigma^Э\right\} / E\left\{\Sigma^C\right\} \le 1 \qquad (14)$$

Заметим, что в данном случае $g_0 = E\left\{\Sigma^Э\right\} / E\left\{\Sigma^C\right\}$. Далее условие (14) может быть переписано в виде:

$$[n] \le E\left\{\Sigma^C\right\} / E\left\{\Sigma^Э\right\}$$

Откуда можно получить обычное условие обеспечения защищенности, вида:

$$[n] \le n ,$$

где $n = E\left\{\Sigma^C\right\} / E\left\{\Sigma^Э\right\}$ - фактический запас, который должен быть не ниже нормативного предельно допустимого запаса $[n]$. Таким образом, величина запаса n определяется соотношением между математическим ожиданиями величин нагрузки и несущей способности.

Очевидно, что введение запасов не может полностью исключить возможность отказа (разрушения) системы. Поэтому при использовании нормативного подхода встает вопрос о том, какая предельная вероятность отказа $\left[P_\phi\right]$ соответствует заданному нормативному запасу $[n]$.

В рамках нормативного подхода, опирающегося на назначение запасов по условию (6), учитывается только соотношение между характеристическими значениями распределений (в рассматриваемом примере математическими ожиданиями нагрузки и несущей способности $E\{\Sigma^C\} / E\{\Sigma^Э\}$). При этом вероятность отказа может быть оценена только с помощью приближенного выражения (15), не учитывающего более высокие моменты распределений $\Sigma^Э$ и Σ^C:

$$P_\phi \approx \psi_1(n \,|\, \bar{\chi}) = \psi_1\left(\frac{E\left\{\Sigma^C\right\}}{E\left\{\Sigma^Э\right\}} \,|\, \bar{\chi} \right) \qquad (15)$$

Следовательно, предельно допустимому запасу $[n]$ можно будет приближенно поставить в соответствие предельно допустимую вероятность отказа $\left[P_\phi\right]$ с помощью функции ψ_1 : $\left[P_\phi\right] \approx \psi_1\left([n]\right)$.

[2] Отметим также, что нагрузка и несущая способность являются функциями случайных переменных состояния $\bar{Y}$ и параметров проектирования $\bar{\chi}$: $\Sigma^Э = \Sigma^Э(\bar{Y}, \bar{\chi})$ и $\Sigma^C = \Sigma^C(\bar{Y}, \bar{\chi})$. Однако, далее будет использоваться краткая запись $\Sigma^Э$ и Σ^C.

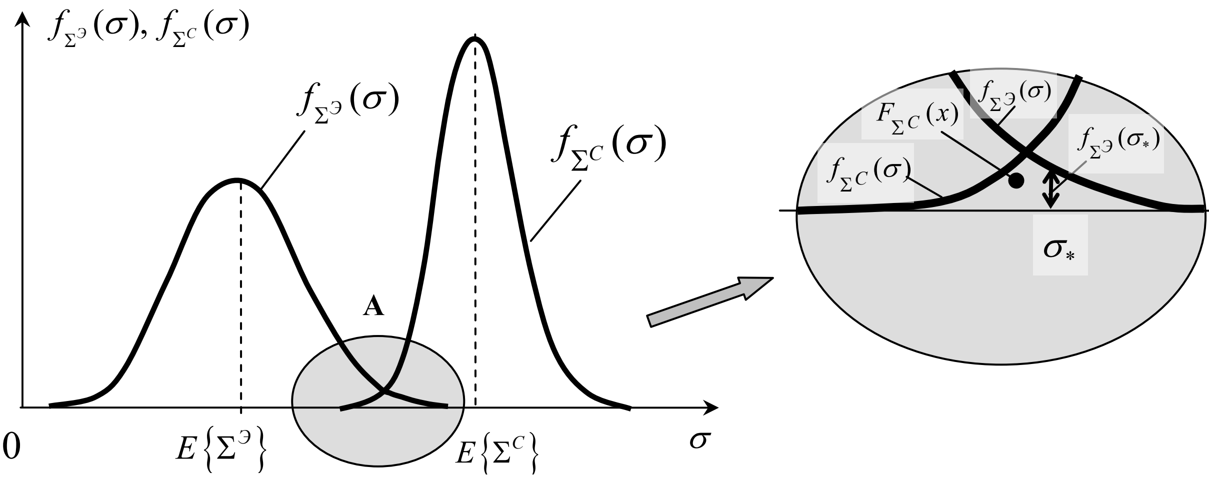


Рис. 2. Оценка вероятности разрушения с помощью функций плотностей распределения несущей способности и нагрузки

Между тем вероятность разрушения P_ϕ определяется областью перекрытия графиков плотностей распределения величин $\Sigma^Э$ и Σ^C (рис.2). Очевидно, что конфигурация этой области зависит не только от центров распределения $E\left\{\Sigma^Э\right\}$ и $E\left\{\Sigma^C\right\}$, но и от средне квадратичных отклонений $S\left\{\Sigma^C\right\}, S\left\{\Sigma^Э\right\}$, а также, если законы распределения величин $\Sigma^Э$ и Σ^C отличны от нормального, и от более высоких моментов распределений.

$$P_\phi = \varphi\left(\frac{E\left\{\Sigma^C\right\}}{E\left\{\Sigma^Э\right\}}, S\left\{\Sigma^C\right\}, S\left\{\Sigma^Э\right\}, \underset{\substack{моменты\ высших\\ порядков}}{\cdots} \mid \bar{\chi}\right) \tag{16}$$

Для рассматриваемого частного случая, когда величины $\Sigma^Э$ и Σ^C являются некоррелированными и распределены по нормальному закону, можно легко показать, что вероятность разрушения имеет вид [5, 6]:

$$P_\phi = \Phi\left(-\frac{E\{\Sigma^C\} - E\{\Sigma^Э\}}{\sqrt{\left(S\{\Sigma^C\}\right)^2 + \left(S\{\Sigma^Э\}\right)^2}} \mid \bar{\chi}\right) \tag{17}$$

где $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int\limits_{-\infty}^{x} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right)dt$ - нормальная функция распределения.

Таким образом, для рассматриваемого случая нормально распределенных, некоррелированных величин $\Sigma^Э$ и Σ^C, если при варьировании параметрами $\bar{\chi}$ средне квадратичные отклонения $S\{\Sigma^C\}$ и $S\{\Sigma^Э\}$ являются постоянными, то вероятность разрушения зависит только от величин математических ожиданий $E\{\Sigma^C\}$ и $E\{\Sigma^Э\}$.

Сопоставление выражений (15), (16) и (17) позволяет сделать предположение, что подходы, базирующиеся на назначении запасов и на теории надежности, являются эквивалентными в том случае, когда вторые и более высокие моменты распределений являются константами, то есть, не меняются при варьировании параметров проектирования $\bar{\chi}$. В этом случае изменение параметров $\bar{\chi}$ приводит к тому, что распределения величин $\Sigma^Э$ и Σ^C сдвигаются друг относительно друга, не изменяя своей формы. При этом изменение вероятности разрушения будет зависеть только от изменения соотношения между математическими ожиданиями $E\left\{\Sigma^Э\right\}$ и $E\left\{\Sigma^C\right\}$ (рис.3а). Тогда приближенное соотношение между запасом и вероятностью отказа (15) становится точным, то есть существует функциональная зависимость между запасом и вероятностью разрушения.

Если же в процессе варьирования параметрами $\bar{\chi}$, среднеквадратичные отклонения величин $\Sigma^{Э}$ и Σ^{C} будут изменяться (рис. 3б), то область перекрытия графиков $f_{\Sigma^{C}}(\sigma)$ и $f_{\Sigma^{Э}}(\sigma)$, а, следовательно, и вероятность отказа (по выражению 17), становится функцией не только от соотношения между математическими ожиданиями $E\{\Sigma^{C}\}$ и $E\{\Sigma^{Э}\}$, но и от среднеквадратичных отклонений $E\{\Sigma^{C}\}$ и $E\{\Sigma^{Э}\}$. В этом случае функциональной зависимости между запасом n вероятностью отказа P_{ϕ} не существует, и, следовательно, не существует и взаимнооднозначного соответствия между предельно допустимыми величинами $[n]$ и $\left[P_{\phi}\right]$.

