

О ПРОГНОЗИРОВАНИИ УСТОЙЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ, ПОДВЕРЖЕННОЙ ВОЗДЕЙСТВИЮ УГРОЗ

Воеводин В. А.¹

DOI: 10.21681/2311-3456-2025-5-41-49

Цель исследования: обосновать актуальность, сформулировать и формализовать научную задачу прогнозирования устойчивости функционирования системы безопасности объектов критической информационной инфраструктуры (КИИ), подверженных воздействию угроз.

Методы исследования: эвристические, экстраполяционные, экспертные, сравнение и сопоставление, дифференциальное исчисление, информационная диагностика.

Полученные результаты: сформулированы вербальная и формальная постановки научной задачи прогнозирования устойчивости функционирования системы безопасности объектов КИИ, подверженных воздействию угроз, предложен алгоритм ее решения задач.

Научная новизна: предлагается инструмент для прогнозирования, основанный на построении прогностической модели, представляющей собой линейную комбинацию одноименных параметров объекта прогнозирования и объектов-аналогов. На основе данных о значении параметров объектов-аналогов, когда одноименные параметры имеют линейную корреляцию, делается прогноз. Например, можно априори предсказать устойчивость функционирования системы безопасности объекта критической инфраструктуры после планируемого реинжиниринга его системы безопасности.

Практическая значимость: постановка научной задачи может служить основой для формулирования технического задания на реинжиниринг систем безопасности объектов КИИ с заданными требованиями к устойчивости их функционирования.

Ключевые слова: прогнозирование, устойчивость функционирования, объект-аналог, реинжиниринг, объект критической информационной инфраструктуры, угрозы.

Введение

Для поддержания требуемого уровня кибербезопасности и устойчивости функционирования (устойчивость) объектов критической информационной инфраструктуры (КИИ) в соответствии со складывающейся обстановкой осуществляется реинжиниринг их систем безопасности. Системы безопасности (СБ) создаются субъектами КИИ для обеспечения информационной безопасности (защиты информации)².

Органам управления информационной безопасностью (ИБ) при принятии решения по реинжинирингу СБ объектов КИИ на ранних стадиях разработки проекта, требуется инструмент для прогнозирования, в том числе, устойчивости функционирования СБ. Прогнозирование устойчивости на ранних этапах разработки сложных и уникальных систем осуществляется в условиях высокой неопределенности, когда нет точных сведений о будущем составе и структуре объекта. На практике могут быть известны:

1) требуемые значения отдельных параметров СБ (требования заказчика), подвергаемой реинжинирингу; 2) устойчивости функционирования одного или нескольких реальных объектов-аналогов, которые могут быть признаны экспертами как прототипы рассматриваемой СБ. В соответствии с этими предположениями задача прогнозирования имеет следующую вербальную постановку.

Постановка задачи

Пусть требуется априори оценить устойчивости функционирования объекта КИИ после ее реинжиниринга его СБ. Для чего было принято решение организовать и провести внутренний аудит с целью прогнозирования устойчивости функционирования объекта КИИ после реинжиниринга СБ. Для организации аудита имеются исходные данные, характеризующие: 1) устойчивости функционирования реальных аналогичных объектов КИИ, находящихся в сравнимых

1 Воеводин Владислав Александрович, кандидат технических наук, доцент МИЭТ, Москва, Россия. AuthorID: 1012813, ORCID 0009-0003-9431-1685. E-mail: vva541@mail.ru

2 Требования к созданию систем безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации и обеспечению их функционирования. Утверждены приказом ФСТЭК России от 21 декабря 2017 г. № 235.

условиях в отношении воздействия угроз; 2) требования к устойчивости функционирования оцениваемого объекта, подвергаемого реинжинирингу.

Требуется разработать методику, позволяющую получить прогноз устойчивости функционирования объекта КИИ с учетом возможного воздействия угроз. Определения понятия «кибербезопасность» приводятся в [1], структурной и функциональной устойчивости – в [2]. Далее по тексту объект КИИ будет позиционироваться как объект информатизации (ОИ).

Пусть заданы:

1. Исходные условия (данные):

- а) требования к устойчивости функционирования, заданные с помощью нестационарного коэффициента живучести $K_{ж}(t)$ ОИ, который характеризует вероятность того, что в момент времени $t \in (0, T]$ он будет находиться в состоянии «функционален», при условии что в начальный момент времени t_0 он находился в состоянии «функционален».
- б) требования к обеспечению устойчивости функционирования оцениваемого ОИ $K_{ж}(t) \geq K_{ж}^*$, $t \in (0, T]$, где $K_{ж}^*$ – требуемое пороговое значение нестационарного коэффициента живучести;
- в) значения параметров, оцениваемого ОИ, существенных для обеспечения требуемой устойчивости его функционирования $X^* = \{x_i^*\}$, $i = (1, n)$, где n – число учитываемых параметров;
- г) устойчивость функционирования реальных ОИ – объектов-аналогов $U = \{U_l\}$, $l = (1, L)$, где L – число объектов-аналогов;
- д) значения аналогичных параметров для объектов-аналогов $X_l = \{x_{li}\}$, $i = (1, n)$, $l = (1, L)$;
- е) из множества потенциальных объектов-аналогов L экспертным методом выбирается один, который обладает наиболее близким сходством по отношению к оцениваемому, поэтому при дальнейших рассуждениях, если это не изменяет их смысл, индекс l будет опускаться.

