ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Васюткина Д. И., аспирант,
Ветрова Ю. В., канд. техн. наук, доц.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ*

vs1606@mail.ru

В статье представлены результаты аналитического обзора существующих отечественных и зарубежных исследований в области обеспечения комплексной безопасности объектов. В результате исследований различных математических моделей состояния систем комплексной безопасности выявлено, что в математической постановке проблема сводиться к исследованию системы дифференциальных уравнений с нелинейными обратными связями: при анализе устойчивости этих систем часто используються степенные законы распределения вероятностей и одной из наиболее адекватных методов моделирования сложных систем представляют собой энтропийные подходы, в которых должен быть определен максимум энтропии сложной системы.

Ключевые слова: *моделирование, комплексная безопасность, риск, энтропия, устойчивость, оптимизация.*

Введение. При разработке математических основ и моделей оптимального управления риском использовалась концепция безопасности, предложенная в работах [1, 2] примененная для решения практических задач обеспечения комплексной безопасности в работах [3, 4].

Состояние безопасности любого объекта, в том числе образовательного учреждения, определяется их защищенностью от совокупности всевозможных опасностей природного, техногенного и социального характера. Эта совокупность не является результатом простого наложения опасностей как с точки зрения вероятностей проявления опасных факторов, так и с точки зрения их воздействия на человека, сферу его деятельности и обитания. Реализация одного из видов опасностей, как правило, вызывает цепную реакцию осуществления других видов опасностей, последствия которых можно оценить только с определенной вероятностью.

Только в рамках такого системного и вероятностного подхода может быть решена одна из основных задач обеспечения комплексной безопасности – задача оптимального распределения имеющихся ограниченных ресурсов, направленных на предотвращение тех или иных чрезвычайных ситуаций.

Проблеме математического моделирования состояния безопасности объектов различной природы в последнее время уделяется значительное внимание [5]. Системы обеспечения комплексной безопасности имеют обратные связи и их учет играет принципиальную роль в управлении рисками [6].

Методология. В процессе работы был исследован системный подход, охватывающий методы обобщения и анализа факторов риска, аналитические исследования, методы математического моделирования.

Основная часть. В математической постановке проблема сводится к исследованию системы дифференциальных уравнений с нелинейными обратными связями вида:

$$\frac{\partial}{\partial t} X_i(t) = F_i(X_1, X_2, \ldots, X_n; t),\ i = 1,2,\ldots,n, \tag{1}$$

где X_i – фазовые переменные, определяющие состояние рассматриваемого объекта в данный момент времени t.

В число фазовых переменных, характеризующих состояние безопасности ВУЗа, входят численность студентов, преподавателей и сотрудников, находящихся в ВУЗе в определенное время, число и характеристики источников потенциальной опасности, количественные и качественные характеристики сил и технических средств, направленных на предупреждение чрезвычайных ситуаций (ЧС) и минимизацию их последствий. Система уравнений (1) будет описывать поведение объекта в условиях ЧС, если известны правые части уравнений (1) с нелинейными обратными связями.

При анализе устойчивости систем комплексной безопасности часто используется приближение суммы одинаково распределенных независимых случайных величин с конечными средними и дисперсией. В этом случае, в соответствии с центральной предельной теоремой возникает нормальный закон распределения плотности вероятности:

$$f(x) \approx \exp\left(-\frac{(x-M)^2}{\sigma^2}\right). \quad (2)$$

Однако, анализ статистики, связанной с риском, показывает, что часто имеет место степенные законы распределения вероятностей:

$$f(x) \approx x^{-\alpha}, \ \ x >> 1, \ \ \alpha \approx 1. \quad (3)$$

Именно этот закон характеризует распределение числа землетрясений по их энергиям, зависимость числа пострадавших людей при наводнениях, статистику аварий на объектах атомной промышленности и т.д.

Во многих задачах, связанных с безопасностью, ключевое значение имеет прогнозирование [7]. Еще недавно считалось, что, имея математическую модель объекта и достаточно мощную вычислительную технику, можно сделать прогноз наступления и развития чрезвычайных ситуаций. Однако, нелинейная динамика показывает, что даже для сравнительно простых систем есть свои пределы предсказуемости или горизонт прогноза, заглянуть за который принципиально невозможно.

Перспективным направлением рискологии является применение вейвлет-анализа, как метода экспресс - диагностики и оперативного прогноза кризисного состояния.

Присутствие в системе положительных обратных связей всегда потенциально опасно и может служить причиной потери устойчивости управляемости. В частности, такими являются системы с изменяющимся запаздыванием, которые описываются уравнением вида:

$$\frac{dx}{dt} = F\big(x(t), \ \ x(t-\tau)\big), \quad (4)$$

где τ – запаздывание.