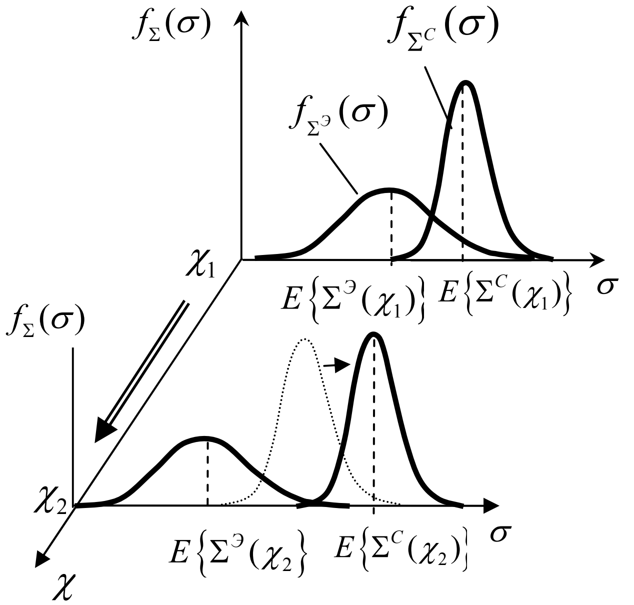


Рис. 3а. Пример случая, когда по мере варьирования параметром χ при увеличении запаса вероятность разрушения монотонно уменьшается

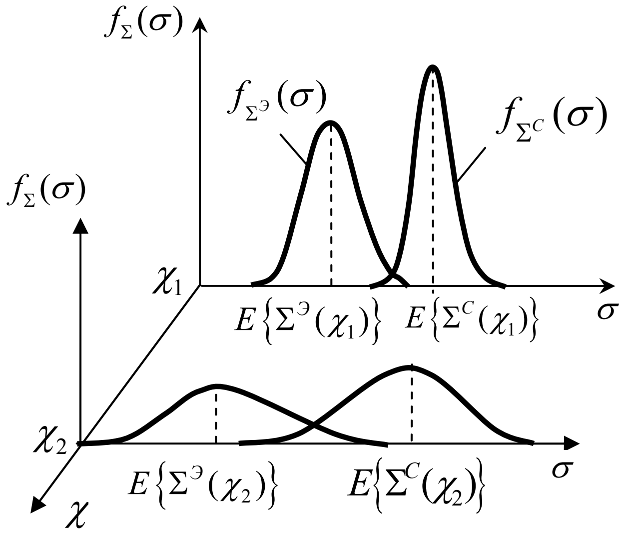


Рис. 3б Пример случая, когда по мере варьирования параметром χ, при увеличении запаса вероятность разрушения возрастает

3.2. Эквивалентность нормативного и вероятностного подходов в случае произвольной функции предельных состояний

Несмотря на то, что в общем случае, взаимнооднозначного соответствия между $[n]$ и $\left[P_{\phi}\right]$ не существует, может быть сформулировано достаточное условие наличия подобного с соответствия [7]. Величины $[n]$ и $\left[P_{\phi}\right]$ находятся между собой в определенной функциональной зависимости, если распределение нормализованной функции состояний $G(\bar{Y}, \bar{\chi})$, определяемой как отношение функции состояний $g(\bar{Y}, \bar{\chi})$ и номинальной функции состояний $g_0(\bar{\chi})$, является инвариантным по всей допустимой области D варьирования параметров проектирования $\bar{\chi}$. Более того, если данное условие выполняется, то можно доказать теорему, определяющую вид этой зависимости.

Следует отметить, что номинальная функция $g_0(\bar{\chi})$ является детерминированной функцией параметров проектирования, выбор которой зависит от вида функции состояний $g(\bar{Y}, \bar{\chi})$. Поиск такой функции $g_0(\bar{\chi})$, которая позволяет обеспечить инвариантность нормированного распределения $G(\bar{Y}, \bar{\chi})$ при варьировании параметрами $\bar{\chi}$, является отдельной задачей. Достаточно часто номинальную функцию можно получить, путем замены в функции $g(\bar{Y}, \bar{\chi})$ случайных переменных $\bar{Y}$ на их математические ожидания: $g_0(\bar{\chi}) = g(E\{\bar{Y}\}; \bar{\chi}\}$.

Теорема. Если нормированное распределение $G(\bar{Y}, \bar{\chi}) = g(\bar{Y}, \bar{\chi}) / g_0(\bar{\chi})$ является инвариантным по всей допустимой области параметров проектирования D, то существуют пары значений $\left([n], \left[P_\phi\right]\right)$, такие что:

1) Оказываются эквивалентными условия:

$$[n] \cdot g_0(\chi) \le 1 \tag{18}$$

и

$$P\left(g(\bar{Y}, \bar{\chi}) > 1 \,|\, \bar{\theta}\right) \le \left[P_\phi\right] \tag{19}$$

2) Существует функциональная связь между значениями $[n]$ и $\left[P_\phi\right]$, которая имеет вид:

$$P\left(g(\bar{Y}, \bar{\chi}) - [n] \cdot g_0(\bar{\chi}) > 0\right) = \left[P_\phi\right], \tag{20}$$

где параметры $\bar{\chi}$ считаются распределенными равномерно по области D.

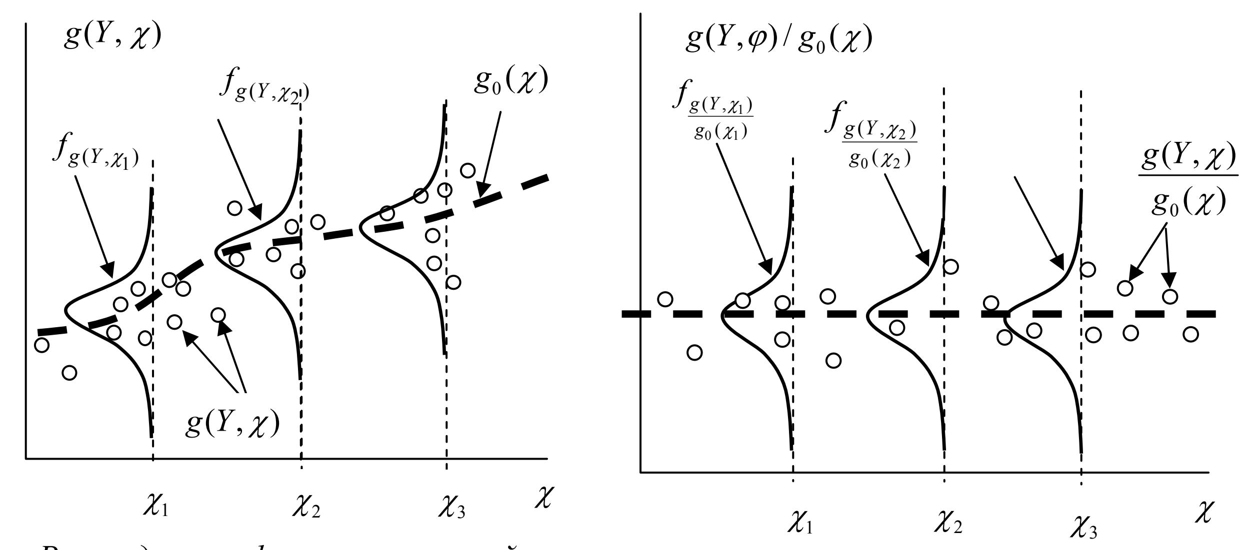
Доказательство этой теоремы, которая далее будет называться теоремой эквивалентности, представлено в работе [7]. Смысл теоремы эквивалентности заключается в том, что требование к обеспечению защищенности, выраженное через запас, может, при условии выполнения условия инвариантности нормализованного распределения $G(\bar{Y}, \bar{\chi})$, быть переписано в вероятностной постановке (как условие обеспечения защищенности по теории надежности). При этом назначенный запас $[n]$ равен $\left(1 - \left[P_\phi\right]\right) -$му квантилю нормализованной функции состояний $G(\bar{Y}, \bar{\chi}) = g(\bar{Y}, \bar{\chi}) / g_0(\bar{\chi})$.