2. Исходные гипотезы:

1. В общем виде прогноз устойчивости оцениваемого ОИ U^* (позиционируется как зависимый или искомый параметр) может быть получен с помощью некоторой обобщенной функции

$$U^* = U(g_1, g_2, \dots, g_n), \quad (1)$$

где $g_i = \frac{x_i^*}{x_i}$, $i = (1, n)$, g_i – нормирующий коэффициент соответствующих одноименных параметров, который вводится для приведения сравниваемых параметров к одной относительной шкале прогнозирования.

2. При прогнозировании устойчивости необходимо учитывать, что задача решается в условиях:

- а) высокой информационной неопределенности, при которой нет точных сведений о сценарии воздействия угроз, вероятностных характеристиках $K_{ж}(t)$;
- б) формализованный вид зависимости (1) для сложных объектов вывести неоправданно сложно или практически невозможно;
- в) при этом имеется некоторая информация по реальным объектам-аналогам $X_l = \{x_{li}\}$ и $U = \{U_l\}$, см. исходные данные.

В этих условиях конструктивным является подход поиска приближенной функциональной зависимости для выражения (1), построенной на основе процедуры сравнения с аналогами.

3. Исходные допущения:

- а) все нормирующие коэффициенты (параметры) $g_{li} \geq 0$ и независимы;
- б) g_{li} предпочтительно максимизируют;
- в) исходная функция (1): неотрицательна и монотонно возрастающая по всем аргументам;
- г) $U(r, g_i) = \gamma(r)U(g_i)$, $i = (1, n)$, при одновременном увеличении значений всех параметров в r раз устойчивость возрастает в $\gamma(r)$ раз, где $\gamma(r)$ – некоторая дифференцируемая возрастающая функция $r \geq 1$, принимающая при $r = 1$ значение $\gamma(r) = 1$.

Обосновать принятие перечисленных исходных допущений на практике можно с учетом следующих обстоятельств:

1. Условия а) и б) могут быть выполнены соответствующим выбором сравниваемых параметров объекта-аналога. При этом в случае минимизируемых параметров можно брать их обратные значения.
2. Условия в) и г) могут быть приняты на основании логики вещей, так как увеличение (улучшение) значений параметров на практике всегда связано с дополнительными затратами, зависящими от степени их улучшения.

4. Требуется сформировать прогноз устойчивости U^* оцениваемого ОИ, подверженного воздействию угроз. Известные способы оценивания устойчивости ориентированы на условия штатного применения, для которых возможно получить репрезентативную статистику, характеризующую надежность элементов ОИ. Для условий воздействия угроз, когда репрезентативная статистика в принципе отсутствует, а сами процессы не являются стационарными такие методы могут приводить к ошибочным оценкам.

Ретроспективный анализ методов решения подобных задач

В настоящее время опубликовано значительное число работ, посвященных оцениванию результативности эксплуатации сложных технических систем³,

³ Саркисян С. А., Ахундов В. М., Минаев Э. С. Анализ и прогноз развития больших технических систем. – М.: Наука, 1982. – 282 с.

в том числе в условиях штатного применения [3–9]. В условиях штатного применения возникают отказы, порядок устранения которых строго регламентирован в эксплуатационной документации и обеспечен всеми имеющимися силами и средствами и априори известен. Применяемые методы оценивания устойчивости КИИ основаны на моделях надежности функционирования восстанавливаемых технических устройств, которые построены на результатах наблюдения за стационарными условиями их эксплуатации. При этом следует учитывать, что теория надежности – это наука экспериментальная, рабочие гипотезы и выводы которой базируются на конкретных экспериментальных данных. Экспериментальные данные и выводы всегда отражают некоторую предысторию, а принимаемые решения базируются на отрицательном опыте прошлого. Предметом теории надёжности являются методы обеспечения стабильности работы объектов в процессе проектирования, производства, приёмки, транспортировки, эксплуатации и хранения. Вопросам оценивания устойчивости функционирования объектов экономики в чрезвычайных ситуациях методом прогнозирования и моделирования производственных функций посвящены работы [10, 11]. В [10] автор делает вывод, что применение основных положений оценивания устойчивости функционирования объектов экономики методом прогнозирования может оптимизировать использование сил и средств при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций с помощью коэффициентов надёжности. В [11] автор предлагает подход к моделированию производственных функций в условиях стохастической неопределенности с целью оценивания риска. Во всех упомянутых выше публикациях в основу оценивания был положен циклический процессный подход с обучением.

