

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ В ДИНАМИКЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Н.Д. ПАНКРАТОВА

Предложен инструментарий системного анализа диагностирования сложных технических систем, базирующийся на своевременном выявлении ситуаций риска и оперативном предотвращении перехода штатных ситуаций в критические, чрезвычайные или аварийные как основы стратегии управления рисками и обеспечения гарантированной безопасности в динамике функционирования сложных технических систем.

Высокая социально-экономическая значимость проблемы обеспечения гарантированной безопасности функционирования сложных технических систем (СТС) определяется непрерывным увеличением количества техногенных и природных катастроф с последствиями регионального, национального и глобального масштабов. Катастрофы национального масштаба наносят весомый ущерб национальной экономике. Так, ежегодный прямой и косвенный ущерб от аварий и катастроф в ряде стран составляет более 5% внутреннего валового продукта [1].

Вместе с тем решение многих важнейших задач обеспечения безопасности функционирования СТС связано с принципиальными трудностями, которые определяются многими факторами. Среди них следует особо выделить:

- неопределенность действия и многообразие непрогнозируемого взаимодействия механизмов нагружения, старения и разрушения в условиях высокого динамизма неравномерных силовых, температурных и других воздействий на конструктивные элементы технических систем;
- неопределенность и неограниченность множества причин и факторов, действия которых приводят к появлению ситуаций риска;
- уникальность условий, причин и факторов появления каждой ситуации риска;
- сложность обнаружения и распознавания причин и факторов рисков;
- отсутствие практической возможности экспериментального исследования закономерностей, свойств и особенностей ситуаций риска.

Данные факторы являются главными причинами принципиально неустранимой неопределенности и неполноты исходной информации о ситуациях риска и, в конечном итоге, обуславливают фрагментарность принципов, приемов и подходов аппарата анализа, диагностирования и прогнозирования экологических и техногенных ситуаций рисков в процессе функционирования СТС [2–6].

Цель работы — предложить инструментарий своевременного выявления ситуаций риска и оперативного предотвращения перехода штатных си-

туаций в критические, чрезвычайные или аварийные как основу стратегии управления рисками и обеспечения гарантированной безопасности в динамике функционирования сложных технических систем. Инструментарий базируется на принципе своевременного обнаружения и устранения причин возможного перехода работоспособного состояния объекта в неработоспособное на основе системного анализа многофакторных рисков нештатных ситуаций, достоверного оценивания ресурсов допустимого риска различных режимов функционирования СТС и прогнозирования основных показателей живучести объекта в течение заданного периода его эксплуатации [6,7]. Основой диагностирования и прогнозирования ситуаций риска является предлагаемая здесь модель оценивания функции риска, базирующаяся на новых принципах и приемах реализации информационных технологий.

СИСТЕМНАЯ СОГЛАСОВАННОСТЬ ОЦЕНИВАНИЯ И КОРРЕКТИРОВАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Процессы **функционирования сложных технических систем** и процессы **обеспечения их безопасности** во многом принципиально различаются. Первые ориентированы на достижение главной, производственной цели сложной технической системы, поэтому им уделяется основное внимание на всех стадиях жизненного цикла изделия. Вторые представляются определенной категорией специалистов второстепенными, поскольку создается мнение, что все основные проблемы работоспособности и надежности, а, следовательно, и безопасности изделия решены на этапах его разработки, доводки, доработки, испытаний. В результате появляются прецеденты, когда разработка целей, задач, требований к системе безопасности и, прежде всего, к системе технического диагностирования (СТД) не получает должного обоснования. И, как следствие, оказывается, что показатели и свойства разработанной системы безопасности не соответствуют реально необходимым потребностям сложных объектов, для которых они разрабатывались. Поэтому возникает практическая необходимость **качественного изменения принципов и структуры управления работоспособностью и безопасностью** современных сложных технических систем в реальных условиях воздействия многофакторных рисков.

Прежде всего, управление сложными объектами должно быть системным, что следует трактовать как **системную согласованность оценивания и корректирования работоспособности и безопасности** в процессе функционирования таких объектов не только по соответствующим целям, задачам, ресурсам и ожидаемым результатам, но и (что особо важно) по оперативности и результативности взаимодействия в реальных условиях нештатной ситуации. С одной стороны, должна обеспечиваться оперативность и результативность системы безопасности по своевременному обнаружению нештатной ситуации, оцениванию ее степени и уровня риска, определению ресурса допустимого риска в процессе формирования рекомендаций по оперативным действиям лиц, принимающих решения (ЛПР). С другой стороны, система управления работоспособностью после получения сигнала о нештатной ситуации должна оперативно и результативно обе-

спечить готовность сложного объекта к экстремному переходу в нерабочее состояние и возможность его реализации в пределах ресурса допустимого риска. Общая стратегия [3] такого подхода показана на рис. 1. Знак «?» означает, что имеется неполная, нечеткая информация о состоянии функционирования объекта в момент $T_k \in T^\pm$. Этой информации недостаточно для принятия решения. Отсюда следует принципиально важное свойство предлагаемого подхода, которое состоит в том, что анализ ситуации и принятие решения обеспечиваются не только в типовых условиях четкого распознавания штатного или нештатного режима системы, но и в условиях нечеткой, неполной информации о ситуации. Следует обратить внимание на то, что этот подход в условиях нечеткой информации о ситуации позволяет в случае необходимости своевременно принять решение об экстренной остановке функционирования системы.

В данной стратегии управления в блоках 1–3 реализуются процедуры диагностирования и анализа режима функционирования сложного объекта. Необходимо заметить, что **требование своевременности является преобладающим**, ибо самая точная, самая достоверная информация становится ненужной, если она поступает к персоналу после аварии или катастрофы. Отсюда появляется практическая потребность системной согласованности темпов диагностирования с темпами рабочих процессов в различных режимах функционирования сложной технической системы. Такая согласованность может действовать как одно из важнейших условий обеспечения гарантированной безопасности объектов повышенного риска. В блоке 4 на основе результатов, полученных при выполнении процедур блоков 2 и 3, происходит распознавание состояния штатного режима функционирования. При этом анализируются три возможных варианта состояния сложного объекта: сохраняется штатный режим функционирования (переход управления на блок 5.0); выявляются признаки нарушений штатного режима, на основе которых можно обнаружить, что в момент $T_k \in T^\pm$ ситуация является нештатной (переход управления на блок 5.1) или становится неопределенной (переход управления на блок 5.2).

