ПРОБЛЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ И НАДЕЖНОСТИ МАШИН

№ 5, 2008

ТЕХНОГЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 614.824(082)

© 2008 г. Ахметханов Р.С., Двоpецкая Т.Н., Куксова В.И., Юдина О.Н.

ДИНАМИЧЕСКИЕ РИСКИ И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ[1]

Рассмотрен подход анализа рисков в динамической постановке. Используется система обобщенных соотношений, описывающих динамику системы “человек – технический объект – среда” и качественный анализ с использованием обобщенного описания динамических систем с применением потенциальных поверхностей рисков. Динамика систем характеризуется аттракторами в фазовом (или конфигурационном) пространстве, а устойчивость аттракторов характеризует неизменность безопасности систем. Топология потенциальной поверхности (главные кривизны, относительное распределение характерных точек) определяет устойчивость и динамическое поведение системы, а также возможность перехода с одного аттрактора на другой. Это позволяет оценить вероятность возникновения аварии или катастрофы с помощью анализа цепочки переходов с одного аттрактора (состояния системы) на другой.

В современной технике, экономике, в управлении производством и отраслями хозяйства, в научных исследованиях, а также при анализе рисков широко применяются математические модели изучаемых процессов – механических, физических и химических. При построении этих моделей необходима известная идеализация, упрощение реальных явлений и процессов, присущих техническим устройствам, агрегатам, системам различной физической природы. При этом одна и та же система может быть описана разными моделями в зависимости от поставленной задачи исследования и степени идеализации. Для большинства систем характерно протекание явлений и процессов управления во времени. При этом динамика одних систем характеризуется линейными дифференциальными, разностными и интегральными уравнениями или линейными функциональными зависимостями, а динамика других – нелинейными уравнениями и функциональными зависимостями.

Динамические системы называются непрерывными, если рассматриваемые в них процессы и сигналы имеют непрерывное множество значений по величине и времени. В дискретных системах процессы и сигналы имеют конечное число значений по величине и времени. Системы, дискретные только по времени, называются импульсными. При составлении модели системы и описании ее динамики характерно использование переменных состояния и уравнений первого порядка относительно этих переменных. Переменные состояния при таком описании системы аналогичны обобщенным координатам в классической механике, а пространство состояний является фазовым пространством.

[1] Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (Грант 05-08-17940а).

При этом описании любая сложная система рассматривается как многомерная. Состояние системы в любой текущий момент времени характеризуется совокупностью фазовых координат, которые можно объединить в вектор состояния. Методы исследования систем, использующие этот способ описания их поведения, принято называть методами пространства состояний. Интерпретацией пространства состояний системы обычно является фазовое пространство. При описании и динамики системы можно использовать и конфигурационное пространство в качестве пространства состояний.

Реальные технические системы подвержены случайным флуктуациям внешнего и внутреннего характера. Первые связаны с колебаниями во времени различных физических характеристик среды, а вторые вызваны непосредственно случайным характером взаимодействия между различными компонентами системы. Это приводит к рассмотрению рисков во времени.

Сложность системы требует на начальном этапе рассматривать ее на приближенных моделях, учитывающих несколько укрупненных подсистем и связи между ними. В этом случае техническую систему можно представить системой, состоящей из трех основных подсистем: внешняя среда, технический объект и человек. Представление системы, состоящей из подсистем, является важным методологическим аспектом решения задачи анализа взаимодействий между подсистемами, определяющих синергетические кумулятивные эффекты аварий и техногенных катастроф. В указанных подсистемах можно рассматривать свои подсистемы со своими внутренними и внешними воздействиями, изменениями параметров и т.д. [1].

Часто бывает трудно выяснить, с чем непосредственно связаны наблюдаемые колебания параметров системы, тем более что важную роль здесь могут играть различные сочетания благоприятных и неблагоприятных факторов. Это позволяет строить модели стохастических возмущений безотносительно к конкретным механизмам их возникновения, определяя лишь их стохастические свойства.

При оценке рисков в техногенной сфере используются дискретные модели. Обычно риск определяется вероятностью возникновения аварийной ситуации P и возможным ущербом U: $R = PU$.

В случае, когда риск рассматривается для n-го числа возможных аварийных ситуаций, то выражение для определения риска будет следующим: $R = \Sigma P_i U_i$, $i = 1, \ldots, n$.

