

Наука и инновации в информационном обществе

ПОДХОД К ОПТИМИЗАЦИИ ПРОГРАММЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА РИСК ДЛЯ ВЗАИМОЗАВИСИМЫХ СОБЫТИЙ

Статья рекомендована к публикации членом редакционного совета А.Н.Райковым 06.12.2022 г.

Саченко Лариса Анатольевна

Кандидат экономических наук
ООО «Риск-профиль», генеральный директор
Москва, Россия
sachenko@risk-profile.ru

Аннотация

В статье предложен подход к оптимизации комплексного воздействия на сложную систему с взаимозависимыми элементами с целью разработки оптимальной стратегии воздействия на риск. Применение предложенного подхода позволяет найти баланс по оптимальному распределению инвестиций между превентивными мерами и мерами реагирования на инциденты. На основе модели полной стоимости риска приведены примеры оптимизации многофакторного воздействия на систему с взаимозависимыми событиями при помощи матричных уравнений. Показано принципиальное отличие результатов оптимизации от аналогичных воздействий, не учитывающих взаимозависимости между рисковыми событиями.

Ключевые слова

управление риском, готовность к реагированию, оптимизация затрат, взаимозависимые события

Введение

Разработка оптимального комплекса мер по управлению риском компании представляет из себя сложную комплексную задачу. В текущих условиях многие события невозможно предвидеть заранее, и когда они происходят, возникает ситуация «провала риск-менеджмента». Ответ на вопрос о том, что важнее – предвидеть и предотвратить риск или подготовиться к реагированию на него, каким должен быть оптимальный набор мер с точки зрения эффективности затрат и возможных последствий, совсем не очевиден. Что эффективнее для снижения рисков предприятия: замена оборудования, вложения в информационную безопасность, покупка средств индивидуальной защиты или проведение учений? Либо достаточно затрат на страхование? В каком объеме?

Найти возможные подходы к поиску баланса между превентивными мерами управления риском и мерами реагирования в условиях множественных прямых и обратных связей между событиями – основная цель данной работы.

В первом разделе проведен анализ существующих подходов по формированию комплексных стратегий воздействия на риск, приведены примеры учета взаимозависимости рискованных событий.

Во втором разделе представлена модель, позволяющая оценить полную стоимость риска с учетом взаимозависимостей между рискованными событиями. Модель позволяет оценить совокупное влияние многофакторного воздействия на полную стоимость риска при помощи матричных уравнений.

В третьем разделе на численном примере демонстрируются возможности применения разработанной автором модели по совместной оптимизации превентивных мер управления риском и мер реагирования при произвольных поверхностях отклика. Показаны принципиальные отличия

© Саченко Л.А., 2023

Производство и хостинг журнала «Информационное общество» осуществляется Институтом развития информационного общества.

Данная статья распространяется на условиях международной лицензии Creative Commons «Атрибуция — Некоммерческое использование — На тех же условиях» Всемирная 4.0 (Creative Commons Attribution – NonCommercial - ShareAlike 4.0 International; CC BY-NC-SA 4.0). См. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/legalcode.ru>
https://doi.org/10.52605/16059921_2023_04_93

результатов по разработке комплекса мер воздействия на риск, полученных с учетом взаимозависимостей между рисковыми событиями и без учета таких взаимозависимостей.

1 Подходы к выбору оптимальной стратегии воздействия на риск и учету зависимости рисков событий

В одной из первых работ по выбору оптимальной программы воздействия на риск [1] была предложена модель для выбора стратегии реагирования на риски проекта. Модель позволяет провести сквозной экспертный анализ рисков событий по иерархической структуре работ и ранжировать воздействия на риск по показателю снижения полной стоимости риска на единицу затрат.

Подходы к оптимальному вложению средств в управление риском, предложенные исследователями в последующие годы, были классифицированы в [2] следующим образом: зональный, взвешенный, подход по иерархической структуре работ и оптимизационный. Из этих подходов первые два – качественные, третий – смешанный, в рамках четвертого оптимизационного подхода могут быть использованы чисто количественные методы.

Среди наиболее близких к предмету рассмотрения настоящей статьи оптимизационных методов можно выделить две большие подгруппы – одно- и многокритериальная оптимизация.

Для решения задач с единственным критерием оптимизации при выборе мер по управлению риском в последнее время чаще выбирается жизнестойкость или готовность к реагированию (resilience). Действительно, выбор такого критерия позволяет проводить совместный анализ эффективности превентивных мер и мер реагирования на инциденты. Так, в работе [3] максимизируется жизнестойкость взаимозависимой технотронной системы с помощью показателя «способности к восстановлению», учитывая взаимосвязи между подсистемами оборудования, электрических сетей и коммуникаций при разных восстановительных стратегиях. Модели теории игр применяются для выделения оптимальных стратегий жизнестойкости электрических сетей, железнодорожных систем, распределению товаров по сети сбыта. Например, в [4] для оценки жизнестойкости взаимозависимых систем критической инфраструктуры используются модели «нападающий-защитник» и «защитник-нападающий». Эффективность инвестиций в жизнестойкость сложных взаимозависимых систем максимизируется в [5]. Решение ранжирует элементы системы по степени вклада в суммарную производительность по индексу Соболя [6]. Схожий подход к приоритизации планов аварийного восстановления сети после сбоев предложен в работе [7]. Он оценивает вклад элемента в пропускную способность сети, а также время восстановления элемента после сбоя. В статье [8] с использованием метода Монте-Карло и эвристических методов максимизируется ожидаемое значение жизнестойкости для взаимозависимых систем, относящихся к критической инфраструктуре. Стоимостные показатели при этом заданы в виде бюджетного ограничения. Принцип максимизации жизнестойкости при бюджетном ограничении для взаимозависимых газовой и электрической систем при возникновении природных катастроф также применяется и в [9]. Автор показывает преимущество согласованных восстановительных стратегий над сепаратными стратегиями по каждой из систем.

