



УДК 65.012.122

© 2012 г. **О.В. Абрамов**, д-р техн. наук
(Институт автоматике и процессов управления ДВО РАН, Владивосток)

АНАЛИЗ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ РИСКОВ*

Рассмотрены некоторые подходы к решению задачи управления техногенными рисками сложных систем ответственного назначения, базирующиеся на идеях функционально-параметрического подхода теории надежности. Предлагается стратегия управления рисками, в основе которой индивидуальное прогнозирование процессов изменения параметров исследуемой системы.

Ключевые слова: техногенный риск, надежность, параметр, прогноз, случайный процесс, сложная техническая система.

Введение

Сохраняющаяся тенденция ежегодного роста количества и масштабов чрезвычайных ситуаций техногенного характера заставляет искать новые решения проблемы обеспечения безотказности технических устройств и систем. В первую очередь речь идет о сложных технических системах (СТС), таких как электростанции и распределительные сети, предприятия нефтяного и газового комплекса, транспортные средства и системы и т.п. Отказы таких СТС, которые обычно являются системами ответственного назначения, являются причинами аварий и приводят к большим материальным потерям и человеческим жертвам.

В этих условиях особую важность приобретают методы и средства, позволяющие осуществлять мониторинг технического состояния оборудования СТС и прогнозировать его остаточный ресурс. Оценка и прогнозирование реального технического состояния каждой из находящихся в эксплуатации СТС позволяет организовать выборочные ремонтно-профилактические работы, в первую очередь на оборудовании, отказ которого может привести к возникновению чрезвычайных ситуаций. Такой подход дает возможность уменьшить риск возникновения критических ситуаций и обеспечить более полное расходование ресурса СТС.

В данной работе предлагаются некоторые решения проблемы оценки, исследования и снижения техногенных рисков, возникающих в процессе эксплуатации сложных технических систем ответственного назначения. Полученные решения базируются на идеях функционально-параметрического направления (ФП-подхода) теории надежности [1].

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 11-08-98503 р_восток_a).

Модели техногенных рисков

Риск обычно связывают с наступлением некоторого, вообще говоря, случайного события R , которое называют рисковым событием из возможного семейства F событий, описывающих рассматриваемую рисковую ситуацию. Эти события обычно каким-то образом распределены во времени и сопровождаются определенными материальными или иными издержками также случайными по величине [2].

Таким образом, риск характеризуется двумя величинами – временем T наступления рискового события и величиной H причиняемого им ущерба. Поэтому под риском обычно понимают вероятностную модель (Ω, F, P) , на которой определена двухкомпонентная случайная величина (T, H) , первая из компонент которой T – время наступления рискового события R , отсчитываемое от некоторого фиксированного момента, а вторая H – ущерб, приносимый этим рисковым событием. При этом следует иметь в виду, что величина T может зависеть, вообще говоря, от момента t_0 начала отсчета. В теории надежности таким моментом является момент начала эксплуатации оборудования.

Как для всякой двумерной случайной величины, основной мерой для (T, H) является ее двумерное распределение $F(t, h) = P\{T \leq t, H \leq h\}$.

Чаще всего информация о совместном распределении времени наступления рискового события и величины ущерба отсутствует и приходится ограничиваться соответствующими маргинальными распределениями $F_T(t) = P\{T \leq t\}$ – времени наступления рискового события и $F_H(h) = P\{H \leq h\}$ – величины ущерба.

Если риск рассматривается на фиксированном интервале времени, то вместо времени T наступления рискового события R можно рассматривать его индикатор, а ущерб измерять его условным распределением при условии наступления рискового события $F(h, R) = P\{H \leq h | R\}$.