Величины вероятности P и ущерба U определяются параметрами системы, ее текущим состоянием, происходящими технологическими и управляющими процессами, которые связаны с потоками в системе энергии, вещества и информации.

Если рассматривать систему с переменными по времени параметрами, процессами и случайными возмущениями, тогда получим временную зависимость риска $R(t)$. Величина риска для технической систем может иметь устойчивые трендовые изменения или колебаться относительно некоторой фиксированной величины. В более сложном случае динамика изменения величины риска будет характеризоваться трендовой и колебательной составляющей. Колебания могут иметь различные значения по амплитуде, по частоте (например, суточные или сезонные колебания риска, а также связанные с временными особенностями технологических процессов) и числу частотных составляющих. Подобное представление риска, зависящее от параметров системы и времени, позволяет строить динамические модели риска и является основой для управления рисками в сложных системах. Для описания динамики риска можно использовать математический аппарат теории катастроф, нелинейной динамики и методы имитационного моделирования.

Обобщенную систему определяющих соотношений для анализа и управления рисками в сложных системах $R_i(t)$ для момента времени t можно описать в форме [2]

$$\begin{aligned}
&R_i(t) = F\{P_i(t), U_i(t)\} \le [R_i(t)],\\
&[R_i(t)] = F_R\{[P_i(t), U_R(t)]\} = n_R^{-1} R_C(t) = n_R^{-1} F_C\{P_C, U_C\} = F_Z\{m_Z Z(t)\},\\
&P_i(t) = F_P\{P_N(t), P_T(t), P_S(t)\}, \quad U_i(t) = F_U\{U_N(t), U_T(t), U_S(t)\},\\
&R_i(t) = F_R\{R_N(t), R_T(t), R_S(t)\},
\end{aligned} \tag{1}$$

где $[R_i(t)]$ – приемлемый интегральный риск в заданный момент времени; $R_C(t)$ – предельный (критический) уровень допустимого риска; n_R – коэффициент безопасности по рискам; $P_i(t)$, $U_i(t)$ – интегральные (суммарные) вероятности и ущербы для момента времени t; P_C, U_C – предельные (критические) уровни вероятностей и рисков; Z – экономические затраты на управление рисками; m_Z – коэффициент эффективности затраты; $P_N(t)$, $P_T(t)$, $P_S(t)$ – вероятности возникновения в момент времени t неблагоприятных (опасных) событий, обусловленные человеческим фактором, технической системой и внешней средой соответственно; $U_N(t)$, $U_T(t)$, $U_S(t)$ – ущербы, наносимые неблагоприятными (опасными) событиями в момент времени t человеку, техническому объекту и внешней среде соответственно.

Приемлемые риски $[R(t)]$ в общем случае определяются простым произведением $[P(t)] \cdot [U(t)]$, т.е. $R(t) = P(t) \cdot U(t)$. Достижение приемлемые рисков $[R(t)]$ можно осуществить комплексом мероприятий с эффективными затратами $Z(t)$ на заданное одновременное снижение вероятностей $P(t)$ и ущербов $U(t)$.

Приведенная система отношений представляет собой обобщенную динамическую модель риска для системы “человек – технический объект – среда”.

Анализ и управление рисками в соответствии с соотношениями (1) сводятся к [2]: построению во времени t сценариев возникновения и развития аварийных и катастрофических ситуаций; оценке текущих значений вероятностей $P_i(t)$ и ущербов $U_i(t)$ для заданных сценариев с учетом воздействия и поражающих факторов, обусловленных человеческим фактором, объектами техносферы и окружающей средой; оценке предельных (критических) значений параметров риска R_C, P_C и U_C на основе обобщения данных по текущему состоянию системы по потенциальным и реализованным угрозам и рискам; определению и обоснованию коэффициента безопасности по рискам; определению и назначению необходимых затрат $Z(t)$ по снижению рисков; обоснованию и выбору комплекса научно-технических, нормативно-правовых и экономических мероприятий по повышению эффективности снижения рисков.

В соответствии с общей концепцией приемлемых рисков в рамках базовых соотношений для анализа и управления рисками необходимо выполнение неравенства с данного момента времени и последующее время между текущими $R(t)$, критическими $R_C(t)$ и приемлемыми $[R(t)]$ рисками. При этом соответствующие риски $R(t)$, $R_C(t)$ и $[R(t)]$ определяются через вероятности возникновения опасных процессов $P(t)$, $P_C(t)$ и $[P(t)]$, и соответствующих им ущербов $U(t)$, $U_C(t)$ и $[U(t)]$.

