УПРАВЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫМИ РИСКАМИ СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕХАНИЗМА «КОГНИТИВНОЙ ИГРЫ»

Калашников А.О.[1], Аникина Е.В.[2]

Аннотация:

Цель статьи: *разработка механизмов для решения задач управления информационными рисками сложных систем в условиях неопределенности и взаимного влияния элементов системы друг на друга.*

Метод исследования: *теоретико-игровое математическое моделирование процессов управления рисками сложных систем на основе арбитражных схем и многошаговых игр на когнитивных картах.*

Полученный результат: *рассмотрена общая модель сложной системы (например, гетерогенной компьютерной сети), в рамках которой менеджер риска (risk-manager) осуществляет эффективное управление рисками путем распределения имеющегося в его распоряжении ресурса между ее элементами (узлами компьютерной сети). Для оценки состояния элементов системы предложены функции локального риска, удовлетворяющие некоторым заданным требованиям, а для оценки состояния системы в целом – функция интегрального риска.*

Показано, что в случае независимости (отсутствия взаимного влияния друг на друга) элементов системы для нахождения эффективного распределения ресурса может быть использован теоретико-игровой подход на основе арбитражной схемы, основанной на принципах стимуляции и неподавления (МС-решение).

Для случая, когда изменения уровня риска для одного элемента системы может оказывать существенное влияние на уровни рисков других элементов, предлагается совместное использование теоретико-игровых моделей на основе МС-решения и многошаговой «когнитивной игры».

Ключевые слова: *локальный риск, интегральный риск, менеджер риска, теоретико-игровые модели, арбитражная схема, максимально стимулирующее решение, когнитивная карта, многошаговая когнитивная игра.*

DOI: 10.21681/2311-3456-2020-04-2-10

Введение

Современный этап развития России можно охарактеризовать одним словом – цифровизация, поскольку сфера и объемы использования цифровых, информационных технологий расширяются и возрастают с каждым днем. Данный факт находит свое отражение, в том числе, в рамках программ реализации Национальных проектов, принятых в России в 2018-19 гг., причем не только тех, которые, в той или иной степени, напрямую касаются внедрения цифровых, информационных технологий в различные сферы государственной и экономической деятельности, например, «Цифровая экономика», «Наука» или «Образование», но и тех, которые предполагают существенное повышение качества жизни и развития граждан: «Здравоохранение», «Образование», «Культура», «Безопасные и качественные автомобильные дороги», «Жильё и городская среда», «Экология» и ряд других.

В рамках указанных проектов создается большое количество крупномасштабных, распределенных систем, зачастую, не имеющие аналогов как по своей сложности, с одной стороны, так и по размерам потенциальных угроз, возникающих в случае их отказа или некорректной работы, с другой [1, 2].

Таким образом, проблема обеспечения безопасности и управления рисками сложных систем, в настоящее время, становится как никогда актуальной и злободневной. Причем, это касается не только активного внедрения существующих методов и средств информационной безопасности и управления рисками, но и их совершенствования, а также развития новых подходов для решения указанных проблем.

В тоже время, проведенный анализ показывает, что за редким исключением новые подходы к решению проблем управления рисками и безопасностью сложных систем с осуществляются исключительно с традиционных позиций, когда в качестве механизмов управления рассматривается набор *независимых*, автономных цепочек вида: *типовой риск – типовой сценарий – типовые ресурсы*. Данный подход предполагает, что события, в рамках которых реализуются типовые ри-

1 Калашников Андрей Олегович, доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории «Сложных сетей» ФГБУН Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия. E-mail: aokalash@ipu.ru

2 Аникина Евгения Владимировна, научный сотрудник лаборатории «Сложных сетей» ФГБУН Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия. E-mail: janet0584@mail.ru

ски, происходят независимо друг от друга и, поскольку оценка вероятности указанных событий незначительна, то и вероятностью *одновременного* наступления нескольких таких событий можно пренебречь. Из данного допущения, в свою очередь, следует, что, поскольку в некоторый период времени реализуется только одно риск-образующее событие, то для его обнаружения, предупреждения и ликвидации его последствий может быть задействован единственный типовой сценарий и использован определенный этим сценарием набор типовых ресурсов.

К сожалению, в современных условиях, данный подход не может считаться удовлетворительным, поскольку, как показывает анализ, в последние несколько десятков лет наступление одних риск-образующих событий может провоцировать непосредственным или опосредованным образом наступление других риск-образующих событий, эти события, в свою очередь, могут спровоцировать наступление следующих риск-образующих событий и так далее. При этом мы не можем исключать возможности влияния последующих событий на исходные, как в сторону усиления, так и в сторону ослабления связанных с ними рисков.

Таким образом, в настоящее время для эффективного решения задач управления рисками и безопасностью сложных систем необходимо использование подходов, которые позволяют рассматривать риск-образующие события и связанные с ними риски не как «точки» в некотором фазовом пространстве, а как динамическую сеть, узлы которой оказывают на состояние друг друга существенное влияние.

Общая модель

Рассмотрим сложную систему, состоящую множества элементов: $S=\{s_1,\dots,s_i,\dots,s_n\}$, $i\in N=\{1,\dots,n\}$. В рамках модели будем предполагать, что элементы $s_i\in S$, $i\in N$, системы S, вообще говоря, не являются *независимыми* и могут оказывать на *состояние* друг на друга определенное *воздействие*.