При этом обусловленная величина ущерба представляется распределением совместным с наступлением рискового события, имеющим скачок в нуле (поскольку, естественно, при отсутствии рискового события величина ущерба равна нулю), $F_H(h) = 1 - P(R)(1 - F(h, R))$, где $P(R)$ – вероятность наступления события R . Вообще, естественно измерять риск распределением времени наступления рискового события $F_T(t)$ и условным распределением ущерба при его наступлении $F(h, t) = P\{H \leq h | T = t\}$.

В некоторых ситуациях для конкретных расчетов можно использовать более простые числовые характеристики рисков – такие как среднее время наступления рискового события

$$T_{\text{ср}} = MT = \begin{cases} \int_0^{\infty} t f(t) dt & \text{– при непрерывных наблюдениях,} \\ \sum_i i t_i & \text{– при дискретных наблюдениях,} \end{cases}$$

условное среднее значение величины ущерба при условии наступления рискового

события

$$H_{\text{ср}} = MH = \begin{cases} \int_0^{\infty} h f(h) dh & \text{– при непрерывных наблюдениях,} \\ 0 & \\ \sum_i^{\infty} j h_j & \text{– при дискретных наблюдениях,} \end{cases}$$

а также дисперсии соответствующих характеристик.

Таким образом, для решения задач моделирования рисков, анализа и управления рисками необходимо знать вероятностные характеристики времени T наступления рискового события и величины H причиняемого им ущерба.

Классическая теория риска, которая зародилась и развивалась в недрах актуарной (страховой) и финансовой математики [3], исходит из заданных априори или определяемых статистически с достаточной достоверностью законов распределения двумерной случайной величины (T, H) .

При исследовании техногенных рисков в качестве рискового события рассматривается потеря работоспособности (отказ) технического объекта, характеристики которого – наработка (время безотказной работы) или момент отказа, вероятностные характеристики которых определяются методами математической статистики и теории надежности. К сожалению, при исследовании СТС ответственного назначения получить достаточно представительную статистику отказов не представляется возможным. Это связано с тем, что такие системы изготавливаются в небольшом числе экземпляров и эксплуатируются в отличающихся условиях, а их отказы являются редкими событиями. Больше того, задача состоит не в накоплении статистики отказов, а в их предотвращении. В этих условиях перспективным при решении задачи управления техногенными рисками может стать использование функционально-параметрического подхода (ФП-подхода) теории надежности [1].

Методология ФП-подхода в задачах управления техногенными рисками

В основе методологии ФП-подхода лежат следующие основные принципы: процесс функционирования СТС и ее техническое состояние в любой момент времени определяются конечным набором некоторых переменных – параметров системы;

все отказы (рисковые события) есть следствие отклонений параметров от их исходных (номинальных, расчетных) значений, а формой проявления отказа является выход параметров за пределы области допустимых значений (области работоспособности).

Таким образом, при решении задачи управления техногенными рисками на основе ФП-подхода необходимо уметь оценивать текущее техническое состояние системы, прогнозировать изменения технического состояния (момент перехода в предельное состояние). А также определять соответствующие суммарные и единовременные эксплуатационные расходы, связанные с мониторингом состояния, проведением профилактических мероприятий и с ущербом, возникающим при наступлении рискового события.

Пусть $Y(t)$ – случайный процесс (в общем случае векторный) изменения некоторого параметра состояния СТС, статистические характеристики которого полагаются известными. Задана область допустимых изменений этого параметра (область работоспособности). Рисковое событие R в таком случае наступает в момент выхода случайного процесса $Y(t)$ за пределы области работоспособности, а нахождение его вероятности $P(R)$ можно свести к решению задачи о выбросах [4]. Заметим, что результаты анализа рисков основаны при таком подходе на априори заданных закономерностях изменений параметров всего ансамбля объектов рассматриваемого типа и не учитывают индивидуальных особенностей отдельной конкретной системы, а поэтому носят «групповой» характер. Рассчитанная с использованием таких результатов стратегия управления риском может быть рекомендована для всех объектов данного типа независимо от того, насколько каждый из них отличается от среднестатистического, а поэтому оправдана в тех случаях, когда эксплуатируемые объекты статистически однородны (имеют небольшой разброс индивидуальных характеристик качества), а рисковые события не связаны с катастрофическими последствиями.

