

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ КОМБИНАЦИЙ ПАРАМЕТРОВ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Резчиков А.Ф., Дранко О.И.,

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия

rw4cy@mail.ru, drankooi@ipu.ru

Богомолов А.С., Кушников В.А., Косицын А.А.,

Саратовский научный центр РАН, Саратов, Россия

bogomolov@iptmuran.ru, kushnikoff@yandex.ru, kositzyn@gmail.com

Урумбаева Р.Н.

ООО НПО "Эксперт24", Саратов, Россия

urumbaeva@gmail.com

Аннотация. Предложен аналитический подход к определению критических комбинаций параметров, позволяющих улучшить состояние сложной системы. Состав параметров и их значения определяются путем решения задачи улучшения показателя качества. Результаты предназначены для определения мер улучшения прогнозов развития и повышения вероятности благоприятных состояний сложных систем.

Ключевые слова: математическая модель, критические сочетания событий, авария, аварийные комбинации событий.

Введение

Сегодня используется широкий инструментарий математических моделей, алгоритмов для диагностирования и предупреждения отказов и ошибок в системах различного масштаба и различной природы. Тем не менее, серьёзные нарушения их функционирования вызывают аварии, катастрофы и наносят долговременный ущерб. Часто такие нарушения объясняются стечением обстоятельств: дефектов техники, программ и человеческих ошибок в определенном порядке и на определенном отрезке времени. Такие стечения приводят к синергетическому эффекту, более сильному, чем эффекты этих событий по отдельности.

Проблема множественных отказов широко рассматривалась в исследованиях по теории надежности [1–2]. Определены в стандартах методы анализа логических деревьев отказов (FTA, Fault Tree Analysis) и событий (ETA, Event Tree Analysis), анализа видов и критичности отказов (FME(C)A, Failure Modes Effects (and Criticality)), анализа работоспособности системы (HAZOP, Hazard and Operability Studies) и анализа структурных схем надежности (RBD, Reliability Block Diagram).

При исследованиях нарушений функционирования сложных систем и определении методов предупреждения таких нарушений получено множество значимых результатов в технической области [3–4] и в области анализа действий людей [5–7]. Достаточно широко исследуется «эффект домино» [8–10]. Для случаев опасных производств и природных катаклизмов эффекты развития аварий исследовались методами анализа риска [11–13]. Влияние вероятностей отдельных событий на вероятность сложной аварии исследовалось с использованием аппарата булева дифференциального исчисления [14–16]. Для анализа взаимного влияния событий развит аппарат интегрированных оценок надежности мультикомпонентных систем [17–18]. При этом анализ возможного совокупного эффекта разнородных неблагоприятных событий осуществляется в основном на этапах проектирования систем.

В работе [19] для объяснения основной причины техногенных и организационных аварий в условиях, когда по отдельности составляющие события не несли серьезной угрозы и могли быть успешно парированы, была введена формулировка «критические сочетания событий». Исследования в этом направлении учитывали события различной природы (включая человеческий фактор), события внешней среды, взаимодействие событий в сложных системах, и были направлены на решение следующих основных задач:

- определение состава и порядка реализации событий, при котором возможен синергетический результат – развитие критической комбинации;
- определение комплексов мероприятий по предупреждению развития критических ситуаций. Либо наоборот – подталкивания к таким ситуациям, если они способствуют достижению положительной цели. Причем соответствующие мероприятия должны определяться в любой точке развития событий, а не только при проектировании системы;

- модели и алгоритмы для выделения признаков, прекурсоров, по которым можно определить развитие критических комбинаций на достаточно ранних этапах, когда возможно применить имеющиеся ресурсы для парирования или стимулирования развития критической комбинации.

В дальнейшем анализе критических сочетаний был посвящен цикл работ для авиационных транспортных систем [20–21]. Позже полученные результаты распространялись и на другие сложные системы различного назначения и масштаба [23].

