

1.2. МАТРИЧНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО УЧЕТА ЗАВИСИМЫХ СОБЫТИЙ В ЗАДАЧАХ ПЛАНИРОВАНИЯ ЗАТРАТ НА УПРАВЛЕНИЕ РИСКОМ И ЖИЗНЕСТОЙКОСТЬ ОРГАНИЗАЦИЙ

Саченко Л.А.¹, Кондрашин А.В.²

¹ООО «Риск-профиль», Москва, Россия

²Ивановский государственный энергетический университет, Иваново, Россия

Поддержание деятельности компаний при неблагоприятных воздействиях и нарушениях различного рода во многом зависит от эффективности превентивных мер, а также мер реагирования на инциденты. При ограниченности ресурсов возникает задача получения максимальной отдачи от средств, направленных на управление сложной системой в кризисной ситуации, нахождения баланса между объемом предупредительных мер и мерами реагирования. В статье предлагается алгоритм планирования затрат на меры по управлению риском и жизнестойкости для случаев с зависимыми событиями. Использование алгоритма, основанного на матричных уравнениях, показывает разницу результатов, полученных с учетом зависимости событий и аналогичной модели без учета взаимосвязи. Это демонстрирует важность учета зависимости рисков событий и обосновывает использование линейно-алгебраического подхода. Кроме того, показан рост расхождения оценок для зависимых и независимых событий по мере роста неопределенности.

Введение

Важным фактором успеха при планировании мероприятий по управлению риском и жизнестойкости компаний является оптимальное распределение затрат. Как правило, мероприятия по управлению риском носят превентивный характер, а мероприятия по жизнестойкости направлены на повышение готовности к реагированию на инциденты и восстановлению деятельности после них. При этом, современные компании часто представляют собой сложные структуры со множеством взаимозависимых функций.

Исходя из этого, лицу, принимающему решение, требуется оптимально распределить ресурсы на проактивные и реактивные управленческие воздействия с учетом сложности системы таким образом, чтобы ожидаемый ущерб был минимален. Основной целью работы является исследование подходов к оптимизации комплексного воздействия на систему с зависимыми событиями в целях минимизации ожидаемого ущерба.

Фрагментарным решениям данной задачи, в силу ее актуальности, посвящено значительное число работ. Однако универсального комплексного решения «задачи о рисковом бюджете» на сегодняшний день не существует.

Во втором параграфе проведен анализ последних тенденций по количественной оценке и оптимизации жизнестойкости, оценкам эффективности превентивных мер по управлению риском. Показаны основные подходы, как количественные, так и смешанные, так или иначе затрагивающие вопросы баланса превентивных мероприятий и мер реагирования на инциденты для сложных систем.

В третьем параграфе представлена модель многофакторного воздействия на показатель полной стоимости риска при зависимых событиях, приведено решение с помощью матричных уравнений.

В четвертом параграфе на численном примере исследуется разница результатов оценок полной стоимости риска, полученной для тех же управляющих воздействий при учете зависимости рисков событий и без учета такой зависимости. Показано, что различия между полученными оценками нарастают по мере роста неопределенности.

1. Зависимые события в задачах оценки рисков и жизнестойкости

Несколько последних лет исследования по жизнестойкости демонстрируют растущую актуальность. К этому приводит рост частоты и тяжести наблюдаемых катастрофических явлений, как природных, так и техногенных. Поэтому жизнестойкость, представляющая собой процесс реагирования и восстановления после различных непредвиденных сбоев, должна поддерживаться на достаточном и оптимальном уровне. В задачах принятия решений по жизнестойкости часто используется подход, при котором понятие жизнестойкости формализуется для конкретной системы и впоследствии оптимизируется. Например, Конг и др. [Kong J., Zhang C., Simonovic S., 2021] применяют такой подход для региональных систем противодействия природным катастрофам. Хао и др. [Hao, Y., Wang Y., Jia L., He Z., 2021] анализируют жизнестойкость взаимозависимой технотронной системы, совмещая анализ робастности системы, ее способности к восстановлению и критического числа отремонтированных узлов при разных стратегиях. В работе Фанга и Зио [Fang Y., Zio, E., 2019] для оценки жизнестойкости взаимозависимых систем критической инфраструктуры используются модели «нападающий-защитник» и «защитник-нападающий» из теории игр. Модели подобного рода применяются для выделения оптимальных стратегий жизнестойкости электрических сетей, железнодорожных систем, распределению товаров по сети сбыта. Ганин и др. [Ganin, A.A., Massaro E., and others, 2016], Линков и др. [Linkov, I., Trump, B.D., 2019], напротив, придерживаются позиции, что оценка жизнестойкости должна проводить-

ся вне зависимости от модели угроз, опираясь только на внутренние характеристики системы: надежность, робастность и пр.