Для систем ответственного назначения стратегия управления техногенными рисками должна учитывать индивидуальные особенности данной конкретной системы и условий ее эксплуатации. Такую стратегию и соответствующие ей риски будем называть *индивидуальными*. Эффект от использования индивидуальной стратегии управления рисками определяется главным образом следующими факторами:

возможностью в наибольшей степени использовать ресурс каждой конкретной системы, что достигается уменьшением числа преждевременных вмешательств в ее работу;

возможностью предотвращения рискованных событий (отказов), вызываемых выходом определяющих параметров системы за пределы области работоспособности, что достигается своевременным прекращением эксплуатации или проведением профилактических мероприятий.

Индивидуальное управление рисками возможно при условии получения текущей информации о действительном техническом состоянии каждой системы, т.е. реализация индивидуального подхода требует непрерывного или дискретного контроля и анализа ее состояния.

В основе индивидуального подхода лежит прогнозирование изменений параметров технического состояния системы, осуществляемое по результатам контроля. Прогнозирование состояния по одной реализации, т.е. по наблюдениям за одной конкретной системой может проводиться только при наличии известных априорных характеристик процессов, протекающих в аналогичных системах (модели случайного процесса дрейфа параметров), и данных о характеристиках ошибок контроля и помех.

Индивидуальное прогнозирование и управление рисками

Основные трудности при решении задачи прогнозирования состояния для синтеза стратегии управления техногенными рисками связаны с тем, что прогноз

приходится осуществлять для каждого объекта индивидуально, при малых объемах исходной информации (по небольшому набору результатов контроля) и в присутствии помех (ошибок контроля), статистические свойства которых достоверно не известны. В таких условиях классические методы математической статистики и теории случайных процессов теряют свои привлекательные свойства, а их использование для прогнозирования приводит к существенным ошибкам и невысокой достоверности прогноза. В связи с этим необходимы расширение исходной информационной базы (за счет проведения комплексного обследования СТС и последующего мониторинга системы эксплуатации) и разработка новых методов прогнозирования, дополняющих уже известные.

Рассмотрим некоторые подходы к решению задачи индивидуального прогнозирования рисков СТС и их управления при дефиците и неполной достоверности исходной информации, позволяющие получать в этих условиях достаточно надежные результаты.

В общем виде задача индивидуального прогнозирования технического состояния СТС сводится к оценке наблюдаемой информации в присутствии ошибок на интервале $T_p \subset T$, где T – интервал эксплуатации, реализации случайного процесса дрейфа выходных координат системы $y(t)$ при $t \in T \setminus T_p$. Рассмотрим постановку такой задачи.

Пусть изменения состояния системы на интервале эксплуатации могут быть описаны как

$$Y(t) = \mathbf{a}^T \cdot \mathbf{u}(t) + h(t), \quad t \in T, \quad (1)$$

где $\mathbf{a} = \{a_j\}_{j=0}^n$ – вектор случайных коэффициентов; $\mathbf{u} = \{u_j(t)\}_{j=0}^n$ – непрерывные детерминированные функции времени; $h(t)$ – ошибка модели (1), о которой известно только, что она по модулю не превышает некоторой заданной величины, а в общем случае функции $f(t)$:

$$|h(t)| \leq f(t) \quad (2)$$

где $f(t)$ – заданная функция. Представление (1) можно рассматривать как некоторое разложение $Y(t)$ по координатному базису $\{u_j(t)\}_{j=0}^n$.

Реализация этого случайного процесса $y(t)$ наблюдается на интервале $T_p \subset T$ с аддитивной ошибкой $e(t)$. Наблюдения образуют последовательность $\mathbf{z} = \{z(t_k)\}_{k=1}^p$, $t_k \in T_p \subset T$. Вероятностные свойства $e(t)$ не определены, а известно только, что

$$|e(t_k)| \leq c(t_k), \quad t_k \in T_p \subset T, \quad (3)$$

где $c(t)$ – заданная функция.