Предположим, что существует субъект, которого мы будем называть RM (менеджер риска, risk manager). Будем считать, что RM располагает некоторым объемом *ресурса* $X\ge 0$, который он может произвольным образом распределять между элементами системы S:

$$x=(x_1,\dots,x_n),\ x_i\ge 0,\ i\in N,\ \sum_{i=1}^{n}x_i\le X.$$

Обозначим множество допустимых распределений ресурса X между элементами системы S субъекта RM:

$$\mathcal{X}(X)=$$
$$=\left\{x=(x_1,\dots,x_n)\in\mathbb{R}^n : x_i\ge 0,\ \ i\in N, \sum_{i=1}^{n}x_i\le X\right\}$$

Поскольку элементы системы S не являются независимыми и могут оказывать на состояние друг на друга определенное воздействие в рамках модели под *локальным риском* будем понимать некоторую локальную характеристику отдельного элемента $s_i\in S$, $i\in N$, зависящую не только от количества ресурса $x_i\ge 0$, выделенного RM на данный элемент, но и от распределения ресурсов на остальные элементы системы S, то есть от вектора $x=(x_1,\dots,x_n)\in\mathbb{R}^n$. Аналогично, под *интегральным риском* будем понимать некоторую интегральную характеристику всей системы S в целом, также зависящую от вектора $x=(x_1,\dots,x_n)\in\mathbb{R}^n$.

Учитывая приведенные выше соображения, определим, для каждого элемента $s_i\in S$, $i\in N$, системы S функцию локального риска: $\rho_i(x):\mathbb{R}^n\to\mathbb{R}^1$ и будем считать, что состояние системы S однозначно описывается *вектор-функцией риска*: $(\rho_1(x),\dots,\rho_n(x))$. Аналогично, для системы S в целом определим функцию интегрального риска: $\rho(x)=\rho(\rho_1(x),\dots,\rho_n(x))$. В простейшем случае, в качестве функции интегрального риска может быть выбрана сумма локальных рисков всех элементов системы S:

$$\rho(x)=\sum_{i=1}^{n}\rho_i(x).$$

Пусть $z=(z_1,\dots,z_n)\in\mathbb{R}^n$ – вектор, тогда будем писать, что:

$$z=(z_1,\dots,z_n)\ge 0,\ \text{если}\ z_i\ge 0,\ i\in N.$$

В рамках общей модели далее будем предполагать, что функции локального риска $\rho_i(\cdot)$, $i\in N$, непрерывны, всюду дифференцируемы и обладают следующими свойствами:

С1 (неотрицательность риска): для любых $i\in N$, $x\ge 0:\rho_i(x)\ge 0;$

С2 (монотонность риска): для любых $i\in N$, $k\in N$, $\dfrac{\partial\rho_i(x)}{\partial x_k}<0$;

С3 (ограниченность риска): для любых $i\in N$, $x\ge 0$: существует число $\rho_i^{\infty}>0$ такое, что $\rho_i(x)>\rho_i^{\infty}$.

Свойство С1 означает, что потенциальный ущерб, связанный с реализацией локального риска для любого элемента $s_i\in S$, $i\in N$, системы S не может быть отрицательным.

Свойство С2 означает, что для любого элемента $s_i\in S$, $i\in N$, системы S дополнительное выделение ресурса субъектом RM должно приводить к снижению локального риска для всех элементов системы S.

Свойство С3 означает, что для любого элемента $s_i\in S$, $i\in N$, системы S никакое дополнительное выделение субъектом RM ресурса не в состоянии снизить локальный риск для данного элемента «до нуля». Иными словами, вне зависимости от объемов, затраченных

DOI:10.21681/2311-3456-2020-04-2-10

субъектом RM ресурсов для любого элемента $s_i \in S$, $i \in N$, системы S всегда имеет место положительный *остаточный риск*.

Несложно видеть, что функции локального риска $\rho_i(\cdot)$, $i \in N$ представляют собой семейство неотрицательных, ограниченных и строго монотонных функций, убывающих по всем аргументам.

Таким образом, модель управления информационными рисками сложной системы можно задать следующим кортежем:

$$\langle RN, X, S = \{s_i\}, \{\rho_i(\cdot)\}, \rho(\cdot), i \in N \rangle \quad (1)$$

Будем считать, что в рамках общей модели целью субъекта RM является: используя доступный ему ресурс X и распределяя его между элементами системы S добиться максимально возможного снижения значения интегрального риска $\rho(x)$.

Обозначим, $\mathcal{X}(X) =$

$$= \left\{ (x_1, \ldots, x_n) \in \mathbb{R}^n : x_i \geq 0,\ i \in N, \sum_{i=1}^{n} x_i \leq X \right\}$$ — множество

допустимых распределений ресурса X между элементами системы S субъектом RM.

Тогда формально цель RM может быть записана в виде:

$$\inf_{x \in \mathcal{X}(X)} \rho(x) = \\ = \inf_{x \in \mathcal{X}(X)} \rho(\rho_1(x), \ldots, \rho_n(x)) \quad (2)$$

При известных функциях локального риска $\rho_i(\cdot)$, $i \in N$, решение задачи (2) представляет собой задачу многомерной глобальной оптимизации функции $\rho(x)$ в ограниченной области $x \in \mathcal{X}$ и может быть найдено традиционными численными методами (см., например, [3]), подробное рассмотрение которых выходит за рамки настоящей работы.

Предположим теперь, что конкретный вид функций локального риска $\rho_i(\cdot)$, $i \in N$ для любого элемента $s_i \in S$, $i \in N$, системы S нам неизвестен, что, как правило, и имеет место на практике (см., например, [4]), но при этом известно, что они удовлетворяют свойствам С1, С2 и С3. Очевидно, что в этом случае методы решения задачи (2) существенно усложняются.

Арбитражное решение

Для начала в рамках общей модели рассмотрим случай, когда элементы $s_i \in S$, $i \in N$, системы S являются независимыми и не оказывают друг на друга никакого влияния. Подход к решению указанной задачи, когда конкретный вид функций локального риска неизвестен впервые был намечен, хотя и немного в другой постановке, в статье [5], а наиболее полно изложен в монографиях [1, 2]. В основе указанного подхода лежат следующие соображения (подробнее, см. [1, 2]).