(т.к. $P\left(g(\bar{Y}, \bar{\chi}) - [n] \cdot g_0(\bar{\chi}) > 0\right) = \left[P_\phi\right] \;\Rightarrow\; P\left(g(\bar{Y}, \bar{\chi}) / g_0(\bar{\chi}) > [n]\right) = 1 - \left[P_\phi\right]$).

Итак, достаточным условием выполнения равенства (20), является инвариантность нормированного распределение $g(\bar{Y}, \bar{\chi}) / g_0(\bar{\chi})$ по всей допустимой области D параметров проектирования $\bar{\chi}$. Поиск функции $g_0(\bar{\chi})$, обеспечивающей точное выполнение условия инвариантности является весьма сложной задачей. Однако, как правило, достаточно принять номинальную функцию в виде: $g_0(\bar{\chi}) = g\left(E\left\{\bar{Y}\right\}, \bar{\chi}\right)$, чтобы условие инвариантности выполнялось приближенно.

Это объясняется тем, что даже если при варьировании параметров $\bar{\chi}$ распределение $g(\bar{Y}, \bar{\chi})$ меняется весьма сильно, нормированное распределение величины $G(\bar{Y}, \bar{\chi}) = g(\bar{Y}, \bar{\chi}) / g_0(\bar{\chi})$ будет, во многих случаях, меняться незначительно, из-за взаимной компенсации изменений величин $g(\bar{Y}, \bar{\chi})$ и $g_0\left(E\left\{\bar{Y}\right\}, \bar{\chi}\right)$ при варьировании $\bar{\chi}$ (т.е. величина $g(\bar{Y}, \bar{\chi}) / g\left(E\left\{\bar{Y}\right\}, \bar{\chi}\right) \approx 1$) (см. рис. 4). Это будет происходить, в тех случаях, когда при варьировании $\bar{\chi}$ будет существенно меняться только математическое ожидание величины $g(\bar{Y}, \bar{\chi})$, в то время как остальные моменты распределения изменяются незначительно.

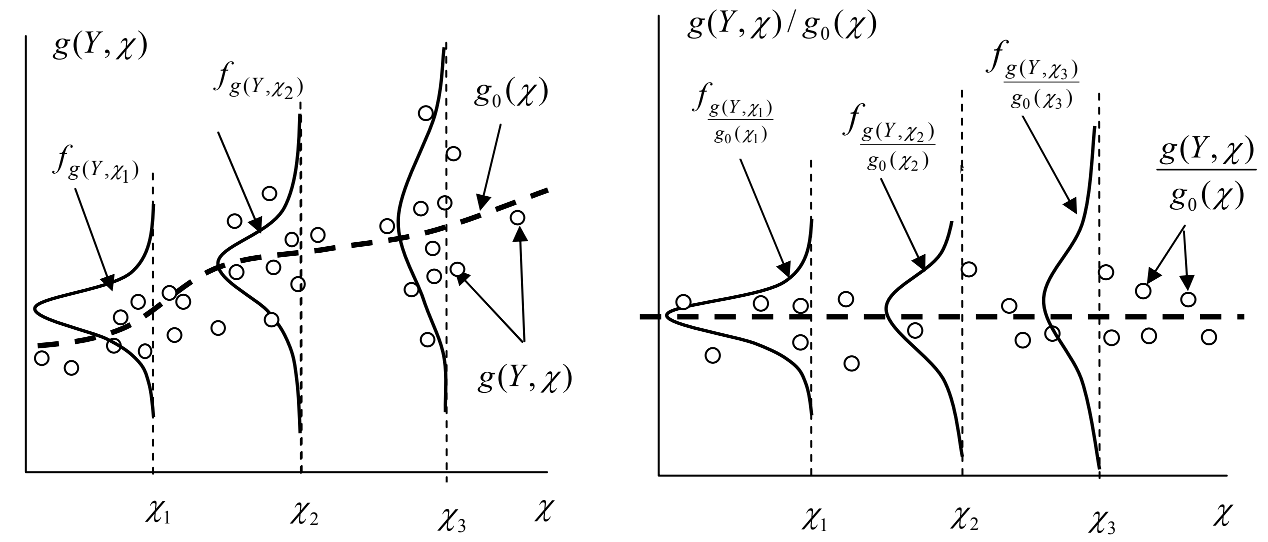
Однако могут быть приведены примеры, когда при варьировании параметров $\bar{\chi}$ характер распределения $g(\bar{Y}, \bar{\chi})$ будет меняться (например, изменяться дисперсия, или другие моменты распределения). В этом случае распределение нормированной величины $g(\bar{Y}, \bar{\chi}) / g_0(\bar{\chi})$ при варьировании параметрами $\bar{\chi}$ уже не будет постоянным (рис. 5).



а. Распределения функции состояний $g(Y,\chi)$

б. Распределение нормированной функции состояний $G(Y,\chi) = g(Y,\chi)/g_0(\chi)$

Рис. 4. Пример распределения функции состояний (а) и нормированной функции состояний (б) для случая, когда распределение нормированной функции состояний инвариантно при варьировании параметра χ.



а. Распределения функции состояний $g(Y,\chi)$

б. Распределение нормированной функции состояний $G(Y,\chi) = g(Y,\chi)/g_0(\chi)$

Рис. 5. Пример распределения функции состояний (а) и нормированной функции состояний (б) для случая, когда распределение нормированной функции состояний не инвариантно при варьировании параметра χ.

Легко проверить, что для рассмотренной в п.3.1 системы, имеющей функцию состояния $g(\overline{Y},\overline{\chi})$ вида (13), распределение нормированной функции состояния $G(\overline{Y},\overline{\chi}) = \dfrac{\Sigma^Э(\overline{Y},\overline{\chi})}{\Sigma^C(\overline{Y},\overline{\chi})} \Bigg/ \dfrac{E\left\{\Sigma^Э(\overline{Y},\overline{\chi})\right\}}{E\left\{\Sigma^C(\overline{Y},\overline{\chi})\right\}}$ будет инвариантно при варьировании параметров $\overline{\chi}$, в том случае если при этом среднеквадратичные отклонения $S\left\{\Sigma^Э(\overline{Y},\overline{\chi})\right\}$ и $S\left\{\Sigma^C(\overline{Y},\overline{\chi})\right\}$ будут постоянны.

Это подтверждает сделанный в п.3.1 вывод о наличии для данной системы взаимнооднозначного соответствия между $[n]$ и $\left[P_\phi\right]$.

3.3. Использование теоремы эквивалентности

В соответствии с теоремой эквивалентности, независимо от типа распределения функции состояния $g(\overline{Y},\overline{\chi})$, условие обеспечения защищенности по критерию надежности (19), может быть заменено на условие обеспечения защищенности по критерию запаса (18), если распределение $G(\overline{Y},\overline{\chi}) = g(\overline{Y},\overline{\chi})/g_0(\overline{\chi})$ является инвариантным по допустимой области D конструктивных параметров $\overline{\chi}$.

Рассмотрим две области пространства конструктивных параметров:

$\Omega_P \equiv \left\{\overline{\chi} : P\left(g(\overline{Y},\overline{\chi}) > 1 \,|\, \overline{\chi}\right) \le \left[P_\phi\right]\right\}$ - область пространства конструктивных параметров, которая удовлетворяет условию обеспечения защищенности по критерию надежности.

$\Omega_n \equiv \left\{\overline{\chi} : [n]\cdot g_0(\overline{\chi}) \le 1\right\}$ - область, в которой удовлетворяются условие обеспечения защищенности по критерию запаса.

Используя теорему эквивалентности, можно утверждать, что если распределение $g(\overline{Y},\overline{\chi})/g_0(\overline{\chi})$ является инвариантным по допустимой области конструктивных параметров D, то область Ω_P, которая удовлетворяет требованию по надежности, и область Ω_n, удовлетворяющая требованиям по запасу, оказываются идентичными.