Для прогнозирования применительно к воздействию угроз нет и не может быть репрезентативной статистики, прежде всего по причине того, что обстановка динамична, сами явления весьма редки и зависят от сценария воздействия угроз (поведенческой неопределенности). В этом случае справедливо предварительное утверждение (гипотеза), что применение классических методов теории надежности, основанных на процессном подходе с обучением, для прогнозирования могут давать ошибочные результаты. Отсюда следует, что применительно к условиям воздействия угроз требуются обобщение методов теории надежности на случаи, когда процесс применения не является стационарным, ограничен по времени и ему присуща поведенческая неопределенность и отсутствуют условия для создания обучающей выборки.

Решение задачи

Учитывая приведенные выше обстоятельства, предлагается авторский подход к решению поставленной задачи. Для решения задачи предлагается использовать модель прогнозируемого объекта в виде полного дифференциала функции (1)

$$dU^* = \sum_{i=1}^n \frac{\partial U^*}{\partial g_i} \Delta g_i,$$

где $\Delta g_i = dg_i$ с учетом того, что g_i являются аргументами в (1).

В соответствии с исходным допущением в) при приращении параметров

$$\Delta g_i = (r - 1) g_i, \quad i = \overline{1, n},$$

полный дифференциал

$$dU^* = [\gamma(r) - 1]U^* - \varepsilon,$$

где ε – величина, которую можно считать величиной высшего порядка малости, которую при расчетах можно не учитывать.

В результате

$$[\gamma(r) - 1]U^* - \varepsilon = \sum_{i=1}^n \frac{\partial U^*}{\partial g_i} (r - 1)g_i$$

или

$$\frac{\gamma(r) - 1}{r - 1} U^* - \frac{\varepsilon}{r - 1} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial U^*}{\partial g_i} g_i.$$

При $r \rightarrow 1$ получаем

$$\rho U^* = \sum_{i=1}^n \frac{\partial U^*}{\partial g_i} g_i \quad (2)$$

где $\rho = \frac{\partial \gamma(r)}{\partial r}$ – показатель скорости роста устойчивости, характеризующий возрастание ее уровня при увеличении значений параметров, характеризующих СБ.

Таким образом, определение значений функции (1) сводится к решению дифференциального уравнения (2) в частных производных.

Для получения решения определяются начальные условия.

1. Пусть $g_1, g_2, \dots, g_n = 1$, тогда $U^* = U_l$, так как $g_i = \frac{x_i^*}{x_i}$ и $g_i = 1$, то $x_i^* = x_i$ и $U^* = U(1, 1, \dots, 1) = U_l$.

При данных начальных условиях можно получить следующие частные решения уравнения (2):

$$U^* = U_l \prod_{i=1}^n g_i^{\lambda}, \quad \lambda > 0; \quad (3)$$

$$U^* = U_l [\sum_{i=1}^n \beta_i g_i]^{\omega}, \quad \omega > 0; \quad (4)$$

$$U^* = U_l \prod_{i=1}^n g_i^{\alpha_i}, \quad \sum_{i=1}^n \alpha_i = 1; \quad (5)$$

$$U^* = U_l \sum_{i=1}^n \beta_i g_i, \quad \sum_{i=1}^n \beta_i = 1; \quad (6)$$

где α, β – показатели степени, характеризующие влияние произведения и взвешенной суммы значений

параметров на устойчивость U^* ; α_i , β_i – коэффициенты важности, характеризующие влияние каждого отдельного параметра g_i на устойчивость ОИ.

Полученные выражения (3–6) удовлетворяют уравнению (2) при различных значениях коэффициента роста ρ . Выражению (3) соответствует $\rho = \lambda n$, т. е. при одновременном возрастании параметров в r раз устойчивость возрастает в $\gamma(r) = \lambda nr$ раз. Выражению (4) соответствует $\rho = \omega$ и $\gamma(r) = \omega r$. Выражения (5) и (6) удовлетворяют уравнению (2) при $\beta = 1$ и $\gamma(r) = r$.

Данные выражения могут быть использованы для определения прогнозируемого значения устойчивости U_π^* посредством подстановки соответствующих значений параметров $g_{\pi i} = \frac{x_{\pi i}^*}{x_{li}}$. Однако для этого необходимо определить значения λ , ω , α_i , β_i и выбрать из числа полученных соотношений $U_\pi^* = U(g_{\pi 1}, g_{\pi 2}, \dots, g_{\pi n})$, обеспечивающих минимальную погрешность прогнозирования.