Поскольку, конкретный вид функций локального риска нам не известен, то представляется целесообразным перейти от «глобальной» задачи минимизации интегрального риска (2) к «локальной» задаче снижения максимума локальных рисков $\rho_i(\cdot)$, $i \in N$:

$$\inf_{x \in \mathcal{X}(X)} \sup_{i \in N} \rho_i(x) \quad (3)$$

Тогда модель управления информационными рисками сложной системы можно задать следующим кортежем:

$$\langle RN, X, S = \{s_i\}, \{\rho_i(\cdot)\}, i \in N \rangle$$

Решением задачи (3) будут «хорошие» распределения ресурса $\hat{x}(X) \in \mathcal{X}(X)$ такие, что:

$$\hat{x}(X) = \arg \inf_{x \in \mathcal{X}(X)} \sup_{i \in N} \rho_i(x)$$

Обозначим подмножество «хороших» распределений ресурса $\hat{\mathcal{X}}(X) \subseteq \mathcal{X}(X)$.

Для задачи (3) оказывается верным следующее утверждение «о выравнивании локальных рисков» (подробнее см. [1, 2]), которое мы приведем без доказательства в обозначениях рассматриваемой выше общей модели:

Утверждение 1. Пусть, $\rho_i(\cdot)$, $i \in N$ удовлетворяют свойствам С1, С2 и С3 и существует распределение ресурса $(\tilde{x}_1, \ldots, \tilde{x}_n) \in \mathcal{X}(X)$ такое, что: $\sum_{i=1}^{n} \tilde{x}_i = X$ и $\rho_1(\tilde{x}_1) = \ldots = \rho_n(\tilde{x}_n) = c$, тогда $(\tilde{x}_1, \ldots, \tilde{x}_n)$ – единственное решение задачи (3).

Смысл указанного утверждения в том, что в случае невозможности реализовать «глобальный» критерий снижения рисков правильной стратегией субъекта RM будет стремление путем соответствующего распределения ресурсов обеспечить выравнивание локальных рисков для всех элементов системы S.

Перед тем, как перейти к дальнейшему обсуждению заметим, что в отсутствии знаний о конкретном вид функций локального риска для любого элемента $s_i \in S$, $i \in N$, системы S целесообразно считать, все элементы системы S похожими друг на друга. Тогда, в определенном смысле, «похожими» будут и сами функции локального риска: $\rho_1(\tilde{x}_1), \ldots, \rho_n(\tilde{x}_n)$.

Предположим теперь, что тем или иным способом субъекту RM стали известны текущие значения локальных рисков для каждого элемента $s_i \in S$, $i \in N$, системы S, до распределения на них каких-либо ресурсов. Обозначим указанные значения $\rho_i(0)$, $i \in N$ и упорядочим их по убыванию: $\rho_{(1)}(0) \geq \ldots \geq \rho_{(n)}(0)$. Откуда следует, что если целью субъекта RM является выравнивание локальных рисков, то для достижения указанной цели для разных элемента $s_i \in S$, $i \in N$, системы S, вообще говоря, придется затратить различный объем ресурсов, причем: если $\rho_{(i)}(0) \geq \rho_{(j)}(0)$, то, исходя из приведенных выше соображений, вообще говоря, должно выполняться соотношение: $x_{(i)} \geq x_{(j)}$. В этом случае, значения $\tilde{\rho}_i = \rho_i(0)$ можно рассматривать, как своеобразные «заявки» элементов $s_i \in S$, $i \in N$, системы S на предоставление ресурса со стороны субъекта RM.

Обозначим $\tilde{\rho} = (\tilde{\rho}_1, \ldots, \tilde{\rho}_n)$ – вектор «заявок» элементов $s_i \in S$, $i \in N$, системы S на предоставление ресурса со стороны субъекта RM.

Наконец предположим, что сам ресурс X, которым располагает субъект RM, представляет собой функцию от «заявок» элементов системы S такую, что $X = X(\tilde{\rho}_1, \ldots, \tilde{\rho}_n)$ – симметрична, непрерывна, строго монотонна и $X(0, \ldots, 0) = 0$. Указанные свойства являются вполне естественными и отражают следующие особенности поведения менеджера риска: 1) не выделять ресурс без необходимости; 2) в случае возрастания рисков увеличивать объем выделяемого ресурса; 3) в отсутствии дополнительной информации считать все элементы системы S «похожими» друг на друга.

В [1, 2] был сформулирован и обоснован ряд «разумных», с точки зрения управления рисками, требований, которым должно удовлетворять «хорошее» распределение ресурсов.

Т1 (оптимальность по Парето): для любого $\hat{x}(X) \in \hat{\mathcal{X}}(X)$: $\sum_{i=1}^{n} \hat{x}_i(X) = X$.

Т2 (монотонность): для любых $X_1 > X_2 \geq 0$ и $\hat{x}(X) \in \hat{\mathcal{X}}(X)$: $\hat{x}(X_1) > \hat{x}(X_2)$,

то есть $\hat{x}_i(X_1) \geq \hat{x}_i(X_2)$, $i \in N$ и существует $j \in N$ такое, что $\hat{x}_j(X_1) > \hat{x}_j(X_2)$.

Т3 (паритетность): для любого $\hat{x}(X) \in \hat{\mathcal{X}}(X)$: если $\rho_{(1)}(0) \geq \ldots \geq \rho_{(n)}(0)$,

то $\hat{x}_{(1)}(X) \geq \ldots \geq \hat{x}_{(n)}(X)$.

В [1, 2] было показано, что подмножество «хороших» распределений ресурса $\hat{\mathcal{X}}(X) \subseteq \mathcal{X}(X)$, удовлетворяющих требованиям Т1, Т2 и Т3, не пусто, поскольку, в частности, указанным требованиям удовлетворяет равномерное распределение ресурса

$$\hat{e}(X) \in \hat{\mathcal{X}}(X) : \hat{e}_i(X) = X/n.$$

Приведенные предположения позволяют использовать для нахождения эффективного распределения ресурса теоретико-игровой подход на основе арбитражной схемы, основанной на принципах стимуляции и неподавления, которая была предложена в 1984 году В.И. Ротарем в статье «О принципе стимуляции в арбитражной схеме» (подробную библиографию см. в [1, 2]). Напомним коротко основные результаты, придерживаясь терминологии и обозначений, определенных в представленной выше общей модели.