В первом варианте имеет место функционирование системы в штатном режиме и выполняется контроль качества функционирования (блоки 6.0–10.0). Во втором варианте проводится анализ степени и уровня риска последовательности нештатных ситуаций, оценивается безопасность и работоспособность сложного объекта (блоки 6.1–7.1) и формируется решение о технологической остановке его функционирования (переход управления на блоки 8.1–10.1) или решение о продолжении функционирования объекта при допустимых значениях степени и уровня риска (переход управления на блок 8.0). В третьем варианте осуществляется **оценивание живучести и безопасности** функционирования системы в условиях неопределенности информации о нештатных ситуациях. Для этого реализуется следующая последовательность действий.

Проводится анализ факторов риска в последовательности нештатных ситуаций, на основе которой оценивается живучесть и безопасность сложного объекта (блоки 6.2–7.2). Если уровни неопределенности и неполноты информации допустимы, то принимается решение о продолжении его функционирования (переход управления на блок 8.0). В противном случае принимается решение об экстренной остановке функционирования объекта (переход управления на блоки 9.2 – 10.2).

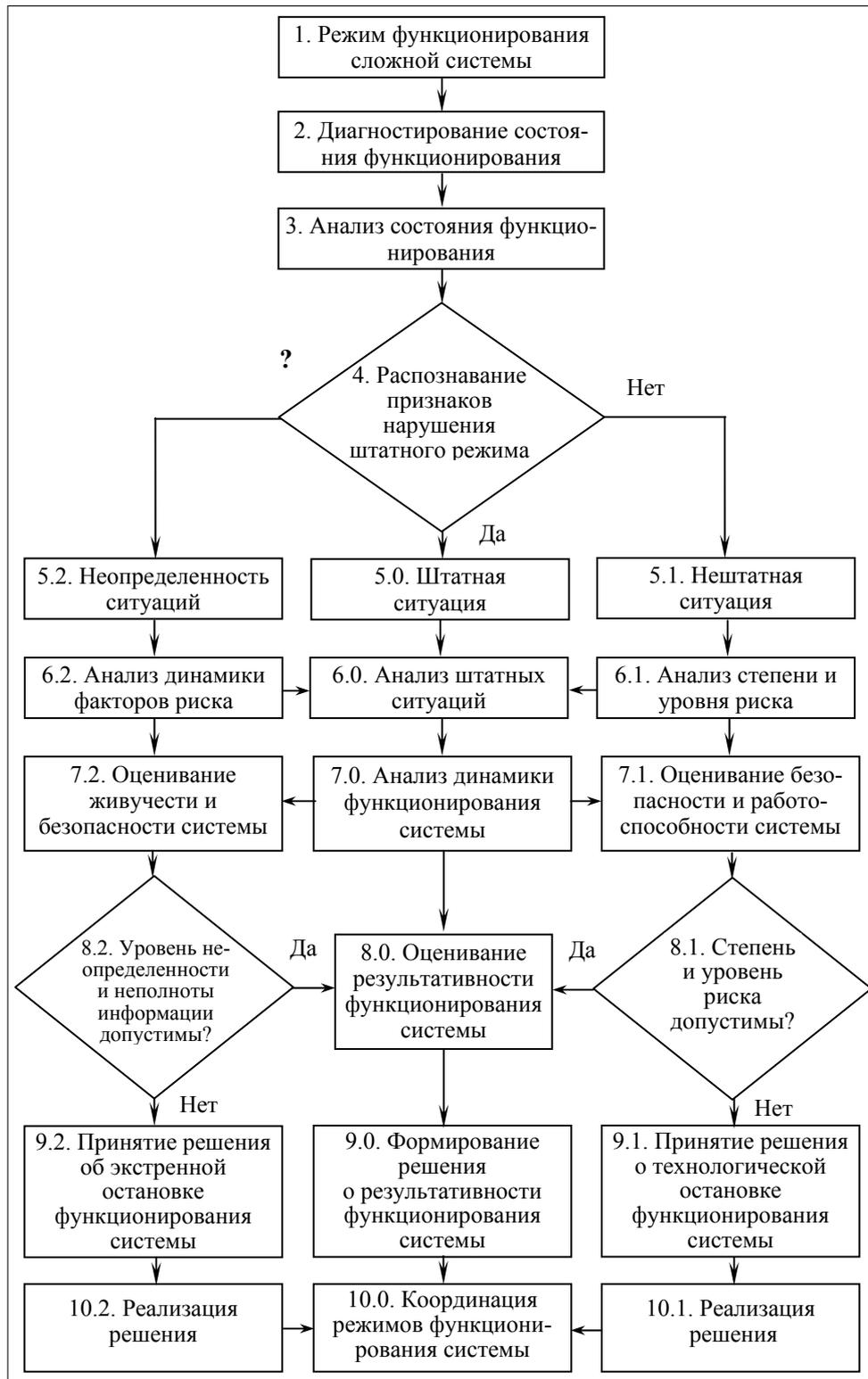


Рис. 1. Схема стратегии системного управления работоспособностью и безопасностью сложных объектов

Рассмотрим особенности ряда информационных технологий, которые имеют принципиальное значение как для программной реализации основных процедур стратегии системного управления работоспособностью и безопасностью сложных объектов [7], так и для конечного результата системного анализа рисков. Следует учитывать, что наличие принципиально неустранимой неопределенности и одновременно неполноты исходной информации, а также принципиально неустранимого порогового ограничения времени на формирование решения приводят к принципиально новому виду требований к исходной информации и, соответственно, требований к информационным технологиям [8, 9].