Последовательность прогнозирования. В соответствии с исходными данными и полученными соотношениями процесс прогнозирования можно осуществить в следующей последовательности:

- 1) определение показателя λ в выражении (3);
- 2) определение коэффициентов важности α_i и β_i в выражениях (4), (5), (6);
- 3) определение показателя ω в выражении (4);
- 4) выбор соотношения $U_\pi^* = U(g_{\pi 1}, g_{\pi 2}, \dots, g_{\pi n})$, обеспечивающего минимальную погрешность прогнозирования;
- 5) определение прогнозируемого уровня устойчивости U_π^* .

Определение показателя λ производится на основании исходных данных об устойчивостях U_l и соответствующих параметров x_{li} для объектов-аналогов, $l = 1, \bar{L}$, $i = 1, n$.

Выбирается один из объектов-аналогов, имеющий максимальный уровень устойчивости U_k , в качестве базового. Для каждого l -го объекта оценивания (ОО) вычисляется значение

$$\pi_l = \prod_{i=1}^n g_{li}$$

и соответствующие отношения

$$\delta_l = \frac{U_l}{U_k}, l = \overline{1, L},$$

где $g_{li} = \frac{x_{li}}{x_{k,i}}$, x_{li} – значение i -го параметра l -го ОО; $x_{k,i}$ – значение i -го параметра базового k -го объекта-аналога.

В результате получаем L точек, характеризующих зависимости $\delta = \varphi(\pi)$, в которой при $l = k$, $\pi_l = 1$ и $\delta_l = 1$. Предполагается, что данная зависимость сохраняется для объектов-аналогов, которые являются прототипами:

$$\delta_\pi = \frac{U_\pi}{U_l} = \varphi(\pi_\pi),$$

$$\text{где } \pi_\pi = \prod_{i=1}^n g_{\pi i}; g_{\pi i} = \frac{x_{\pi i}}{x_{li}}.$$

Если при этом $U_\pi = U_b$ то $\delta_\pi = 1$, $\pi_\pi = 1$, что соответствует начальной точке при $l = k$ для объектов-аналогов.

Далее сглаживается зависимость $\delta = \varphi(\pi)$ с помощью функции вида $\delta = \pi^\lambda$. Для сглаживания используется метод наименьших квадратов, в соответствии с которым необходимо определить такое значение λ , которое обеспечивает минимум квадратичной формы⁴:

$$S(\lambda) = \sum_{l=1}^L (\pi_l^\lambda - \delta_l)^2.$$

Значение λ определяется в результате решения уравнения

$$\frac{dS}{d\lambda} = 2 \sum_{l=1}^L (\pi_l^\lambda - \delta_l) \pi_l^\lambda \ln \pi_l = 0$$

или

$$\sum_{l=1}^L (\pi_l^\lambda - \delta_l) \pi_l^\lambda \ln \pi_l = 0 \quad (7)$$

Определение значений коэффициентов важности α_i и β_i производится в следующей последовательности. Вначале с использованием более простого выражения (6) определяются значения β_i , а затем на основании равенства выражений (5) и (6) при $g_i = g_{\pi i}$ подбираются значения α_i . Для снижения сложности расчетов целесообразно взять логарифмы от этих выражений:

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i \lg g_{\pi i} = \lg \sum_{i=1}^n \beta_i g_{\pi i}. \quad (8)$$

Аналитические зависимости, характеризующие коэффициент важности β_i , можно определить путем подстановки функции (6) в уравнение (2) при $\rho = 1$. В результате получим

$$U_l \sum_{i=1}^n \beta_i g_i = \sum_{i=1}^n \frac{\partial U}{\partial g_i} \Big|_{g_i=1} g_i$$

или

$$\sum_{i=1}^n \beta_i g_i = \sum_{i=1}^n \frac{v_i}{U_l} g_i, \quad (9)$$

где $v_i = \frac{\partial U}{\partial g_i} \Big|_{g_i=1}$ – интенсивность изменения устойчивости при изменении параметра g_i относительно начального значения $g_i = 1$.

Равенство (9) сохраняется в случае

$$\beta_i = \frac{v_i}{U_l}. \quad (10)$$

Таким образом, значение коэффициента важности β_i прямо пропорционально приращению устойчивости функционирования объекта на единицу приращения параметра g_i^* . Для определения конкретных

4 Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. – М.: Наука, 1962. 349 с.

значений β_i можно использовать следующие методы: 1) метод, основанный на решении системы линейных уравнений; 2) метод наименьших квадратов; 3) методы экспертных оценок. Для повышения достоверности и при наличии ресурса рекомендуется использовать все методы в комплексе с последующим сравнением полученных результатов.