В соответствии с введенными выше предположениями будем рассматривать элементы $s_i \in S$, $i \in N$, системы S в качестве «игроков» некоторой игры $\Gamma(\tilde{\rho})$, где $\tilde{\rho} = (\tilde{\rho}_1, \ldots, \tilde{\rho}_n)$ – вектор «заявок» элементов системы S на предоставление ресурса со стороны субъекта RM, который выступает в роли своеобразного «арбитра».

Определим, доступный для распределения RM ресурс $X(\tilde{\rho}) = X(\tilde{\rho}_1, \ldots, \tilde{\rho}_n)$ и множество допустимых распределений ресурса X между элементами системы S:

$$\mathcal{X}(\tilde{\rho}) = \left\{ (x_1, \ldots, x_n) \in \mathbb{R}^n : x_i \geq 0,\ i \in N,\ \sum_{i=1}^{n} x_i \leq X(\tilde{\rho}) \right\}.$$

Обозначим $\hat{\mathcal{X}}(\tilde{\rho}) \subseteq \mathcal{X}(\tilde{\rho})$ – подмножество «хороших» распределений ресурса, удовлетворяющих требованиям Т1, Т2 и Т3.

Определение 1. Пусть $\tilde{\rho}_{(1)} \geq \ldots \geq \tilde{\rho}_{(n)}$, тогда назовем распределение ресурса $\hat{\pi}(\tilde{\rho}) = (\hat{\pi}_{(1)}(\tilde{\rho}), \ldots, \hat{\pi}_{(n)}(\tilde{\rho}))$ «максимально стимулирующим решением» (МС-решением) если:

1) $\hat{\pi}(\tilde{\rho}) \in \mathcal{X}(\tilde{\rho})$;

2) $\hat{\pi}_{(1)}(\tilde{\rho}) = \sup_{\hat{x}(\tilde{\rho}) \in \hat{\mathcal{X}}(\tilde{\rho})} \hat{x}_{(1)}(\tilde{\rho})$;

$\hat{\pi}_{(2)}(\tilde{\rho}) = \sup_{\hat{x}(\tilde{\rho}) \in \hat{\mathcal{X}}^{(1)}(\tilde{\rho})} \hat{x}_{(2)}(\tilde{\rho})$;

…

$$\hat{\pi}_{(n-1)}(\tilde{\rho}) = \sup_{\hat{x}(\tilde{\rho}) \in \hat{\mathcal{X}}^{(1)(2)\ldots(n-2)}(\tilde{\rho})} \hat{x}_{(n-1)}(\tilde{\rho})$$

где

$$\hat{\mathcal{X}}^{(1)(2)\ldots(k)}(\tilde{\rho}) =$$

$$= \{\hat{x}(\tilde{\rho}) \in \hat{\mathcal{X}}(\tilde{\rho}) : \hat{x}_{(1)}(\tilde{\rho}) = \hat{\pi}_{(1)}(\tilde{\rho}),$$

$$\hat{x}_{(2)}(\tilde{\rho}) = \hat{\pi}_{(2)}(\tilde{\rho}), \ldots, \hat{x}_{(k)}(\tilde{\rho}) =$$

$= \hat{\pi}_{(k)}(\tilde{\rho})\}$ и $k = 1, 2, \ldots, n-2$.

Таким образом, под МС-решением будем понимать такое распределение ресурса X между элементами системы S, при котором: во-первых, для него выполнены требования Т1, Т2 и Т3, а, во-вторых, на элемент с номером (1), с максимальной «заявкой», выделяется максимально возможное для номера (1), среди всех таких распределений, количество ресурса; на элемент с номером (2), со второй по значимости «заявкой», выделяется максимально возможное для номера (2), среди распределений у которых, количество ресурса для номера (1) уже зафиксировано и равно $\hat{\pi}_{(1)}(\tilde{\rho})$ и так далее.

Как следует из приведенного выше определения МС-решения, его существование отнюдь не является очевидным. Тем не менее, оказывается верным следу-

DOI:10.21681/2311-3456-2020-04-2-10

ющее утверждение [1, 2, 5], которое мы приведем без доказательства:

Утверждение 2. Пусть $\tilde{\rho}_{(1)} \geq \cdots \geq \tilde{\rho}_{(n)}$, тогда МС-решение $\hat{\pi}(\tilde{\rho}) = \left(\hat{\pi}_{(1)}(\tilde{\rho}), \dots, \hat{\pi}_{(n)}(\tilde{\rho})\right)$ существует и единственно.

Приведенное утверждение дает возможность в рамках решения задачи (3) организовать эффективное управление информационными рисками сложной системы при котором сначала снижается максимальный риск, затем следующий по значимости и так далее. К сожалению, доказательство утверждения 2 не является конструктивным и не определяет МС-решение в аналитической форме. Тем не менее, для ряда частых случаев это может быть сделано. Данное обстоятельство и позволяет успешно применять МС-решение на практике.