В 2024 году Российская Академия Наук обновила списки приоритетных ожидаемых результатов научных исследований. В области технических наук, в теории и технологии управления сложными системами предписывается разработка теорий, методов и технологий, обеспечивающих требуемые качества функционирования сложных систем управления «в условиях возникновения критических сочетаний событий, приводящих к отказам, авариям и катастрофам». Таким образом, мы полагаем, что разработка моделей и методов анализа критических сочетаний событий актуальна, важна и обусловлена. Далее мы будем использовать позднее введенный термин «критические комбинации событий» (ККС), поскольку критические комбинации могут приводить не только к авариям, но и к позитивным переменам, росту, достижению цели системы. Кроме того, речь в статье пойдет о критических комбинациях параметров, так как конкретным представлением событий, как мы полагаем, можно считать достижение определенными параметрами системы или среды некоторых значений или множеств значений. Представим основную формальную постановку задачи предупреждения критических комбинаций событий.

1. Постановка задачи

Допустим, $\bar{A} = \{A_1, \dots, A_n\}$ – множество ситуаций, вызываемых критическими комбинациями событий в системе Σ на отрезке времени $[t_n, t_k]$, $P(A, t)$ – вероятность возникновения ситуации A из этого множества. Пусть также $s(t)$, $x(t)$ – состояние системы Σ и ее внешней среды, $u(t)$ – управляющие воздействия на систему в момент t . Требуется определить управляющие воздействия $u(t_1), \dots, u(t_k)$ на отрезке $[t_n, t_k]$, при которых для всех $t \in [t_n, t_k]$ справедливо

$$P(A_i, t) < \varepsilon, i = 1, \dots, n, \quad (1)$$

где ε – заданное число, и выполняются граничные условия

$$C_n(s(t_n), x(t_n), u(t_n), t_n) = 0, \quad (2)$$

$$C_k(s(t_k), x(t_k), u(t_k), t_k) = 0, \quad (3)$$

где $C_n(s(t_n), x(t_n), u(t_n), t_n)$, $C_k(s(t_k), x(t_k), u(t_k), t_k)$ – заданные функции, и ограничения

$$D_1(t) \leq D(s(t), x(t), u(t), t) \leq D_2(t), \quad (4)$$

связанные с целями и нормативами функционирования системы, где $D(s(t), x(t), u(t), t)$, $D_1(t)$, $D_2(t)$ – заданные на $[t_n, t_k]$ функции.

Важной реализацией условия (4) является ограничение ресурсов на парирование

$$\sum_{i=1}^k F(s(t_i), x(t_i), u(t_i), t_i) \leq R, \quad (5)$$

где $F(s(t), x(t), u(t), t)$ – заданная функция затрат определенного ресурса (например, времени внедрения управляющих воздействий, в человеко-часах) и R – запас данного ресурса на выполнение задач по предупреждению аварийных комбинаций событий на отрезке $[t_n, t_k]$. В общем случае таких различных ресурсов может быть несколько и неравенство (5) является векторным. Данная постановка задачи отличается от подобной постановки в [21], где требуется минимизация затрачиваемого ресурса. Решение задачи из [21] задачи является более сложным и не всегда необходимым. Предлагаемая выше постановка задачи (1) – (4) более актуальна в случае, когда ограничения по ресурсам известны и вариант их расходования не больше заданного уровня R вполне приемлем.

Таким образом, основная задача управления предотвращением развития аварийных комбинаций событий заключается в определении управляющих воздействий по снижению вероятности развития определенных аварийных комбинаций. Требуемые воздействия ограничены данными ресурсами, начальными условиями и требованием минимизации затрат на их осуществление.

Формальная постановка задачи организации и стимулирования развития критических комбинаций событий быть получена путем изменения знака неравенства в формуле (1) на противоположный знак.

Данное изменение по виду минимально, а по сути – кардинально. Оно подчеркивает двойственность и взаимную обратимость рассматриваемых задач. Задача организации и стимулирования развития критических комбинаций заключается в определении управляющих воздействий по повышению вероятности развития определенных критических комбинаций.

2. Подходы к решению задачи

2.1. Логико-вероятностный подход

Первый подход к анализу процессов развития и предупреждения КСС основывался на анализе деревьев отказов. Используемые для этого модели на основе деревьев отказов (или систем продукций) учитывают события среды, действия персонала и др.