Система линейных уравнений составляется на основе исходных данных и имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 g_{11} + \beta_2 g_{12} + \dots + \beta_n g_{1n} &= \delta_1; \\ \beta_1 g_{21} + \beta_2 g_{22} + \dots + \beta_n g_{2n} &= \delta_2; \\ \dots & \\ \beta_1 g_{n-1,1} + \beta_2 g_{n-1,2} + \dots + \beta_n g_{n-1,n} &= \delta_{n-1}; \\ \beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_n &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где $g_{l,i} = \frac{x_{li}}{x_{ki}}$, x_{li} – значение i -го параметра l -го объекта-аналога; x_{ki} – значения i -го параметра объекта-аналога, выбранного в качестве базового; $\delta_l = \frac{U_l}{U_k}$ – приведенная устойчивость l -й объекта-аналога к устойчивости базового объекта-аналога; U_k – устойчивость функционирования для базового к объекта-аналога; $l = 1, n-1$; $i = 1, n$; $\frac{U_k}{U_l} < U_l$.

Определение значений β_i , $i = 1, n$, посредством решения системы (11) возможно, если $L \geq n$. т. е. число объектов-аналогов L не меньше числа параметров n . Неравенство $L \geq n$ получается из условия, что один из объектов аналогов выбирается в качестве базового, а одно из уравнений представляет собой условие

$$\sum_{i=1}^n \beta_i = 1.$$

При использовании метода наименьших квадратов необходимо определить также значения β_i , которые обеспечивают минимум квадратичной формы:

$$S(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n) = \sum_{l=1}^L (\varphi_l - \delta_l)^2,$$

где

$$\varphi_l = \sum_{i=1}^n \beta_i g_{l,i}.$$

В результате получаем систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{l=1}^L (\varphi_l - \delta_l) g_{l,1} &= 0; \\ \sum_{l=1}^L (\varphi_l - \delta_l) g_{l,2} &= 0; \\ \dots & \\ \sum_{l=1}^L (\varphi_l - \delta_l) g_{l,n-1} &= 0; \\ \beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_n &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Подставляем в данную систему выражение

$$\sum_{i=1}^n \beta_i g_{l,i} = \varphi_l$$

и путем решения полученной системы определяем неизвестные параметры β_i .

Метод наименьших квадратов имеет существенные преимущества, так как позволяет определять значения β_i при $L < n$ и дает меньшую погрешность приближения.

Метод экспертных оценок целесообразно использовать в тех случаях, при которых число L объектов-аналогов незначительно или когда значения коэффициентов важности β_i параметров объектов аналогов не соответствуют значениям β_i оцениваемого объекта.

Анализ методов экспертного оценивания позволяет утверждать, что в наибольшей степени подходит метод анкетного опроса, в ходе которого каждый эксперт попарно оценивает степень влияния каждого параметра на устойчивость функционирования ОО.

Таблица 1.

Параметры существенные для прогнозирования затрат

Наименование параметра	Физический смысл	Тип шкалы	Диапазон изменения
g_1 – отношение затрат на ИБ к затратам на ИТ	Доля ресурса, выделенного на обеспечение устойчивости функционирования на период $(0, T]$	$g_1 = \frac{C_{ИБ} - C_{ИТ}}{C_{ИБ}}$	$(-1, +1)$
g_2 – минимум функции устойчивости (функции живучести)	Максимум вероятности того, что в результате воздействия угроз на периоде $(0, T]$ объект потеряет свою функциональность	$u_m = \min_{t \in (0, T]} u(t)$	$(0,1)$
g_3 – доля резерва невозобновляемого ресурса	Доля резерва от общей ресурсоемкости восстановительных работ оцениваемого объекта, выделенного на период $(0, T]$, для обеспечения восстановления функциональности	$g_3 = \frac{C_P - C_{ИБ}}{C_{ИБ}}$	$(-1, +1)$
g_4 – вариабельность времени восстановления	Отношение разницы нижней и верхней границ прогностических оценок времени восстановления функциональности после успешного воздействия угроз к периоду $(0, T]$	$g_4 = \frac{\tau - \hat{\tau}}{T}$	$(0,1)$

Период $(0, T]$ – прогнозируемая продолжительность периода воздействия угроз, T – прогнозируемый момент времени завершения восстановления функциональности объекта оценивания от начала отчета – 0.

СИБ – стоимость мероприятий по обеспечению ИБ на периоде $(0, T]$;

СИТ – стоимость мероприятий по обеспечению ИТ на периоде $(0, T]$;

СР – стоимость резерва (невозобновляемого ресурса, находящегося в резерве);

$\hat{t}$ – верхняя прогностическая оценка времени восстановления функциональности;

$\underline{t}$ – нижняя прогностическая оценка времени восстановления функциональности;

Физический смысл и содержание показателей приведены в табл. 1

Далее эксперту предлагается заполнить квадратную таблицу-матрицу, например, табл. 2. Каждой строке и столбцу матрицы соответствует определенный параметр. Заполнение матрицы осуществляется по следующему правилу.