При оценке рисков рассматриваются опасные процессы и опасности, действующие на технические объекты, население и окружающую среду. Под опасностью понимаются явления, процессы, действия или условия, чреватые наличием некоторого потенциала (как правило, это энергия, вещество или информация), который может нанести ущерб здоровью людей, привести к их гибели, нанести ущерб окружающей среде, привести к потере сохранности материальных объектов.

Для каждого комплекса, объекта, процесса и чрезвычайной ситуации может быть установлен обобщенный показатель ее потенциальной опасности (угрозы) в виде относительного безразмерного показателя радиуса-вектора D_S в пространстве W, E, I [2]: $D_S = \sqrt{k_W W^2 + k_E E^2 + k_I I^2}$, где W, E, I – безразмерная относительная категория опасности, определяемая количеством вещества, энергии и информации, накопленных на объекте; k_W, k_E, k_I – весовые коэффициенты.

При изменении состояния рассматриваемого технического объекта и его параметров обобщающий показатель рассматривается в виде потенциальной функции времени t: $D_S(t) = \sqrt{k_W W^2(t) + k_E E^2(t) + k_I I^2(t)}$.

В соответствии со сценарием развития техногенной катастрофы происходит и изменение весовых коэффициентов по времени. В этом случае они также вводятся в пред-

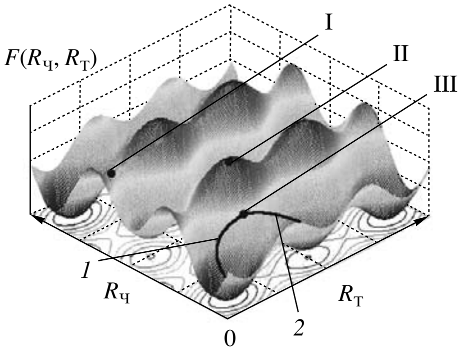

Рис. 1. Поверхность риска $f(R_ч, R_т)$: I – гиперболическая точка, II – эллиптическая точка (максимум); III – начальное состояние системы, *1* и *2* – возможные переходы в область локальных минимумов потенциальной поверхности (эллиптические точки)

ставленное выражение в виде функций от времени, что позволяет записывать обобщенные сценарии в виде математических выражений, учитывающих изменение соотношений энергий, веществ, информации и весовых коэффициентов. Изменения значений $W(t)$, $E(t)$ и $I(t)$ можно моделировать моделями физических, химических и механических процессов, протекающих при техногенной катастрофе.

Используя эти обобщенные относительные факторы ($W(t)$, $E(t)$ и $I(t)$) можно построить выражение для рисков. В случае техногенных катастроф вектор состояния объекта выходит из области допустимых значений энергий, вещества и информации. Выбранные типовые факторы являются поражающими и инициирующими, в зависимости от стадии развития техногенной катастрофы.

Подобный подход в описании опасных и инициирующих факторов позволяет строить обобщенные сценарии и модельные представления возникновения и развития техногенных катастроф в пространстве трех параметров – вещество, энергия и информация. В этом случае обобщенные критерии оценки рисков возникновения техногенных катастроф будут выражаться в виде функций $f^*(W(t), E(t), I(t))$.

Рассмотрим динамическую систему, состояния которой можно охарактеризовать набором величин x, которые обозначим индексом j, т.е. величин x_j, которые могут изменяться со временем. Все x_j составляют вектор состояния $\mathbf{x}(t) = (x_1(t), x_2(t), \ldots, x_n(t))$. Эволюция вектора $\mathbf{x}(t)$ со временем (динамика системы) определяется дифференциальными уравнениями вида

$$d\mathbf{x}/dt = N(\mathbf{x}, \mathbf{a}) + \mathbf{F}(t), \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0,$$

где $N(\mathbf{x}, \mathbf{a})$ – детерминистическая часть, $\mathbf{F}(t)$ – флуктуирующие силы. Если в отсутствие флуктуирующих сил значение вектора состояния x в начальный момент времени известно и так называемые управляющие параметры $\mathbf{a}$ заданы, то будущее вектора x определено однозначно. Для последующего состояния системы важно соотношение детерминированной и случайной составляющих в пространстве и времени (направление действия случайного возмущения в отношении к текущему состоянию системы).