В отличие от традиционных систем управления, в которых требования к исходной информации и к информационным технологиям задаются априорно и остаются неизменными в динамике функционирования сложных технических объектов, в системе управления безопасностью техногенно и/или экологически опасных объектов предлагается реализовать принципиально иной подход. Сущность его состоит в том, что требования к количественным и качественным показателям исходной информации должны быть ситуационно динамичными и адаптивными, т.е. постоянно соответствовать условиям и особенностям складывающейся ситуации риска и изменяться соответственно ее динамике. Например, первоначальная оценка признаков ситуации риска свидетельствует о медленном изменении ее условий и свойств, но исходной информации недостаточно для определения степени и уровня риска. В этом случае основными являются требования к полноте и достоверности исходной информации, поскольку для получения обоснованного решения необходимо иметь высокую достоверность оценки степени и уровня риска. Но одновременно должен осуществляться мониторинг диагностики динамики обнаруженной ситуации риска, так как в условиях неопределенности нельзя исключить возможность резкого ускорения процессов риска.

Мониторинг позволяет выявить тенденции динамики ситуации риска и на этой основе принять определенное решение. Если, например, в течение достаточно продолжительного времени отсутствуют признаки возрастания опасности, то можно полагать, что лимит времени на формирование и реализацию решения не является главным, определяющим фактором опасности. В этом случае стратегия действий ЛППР должна быть направлена на решение одной из двух задач как главного условия успешного управления безопасностью.

Задача 1. Формирование и реализация оптимального решения, если требуемые затраты времени на его формирование и реализацию существенно меньше прогнозируемого лимита времени.

Задача 2. Формирование и реализация рационального решения, если требуемые затраты времени на формирование и реализацию оптимального решения соизмеримы с прогнозируемым лимитом времени.

Но если ситуация отличается высоким динамизмом, то в первую очередь жестко лимитируется продолжительность формирования и реализации решения, и потому основным требованием к исходной информации становится ее своевременность. При этом лимит времени на формирование и реализацию решения превращается в главный фактор, определяющий все тре-

бования не только к информационным технологиям формирования и реализации решения, но и к стратегии действий ЛПР. В данном случае стратегия действий ЛПР должна быть направлена, прежде всего, на выполнение условия своевременного управления безопасностью — сформировать и реализовать решение до наступления критического момента $T_{кр}$. Логика стратегии основана на следующем критерии: рациональное решение, позволяющее предотвратить или уменьшить нежелательные последствия ситуации риска и реализованное до наступления $T_{кр}$, существенно лучше оптимального решения, сформированного после его наступления. Сущность данного критерия следует из очевидного факта: оптимальное решение, сформированное после наступления $T_{кр}$, становится бессмысленным и ненужным, так как его реализация принципиально исключается после наступления нежелательных последствий в момент $T_{кр}$.

Возможны и другие случаи, когда первоначальная оценка признаков ситуации риска свидетельствует о малой вероятности ее перехода в аварийную, малом уровне возможного ущерба и медленном изменении условий и свойств факторов риска. Но через некоторое время обнаруживается множество новых признаков, выявляется высокий динамизм процессов риска, резко возрастает неопределенность критического момента $T_{кр}$ и потенциальных значений степени и уровня рисков. При этом принципиально не исключается возможность последующей бифуркации в динамике процессов риска. В таких условиях все рассмотренные выше стратегии ЛПР становятся недопустимыми, поскольку не выполняются допущения, принятые для этих стратегий. В этом случае стратегия действий ЛПР должна быть направлена на одновременное решение следующих трех задач.

Задача 1. Оценивание минимального и максимального значений критического времени $T_{кр}$.

Задача 2. Оценивание минимального и максимального значений степени и уровня рисков.

Задача 3. Оценивание возможности формирования и реализации решения по предотвращению нежелательных последствий исследуемой ситуации риска.

Логика стратегии ЛПР направлена на достижение главной цели: выявить условия, при которых возможно сформировать и реализовать решение до наступления критического момента $T_{кр}$.

Данную стратегию действий ЛПР следует полагать типичной для практики, поскольку указанные выше условия являются наиболее характерными для практических задач системы управления безопасностью техногенно и/или экологически опасных объектов. Поэтому эта стратегия определяет основные требования к свойствам и качественным показателям информационных технологий обнаружения, распознавания, оценивания, классификации, ранжирования ситуаций риска и прогнозирования их динамики. Отметим наиболее важные из них.

Информационные технологии должны: параллельно выполнять решения задач 1, 2, 3; быть адаптируемыми к конкретным условиям изменения

ситуаций риска; рационально использовать как априорную информацию об условиях и факторах появления нештатных, критических, чрезвычайных, аварийных и катастрофических ситуаций соответствующего класса сложных технических объектов, так и текущую информацию технического диагностирования конкретного технического объекта; выполнять решение задач обнаружения, распознавания, оценивания, классификации, ранжирования ситуаций риска и прогнозирования их динамики на основе рационального использования количественной и качественной информации о факторах риска [10, 11].

Общая информационная технология обнаружения ситуаций риска реализуется в виде системы структурно взаимосвязанных частных технологий. Каждая технология ориентирована функционально на совместное использование текущей информации технического диагностирования конкретного технического объекта и знаний одной из частных информационных баз. Отличительной особенностью общей технологии обнаружения является динамический параллелизм функционирования частных технологий, сущность которого состоит в оперативном изменении количества одновременно параллельно функционирующих частных технологий в зависимости от складывающейся ситуации риска. Решение об обнаружении ситуации риска принимается интеллектуальной экспертной системой на основании информации частных технологий. Решение представляется ЛППР вместе с кратким объяснением причин и указанием факторов риска. Аналогично функционируют информационные технологии распознавания, оценивания, классификации, ранжирования ситуаций риска и прогнозирования их динамики.

ФОРМИРОВАНИЕ МОДЕЛИ ОЦЕНИВАНИЯ ФУНКЦИИ РИСКА

Построим модель оценивания функции риска, на основе которой в блоках 1–3 схемы стратегии системного управления работоспособностью и безопасностью сложных объектов (рис. 1) реализуются процедуры диагностирования и анализа режима функционирования сложного объекта. С учетом необходимости работы с нормированными переменными функциональные характеристики степени и уровня риска должны формироваться в интервале $[0, 1]$, т.е. схема модели оценивания риска должна быть типа чебышевского полосового фильтра (рис. 2).