Основной принцип предлагаемых алгоритмов основывается на путях успешного функционирования (ПУФ) [21]. При появлении в системе неблагоприятного события e оценивается вероятность появления событий, дополняющих ситуацию до известного сценария аварии. Для этого анализируются минимальные сечения, содержащие e с учетом произошедших ранее событий. Для тех совокупностей событий, вероятности которых превышают допустимое значение, строятся усеченные ПУФ. Предупреждение аварий основано на идее, что при недопущении событий из любого ПУФ сценарии рассматриваемых аварий не реализуются.

Ограничением для использования ПУФ является то, что мероприятия по предупреждению входящих в них событий могут требовать значительных ресурсов. С другой стороны, количество различных ПУФ может быть достаточно велико (совпадает с множеством минимальных сечений инвертированного дерева) и может быть получено целесообразное решение задачи выбора наименее затратного ПУФ.

Другие ограничения такого подхода – это сложность построения деревьев отказов (или систем продукций) с достаточно полным и точным описанием событий. Однако деревья отказов или системы продукций являются не целью, а средством нахождения критических комбинаций. Поэтому важна разработка альтернативных подходов к определению их состава. В настоящее время мы также рассматриваем подход, основанный на анализе функции качества функционирования системы.

2.2. Подход на основе улучшения значения показателя качества

Пусть качества функционирования (например, эффективности, безопасности и др.) системы представлено функцией $Y(X, \Sigma)$, где X – некоторое множество переменных или параметров системы и среды, Σ – структура системы, среды. И пусть значение $Y(X, \Sigma)$ при текущих значениях $X(0), \Sigma(0)$ оказывается неудовлетворительным. Требуется изменить «в лучшую сторону» прогнозируемое значение Y путем изменения значений переменных или структуры. Ясно, что для этого необходимо определить переменные, которые будут изменены в пределах имеющихся ресурсных ограничений, и значения, которые эти переменные получают при таком изменении. Критической комбинацией в этом случае будем считать подмножество переменных или параметров X' и структуры Σ' , подлежащих изменению по результатам решения задачи. Переменные или параметры, которые не изменяются согласно полученному решению, не входят в данную критическую комбинацию.

Формально задача заключается в следующем. Для заданных $X(0), \Sigma(0)$ определить $X(1), \Sigma(1)$ такие, что значение $Y(X(1), \Sigma(1))$ будет «лучше» $Y(X(0), \Sigma(0))$, а затраты на эти изменения $R(X(0), \Sigma(0), X(1), \Sigma(1))$ не будут превосходить заданного R . При этом здесь могут быть два основных варианта постановки задачи – с оптимизацией целевой функции и без нее. Представим эти варианты для случая, когда рассматриваемые функции вещественные (а в общем случае неравенства могут быть заменены на теоретико-множественные включения).

Постановка задачи. Найти такую структуру системы и значения параметров $X(1), \Sigma(1)$, что

$$Y(X(1), \Sigma(1)) \rightarrow \max, \quad (6)$$

с ограничениями

$$R(X(0), \Sigma(0), X(1), \Sigma(1)) \leq R, \quad (7)$$

$$Z_i(X, \Sigma) = 0, \quad i \in I, \quad (8)$$

$$Y(X(1), \Sigma(1)) - Y(X(0), \Sigma(0)) > \varepsilon. \quad (9)$$

Здесь условие (6) означает максимальную выгоду от изменений, (7) – ограничение ресурса на эти изменения, (8) – связи между параметрами и структурой системы $Z_i(X, \Sigma)$ – заданная функция

структуры и переменных), (9) – условие целесообразности рассматриваемых изменений, ε – неотрицательное число, на которое нужно увеличить значение $Y(X, \Sigma)$. При этом в левой части (9) может, как вариант, фигурировать и отношение между $Y(X(1), \Sigma(1))$, $Y(X(0), \Sigma(0))$.