В работе [Proag, S.-L., Proag V., 2014] рассмотрены возможные подходы по применению анализа «затраты-выгоды» к внедрению мер жизнестойкости. Первым шагом при проведении анализа выделено определение списка альтернатив. Подчеркивается, что одновременное соединение или изменение даже двух-трех исходных данных приводит к кратному росту числа альтернатив. Выбор среди возможных альтернатив предлагается делать экспертно. Благоевич и др. [Blagojevic, N., Didier M., 2021] поставили задачу поиска наиболее эффективных направлений инвестиций в жизнестойкость сложных взаимосвязанных систем. Решение предложено на основе анализа чувствительности по индексу Соболя [I. M. Sobol, 1993], который ранжирует элементы системы по степени вклада в суммарную производительность. Такой подход позволяет выделить наиболее значимые элементы системы как первоочередные направления вложений в жизнестойкость. С другой стороны, ранжирование по степени значимости позволяет пренебречь наименее значимыми элементами и существенно снизить сложность рассматриваемой системы. Схожий подход к приоритизации планов аварийного восстановления сети после сбоев предложен в работе [Xu, Z., Ramirez-Marquez J.I., Liu Y., Xiahou T., 2020]. Он основан на оценке вклада элемента в пропускную способность сети, а также времени восстановления конкретного элемента после сбоя.

В статье [T. Itoi, 2020] среди неотъемлемых качеств жизнестойкой системы выделяются учет сложности системы при проведении ее изменений. Ринальди и др. [Rinaldi, S., Peerenboom J., Kelly T., 2001] подчеркивают важность учета эмерджентного поведения сложных систем, когда система приобретает свойства, не характерные для ее элементов в отдельности.

При рассмотрении управляющих мер по формированию жизнестойкости различных систем превентивные меры, как правило, рассматриваются отдельно от мер реагирования на инциденты. Наиболее популярным инструментом, используемым для ранжирования превентивных мер по степени эффективности, является анализ чувствительности. Данный метод наиболее удобен при оценке независимого воздействия факторов риска. В некоторых случаях это ограничение по независимому воздействию может быть преодолено путем определения взаимных чувствительностей факторов риска второго порядка [В. Котов, 2019], однако это справедливо лишь в области радиуса сходимости ряда Тейлора. Это ограничение снижает частоту использования метода анализа чувствительности, особенно при необходимости оценки многофакторного воздействия, и мотивирует исследователей к использованию ряда других методов. Так, Макинтош и Беккер [McIntosh, RD., Becker A., 2020] предлагают принцип распределения ресурсов, необходимых портам североатлантического побережья США для реагирования на природные катастрофы. Предлагается распределение ресурсов на основе ранжирования портов по степени уязвимости. Сандри и др. [Sandri, O., Hayes J., 2020] проводят анализ эффективности систем управления газотранспортными системами, причем анализ управляющей системы включает всех стейкхолдеров, а также взаимосвязи между ними. По результатам анализа авторы выявляют элементы управления, позволяющие снизить риск аварий, а также области конфликтующих интересов, оказывающих негативное воздействие на эффективность предупредительных мер. Журавин и др. [Журавин, С.Г., Немцев, В.Н., Куликов С.В., 2010] применили теорию марковских процессов для описания, исследования и управления сложным технологическим процессом – планированием ремонтов стана горячей прокатки на металлургическом предприятии. В результате оптимизации по показателю надежности (безопасности) эксплуатации основных фондов производственный комплекс на практике продемонстрировал более надежную работу оборудования, однако остались вопросы по экономической эффективности примененного подхода. В области планирования радиационной защиты оптимизируется коллективная доза на основе анализа затраты-выгоды. В отличие от других областей деятельности, уровень затрат на обеспечение радиационной безопасности настолько высок, что стоимостной критерий при планировании мер защиты является определяющим. Естественно, оптимизация проводится исключительно в области соответствия требуемым уровням коллективного и индивидуального риска. Однако, как правило, такой подход применяется к отдельным, наиболее затратным мерам, но не ко всему комплексу мер.

Сравнительно небольшое число работ затрагивают совместно как меры управления риском до инцидента, так и аспекты реагирования. В то же время эти области деятельности, как сообщающиеся сосуды, взаимодополняют друг друга: чем эффективнее выполнены превентивные мероприятия, тем меньше нагрузка на меры реагирования. Конг и др. [Kong J., Zhang C., Simonovic S., 2021] предлагают комбинированные стратегии противодействия природным катастрофам, сочетающие превентивные меры и меры реагирования. В работе [He, F., & Zhuang, J., 2015] на основе модели, аналогичной полной стоимости риска, выполнены исследования оптимального соотношения затрат до и после инцидента в зависимости от вида функции распределения ожидаемого убытка. При этом предполагается линейный отклик всей системы целиком при измерении ее готовности к инциденту и эффективности реагирования на единицу вложений, а отдельные компоненты системы не рассматриваются.