Еще одним традиционно используемым монокритерием оптимизации вложений в меры по управлению риском является показатель полной стоимости риска (Total Cost of Risk, TCR). Этот показатель суммирует размер ожидаемых убытков с затратами на комплекс мер по управлению риском. Модель минимизации полной стоимости риска использована в [10] для принятия решения по рискам информационной безопасности. Показатель полной стоимости риска является ключевым в подходе, предложенном в [11] при внедрении мер по формированию жизнестойкости организаций. Вероятностный анализ рисков, встроенный в модель полной стоимости риска применяется в [12] для повышения устойчивости энергосистем с распределенной генерацией в виду экстремальных погодных условий. Стратегии превентивной работы по обеспечению надежности работы микросетей с координацией между инфраструктурами электроснабжения и природного газа, предложенные в работе [13], также основаны на оптимизации полной стоимости риска.

Третий критерий оптимизации, который часто используется в задачах управления риском – полезность. Исследование [14] предлагает оптимизационный подход, при помощи которого происходит выбор стратегии реагирования на риски, максимизирующей функцию полезности. Стратегии выбираются с учетом влияния каждого риска на результаты проекта и бюджетных ограничений. Методы выбора стратегий реагирования на риск для взаимозависимых событий,

предложенные в [15], также основаны на максимизации функции полезности. Выбор вида данной функции стандартен и предусматривает убывающую отдачу от вложений в меры реагирования на риск.

Таким образом, из трех наиболее часто используемых монокритериев оптимизации затрат на меры по управлению риском, только критерий полной стоимости риска напрямую оптимизирует весь спектр возможных убытков и затрат, связанных с присутствием рисков в реализации проекта или деятельности предприятия. Однако при определенных условиях критерии жизнестойкости (resilience) и полезности при введенных бюджетных ограничениях могут быть более предпочтительны.

Многокритериальные методы, как правило, интегрируют экспертные и количественные оценки рисков по множеству целей и задач конкретного проекта. В работе [16], помимо минимизации полной стоимости риска, предлагается еще четыре стратегии воздействия на риск: первоочередное управление факторами, наиболее влияющими на цели проекта; выбор мер с наименьшими затратами на снижение единицы риска; метод случайного поиска и генетический алгоритм. При этом оценка рисков и оптимизация проводится по взвешенному показателю, учитывающему совокупность целей проекта. Авторы статьи [17] предлагают сочетать для быстро развивающихся технологий риск-ориентированное принятие решения с некоторой агрегированной полуколичественной метрикой, учитывающей физические, социальные и экономические последствия для разных альтернатив. Использование такого смешанного подхода позволит адаптировать принимаемые решения к уровню текущих знаний об области управления. Конкретная реализация данного подхода предлагается в [18] с применением метода анализа иерархий, в котором, наряду с очевидными достоинствами, авторы выделяют ряд серьезных недостатков. Метод оптимизации, предлагаемый в [2], максимизирует комплекс мер по величине снижения ожидаемых убытков от рисков событий. При этом в качестве целевых функций используются ключевые показатели проекта: качество, график, затраты, а рисков события предполагаются независимыми.

Вопросам корректного учета взаимозависимости рисков в сложных проектах и процессах придается большое значение как в исследовательских работах, так и в практике риск-менеджмента. Важность учета эмерджентного поведения сложных систем, когда система приобретает свойства, не характерные для ее элементов в отдельности, подчеркивается в статье [19]. Два подхода по формированию стратегии воздействия на риск с учетом существующих зависимостей между рисками предложены в [20]. Первый подход предусматривает обработку вторичных рисков после учета влияния зависимостей, второй предлагает воздействовать на первичные риски. Основным критерий принятия решений – оцененное значение индекса зависимости рисков проекта, вычисляемого с помощью графа выявленных зависимостей. Применение модели оптимизации воздействия на риск с учетом взаимозависимости между рисками в противоположных направлениях, представленное в [15], привело к двум выводам: во-первых, целевая функция более чувствительна к силе взаимосвязи, чем к ее направлению, и, во-вторых, недостаточное внимание к взаимозависимостям между рисками повышает стоимость программы по управлению риском. Первый из этих тезисов можно принять как дискуссионный, поскольку методика учета взаимосвязи между рисками, принятая в данной работе, содержит усреднения по направлению взаимодействия. Пример использования подобной модели для иранской строительной компании представлен в [14].

Еще один подход по учету взаимозависимостей между рисками предполагает использование модели процессов в системе воздействия. Так в работе [21] с помощью моделирования описывается состояние сообщества, сценарий землетрясения, характеристики строительных объектов, сценарии разрушений и потерь, и на последнем этапе предлагаются альтернативы по траектории восстановления. Показано, что учет доступности ресурсов, имеющихся в сообществе, позволяет сократить время восстановления и потенциальные убытки. Готовность к природным катастрофам находится в фокусе анализа в работе [8]. Представленный подход, позволяющий найти баланс между комплексом превентивных мер и мерами реагирования, основан на моделировании убытков во взаимосвязанных критических системах. Преимущество согласованных стратегий реагирования, сформированных с учетом взаимозависимостей между системами критической инфраструктуры, над «эгоистическими» стратегиями показано в [9, 13].

Из-за того, что имеющиеся на настоящий момент подходы учета взаимозависимостей между рисковыми событиями предполагают массу ограничений и допущений, их применение носит весьма ограниченный характер. Компенсировать недостатки целостного излишне

формализованного подхода к формированию стратегии воздействия на риск предлагается в [22] при помощи следующего алгоритма с расширенным охватом рассмотрения задачи: сначала рекомендуется провести анализ эффективности действия единичных мер по управлению риском на независимые события (снизу-вверх), затем провести анализ существующих взаимозависимостей (сверху-вниз), на итоговом шаге разработать коллаборативный итеративный процесс принятия решения.

Таким образом, из совокупности рассмотренных выше подходов только количественный подход на основе однокритериальной оптимизации для взаимозависимых систем позволяет выделить преимущество согласованных многокомпонентных стратегий воздействия на риск над сепаратными изолированными стратегиями. Но узконаправленность моделей [4, 5, 7-9, 13] не предполагает их широкого применения. Для расширения практики использования согласованных многокомпонентных стратегий воздействия на риск автором разработан и представлен ниже более общий подход, позволяющий провести анализ комплексного воздействия сверху-вниз на систему из взаимозависимых компонентов.