Выбор d^-, d^+, H , а также числа k (количество возвышенностей) — важная задача как с практической, так и с теоретической точки зрения и решается самостоятельно для каждой предметной области. Характеристики функциональной зависимости степени и уровня риска могут быть построены с помощью смещенных полиномов Чебышева $T_n^*(x)$, $n = 2k$, $k = 1, 2, \dots, N$. Например, $f_1(x) = |T_2^*(x)|$ имеет вид, показанный на рис. 3.

В общем случае используется обобщенный полином

$$f(x) = \sum_{n=2k}^N a_n |T_n^*(x)|^{(1)}, \quad k = \overline{1, N_1}; \quad N_1 = \frac{N}{2} \quad (1)$$

или

$$f(x) = \sum_{n=2k}^N [b_n(1 + a_n T_n^*(x))]. \quad (2)$$

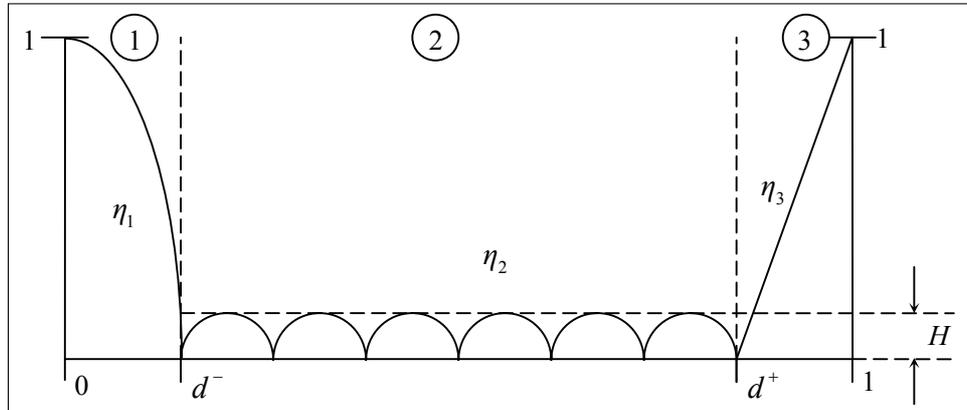


Рис. 2. Схема модели оценивания функции риска

В соответствии с предлагаемой схемой модели оценивания функции риска (см. рис.2) целесообразно по изменению параметров диагностирования разработать в интервале $[0, 1]$ следующие варианты моделей:

а) элементарную модель (функция одной переменной как модуль для последующих моделей);

б) модель оценки риска по нескольким динамически синхронным и синфазным параметрам (без запаздывания изменений, т.е. одновременное увеличение или уменьшение группы параметров);

в) модель б), но для синхронных, противофазных параметров (без запаздывания, но при увеличении показателей одной группы, одновременно уменьшаются показатели другой);

г) то же, что б) и в), но с учетом запаздывания реализации (увеличение или уменьшение) некоторой группы параметров.

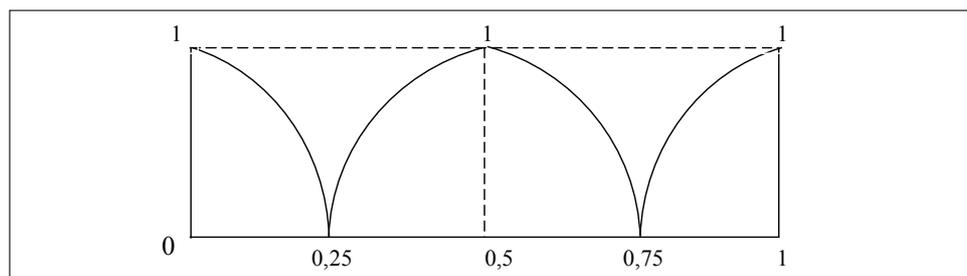


Рис. 3. Графическое представление смещенных полиномов Чебышева $f_1(x) = =|T_2^*(x)|$

Модели необходимо построить для системы вложенных интервалов, каждый из которых определяет штатный режим, а также нештатную \vee , критическую $\vee\vee$, чрезвычайную \wedge и аварийную * ситуации (рис. 4), или ввести определенные характеристики различных ситуаций риска, например, риск несущественный, существенный, критический или катастрофический.

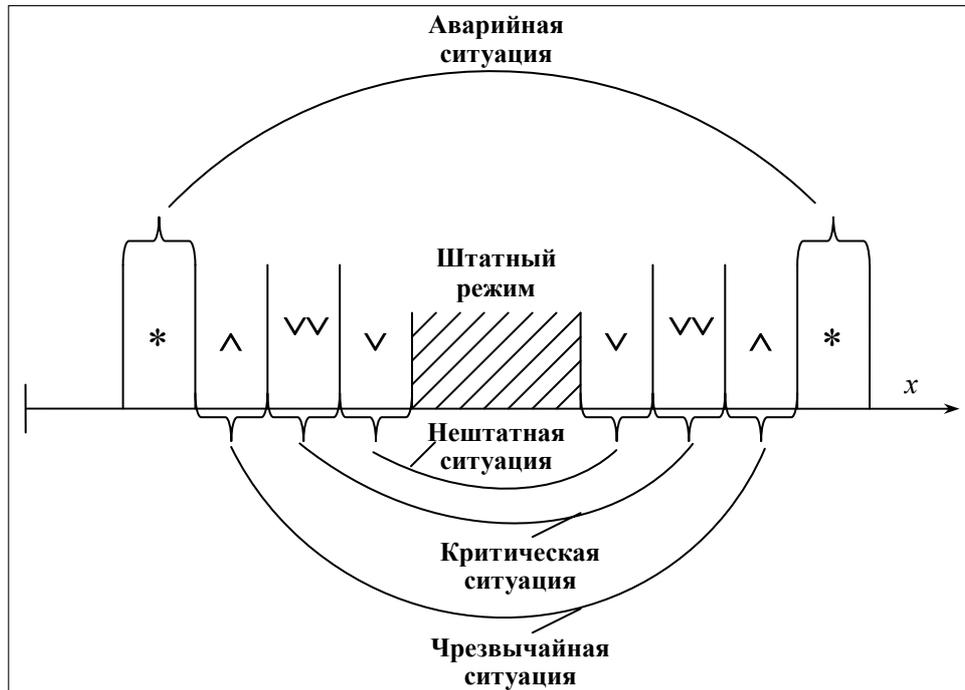


Рис. 4. Схема вложенных интервалов возможных ситуаций риска

При формировании модели оценивания функции риска будем выполнять следующие ее основные принципы.