Поскольку в большинстве задач, касающихся планирования поведения сложных взаимосвязанных систем, отсутствует достаточное количество информации для проведения количественных оценок, значительное число работ посвящено применению квазиколичественных методов, опирающихся на экспертные оценки. Качалов и др. [Качалов, Р.М., Кобылко А.А. и др., 2017] вводят процедуру ранжиро-

вания антирисковых управленческих воздействий, используя функции принадлежности теории нечеткой логики для описания взаимосвязи между факторами риска и соответствующими им последствиями. Значительное количество исследований используют различные модификации метода анализа иерархий. Покровский [А. Покровский, 2011] с помощью пакета нейросетевых программ выполняет оценку значений средней (хордовой) эластичности приоритетов направлений инвестиций по значимости рисков различного вида, определяет их рейтинги, выделяет ограничения при применении данного метода. Кейслер и Линков [Keisler, J.M., Linkov I., 2020] позиционируют метод анализа иерархий как основной инструмент риск-ориентированного принятия решений, выделяют ряд его безусловных достоинств и, вместе с тем, выделяют достаточно серьезные недостатки и ограничения, которые необходимо учитывать при применении данного метода. Коллективная работа ряда авторов [Linkov I. et. al., 2018] носит программный характер и предлагает новый подход к управлению риском в быстро развивающихся технологических направлениях. В силу того, что количественных данных по рискам новых технологий явно недостаточно для проведения количественного анализа риска, а общественная значимость и польза могут быть очень высокими, предлагается компенсировать недостаток знаний о рисках новых технологий шириной охвата проблемы и оперативным участием регулирующих органов, научного сообщества и заинтересованных сторон.

Таким образом, значительное число работ так или иначе затрагивают проблему оптимизации затрат на управление риском и жизнестойкость с применением количественных и, что чаще – квазиколичественных методов. Однако задача комплексного подхода к оптимизации вложений в управляющие меры по риску и жизнестойкости исследована недостаточно.

Для случаев, когда количественная оценка возможна, в последующих параграфах разработана модель оценки полной стоимости риска для многофакторного управленческого воздействия на систему с зависимыми событиями. А также проведены исследования на численном примере, показывающие отличия по результатам аналогичных воздействий без учета зависимости событий.

Эта же модель будет полезна для более глубокой проработки альтернатив по управлению риском и анализе характера отклика системы на управленческие воздействия при недостаточности данных для проведения количественной оценки.

2. Модель многофакторного воздействия на показатель полной стоимости риска при зависимых событиях

Показатель полной стоимости риска включает все затраты организации, связанные с рисками. Этот показатель часто используется для оптимизации мер по управлению риском и страхованию. Полная стоимость риска TCR определяется суммой следующих компонентов:

$$TCR = C_{ret} + C_{ins} + C_{rm},$$

где C_{ret} – резервы связанные с самостоятельным покрытием непредвиденных потерь; C_{ins} – страховая премия; C_{rm} – расходы на нестраховые меры по управлению риском.

Поскольку страхование является лишь средством финансирования убытка, оно практически не влияет на внутренние характеристики организации, приводящие к различным инцидентам и готовность противостоять кризисам. Поэтому в целях настоящего исследования будем считать компонент C_{ins} постоянным, а основным изучаемым показателем примем скорректированную с учетом этого полную стоимость риска \overline{TCR} :

$$\overline{TCR} = C_{ret} + C_{rm}.$$

В свою очередь, как показано в [L. Sachenko, 2020], расходы на нестраховые меры управления риском будут состоять из двух компонентов – расходы на снижение риска (C_{risk}) и расходы на жизнестойкость (C_{res}): $C_{rm} = C_{risk} + C_{res}$.

Тогда основной задачей при минимизации полной стоимости риска будет выбор таких превентивных мер C_{risk} и мер по реагированию на инциденты C_{res} , которые приведут к наименьшим ожидаемым потерям C_{ret}

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

Для решения задачи (1) была разработана модель, представленная на Рис. 1. Такого рода модель изначально планировалась для управления рисками производственного предприятия, соответственно, для иллюстрации используем производственные риски.

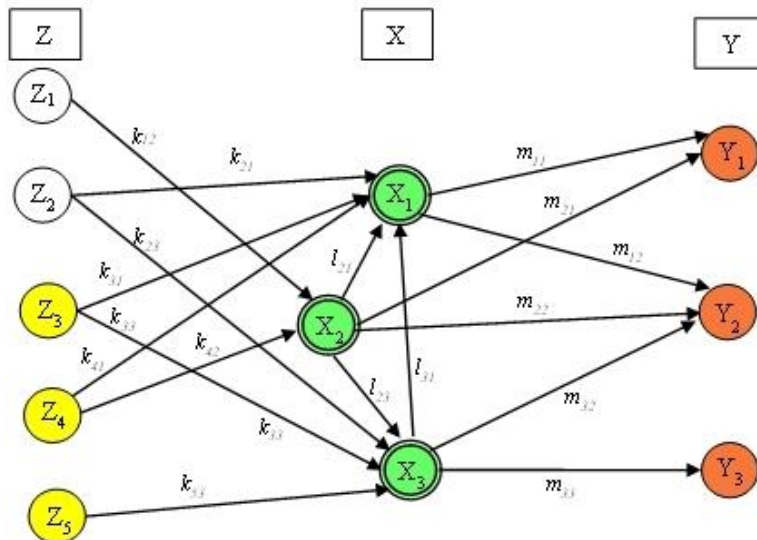


Рис. 2. Модель полной стоимости риска с многофакторным воздействием на зависимые события

Первая колонка Z представлена множеством факторов, оказывающих влияние на события из множества X . Для решения задачи (1) была разработана модель, представленная на Рис. 1 белым цветом выделены условно неуправляемые факторы Z_1 и Z_2 , желтым – управляющие факторы $Z_3 – Z_5$. На размерность величин Z_1 и Z_2 ограничений не накладывается. Это могут быть природные явления, износ оборудования, человеческий фактор и т.п. $Z_3 – Z_5$ представлены размером затрат на управляющие мероприятия. Примером таких мероприятий могут быть планово-предупредительный ремонт, обучение персонала по действиям в кризисных ситуациях, разработка регламентов, установка оборудования по локализации последствий аварий и т.п. Коэффициенты k_{ij} отражают степень влияния фактора Z_i на событие X_j . Для управляемых факторов это влияние будет выражено в степени влияния на события из множества X на единицу затрат.