Со временем вектор $\mathbf{x}(t)$ стремится выйти на аттрактор. Чтобы наглядно представить себе такой аттрактор, представим поверхность с возвышенностями и впадинами. Для описания динамики системы обычно используется физическая модель процесса в виде динамики шарика по этой поверхности (или траекторией движения изображающей точки, описывающей состояние системы в фазовом или конфигурационным пространстве).

Задание управляющих параметров $\mathbf{a}$ означает определенный выбор рельефа, по которому шарик может скатываться под действием силы тяжести. Задание вектора состояния $\mathbf{x}(t)$ в начальный момент времени означает, что шарик в начальный момент времени помещают в некоторую вполне определенную точку, например на склоне холма (рис. 1). Он скатывается оттуда, пока не достигает точки впадины, которая и является аттрактором в этом случае. У динамических систем могут быть аттракторы других типов, например предельные циклы, когда система совершает незатухающие колебания, или еще более сложные аттракторы, известные под названием хаотических аттракторов. При наличии флуктуации шарик может перепрыгивать из одного локального минимума поверхности в другой – с одного аттрактора на другой.

Равновесие может быть устойчивым, но если оно окружено неустойчивым циклом малой амплитуды, то весьма вероятно, что система будет демонстрировать в целом неустойчивое поведение. И наоборот, если положение равновесия неустойчиво, но оно окружено устойчивым циклом, то систему в целом можно считать устойчивой.

В соответствии с приведенными обобщениями состояний системы в зависимости от энергии, вещества и информации и представления динамики системы в виде движения изображающей точки по потенциальной поверхности можно ввести скалярную характеристику риска системы в виде потенциальной функции риска. Эта функция зависит от параметров системы, ее элементов и количества запасенной в системе энергии, вещества и информации. Эта зависимость является нелинейной и ее можно представить гиперповерхностью в фазовом или конфигурационном пространстве. Например, гиперповерхность в n-мерном конфигурационном пространстве может иметь локальные особенности, которые проявляются в наличии характерных точек – эллиптического, гиперболического и параболического типа [3]. Эти точки и их распределение в пространстве параметров определяют особенности динамики системы. В зависимости от того, насколько состояние системы в данный момент времени t находится близко к характерной точке, зависит ее последующее поведение и стратегия управления рисками в системе.

Изменение особенностей потенциальной функции связано с изменениями параметров системы со временем, а динамика изображающей точки с внутренними и внешними силами, действующими на систему. Переход из одной области гиперповерхности в другую область (с одного аттрактора на другой) может быть сопряжен с выбросом энергии, веществ или информации, что приводит к изменению состояния системы и соответственно величин рисков. Потенциальная функция риска также описывает свойства защищенности системы, которую можно представить в виде потенциального барьера, препятствующего изменению состояния системы.

Потенциальные поверхности (потенциальные функции риска) можно получить для вероятностей, ущербов или рисков в зависимости от целей анализа и особенности системы. Например, при функционировании системы меняется величина вероятности, а ущерб является константой для данного вида аварии или техногенной катастрофы, или наоборот динамика системы такова, что ведет к изменению возможных ущербов при постоянном значении вероятности. Если вероятность и ущерб претерпевают значительные изменения со временем t, то анализируется потенциальная поверхность риска.

В соответствии с представленной обобщенной системой определяющих соотношений (1) для анализа рисков техногенных катастроф можно рассмотреть потенциальную функцию риска $f(R_{Ч}, R_{Т}, R_{СР})$, представляющую собой поверхность в пространстве индивидуальных $R_{Ч}$, технических $R_{Т}$ рисков и рисков среды $R_{СР}$, связанных с человеком, средой и собственно с техническим объектом и зависящих от величин, накопленных в системе веществ $W(t)$, энергий $E(t)$ и информации $I(t)$. Состояние системы определяется положением точки на данной поверхности с соответствующими значениями рисков $R_{СР}$, $R_{Ч}$ и $R_{Т}$. Пример потенциальной поверхности $f(R_{Ч}, R_{Т})$ для рисков $R_{Ч}$ и $R_{Т}$ представлен на рис. 1, где указаны характерные точки. Динамика системы определяется соответствующим аттрактором на этой поверхности, вид которого зависит от топологических особенностей потенциальной поверхности. Переход системы с одного аттрактора на другой характеризуется вероятностью $P(t)$.