2 Модель многофакторного воздействия на показатель полной стоимости риска при взаимозависимых событиях

Показатель полной стоимости риска TCR включает все затраты организации, связанные с рисками. Для задачи оптимизации мер до и после события он может быть представлен как:

$$\overline{TCR} = C_{ret} + (C_{risk} + C_{res}) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где

C_{ret} - резервы организации, связанные с самостоятельным покрытием непредвиденных потерь;

C_{risk} - объем превентивных мер;

C_{res} - объем мер реагирования.

Тогда основной задачей при минимизации полной стоимости риска будет выбор такого объема превентивных мер C_{risk} и мер по реагированию на инциденты C_{res} , который приведет к наименьшим ожидаемым потерям C_{ret} .

Для решения задачи (1) автором была разработана модель, представленная на рис. 1. Модель была разработана для управления рисками производственного предприятия, соответственно, для иллюстрации используем производственные риски.

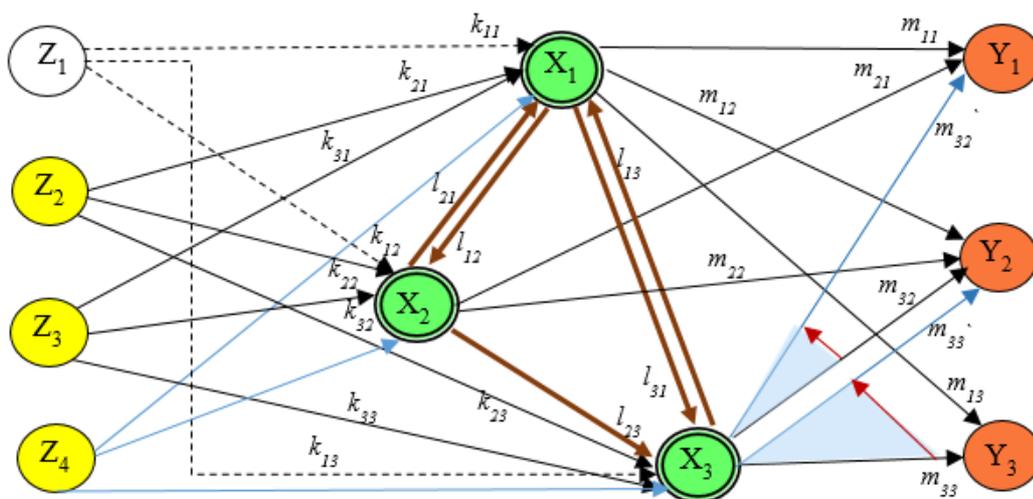


Рис. 1. Модель полной стоимости риска с многофакторным воздействием на взаимозависимые события

Первая колонка Z представлена множеством факторов, оказывающих влияние на частоту событий из множества X . В третьем столбце Y представлен спектр ущербов $Y_1 - Y_3$, упорядоченных по возрастанию.

На рис. 1 белым цветом выделен параметрически заданный безразмерный фактор Z_1 , представляющий множество условно неуправляемых факторов. Это могут быть природные явления, износ оборудования, человеческий фактор и т.п. Желтым цветом выделены управляющие факторы $Z_2 - Z_4$. Факторы $Z_2 - Z_4$ представлены в модели безразмерной величиной, отражающей долю или объем использования из всей совокупности возможных мер по управлению риском каждого типа. Это значит, что из возможного списка мероприятий по управлению риском Z_i будет представлять собой долю реализованных мероприятий i -го типа. Факторы $Z_2 - Z_4$ изменяются от 0 до Z_i^{max} , где Z_i^{max} – максимальный объем из всех рассматриваемых мер по управлению риском данного типа. В модели, представленной на рис. 1, условно задано, что Z_2 – планово-предупредительный ремонт, Z_3 – обучение персонала по действиям в кризисных ситуациях, разработка регламентов, Z_4 – установка оборудования по локализации последствий аварий. Коэффициенты k_{ij} отражают степень влияния фактора Z_i на частоту события X_j .

Множество X задано ожидаемыми частотами реализации событий $X_1 - X_3$ [соб./год] и иллюстрирует простейший случай взаимосвязанных событий. Предполагается, что оценки ожидаемых частот для событий X_i известны. Для производственного предприятия, например, X_1 – частота unplanned перерывов в производстве, X_2 – частота поломок оборудования, X_3 – частота аварий с выбросом вредных веществ в окружающую среду. Взаимосвязь выражается в том, что причиной простоя может быть поломка оборудования. Одновременно с этим, во время простоя оборудование не подвергается износу и может быть отремонтировано, что может снизить частоту поломок. Также поломка может быть причиной выброса вредных веществ, а выброс, в свою очередь, почти наверняка приведет к простою предприятия. Существует и небольшая вероятность выброса вредных веществ по причине unplanned простоя, что может быть связано с нарушением регламентов во время простоя. Взаимосвязь между частотами событий X_i показана на рис. 1. коричневыми стрелками. Степени влияния частот событий X_i на частоты событий X_j выражены коэффициентами l_{ij} .

Меры по реагированию на инцидент типа Z_4 выражаются в том, что не влияют на частоты событий $X_1 - X_3$, а ограничивают размер убытка. Примером таких воздействий могут быть различные системы локализации последствий аварий, системы аварийного охлаждения, проведение учений, страхование и т.п. На рис. 1 голубой стрелкой показано действие фактора Z_4 на частоту события X_3 – авария с выбросом вредных веществ в окружающую среду. Примем следующую классификацию размеров ущерба: Y_1 – текущие убытки, Y_2 – серьезные события, Y_3 – катастрофические события. Вследствие действия фактора Z_4 частота события X_3 не изменяется, при этом катастрофический ущерб переходит в серьезный, серьезный – в текущий. На рис. 1 этот процесс «перетекания» больших убытков в меньшие проиллюстрирован с помощью стрелок. При этом коэффициенты m_{ij} отражают долю событий типа i с последствиями Y_j .