Множество событий X с частотой реализации $X_1 – X_3$ в год иллюстрирует простейший случай связанных событий. Для производственного предприятия, например, X_1 – неплановый перерыв в производстве, X_2 – поломка оборудования, X_3 – авария с выбросом вредных веществ в окружающую среду. Взаимосвязь выражается в том, что причиной простоя может быть поломка оборудования. Также поломка может быть причиной выброса вредных веществ, а выброс, в свою очередь, почти наверняка приведет к простоя предприятия. Степень влияния события X_i на X_j выражена коэффициентами l_{ij} .

В последнем третьем столбце Y представлен спектр ущербов $Y_1 – Y_3$, упорядоченных по возрастанию. Так, на Рис. 2 Y_1 – текущие убытки, Y_2 – серьезные события, Y_3 – катастрофические события. При этом m_{ij} отражают долю событий X_i с последствиями Y_j .

Исходная система уравнений (относительно событий X):

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

приведенная система уравнений:

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

Тогда матричное представление задачи вычисления полной стоимости риска при взаимозависимых событиях будет выглядеть следующим образом:

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

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

Полученная модель расчета полной стоимости риска позволит провести анализ данного показателя при изменении управляющих факторов, выявить существующие зависимости и, в конечном итоге, выбрать оптимальный вариант вложений.

3. Результаты сравнительной оценки для зависимых и независимых событий

При инвестировании в меры по управлению риском возникает задача о поиске наилучшего соотношения между превентивными мерами и мерами реагирования на инцидент. Оптимальное решение может быть получено путем выделения наиболее эффективных подготовительных мер и их баланса с мерами, способствующими организациям противостоять совершившимся событиям.

Для решения задачи проведено исследование оценок полной стоимости риска, полученных на численном примере с помощью модели, представленной в параграфе 3, а также сравнение полученных оценок для тех же исходных данных на модели, не учитывающей зависимость событий.

Анализ полученных результатов при зависимых и независимых событиях выполнялся для двух задач:

1) сравнение линейных моделей полной стоимости риска в зависимости от затрат на превентивные меры, полученных в результате полного факторного эксперимента 2^2 (два фактора изменяются на двух уровнях);

2) сравнение линейных моделей полной стоимости риска в зависимости от затрат на превентивные меры и меры реагирования на инциденты в результате полного факторного эксперимента 2^3 (3 фактора на двух уровнях).

3.1. Факторное исследование мер по управлению риском

В данном параграфе на численном примере проводится сравнение оценок полной стоимости риска, полученных при аналогичных изменениях факторов для системы с зависимыми событиями и той же системы без учета взаимосвязи.

Предположим, что на определенном предприятии наблюдается некоторая частота инцидентов разного рода X_1-X_3 . Необходимо найти оптимальное соотношение затрат на превентивные мероприятия (Z_5+Z_6), обеспечивающее минимум полной стоимости риска ($Y_1+Y_2+Y_3$).

Для расчетного сравнения применены модели, представленные на Рис. 2 (а, б) соответственно. На рисунках факторы $Z_1 - Z_4$ приняты условно неуправляемыми (пунктирные стрелки), факторы Z_5 и Z_6 – управляющие (сплошные стрелки). Исходные наблюдаемые частоты инцидентов $X_1 - X_3$ равны в обоих случаях, их значения (10,10,0,02). То есть условно предполагается, что происходит 10 поломок в год, 10 простоев и один раз в 50 лет – авария с выбросом вредных веществ. В случае (а) связь между событиями учитывается, а в случае (б) – нет.

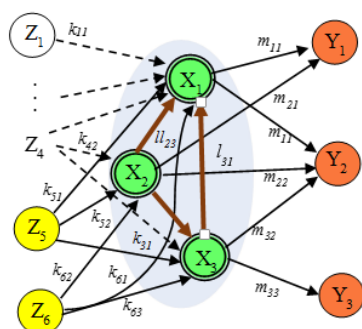


Рис. 2(а). Воздействие факторов Z_5 и Z_6 на зависимые события

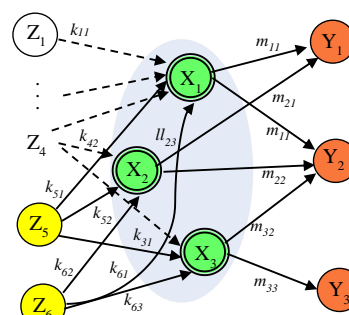


Рис. 2(б). Воздействие факторов Z_5 и Z_6 на независимые события

Численное представление исходных данных для расчета:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & -0,5 & -0,9 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -0,001 & 1 \end{pmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 3 & 1 & 0,982 & -0,1 & 0 \\ 3 & 6 & 0,5 & 0,5 & -2 & -1 \\ 0,006 & 0,003 & 0,0005 & 0,005 & -0,002 & -0,002 \end{bmatrix},$$

$$D = \begin{pmatrix} 0,9 & 0,9 & 0,1 \\ 0,1 & 0,1 & 0,9 \end{pmatrix}.$$

При проведении полного факторного эксперимента 2^2 факторы Z_5 и Z_6 изменялись от 0 до 3. Сами превентивные меры могут быть любыми, в данной модели предполагалось, что Z_5 – обучение персонала, Z_6 – затраты на плано-предупредительный ремонт. В результате для двух случаев получены следующие линейные модели, представленные в Табл.1:

