https://trasscom.ru/blog/intellektualnye-transportnye-sistemy (дата обращения 15.09.2023).

2. *Ванновская О.В.* Психология коррупционного поведения госслужащих. – СПб.: ООО «Книжный Дом», 2013. – 264 с.

3. *Козлов А.Д., Нога Н.Л.* Риски информационной безопасности корпоративных информационных систем при использовании облачных технологий // Управление риском. – 2019. – №3. – С. 31-46.

4. *Kozlov A., Noga N.* Some Method of Complex Structures Information Security Risk Assessment in Conditions of Uncertainty / Proceedings of the 13th International Conference "Management of Large-Scale System Development" (MLSD). – M.: IEEE, 2020. – URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/9247662 (дата обращения 15.09.23).

5. MATLAB версия 9.6.0 R2019a – URL: https://1progs.ru/matlab/ (дата обращения 14.03.2023).

6. *Козлов А.Д., Нога Н.Л.* Метод усредненных коэффициентов влияния для формирования нечеткой базы знаний при оценке рисков информационной безопасности / Проблемы управления безопасностью сложных систем: материалы XXX Международной конференции. 14 декабря 2022 г., Москва. – Москва: ИПУ РАН, 2022. – С. 174-180.

DOI: 10.25728/iccss.2023.72.88.072

Широкий А.А.

Учет влияния структуры сложной системы на ее интегральный риск на примере задачи оптимального размещения элементов в простой цепи

Аннотация: Задачи управления рисками сложной системы путем модификации ее структуры редко ставятся на практике ввиду того, что такие изменения либо требуют значительных затрат, либо невозможны вовсе. В то же время вопрос о влиянии структуры системы на ее интегральный риск весьма актуален на этапе проектирования. В настоящей работе представлена постановка задачи оптимального размещения элементов сложной системы внутри фиксированной структуры и приведено ее решение для частного случая – простой цепи. Полученный результат будет использован при поиске решений поставленной задачи для структур более сложных топологий – в частности, древовидных. В результате должен получиться математический аппарат для количественного сравнения структур между собой по критерию влияния на интегральный риск сложной системы.

Ключевые слова: сложные системы, сложные сети, управление рисками

Задачи управления рисками в зарубежной литературе обычно рассматриваются в области под названием «Risk Management», являющейся подразделом теории менеджмента. Последняя относится к наукам слабой версии (подробнее см., например, [1]) и не подразумевает работу с количественными оценками рисков. Значимыми результатами исследований в этой области являются структурированные наборы формализованных процедур идентификации рисков и выбора управляющих воздействий, направленных на их снижение (risk management framework). Наиболее успешные практики входят в состав стандартов (например, серии ISO 31000 [2] и 27005 [3]). При этом предлагаемые фреймворки не имеют в своей основе математической модели защищаемой системы, в связи с чем количественные оценки эффективности их применения затруднены. По той же причине сложно сравнивать их между собой.

С количественными моделями оценки риска много работают исследователи в областях актуарной и финансовой математики. Большинство таких моделей являются статистическими и требуют для практического применения достаточно больших накопленных объемов исторических данных. Термин «структура» в этих областях встречается, например, в контексте решения задач оптимизации портфелей страховых или биржевых активов — и в этом смысле, скорее, характеризует их количественный состав нежели взаимосвязи.

В разделе «дизайн механизмов» теории управления встречаются оптимизационные и теоретико-игровые постановки задачи минимизации риска. Следует отметить, что наиболее часто они формулируются по аналогии с постановками задач синтеза оптимальных механизмов управления. В этом контексте термин «структура» употребляется при описании взаимоотношений управляющих центров и активных агентов. Модели же защищаемых систем обычно представлены в виде множества элементов (по аналогии с множеством агентов). Поскольку возможные взаимосвязи между ними не оказывают влияния на решения задач в типовых постановках, то и в фокус внимания исследователей.

Свойства различных структур и связанные с возможными сценариями их деградации задачи управления рисками детально изучаются в соответствующих разделах естественных наук, например, в математической физике. Множество важных результатов получено при изучении графов социального влияния, энергосистем, дорожных графов, структур макромолекул. Однако вопрос о применимости полученных результатов для количественной оценки влияния структуры сложной системы на ее интегральный риск остается открытым.

Отметим, что для систем с изолированными элементами получен ряд фундаментальных результатов, позволяющих строить алгоритмы решения задач оптимального с точки зрения минимизации рисков распределения ресурсов, в том числе в условиях разного рода неопределенности.

В настоящей (и ряде предшествующих) работ сделан акцент на том, чтобы рассчитать влияние структуры сложной системы на количественную оценку ее интегрального риска, безотносительно выделяемых ресурсов. С этой целью в работе [4] была предложена альтернативная формулировка задачи минимизации риска. Классическая постановка предполагает нахождение оптимального распределения ресурсов среди элементов защищаемой системы с фиксированной структурой. В альтернативной формулировке предлагается находить оптимальное с точки зрения интегрального риска размещение элементов системы внутри некоторой заданной структуры. Такая постановка позволяет сравнивать различные структуры между собой с точки зрения влияния на риск, что отчасти компенсирует неестественность постановки (в большинстве реальных систем возможности поменять элементы местами невозможно).