Модель (1), ограничения (2), (3) на помехи и измерения \mathbf{z} , $t_k \in T_p \subset T$ составляют совокупность исходных сведений для решения задачи индивидуального прогнозирования. Ограниченность и неопределенность этих сведений, в частности отсутствие достоверных сведений о вероятностных характеристиках возмущающих факторов, затрудняют получение оценок $y(t)$, $t \in T \setminus T_p$ с использовани-

ем известных статистических методов – таких как методы наименьших квадратов, наименьших модулей и др. Более пригодным здесь может быть построение иско- мых оценок из расчета на “наихудший” случай, т.е. на основе принципа минимак- са.

Пусть в зависимости (1) модельные ошибки отсутствуют, т.е.:

$$y(t) = \mathbf{a}^T \cdot \mathbf{u}(t), \quad t \in T. \quad (4)$$

Предположим, что возможен непрерывный контроль $y(t)$, в результате кото- рого получена реализация $z(t)$ на интервале $T_p \subset T$. Тогда с учетом (3) можно за- писать

$$z(t) - c(t) \leq y(t) \leq z(t) + c(t), \quad t \in T_p \subset T. \quad (5)$$

Из выражения (5) следует, что на интервале T_p истинная реализация $y(t)$ за- ключена в “трубке”, ограниченной функциями $z(t) - c(t)$ и $z(t) + c(t)$. В этой трубке находится множество реализаций вида (4), которые назовем допустимыми. Для прогнозирования процесса $y(t)$ при $t \in T \setminus T_p$ выделим из этого множества “наи- худшие”, т.е. такие, которые при $t \in T \setminus T_p$ идут выше или ниже остальных.

Можно показать, что при наложении некоторых ограничений на функции $\mathbf{u} = \{u_j(t)\}_{j=0}^n$ (в частности, если данные функции образуют на интервале T систе- му Чебышева) такими “наихудшими” реализациями будут экстремальные поли- номы Карлина $y(t)^-$ и $y(t)^+$ [5].

Кривые $y(t)^-$ и $y(t)^+$ выделяют при $t \in T \setminus T_p$ так называемый “конус прогно- за” в том смысле, что действительная реализация исследуемого процесса гаран- тированно находится внутри этого конуса при $t \in T \setminus T_p$.

Построим алгоритм нахождения экстремальных реализаций с учетом дис- кретности контроля. Можно показать, что в такой ситуации поиск $y(t)^-$ и $y(t)^+$ сво- дится к решению двух задач линейного программирования [6]:

$$1) \max \mathbf{a}^T \mathbf{u}(t^*),$$

$$2) \min \mathbf{a}^T \mathbf{u}(t^*), \quad t^* \in T \setminus T_p,$$

при ограничениях

$$z(t_k) - c(t_k) \leq \mathbf{a}^T \mathbf{u}(t_k) \leq z(t_k) + c(t_k), \quad k = \overline{1, p}. \quad (6)$$

Рассматриваемый алгоритм прогнозирования отвечает общим требованиям, предъявляемым на практике к любой прогнозирующей процедуре. Он обладает свойством оптимальности (в минимаксном смысле), однозначности и несмещен- ности.

Кроме ошибок измерений, в данном алгоритме можно учитывать и другие погрешности, в том числе и модельные ошибки в зависимости (1). Их учет соот- ветствует аддитивному введению ограничений (2) в ограничения (3) и не оказы- вает принципиального влияния на процедуру построения “конуса прогноза”. Если же базовая модель $y(t)$ содержит структурные ошибки, то для повышения точно- сти прогноза можно использовать специальный алгоритм с адаптацией. Основная идея такого алгоритма аналогична принципам, заложенным в методах скользяще-

го среднего или экспоненциального сглаживания и состоящим в задании различных весов результатам измерений [6].