1. Принцип **соответствия** модели реальным процессам. Функция риска $f_i(x)$ возрастает по мере приближения к границам интервала и достигает на них максимумов (рис. 5).

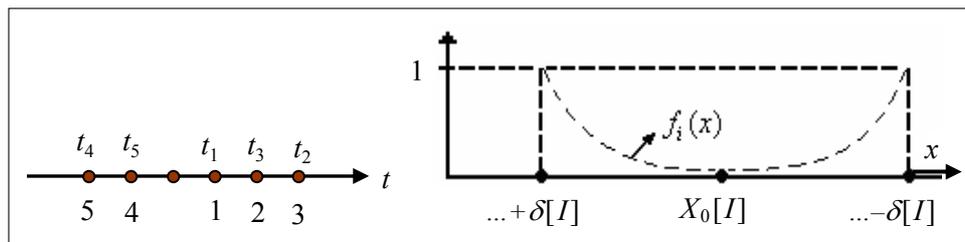


Рис. 5. Модель изменения функции риска

2. Принцип **правдоподобия** модели реальным процессам. Возрастание степени и уровня риска в динамике приближения к границам интервала под воздействием фактора риска происходит неравномерно. Скорость роста функции риска увеличивается, приближаясь к границам интервала.

3. Принцип **адекватности** модели реальным процессам. Динамика возрастания функции риска по мере приближения к границам интервала различная под воздействием разных факторов риска.

4. Принцип **однотипности или типичности** моделей для разнородных процессов риска. Из п.1–3 следует, что процессы изменения функций риска могут существенно различаться (из-за особенностей процессов) количест-

вом слагаемых в обобщенном полиноме, его коэффициентами, но структура моделей, их свойства должны быть одного типа (например, в виде обобщенного полинома).

Примечание. По п.2 необходимо объяснить понятие «правдоподобие». Учитывая неограниченность множества факторов риска, множества признаков каждого фактора, сложность сбора и обработки информации о факторах риска, уникальность, неповторимость условий и результатов каждой ситуации, принципиально невозможно получить полное и достоверное описание ситуации риска. Поэтому в теории случайных процессов и в теории оценивания параметров случайных процессов вводится понятие **принцип максимального правдоподобия**. Именно на этой основе формулируется п.2.

Указанным выше принципам в наибольшей степени отвечают обобщенные полиномы, построенные на множестве полиномов Чебышева. Эти полиномы дают возможность обеспечить равномерное приближение на всем заданном интервале изменения переменных, которые нормируются к интервалу $[-1, 1]$ или $[0, 1]$. Для рассматриваемой задачи целесообразно привлекать смещенные полиномы Чебышева и, соответственно, удобно нормировать переменные к интервалу $[0, 1]$.

Особенность данной задачи, как следует из примечания, состоит в том, что базовую модель риска необходимо построить априорно, не имея необходимых исходных количественных данных. Отсюда следует, что базовая модель должна быть построена на основе априорных значений и общих представлений о физических процессах, которые приводят к появлению и развитию ситуаций риска.

Для формирования базовой модели требуется:

- 1) выбрать вариант построения модели в виде
 - а) единой модели в форме (1) или (2) для всего интервала $[0, 1]$,
 - б) в форме системы из трех моделей: одна — для интервала $[0, d^-]$, вторая — для $[d^-, d^+]$, третья — для $[d^+, 1]$;
- 2) создать массив исходных численных данных для моделей;
- 3) сформулировать задачу построения модели и предложить метод и алгоритм ее решения.

Независимо от выбора варианта модели, массив исходных данных должен обеспечивать сглаживание возмущающих действий концов интервала. При использовании полиномов Чебышева это достигается неравномерным распределением точек дискретного массива переменных. Для интервала $[0, 1]$ при использовании смещенных полиномов Чебышева можно дискретное множество D_x интервала $[0, 1]$ формировать на основе соотношений [12]

$$x_q = 1 - \cos \left[\frac{(q-1)\pi}{2(M-1)} \right] \quad (3)$$

или

$$x_q = \sin \left[\frac{(q-1)\pi}{2(M-1)} \right], \quad (4)$$

где $q = \overline{1, M}$, M — число точек в интервале $[0, 1]$, т.е. число дискретных значений в D_x . При этом выполняется условие $x_1 = 0, x_M = 1$.

Значение M целесообразно выбрать $M = 11$ (тогда в $(0, 1)$ будет 9 точек) или $M = 21$ (тогда внутренних точек будет 19) или другое, аналогично выбранное значение M . Выбор значения M зависит от условий на границах интервала, а именно, при $q = 1, x_1 = 0$; при $q = M, x_M = 1$, а также от значения порядка N полинома $T_n^*(x)$. Данное условие важно тем, что полином n -го порядка имеет n нулей в интервале $[0, 1]$ и, следовательно, имеет $(n+1)$ значение $|T_n(x)| = 1$. Поэтому множество D_x должно максимально возможно отображать характерные точки функции $T_n(x)$, а именно, нули, максимумы, минимумы и 1-2 точки между ними.

Рассмотрим методы формирования модели риска для варианта б), т.е. в виде системы из трех моделей. Модель варианта а) является, как будет показано ниже, частным случаем варианта б).

Модель для интервала $[d^-, d^+]$ будем формировать в виде (2). Дополнительно в соответствии с предметной областью исследования необходимо задать величину H . Полагаем известными значения d^-, d^+, H . В соответствии с (2) задача состоит в нахождении значений $\langle a_n^0 \rangle, \langle b_n^0 \rangle, n = 2, 4, \dots, N$, при которых максимальная величина абсолютной невязки

$$\Delta = \max_{x \in [d^-, d^+]} |f(x) - H| \quad (5)$$

будет минимально возможной при полученных значениях $a_n = a_n^0, b_n = b_n^0$

$$\Delta^0 = \min_{\langle a_n, b_n \rangle} \Delta. \quad (6)$$

Решение задачи

1. Формируется дискретное множество D_y для интервала $[d^-, d^+]$, который преобразуется в $[0, 1]$ на основе соотношения

$$y = \frac{x - d^-}{d^+ - d^-}, \quad (7)$$

и на основе (3) или (4) определяется y_q . Например,

$$y_q = 1 - \cos \left[\frac{(q-1)\pi}{2(M-1)} \right], \quad q = \overline{1, M}, \quad (8)$$

где M определяем из условия, что между характерными точками (максимум, нуль, минимум, нуль) для полинома наибольшего порядка (определяемого N) должно быть не менее двух дискретов (т.е. не менее двух значений y_q).