В случае, если функция качества и затраты на изменение ее значения сравнимы и связаны интересами некоторой стороны, имеет смысл рассматривать задачу определения наиболее выгодных изменений, если таковые существуют. Тогда вместо условия (6) можно рассматривать условие

$$Y(X(1), \Sigma(1)) - R(X(0), \Sigma(0), X(1), \Sigma(1)) \rightarrow \max. \quad (10)$$

Решение задачи с такой целевой функцией может отличаться от решения задачи (6) – (9). Решение одной из этих задач в общем случае не является решением другой, покажем это на примере.

Пусть ЛПР прогнозирует значение остатка денежных средств на предстоящий период работы предприятия и текущий прогноз неудовлетворителен. Оперативные изменения для исправления этой ситуации можно провести только в части дополнительной закупки ресурсов X_1 (2 у.е. за единицу) и X_2 (1 у.е. за единицу). Количество доступных средств составляет 10 у.е., текущие значения $X_1(0) = X_2(0) = 1$, желательное повышение прогнозируемой оценки остатка – до 5 у.е. и выше. При этом первого ресурса должно быть добавлено не меньше, чем второго. Пусть в формуле для прогнозирования остатка денежных средств объемы этих ресурсов присутствуют с коэффициентами 1 и 2. Тогда, учитывая $X_1(0) + 2X_2(0) = 3$, согласно (6) – (9) нам нужно определить такие $\Delta_1, \Delta_2 \geq 0$, что

$$\Delta_1 + 2\Delta_2 \rightarrow \max, \quad (11)$$

с ограничениями

$$2\Delta_1 + \Delta_2 \leq 10, \quad (12)$$

$$\Delta_1 \geq \Delta_2, \quad (13)$$

$$\Delta_1 + 2\Delta_2 \geq 2. \quad (14)$$

Применение симплекс-метода дает решение $\Delta_1 = \Delta_2 = 10/3$, то есть, в критическую комбинацию вошли обе переменные и их нужно увеличить, согласно этому решению, с 1 до 10/3.

Пусть теперь вместо условия (11) используется условие вида (10). После преобразования оно будет в рассматриваемом случае иметь вид

$$\Delta_2 - \Delta_1 \rightarrow \max. \quad (15)$$

Решая задачу с такой целевой функцией, получаем $\Delta_1 = \Delta_2 = 2/3$. Это означает, что при перечисленных условиях повышать прогнозируемый показатель до максимума более затратно, чем ограничиться повышением его до значения 5, которое и требовалось. Пример подтверждает известную мысль, что при оптимизации нескольких показателей они не обязательно достигают своих максимумов в отдельности. Более того, при известных желаемых значениях показателя качества задача вообще может рассматриваться без требований оптимизации, то есть, с условиями (6) – (9). Последнее полученное решение подходит и к такой задаче.

В итоге, по отношению к трём перечисленным в начале задачам: определение состава, мероприятий по парированию или стимулированию, предиктивная диагностика, предлагаемый подход дает возможность:

- определить переменные, составляющие критическую комбинацию и значения этих переменных, к которым их необходимо привести в рамках имеющихся ресурсных ограничений;
- определить мероприятия по реализации критической комбинации параметров в случае, если известны мероприятия для найденных изменений переменных;
- провести прогнозирование динамики показателя качества функционирования системы при различных рассматриваемых сценариях.

Отметим аспекты, связанные с решением задач оптимизации для определения критических комбинаций параметров.

3. Обсуждение результатов

3.1. Направления возможного развития и ограничения предлагаемого метода

Условие (8) в общем случае существенно усложняет задачу, создавая потенциальное «трение» между мероприятиями по увеличению значений переменных, которые без этого условия можно было бы в рамках допустимых ограничений увеличить или уменьшить независимо. Таким образом, ситуация

в этом случае существенно сложнее, чем когда для изменения рассматривается всего одна переменная [24]. Это внесет дополнительные аспекты при рассмотрении задачи для сложных организационных систем [25–26].

В случаях, когда переменные рассматриваемых задач будут целочисленными или качественными, и потенциальными изменениями будет затрагиваться структура системы, в качестве методов решения потребуется привлекать не только методы линейного программирования. Это создаст определенные ограничения, в целом преодолимые с учетом возможности перебора решений на современной вычислительной технике.