Остановимся на использовании алгоритма гарантированного прогноза для решения задач оценки момента наступления рискованного события и принятия управленческих решений (назначения моментов контроля, прекращения эксплуатации и проведения профилактических коррекций параметров).

Пусть работоспособность объекта определяется состоянием контролируемого дискретно выходного параметра $y(t)$. В достаточно общей форме условие работоспособности может быть задано в виде $A(t) \leq y(t) \leq B(t)$, где $A(t)$, $B(t)$ – соответственно нижняя и верхняя границы допустимых изменений параметров. Задача состоит в назначении таких моментов контроля и коррекций параметра (прекращения эксплуатации), при которых гарантируется его нахождение в области допустимых значений (выполнение условий работоспособности) в течение времени эксплуатации $[0, T]$. При этом необходимо стремиться к тому, чтобы число контрольных замеров (и коррекций) было по возможности минимальным.

Пусть по результатам p контрольных измерений построены экстремальные реализации $t > t_p$. Пересечение экстремальных реализаций с границами области допустимых изменений параметра $A(t)$ и $B(t)$ определит моменты времени t_A и t_B , минимальный из которых целесообразно принять за момент наступления рискованного события:

$$t_{p+1} = \min\{t_A, t_B\}.$$

Моменты времени t_A , t_B находятся из решения уравнений:

$$y(t)_- = A(t); \quad y(t)_+ = B(t).$$

Очевидно, что в течение времени $t_r = t_{p+1} - t_p$ контролируемый параметр будет гарантированно находиться в области допустимых значений, поэтому до момента t_{p+1} производить измерение или коррекцию параметра нет необходимости. В момент t_{p+1} следует провести очередное измерение параметра, результат которого (z_{p+1}, t_{p+1}) можно использовать для расчета параметров новых экстремальных реализаций. Определяется очередной промежуток времени, в течение которого параметр не выйдет за допустимые пределы. Если этот промежуток (назовем его интервалом гарантированной эксплуатации) окажется меньше некоторого наперед заданного минимально целесообразного времени эксплуатации t_r^{\min} ($t_{p+z} - t_{p+1} < t_r^{\min}$), то в момент времени t_{p+1} следует прекратить эксплуатацию (произвести профилактическую коррекцию параметра).

Таким образом, метод гарантированного прогноза (МГП) позволяет определить некоторую область, в пределах которой гарантированно будут находиться параметры состояния в заданный момент времени. Как отмечалось выше, он обладает необходимыми свойствами несмещенности, однозначности и оптимальности. Результаты прогноза позволяют оценить момент наступления рискованного события и остаточный ресурс СТС, а также определить стратегию управления техногенным риском (назначать целесообразные моменты контроля состояния, прекращения эксплуатации, а также проведения профилактических и ремонтных работ).

Отметим возможность использования МГП для оценки вероятности наступления рискованного события $P(R)$. Если множества, которым принадлежат возможные ошибки (модели, измерений и др.), задаются с некоторой вероятностью (например, ограничения (б) выполняются с вероятностью P_2), другими словами, если известна вероятность того, что истинная реализация наблюдаемого процесса проходит через все окна контроля, то МГП позволяет определить границы, в пределах которых с вероятностью P_2 будет находиться исследуемый параметр в будущем, а вероятность наступления рискованного события будет $P(R) = 1 - P_2$.

Стратегия управления рисками должна быть такой, чтобы суммарные потери, связанные с эксплуатацией исследуемой СТС, были бы минимальными. В ряде случаев в качестве критерия выбора этой стратегии можно использовать показатель гарантированного уровня общих материальных потерь при эксплуатации системы на множестве T .

$$S_g = \sup_{y(t) \in Y \cdot T} \int H(y(t)) dt + V_T,$$

где $H(y(t))$ – функция потерь, определяющих материальные потери, возникающие при отклонении вектора состояния объекта $y(t)$ от номинального; V_T – затраты на проведение мероприятий по техническому обслуживанию объекта во время эксплуатации.