В случае управляемого перехода с одного аттрактора на другой требуются материальные затраты на преодоление препятствий (потенциальных барьеров), представленных в виде гиперболических (седловых) точек между локальными точками минимума данной поверхности. Переход через точки максимума потенциальной функции требует более значительных затрат и данная точка является неустойчивой, с которой движение в последующем может осуществляться в различном направлении. Гиперболическая (седловая) точка (рис. 1, точка I) определяет с большей вероятностью переход на новый уровень рисков (вероятности или ущербов) в направлении главной кривизны с отрицательной кривизной.

Характер распределения критических точек на потенциальной поверхности риска относительно точки состояния системы и изменения поверхности в ее окрестности определяют характер принимаемых решений по обеспечению безопасности в системе. Учет характерных точек и их пространственное расположение необходимы для реализации глобальной минимизации риска. Подобный анализ особенностей поверхностей используется в теории катастроф [4] и теории рисков [5].

Аттрактор может быть и состоянием покоя, т.е. неподвижной точкой, предельным циклом, тором или странным аттрактором. На рис. 1 представлены варианты (потенциальная функция $f(R_{Ч}, R_{Т})$, для изменения состояния системы из начальной точки (рис. 1, точка III) на разные аттракторы (рис. 1, траектории *1* и *2*), которые имеют различные значения рисков для притягивающих неподвижных точек. Эти два варианта отличаются средними уровнями риска для технического объекта $R_{Т}$, тогда как индивидуальный риск для оператора $R_{Ч}$ остается постоянным.

Представленная поверхность, расположение критических точек которой таково, что переход из одного положения в другое приводит к изменению только одной из величин рисков, другая остается неизменной. Переход через точку II локального максимума требует наибольших значений внешних воздействий. Представленная поверхность является динамическим аналогом дерева событий. В этом случае вероятность перехода с одной стадии аварии (аттрактора) на другую является функцией времени, состояния системы и случайных возмущений в системе.

Изменения значений риска связаны для разных объектов с циклами их функционирования, временем суток, временем года и т.д. Существующие колебания рисков имеют различный переход для разных технических объектов. Эти колебания, различные по своему периоду, накладываются на тренд, который связан обычно с изменением технического объекта с течением времени его эксплуатации, когда происходит накопление микротрещин и исчерпание ресурса объекта. При рассмотрении системы “человек–машина–среда” эти колебания и трендовые изменения характерны для всех составляющих данной системы. При этом существуют взаимосвязи, которые могут усиливать или гасить трендовые и частотные составляющие динамики характеристик систем, описывающих риски (вероятность и ущерб). Эти особенности также определяются топологией потенциальной поверхности, ориентацией ее главных кривизн относительно конфигурационного пространства. Ориентация потенциальной поверхности относительно осей конфигурационного пространства может быть различной. Со временем она может претерпевать изменения: меняются локальные главные кривизны поверхности в области локальных минимумов и их направления. Также может происходить дрейф характерных точек, меняться расстояния между ними и величина потенциальной функции в данной точке и т.д. Число характерных точек также может меняться – меняется число возможных устойчивых состояний или аттракторов. Эти изменения зависят от изменений параметров системы a.

Соседние локальные минимумы потенциальной поверхности отделены друг от друга гиперболическими (седловыми) точками, которые играют роль некоторого барьера для изменения состояния системы. Изменение параметров системы также ведет к изменению величины потенциальной функции в данной точке – величины потенциального барьера. Его увеличение ведет к снижению вероятности перехода системы в другое состояние, уменьшение ведет к повышению вероятности изменения состояния системы или усложнению аттрактора, появлению дополнительных частотных составляющих. В нелинейных системах, в дополнение к главным кривизнам поверхности, существуют еще дополнительные кривизны, которые значительно усложняют динамику системы [6].

