Прус М.Ю.

Стохастическое моделирование каскадных сценариев развития аварий и катастроф

Аннотация: Построена общая стохастическая модель, описывающая динамику возникновения и развития аварий и катастроф техногенного и природного происхождения по каскадному сценарию с ветвящейся структурой. Приведены нестационарные решения уравнений Колмогорова-Чепмена, с заданием интенсивностей переходов трехпараметрическим распределением Вейбулла.

Ключевые слова: моделирование техногенных аварий, каскадное развитие аварии, распределение Вейбулла

Возникновение и развитие аварий и катастроф как техногенного, так и природного происхождения, наиболее часто происходит по определенным типам каскадных сценариев, в которых аварии и/или отказы одних элементов порождают отказы и/или аварии других элементов в рамках одной системы, либо нескольких взаимодействующих систем [1-4]. Возможные неблагоприятные сценарии развития ситуации по так называемому «принципу домино» обусловлены реализацией поэтапных переходов к критическим состояниям с нарастанием степени потенциальной опасности, либо сопровождаются усилением неблагоприятных факторов и явлений.

В ходе развития реальных аварийных либо опасных природных процессов, как правило, возникают и исчезают так называемые «окна возможностей» – временные интервалы, в течение которых может быть оказано существенное влияние на динамику событий и общий исход в результате комплекса своевременных целенаправленных воздействий. Основные цели исследования динамики различных аварий и катастроф состоят в выявлении закономерностей, способствующих определению характера и момента наиболее эффективного воздействия на объекты и процессы со стороны имеющихся систем обеспечения безопасности.

При своевременном реагировании оперативных и аварийно-спасательных подразделений служб экстренного реагирования появляется возможность торможения процессов развития событий по неблагоприятному сценарию и дальнейшего снижения степени опасности вплоть до ликвидации угроз и негативных последствий инцидента. Поэтому перспективным направлением развития систем информационно-аналитического обеспечения и поддержки управления оперативным реагированием на инциденты представляется построение превентивных и рискориентированных алгоритмов реагирования, генерируемых на основе математического моделирования динамики наиболее вероятных сценариев при производственных авариях, катастрофах и стихийных бедствиях.

Математические модели и алгоритмы, предназначенные для информационно-аналитического обеспечения и решения задач поддержки управления при оперативном реагировании на инциденты и аварии, должны обладать свойствами адекватности и адаптивности, понимаемыми соответственно как совпадение модели и моделируемой системы в отношении цели моделирования, а также как способности модели изменять структуру и параметры в соответствии с изменением состояния системы.

Приведем основные гипотезы, допущения и ограничения, принимаемые при построении предлагаемой стохастической модели техногенных аварий и катастроф.

Первая гипотеза, которая лежит в основе моделирования, заключается в предположении о каскадном характере развития инцидентов, заключающемся в возможности реализации ряда неблагоприятных сценариев вследствие возникновения инициирующего события (аварийной ситуации). При этом возможно разделение любой реализующейся последовательности событий по этапам, характеризующимся определенной длительностью развития, степенями текущей опасности состояний системы и возможностями дальнейшего перехода к критическим состояниям последующих уровней с возрастанием степени опасности и/или усилением проявления неблагоприятных факторов.

В общем случае на развитие инцидентов влияет вся предыстория событий, т.е. переходы между состояниями могут зависеть не только от предыдущего, но и от ряда предшествующих состояний, и формально описываются моделью, относящейся к классу немарковских случайных процессов. Вместе с тем, при моделировании многие немарковские процессы удается трансформировать за счет расширения числа состояний в марковские случайные процессы. Основное допущение связано с возможностью описания наблюдаемой динамики реальных систем в рамках модели марковских процессов с дискретными состояниями и непрерывным временем на основе уравнений Колмогорова-Чепмена.

Вторая гипотеза связана с предположением о древовидной структуре наблюдаемой последовательности событий с ветвлением при переходах на последующие уровни. Соответствующие возможные реализации последовательности элементарных событий отражаются как совокупности переходов между состояниями моделируемой системы, представленных множеством вершин размеченного стратифицированного графа. Представление отображает иерархическую структуру состояний, разграничивая этапы последовательности событий в соответствии с динамикой развития аварийной ситуации и выделением страт различных уровней, включающих наборы близких по степени опасности состояний.