Примечание. При использовании системы из трех моделей можно в интервале $[d^-, d^+]$ применять в функции (2) не только четные, но и нечетные полиномы Чебышева. В этом случае снимается требование к $f(x)$ при $x=0$ и $x=1$ (см. рис.2). Для получения достаточно малого значения Δ^0 , а именно $\Delta^0 \in (1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-7})$, необходимо использовать полиномы Чебышева 9...10 порядка.

2. Формируется система M уравнений

$$\sum_{k=0}^N [b_k (1 + a_k T_k^*(y_q))] - H = 0, \quad q = \overline{1, M}, \quad (9)$$

где неизвестные a_k и b_k .

Данная система является несовместной, так как $M > 2N$. Решение целесообразно определять по чебышевскому критерию (5) и (6) и задачу рассматривать как чебышевскую задачу приближения для несовместной системы линейных уравнений. В (6) необходимо принять $\Delta^0 = \min_{\langle a_k, b_k \rangle} \Delta$. Для

определения $\langle a_k, b_k \rangle, k = \overline{0, N}$ наиболее удобно задачу свести к задаче линейного программирования. Решение задачи (9) можно находить градиентными методами, методом наименьших квадратов, симплекс-методом или любым другим быстросходящимся методом.

После получения решения задачи (9) необходимо перейти к переменной x на основе (7)

$$x = y(d^+ - d^-) + d^-, \quad (10)$$

и если x удовлетворяет условию $d^- \leq x \leq d^+$, то искомая функция риска (точки степени риска η_2) будет определяться соотношением

$$\eta_2 = f(x) = \sum_{k=0}^N b_k \left[1 + a_k T_k \left(\frac{x - d^-}{d^+ - d^-} \right) \right]. \quad (11)$$

Далее необходимо определить значения $\eta_2(d^-)$ и $\eta_2(d^+)$ для сопряжения функций риска интервалов $[0, d^-]$ и $[d^+, 1]$ с функцией (11). Функции риска для этих интервалов можно определять существенно проще, поскольку свойства и особенности таких функций очевидны из указанных выше принципов и рис.2, а именно функции являются монотонно возрастающими при изменении x от d^- до 0 и от d^+ до 1.

Поэтому целесообразно использовать степенные функции. Наиболее удобно применить функции вида

$$\eta = c_1 x^p + c_2,$$

поскольку изменением степени p можно учитывать экстремальные свойства функций (или иными словами, изменять динамику возрастания степени риска по мере приближения к 0 или 1).

Определения коэффициентов c_1 и c_2 можно выполнить аналитическим методом, учитывая граничные условия интервалов $[0, d^-]$ и $[d^+, 1]$.

Функции рисков для интервалов $[0, d^-]$, $[d^-, d^+]$ и $[d^+, 1]$ обозначим соответственно η_1, η_2, η_3 (см. рис. 2).

Тогда для $[0, d^-]$ имеем граничные условия для η_1

$$x = 0 \rightarrow \eta_1 = 1; \quad x = d^-; \quad \eta_1 = H^- = \eta_2(d^-).$$

Отсюда для $\eta_1 = c_{11}x + c_{21}$ получаем систему уравнений

$$\begin{cases} 1 = c_{11} \cdot 0 + c_{21}, \\ H^- = c_{11} d^- + c_{21}, \end{cases}$$

и ее решение дает значения $c_{12} = 1; c_{11} = \frac{H^- - 1}{d^-}$. Следовательно,

$$\eta_1 = \frac{H^- - 1}{d^-} x^p + 1, \quad x \in [0, d^-]. \quad (12)$$

Аналогично для $[d^+, 1]$ получаем

$$\eta_3 = \frac{1 - H^+}{1 - d^+} x^p + \left(1 - \frac{1 - H^+}{1 - d^+} \right). \quad (13)$$

Общая функция степени риска определяется соотношением

$$\eta = \begin{cases} \eta_1 = \frac{H^- - 1}{d^-} x^p + 1 \text{ при } x \in [0, d^-], \\ \eta_2 \Rightarrow \text{ф-ла (11) при } x \in [d^-, d^+]; \eta_3 \Rightarrow \text{ф-ла (13) } x \in [d^+, 1]. \end{cases} \quad (14)$$

Выбор показателей (H, d^-, d^+, N, M, p) , которые задают структурные и экстремальные свойства общей модели (14), должен выполняться как по результатам испытаний СТС, так и по результатам технического диагностирования в динамике ее эксплуатации, т.е. модель должна быть адаптивной в процессе настройки (по данным испытаний) и эксплуатации (по данным технического диагностирования). Практическая необходимость такого подхода обусловлена существенным влиянием условий эксплуатации на расход ресурсов СТС. К примеру, двигатели самолетов, совершающих полеты на короткие расстояния, вырабатывают ресурс (т.е. стареют) в 3–5 раз быстрее, чем двигатели самолетов дальних рейсов. Причины — переходные режимы и другие условия взлетов и посадок воздействуют существенно больше на механизмы старения, чем крейсерский режим.

Принципиальная особенность реализации этих моделей заключается в том, что их аппаратная реализация должна обеспечивать решение задачи распознавания по нескольким синхронным параметрам **без предварительного обучения** (что нехарактерно для типовых нейроанализаторов) на основании априорного анализа имеющихся знаний и представлений о динамике процессов.

