

УДК 629.198.2

ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЯ ОБ ОСТАТОЧНОМ РЕСУРСЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РИСК-АНАЛИЗА

Г. Н. Мальцев,

доктор техн. наук, профессор

М. В. Цветков,

адъюнкт

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского

Рассмотрены вопросы назначения остаточного ресурса сложных технических систем, находящихся за пределами гарантийного срока эксплуатации, входящих в состав информационно-управляющих комплексов с использованием риск-анализа. Приведен алгоритм принятия решения о возможности дальнейшей эксплуатации сложной технической системы по результатам оценки ее остаточного ресурса с использованием риск-анализа.

The determination of residual life of the technical systems is considered. Systems in question are supposed to be a part of information control system and with warranty period expired. The paper also describes an algorithm for making decisions about the possibility of prolonged exploitation of the system using the knowledge of the residual life as well as the risk analysis.

Эксплуатация сложных технических систем, в том числе входящих в состав информационно-управляющих комплексов, в современных условиях часто связана с долгосрочным планированием их применения и принятием решений о возможности эксплуатации без проведения ремонтно-восстановительных работ в течение заданного срока службы. Для решения этих задач разрабатываются и используются методики назначения остаточного ресурса технических систем, позволяющие с той или иной точностью прогнозировать момент наступления их предельного состояния [1, 2].

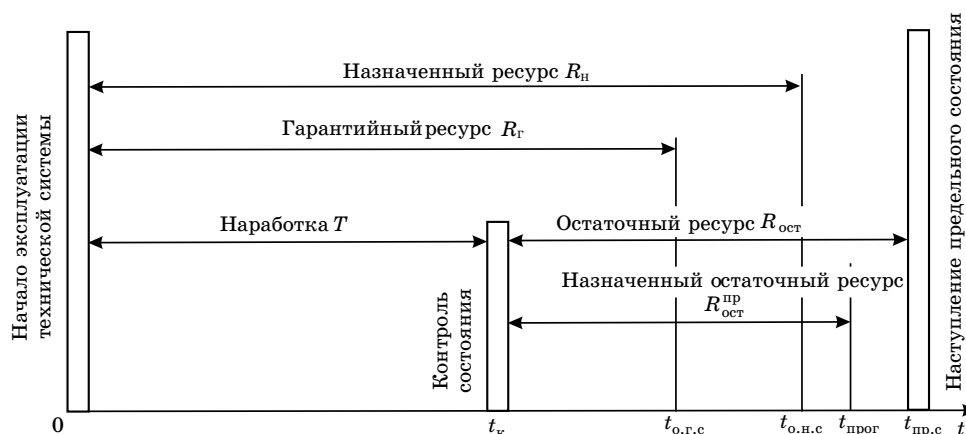
В практике эксплуатации сложных технических систем принято различать [1]:

- гарантийный ресурс R_r — суммарную наработку системы, в течение которой предприятие-изготовитель гарантирует ее работоспособное состояние;
- назначенный ресурс R_n — суммарную наработку системы, при достижении которой ее применение по назначению должно быть прекращено;
- остаточный ресурс $R_{ост}$ — суммарную наработку системы от момента контроля технического состояния до перехода в предельное состояние.

На временной диаграмме, поясняющей виды ресурсов технических систем (рис. 1), обозначены: $t = 0$ — момент времени, соответствующий началу эксплуатации технической системы; t_k — момент контроля технического состояния системы; $t_{о.г.с}$ —

время окончания гарантийного срока эксплуатации системы; $t_{о.н.с}$ — время окончания назначенного срока эксплуатации; $t_{прог}$ — время, до которого производится эксплуатация технической системы; $t_{пр.с}$ — время наступления предельного состояния, которое зависит от множества факторов, связанных с техническим состоянием и условиями эксплуатации системы, и является случайной величиной. Случайный характер наступления предельного состояния приводит к необходимости назначения остаточного ресурса $R_{ост}^{пр}$, исходя из которого в соответствии с принятыми методиками планируется дальнейшая эксплуатация системы.