Табл.1. Линейные модели полной стоимости риска для событий с зависимостью и без по результатам полного факторного эксперимента 2^2

N	Взаимосвязанные события	События без взаимосвязи
1	$Y_1 = 10,55 - 5,4 Z_5 - 2,04 Z_6 + 0,01 Z_5 Z_6$	$Y_1 = 12,6 - 4,05 Z_5 - 1,35 Z_6$
2	$Y_2 = 1,27 - 0,6 Z_5 - 0,23 Z_6 - 0,005 Z_5 Z_6$	$Y_2 = 1,4 - 0,45 Z_5 - 0,14 Z_6$
3	$Y_3 = 0,0076 - 0,0048 Z_5 - 0,0036 Z_6$	$Y_3 = 0,0112 - 0,0024 Z_5 - 0,0024 Z_6$

Очевидное отличие полученных моделей для рассмотренного примера состоит в том, что в случае с зависимыми событиями размер оценки ожидаемого ущерба на каждом из уровней меньше, в то же время, уровень эффективности воздействия факторов выше, чем в случае с независимыми объектами воздействия. Естественно, отличие может быть и противоположным для других исходных данных. Это обстоятельство особенно значимо для событий, приводящим к катастрофическим ущербам и требующим, соответственно, существенных затрат.

Помимо отличий в оценке степени воздействия факторов на вероятность событий, во втором случае не был выявлен эффект взаимодействия между факторами, в то же время он присутствует в линейных моделях, полученных на зависимых событиях.

В результате на численном примере показано, что более полное представление о модели функционирования объекта воздействия может привести к более рациональным решениям относительно расходования средств на превентивные мероприятия. И чем выше размер ожидаемого убытка, тем выше значимость учета существующих взаимосвязей.

3.2. Факторное исследование мер по жизнестойкости

Если в случае с превентивными мерами основное отличие полученных моделей полной стоимости риска выражалось только в разнице абсолютных значений факторов, то введение в задачу мер реагирования на уже произошедшие инциденты, характерных для жизнестойкости, существенно меняет картину. Действительно, исходя из предположений модели (2) для случаев, приведенных на Рис. 2 (а,б), воздействие факторов Z_5 и Z_6 на события $X_1 - X_3$ являются линейными, поэтому при росте степени неопределенности, то есть отклонений значения неуправляемых факторов, относительные соотношения модели по воздействию факторов сохраняются.

Меры же по реагированию на инцидент Z_7 выражаются в том, что не влияют на вероятность событий $X_1 - X_3$, а ограничивают размер убытка. Как показано на Рис. 3, катастрофический ущерб переходит в серьезный, серьезный – в текущий.