Выделяется первая строка, соответствующая параметру g_1 . Выделенный параметр последовательно сравнивается с другими параметрами, указанными в соответствующих столбцах. Если, по мнению эксперта, приращение устойчивости на единицу первого параметра g_1 больше, чем на единицу сравниваемого параметра g_r , то на пересечении первой строки и r -го столбца проставляется 1, в противном случае – 0 и т. д. Затем сравнение повторяется для остальных строк матрицы. После проведения экспертного опроса группы из m экспертов прогнозист получает m заполненных матриц

$$D_j = \|d_{i,r,j}\|, i, r = \overline{1, n}; j = \overline{1, m},$$

где $d_{i,r,j}$ – обобщающий элемент j -й матрицы, характеризующий предпочтение j -го эксперта, по параметру g_i в отношении параметра g_r по затратам.

Статистическая обработка полученных результатов осуществляется следующим образом:

1. Суммируются элементы каждой i -й строки матрицы D_j и определяется балл

$$d_{i,j} = \sum_{r=1}^n d_{i,r,j}, i = \overline{1, n},$$

характеризующий предпочтение параметра g_i перед остальными параметрами по затратам.

По полученным величинам $d_{i,j}$ вычисляется коэффициент важности $\beta_{i,j}$, определяющий, по мнению эксперта j , относительное предпочтение параметра g_i перед остальными параметрами по затратам:

$$\beta_{i,j} = \frac{d_{i,j}}{\sum_{i=1}^n d_{i,i}}. \quad (13)$$

2. Затем вычисляется среднее значение

$$\bar{\beta}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \beta_{i,j}, i = \overline{1, n}, \quad (14)$$

и дисперсия

$$D_{\beta_i} = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (\beta_{i,j} - \bar{\beta}_i)^2, i = \overline{1, n}, \quad (15)$$

каждого коэффициента важности β_i .

3. Определение показателя ω в выражении (4) производится на основании исходных данных о значениях устойчивости функционирования объектов-аналогов, а также полученных значений коэффициентов важности β_i . Определение осуществляется по аналогии, как и при вычисления показателя λ , только для каждого l -го объекта-аналога вместо π_l вычисляется значение

$$\sigma_l = \sum_{i=1}^n \beta_i g_{li}.$$

Таблица 2.

Результат анкетного опроса (вариант)

Наименование показателя	g_1 – отношение затрат на ИБ к затратам на ИТ	g_2 – минимум функции устойчивости	g_3 – доля резерва невозобновляемого ресурса	g_4 – вариабельность времени восстановления
g_1 – отношение затрат на ИБ к затратам на ИТ	–	0	0	1
g_2 – минимум функции устойчивости		–	1	1
g_3 – доля резерва невозобновляемого ресурса			–	1
g_4 – вариабельность времени восстановления				–

В результате получаем L точек (σ_l, δ_l) , характеризующих значение графика $\delta = f(\sigma)$. Сглаживаем зависимость $\delta = f(\sigma)$ функцией $\delta = \sigma^\omega$ с использованием метода наименьших квадратов. Значение ω определяется путем решения уравнения

$$\sum_{l=1}^L (\sigma_l^\omega - \delta_l) \sigma_l^\omega \ln \sigma_l = 0.$$

Выбор соотношения $U_\Pi = U(g_{n,1}, g_{n,2}, \dots, g_{n,n})$, обеспечивающего наименьшую погрешность прогнозирования, производится из семейства выражений (3), (4), (5), (6). Выбор осуществляется на основании критерия минимума суммы квадратов отклонений вычисленных уровней устойчивости соответствующих объектов-аналогов, т. е. необходимо выбрать такое соотношение j , которое бы обеспечивало

$$\sum_{l=1}^L (\varphi_{lj} - \delta_l)^2 = \min_j, j = 1, 3, 4, \dots, \quad (16)$$

где

$$\varphi_{l,1} = \prod_{i=1}^n g_{li}^\lambda; \varphi_{l,2} = \left[\sum_{i=1}^n \beta_i g_{li} \right]^\omega; \varphi_{l,3} = \prod_{i=1}^n g_{li}^{\alpha_i};$$

$$\varphi_{l,4} = \sum_{i=1}^n \beta_i g_{li}; g_{li} = \frac{x_{li}}{x_{\kappa,i}}; \delta = \frac{U_l}{U_\kappa},$$

где κ – индекс базового объекта-аналога.

Выбранное с помощью данного критерия соотношение может быть рекомендовано в качестве прогноза устойчивости ОО после его реинжиниринга (обеспечение устойчивости его функционирования в условиях воздействия угроз).

Определение прогнозируемых затрат U_Π производится посредством подстановки соответствующих значений параметров $g_{\Pi i} = \frac{x_{\Pi i}}{x_{\kappa i}}$ в выбранное соотношение и вычисление УП. Например, пусть в соответствии с критерием (16) наименьшую погрешность обеспечивает соотношение (4). Тогда

$$U_\Pi = U_l \left[\sum_{i=1}^n \beta_i g_{\Pi i} \right]. \quad (17)$$

Если значение $g_{\Pi i}$ задаются приблизительно с помощью законов распределения или числовых характеристик, то с использованием соотношения (17) также определяются соответствующие законы распределения или числовые характеристики (математическое ожидание и дисперсия) величины U_Π . При этом необходимо учитывать среднюю погрешность, допускаемую при использовании приближенного выражения (17).