Предположим, что функция $X(\tilde{\rho})$ имеет вид: $X(\tilde{\rho}) = X(\tilde{\rho}_1 + \cdots + \tilde{\rho}_n)$, то есть, зависит только от суммы «заявок» всех элементов $s_i \in S$, $i \in N$, системы S, что довольно часто встречается на практике, причем $\frac{\partial X(\tilde{\rho}_1 + \cdots + \tilde{\rho}_n)}{\partial \tilde{\rho}_i} > 0$, для $i \in N$. Тогда для случаев, когда $X(\tilde{\rho})$ выпукла, вогнута или линейна оказываются верным следующие утверждения (подробнее см. [1, 2]):

Утверждение 3. Пусть $\tilde{\rho}_{(1)} \geq \cdots \geq \tilde{\rho}_{(n)}$ (для простоты, будем считать, что $\tilde{\rho}_1 \geq \cdots \geq \tilde{\rho}_n$) и $X(\tilde{\rho})$ выпукла, то есть: $\frac{\partial^2 X(\tilde{\rho}_1 + \cdots + \tilde{\rho}_n)}{\partial \tilde{\rho}_i^2} \geq 0$, для $i \in N$. Тогда МС-решение имеет вид:

$$\mu_n^+(\tilde{\rho}) = \frac{1}{n} X(n\tilde{\rho}_n);$$

$$\mu_k^+(\tilde{\rho}) = \frac{1}{k}\Big(X\big(k\tilde{\rho}_k + \textstyle\sum_{i=k+1}^{n} \tilde{\rho}_i\big) -$$

$$- \textstyle\sum_{i=k+1}^{n} \mu_i^+(\tilde{\rho})\Big),\ k = 1,2, \dots, n-1.$$

Утверждение 4. Пусть $\tilde{\rho}_{(1)} \geq \cdots \geq \tilde{\rho}_{(n)}$ (для простоты, будем считать, что $\tilde{\rho}_1 \geq \cdots \geq \tilde{\rho}_n$) и $X(\tilde{\rho})$ вогнута, то есть: $\frac{\partial^2 X(\tilde{\rho}_1 + \cdots + \tilde{\rho}_n)}{\partial \tilde{\rho}_i^2} \leq 0$, для $i \in N$. Тогда МС-решение имеет вид:

$$\mu_1^-(\tilde{\rho}) = \frac{1}{n} X(n\tilde{\rho}_1);\ \mu_k^-(\tilde{\rho}) = \frac{1}{n-(k-1)} X\big(\textstyle\sum_{i=1}^{k-1} \tilde{\rho}_i +$$

$$+ (n-(k-1))\tilde{\rho}_k\big) - \frac{1}{n-(k-1)} \textstyle\sum_{i=1}^{k-1} \mu_i^-(\tilde{\rho}),\ k = 2, \dots, n.$$

Утверждение 5. Пусть $\tilde{\rho}_{(1)} \geq \cdots \geq \tilde{\rho}_{(n)}$ (для простоты, будем считать, что $\tilde{\rho}_1 \geq \cdots \geq \tilde{\rho}_n$) и $X(\tilde{\rho}) = \alpha(\sum_{i=1}^{n} \tilde{\rho}_i) + \beta$ (линейная функция), то есть: $\frac{\partial^2 X(\tilde{\rho}_1 + \cdots + \tilde{\rho}_n)}{\partial \tilde{\rho}_i^2} \equiv 0$, для $i \in N$. Тогда МС-решение имеет вид: $\mu_k(\tilde{\rho}) = \alpha\tilde{\rho}_k$, $k = 1, \dots, n$.

Анализ приведенного МС-решения позволяет сделать вывод о том, что достоверная информация о значениях «заявок» (иначе, текущие значения локальных рисков для каждого элемента $s_i \in S$, $i \in N$, системы S, до распределения на них каких-либо ресурсов) на предоставление ресурса со стороны субъекта RM: $\tilde{\rho}_i = \rho_i(0)$ является ключевой, для реализации указанного подхода, поскольку:

- во-первых, дает возможность упорядочить элементы $s_i \in S$, $i \in N$, системы S с точки зрения их рискового потенциала и, тем самым, определить приоритеты в выделении им ресурса в соответствии с упорядоченным вектором «заявок» $\tilde{\rho}_{(1)} \geq \cdots \geq \tilde{\rho}_{(n)}$;
- во-вторых, дает возможность определить соответствующий объем ресурса $X(\tilde{\rho}) = X(\tilde{\rho}_1, \dots, \tilde{\rho}_n)$, как функции о указанных «заявок»;
- в-третьих, если субъект RM в качестве функции для вычисления объема ресурса выбирает $X(\tilde{\rho}) = X(\tilde{\rho}_1 + \cdots + \tilde{\rho}_n)$, то в соответствии с утверждениями 4-6 появляется возможность непосредственного вычисления значения МС-решения.

Таким образом, если мы хотим для решения задачи (3) в рамках общей модели использовать некоторый аналог МС-решения нам будет необходимо разработать метод, который позволит проводить не только оценку «заявок» элементов $s_i \in S$, $i \in N$, системы S на предоставление ресурса со стороны субъекта RM: $\tilde{\rho}_i = \rho_i(0)$, но и их ранжирование $\tilde{\rho}_{(1)} \geq \cdots \geq \tilde{\rho}_{(n)}$ с учетом взаимного влияния друг на друга.

«Когнитивная игра»

Очевидно, что для решения задачи (3), может быть использован либо экспертный, либо экспертно-формализованный, либо, наконец формализованный подход.

Остановимся на этом вопросе более подробно.

В рамках экспертного подхода вся «ответственность» за учет эффектов, возникающих в результате взаимного влияния рисков элементов системы S друг на друга, полностью возлагается на экспертов – специалистов в области оценки информационных рисков. Подробнее, с методами, используемыми при реализации подобного подхода можно ознакомиться, например, в [6-9].

В рамках экспертно-формализованного подхода эксперты используют формализованные процедуры, которые позволяют оценивать, в том числе, многофакторные риски. Примером подобного подхода может являться механизм комплексного оценивания, в основе которого лежит аппарат последовательных бинарных сверток. Подробнее, с указанным подходом можно ознакомиться, например, в [10, подробную библиографию см. там же], а применительно к оценке информационных рисков в [11-14].

Перейдем теперь к рассмотрению формализованного подхода.