Было бы полезно с помощью выражения (20) получить соотношение между $[n]$ и $\left[P_\phi\right]$. Поскольку, наличие подобной зависимости (рис. 6) позволит заменить задачу проектирования по критерию надежности на задачу проектирования по критерию запаса: то есть по заданной предельно допустимой вероятности отказа $\left[P_\phi\right]$ можно будет определить соответствующее необходимое значение нормативного запаса $[n]$.

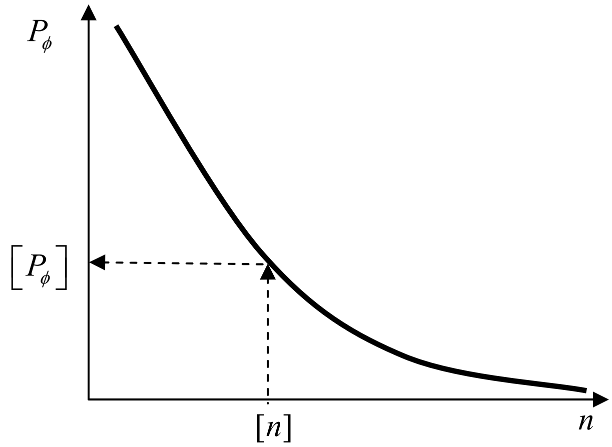


Рис. 6. Зависимость между запасом и вероятностью отказа

Поскольку условие (20) может быть переписано в виде:

$$P\left(\frac{g(\overline{Y},\overline{\chi})}{g_0(\overline{\chi})} > [n]\right) = P\left(G(\overline{Y},\overline{\chi}) > [n]\right) = \left[P_\phi\right],$$

где $G(\overline{Y},\overline{\chi}) = g(\overline{Y},\overline{\chi})/g_0(\overline{\chi})$.Следовательно, $[n]$ является $\left(1-\left[P_\phi\right]\right)$ -ым квантилем случайной переменой G .

Для оценки зависимости $[n]$ от $\left[P_\phi\right]$ может быть предложена достаточно простая процедура, основанная на методе Монте Карло [7]. Пусть осуществляется выборка M пар значений $(\bar{Y}, \bar{\chi})$, где значения переменных $\bar{Y}$ выбираются случайным образом *с учетом их известных функций распределения,* а значения параметров $\bar{\chi}$ выбираются исходя из их равномерного распределения по области D:

$$\left\{\left(Y^{(1)}; \chi^{(1)}\right); \left(Y^{(2)}; \chi^{(2)}\right); \ldots; \left(Y^{(M)}; \chi^{(M)}\right)\right\}$$

В результате, используя метод Монте Карло, получив для заданного значения $[n]$ множество значений $\left\{G^{(1)}; G^{(2)}; \ldots; G^{(M)}\right\}$, можно оценить значение вероятности отказа $\left[P_\phi\right]$, соответствующее данному запасу $[n]$:

$$\left[P_\phi\right] \approx \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{M} \left(G^{(i)} > [n]\right) = \left[\tilde{P}_\phi\right] \tag{21}$$

Далее варьируя величиной $[n]$, можно последовательно, применяя выражение (21), получить функциональную зависимость между $[n]$ и $\left[P_\phi\right]$.

Например, если $M = 10000$ и допустимая вероятность отказа $\left[P_\phi\right] = 0,01$, то соответствующий запас представляет собой значение из множества $\left\{G^{(1)}; G^{(2)}; \ldots; G^{(M)}\right\}$, расположенное на $0,01 \times M = 100 -$ ом месте в порядке убывания величин $G^{(i)}$. Таким образом, одна и та же полученная методом случайной выборки последовательность $\left\{G^{(1)}; G^{(2)}; \ldots; G^{(M)}\right\}$ может быть последовательно использована для построения всей функциональной зависимости между $[n]$ и $\left[P_\phi\right]$.

3.4. Использование соотношений между запасами и вероятностями отказов для случая множественных предельных состояний системы

Для сложных систем характерна множественность предельных состояний $ПC_1, ПC_2, \ldots ПC_q$. Поэтому при проектировании таких систем встает вопрос о рациональном выборе соотношений между предельными запасами $[n_1],[n_1],\ldots,[n_q]$ по различным механизмам достижения предельных состояний.. При этом часто делают выбор в пользу равнонадежных систем, задавая равные предельно допустимые вероятности отказов по различным предельным состояниям $\left[P_{ПC1}\right] = \left[P_{ПC2}\right] = \ldots = \left[P_{ПCq}\right]$ и назначая, с учетом соотношений вида (20), предельно-допустимые запасы $[n_1],[n_1],\ldots,[n_q]$, соответствующие условию равнонадежности (рис. 7). В таком подходе проектирование защищенных систем представляет собой итерационную процедуру, при котором конструктивные параметры варьируются до тех пор, пока не будет выполнено условие обеспечения защищенности вида (7) по всем идентифицированным предельным состояниям.

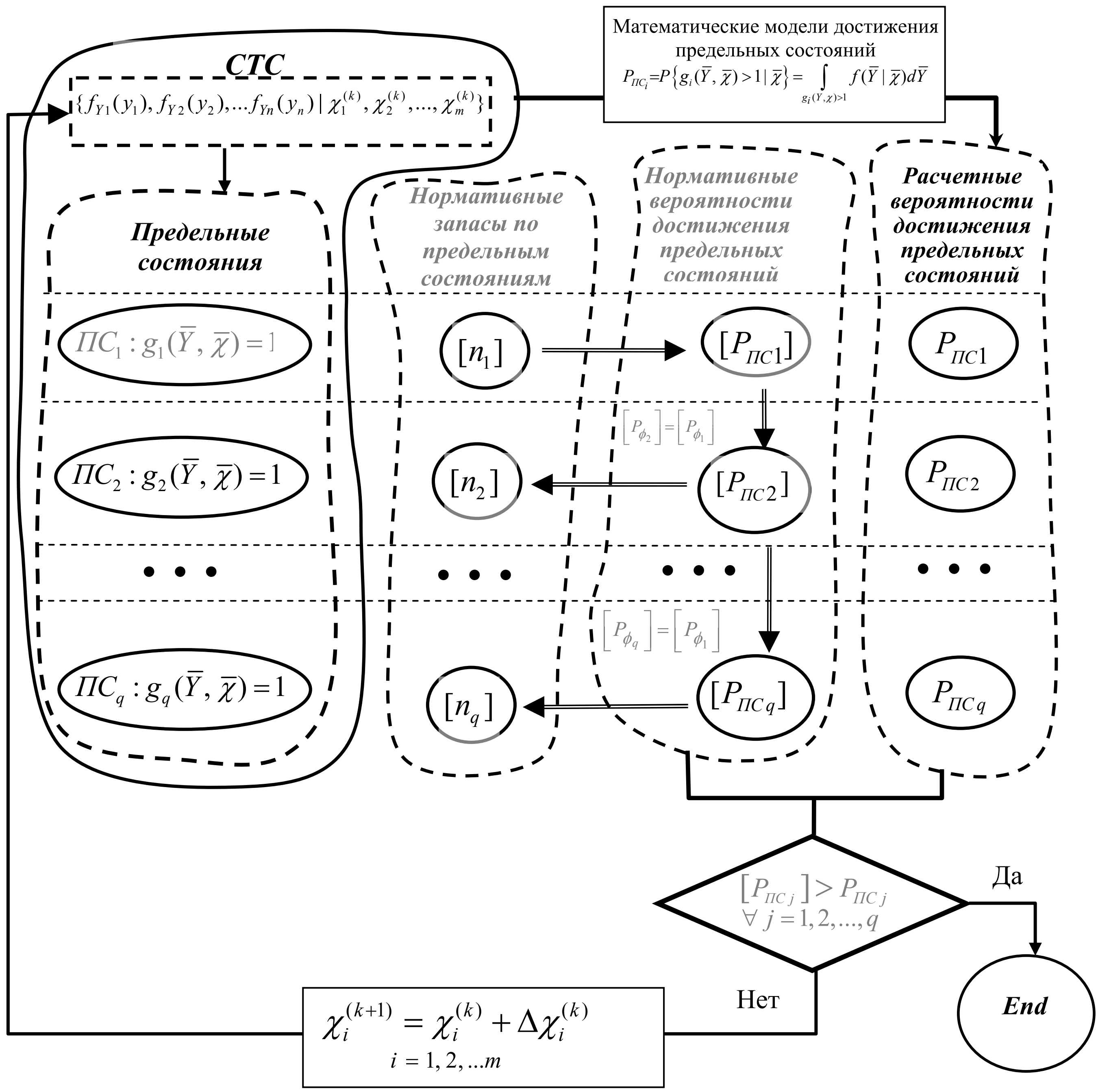


Рис. 7. Проектирование равнонадежных систем при множественных механизмах достижения предельных состояний

Следует отметить, что с точки зрения размещения ресурсов при обеспечении защищенности СТС проектирование систем при вероятностном подходе, позволяющем строить равнонадежные системы по различным механизмам достижения предельных состояний является более рациональным, чем обеспечение защищенности при нормативном подходе. Однако оно не является оптимальным, поскольку в этом случае не учитывается критичность отказов, связанных с достижением различных предельных состояний. Поэтому при проектировании СТС более эффективным является использование подходов, основанных на минимизации рисков, которые будут рассмотрены в п.4.