Аддитивность критерия S_g открывает путь к решению задачи на основе принципа оптимальности Беллмана [7]. При этом поиск искомой стратегии можно рассматривать как многошаговый управляемый процесс принятия решений для синтеза оптимальной системы управления, а S_g – финальная функция потерь (сумма потерь, связанных со всеми шагами принятия решений). Соответствующие алгоритмы являются адаптивными, так как совместно с принятием основных решений оценивают неизвестную обстановку, чем улучшают процесс принятия решений, достаточно просты и могут быть реализованы в рекуррентном виде.

Заключение

В статье исследованы некоторые пути решения проблемы прогнозирования техногенных рисков, источником которых являются постепенные отказы. Особую важность решение этой проблемы приобретает применительно к уникальным системам ответственного назначения, отказы которых приводят к существенным материальным потерям или катастрофическим последствиям. Основные трудности, возникающие при оценке и прогнозировании рисков уникальных технических систем, обусловлены дефицитом информации о закономерностях случайных процессов изменения параметров таких систем и ошибках оценки их реального технического состояния. В этих условиях классические методы экстраполяции и теории случайных процессов теряют свою привлекательность, а их использование может привести к неоправданно большим ошибкам.

Предложенное решение задачи оценки момента наступления рискованного события (отказа) основано на методе индивидуального гарантированного прогноза технического состояния СТС, позволяющего получать достаточно устойчивые результаты при дефиците априорной информации.



Как отмечалось выше, этот метод относится к классу минимаксных, а поэтому основанная на его использовании стратегия управления рисками будет пессимистической и наиболее оправданной в случае высокой цены отказа СТС.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абрамов О.В.* Функционально-параметрический подход в задачах обеспечения надежности технических систем // Надежность и контроль качества. – 1999. – № 5. – С. 34-45.
2. *Хенли Э.Д., Кумамото Х.* Надежность технических систем и оценка риска. – М.: Машиностроение, 1984.
3. *Башарин Г.П.* Начала финансовой математики. – М.: ИНФРАМ, 1997.
4. *Тихонов В.И., Хименко В.И.* Выбросы траекторий случайных процессов. – М.: Наука, 1987.
5. *Karlin S., Studden W.J.* Tchebycheff Systems: with Applications in Analysis and Statistics. – John Wiley & Sons, New York, 1966.
6. *Абрамов О.В., Розенбаум А.Н.* Управление эксплуатацией систем ответственного назначения. – Владивосток: Дальнаука, 2000.
7. *Беллман Р., Дрейфус С.* Прикладные задачи динамического программирования. – М.: Наука, 1965.

E-mail:

Абрамов Олег Васильевич – abramov@iacp.dvo.ru.

УДК 614.8:658.07:331.48

© 2012 г. **М.Ф. Аноп,**

Я.В. Катueva, канд. техн. наук

(Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток)

АНАЛИЗ УЯЗВИМОСТЕЙ МУНИЦИПАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ С УЧЕТОМ ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ВЛАДИВОСТОКА*

Рассматриваются основные геохозяйственные характеристики Владивостокского городского муниципального округа. Производится совместный анализ уязвимости и особенностей территории с целью выявления индикаторов риска и предотвращения угроз безопасности.

Ключевые слова: безопасность, уязвимость территорий, индикаторы опасностей, опасные процессы и явления.

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта ДВО РАН 12-III-A-03-035 «Разработка методов оценки комплексной безопасности и управления рисками сложной территориально-распределенной системы» и гранта РФФИ 11-08-98503-р_восток_a «Методы мониторинга и поддержки управленческих решений в системе обеспечения безопасности технических и природных объектов Приморского края».