Вернемся к общей модели и рассмотрим ее более подробно. Итак, пусть имеется сложная система, состоящая из элементов: $S = \{s_1, \dots, s_i, \dots, s_n\}$, $i \in N$, которые могут оказывать друг на друга определенное воздействие, в том числе, в части передачи друг другу связанных с ними рисков. Указанное воздействие будем описывать взвешенным ориентированным графом $G(S, W)$, где S – множество узлов, которое совпадает с множеством элементов системы S, а $W \subseteq S \times S$ – множество направленных дуг $w_{ij} = (s_i, s_j) \in W$, $i \in N$, $j \in N$, которые отражают связи между элементами системы S. Положим, что на $G(S, W)$ заданы две функции: $\rho: S \to \mathbb{R}^1$ и $\sigma: W \to \mathbb{R}^1$, где ρ_i, $i \in N$ – «вес» узлов (элементов системы S), а σ_{ij}, $i \in N$, $j \in N$ – «вес» дуг (взаимных влияний элементов системы S друг на друга). Матрица $\Sigma = \|\sigma_{ij}\|$ размера $n \times n$ отражает «интенсивность» влияния i-го элемента системы S на j-й элемент.

Будем считать, что взаимное влияние осуществляется в дискретные моменты времени и начальному состоянию системы соответствует нулевой момент времени и значения весов элементов системы S : $\rho_i(t = 0) = \tilde{\rho}_i$. Тогда изменение значений весов элементов $s_i \in S$, $i \in N$, системы S в результате их взаимного влияния друг на друга будем описывать следующими выражениями:

$$\rho_i(t+1) = \rho_i(t) + \\ + \sum_{k=1}^{n} \sigma_{ik}(\rho_i(t) - \rho_i(t-1)), \\ t = 0, 1, \dots, \rho_i(t = 0) = \tilde{\rho}_i \tag{4}$$

Система (4) однозначно описывает динамику изменений значений «весов» элементов системы S в результате их взаимного влияния друг на друга в случае, когда у нас отсутствует информация о конкретном виде функций локального риска $\rho_i(\cdot)$, $i \in N$ для любого элемента $s_i \in S$, $i \in N$, системы S, но при этом известно, что они удовлетворяют свойствам С1, С2 и С3 (см. соответствующее описание общей модели выше).

Обозначим $\Delta\rho_i(t) = \rho_i(t) - \rho_i(t-1)$ – «скорость» изменения значений «весов» элементов $s_i \in S$, $i \in N$, системы S (в терминологии [15, 16] – «импульс»), тогда выражения (4) можно представить в следующем виде:

$$\Delta\rho_i(t+1) = \sum_{k=1}^{n} \sigma_{ik} \Delta\rho_i(t), \\ t = 0,1, \dots, \Delta\rho_i(t = 0) = \tilde{\rho}_i \tag{5}$$

Приведенные выше описание графа $G(S, W)$ вместе с динамикой изменений значений «весов» элементов системы S до момента времени t, заданной выражениями (4) или (5) будем называть (подробнее, см., например, [15-20]) «когнитивной картой» (впервые термин введен в [17]).

Обозначим $\bar{\rho}_i(t) = (\rho_i(0), \rho_i(1), \dots, \rho_i(t))$ – вектор значений «весов» элемента $s_i \in S$, $i \in N$, системы S до момента времени t, $\bar{P}(t) = (\rho_1(t), \rho_2(t), \dots, \rho_n(t))$ – вектор значений «весов» элементов системы S в момент времени t, $\mathcal{P}(t) = (\bar{P}(0), \bar{P}(1), \dots, \bar{P}(t))$ – матрица динамики изменений значений «весов» элементов системы S до момента времени t, (в терминологии [15, 16] – «траектории»), $t = 0, 1, \dots$.

Важнейшей особенностью «когнитивных карт» является возможность учета опосредованного влияния элементов системы S друг на друга, когда один из элементов влияет на другой, через несколько промежуточных.

Обозначим E_n – единичную матрицу размера $n \times n$ и рассмотрим, следуя [22], выражение:

$$B^t = E_n + \Sigma + \Sigma^2 + \dots + \Sigma^t, \\ t = 1,2, \dots \tag{6}$$

Из (4) и (6) следует, что динамика изменений значений «весов» элементов системы S до момента времени t, может быть описана (с учетом введенных выше обозначений) выражением:

$$\bar{P}(t) = B^t \bar{P}(0) + (E_n - B^t)\bar{P}(-1), \\ t = 1,2, \dots \tag{7}$$

Тогда, если считать, что $\rho_i(t) \equiv 0$ при $t < 0$ (подробнее см. [16]), то выражение (7) примет вид:

$$\bar{P}(t) = B^t \bar{P}(0), t = 1,2, \dots \tag{8}$$

Если матрица Σ такова, что все ее собственные значения содержаться внутри окружности единичного радиуса на комплексной плоскости, то выполнения данного требования достаточно для обеспечения сходимости суммы натуральных степеней матрицы Σ^t при $t \to \infty$ (подробнее см. [16]). Обозначим B^∞ значение суммы (6) при $t \to \infty$ ($B^\infty \approx (E_n - \Sigma)^{-1}$, см. [16]), тогда при $t \to \infty$ выражение (8) примет вид:

$$\bar{P}(\infty) = B^\infty \bar{P}(0) \tag{9}$$

где $\bar{P}(\infty) = (\rho_1(\infty), \rho_2(\infty), \dots, \rho_n(\infty))$ – «установившиеся» значения локальных рисков элемента $s_i \in S$, $i \in N$, системы S, которые мы и будем рассматривать в качестве «заявок» в общей модели. Упорядочивая их по убыванию $\rho_{(1)}(\infty) \geq \rho_{(2)}(\infty) \geq \dots \geq \rho_{(n)}(\infty)$ и применяя подход, представленный выше, мы имеем возможность выбрать в качестве эффективного решения задачи (3) соответствующее МС-решение.