4. Обеспечение защищенности по критерию риска

Разработка моделей теории рисков позволяют реализовать комплексный подход к обеспечению защищенности, учитывающий вероятность достижения предельных состояний и связанные с ним ущербы.

При этом проектируемая система считается защищенной, если расчетная величина экономического риска $R_Э$ оказывается меньше нормативного предельно допустимого значения $[R_Э]$:

$$R_Э < \left[R_Э\right]. \qquad (22)$$

Здесь под экономическим риском понимается двухфакторный функционал вероятности отказа $P_\phi(\bar{Y} \mid \bar{\chi})$ и последствий отказа системы $U_\phi(\bar{Y} \mid \bar{\chi})$, причем при оценке экономических рисков этот функционал выбирается в форме произведения указанных факторов:

$$R(\bar{Y} \mid \bar{\chi}) = P_\phi(\bar{Y} \mid \bar{\chi}) \cdot U_\phi(\bar{Y} \mid \bar{\chi}) \qquad (23)$$

Вероятность достижения предельного состояния определяется согласно выражению (9) и оценивается с помощью методов теории надежности.

Калькуляция ущербов от отказов технических систем является отдельной задачей, решаемой с помощью специальных методик оценки ущербов при техногенных авариях [8]. Ущерб от достижения элементом системы предельного состояния и последующего отказа системы выражается в нарушении целостности системы или ухудшении других свойств; фактических или возможных экономических и социальных потерях (отклонение здоровья человека от среднестатистического значения, т.е. его болезнь или смерть; нарушение процесса нормальной хозяйственной деятельности; утрата того или иного вида собственности; ухудшение природной среды и т.д.), возникающих в результате отказа СТС. При рассмотрении последствий отказов СТС ущерб представляется в виде суммы прямого $U_\phi^{пр}$ и косвенного $U_\phi^{кос}$ ущербов:

$$U_\phi = U_\phi^{пр} + U_\phi^{кос}.$$

Под *прямым ущербом* при отказе СТС понимаются потери и убытки населения, природной среды и всех структур народного хозяйства (в т.ч. самой системы), попавших в зону действия поражающих и вредных факторов аварии. Они определяются количеством погибших и пострадавших среди персонала и населения, невозвратных потерь основных фондов, оцененных природных ресурсов и убытков, вызванных этими потерями. *Косвенный ущерб* от отказа СТС – это потери, убытки и дополнительные затраты, которые понесут население, объекты природной среды и народного хозяйства, не попавшие в зону действия опасных факторов аварии, и которые вызваны нарушениями и изменениями в сложившейся структуре хозяйственных связей, инфраструктуре. Кроме того, это потери (дополнительные затраты), вызванные необходимостью проведения отдельных мероприятий по ликвидации последствий аварии.

Экономические риски в отличие индивидуальных и социальных рисков, как правило, не нормируются государственными органами. Вопрос о выборе предельных значений экономического риска обычно решается на уровне организаций, эксплуатирующих СТС данного типа, с учетом требований страховых компаний. При этом, безусловно, должны учитываться такие факторы как значимость системы для жизнедеятельности страны, региона или местного сообщества, уровня социально-экономического развития страны, восприятия риска в обществе и т.д. Величина $[R_Э]$ определяет значение экономического риска, с которым общество готово мириться ради тех благ, которые оно получает с помощью эксплуатируемой системы. Существуют различные подходы к определению величины допустимого риска. Так, например, в Голландии для таких гидротехнических сооружений как дамбы законодательно установлена величина допустимого экономического риска $[R_Э] = 1 \cdot 10^4$ *долл/год*. Практика страховых компаний США предполагает выбор в качестве $[R_Э] = C / T_L \times 20\%$ *долл / год*, где C - стоимость объекта, T_L - срок его эксплуатации. С другой стороны, величина предельно допустимого экономического риска может оцениваться как произведение нормативной предельно допустимой вероятности отказа $\left[P_\phi\right]$, установленной для систем данного типа по выражению (11), и, определенной доли (α) стоимости

C объекта[3]: $[R_Э]=\left[P_\phi\right]\cdot\alpha\cdot C$. Кроме того, допустимый риск может оцениваться как отношение величины некоторого критического риска $R_Э^C$, при котором наступает банкротство компании, эксплуатирующей систему, и выбранного коэффициента запаса по рискам n_R [9].

$[R_Э]=R_Э^C/n_R$.

Величина расчетного экономического риска $R_Э$, связанного с эксплуатацией системы, определяется как математическое ожидание ущерба:

$$R_Э=E\{U\}=\int_0^\infty u\, f_U(u)du\,, \tag{24}$$

где $f_U(u)$ - плотность распределения ущерба. Получить аналитическое выражение, задающее функцию плотности распределения ущерба для сложных систем, не представляется возможным. Поэтому для оценки ущербов и рисков используются методы дискретизации, предусматривающие выделение конечного множества сценариев развития аварии и калькуляцию ущербов, соответствующих каждому из сценариев.

Для характеристики экономического риска, связанного с эксплуатацией рассматриваемой системы, часто используется, так называемая, FD кривая, которая представляет собой построенную в двойных логарифмических координатах зависимость:

$FD(u)=P(U>u)$,

где $P(U>u)$ вероятность превышения случайной величиной U - «ущерб от отказа системы» текущего значения ущерба u. Очевидно, что FD-кривая может быть определена через функцию плотности вероятности распределения ущерба $f_U(u)$:

$$FD(u)=1-F_U(u)=P(U>u)=\int_x^\infty f_U(u)du$$

Для построения FD кривой для рассматриваемой системы необходимо провести сценарный анализ, определить вероятности реализации различных сценариев и соответствующие им ущербы. Затем идентифицированные сценарии сортируются в порядке возрастания тяжести ущерба, после чего для уровня ущерба, соответствующего каждому из сценариев, подсчитывается вероятность превышения этого уровня.

Легко показать, что величина экономического риска R равна площади A под FD кривой (рис. 8). Дейсвительно:

$$A=\int_0^\infty(1-F_U(u))du=\int_0^\infty\int_u^\infty f_U(x)dxdu=\int_0^\infty\int_u^x f_U dudx=\int_0^\infty xf_U(x)dx=E\{U\}$$

Важно отметить, что величина ущерба при достижении предельного состояния не является детерминированной, причем основная доля ущерба, связана не с отказом элемента системы, достигшим предельного состояния. Для сложных систем достижение предельного состояния не приводит к немедленному разрушению системы в целом. По сути, факт достижения предельного состояния инициирует ветвь сценарного дерева, которая состоит из группы сценариев и описывает закритическое поведение системы (возможности перераспределения нагрузок, наличия резервирования, срабатывание систем защиты и аварийного останова и т.д.). Поэтому для оценки величины ущерба, который может наступить после достижения предельного состояния, необходимо проанализировать сценарии S_j закритического поведения системы (рис. 9), которые инициируются после достижения предельного состояния $ПС_i$, то есть оценить вероятности реализации различных конечных состояний $КС_j$ и их последствия $U(КС_j)$ как для самой системы, так и окружающей среды.