Исходное уравнение получено относительно частот событий X_i путем учета влияния на результирующую частоту событий данного типа частот других событий X_j , $j \neq i$, и набора управляющих факторов Z_i . Суммирование влияний для каждой частоты X_i происходит по всем входящим стрелкам (см. Рис. 1):

$$X_j(j = 1, \dots, N) = \sum_{i=1}^K Z_i * k_{ij} + \sum_{i=1}^N X_i * l_{ij},$$

приведенное уравнение:

$$X_j(j = 1, \dots, N) - \sum_{i=1}^N X_i * l_{ij} = \sum_{i=1}^K Z_i * k_{ij}.$$

Тогда матричное решение задачи вычисления ожидаемых потерь C_{ret} при взаимозависимых событиях будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} A \cdot X &= C \cdot Z \\ A^{-1} \cdot A \cdot X &= A^{-1} \cdot C \cdot Z \\ X &= A^{-1} \cdot C \cdot Z, \\ Y &= D \cdot X \\ Y &= D \cdot A^{-1} \cdot C \cdot Z \end{aligned} \quad (2)$$

где $Y = \sum_i Y_i = C_{ret}$, матрицы $A = (-l_{ij})$, кроме элементов x_j с $i=j$, равных 1, $C = (k_{ij})$, $D = (m_{ij})$ соответственно.

Суммируя размер ожидаемого убытка с затратами в соответствии с формулой (1) получим для модели, представленной на рис. 1, следующее выражение:

$$\overline{TCR} = C_{ret} + C_{risk} + C_{res} = Y + \sum_{i=2}^4 f(Z_i) \quad (3)$$

где функция $f(Z_i)$ отражает зависимость затрат на меры по управлению риском каждого типа в зависимости от объема их реализации. Чаще всего функция $f(Z_i)$ бывает представлена экспоненциальной зависимостью, отражающей закон роста предельных затрат, необходимых для снижения частоты рискованных событий на дополнительную единицу.

Полученная модель расчета полной стоимости риска позволит провести анализ данного показателя при изменении управляющих факторов, выявить существующие зависимости и принять решение по оптимальному распределению рискованных инвестиций.

3 Результаты оптимизации для взаимозависимых и независимых событий

Принимая основным критерием оптимальности комплекса мер по управлению риском минимальное значение полной стоимости риска, приходим к необходимости решить оптимизационную задачу, которая может быть записана как

$$\begin{cases} \overline{TCR}^* = \min \overline{TCR}(Z_1^*, Z_2^*, Z_3^*, Z_4^*), \\ Z_i (i = 2, 4) \in [0, Z_i^{max}], \end{cases} \quad (4)$$

где

\overline{TCR}^* - значение показателя полной стоимости риска в точке минимума;

Z_1^* - значение неуправляемого входного параметра, константа;

Z_i^{max} - максимальный объем мер по каждому из факторов Z_i ;

Z_2^*, Z_3^*, Z_4^* - искомая комбинация управляющих воздействий, обеспечивающая минимум полной стоимости риска.

В работе [23] приведены решения задачи (4) для плоской поверхности отклика, имеющие краевые решения. Показаны отличия результатов при учете и неучете зависимостей между рискованными событиями, а также эффект нарастания расхождения по мере роста неопределенности.

В случае с присутствием в модели на рис. 1 как прямых, так и обратных связей между событиями, и неизвестного вида функций $f(Z_i)$ в уравнении (3), форма поверхности отклика не очевидна. В таком случае необходимо найти решение для произвольной поверхности отклика.

3.1 Оптимизация превентивных мер управления риском

Проведем сравнение результатов оптимизации для превентивных мер управления риском, полученных при аналогичных воздействиях для системы с взаимозависимыми событиями и той же системы без учета взаимозависимостей.

Предположим, что на определенном предприятии наблюдается некоторая частота инцидентов разного рода $X_1 - X_3$ (рис. 1). Необходимо найти оптимальный объем превентивных мероприятий (Z_2, Z_3), обеспечивающий минимум полной стоимости риска. В терминах задачи (4) запишем данную частную задачу как:

$$\begin{cases} \overline{TCR}^* = \min (\overline{TCR}(Z_1^*, Z_2^*, Z_3^*)), \\ Z_i (i = 2, 3) \in [0, Z_i^{max}]. \end{cases} \quad (4.1)$$

Для расчетного сравнения автором предложены и применены модели, представленные на рис. 2 (а,б) соответственно. На рис. 2 фактор Z_1 принят условно неуправляемым (пунктирные стрелки), факторы Z_2 и Z_3 - управляющие (сплошные стрелки). Исходные наблюдаемые частоты инцидентов $X_1 - X_3$ равны в обоих случаях, их значения (10,10,2). То есть условно предполагается, что происходит 10 поломок в год, 10 простоев и два раза в год - авария с выбросом вредных веществ. Все количественные предположения носят исключительно иллюстративный характер. В случае (а) связь между событиями учитывается, а в случае (б) - нет.

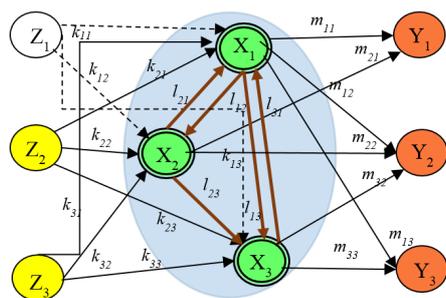


Рис. 2 (а): Воздействие факторов Z_2 и Z_3 на взаимозависимые события

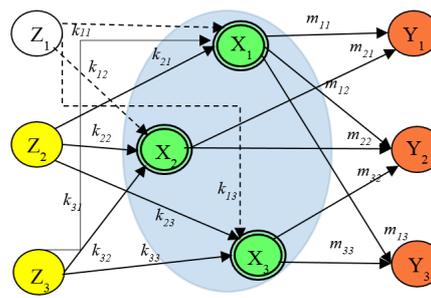


Рис. 2(б): Воздействие факторов Z_2 и Z_3 на независимые события

Численное представление исходных данных для расчета при взаимозависимых событиях:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & -0,5 & -0,9 \\ 0,3 & 1 & 0 \\ 0,2 & -0,1 & 1 \end{pmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} -0,5 & -1 \\ -1 & -0,5 \\ -0,05 & -0,05 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{pmatrix} 0,6 & 0,9 & 0,1 \\ 0,3 & 0,1 & 0,1 \\ 0,1 & 0 & 0,8 \end{pmatrix}.$$

При проведении расчетов факторы Z_2 и Z_3 , представляющие собой объем реализации превентивных мероприятий, изменялись в пределах от 0 до 100. За степень воздействия на частоту исходных событий X_i на единицу использования факторов Z_i отвечает матрица C .