Для априорной оценки погрешности прогноза статистическими методами можно использовать размер доверительного интервала. Модель прогноза считается более точной, если при одной и той же доверительной вероятности она даёт более узкий доверительный интервал по сравнению с другой моделью.

Выводы

В результате настоящего исследования предложен авторский подход к прогнозированию уровня устойчивости объектов КИИ после реинжиниринга его СБ, который позволяет решить задачу обоснования проектного решения на ранних этапах. Предложенный подход отличается от известных применением методов математического анализа совместно с экстраполяционными и экспертными методами, что в совокупности позволяет построить: а) результативную прогностическую модель ОО; б) прогноз за пределами обучения на основе параллельного балансирования влияния выбранных параметров.

При применении метода следует учитывать следующие обстоятельства:

- если между одноименными параметрами существует нелинейная зависимость, линейная модель может давать результаты с большой погрешностью;
- модель чувствительна к выбросам значений одноименных параметров.

При выборе метода следует учитывать, что предлагаемая модель уступает статистическим моделям в точности оценивания зависимой переменной, поэтому ее следует применять, если отсутствует репрезентативная статистика.

В качестве объекта прогнозирования могут выступать и другие факторы, например:

- *управляемые факторы*, которые можно корректировать посредством организации целенаправленных воздействий, например стоимость владения, вероятность поражения, устойчивость функционирования и т. п.;
- *неуправляемые факторы*, будущее проявление которых можно только прогнозировать, но изменять практически невозможно, например сценарий воздействия противника, физико-географические особенности и т. п.

Работа выполнена при поддержке Фонда Потанина.

Литература

1. Язов Ю. К. Об определении понятия «кибербезопасность» и связанных с ним терминов // Вопросы кибербезопасности. 2025. № 1(65). С. 2–6. DOI:10.21681/2311-3456-2025-1-2-6.
2. Воеводин В. А. Генезис понятия структурной устойчивости информационной инфраструктуры автоматизированной системы управления производственными процессами к воздействию целенаправленных угроз информационной безопасности. Вестник Воронежского института ФСИН России. 2023. № 2, апрель–июнь. С. 30–41.
3. Стародубцев Ю. И. Структурно-функциональная модель киберпространства/ Ю. И. Стародубцев, П. В. Закалкин, С. А. Иванов // Вопросы кибербезопасности. 2021. № 4(44), с. 16–24. DOI:10.21681/2311-3456-2021-4-16-24.
4. Фатин А. Д., Павленко Е. Ю. Анализ моделей представления киберфизических систем в задачах обеспечения информационной безопасности // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2020. № 2. С. 109–121.
5. Зегжда Д. П. Кибербезопасность цифровой индустрии. Теория и практика функциональной устойчивости к кибератакам / под ред. Д. П. Зегжды. – М.: Горячая линия – Телеком. 2022. – 560 с.
6. Коноваленко С. А. Методика оценивания функциональной устойчивости гетерогенной системы обнаружения, предупреждения и ликвидации последствий компьютерных атак // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 4. С. 157–195. doi: 10.24412/2410-9916-2023-4-157-195.
7. Ерохин С. Д., Петухов А. Н., Пилюгин П. А. Управление безопасностью критических информационных инфраструктур. М.: Горячая линия – Телеком. 2023. – 240 с.
8. Коцыняк М. А., Осадчий А. И., Коцыняк М. М., Лаута О. С., Деметьев В. Е., Васюков Д. Ю. Обеспечение устойчивости информационно-телекоммуникационных сетей в условиях информационного противоборства. СПб.: АО ЦНИИС, 2014. – 126 с.
9. Одоевский С. М., Лебедев П. В. Методика оценки устойчивости функционирования системы технологического управления информационно-коммуникационной сетью специального назначения с заданной топологической и функциональной структурой // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 1. – С. 152–189.
10. Евсупов В. М. Основные положения, используемые при оценке устойчивости функционирования объектов экономики в чрезвычайных ситуациях методом прогнозирования / В. М. Евсупов // Заметки ученого. – 2021. № 10. – С. 321–325.
11. Долгов А. В. Анализ современных подходов к моделированию производственных функций в условиях неопределенности / А. В. Долгов // Вестник Волжского университета им. В. Н. Татищева. – 2024, Т. 2, № 1(53). – С. 37–45. – DOI 10.51965/2076-7919_2024_2_1_37.

ON FORECASTING COSTS FOR THE RE-ENGINEERING OF THE SECURITY SYSTEM OF CRITICAL INFORMATION INFRASTRUCTURE OBJECTS EXPOSED TO THREATS

Voevodin V. A.⁵

Keywords: cost forecasting, operation sustainability, object-analog, re-engineering, critical information infrastructure object, threat.