---

[3] Косвенные ущербы, связанные с невыполнением системой предписанных ей функций, учитываются с помощью коэффициента социальной значимости системы, который входит в выражение (11)

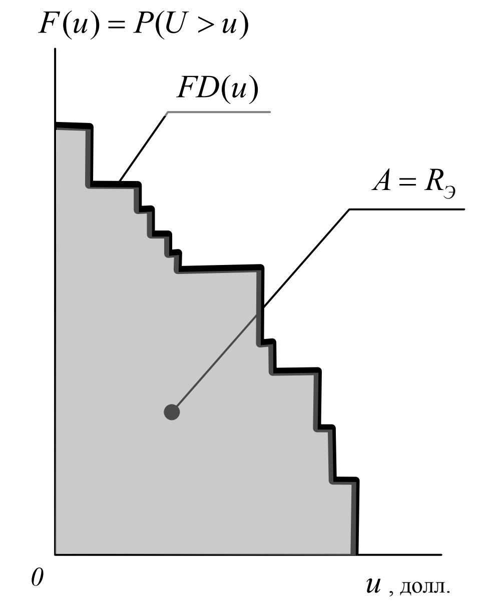


Рис. 8. FD кривая экономического риска

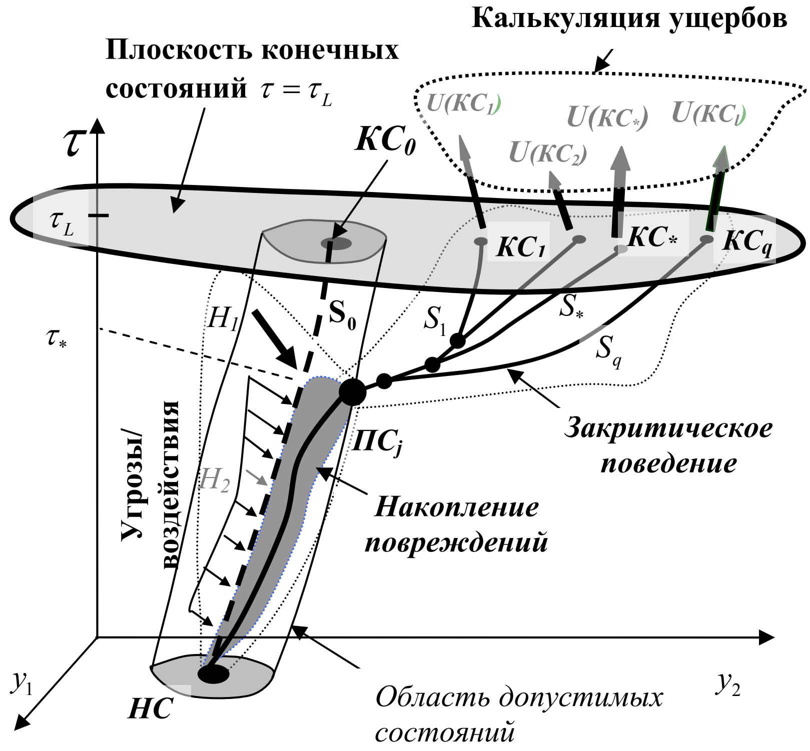


Рис. 9. Сценарный анализ СТС на этапе накопления повреждений и закритического поведения

НС – начальное состояние системы; S_0 – сценарий успешного выполнения системой своих функций; $КС_0$ - заданное конечное состояние СТС, ε_L - окрестность точки $КС_0$, в которой конечные состояния можно считать неповрежденными; H_i (i=1,2,...,n) воздействия на систему, $ПС_j$ (j=1,2,...,q) - предельное состояния, S_k (k=1, 2, ...l) – сценарии отказа, реализующиеся после достижения предельных состояний; $КС_k$ (k=1,2, ...l)-поврежденные конечные состояния системы, соответствующие сценариям S_k; $U(КС_k)$ (k=1,2, ...l) - ущербы, соответствующие конечным состояниям $КС_k$

Для описания процессов достижения предельных состояний и сценариев закритического поведения технической системы используют сценарные деревья (рис.9), которые могут быть проанализированы с помощью специальных графовых моделей, (деревьев событий, деревьев отказа, байесовых сетей) и обобщенно представлены с помощью матричного выражения:

$$\underbrace{\begin{Bmatrix} P(КС_0) \\ P(КС_1) \\ \cdot\,\cdot\,\cdot \\ P(КС_n) \end{Bmatrix}}_{\overline{КС}} = \underbrace{\begin{bmatrix} P(КС_0 \mid ПС_1) & P(КС_0 \mid ПС_2) & \cdots P(КС_0 \mid ПС_m) \\ P(КС_1 \mid ПС_1) & P(КС_1 \mid ПС_2) & \cdots P(КС_1 \mid ПС_m) \\ & \cdots & \\ P(КС_q \mid ПС_1) & P(КС_q \mid ПС_2) & \cdots P(КС_q \mid ПС_m) \end{bmatrix}}_{[V_S]} \times \left(\overbrace{\underbrace{\begin{bmatrix} P[ПС_1 \mid H_1] & P[ПС_1 \mid H_2] & \cdots & P[ПС_1 \mid H_n] \\ P[ПС_2 \mid H_1] & P[ПС_2 \mid H_2] & \cdots & P[ПС_2 \mid H_n] \\ & \cdot\,\cdot\,\cdot & & \\ P[ПС_m \mid H_1] & P[ПС_m \mid H_2] & \cdots & P[ПС_m \mid H_n] \end{bmatrix}}_{[V_e]} \times \underbrace{\begin{Bmatrix} P(H_1) \\ P(H_2) \\ \cdot\,\cdot\,\cdot \\ P(H_n) \end{Bmatrix}}_{\overline{H}}}^{\overline{ПС}} \right)$$

$[V_s]$ - матрица структурной уязвимости, компонентами которой являются условные вероятности достижения системой различных конечных состояний $КС_i$ в случае реализации предельных состояний $ПС_j$: $V(k; j) = P[КС_k \mid ПС_j]$. Эта матрица характеризует закритическое поведение системы.

$[V_e]$ - матрица достижения предельных состояний (матрица локальной уязвимости системы, матрица накопления повреждений), компонентами которой являются условные вероятности достижения предельных состояний $\varPi C_j$ при различных экстремальных воздействиях H_i : $V(j;i) = P[\varPi C_j \mid H_i]$. Эта матрица характеризует этап деградации и накопления повреждений

$\overline{H}$ - вектор угроз, компонентами которого являются вероятности осуществления различных воздействий на систему (экстремальные однократные воздействия, циклические воздействия, температурные воздействия, воздействия агрессивных сред и т.д.) $H(i) = P(H_i)$. Для учета нелинейных эффектов при комбинированном (многофакторном) воздействии вектор $\overline{H}$ может включать дополнительные компоненты, отражающие синергетические эффекты (усиление от взаимного воздействия).

$\overline{\varPi C} = [V_e] \cdot \overline{H}$ - вектор-столбец предельных состояний, компоненты которого являются вероятности достижения предельных состояний: $\varPi C(j) = P(\varPi C_j)$

$\overline{KC} = [V_S] \cdot \overline{\varPi C}$ - вектор-столбец конечных состояний системы, компоненты которого являются вероятности реализации различных поврежденных состояний KC_q : $KC(k) = P(KC_k)$.