При описании подхода к определению критических комбинаций событий на основе формулы показателя качества следует не забывать такого важного обстоятельства, как порядок рассматриваемых событий. В общем случае он имеет значение для развития комбинации. В частности, возможны ситуации, когда мероприятия по изменению значений переменных из критической комбинации могут мешать друг другу (путем поглощения общих ресурсов, например). Подобное возникнет и в случае, когда нужно улучшить несколько показателей системы. Это частично отражено условием (8) требуемой взаимосвязи изменений переменных.

Основным ограничением для представленного подхода является необходимость иметь саму формулу для вычисления показателя качества работы системы. Это должна быть модель, которая вызывает доверие ЛПР и может стать основной для определения мероприятий, часто довольно затратных, для улучшения показателей работы системы в будущем. Однако вопрос доверия ЛПР актуален и для прочих моделей и подходов.

В предложенном виде выше метод улучшения значения показателя качества больше ориентирован на одношаговое управление. Для более сложных случаев он может быть применен несколько раз.

Решение задач для определения критических комбинаций событий или параметров, вообще говоря, не является однозначным. Наилучшим вариантом является представление таких решений в виде множества кортежей или правил их генерации. Неоднозначность решения рассматриваем как возможность введения новых критериев для отбора лучших решений, а также лучших планов мероприятий по изменению значений переменных или структур в интересах решения задачи.

3.2. Возможности и преимущества

При поиске изменений переменных или структуры, позволяющих улучшить значение показателя качества системы, можно искать решение задачи как в абсолютном виде $X_i(1) = X_i(0) + \Delta_i$, так и в относительном: $X_i(1) = k_i X_i(0)$.

Решение задачи, где критерием является выгода от изменения значения показателя, возможно и в случае, если затраты на изменение переменных напрямую не сравнимы со значением этого показателя. Сравнение может быть осуществлено косвенно и выразиться в дополнительном условии.

Для определения критических комбинаций параметров предложенным выше методом возможно использовать и выражение для вероятности возникновения благоприятного (неблагоприятного) события на некотором отрезке времени. Это лучше согласуется с изначальной постановкой (1) – (5) и потенциально расширяет возможности использования предлагаемого метода.

4. Заключение

В статье мы предлагаем метод определения критических комбинаций событий или параметров системы, изменение которых приводит к улучшению показателей качества ее функционирования или возможности избежать аварийного состояния. Такой метод альтернативен ранее используемому логико-вероятностному методу для определения критических комбинаций параметров. Он не требует построения деревьев отказов или перечней неблагоприятных событий, однако требует построения определенной формулы для прогнозируемого значения показателя или вероятности прогнозируемого события. Определение состава критических комбинаций сводится к решению задачи изменения текущих параметров или структуры с целью улучшения показателя качества, который вычисляется или прогнозируется по этой формуле.

Литература

1. *Ryabinin I.A.* Logical probabilistic analysis and its history // International Journal of Risk Assessment & Management. – 2015. – Vol. 18, N 3–4. – P. 256–265.
2. *Viktorova V.S., Lubkov N.V., Stepanyants A.S.* Reliability models and analysis of systems with protection // Automation and Remote Control. – 2018. – Vol. 79, N 7. – P. 1270–1286.