Для технических систем с длительными сроками эксплуатации, находящихся за пределом гарантийного срока эксплуатации, наиболее важным является оценка остаточного ресурса системы $R_{ост}$ и определение назначенного остаточного ресурса $R_{ост}^{пр}$. При этом необходимость разработки методик назначения остаточного ресурса технических систем обусловлена, в первую очередь, экономическими факторами. Экономический выигрыш состоит в прибыли, получаемой от эксплуатации системы, работающей за пределами гарантийного срока, но в пределах назначенного ресурса $R_{ост}^{пр}$, который не превышает (в идеальной ситуации — совпадает) с остаточным ресурсом $R_{ост}$ рассматриваемой технической системы.



■ Рис. 1. Временная диаграмма, описывающая процесс эксплуатации технической системы с точки зрения расхода технического ресурса

Новым подходом к управлению эксплуатацией сложных технических систем является использование методов риск-анализа [2, 3]. Понятие риска в настоящее время широко используется в различных сферах человеческой деятельности [4]. В общем случае под риском W в некоторой сфере деятельности понимают стоимостное выражение вероятностного события, ведущего к ущербу:

$$W = \sum_{i=1}^N P_i C_i, \quad (1)$$

где N — общее количество неблагоприятных событий, ведущих к ущербу; P_i — вероятность возникновения i -го неблагоприятного события за некоторый промежуток времени; C_i — ущерб от возникновения i -го неблагоприятного события, выраженный в относительных или абсолютных единицах, $i = 1, \dots, N$.

В силу случайного характера возникновения отказов и выхода из строя аппаратуры принятие решения об остаточном ресурсе технической системы в принципе носит рискованный характер, а понятие риска связано с правильностью решения о возможности дальнейшей эксплуатации системы в течение определенного промежутка времени. В роли субъекта риска выступает лицо, принимающее решение (ЛПР) о назначении остаточного ресурса системы и о возможности ее применения в течение интервала времени от t_k до $t_{\text{прог}}$. При этом неправильная прогнозная оценка остаточного ресурса технической системы является причиной неправильного принятия решения о ее дальнейшем применении, а рассматриваемый риск ЛПР является частным случаем управленческого риска, с которым связывается принятие решений, приводящих к наступлению событий с нежелательными последствиями при управлении различными организационно-техническими системами [3, 4].

Применительно к задаче оценки риска неправильного назначения остаточного ресурса сложной

технической системы нежелательные последствия связаны с одним событием — ошибкой назначения остаточного ресурса $R_{\text{ост}}^{\text{np}}$, которая характеризуется величиной

$$\Delta R = |R_{\text{ост}} - R_{\text{ост}}^{\text{np}}|. \quad (2)$$

При таком подходе к определению риска $i = 1$, и величины, определяющие риск неправильного принятия решения об остаточном ресурсе системы, являются функцией ΔR : $P(\Delta R)$, $C(\Delta R)$, $W(\Delta R)$.

В предельном случае с точки зрения возможных нежелательных последствий управленческий риск должен быть сведен к нулю. Однако понимание того, что полностью избежать риска при управлении сложными техническими системами и процессами принципиально невозможно, приводит к формулировке принципа приемлемого риска [1, 4]. В соответствии с этим принципом в тех случаях, когда нежелательные последствия не носят катастрофического характера, требуется достижение такого уровня риска, который можно обеспечить в реальных условиях с учетом действующих ограничений, в том числе экономических. Иными словами, при определении приемлемого риска следует сопоставить возможный ущерб вследствие реализации решения, принятого с учетом риска, с затратами, направленными на снижение риска.

Риск непосредственно связан с функцией потерь, через которую выражается ущерб C от возникновения неблагоприятных событий. В нашем случае в качестве функции потерь следует рассматривать зависимость возможного ущерба в стоимостном выражении $C_{\text{п}}$ при неверной прогнозной оценке назначенного ЛПР остаточного ресурса от величины ΔR . Если объективной оценкой остаточного ресурса системы, соответствующей моменту достижения предельного состояния, является оценка $R_{\text{ост}}^{\text{np}}$, то функция потерь будет иметь минимальное значение при $R_{\text{ост}} = R_{\text{ост}}^{\text{np}}$, что соответствует $\Delta R = 0$, и возрастать при $R_{\text{ост}}^{\text{np}} > R_{\text{ост}}$ и $R_{\text{ост}}^{\text{np}} < R_{\text{ост}}$,

что соответствует $\Delta R > 0$. При $R_{\text{ост}}^{\text{пп}} > R_{\text{ост}}$ имеет место резкое возрастание функции потерь, что связано с увеличением числа отказов при достижении системой предельного состояния, и, следовательно, с увеличением материальных затрат на поддержание системы в работоспособном состоянии. При $R_{\text{ост}}^{\text{пп}} < R_{\text{ост}}$ функция потерь также возрастает, но в меньшей степени, что связано с неполным использованием ресурса системы и отказом от ее эксплуатации до достижения ею предельного состояния.