The objective of the study: to justify the relevance, formulate and formalize the scientific task of forecasting costs for re-engineering the security system of critical information infrastructure (CII) objects exposed to threats.

Methods of research: heuristic, extrapolation, expert, comparison and comparison, differential calculus, informational diagnosis.

The results obtained: a verbal and formal formulation of the scientific task of forecasting costs for re-engineering the security system of KIA objects exposed to threats was formulated and an algorithm for its solution was proposed.

Scientific novelty: a tool for forecasting is proposed, based on the structure of a prognostic model, which represents a linear combination of the same-name parameters of the object of prediction and objects-analogues. Based on data about the value of parameters of objects-analogues, when namesake parameters have linear correlation, a forecast is made. For example, it is possible to predict the cost of reengineering, the sustainability of operation, the reserve stock, etc.

Practical significance: the scientific problem can serve as a basis for formulating a technical task to reengineer the safety systems of the KIA with the requirements for their sustainability.

References

1. Jazov Ju. K. Ob opredelenii ponjatija «kiberbezopasnost» i svjazannyh s nim terminov // Voprosy kiberbezopasnosti. 2025. № 1(65). С. 2–6. DOI:10.21681/2311-3456-2025-1-2-6.
2. Voevodin V. A. Genezis ponjatija strukturnoj ustojchivosti informacionnoj infrastruktury avtomatizirovannoj sistemy upravlenija proizvodstvennymi processami k vozdejstvu celenapravlennyh ugroz informacionnoj bezopasnosti. Vestnik Voronezhskogo instituta FSIN Rossii. 2023. № 2, april'–jun'. С. 30–41.
3. Starodubcev Ju. I. Strukturno-funkcional'naja model' kiberprostranstva/ Ju. I. Starodubcev, P. V. Zakalkin, S. A. Ivanov // Voprosy kiberbezopasnosti. 2021. № 4(44), s. 16–24. DOI:10.21681/2311-3456-2021-4-16-24.

⁵ Vladislav A. Voevodin, Ph.D. in Technical Sciences, MIET, Moscow, Russia. AuthorID: 1012813, ORCID 0009-0003-9431-1685. E-mail: vva541@mail.ru

4. Fatin A. D., Pavlenko E. Ju. Analiz modelej predstavlenija kiberfizicheskikh sistem v zadachah obespechenija informacionnoj bezopasnosti // Problemy informacionnoj bezopasnosti. Komp'juternye sistemy. 2020. № 2. S. 109–121.
5. Zegzhda D. P. Kiberbezopasnost' cifrovoj industrii. Teorija i praktika funkcional'noj ustojchivosti k kiberatakam / pod red. D. P. Zegzhdy. – M.: Gorjachaja linija – Telekom. 2022. – 560 s.
6. Konovalenko S. A. Metodika ocenivaniya funkcional'noj ustojchivosti geterogennoj sistemy obnaruzhenija, preduprezhdenija i likvidacii posledstvij komp'juternyh atak // Sistemy upravlenija, svjazi i bezopasnosti. 2023. № 4. S. 157–195. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-4-157-195.
7. Erohin S. D., Petuhov A. N., Piljugin P. L. Upravlenie bezopasnost'ju kriticheskikh informacionnyh infrastruktur. M.: Gorjachaja linija – Telekom. 2023. – 240 s.
8. Kocynjak M. A., Osadchij A. I., Kocynjak M. M., Lauta O. S., Dement'ev V. E., Vasjukov D. Ju. Obespechenie ustojchivosti informacionno-telekommunikacionnyh setej v uslovijah informacionnogo protivoborstva. SPb.: LO CNIIS, 2014. – 126 s.
9. Odoevskij S. M., Lebedev P. V. Metodika ocenki ustojchivosti funkcionirovanija sistemy tehnologicheskogo upravlenija infokommu-nikacionnoj set'ju special'nogo naznachenija s zadannoju topologicheskoi i funkcional'noj strukturoj // Sistemy upravlenija, svjazi i bezopasnosti. 2021. № 1. – S. 152–189.
10. Evstropov V. M. Osnovnye polozhenija, ispol'zuemye pri ocenke ustojchivosti funkcionirovanija ob#ektov jekonomiki v chrezvychajnyh situacijah metodom prognozirovaniya / V. M. Evstropov // Zametki uchenogo. – 2021. № 10. – S. 321–325.
11. Dolgov A. V. Analiz sovremennyh podhodov k modelirovaniju proizvodstvennyh funkcij v uslovijah neopredelennosti / A. V. Dolgov // Vestnik Volzhskogo universiteta im. V. N. Tatishheva. – 2024, T. 2, № 1(53). – S. 37–45. – DOI: 10.51965/2076-7919_2024_2_1_37.