3. *Ryabinin I.A., Strukov A.V.* Quantitative examples of safety assessment using logical-probabilistic methods // International Journal of Risk Assessment & Management. – 2018. – Vol. 21. – N 1–2. – С. 4–20.
4. *Guo, JN at al.* Risk assessment on multimodal transport network based on quality function deployment //International journal of intelligent systems. – 2021 36 (3). – P. 1408–1440.
5. *Aghaei H. at al.* Human reliability analysis in de-energization of power line using HEART in the context of Z-numbers// PLOS ONE, 2021 16(7): e0253827.
6. *Kandemir C, Celik M.* Determining the error producing conditions in marine engineering maintenance and operations through HFACS-MMO// Reliab Eng Syst Saf. – 2021. – P. 206.
7. *Reddy K. at al.* The application of human reliability analysis to three critical care procedures // Reliab Eng Syst Saf. – 2020. – P. 203.
8. *Chao, C. at al.* An innovative methodology for quickly modeling the spatial-temporal evolution of domino accidents triggered by fire// Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2018. – V. 54. – P. 312–324.
9. *Zhang L. at al.* DAMS: A Model to Assess Domino Effects by Using Agent-Based Modeling and Simulation // Risk Analysis. – 2018. – Vol. 38. – N 8. – P. 1585–1600.
10. *Chen C., Reniers G., Zhang L.* An innovative methodology for quickly modeling the spatialtemporal evolution of domino accidents triggered by fire // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2018. – N 54. – P. 312–324.
11. *Bai, M. at al.* Why do major chemical accidents still happen in China: Analysis from a process safety management perspective // Process safety and environmental protection. – 2023. – Vol. 176. – P. 411–420.
12. *Syaza I. at al.* Development of hazard prevention strategies for inherent safety assessment during early stage of process design// Process Safety and Environmental Protection. – 2019. – V. 121. – P. 271–280.
13. *Li, X. at al.* Exploring hazardous chemical explosion accidents with association rules and Bayesian networks // Reliability engineering & system safety. – 2023. – V. 233. – P. 109099.
14. *BM. E. Moret, M.G. Thomason.* Boolean Difference Techniques for Time – Sequence and Common–Cause Analysis of Fault–Trees // IEEE Transactions on reliability. – 1984. – Vol. 33. – N 5. – P. 399–405.
15. *Schneeweiss W.G.* A short Boolean derivation of mean failure frequency for any (also non–coherent) system // Reliability Engineering & System Safety. – 1996. – Vol. 52. – N 1. – P. 45–53.
16. *E. Zaitseva, V. Levashenko, V. Kharchenko.* Analysis of Mimi–State System Reliability by Logical Differential Calculus and Decision Diagrams // Proc. of the 7th Int. Conf. on Computer–Aided Design of Discrete Devices (CAD DD' 10). – Minsk, Belarus. – 2010. – P. 92–99.
17. *Bimbaum L.W.* On the importance of different components in a multicomponent system // Multivariate Analysis II. New York: Academic Press. – 1969. – P. 581–592.
18. *Zaitseva E., Puuronen S.* Estimation of Multi–State system reliability depending on changes of some system component efficiencies // Proc. Of European Safety and Reliability Conference – 2007. – P. 253–261.
19. *Резчиков А.Ф., Богомолов А.С.* Критические сочетания событий – причины аварий в человеко-машинных системах // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2015): труды Девятой междунар. конф: в 2 т. – М.: ИПУ РАН, 2015. – P. 130–135.
20. *Bogomolov A.S., Ivashchenko V.A., Kushnikov V.A. at al.* Modeling complex for critical events combinations analysis in aviation transport systems, Control Sciences. – 2018. Vol. 1. – P. 74–79.
21. *Клюев В.В., Новожилов Г.В., Резчиков А.Ф., Богомолов А.С.* Ресурсный подход к обеспечению безопасности систем «Человек – Объект – Среда» – М.: Спектр. – 2014. – 158 p.
22. *Rezchikov A. F. at al.* Models and Algorithms of Automata Theory for the Control of an Aircraft Group //Automation and Remote Control. – 2018. – Vol. 79 (10) . – P. 1863–1870.
23. *Bogomolov A. S.* Prevention of Accidental Combinations of Events in the Control of Human-Machine Systems // Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Math. Mech. Inform. – 2019. – Vol. 19 (2) . – P. 196–206 (in Russian).
24. *Bogomolov A.S., Dvoryashina M.M., Dranko O.I., Kushnikov V.A., Rezchikov A.F.* Stress Testing of Non-Financial Organizations: An Analytical Approach to Solving the Reverse Problem //Control Sciences. –2021. – Vol. 6. – P. 13–24.
25. *Akinfiyev V. K., Cvirkun A. D.* Metody i instrumental'nye sredstva upravleniya razvitiem kompanij so slozhnoj strukturoj aktivov . – М.: ИПУ РАН. – 2020. – 307 p. (In Russian).
26. *Burkov V.N. at al.* Information Technologies for Development Management Systems // Automation and Remote Control. – 2018. – Vol. 79 (10). – P. 1813–1822 (In Russian).