В качестве показателя применения остаточного ресурса будем использовать разность ΔR между определенным по результатам контроля состояния остаточным ресурсом системы $R_{\text{ост}}$ и наработкой до момента достижения предельного состояния $R_{\text{ост}}^{\text{пп}}$ (2). Ввиду того, что наработка сложной технической системы до наступления предельного состояния $R_{\text{ост}}^{\text{пп}}$ является непрерывной случайной величиной, ΔR также является непрерывной случайной величиной. При этом ошибки являются следствием случайного характера момента наступления предельного состояния, и риск неправильной оценки $R_{\text{ост}}$ будет количественно зависеть от вероятности ошибочного решения ЛППР при назначении им $R_{\text{ост}}^{\text{пп}}$.

Таким образом, под риском назначения остаточного ресурса технической системы понимается стоимостное выражение вероятностного события, ведущего к ущербу и состоящего в назначении остаточного ресурса, не соответствующего реальному. Случайный характер наступления события, связанного с неправильной оценкой остаточного ресурса системы, приводит к необходимости количественного определения среднего риска назначения остаточного ресурса:

$$W(\Delta R) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\Delta R) C_{\text{п}}(\Delta R) d\Delta R, \quad (3)$$

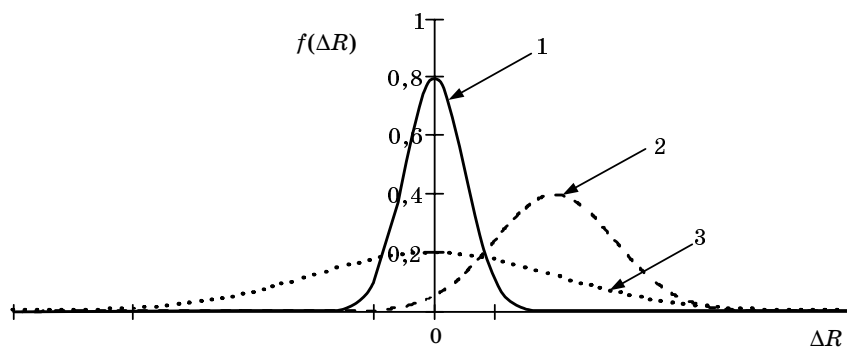
где $f(\Delta R)$ — плотность распределения вероятности ошибки оценки остаточного ресурса системы ΔR ; $C_{\text{п}}(\Delta R)$ — функция объема экономических потерь, зависящая от ΔR . Интегральное выражение

(3) соответствует общему выражению для риска принятия решения (1) при $i = 1$ и осреднению экономических потерь $C_{\text{п}}(\Delta R)$ по плотности распределения вероятности ошибки оценки остаточного ресурса системы ΔR .

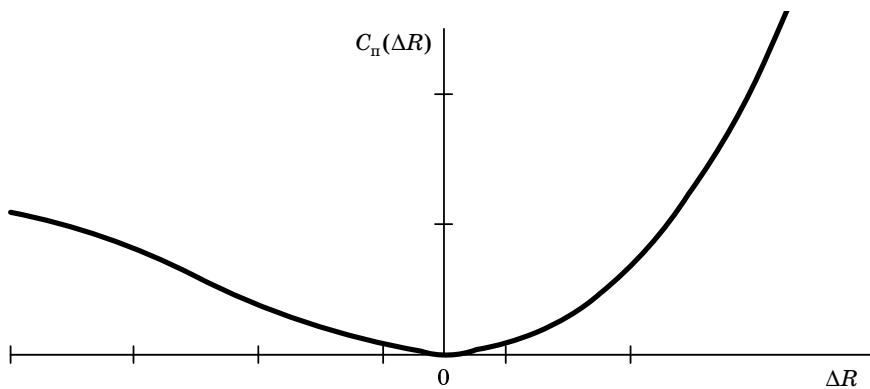
При решении задач теории надежности типовым является использование гауссовой статистики для случайных величин, описывающих изменение технического состояния технических систем [1]. Это относится, в частности, к радиоэлектронной, электротехнической и некоторым другим типам аппаратуры. Поэтому будем полагать, что плотность вероятности ошибки назначения остаточного ресурса системы $f(\Delta R)$ имеет нормальный закон распределения с математическим ожиданием μ_R и среднеквадратическим значением σ_R . Вид законов распределения $f(\Delta R)$ при различных параметрах μ_R и σ_R приведен на рис. 2. Кривая 1 соответствует $\mu_R = 0$ и наименьшему значению σ_R , кривая 2 — $\mu_R = 0$ и наибольшему σ_R , кривая 3 — $\mu_R > 0$ и среднему значению σ_R .