В основе третьей гипотезы лежит эмпирически оправданное предположение о значительных отличиях в наблюдаемой динамике на различных этапах развития аварийной ситуации. По мере развития событий и возрастании угроз на последующих уровнях происходит качественное изменение динамики переходов между принадлежащими к смежным стратам возможными состояниями системы.

Еще одно предположение связано с подбором подходящих законов для адекватного описания временной зависимости интенсивности переходов между состояниями, с учетом определенных этапов развития аварийной ситуации. Представляется обоснованным использование трехпараметрических распределений Вейбулла, позволяющих быстро и легко из анализа статистических данных либо с помощью экспертных методов осуществлять подбор необходимых параметров, при которых достигается достаточно точное соответствие изменения интенсивностей переходов между состояниями и наблюдаемой динамикой развития аварийных ситуаций и катастроф.

В качестве иллюстративного примера далее рассмотрим систему «потенциально опасный объект – инциденты» (ПОО-И), представленную размеченным стратифицированным графом на рисунке 1. Каждый из возможных сценариев после возникновения инцидента рассматривается как композиция последовательности произошедших событий, относящихся к стратам: N-нормальное состояние (Normal); A – авария (accident) (включает некоторые события C, O, а также их комбинации); F – пожар (Fire); E – взрыв (Explosion).

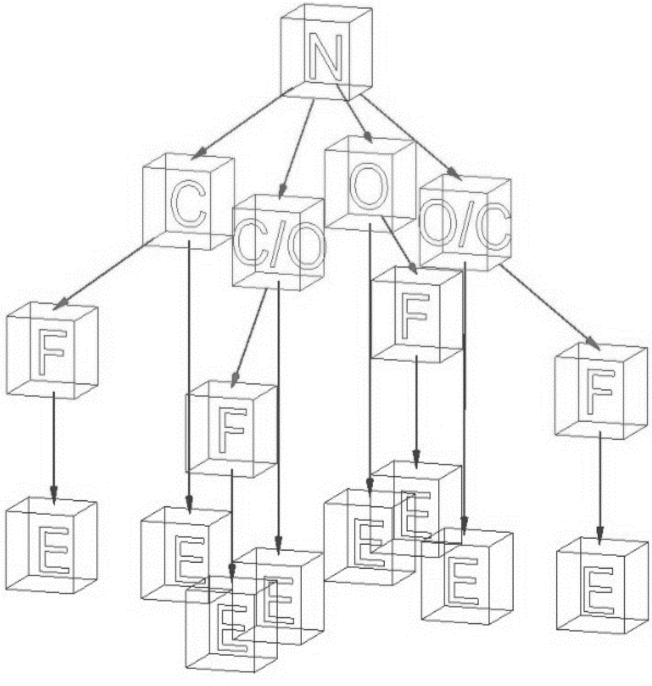

Рисунок 1 – Стратифицированный граф состояний системы «потенциально опасный объект – инциденты»

Моделирование переходов между возможными состояниями при возникновении инцидентов проводится на основе решения системы дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена:

$$
\begin{cases}
\dfrac{dP_N}{dt} = -\,P_N(\lambda_C + \lambda_O + \lambda_{CO} + \lambda_{OC}) \\
\dfrac{dP_O}{dt} = P_N\,\lambda_C - P_C(\lambda_{F/C} + \lambda_{E/C}) \\
\dfrac{dP_O}{dt} = P_N\,\lambda_O - P_O(\lambda_{F/O} + \lambda_{E/O}) \\
\dfrac{dP_{CO}}{dt} = P_N\lambda_{CO} - P_{CO}(\lambda_{F/CO} + \lambda_{E/CO}) \\
\dfrac{dP_{OC}}{dt} = P_N\lambda_{OC} - P_{OC}(\lambda_{F/OC} + \lambda_{E/OC}) \\
\dfrac{dP_{F/C}}{dt} = P_C\lambda_{F/C} - P_{F/C}\lambda_{E/F/C} \\
\dfrac{dP_{F/O}}{dt} = P_O\lambda_{F/O} - P_{F/O}\lambda_{E/F/O} \\
\dfrac{dP_{F/CO}}{dt} = P_{CO}\lambda_{F/CO} - P_{F/CO}\lambda_{E/F/CO} \\
\dfrac{dP_{F/OC}}{dt} = P_{OC}\lambda_{F/OC} - P_{F/OC}\lambda_{E/F/OC} \\
\dfrac{dP_E}{dt} = \dfrac{dP_{E/C}}{dt} + \dfrac{dP_{E/O}}{dt} + \dfrac{dP_{E/CO}}{dt} + \dfrac{dP_{E/OC}}{dt} + \\
+ \dfrac{dP_{E/F/C}}{dt} + \dfrac{dP_{E/F/O}}{dt} + \dfrac{dP_{E/F/CO}}{dt} + \dfrac{dP_{E/F/OC}}{dt} = \\
= P_C\lambda_{E/C} + P_O\lambda_{E/O} + P_O\lambda_{E/CO} + P_{OC}\lambda_{E/OC} + \\
+ P_{F/C}\lambda_{E/F/C} + P_{F/O}\lambda_{E/F/O} + P_{F/CO}\lambda_{E/F/CO} + P_{F/OC}\lambda_{E/F/OC}
\end{cases}
\qquad (1)
$$