Для наглядного представления процесса оптимизации был проведен полный факторный эксперимент. Результаты представлены на рис. 3. По осям Z_2 и Z_3 отложены значения объемов реализации превентивных мероприятий, ось Y – затраты и убытки, являющиеся компонентами полной стоимости риска. Поверхность α представляет собой ожидаемые убытки в случае взаимозависимых событий. Результаты расчетов без учета зависимостей между событиями приводят к поверхности отклика β по ожидаемым убыткам. Поверхность γ показывает зависимость затрат об объема реализации превентивных мероприятий. В данном случае экспоненциальный рост поверхности γ на «хвосте» отражает закон роста предельных затрат, когда по мере снижения значения ожидаемых убытков на одну дополнительную единицу требуются все более и более затратные мероприятия.

Оптимальные решения находятся на линиях пересечения поверхностей убытков (α и β) и затрат (γ). При этом, графически очевидно, что поверхности отклика для двух случаев не только находятся на разном уровне, но еще и повернуты относительно друг друга, а множества оптимальных решений для взаимозависимых и независимых событий принципиально отличны друг от друга.

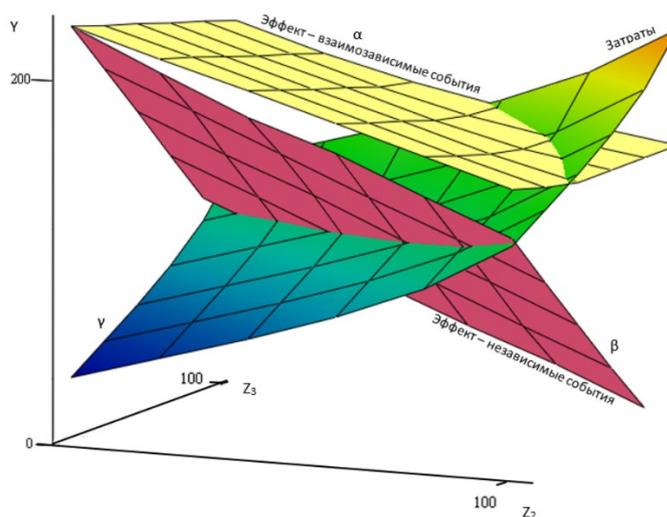


Рис. 3. Процесс оптимизации затрат на превентивные мероприятия

На Рис. 4 представлены поверхности отклика полной стоимости риска, по расчетам для взаимозависимых (поверхность ϕ) и независимых (поверхность ψ) рисков событий.

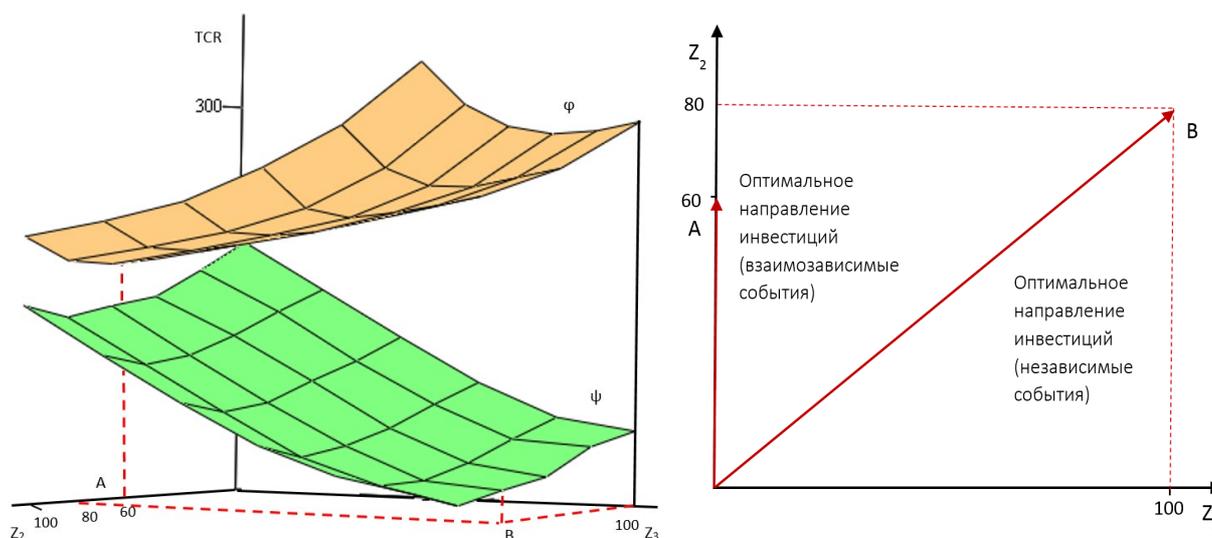


Рис. 4. Результаты оптимизации полной стоимости риска для взаимозависимых и независимых событий

Первое очевидное отличие двух вариантов расчета – степень влияния факторов на полную стоимость риска. В случае с прямым учетом действия управляющих факторов на независимые события ожидаемые значения полной стоимости риска существенно ниже, чем в случае с зависимыми событиями. Таким образом, создается иллюзорное впечатление управляемости и значительной отдачи от планируемых мероприятий по управлению риском. В то время как корректный учет зависимостей между событиями приводит к тому, что при определенных воздействиях эффект мер по управлению риском может быть даже отрицательным, то есть затраты на мероприятия выше получаемого снижения убытков. Такое ослабление ожидаемого воздействия и искажение поверхности отклика возникает по причине действия взаимосвязей между рисковыми событиями. Отметим при этом, что, в зависимости от типа взаимосвязей, искажения могут быть и в противоположном направлении.