Простейшим примером модели с запаздыванием является уравнение Хатчинсона:

$$\frac{dx}{dt} = \alpha \ \ x(t)\cdot\big(1-x(t-\tau)\big). \quad (5)$$

Когда время запаздывания велико, это уравнение описывает редкие, периодически возникающие, гигантские всплески, которые можно интерпретировать как катастрофы. Таким образом, изменение времени запаздывания – один из путей дестабилизации сложных систем. Эффект запаздывания и связанное с ним рассогласование комплекса положительных и отрицательных обратных связей может возникать неявно в сложных системах, где процессы имеют существенно разные скорости, хотя формально запаздывание отсутствует.

При моделировании процессов, в которых активно действуют люди, полное математическое описание поведения отдельно взятого человека невозможно, поскольку его действия определяются очень большим количеством факторов, как рациональных, так и иррациональных [8]. Однако, поведение большой группы людей в стандартной ситуации хорошо описывается вероятностным образом на основе закона больших чисел. Поэтому при проектировании и прогнозировании зданий учебных заведений необходимо учитывать результаты моделирования беспорядочного движения большой неорганизованной группы людей – толпы в условиях паники и устранять особенности конструкций, которые могут привести к давке и заторам. Для построения математического описания поведения толпы людей используются модели клеточных автоматов.

Одной из наиболее адекватных методов моделирования сложных систем представляют собой энтропийные подходы, в которых должен быть определен максимум энтропии сложной системы [9]. Понятие энтропии до недавнего времени использовалось, в основном, для изучения физических систем. Однако, энтропия играет важную роль в исследовании самых различных по своей природе систем, в том числе систем обеспечения комплексной безопасности.

Рассмотрим случайную величину x, которая может принимать значения $x_1, x_2,\ldots, x_n$ с вероятностями $p_1, p_2,\ldots, p_n$, т.е. для случайной величины x существует дискретная функция распределения вероятностей $P(x_i)$ со значениями $p_1, p_2,\ldots, p_n$.

Возникает вопрос, каким образом можно количественно охарактеризовать связь между априорной информацией о случайной величине (например, ее средним значением, дисперсией и т.д.) и видом функции $P(x_i)$.

Интуитивные представления сводятся к тому, что более размытое распределение вероятностей связано с большей неопределенностью (с меньшей априорной информацией), чем распределение с явно выраженным пиком. Такая мера неопределенности была введена К. Шенноном в виде:

$$H(p_1, p_2,..., p_n) = -k\sum_i p_i \cdot \ln p_i, \quad (6)$$

где H - энтропия вероятностного распределения $P(x_i)$.

Если о случайной величине никакой дополнительной информации нет, то максимизация энтропии H при условии $\sum_i p = 1$ дает оптимальное распределение $P(x_i) = \frac{1}{n}$, что совпадает с качественными представлениями о неопределенности.

Общее правило для формирования математических моделей можно представить следующим образом: необходимо выделить переменные величины, определяющие изучаемую систему, выписать все известные ограничения на эти величины, после чего определить энтропию системы либо непосредственно, либо с помощью соответствующего распределения вероятностей. Затем следует оценить значения переменных, максимизирующих энтропию при принятых ограничениях. В качестве примера использования энтропийного подхода рассмотрим модель развития ЧС как процесса перехода системы обеспечения безопасности из устойчивого в неустойчивое состояние [9].

Рассмотрим энергию распределения элементов системы комплексной безопасности H. Процессы, происходящие в системе, будем описывать интенсивностью (скоростью) роста числа элементов системы λ, а также интенсивностью использования элементов ρ. Тогда уравнение, характеризующее состояние системы, можно записать в виде:

$$\frac{dH}{dt} = (\lambda - \beta)H, \qquad (7)$$

где β – параметр, характеризующий управление процессом формирования структуры системы.

Структура системы поддерживается и развивается благодаря ее взаимодействию с внешней средой:

$$\beta = \rho H. \qquad (8)$$

Подставив выражение (8) в уравнение (7), получим нелинейное дифференциальное уравнение, которое можно рассматривать как математическую модель процесса развития системы безопасности:

$$\frac{dH}{dt} = \lambda H - \rho H^2 \qquad (9)$$

Решение уравнения (9) имеет вид:

$$H = \frac{\lambda}{\rho} \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{\lambda}{\rho H_\tau}\right) e^{-\lambda(t-\tau)}} \qquad (10)$$

где H_τ – значение энтропии в некоторый начальный момент τ.

С течением времени ($t \to \infty$) энтропия системы не возрастает неограниченно, а стремится к предельному значению λ.

Точки возможного экстремума (стационарные точки) определяются из условия:

$$\frac{dH}{dt} = H(\lambda - \rho H) = 0. \qquad (11)$$

Одна из таких точек соответствует нулевой энтропии, а остальные являются корнями уравнения:

$$\lambda - \rho H = 0, \qquad (12)$$

где параметры λ и ρ в общем случае зависят от времени.

Если зависимость $f(H) = \lambda - \rho H$ монотонная, то существует одна нетривиальная стационарная точка:

$$H = \lambda/\rho. \qquad (13)$$

Если зависимость $f(H)$ немонотонная, то возможно существование и других нестационарных точек.