$\overline{U}$ - вектор-столбец ущербов, компонентами которого являются ущербы, которые будут иметь место при реализации различных конечных состояний

Проведенный анализ позволяет оценить величину экономического риска, связанного с эксплуатацией системы, который будет определяться выражением:

$$R = \left\{ \begin{bmatrix} P(KC_0 \mid \varPi C_1) & P(KC_0 \mid \varPi C_2) & \cdots P(KC_0 \mid \varPi C_q) \\ P(KC_1 \mid \varPi C_1) & P(KC_1 \mid \varPi C_2) & \cdots P(KC_1 \mid \varPi C_q) \\ & \cdots & \\ P(KC_l \mid \varPi C_1) & P(KC_l \mid \varPi C_2) & \cdots P(KC_l \mid \varPi C_q) \end{bmatrix} \times \left(\begin{bmatrix} P[\varPi C_1 \mid H_1] & P[\varPi C_1 \mid H_2] & \cdots & P[\varPi C_1 \mid H_n] \\ P[\varPi C_2 \mid H_1] & P[\varPi C_2 \mid H_2] & \cdots & P[\varPi C_2 \mid H_n] \\ & . \ . \ . & & \\ P[\varPi C_q \mid H_1] & P[\varPi C_q \mid H_2] & \cdots & P[\varPi C_q \mid H_n] \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} P(H_1) \\ P(H_2) \\ . \ . \ . \\ P(H_n) \end{Bmatrix} \right) \right\} \times \begin{Bmatrix} U(KC_0) \\ U(KC_1) \\ . \ . \ . \\ U(KC_l) \end{Bmatrix}$$

Следует отметить, что, умножив левую и правую часть выражения (20) на некоторый предельный ущерб U_*, который устанавливается равным определенной доли α стоимости C системы $U_* = \alpha \cdot C$ (например, часто выбирают $\alpha = 20\%$), можно записать соотношение (24), которое аналогично выражению эквивалентности нормативного и вероятностного подходов, и определяет эквивалентность нормативного подхода и подхода, основанного на управлении риском, при условии, что нормированное распределение функции предельных состояний $G(\overline{Y}, \overline{\chi}) = g(\overline{Y}, \overline{\chi}) / g_0(\overline{\chi})$ является инвариантным по всей допустимой области параметров проектирования D.

$$P\left(g(\overline{Y}, \overline{\chi}) - [n] \cdot g_0(\overline{\chi}) > 0\right) \cdot U_* = \left[R_Э\right] \qquad (25)$$

В общем случае, это соотношение устанавливает некоторую оценочную зависимость между допустимым экономическим риском $[R_Э] = \left[P_\phi\right] \cdot U_*$ и нормативным запасом $[n]$, которая выполняется точно при условии соблюдения требования инвариантности нормированного распределения $G(\overline{Y}, \overline{\chi})$.

В рассмотренном ранее нормативном и вероятностном подходах критичность отказов учитывается неявно путем увеличения нормативных запасов для опасных технических систем (при нормативном подходе) и введения коэффициента социальной значимости ξ_S (при вероятностном подходе). К достоинствам основанного на оценке риска подхода следует отнести то, что он позволяет учитывать критичность отказов в явном виде. Кроме того, этот подход позволяет достаточно легко перейти к случаю множественных механизмов достижения предельных состояний и рассматривать закритическое поведение СТС после отказов их отдельных элементов.

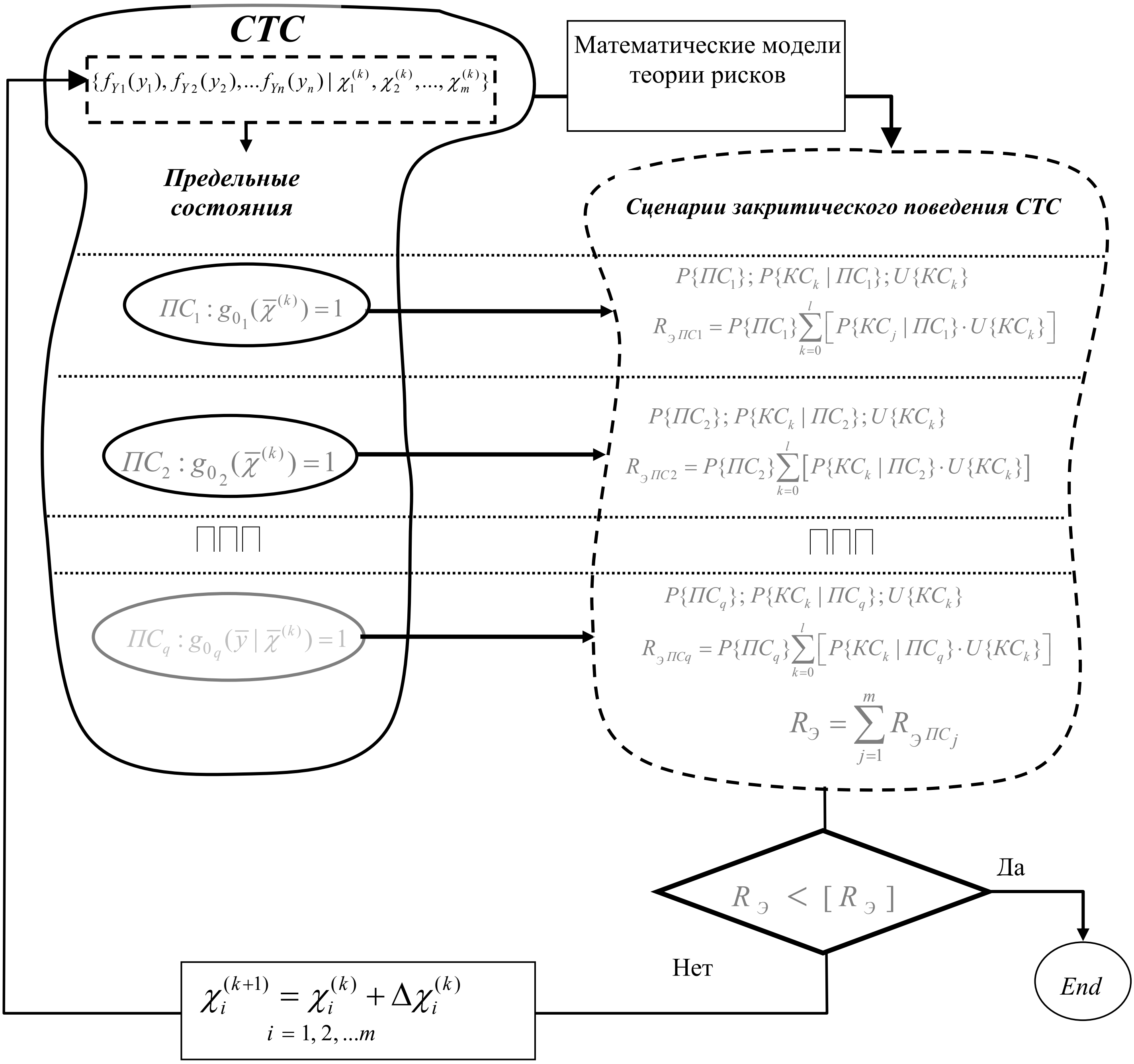


Рис. 10. Процедура обеспечения защищенности по критерию риска.

Влияние человеческого фактора, которое при нормативном и вероятностном подходах учитывается весьма грубо (путем увеличения запасов n_i или введения специального коэффициента k_{HF} в выражение для оценки $\left[P_\phi\right]$, соответственно), в случае основанного на управлении риском подхода может описываться более точно: с помощью введения специальных узлов графовых моделей, описывающих действия и состояния операторов (если используются модели учета человеческого фактора первого поколения) или создания многоуровневых оценки риска в техно-социальных систем (модели второго поколения) [10].

Итерационная процедура поиска обеспечения защищенности СТС по критерию риска представлена на рис. 10.