**ДЕМОНСТРАЦИОННАЯ ВЕРСИЯ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА
ДИАГНОСТИКИ ФУНКЦИИ РИСКА**

Процессы функционирования СТС контролируются системой технического диагностирования, которая с временной дискретностью $T_k = \{t_k | t_k = t_{k-1} + \Delta t\}$ измеряет значения показателей качества функционирования $Y_k = \hat{Y}[T_k] \in Y$ при априорно известных значениях параметров автоматизированной человеко-машинной системы управления $U_k = \hat{U}[T_k] \in U$, внутренних параметров СТС $X_k = \hat{X}[T_k] \in X$. На функционирование системы оказывают воздействия факторы внешней среды и риска, значения показателей $\Xi_k = \Xi[T_k]$ которых известны с малой достоверностью или априорно неизвестны. В системе диагностирования результаты измерений формируются в виде последовательности $E_1, E_2, \dots, E_k, \dots$ состояний сложной системы, в которой каждое состояние E_k характеризуется определенными значениями (Y_k, X_k, U_k) показателей Y, X, U процессов функционирования системы, а также значениями показателей Ξ_k и формализуется соотношением

$$E_k = \{Y_k \in Y \wedge X_k \in X \wedge U_k \in U \wedge \Xi_k \in \Xi\}.$$

На основе результатов диагностирования $E_1, E_2, \dots, E_k, \dots$ строятся целевые функции, которые определяют зависимость показателей качества функционирования Y, X, U от значений параметров $U_k = \hat{U}[T_k]$, $X_k = \hat{X}[T_k]$ и прогнозируемых значений показателей факторов риска Ξ_k , и выполняется распознавание перехода в нештатный режим.

Здесь **нештатный режим** R_{abn} определяется как такой режим функционирования объекта, для которого отдельные показатели $\forall T_k \in T_{abn}^\pm$ или некоторые сочетания показателей, или все показатели Y_k, X_k, U_k, Ξ_k не находятся в априорно заданных интервалах $D_Y^\pm, D_X^\pm, D_U^\pm, \bar{D}_\Xi^\pm$. В общем случае режим R_{abn} формализуется соотношениями

$$\forall T_k \in T_{abn}^\pm \Rightarrow R_{abn} = A_1 \vee A_2 \vee A_3 \vee A_4 \vee \dots \vee A_N,$$

$$T_{abn}^\pm = \{t | t_{abn}^- \leq t \leq t_{abn}^+\}, T_{abn}^\pm \in T^\pm,$$

$$A_1 = \{(Y_k \notin D_Y^\pm) \wedge [(X_k \in D_X^\pm) \wedge (U_k \in D_U^\pm) \wedge (\Xi_k \in \bar{D}_\Xi^\pm)]\},$$

$$A_2 = \{(X_k \notin D_X^\pm) \wedge [(Y_k \in D_Y^\pm) \wedge (U_k \in D_U^\pm) \wedge (\Xi_k \in \bar{D}_\Xi^\pm)]\},$$

$$A_3 = \{(U_k \notin D_U^\pm) \wedge [(Y_k \in D_Y^\pm) \wedge (X_k \in D_X^\pm) \wedge (\Xi_k \in \bar{D}_\Xi^\pm)]\}, \quad (15)$$

$$A_4 = \{(\Xi_k \notin \bar{D}_\Xi^\pm) \wedge [(Y_k \in D_Y^\pm) \wedge (X_k \in D_X^\pm) \wedge (U_k \in D_U^\pm)]\},$$

$$A_5 = \{[(Y_k \notin D_Y^\pm) \wedge (X_k \notin D_X^\pm)] \wedge [(U_k \in D_U^\pm) \wedge (\Xi_k \in \bar{D}_\Xi^\pm)]\}, \dots,$$

$$A_N = \{(X_k \notin D_X^\pm) \wedge (Y_k \notin D_Y^\pm) \wedge (U_k \notin D_U^\pm) \wedge (\Xi_k \notin \bar{D}_\Xi^\pm)\}.$$

Демонстрационная модель системного анализа диагностики разработана для общего случая, не акцентируя внимание на природу происхождения датчиков и их измерений. Поскольку в демонстрационной версии физический смысл параметров не конкретизировался, то и не учитывалось их функциональное взаимодействие. В демонстрационной версии модели учитывалось следующее:

- произвольное количество датчиков, обобщающих определенный поток значений-измерений;
- произвольное количество групп, объединяющих функционально взаимодействующие датчики;
- создание, редактирование, изменение или удаление групп и датчиков;
- при создании каждого нового датчика одним из связанных с ним параметров является файл исходных данных, в котором содержатся показания датчика в любой дискретный момент времени;
- изменение показания датчиков и распределения функций риска можно контролировать и отслеживать в рамках датчиков одной группы или контролировать систему диагностики отдельных групп датчиков, а также интегрированную кумулятивную функцию риска;
- изменение параметров оценивания модели функции риска (скорость изменения значений датчиков, порог функции риска, степени смещенных полиномов Чебышева, перерасчет несовместных систем уравнений (1) или (2) и др.).

Демонстрационная версия процесса диагностирования для определенной группы из четырех функционально взаимозависимых датчиков приведена на рис. 6. У каждого из них есть пять интервалов, в рамках которых могут находиться показания в зависимости от режима работы системы. Для каждого датчика берутся предыдущие 40 измерений и по ним рассчитываются коэффициенты системы уравнений (1) или (2), полагая, что эти измерения проводились в штатном режиме. Для идентификации перехода в нештатный режим, когда выполняется одно из условий (15), и при превышении порога функции риска, диагностическая система оповещает про опасность перехода в нештатный режим. При обработке измерений датчиков на основе разработанной модели оценивания функции риска формируется кумулятивная функция риска как максимум среди всех наблюдаемых значений риска для моделируемой ситуации.