На рис. 3 показан возможный вид функции потерь $C_{\text{п}}(\Delta R)$, резко возрастающей при $\Delta R > 0$ и слабо возрастающей при $\Delta R < 0$. На рис. 4 показаны результаты определения среднего риска $W(\Delta R)$ для трех законов распределения вероятности ошибки оценки остаточного ресурса системы $f(\Delta R)$ при различных параметрах μ_R и σ_R и функции потерь $C_{\text{п}}(\Delta R)$ (см. рис. 2 и 3). На рис. 4 риск в каждом из рассматриваемых случаев равен площади под кривыми 1, 2 и 3 соответственно. Произведение функций $f(\Delta R)$ и $C_{\text{п}}(\Delta R)$ под знаком интеграла в выражении (3) соответствует взвешиванию функции потерь при назначении остаточного ресурса $R_{\text{ост}}^{\text{пп}}$.

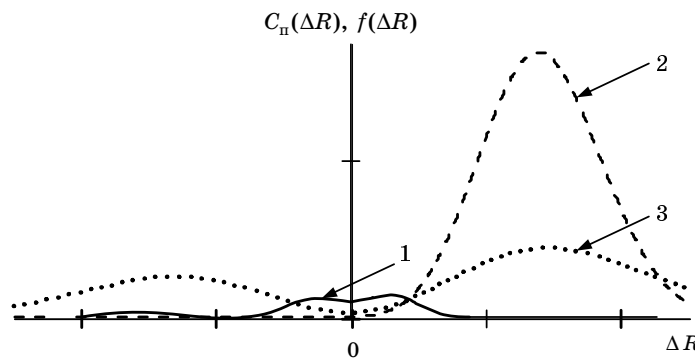
Очевидно, что в случае малой дисперсии плотности распределения ошибки $f(\Delta R)$ и близком расположении назначенного и реального остаточного ресурса $R_{\text{ост}} - R_{\text{ост}}^{\text{пп}} \cong 0$ область малых потерь функции $C_{\text{п}}(\Delta R)$ будет компенсировать большую часть указанной плотности и риск определения назначенного ресурса будет минимален. При увеличении дисперсии плотности распределения ошибки остаточного ресурса, которая имеет место



■ Рис. 2. Плотности распределения случайной величины ΔR при различных параметрах распределения μ_R и σ_R



■ *Рис. 3. Возможный вид функции потерь (расходов) при принятии решения о возможности эксплуатации технической системы*



■ *Рис. 4. Зависимости, характеризующие риск принятия решения в каждом из рассматриваемых случаев*

при недостаточной статистической выборке предельных состояний аналогичных систем, риск назначения остаточного ресурса возрастает. Наиболее неблагоприятным случаем является смещение плотности распределения ошибки назначения остаточного ресурса относительно области минимальных потерь, которое имеет место при несовпадении $R_{ост}$ и $R_{ост}^{пр}$ и $\mu_R > 0$.

Ключевым вопросом при оценивании риска назначения остаточного ресурса является определение функции потерь, которая отражает затраты на поддержание анализируемой технической системы в работоспособном состоянии в зависимости от ошибки реального и назначенного ресурса системы. Из-за сложности формализации, а также случайного характера наступления отказов системы в общем случае строгое математическое описание данной функции весьма затруднительно и не имеет точных аналитических зависимостей. Поэтому для определения функции потерь принято использовать экспертное оценивание. Известно несколько методов получения экспертных оценок, каждый из которых обладает своими преимуществами и недостатками [5]. Поэтому во многих случаях наибольший эффект дает комплексное применение нескольких видов экспертизы.

Наиболее простым, но наименее точным способом получения функции потерь является использование технической и эксплуатационной документации на систему, определяющей стоимость анализируемой системы и ее эксплуатации. Очевидный недостаток данного способа заключается в том, что он не позволяет учитывать случайность наступления предельного состояния системы и наступления отказов ее элементов и подсистем.