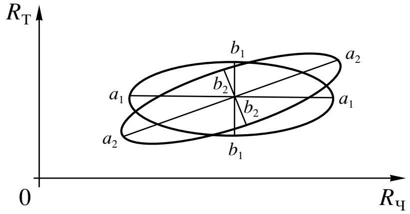

Рис. 2

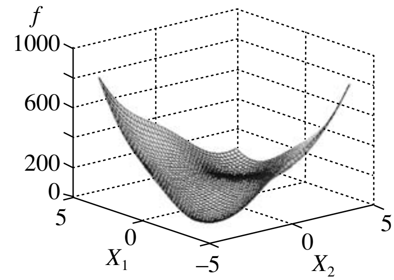

Рис. 3

Рис. 2. Связанность риска оператора $R_Ч$ и технического объекта $R_Т$

Рассмотрим геометрию поверхности вблизи локального минимума. На рис. 2 схематично представлено возможное расположение главных кривизн поверхности в области локального минимума потенциальной функции риска для линейной системы [7]. Главные кривизны *a–a* и *b–b* определяют характерные движения (в механике – собственные колебания). Направления этих кривизн в конфигурационном пространстве определяют связанность рисков, т.е. определяют характер динамики рисков: или независимые изменения по одной из координат (a_1–a_1 или b_1–b_1) или совместное их изменение (a_2–a_2, b_2–b_2). Если динамика системы определена и связана с главной кривизной (это a_2–a_2 или b_2–b_2), то риски коррелированны. В случае a_2–a_2 корреляция положительная, а b_2–b_2 отрицательная. Угол наклона главных кривизн относительно координат $R_Ч$ и $R_Т$ определяет степень корреляции этих рисков.

На рис. 3 приведен пример потенциальной поверхности $f(X_1, X_2)$, имеющей два локальных минимума. Возможно несколько вариантов траекторий динамики бистабильной системы, зависящих от начального состояния системы: – движение в зоне одного локального минимума потенциальной поверхности, периодические движения в области обоих минимумов и случайные движения в области обоих минимумов. Характер динамики системы зависит от величины запасенного в системе потенциала (в механике – энергия), который может быть больше величины потенциального барьера между локальными минимумами потенциальной поверхности или меньше.

Следует отметить, что приведенная на рис. 3 поверхность с двумя локальными минимумами и седловой точкой между ними получена трансформацией поверхности, приведенной на рис. 1, при изменении параметров системы *a*. Дальнейшим изменением параметров системы данную поверхность можно привести к поверхности с одной точкой минимума. В этом случае система устойчива к различным возмущениям и ее динамика происходит в близости данной локальной точки, переходов к другим режимам не существует. Если такая поверхность описывает систему и ее риски, то она со стабильным значением риска для технического объекта и человека. Например при наличии точек параболического типа (поверхность вблизи данной точки представляет собой желоб, в [5] – русло) система является неустойчивой при действии возмущения в направлении нулевой кривизны поверхности.

Рассмотрим две области потенциального минимума (точки *A* и *B*), отделенные точкой максимума (рис. 4). Вероятность перехода из одной области локального минимума зависит от величины потенциального барьера Δf и величины воздействия на систему $\mathbf{F}(t)$. Переход системы в область точки минимума *B* приводит к возникновению динамики системы, характеризуемой новым аттрактором.

Значения потенциальной функции $f(\mathbf{x}, \mathbf{a})$ в точках локального минимума характеризуются запасами в системе энергии, вещества и информации. В данном случае $f(A) > f(B)$. Вероятность аварии или катастрофы зависит от начального состояния системы и вероятности перехода на другой аттрактор $P(t) = P(AB|A)$.

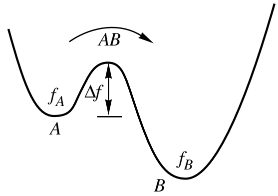

Рис. 4

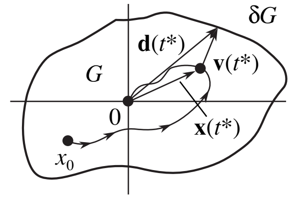

Рис. 5

Рис. 4. Локальные минимумы потенциальной функции (f_A, f_B) и потенциальный барьер Δf между ними
Рис. 5. Устойчивость системы S при возможных возмущениях $F(t)$

При развитии техногенной катастрофы может быть несколько переходов с аттрактора на аттрактор, которые зависят от предыстории и предыдущих переходов и их направлений. Дискретный аналог описания переходов (сценариев) и рисков – метод деревьев событий.

Сказанное свидетельствует о том, что возможность перехода на новый аттрактор определяется характеристиками системы S и классом допустимых возмущений. В качестве простейшей иллюстрации отметим, что если минимальное возмущение $|\mathbf{F}(t)| < \Delta f$ при всех t, то система S будет “поглощать” все возможные возмущения, т.е. S будет обладать устойчивостью по отношению к возмущениям такого класса. В противном случае та же система S не будет полностью незащищенной по отношению к данному классу возмущений.