Выводы

В работе рассматривается общая модель сложной компьютерной сети, в рамках которой менеджер риска (*risk-manager*) осуществляет эффективное управление рисками сложной системы путем распределения имеющегося в его распоряжении ресурса между ее элементами (узлами компьютерной сети). Для оценки состояния элементов системы используются функции локального риска, удовлетворяющие некоторым задан-

DOI:10.21681/2311-3456-2020-04-2-10

ным требованиям, а для оценки состояния системы в целом – функция интегрального риска.

Рассмотрена задача управления рисками в условиях неопределенности, когда информация о конкретном виде функций локального риска элементов системы отсутствует.

Показано, что в случае независимости (отсутствия взаимного влияния друг на друга) элементов системы для нахождения эффективного распределения ресурса может быть использован теоретико-игровой подход на базе арбитражной схемы, основанной на принципах стимуляции и неподавления (МС-решение).

Также показано, что в случае, когда элементы системы могут оказывать на состояния друг на друга определенное воздействие, может быть использован другой теоретико-игровой подход с использованием игры на когнитивной карте (когнитивная игра).

В качестве дальнейших направлений исследований представляется целесообразным рассмотреть модель информационного противоборства на сложной компьютерной сети, в которой кроме RM, играющего роль «защитника» сложной системы, также присутствует субъект, играющий роль «атакующего».

Рецензент: *Марков Алексей Сергеевич, доктор технических наук, профессор МГТУ им.Н.Э.Баумана, г. Москва, Россия. E-mail: markov@bmstu.ru*

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект 18-29-22042).

Литература

1. Калашников А.О. Модели и методы организационного управления информационными рисками корпораций // А.О. Калашников — М.: Эгвес, 2011. 312 с. - ISBN 978-5-91450-078-5.
2. Калашников А.О. Организационные механизмы управления информационными рисками корпораций // А.О. Калашников – М.: ПМСОФТ, 2008. 175 с. – ISBN 978-5-9900281-9-7.
3. Ehrgott Matthias Multicriteria Optimization // Matthias Ehrgott. – Springer Berlin Heidelberg, 2010. P. 382.
4. Козлов А.Д., Нога Н.Л. Риски информационной безопасности корпоративных информационных систем при использовании облачных технологий / А.Д. Козлов, Н.Л. Нога // Управление риском. 2019. № 3. С. 31-46.
5. Управление информационными рисками с использованием арбитражных схем / А.О. Калашников // Системы управления и информационные технологии. 2004. № 4 (16). С. 57-61.
6. Петренко С.А. Управление информационными рисками. Экономически оправданная безопасность / С.А. Петренко, С.В. Симонов – М.: Компания АйТи; ДМК Пресс, 2004. 384 с. – ISBN 5-98453-001-5 (АйТи) – ISBN 5-94074-246-7 (ДМК Пресс).
7. Астахов А.М. Искусство управления информационными рисками / А.М. Астахов – М.: ДМК Пресс, 2010. 312 с. – ISBN 978-5-94074-574-7.
8. Дамодаран Асват Стратегический риск-менеджмент: принципы и методики. : Пер. с англ. / А. Дамодаран – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2017. 496 с. – ISBN 978-5-8459-1453-8 (рус.).
9. Барабанов А.В. Семь безопасных информационных технологий. Под ред. А.С. Маркова / А.В. Барабанов, А.В. Дорофеев, А.С. Марков, В.Л. Цирлов – М.: ДМК Пресс, 2017. 224 с. – ISBN 978-5-97060-494-6.
10. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. 3-е изд. / Д.А. Новиков. – М.: Издательство физико-математической литературы, 2012. 604 с.
11. Управление информационными рисками организационных систем: общая постановка задачи / А.О. Калашников // Информация и безопасность. – 2016. Том 19. № 1(4). С. 36-45.
12. Управление информационными рисками организационных систем: механизмы комплексного оценивания / А.О. Калашников // Информация и безопасность. 2016. Том 19. № 3(4). С. 315-322.
13. Модель управления информационной безопасностью критической информационной инфраструктуры на основе выявления аномальных состояний (Часть 1) / А.О. Калашников, Е.В. Аникина // Информация и безопасность. 2018. Том 21. № 2(4). С. 145-154.
14. Модель управления информационной безопасностью критической информационной инфраструктуры на основе выявления аномальных состояний (Часть 2) / А.О. Калашников, Е.В. Аникина // Информация и безопасность. 2018. Том 21. № 2(4). С. 155-164.
15. Робертс Ф.С. Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам. / Ф.С. Робертс. – М.: Наука, 1986. 496 с.
16. «Когнитивные игры»: линейная импульсная модель / Д.А. Новиков // Проблемы управления. 2008. № 3. С. 14-22.
17. Cognitive Maps in Rats and Men / E. Tolman // Psychological Review. – 1948. № 55, pp.189-208.
18. Систематизация когнитивных карт и методов их анализа / А.А. Кулинич // Тр. VII-й междунар. конф. «Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций». – М.: ИПУ РАН, 2007. С. 50-56.
19. Структурно-целевой анализ развития социально-экономических ситуаций / В.И. Максимов // Проблемы управления. 2005. № 3. С.30-38.
20. Когнитивный подход в управлении / З.К. Авдеева, С.В. Коврига, Д.И. Макаренко, В.И. Максимов // Проблемы управления. 2007. № 3. С.2-8.

MANAGEMENT OF INFORMATION RISKS FOR COMPLEX SYSTEM USING THE «COGNITIVE GAME» MECHANISM

Kalashnikov A.O.[3], *Anikina E.V.*[4]

Abstract

Purpose of the article: *development of mechanisms for solving problems of information risk management of complex systems in conditions of uncertainty and mutual influence of system elements on each other.*

Research method: *game-theoretic mathematical modeling of risk management processes in complex systems based on arbitration schemes and multistep games on cognitive maps.*

The result: *a general model of a complex system (for example, a heterogeneous computer network) is considered, within which the risk manager (risk-manager) carries out effective risk management by distributing the resource at his disposal among its elements (nodes of a computer network). To assess the state of the system elements,* functions of local risk are proposed that satisfy certain specified requirements, and to assess the state of the system as a whole, an integral risk function is proposed.