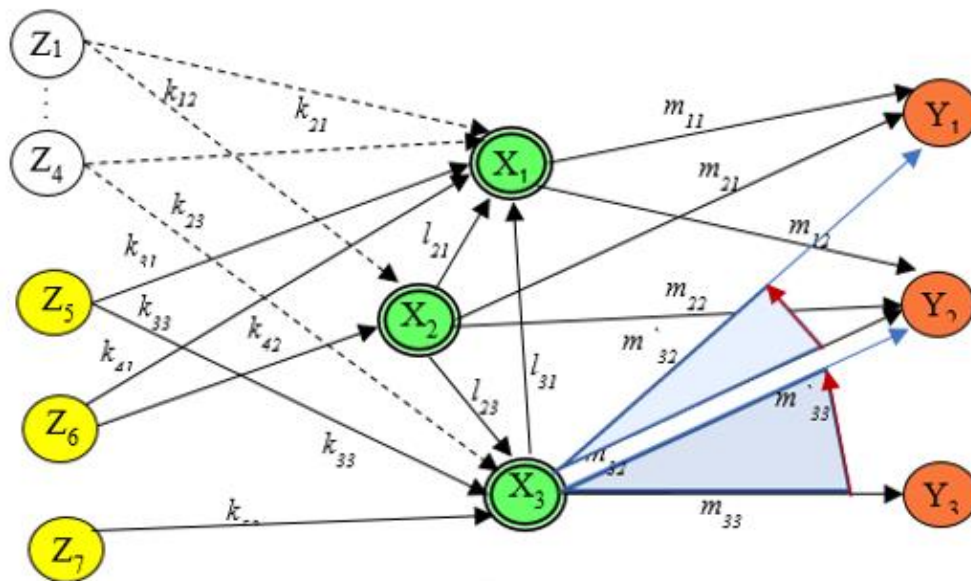


Рис. 3. Принцип воздействия фактора Z_7 по реагированию на инцидент

Для проведения сравнительного анализа линейных модели полной стоимости риска при введении управляющих мер по жизнестойкости был использован полный факторный эксперимент 2^3 (3 фактора на двух уровнях), когда к уже известным по параграфу 4.1 факторам Z_5 и Z_6 добавлен фактор Z_7 , оказывающий воздействие непосредственно на размер ущерба по принципу, представленному на Рис. 3. В качестве примера такого воздействия можно привести различные системы локализации аварий, ловушки расплава активных зон для атомных реакторов и т.п. Как и в предыдущем параграфе, исследование проводилось для двух случаев: зависимые события и независимые события. В результате расчетов по методу Йетса получены следующие линейные модели, представленные в Табл.2:

Табл.2(а). Линейные модели полной стоимости риска по результатам полного факторного эксперимента с применением мер жизнестойкости 2^3 для зависимых событий

	Зависимые события
	$Y_1 = 10,6 - 5,4 Z_5 - 2,04 Z_6 + 0,01 Z_5 Z_6$
	$Y_2 = 1,18 - 0,6 Z_5 - 0,23 Z_6 + 0,004 Z_7 - 0,005 Z_5 Z_6 - 0,003 Z_5 Z_7 - 0,002 Z_6 Z_7$
	$Y_3 = 0,004 - 0,0024 Z_5 - 0,0018 Z_6 - 0,0038 Z_7 + 0,0024 Z_5 Z_7 + 0,0018 Z_6 Z_7$

Табл.2(б). Линейные модели полной стоимости риска по результатам полного факторного эксперимента с применением мер жизнестойкости 2^3 для независимых событий

N	События без взаимосвязи
1	$Y_1 = 12,6 - 4,05 Z_5 - 1,35 Z_6$
2	$Y_2 = 1,4 - 0,45 Z_5 - 0,15 Z_6 + 0,005 Z_7 - 0,002 Z_5 Z_7 - 0,002 Z_6 Z_7$
3	$Y_3 = 0,006 - 0,0012 Z_5 - 0,0012 Z_6 - 0,0056 Z_7 - 0,0012 Z_5 Z_7 - 0,0012 Z_6 Z_7$

При сравнении полученных моделей можно сделать те же самые выводы, что и в предыдущем параграфе: модель с зависимыми событиями показывает больший эффект от вложений в управление

риском и жизнестойкость, чем аналогичная модель, предполагающая независимость событий. Помимо этого, в моделях (а, б) Табл.2 виден эффект от «перетекания» катастрофических ущербов Y_3 в серьезные Y_2 на примере положительных коэффициентов при факторе Z_7 в модели для серьезных ущербов Y_2 .

Однако наибольший интерес представляло исследование поведения модели при росте неопределенности. Для этого на том же численном примере были проведены оценки моделей с зависимостью и без по мере синхронного роста числа событий, происходящих по необъяснимым причинам. Результаты оценки коэффициента при факторе Z_7 , отражающем эффективность затрат на жизнестойкость, представлены на Рис. 4.

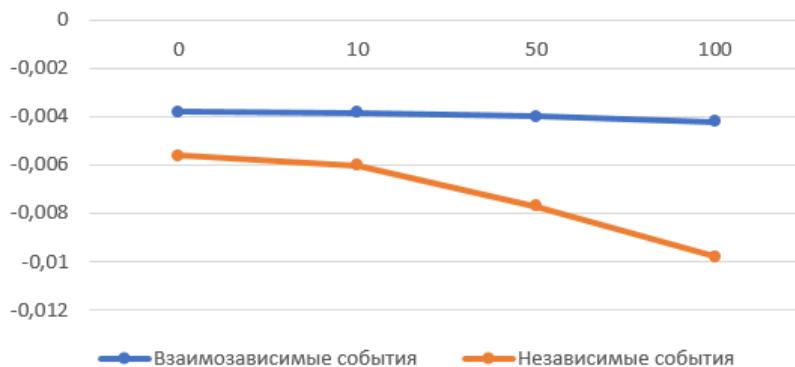


Рис. 4. Эффект снижения убытка от вложений в жизнестойкость по мере роста неопределенности для зависимых и независимых событий

Оказалось, что по мере роста неопределенности система, не учитывающая взаимосвязь событий, дает существенно больший ожидаемый эффект от вложений в жизнестойкость, в отличие от системы со связанными событиями. Этот эффект иллюзорной управляемости может серьезно сместить принятое решение по инвестициям от оптимального, тем самым не позволив организации достигнуть своих целей в критический момент. Очевидно, также, что при другой конфигурации системы отклонение результата может быть направлено и в противоположную сторону.

3. Заключение

В статье на примере модели многофакторного воздействия на показатель полной стоимости риска продемонстрирована важность учета зависимостей в системе воздействия при принятии управленческих решений. На численном примере показано, что даже при незначительном количестве взаимосвязей присутствует существенное расхождение как по оценке эффективности действия различных управленческих факторов на полную стоимость риска, так и по степени взаимосвязи между факторами.