Вторым и более точным способом определения вида функции потерь является эмпирический метод, позволяющий построить на основе измерений эксплуатационных затрат требуемую зависимость. Для его реализации необходимо на основе обработки представительных статистических выборок оценок стоимости эксплуатации ряда однотипных систем построить требуемую зависимость. Данный способ применим в случае анализа серийных систем, по которым имеется статистика о затратах, и при возможности использования данных о функционировании подобных систем.

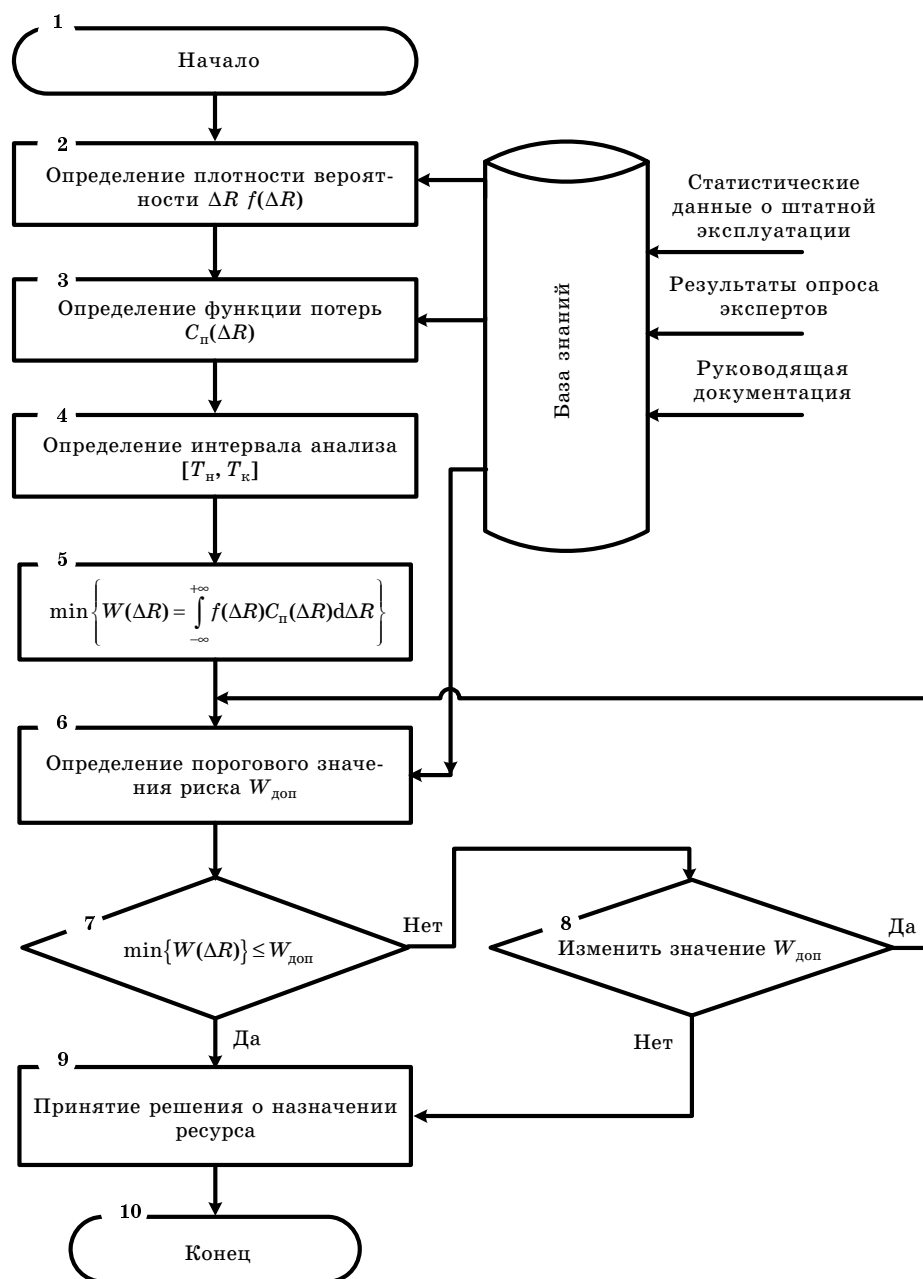
Третьим способом оценки вида функции потерь является метод экспертных оценок, сущность которого заключается в проведении экспертами интуитивно-логического анализа упущенной выгоды от списания системы, не выработавшей ресурс, и стоимости

эксплуатации системы после наступления ее предельного состояния с формальной обработкой результатов. Для решения требуемой задачи могут применяться разновидности метода экспертных оценок: анкетирование и интервьюирование, мозговой штурм, дискуссия, совещание, оперативная игра, сценарий.