Рассматривая риски, интересна оценка возможности системы сохранить неизменность аттрактора при воздействии возмущений. Начнем с анализа системы S, описываемой дифференциальными уравнениями (1), и предположим, что в отсутствие действия внешних возмущений началом координат является точка равновесия, т.е. потенциал $f(0, \mathbf{a}) = 0$ для всех a при $F(t) = 0$. Здесь $\mathbf{a}$ – вектор параметров системы. В свете представлений об устойчивости системы возникают следующие вопросы: а) при каких условиях функция $F(t)$, характеризующая возмущения, может привести к тому, чтобы система, положение которой описывается функцией $x(t)$, покинула область притяжения G начала координат (рис. 5); б) какие изменения параметров системы $\mathbf{a}$ приведут к такому искажению границы δG области G, чтобы положение системы оказалось сдвинутым в область аттрактора, отличного от аттрактора в начале координат.

При определении вероятности изменения вида аттрактора необходимо принимать во внимание величину и направление возмущающей силы $\mathbf{F}(t)$. В каждый момент времени t построим вектор, направленный от $\mathbf{x}(t)$ к точке на δG, ближайшей к $\mathbf{x}(t)$ (рис. 5). Вектор $\mathbf{v}(t)$ строится по известному вектору $\mathbf{x}(t)$, определяемому путем численного интегрирования, и вектору $\mathbf{d}(t)$, который известен, поскольку по начальному предположению граница δG известна. Таким образом $\mathbf{v}(t) = \mathbf{d}(t) - \mathbf{x}(t)$. Предположим, что функция $\mathbf{F}(t)$ соответствует возмущению в виде “импульса” в момент $t = t^*$, т.е. $\mathbf{F}(t) = \boldsymbol{\mu}\delta(t - t^*)$, где $\boldsymbol{\mu}$ – вектор, указывающий величину (потенциал $f_{\boldsymbol{\mu}}(\mathbf{x})$) и направление импульса. Тогда можно путем сравнения векторов $\boldsymbol{\mu}$ и $\mathbf{v}(t)$ определить, будет ли система выведена за пределы δG. Ответ на этот вопрос зависит от того, имеет ли вектор $\boldsymbol{\mu}$ достаточную величину потенциала и надлежащее направление с тем, чтобы вывести $\mathbf{x}(t)$ за границу δG.

Введем функцию m, характеризующую результат сравнения векторов $\boldsymbol{\mu}$ и $\mathbf{v}(t)$ по величине $m(t) = \|\boldsymbol{\mu}\| - \|\mathbf{v}(t)\|$ и функцию θ, характеризующую результат сравнения этих векторов по направлению $\cos\theta(t) = (\boldsymbol{\mu}, \mathbf{v}(t))(\|\boldsymbol{\mu}\| \cdot \|\mathbf{v}(t)\|)^{-1}$, где (,) означает скалярное произведение векторов, $\|\cdot\|$ – евклидову норму. При этом оказывается, что состояние системы S в момент времени t можно характеризовать следующим соотношением: высокая вероятность смены аттрактора при $m(t) \geq 0$ и $\cos\theta(t) \approx 1$; низкая вероятность смены аттрактора при $m(t) < 0$ и $\cos\theta(t) < 1$.

Другими словами, система S устойчива по отношению к импульсному возмущению $\boldsymbol{\mu}$ в момент времени t^*, если величина $\boldsymbol{\mu}$ очень мала или если возмущение $\boldsymbol{\mu}$ стремится увести $\mathbf{x}(t)$ от границы δG. Если же вектор $\boldsymbol{\mu}$ по величине больше $\mathbf{v}(t)$ и стремится подвести $\mathbf{x}(t)$ к границе δG, то можно говорить о низкой устойчивости системы S к возмущению $\mathbf{F}(t)$. Точное определение вероятности перехода с аттрактора на другой аттрактор требует учета величины потенциального барьера в направлении действия возмущения.

Непосредственное внешнее воздействие на состояние равновесия является одним из факторов, благодаря которому система может быть смещена из области одного аттрактора в область другого. Рассмотрим второй фактор, при действии которого система может быть сдвинута в область другого аттрактора. Таким фактором являются изменения в динамике системы, обусловленные изменением вектора параметров системы **a**. Примером таких изменений являются поверхности, представленные на рис. 1 и 2, которые относятся к одной динамической системе при различных параметрах системы **a**. При изменении параметров системы **a** происходит изменение топологических особенностей поверхности, что в свою очередь может приводить к изменению динамики системы. Эти изменения в динамике системы и ее безопасности могут происходить медленно или через бифуркацию.