Второе принципиальное отличие выявлено по оптимальным направлениям инвестирования. Действительно, результатом решения задачи (4.1) для взаимозависимых событий в координатах (Z_2, Z_3) будет точка A (60,0) (рис. 4). Решением той же задачи для независимых событий будет точка B (80,100). Таким образом, направления оптимального инвестирования разнонаправленны.

Если в первом случае приближение к максимальному эффекту от мероприятий по управлению риском достигается при применении мер типа Z_2 , то во втором случае преобладают меры Z_3 , которые относятся к Z_2 как 5:4. Более того, как видно из рис. 4, на основе модели независимых событий лицо, принимающее решение в точке B, в действительности получит обратный ожидаемому эффект от своих действий по управлению риском, то есть в результате принятых мер полная стоимость риска только возрастет.

3.2 Многофакторная оптимизация управляющего воздействия

В общем случае представленный математический подход позволяет провести оптимизацию и найти оптимальное соотношение для любого количества управляющих факторов. Для удобства графического представления продемонстрируем результат такой оптимизации методом Хука-Дживса на примере задачи (4) для трех управляющих факторов: Z_2, Z_3, Z_4 . Этот метод, не претендуя на высокую точность, позволяет достичь экстремума произвольной поверхности отклика с минимальным количеством итераций.

На рис. 5 представлены траектории поиска для случаев с взаимозависимыми и независимыми событиями. Стартуя из начальной точки D_0 , траектории поиска расходятся почти в противоположных направлениях.

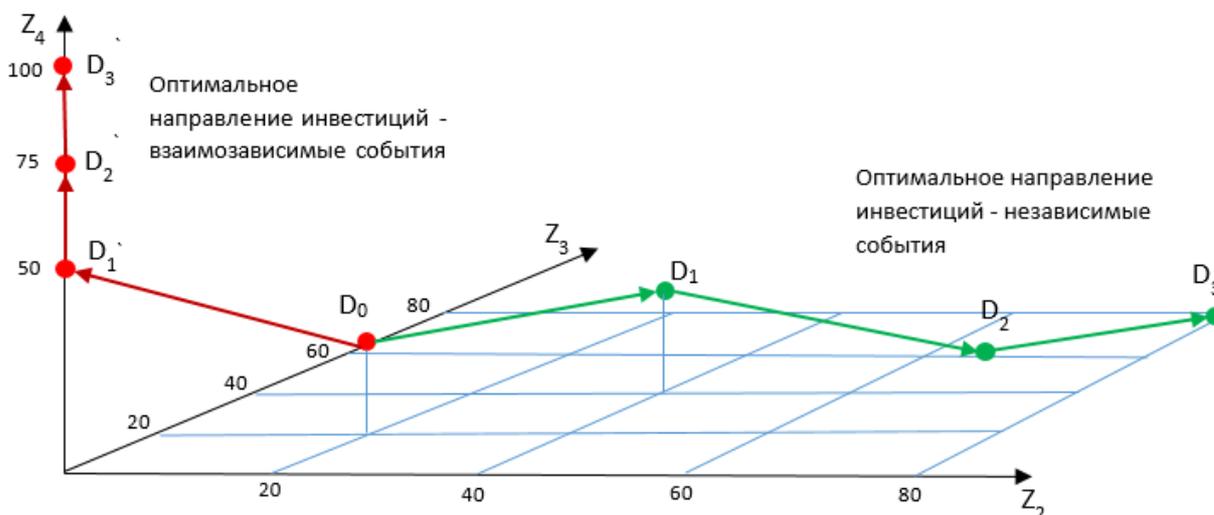


Рис. 5. Траектории поиска минимума полной стоимости риска для взаимозависимых и независимых событий

Учет взаимозависимости событий предлагает лицу, принимающему решение, вариант распределения инвестиций, ориентированный на меры по реагированию на уже свершившееся событие (Z_4). В то время как для независимых событий получен диаметрально противоположный вариант, состоящий из превентивных мер в равной пропорции (Z_2, Z_3). Естественно, что решение такого сложного вопроса не может быть однокритериальным, и существует значительное количество косвенных факторов, оказывающих влияние на итоговое распределение средств. Однако представление о наиболее эффективных сочетаниях мер по управлению риском может быть очень полезным при принятии решений.

Заключение

В статье на примере модели многофакторного воздействия на показатель полной стоимости риска продемонстрирована важность учета взаимозависимостей между рисковыми событиями при принятии управленческих решений. На численном примере показано, что присутствует принципиальное расхождение по оптимальной комбинации управляющих мер при учете и неучете таких взаимозависимостей.

Предложенный автором подход позволяет учесть наличие существующих в системе воздействия взаимосвязей и провести целевой поиск оптимальной комбинации мер по управлению риском. Удобство модели заключается в возможности регулирования степени субъективизма – в силу присутствия «неуправляемого» фактора Z_1 , можно отделить объективно наблюдаемые степени влияния факторов и событий от субъективных предположений и оценок. С другой стороны, можно протестировать на модели различные экспертные оценки и гипотезы об оптимальных решениях при различных исходных условиях.

Важным полезным свойством предложенной модели является возможность совместного анализа превентивных мер и мер реагирования на инциденты. Также к преимуществам модели можно отнести корректный учет направления взаимосвязей между событиями. В отличие от методов, использующих симметричную ковариационную матрицу для учета взаимосвязей, такой подход позволяет точнее описать характер влияния управляющих факторов на систему воздействия.

Еще одним достоинством представленной модели можно считать отсутствие ограничений на знак воздействия факторов и взаимосвязей между событиями: одинаково учитываются как положительные, так и отрицательные по направлению воздействия.

Основные недостатки и ограничения применения модели связаны с высокой степенью формализации, которая «поглощает» нечеткие взаимосвязи, присущие системе управления. Также к существенным ограничениям можно отнести линейный характер взаимосвязей и требования к

качеству количественных оценок исходных данных. Поэтому представленный математический аппарат не может быть рекомендован как единственный инструмент при разработке стратегии воздействия на риск.

Дополнение традиционно используемых средств оптимизации подобными моделями, учитывающими взаимосвязи между рисками, может существенно повысить эффективность планов воздействия на риск за счет использования согласованных многокомпонентных стратегий.