Для задания временной зависимости интенсивности переходов между состояниями системы применяется трехпараметрическое распределение Вейбулла. Интенсивности переходов между состояниями, принадлежащим смежным уровням, описываются соответствующими распределениями, полностью задаваемыми коэффициентами масштаба, формы и сдвига:

$$
\begin{cases}
\lambda_C = \dfrac{1}{\eta_C}, \quad \lambda_O = \dfrac{1}{\eta_O}, \quad \lambda_{CO} = \dfrac{1}{\eta_{CO}}, \quad \lambda_{OC} = \dfrac{1}{\eta_{OC}}, \\
\lambda_{F/C} = \beta_{F/C} \dfrac{\left(t-\theta_{F/C}\right)^{\beta_{F/C}-1}}{\eta_{F/C}^{\beta_{F/C}}}, \\
\lambda_{F/O} = \beta_{F/O} \dfrac{\left(t-\theta_{F/O}\right)^{\beta_{F/O}-1}}{\eta_{F/O}^{\beta_{F/O}}}, \\
\lambda_{F/CO} = \beta_{F/CO} \dfrac{\left(t-\theta_{F/CO}\right)^{\beta_{F/CO}-1}}{\eta_{F/CO}^{\beta_{F/CO}}}, \\
\lambda_{F/OC} = \beta_{F/OC} \dfrac{\left(t-\theta_{F/OC}\right)^{\beta_{F/OC}-1}}{\eta_{F/OC}^{\beta_{F/OC}}}, \\
\lambda_{E/C} = \beta_{E/C} \dfrac{\left(t-\theta_{E/C}\right)^{\beta_{E/C}-1}}{\eta_{E/C}^{\beta_{E/C}}}, \\
\lambda_{E/O} = \beta_{E/O} \dfrac{\left(t-\theta_{E/O}\right)^{\beta_{E/O}-1}}{\eta_{E/O}^{\beta_{E/O}}}, \\
\lambda_{E/CO} = \beta_{E/CO} \dfrac{\left(t-\theta_{E/CO}\right)^{\beta_{E/CO}-1}}{\eta_{E/CO}^{\beta_{E/CO}}}, \\
\lambda_{E/OC} = \beta_{E/OC} \dfrac{\left(t-\theta_{E/OC}\right)^{\beta_{E/OC}-1}}{\eta_{E/OC}^{\beta_{E/OC}}}, \\
\lambda_{E/F/C} = \beta_{E/F/C} \dfrac{\left(t-\theta_{E/F/C}\right)^{\beta_{E/F/C}-1}}{\eta_{E/F/C}^{\beta_{E/F/C}}}, \\
\lambda_{E/F/O} = \beta_{E/F/O} \dfrac{\left(t-\theta_{E/F/O}\right)^{\beta_{E/F/O}-1}}{\eta_{E/F/O}^{\beta_{E/F/O}}}, \\
\lambda_{E/F/CO} = \beta_{E/F/CO} \dfrac{\left(t-\theta_{E/F/CO}\right)^{\beta_{E/F/CO}-1}}{\eta_{E/F/CO}^{\beta_{E/F/CO}}}, \\
\lambda_{E/F/OC} = \beta_{E/F/OC} \dfrac{\left(t-\theta_{E/F/OC}\right)^{\beta_{E/F/OC}-1}}{\eta_{E/F/OC}^{\beta_{E/F/OC}}}
\end{cases}
\tag{2}
$$