Принцип приемлемого риска предполагает оценивание показателя риска и обоснование мер по его снижению до приемлемого уровня, который является допустимым в определенных условиях [4]. Эта концепция лежит в основе управления

риском, представляющего собой неотъемлемый этап подготовки и принятия решений, связанных с эксплуатацией системы, входящей в состав информационно-управляющей системы. Управление риском должно включать следующие этапы [4]:

- 1) анализ риска (определение источников угроз, оценивание значений его показателей);
- 2) обоснование допустимого значения риска;
- 3) выбор управляемых параметров, обеспечивающих это значение;
- 4) реализацию мер по снижению риска.



■ Рис. 5. Алгоритм принятия решения о возможности дальнейшей эксплуатации сложной технической системы с использованием риск-анализа

Рассмотренный подход к количественному определению среднего риска $W(\Delta R)$ относится, прежде всего, к первым двум этапам управления риском для количественного определения величины потерь и планирования мер по снижению риска.

На рис. 5 приведен алгоритм принятия решения о возможности дальнейшей эксплуатации сложной технической системы по результатам оценки ее остаточного ресурса с использованием риск-анализа. Данный алгоритм требует задания в качестве исходных данных статистических данных о штатной эксплуатации этой системы и прототипов, а также экспертных оценок и предусматривает проведенный заранее этап предварительной обработки результатов наблюдения и опросов. В базе знаний содержатся в уже обработанном виде данные о штатной эксплуатации технической системы и аналогов, знания экспертов, а также требования руководящей документации. В блоках 2 и 3 производится определение количественных характеристик случайной величины — ошибки назначения остаточного ресурса технической системы, а также функции потерь $C_{\text{п}}(\Delta R)$. Для решения этих задач используется информация из базы знаний.

Определение интервала анализа в блоке 4 является самостоятельной задачей и требует формализованного подхода к ее решению. Одним из вариантов решения является принятие в качестве левой границы интервала времени начала прогно-

зирования, а в качестве правой границы — математического ожидания случайной величины — времени наступления предельного состояния. На интервале анализа в блоке 5 стандартным методом находится минимум значения риска, а затем в блоке 6 выполняется его сравнение с заданным (экспертами, руководящей документацией) максимально допустимым значением риска $W_{\text{доп}}$. Решение о возможности эксплуатации сложной технической системы принимается в блоке 7, исходя из результатов сравнения допустимого и полученных значений риска. В случае, если найденное минимальное значение риска превышает заданное одним из указанных способов значение $W_{\text{доп}}$ и дальнейшее снижение $W_{\text{доп}}$ недопустимо (блок 8), то в блоке 9 принимается решение о невозможности дальнейшей эксплуатации системы. Если же требования к уровню допустимого риска допускают возможность снижения $W_{\text{доп}}$, то осуществляется переход к блоку 6. Данная итерация повторяется до тех пор, пока в блоке 9 не будет принято решение о возможности или невозможности дальнейшей эксплуатации технической системы в течение $R_{\text{ост}}^{\text{пр}}$.

Рассматриваемый подход, основанный на риск-анализе принятия решения о возможности дальнейшей эксплуатации технической системы, позволяет повысить уровень обоснованности принимаемого решения ЛПР и может быть использован в методиках назначения остаточного ресурса.

Литература

1. Половко А. М., Гуров С. В. Основы теории надежности. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 702 с.
2. Елохин А. Н. Анализ и управление риском: Теория и практика. М.: Полимедиа, 2002. 192 с.
3. Черкасов В. В. Проблемы риска в управленческой деятельности. М.: Рефл. бук, 1999. 288 с.
4. Соложенцев Е. Д. Сценарное логико-вероятностное управление риском в бизнесе и технике. СПб.: Бизнес-пресса, 2006. 544 с.
5. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д. А. Поспелова. М.: Наука, 1986. 311 с.