Благодарности

Выражаю глубокую признательность профессору ИГЭУ Кондрашину Анатолию Васильевичу. Эту статью я посвящаю его светлой памяти.

Литература

1. Ben-David I., Raz T. An integrated approach for risk response development in project planning. // *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 52, 2001. pp. 14-25.
2. Zhang Y., Fan Zh-P. An optimization method for selecting project risk response strategies. // *International Journal of Project Management*, Vol. 32, No. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijproman.2013.06.006>, 2014. pp. 412-422.
3. Hao Y., Wang Y., Jia L., He Z. Analysis of Resilience Under Repair Strategy in Interdependent Mechatronic System. // *IEEE Access*. 2021. pp. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3051502.
4. Fang Y., Zio E. Game-Theoretic Decision Making for the Resilience of Interdependent Infrastructures Exposed to Disruptions. // *Critical Infrastructure Security and Resilience - Theories, Methods, Tools and Technologies*. 2019. DOI: 10.1007/978-3-030-00024-0_6.
5. Blagojevic, N., Didier M., Stojadinovic B. Quantifying Component Importance for Disaster Resilience of Communities with Interdependent Civil Infrastructure Systems. // Preprint. 2021. pp. DOI: 10.31224/osf.io/hzmy8.
6. Sobol I.M. Sensitivity Estimates for Nonlinear Mathematical Models. // *Mathematical and Computer Modelling*. 1993 (1). pp. 407-414.
7. Xu, Z., Ramirez-Marquez J.I., Liu Y., Xiahou T. A new resilience-based component importance measure for multy-state networks. // *Reliability Engineering and System Safety*. 2020. pp. doi: 10.1016/j.ress.2019.106591.
8. Kong J., Zhang C., Simonovic S. Optimizing the Resilience of Interdependent Infrastructures to Regional Natural Hazards with Combined Improvement Measures. // *Reliability Engineering and System Safety*. 2021. No. //doi.org/10.1016/j.ress.2021.107538.
9. Fang Y.-P., Zio E. An adaptive robust framework for the optimization of the resilience of interdependent infrastructures under natural hazards // *European Journal of Operational Research*. 2019. No. 276. pp. 1119-1136. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.01.052>.
10. Chouba I., Sottet J.-S. Cost-Risk Optimization Applied in the Context of Regulation. In *Proceedings of the 6th International Conference on Model-Driven Engineering and Software Development*. 2018. Vol. DOI: 10.5220/0006659105360543.
11. Sachenko L. Organizational resilience. Cost optimization approaches. CPT2020 Computing for Physics and Technology. The 8th International Conference on Computing for Physics and Technology (CPT2020). Conference Proceedings. Nizhny Novgorod. 2020. Vol. pages 138-143. https://doi.org/10.30987/conferencearticle_5fce27718a8596.60663534
12. Rocchetta R., Li Y.F., Zio E. Risk assessment and risk-cost optimization of distributed power generation systems considering extreme weather conditions // *Reliability Engineering & System Safety*. 2015. Vol. 136. No. DOI: 10.1016/j.ress.2014.11.013. pp. 47-61.
13. Manshadi S.D., Khodayar M.E. Resilient Operation of Multiple Energy Carrier Microgrids // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2015. Vol. 6. No. DOI: 10.1109/TSG.2015.2397318.
14. Safaeian M., Fathollahi-Fard A.M., Kabirifar, K., Yazdani M., Shapouri M. Selecting Appropriate Risk Response Strategies Considering Utility Function and Budget Constraints: A Case Study of a Construction Company in Iran // *Buildings*. Jan 2022. No. doi.org/10.3390/buildings12020098.
15. Zhang Y. Selecting risk response strategies considering project // *International Journal of Project Management*. 2016. Vol. 34. No. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijproman.2016.03.001>. pp. 819-830.

16. Kayis B., Arndt G., Zhou M., Amornsawadwatana S. A Risk Mitigation Methodology for New Product and Process Design in Concurrent Engineering Projects," // *Annals of the CIRP*, 2007, Vol. 56, pp. 167-170. doi:10.1016/j.cirp.2007.05.040
17. Linkov I., Trump B.D., Anklam E. et al. Comparative, collaborative, and integrative risk governance for emerging technologies. // *Environment Systems and Decisions*. 2018, Vol. 38, pp. 170-176. <https://doi.org/10.1007/s10669-018-9686-5>.
18. Keisler, J.M., Linkov I. Use and Misuse of MCDA to Support Decision Making Informed by Risk. // *Risk Analysis*. November 2020. DOI: 10.1111/risa.13631.
19. Rinaldi, S., Peerenboom J., Kelly T. Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies // *IEEE Control Systems*. 2001. 21(6) doi:10.1109/37.969131.
20. Kwan T., Leung H. A risk management methodology for project risk dependencies // *IEEE Transactions on Software Engineering*, 2011. Vol. 37(5). pp. 635-648.
21. Sediek O.A., El-Tawil S., McCormick J. Dynamic Modeling of In-Event Interdependencies in Community Resilience // *Nat. Hazards Rev.* 2020. Vol. 21(4). No. DOI: 10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000413.
22. Hochrainer-Stigler S., Colon C., Boza G., Poledna S., Rovenskaya E., Dieckmann U. Enhancing Resilience of Systems to Individual and Systemic Risk: Steps toward An Integrative Framework // *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2020. No. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101868>.
23. Sachenko L., Kondrashin A. Dependent Events Accounting in Organizational Risk Management and Resilience Cost Planning Tasks Using Matrix Equations. Computing for Physics and Technology. The 9th International Conference on Computing for Physics and Technology (CPT2021). Conference Proceedings // Nizhny Novgorod – Moscow – Pushchino, Russia, November 08-12, 2021, ISBN 978-5-6042891-5-0, p. 136-145. 2021.