$$
\begin{cases}
\lambda_C = \dfrac{1}{\eta_C}, \quad \lambda_O = \dfrac{1}{\eta_O}, \quad \lambda_{CO} = \dfrac{1}{\eta_{CO}}, \quad \lambda_{OC} = \dfrac{1}{\eta_{OC}}, \\
\lambda_{F/C} = \beta_{F/C} \dfrac{\left(t - \theta_{F/C}\right)^{\beta_{F/C-1}}}{\eta_{F/C}^{\beta_{F/C}}}, \\
\lambda_{F/O} = \beta_{F/O} \dfrac{\left(t - \theta_{F/O}\right)^{\beta_{F/O-1}}}{\eta_{F/O}^{\beta_{F/O}}}, \\
\lambda_{F/CO} = \beta_{F/CO} \dfrac{\left(t - \theta_{F/CO}\right)^{\beta_{F/CO-1}}}{\eta_{F/CO}^{\beta_{F/CO}}}, \\
\lambda_{F/OC} = \beta_{F/OC} \dfrac{\left(t - \theta_{F/OC}\right)^{\beta_{F/OC-1}}}{\eta_{F/OC}^{\beta_{F/OC}}}, \\
\lambda_{E/C} = \beta_{E/C} \dfrac{\left(t - \theta_{E/C}\right)^{\beta_{E/C-1}}}{\eta_{E/C}^{\beta_{E/C}}}, \\
\lambda_{E/O} = \beta_{E/O} \dfrac{\left(t - \theta_{E/O}\right)^{\beta_{E/O-1}}}{\eta_{E/O}^{\beta_{E/O}}}, \\
\lambda_{E/CO} = \beta_{E/CO} \dfrac{\left(t - \theta_{E/CO}\right)^{\beta_{E/CO-1}}}{\eta_{E/CO}^{\beta_{E/CO}}}, \\
\lambda_{E/OC} = \beta_{E/OC} \dfrac{\left(t - \theta_{E/OC}\right)^{\beta_{E/OC-1}}}{\eta_{E/OC}^{\beta_{E/OC}}}, \\
\lambda_{E/F/C} = \beta_{E/F/C} \dfrac{\left(t - \theta_{E/F/C}\right)^{\beta_{E/F/C-1}}}{\eta_{E/F/C}^{\beta_{E/F/C}}}, \\
\lambda_{E/F/O} = \beta_{E/F/O} \dfrac{\left(t - \theta_{E/F/O}\right)^{\beta_{E/F/O-1}}}{\eta_{E/F/O}^{\beta_{E/F/O}}}, \\
\lambda_{E/F/CO} = \beta_{E/F/CO} \dfrac{\left(t - \theta_{E/F/CO}\right)^{\beta_{E/F/CO-1}}}{\eta_{E/F/CO}^{\beta_{E/F/CO}}}, \\
\lambda_{E/F/OC} = \beta_{E/F/OC} \dfrac{\left(t - \theta_{E/F/OC}\right)^{\beta_{E/F/OC-1}}}{\eta_{E/F/OC}^{\beta_{E/F/OC}}}
\end{cases}
$$

где коэффициенты: η_*, θ_*, β_* определяют масштаб, сдвиг и форму распределений изменения интенсивности λ_* переходов между состояниями (обозначены нижними индексами).

Рассмотрим основные этапы развития аварий и катастроф в рамках предлагаемой каскадной модели. Первый этап обусловлен переходом в результате возникновения инцидента из состояния «норма» в одно из состояний, соответствующих агрегированному состоянию «авария». Спонтанное формирование некоторого потенциально опасного аварийного состояния системы достаточно точно может быть описано в приближении однородного пуассоновского процесса.

Дальнейшее развитие событий в соответствии с одним из неблагоприятных сценариев связано со вторым этапом, представляющим обусловленный нарушением нормального функционирования системы переход из потенциально опасного аварийного состояния к одному из критических состояний следующего уровня. Возможен некоторый временной сдвиг при перераспределении элементов системы либо трансформации запасенной энергии. При этом формируются предпосылки возникновения с нарастающей по времени интенсивностью переходов к последующим критическим состояниям следующего уровня опасности, для которого характерны процессы неконтролируемой диссипации запасенной энергии.