Важно иметь в виду, что экономический риск, связанный с функционированием СТС, представляет собой интегральный показатель, характеризующий вероятность наступления неблагоприятных событий и размер ущерба при их наступлении. При оценке экономических ущербов учитываются также и экономические потери, связанные с возможной гибелью операторов (персонала и населения прилегающих территорий). То есть, показатель экономического риска включает в себя и различные аспекты индивидуального и социального рисков. Это обстоятельство и позволяет во многих случаях ограничиваться проверкой условиям непревышения предельного допустимого экономического риска при оценке защищенности объекта. Однако, необходимо иметь в виду, что в более общей постановке, обеспечение защищенности по критерию риска требует помимо выполнения условия (22), которое учитывает, преимущественно, экономические аспекты опасных событий, связанных с эксплуатацией рассматриваемой СТС, также и соблюдения требований, касающихся непревышения индивидуальных рисков R_I для операторов и персонала СТС установленного предельно допустимого значения индивидуального риска $[R_I]$, а также нахождения $FN(n)$ кривой социального риска, построенной для рассматриваемой системы, в установленной законодательно в соответствии с принципом практической целесообразности (англ. ALARP principle) области приемлемого социального риска (рис. 11). В этой постановке, обеспечение защищенности по критерию риска предполагает одновременное выполнение следующего комплекса условий:

$$\begin{cases} R_Э < [R_Э] \\ R_I < [R_I] \\ FN(n) - [R_S(n)] < 0 \ \ \forall \ n \in \{1, 2, 3, \ldots\} \end{cases} \tag{26}$$

Вопросы нормирования и регулирования индивидуальных и социальных рисков значительно лучше проработаны, чем это имеет место для экономических рисков (см., например, [11, 12, 13]).

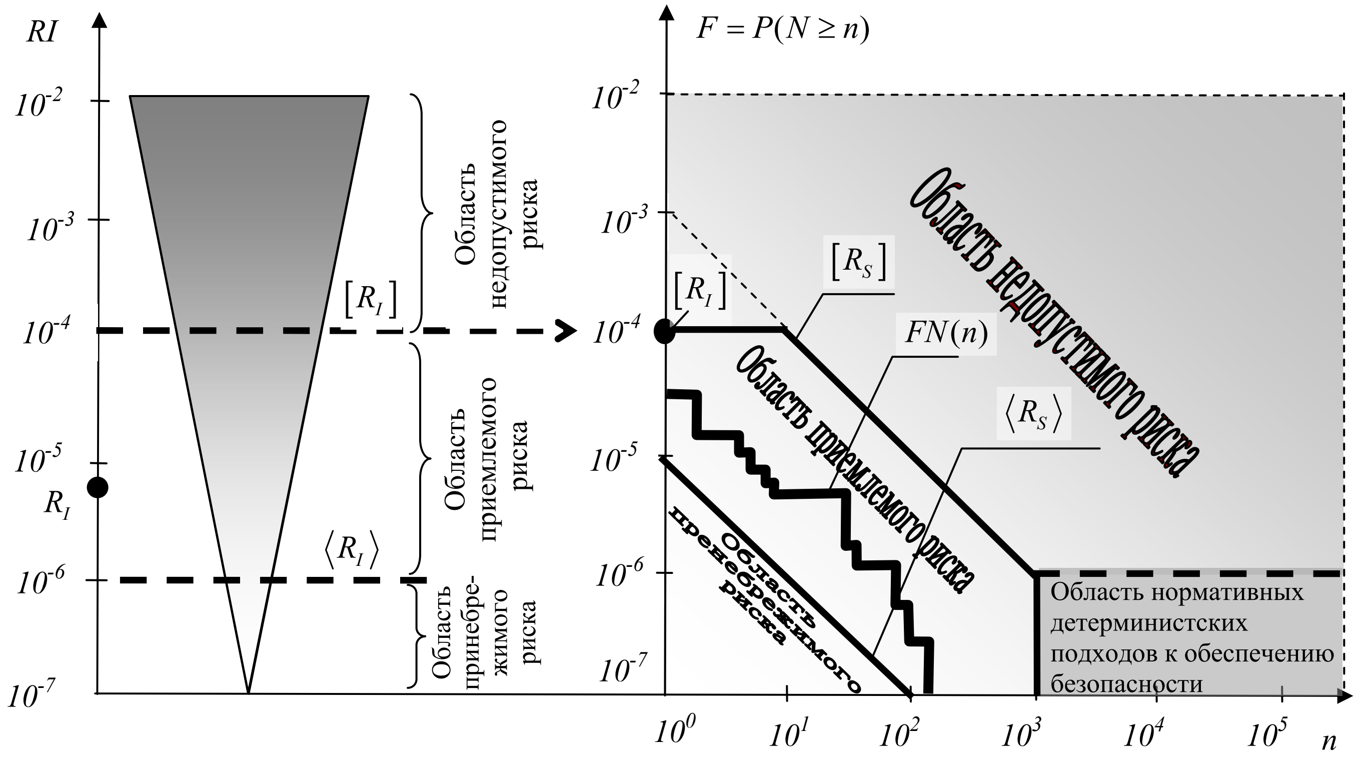


Рис. 11 Характеристики индивидуального и социального риска при нормировании защищенности сложных технических систем

$[R_I]$ *и* $\langle R_I \rangle$ *- нормативные значения предельно допустимого и пренебрежимого индивидуального риска,*

$[R_I]$ *и* $\langle R_I \rangle$ *- критериальные линии предельно допустимого и пренебрежимого социального риска*

$FN(n)$ - расчетная кривая социального риска для рассматриваемой системы

В заключении необходимо отметить, что обеспечение защищенности СТС по критерию рисков имеет ряд преимуществ по сравнению с нормативным и вероятностным подходами, поскольку они позволяют:

1) При оценке защищенности системы в явной форме учитывать критичность отказов.

2) Оценивать защищенность на системном уровне, учитывая способность СТС функционировать при наличии локальных повреждений.

3) Учитывать множественность механизмов достижения предельных состояний.

4) В более строгой форме учитывать влияние человеческого фактора на надежность технических систем с помощью гибридных многоуровневых моделей.

5) Оптимизировать в процессе обеспечения защищенности суммарные затраты жизненного цикла СТС с учетом стоимости затрат на обеспечение защищенности и рисков аварий.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант №10-08-00989.

Литература

1. Махутов Н.А., Резников Д.О. Сопоставительная оценка нормативного и основанного на управлении риском подходов к оценке защищенности сложных технических систем//Проблемы машиностроения и надежности машин. 2011 №6, с.92-98
2. Махутов Н.А., Резников Д.О., Петров В.П., Куксова В.И.. Нормативные и вероятностные подходы к обеспечению защищенности критически важных объектов// Безопасность в техносфере. 2011 г. №4 с. 5-12
3. Махутов Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. Новосибирск. Наука 2005. В 2 ч. Часть 1. Критерии прочности и ресурса. 494 с. Часть 2 Обоснование ресурса и безопасности. 620 с.
4. Elishakoff I., Safety Factors and Reliability: Friends or Foes?, Kluwer. Academic Publishers, Dordrecht, 2004.
5. Махутов Н.А., Резников Д.О., Петров В.П., Куксова В.И. Обеспечение защищенности и минимизация общих эксплуатационных затрат и ущербов в течение жизненного цикла критически важных объектов путем выбора оптимальной стратегии проведения технических инспекций и ремонта//Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций, 2010, №3.
6. Ang A., Tang. W. Probability concepts in Engineering Planning and Design. Volume 1. Basic Principles. John Wiley & Sons, Inc. US. 1975. V.1. 407.
7. Ching, J., Equivalence between reliability and factor of safety, Probabilistic Engineering Mechanics, 24(2), 159-171, 2009.
8. Шойгу С.К...Владимиров В.А, Воробьев Ю.Л., Шахраманьян М.А. Безопасность России. Защита населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера МГФ “Знание” 1999
9. Махутов Н.А., Шульц В.Л. Стратегические техногенные риски в проблемах национальной безопасности// Национальная безопасность. №3, 2011, стр. 4-28.
10. Махутов Н.А., Ахметханов Р.С., Петров В.П., Резников Д.О. и др. Безопасность России. Человеческий фактор в проблемах безопасности. М. МГФ Знание. 2008 г. 687 стр.
11. Bowles D.S. – Tolerable risk guidelines for dams: Principles and applications. Risk analysis, Dam Safety, Dam Security and Critical Infrastructure Management- Escuder-Bueno et al. (eds). Taylor & Francis Group. London. 2011
12. Махутов Н.А., Резников Д.О. Оценка и нормирование рисков, связанных с эксплуатацией сложных технических систем// Безопасность в техносфере. №5, 2012 (в печати).
13. Махутов Н.А., Резников Д.О., Петров В.П. Использование принципа практической целесообразности при нормировании индивидуального риска // Безопасность в техносфере. №6, 2012 (в печати).