AN OPTIMIZATION APPROACH TO RISK CONTROLS PROGRAM FOR INTERDEPENDENT EVENTS

Sachenko, Larisa Anatolievna

Candidate of economic sciences

Risk-profile LLC, CEO

Moscow, Russian Federation

sachenko@risk-profile.ru

Abstract

The article proposes an approach to the complex impact on a complex system with interdependent elements optimizing in order to develop an optimal risk control strategy. The application of the proposed approach makes it possible to find a balance on the optimal allocation of investments between preventive measures and incident response measures. Based on the Total Cost of Risk model, examples of optimization of multifactorial impact on a system with interdependent events using matrix equations were given. The principal difference between the results of optimization from similar impacts that do not take into account the interdependencies between risk events was shown.

Keywords

risk management, resilience, cost optimization, interdependent events

References

1. Ben-David I., Raz T. An integrated approach for risk response development in project planning. // *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 52, 2001. pp. 14-25.
2. Zhang Y., Fan Zh-P. An optimization method for selecting project risk response strategies. // *International Journal of Project Management*, Vol. 32, No. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijproman.2013.06.006>, 2014. pp. 412-422.
3. Hao Y., Wang Y., Jia L., He Z. Analysis of Resilience Under Repair Strategy in Interdependent Mechatronic System. // *IEEE Access*. 2021. pp. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3051502.
4. Fang Y., Zio E. Game-Theoretic Decision Making for the Resilience of Interdependent Infrastructures Exposed to Disruptions. // *Critical Infrastructure Security and Resilience - Theories, Methods, Tools and Technologies*. 2019. DOI: 10.1007/978-3-030-00024-0_6.
5. Blagojevic, N., Didier M., Stojadinovic B. Quantifying Component Importance for Disaster Resilience of Communities with Interdependent Civil Infrastructure Systems. // Preprint. 2021. pp. DOI: 10.31224/osf.io/hzmy8.
6. Sobol I.M. Sensitivity Estimates for Nonlinear Mathematical Models. // *Mathematical and Computer Modelling*. 1993 (1). pp. 407-414.
7. Xu, Z., Ramirez-Marquez J.L., Liu Y., Xiahou T. A new resilience-based component importance measure for multy-state networks. // *Reliability Engineering and System Safety*. 2020. pp. doi: 10.1016/j.ress.2019.106591.
8. Kong J., Zhang C., Simonovic S. Optimizing the Resilience of Interdependent Infrastructures to Regional Natural Hazards with Combined Improvement Measures. // *Reliability Engineering and System Safety*. 2021. No. //doi.org/10.1016/j.ress.2021.107538.
9. Fang Y.-P., Zio E. An adaptive robust framework for the optimization of the resilience of interdependent infrastructures under natural hazards // *European Journal of Operational Research*. 2019. No. 276. pp. 1119-1136. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.01.052>.
10. Chouba I., Sottet J.-S. Cost-Risk Optimization Applied in the Context of Regulation. In *Proceedings of the 6th International Conference on Model-Driven Engineering and Software Development*. 2018. Vol. DOI: 10.5220/0006659105360543.
11. Sachenko L. Organizational resilience. Cost optimization approaches. CPT2020 Computing for Physics and Technology. The 8th International Conference on Computing for Physics and Technology (CPT2020). Conference Proceedings. Nizhny Novgorod. 2020. Vol. pages 138-143. https://doi.org/10.30987/conferencearticle_5fce27718a8596.60663534

12. Rocchetta R., Li Y.F., Zio E. Risk assessment and risk-cost optimization of distributed power generation systems considering extreme weather conditions // *Reliability Engineering & System Safety*. 2015. Vol. 136. No. DOI: 10.1016/j.ress.2014.11.013. pp. 47-61.
13. Manshadi S.D., Khodayar M.E. Resilient Operation of Multiple Energy Carrier Microgrids // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2015. Vol. 6. No. DOI: 10.1109/TSG.2015.2397318.
14. Safaeian M., Fathollahi-Fard A.M., Kabirifar, K., Yazdani M., Shapouri M. Selecting Appropriate Risk Response Strategies Considering Utility Function and Budget Constraints: A Case Study of a Construction Company in Iran // *Buildings*. Jan 2022. No. doi.org/10.3390/buildings12020098.
15. Zhang Y. Selecting risk response strategies considering project // *International Journal of Project Management*. 2016. Vol. 34. No. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijproman.2016.03.001>. pp. 819-830.
16. Kayis B., Arndt G., Zhou M., Amornsawadwatana S. A Risk Mitigation Methodology for New Product and Process Design in Concurrent Engineering Projects," // *Annals of the CIRP*, 2007, Vol. 56, pp. 167-170. doi:10.1016/j.cirp.2007.05.040
17. Linkov I., Trump B.D., Anklam E. et al. Comparative, collaborative, and integrative risk governance for emerging technologies. // *Environment Systems and Decisions*. 2018, Vol. 38, pp. 170-176. <https://doi.org/10.1007/s10669-018-9686-5>.
18. Keisler, J.M., Linkov I. Use and Misuse of MCDA to Support Decision Making Informed by Risk. // *Risk Analysis*. November 2020. DOI: 10.1111/risa.13631.
19. Rinaldi, S., Peerenboom J., Kelly T. Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies // *IEEE Control Systems*. 2001. 21(6) doi:10.1109/37.969131.
20. Kwan T., Leung H. A risk management methodology for project risk dependencies // *IEEE Transactions on Software Engineering*. 2011. Vol. 37(5). pp. 635-648.
21. Sediek O.A., El-Tawil S., McCormick J. Dynamic Modeling of In-Event Interdependencies in Community Resilience // *Nat. Hazards Rev.* 2020. Vol. 21(4). No. DOI: 10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000413.
22. Hochrainer-Stigler S., Colon C., Boza G., Poledna S., Rovenskaya E., Dieckmann U. Enhancing Resilience of Systems to Individual and Systemic Risk: Steps toward An Integrative Framework // *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2020. No. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101868>.
23. Sachenko L., Kondrashin A. Dependent Events Accounting in Organizational Risk Management and Resilience Cost Planning Tasks Using Matrix Equations. Computing for Physics and Technology. The 9th International Conference on Computing for Physics and Technology (CPT2021). Conference Proceedings // Nizhny Novgorod – Moscow – Pushchino, Russia, November 08-12, 2021, ISBN 978-5-6042891-5-0, p. 136-145. 2021.