Прямое решение поставленной задачи для сложной системы со структурой произвольной топологии невозможно из-за высокой вычислительной сложности, поэтому представляется разумным последовательно получать точные или эвристические решения для различных типов структур в порядке возрастания их сложности, а именно:

1) простая цепь;
2) «звезда»;
3) древовидная структура;
4) произвольная структура.

Далее приведено решение задачи для простой цепи. Более подробно оно обсуждается в работе [4].

Рассмотрим сложную систему, состоящую из конечного множества элементов (объектов, пока произвольной природы): $S = \{s_1, \dots, s_i, \dots, s_n\}$, $i \in N = \{1, \dots, n\}, n \in \mathbb{N}$. Для каждого элемента s_i нам известна вероятность p_i его успешного преодоления злоумышленником, а также величина u_i ущерба системе в случае успешной атаки.

Определение 1. Пусть задан граф $G\left(V = \{v_1, \dots, v_n\}, E = \{(v_i, v_{i+1})\}_{i=1}^{n-1}\right), m \in \mathbb{N}$ и периметр $T = \{v_1\}$. Тогда будем говорить, что кортеж $W_n = \langle G(V,E), T \rangle$ задает простую цепную структуру длины n.

Определение 2. Взаимно-однозначное отображение $M^{-1}: S \to V, S = \{s_1, \dots, s_n\}, n \in N: \forall i \le n\ \exists! j \le n: v_j = M^{-1}(s_i)$ будем называть размещением элементов S в структуре W. Соответствующее обратное отображение $M: V \to S$ будем называть проекцией структуры W_n на множество элементов S.

Для произвольного заданного размещения $M^{-1}: S \to V$ можно рассчитать значение интегрального риска

$$\rho(S, W_n, M^{-1}) = \sum_{i=1}^{n} \rho_{M(v_i)}, \tag{1}$$

где $\rho_{M(v_i)}$ – значение локального риска для элемента $M(v_i)$, и записать задачу минимизации интегрального риска, заключающуюся в поиске множества $\mathbf{M}_{min}$ таких размещений, для каждого из которых достигается минимальное значение интегрального риска ρ_{min}:

$$\mathbf{M}_{min} = \underset{M^{-1}}{\mathrm{Argmin}}\, \rho(S, W_n, M^{-1}):$$
$$\rho_{min} = \sum_{i=1}^{n} \rho_{M(v_i)} \ \forall M^{-1} \in \mathbf{M}_{min}. \quad (2)$$

Определение 3. Будем говорить, что элементы $s_i, s_j \in S, i, j \in N, i \neq j$ нестрого упорядочены по возрастанию (убыванию) локального риска и записывать $s_i \preccurlyeq s_j$ ($s_i \succcurlyeq s_j$) если при заданной простой цепной структуре W_n для любых размещений M^{-1}, K^{-1} и любых таких индексов $p, q, k, l, p < q, k > l$, что $s_i = M(v_p) = K(v_k), s_j = M(v_q) = K(v_l)$ выполняется неравенство $\rho(S, W_n, M^{-1}) \leq \rho(S, W_n, K^{-1})$ ($\rho(S, W_n, M^{-1}) \geq \rho(S, W_n, K^{-1})$).

В работе [4] были доказаны следующие утверждения.

Утверждение 1 (критерий упорядоченности). Пусть $N = \{1, .., n\}$, $S = \{s_1, \ldots, s_n\}$. Тогда $\forall i \in N \backslash \{n\}\, s_i \preccurlyeq s_{i+1} \Leftrightarrow \frac{u_i}{u_{i+1}} \leq \frac{p_{i+1}(1-p_i)}{p_i(1-p_{i+1})}$; $s_i \succcurlyeq s_{i+1} \Leftrightarrow \frac{u_i}{u_{i+1}} \geq \frac{p_{i+1}(1-p_i)}{p_i(1-p_{i+1})}$.

Утверждение 2 (транзитивность критерия упорядоченности). Пусть $N = \{1, .., n\}$, $S = \{s_1, \ldots, s_n\}$, $n \in \mathbb{N}$. Тогда $\forall i, j, k \in N: i < j < k\ s_i \preccurlyeq s_j \preccurlyeq s_k \Longrightarrow s_i \preccurlyeq s_k$.

Приведенные утверждения позволяют решить задачу (2) для любой цепной структуры с одновершинным периметром в общем виде.

В реальных задачах защитник редко имеет возможность выбирать размещение элементов в структуре. В то же время защитник может применить предложенный в настоящей работе подход для учета информации о структуре возможной атаки при решении задачи о выделении ресурсов в рамках классических моделей Defender-Attacker и Defender-Attacker-Defender.

Полученный результат будет использоваться при исследовании древовидных структур, а также структур произвольной конфигурации.

Литература:

1. *Новиков А.М., Новиков Д.А.* Методология. – М.: СИНТЕГ, 2007. – 668 с.

2. ISO 31000:2018 Risk management – Guidelines. – URL: https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:31000:ed-2:v1:en (дата обращения 4.10.2023).

3. ISO/IEC 27005:2022(en) Information security, cybersecurity and privacy protection – Guidance on managing information security risks. – URL: https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso-iec:27005:ed-4:v1:en (дата обращения 4.10.2023).

4. *Shiroky A.A., Kalashnikov A.O.* Mathematical Problems of Managing the Risks of Complex Systems under Targeted Attacks with Known Structures // Mathematics. – 2021. – Vol. 9 (19). – 2468.