Для оценки влияния динамики самой системы $\mathbf{x}(t)$ на возможные переходы можно использовать аппарат нелинейной динамики. Одной из особенностей переходов на другие аттракторы является неустойчивость каждой траектории, принадлежащей хаотическому аттрактору. Удачной количественной мерой этой неустойчивости оказались так называемые характеристические показатели Ляпунова (ляпуновские показатели). Они позволяют оценить: фрактальную размерность аттрактора; энтропию динамической системы; характерное время предсказуемости поведения системы.

Ляпуновские показатели – это одни из немногих характеристик, которые с довольно высокой точностью можно рассчитать по известным уравнениям движения. По ним можно многое сказать о динамической системе, о наблюдаемом режиме, о размерности аттрактора, если таковой имеется, и об энтропии динамической системы.

Притяжение к аттрактору требует, чтобы фазовые объемы больших размерностей сжимались. Это отражено в ляпуновском спектре. Исходя из сказанного, общим условием устойчивости системы является введение управляющих сил, ведущих к уменьшению фазового объема $\Gamma(\mathbf{x}(t))$ для рассматриваемой динамической системы.

Таким образом, управление рисками в динамической системе требует установления устойчивых режимов динамики и устойчивость системы к возможным возмущениям и изменениям ее параметров. При этом $Z(t)$ на данное управление были бы минимальными.

Стабилизацию хаотического поведения можно осуществить двумя способами. Первый обеспечивает выведение системы из хаотического на регулярный режим посредством внешних возмущений, реализованных без обратной связи. Другими словами, этот метод не учитывает текущее состояние динамических переменных системы. Другой метод реализуется вводом корректирующего воздействия в соответствии с требуемой динамикой переменных системы, используя обратную связь. Первый способ стабилизации хаотической динамики называется подавлением риска или контролированием (иногда управлением или регулированием) динамики системы без обратной связи. Второй носит название контролирование риска с обратной связью. Реализацию каждого из этих методов можно провести параметрическим или силовым способом, что соотносится с изложенными представлениями устойчивости динамических систем на действие внешних возмущений $\mathbf{F}(t)$ и изменение параметров системы **a**.

Исходя из сказанного, вероятность аварии или катастрофы $P(t)$ можно определить как ряд событий переходов с одного аттрактора на другой, возможных с определенной вероятностью. Эти события могут реализовываться при изменении параметров системы **a**, действии определенных возмущений $F(t)$ и зависеть от особенностей динамического поведения самой системы (аттрактора), т.е. риск аварии для технической системы является функцией от этих параметров $R(t) = f(\mathbf{x}(t), \mathbf{a}(t), \mathbf{F}(t))$.

Таким образом, представленный подход описания рисков в динамической постановке позволяет определить вероятность возникновения аварии или катастрофы из условия неустойчивости аттрактора и цепи переходов с одного аттрактора (состояния системы) на другой. При этом происходит увеличение величины вероятности возникновения аварии $P(t)$ от начальных значений до $P(t) = 1, 0$. Топологические особенности потенциальной поверхности риска (вероятности или ущерба) позволяют описывать переходы типа И/ИЛИ и представляют собой графическое обобщение динамических процессов, которые могут происходить в системе и вести к авариям и катастрофам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Могилевский В.Д.* Методология систем. М.: Экономика, 1999. 252 с.
2. *Абросимов Н.В.* и др. Безопасность России. Анализ риска и проблемы безопасности. Ч. 2. Безопасность гражданского и оборонного комплексов и управление рисками. М.: МГФ “Знание”, 2006. 751.
3. *Позняк Э.Г., Шикин Е.В.* Дифференциальная геометрия. М.: Изд-во МГУ, 1990. 384 с.
4. *Острековский В.А.* Анализ устойчивости и управляемости динамических систем методами теории катастроф. М.: Высшая школа, 2005. 326 с.
5. *Владимиров В.А., Воробьев Ю.Л., Салов С.С. и др.* Управление риском: риск, устойчивое развитие, синергетика. М.: Наука, 2000. 431 с.
6. *Ахметханов Р.С.* Особенности динамических взаимодействий в нелинейных системах // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2007. № 5. С. 14–21.
7. *Ахметханов Р.С.* Структурные особенности динамических взаимодействий в линейных системах // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2006. № 4. С. 18–26.

Москва Поступила в редакцию 28.IV.2008