Переход к третьему этапу может произойти в ходе дальнейшей трансформации системы и связан с возникновением критического события, характеризующегося резким выделением значительной доли запасенной энергии, приводящим к разрушению основных элементов системы, а также воздействию опасных факторов на находящихся в зоне поражения людей и иные объекты. Также возможен некоторый временной сдвиг, обусловленный изменением элементов системы и дальнейшей трансформацией энергии системы.

В качестве четвертого этапа развития событий в системе рассматриваются последующие состояния, связанные с возникновением и дальнейшим развитием чрезвычайной ситуации соответствующего масштаба.

Опыт моделирования динамики развития опасных событий при инцидентах, основанных на получении отдельных локальных решений системы дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена (1) с заданными распределениями Вейбулла (2), описывающих переходы между принадлежащим к смежными этапам состояниями системы позволяет сделать следующие выводы:

1. Марковская модель с представлением набора возможных элементарных состояний в виде стратифицированного графа позволяет выделять возможные сценарии развития последовательности событий при возникновении различных инцидентов.

2. Применение трехпараметрического распределения Вейбулла достаточно адекватно описывает динамику интенсивностей переходов между элементарными состояниями.

3. Полученные для избранного сценария локальные решения систем уравнений Колмогорова-Чепмена позволяют проводить численное моделирование и анализ динамики рисков возникновения и развития аварийных и критических состояний.

4. Своевременное реагирование оперативных и аварийно-спасательных подразделений служб экстренного реагирования в течение определенного «окна возможностей» приводит к торможению процессов развития событий по неблагоприятному сценарию и дальнейшему снижению степени опасности вплоть до устранения угроз и ликвидации негативных последствий инцидента.

Литература:

1. *Синицын В.В., Татаринов В.В., Прус Ю.В., Кирсанов А.А.* Совершенствование процессов управления в системе обеспечения безопасности автомобильных перевозок опасных грузов // Технологии техносферной безопасности. – 2019. – № 1(83). – С. 50-60.

2. *Синицын В.В., Татаринов В.В., Прус Ю.В., Кирсанов А.А.* Моделирование системы поддержки принятия управленческих решений при ликвидации автомобильных аварий с опасным грузом // Технологии техносферной безопасности. – 2019. – № 2 (84). – С. 84-90.

3. *Кирсанов А.А., Прус М.Ю., Туниеков Д.С.* Системы информирования об автомобильной аварии с опасным грузом / Материалы XXVII международной конференции «Проблемы

управления безопасностью сложных систем» (ПУБСС-2019) (18 декабря 2019 г. Москва). – М.: ИПУ РАН, 2019. – С. 372-377.

4. *Kirsanov A.A., Tatarinov V.V., Prus Y.V.* Decision support software for chemical accident elimination management // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2019. – V. 2195. № 1. – P. 020076.

Мистров Л.Е., Головченко Е.В.

Основы моделирования мероприятий информационной безопасности для обеспечения конфликтной устойчивости функционирования социально-экономических организаций

Аннотация: Предлагаются основы математического моделирования мероприятий информационной безопасности для обеспечения конфликтной устойчивости авиационных социально-экономических организаций на основе критерия «эффективность-стоимость». Основы базируются на методах теорий многоуровневых иерархических систем, теории игр, гомотопическом методе исследования нелинейных оптимизационных задач с экстремальными переменными и методе Гаусса-Зейделя.

Ключевые слова: социально-экономическая организация, конкуренция, конфликтная устойчивость, многошаговая биматричная игра, математическое моделирование

Авиационные перевозки являются одним из самых развивающихся отраслей экономики. Функционирование авиационных предприятий гражданской авиации характеризуется широкой географией, значительным спектром предоставляемых услуг и одновременно жесткими требованиями по обеспечению авиационной безопасности. Все это существенно ужесточается в условиях конкуренции. В связи с чем, проблемным вопросом является необходимость обеспечения конфликтной устойчивости (КУ) функционирования таких авиационных социально-экономических организаций (СЭО), каковыми и являются авиационные предприятия (АП). При этом особую актуальность приобретают вопросы математического моделирования технико-экономического обоснования мероприятий информационной