Еще более важным полезным свойством представленной модели является возможность одновременного анализа превентивных мер и мер реагирования на инциденты. При анализе одновременного воздействия таких мер модельное исследование выявило нарастание расхождения в оценках полной стоимости риска при аналогичных управляющих воздействиях по мере нарастания неопределенности. Модель, учитывающая зависимости внутри исследуемой системы, показала большую устойчивость результата при росте неопределенности.

Исследования такого рода могут быть использованы как непосредственный инструмент при принятии решений о распределении средств «рискового бюджета», так и как вспомогательное средство информации о поведении системы в ситуациях при недостаточности исходных данных.

Кроме того, в данной работе не были рассмотрены случаи сложных систем с взаимозависимыми событиями. Можно предположить, что существует высокая степень вероятности того, что этот же математический аппарат способен решать и задачи с присутствием взаимозависимых событий.

Литература

1. 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. doi.org/10.1016/j.ress.2021.107538, 2021.
2. Hao, Y., Wang Y., Jia L., He Z. Analysis of Resilience Under Repair Strategy in Interdependent Mechatronic System // IEEE Access., p. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3051502, 2021.
3. 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., pp. DOI: 10.1007/978-3-030-00024-0_6, 2019.
4. Ganin, A.A., Massaro E., Gutfraind A., Steen N., Keisler J.M., Kott A., Mangoubi R., Linkov I. Operational resilience: concepts, design and analysis// Scientific reports., № PMC4726063, 2016.
5. Linkov, I., Trump, B.D. The Science and Practice of Resilience. 10.1007/978-3-030-04565-4, Springer, 2019.

6. Proag, S.-L., Proag V. The cost benefit analysis of providing resilience// *Procedia Economics and Finance.*, т. 18, 2014.
7. Blagojevic, N., Didier M., Stojadinovic. Quantifying Component Importance for Disaster Resilience of Communities with Interdependent Civil Infrastructure Systems. Preprint., p. DOI: 10.31224/osf.io/hzmy8, 2021.
8. I. M. Sobol. Sensitivity Estimates for Nonlinear Mathematical Models// *Mathematical and Computer Modelling.*, pp. 407-414, 1993 (1).
9. 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*, p. doi: 10.1016/j.ress.2019.106591, 2020.
10. T. Itoi. System Resilience for Sustainable Development and Disaster Risk Reduction. The Seventh Asian-Pacific Symposium on Structural Reliability and Its Applications (APSSRA2020)., Tokyo, Japan., 2020.
11. Rinaldi, S., Peerenboom J., Kelly T. Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies// *IEEE Control Systems.* p. 21(6) doi:10.1109/37.969131, 2001.
12. В. Котов, Риск-анализ инвестиционных проектов на основе функций чувствительности и теории нечетких множеств., Санкт-Петербург: Астерион, 2019.
13. McIntosh, RD., Becker A. Applying MCDA to weight indicators of seaport vulnerability to climate and extreme weather impacts for U.S. North Atlantic ports// *Environ Syst Decis.*, doi.org/10.1007/s10669-020-09767 -y, 2020.
14. Sandri, O., Hayes J., Holdsworth S. Regulating urban development around major accident hazard pipelines: a systems comparison of governance frameworks in Australia and the UK// *Environ Syst Decis.*, pp. <https://doi.org/10.1007/s10669-020-09785-w>, 2020.
15. Журавин, С.Г., Немцев, В.Н., Куликов С.В. Снижение производственных рисков в условиях планирования ремонтов оборудования на основе марковских цепей// *Страховое дело*, pp. 35-40., Март 2010.
16. He, F., & Zhuang, J. Balancing pre-disaster preparedness and post-disaster relief// *European Journal of Operational Research.*, p. 246–256, 2016 doi:10.1016/j.ejor.2015.12.048.
17. Качалов, Р.М, Кобылко А.А., Слепцова Ю.А., Ставчиков А.И., Завьялова Е.А., Куршина Ф.Л., Плетененко О.А. Концептуальное моделирование процессов управления экономическим риском на основе теории нечеткой логики., Москва: ЦЭМИ РАН, 2017.
18. А. Покровский, «Оценка чувствительности рисков при изменении определяющих факторов// Эффективное антикризисное управление.», 4 2011.
19. Keisler, J.M., Linkov I. Use and Misuse of MCDA to Support Decision Making Informed by Risk// *Risk Analysis.*, p. DOI: 10.1111/risa.13631, November 2020.
20. Linkov I. et. al. Comparative, collaborative, and integrative risk governance for emerging technologies// *Environment Systems and Decisions.*, pp. doi.org/10.1007/s10669-018-9686-5, 2018.
21. L. Sachenko, «CPT2020 Computing for Physics and Technology. The 8th International Conference on Computing for Physics and Technology (CPT2020). Conference Proceedings.» в *Organizational resilience. Cost optimization approaches.*, Nizhny Novgorod, 2020.