It is shown that in the case of independence (absence of mutual influence on each other) of the system elements to find an effective resource allocation, a game-theoretic approach can be used based on an arbitration scheme based on the principles of stimulation and non-suppression (MS-solution).

For the case when changes in the level of risk for one element of the system can have a significant impact on the levels of risks of other elements, it is proposed to use game-theoretic models based on the MS-solution and a multistep "cognitive game".

Keywords: local risk, integral risk, risk manager, game-theoretic models, arbitration scheme, maximally stimulating decision, cognitive map, multistep cognitive game.

References

1. Kalashnikov A.O. Modeli i metodi organizacionnogo upravleniya informacionnimi riskami korporacii / A.O. Kalashnikov – M.: Egves, 2011, p. 312- ISBN 978-5-91450-078-5.
2. Kalashnikov A.O. Organizacionnie mehanizmi upravleniya informacionnimi riskami korporacii // A.O. Kalashnikov – M.: PMSOFT, 2008. p.175 – ISBN 978-5-9900281-9-7.
3. Ehrgott Matthias Multicriteria Optimization // Matthias Ehrgott. – Springer Berlin Heidelberg, 2010. P. 382.
4. Kozlov A.D., Noga N.L. Riski informacionnoi bezopasnosti korporativnih informacionnih system pri ispolzovanii oblachnih tehnologii / A.D. Kozlov, N.L. Noga // Upravlenie riskom. 2019. № 3. pp. 31-46.
5. Upravlenie informacionnimi riskami s ispolzovaniem arbitrajnih shem / A.O. Kalashnikov // Sistemi upravleniya i informacionnie tehnologii. 2004. № 4 (16). pp. 57-61.
6. Petrenko S.A. Upravlenie informacionnimi riskami. Ekonomicheski opravdannaya bezopasnost / S.A. Petrenko, S.V. Simonov – M.: Kompaniya AiTi; DMK Press, 2004. 384 p. – ISBN 5-98453-001-5 (AiTi) – ISBN 5-94074-246-7 (DMK Press).
7. Astahov A.M. Iskusstvo upravleniya informacionnimi riskami / A.M. Astahov – M.: DMK Press, 2010. 312 p. – ISBN 978-5-94074-574-7.
8. Damodaran Asvat Strategicheskiy risk-manadjement: principi i metodiki: Per.s angl. / A. Damodaran – M.: OOO «I.D. Viliams», 2017. 496 p. – ISBN 978-5-8459-1453-8 (rus.).
9. Barabanov A.V. Sem bezopasnih informacionih tehnologii. Pod red. A.S. Markova / A.V. Barabanov, A.V. Dorofeev, A.S. Markov, V.L. Cirlov – M.: DMK Press, 2017. 224 p. – ISBN 978-5-97060-494-6.
10. Novikov D.A. Teoriya upravleniya organizacionnimi sistemami. 3-e izd. / D.A. Novikov. – M.: Izdatelstvo fiziko-matematicheskoi literaturi, 2012. 604 p.
11. Upravlenie informacionnimi riskami organizacionnih system: obshaya postanovka zadachi / A.O. Kalashikov // Informaciya i bezopasnost. – 2016. Том 19. № 1(4). pp. 36-45.
12. Upravlenie informacionnimi riskami organizacionnih system: mehanizmi kompleksnogo ocenivaniya / A.O. Kalashikov // Informaciya i bezopasnost. 2016. Том 19. № 3(4). pp. 315-322.
13. Model upravleniya informacionnoi bezopasnostiyu kriticheskoi informacionnoi infrstructuri na osnove viyavleniya anomalnih sostoyanii (Chast 1) / A.O. Kalasnikov, E.V. Anikina // Informaciya I bezopasnost. 2018. Том 21. № 2(4). pp. 145-154.
14. Model upravleniya informacionnoi bezopasnostiyu kriticheskoi informacionnoi infrstructuri na osnove viyavleniya anomalnih sostoyanii (Chast 2) / A.O. Kalashnikov, E.V. Anikina // Informaciya I bezopasnost. 2018. Том 21. № 2(4). pp. 155-164.

3 Andrey Kalashnikov, Dr.Sc., Chief Scientist of the Laboratory «Complex networks» Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. E-mail: aokalash@ipu.ru

4 Evgenia Anikina, Researcher of the Laboratory «Complex networks» Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. E mail: janet0584@mail.ru

DOI:10.21681/2311-3456-2020-04-2-10

15. Roberts F.S. Discretnie matematicheskie modeli s prilojeniyami k socialnim, biologicheskim i ekologicheskim zadacham. / F.S. Roberts. – M.: Nauka, 1986. 496 p.
16. «Kognitivnie igri»: lineinaya impulsnaya model/ D.A. Novikov // Problemi upravleniya. 2008. № 3. p. 14-22.
17. Cognitive Maps in Rats and Men / E. Tolman // Psychological Review. – 1948. № 55, pp.189-208.
18. Sistematizaciya kognitivnih kart i metodov ih analiza / A.A. Kulinich // Tr. VII-i mejdunar. konf. «Kognitivnii analiz i upravlenie razvitiem situacii ». – M.: IPU RAN, 2007. pp. 50-56.
19. Structurno-celevoi analiz razvitiya socialno-ekonomicheskih situacii / V.I. Maksimov // Problemi upravleniya. 2005. № 3. pp. 30-38.
20. Kognitivnii podhod v upravlenii / Z.K. Avdeeva, S.V. Kovriga, D.I. Makarenko, V.I. Maksimov // Problemi upravleniya. 2007. № 3. pp. 2-8.