Устойчивость работы системы безопасности определяется реакцией системы на малые возмущения ΔH, накладываемые на систему, которая находится в стационарной точке H_0. реакцию системы можно исследовать методом фазовых диаграмм. Области устойчивости системы определяются с помощью прямого метода Ляпунова.

Утрата работоспособности (гибель) системы безопасности может произойти в двух случаях:

1) случайные или целенаправленные воздействия внешней среды приводят к гибели отдельных элементов системы, в результате чего система уже не может выполнять заданные функции;

2) в системе не используется информация о взаимодействии отдельных элементов системы с внешней средой, в результате чего нарушаются связи системы с внешней средой, перестают действовать регулирующие механизмы, что приводит к дезорганизации системы и ее гибели.

Эти режимы работы системы безопасности, а также условия остановки ее разрушения могут быть исследованы на основе рассматриваемой выше энтропийной математической модели системы обеспечения безопасности.

При разработке комплексных систем безопасности важно улучшение не одного, а всех её параметров. Задача оптимизации в этом случае является задачей многокритериальной (векторной). Целью многокритериальной оптимизации является выбор одного из множества реально возможных вариантов построения системы, удовлетворяющего установленным ограничениям .

Так как проектируемая комплексная система безопасности состоит из нескольких взаимосвязанных систем, оптимальность всей системы определяется эффективностью его отдельных подсистем, каждая из которых может быть охарактеризована, по крайней мере, хотя бы одним частным критерием оптимальности $Q_i(\vec{x})$. Функционирование всей системы можно считать оптимальным, если за счет выбора управляющих параметров обеспечиваются экстремальные значения всех частных критериев оптимальности. В этом случае оптимизацию производят по нескольким частным критериям $Q_i(\vec{x})(i=1,\ 2,\ \dots,\ s)$. Многокритериальная оптимизация представляет собой попытку получить наилучшее значение для некоторого множества характеристик рассматриваемого объекта, т.е. найти некоторый компромисс между теми частными критериями $Q_i(\vec{x})(i=1,\ 2,\ \dots,\ s)$, по которым требуется оптимизировать решение.

Постановку задачи можно представить следующим образом:

$$\begin{cases} Q_1(\vec{x}) \to \min\ (\max), \\ Q_2(\vec{x}) \to \min\ (\max), \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots, \\ Q_s(\vec{x}) \to \min\ (\max), \\ g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \le b_1, \\ g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \le b_2, \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots, \\ g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \le b_m, \\ d_j \le x_j \le D_j,\ \ j = 1, 2, \dots, n. \end{cases} \qquad (14)$$

где D_j и d_j – граничные условия; $g_i(x)$ – левые части ограничений, b_i – правые части ограничений.

Вывод: Применение современных информационных технологий позволяет внедрить в практику проектирования математические методы поиска оптимальных решений, что сокращает сроки разработки систем и уменьшает количество их испытаний.

** Работа выполнена в рамках программы стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова на 2012 – 2016 годы.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воробьев Ю.Л. Основы формирования и реализации государственной политики в области снижения рисков чрезвычайных ситуаций. М.: ФИД «Деловой экспресс», 2000. 248с.

2. Шаптала В.Г., Радоуцкий В.Ю., Шульженко В.Н. Концепция обеспечения безопасности высших учебных заведений // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2009. №3. С.127 - 129.

3. Шаптала В.Г., Радоуцкий В.Ю., Шульженко В.Н., Ветрова Ю.В. - Основные положения обеспечения безопасности учреждений высшего профессионального образования // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2010. № 3. С. 186-187.

4. Радоуцкий В.Ю., Шаптала В.Г., Шульженко В.Н., Добровольский В.С., Овечкин А.Н. Комплексная безопасность высших учебных заведений: монография. Петербург: Изд – во «Инфо - да», 2008. 120с.

5. Акимов В.А., Кузьмин И.И. Управление рисками катастроф как необходимое условие развития России // Управление риском. 1997. №3. С. 11-21.

6. Радоуцкий В.Ю., Шаптала В.В., Ветрова Ю.В., Шаптала В.Г. Оценка риска чрезвычайных ситуаций природного, техногенного характера и пожаров: уч. пос. Белгород: Изд-во БГТУ, 2011. 116 с.

7. Радоуцкий В.Ю., Шаптала В.В.Шаптала В.Г. Моделирование опасных факторов пожара, чрезвычайных и кризисных ситуаций: монография. Белгород: ООО«ЕвроПолиграф», 2011. – 171 с.

8. Радоуцкий В.Ю., Шаптала В.Г. – Методологические основы моделирования систем обеспечения комплексной безопасностью вузов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2008. № 3. С. 64-66.

9. А.Дж. Вилсон. Энтропийные методы моделирования сложных систем М.: Наука, 1978. 248 с.