References in Cyrillics

1. 1. 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*. doi.org/10.1016/j.ress.2021.107538, 2021.
2. Hao, Y., Wang Y., Jia L., He Z. Analysis of Resilience Under Repair Strategy in Interdependent Mechatronic System // *IEEE Access.*, p. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3051502, 2021.
3. 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.*, pp. DOI: 10.1007/978-3-030-00024-0_6, 2019.
4. Ganin, A.A., Massaro E., Gutfraind A., Steen N., Keisler J.M., Kott A., Mangoubi R., Linkov I. Operational resilience: concepts, design and analysis// *Scientific reports.*, № PMC4726063, 2016.
5. Linkov, I., Trump, B.D. *The Science and Practice of Resilience.*, 10.1007/978-3-030-04565-4, Springer., 2019.
6. Proag, S.-L., Proag V. The cost benefit analysis of providing resilience// *Procedia Economics and Finance.*, т. 18, 2014.
7. Blagojevic, N., Didier M., Stojadinovic. Quantifying Component Importance for Disaster Resilience of Communities with Interdependent Civil Infrastructure Systems. Preprint., p. DOI: 10.31224/osf.io/hzmy8, 2021.
8. I. M. Sobol. Sensitivity Estimates for Nonlinear Mathematical Models// *Mathematical and Computer Modelling.*, pp. 407-414, 1993 (1).
9. 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*, p. doi: 10.1016/j.ress.2019.106591, 2020.

10. T. Itoi. System Resilience for Sustainable Development and Disaster Risk Reduction. The Seventh Asian-Pacific Symposium on Structural Reliability and Its Applications (APSSRA2020)., Tokyo, Japan., 2020.
11. Rinaldi, S., Peerenboom J., Kelly T. Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies// IEEE Control Systems. p. 21(6) doi:10.1109/37.969131 , 2001.
12. V. Kotov, Risk-analysis of investment projects on the base of sensitivity functions and fuzzy logic theory. Saint-Petersburg: Asterion, 2019.
13. McIntosh, RD., Becker A. Applying MCDA to weight indicators of seaport vulnerability to climate and extreme weather impacts for U.S. North Atlantic ports// Environ Syst Decis., doi.org/10.1007/s10669-020-09767 -y, 2020.
14. Sandri, O., Hayes J., Holdsworth S. Regulating urban development around major accident hazard pipelines: a systems comparison of governance frameworks in Australia and the UK// Environ Syst Decis., pp. <https://doi.org/10.1007/s10669-020-09785-w>, 2020.
15. Zhuravin, S.G., Nemtsev, V.N., Kulikov S.V. Reduction of production risks in terms of planning equipment repairs based on Markov chains.// Insurance business, pp. 35-40., Март 2010.
16. He, F., & Zhuang, J. Balancing pre-disaster preparedness and post-disaster relief// European Journal of Operational Research., p. 246–256, 2016 doi:10.1016/j.ejor.2015.12.048.
17. R.M. Kachalov, Kobylko A.A., Sleptsova Y.A., Stavchikov A.I., Zavialova E.A., Kurshina F.L., Pletenenko O.A. Conceptual Modeling of Risk Management Processes Based on the Fuzzy Logic Theory: Collec-tive monograph / by ed. R.M. Kachalov. Moscow, CEMI Russian Academy of Sciences, 2017. – 113 p. (Rus.)
18. A. Pokrovsky. Risk sensitivity assessment when determining factors change// Effective anti-crisis management, 4, 2011.
19. Keisler, J.M., Linkov I. Use and Misuse of MCDA to Support Decision Making Informed by Risk// Risk Analysis., p. DOI: 10.1111/risa.13631, November 2020.
20. Linkov I. et. al. Comparative, collaborative, and integrative risk governance for emerging technologies// Environment Systems and Decisions., pp. doi.org/10.1007/s10669-018-9686-5, 2018.
21. L. Sachenko, «CPT2020 Computing for Physics and Technology. The 8th International Conference on Computing for Physics and Technology (CPT2020). Conference Proceedings.» в Organizational resilience. Cost optimization approaches., Nizhny Novgorod, 2020.

Саченко Лариса Анатольевна – к.э.н., Генеральный директор ООО «Риск-профиль»,
ORCID: 0000-0002-1516-7802
E-mail: sachenko@risk-profile.ru

Кондрашин Анатолий Васильевич – к.т.н., профессор
Ивановского государственного энергетического университета,
ORCID: 0000-0003-4702-1848

Ключевые слова

Матричные уравнения, зависимые события, управление рисками, жизнестойкость, оптимизация затрат.

Larisa Sachenko, Anatoly Kondrashin. Dependent Events Accounting in Organizational Risk Management and Resilience Cost Planning Tasks Using Matrix Equations

Keywords

Matrix equations, dependent events, risk management, resilience, cost optimization,

DOI: 10.34706/DE-2022-05-02

JEL classification C02 – Математические методы; M15 Управление информационными технологиями.

Abstract

The maintenance of companies' activities in the event of adverse impacts and disruptions of various kinds largely depends on the effectiveness of preventive measures and incident response measures. With limited resources, there arises the task of getting the maximum return from the investments in managing a complex system in a crisis situation, of finding a balance between the volume of preventive measures and response measures. The article considers approaches to planning the organizational total cost of risk and resilience for cases with dependent events. Using the model of total cost of risk estimation based on matrix equations, a full factor experiment was conducted and the difference between the results obtained by using the event dependency and a similar model without dependency was shown. An increase in the distortion of the estimates obtained without considering the dependencies between the events with increasing uncertainty was shown to demonstrate the significance of taking into account the dependencies of risk events.