Таким образом, путем комплексного, системного и непрерывного оценивания параметров функционирования СТС в реальном режиме времени выявляются ситуации, которые потенциально могут вывести объект за рамки функционирования из штатного режима. Предлагаемый инструментарий учитывает возможность для ситуаций, развитие которых приводит к отклонениям параметров от штатного режима функционирования объекта, своевременного принятия решения в зависимости от изменения режима функци-

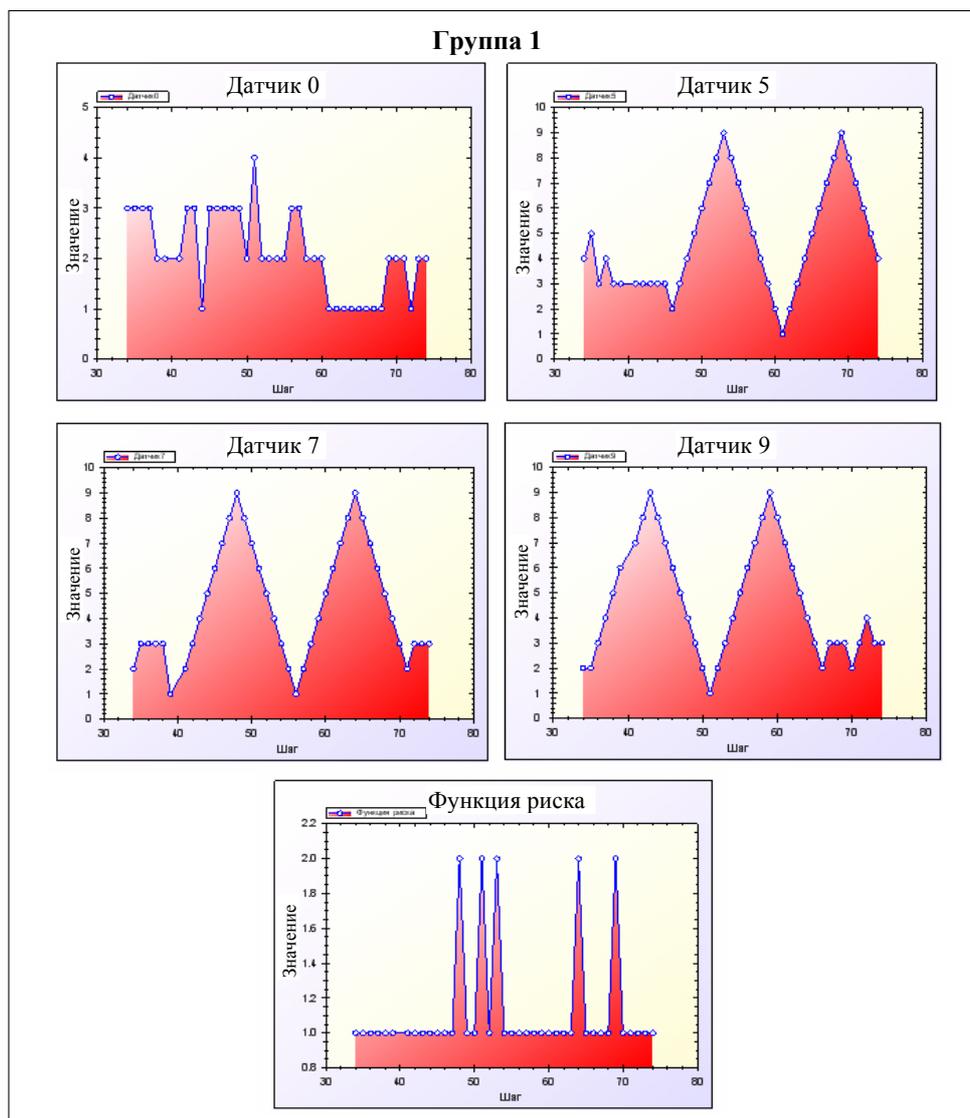


Рис. 6. Процесс диагностирования для группы датчиков

онирования или искусственной корректировки параметров с целью влияния на измененный режим и возвращения значений его параметров в штатный режим функционирования, обеспечивая живучесть СТС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марчук Г.И., Кондратьев К.Я. Проблемы глобальной экологии. — М.: Наука, 1992. — 264 с.
2. Pankratova N.D. A system analysis of multifactor risks in conditions of uncertainty // Proceedings of the XV IFIP World Computer Congress. — Vienna / Austria and Budapest/Hungary, 31 August — 4 September, 1998. CD-ROM, file: /doc/000/000/665.htm.

3. Zgurovsky M.Z., Pankratova N.D. System analysis: Theory and Applications. — Springer. — 2007. — 475 p.
4. Pankratova N.D., Oparina E.L. Recognition and minimization of risks in dynamics of operation for complex ecological systems // Materialy miedzynar. konf. «V Jubileuszowa Szkola Geomechaniki». Czesc II. — Gliwice-Ustron, 2001. — P. 77–86.
5. Панкратова Н.Д., Курілін Б.І. Концептуальні основи системного аналізу ризиків у динаміці управління безпекою складних систем // В кн.: Соціальні ризики та соціальна безпека в умовах природних і техногенних надзвичайних ситуацій та катастроф / Відп. ред: В.В. Дурдинець, Ю.І. Саєнко, Ю.О. Привалов. — Київ: Стилос.— 2001. — С. 121–168.
6. Pankratova N., Kurilin B. Conceptual foundations of the system analysis of risks in dynamics of control of complex system safety. Part 1. Basic statements and substantiation of approach // Journal of automation and information sciences. — 2001. — 33, № 2. — P. 15–31.
7. Pankratova N., Kurilin B. Conceptual foundations of the system analysis of risks in dynamics of control of complex system safety. Part 2. The general problem of the system analysis of risks and the strategy of its solving // Journal of automation and information. — 2001. — 33, № 4. — P. 1–14.
8. Панкратова Н.Д., Курілін Б.І. Математические основы информационного анализа системных задач // Сб. тр. Пятой междунар. конф. «Интеллектуальный анализ информации», Киев, 17–20 мая 2005 г. — 2005. — С. 224–233.
9. Згуровський М.З., Панкратова Н.Д. та ін. Інформаційно-аналітична система збору та обробки даних // Патент на корисну модель. — 2007. — № 22435.
10. Журавлев Ю.И., Гуревич И.Б. Методы и средства преобразования и обработки информации в задачах распознавания образов и анализа изображений // В кн.: «Параллельная обработка информации». — 1990.— Т. 5. — Киев: Наук. думка. — С. 218–318.
11. Технические средства диагностирования: Справочник / Под ред. В.В. Ключева. — М.: Машиностроение, 1989. — 672 с.
12. Ланцош К. Практические методы прикладного анализа. — М.: Физматгиз, 1961. — 524 с.

Поступила 05.11.2007