

Методический подход к вероятностному прогнозированию и сравнению качества функционирования систем в условиях неопределенности

Methodological approach to probabilistic prediction and comparison of systems operation quality under conditions of uncertainty

Костокрызов А.И.^{1*}, Нистратов А.А.¹
Andrey I. Kostogryzov^{1*}, Andrey A. Nistratov¹

¹Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

¹Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*Akostogr@gmail.com



Костокрызов А.И.



Нистратов А.А.

Резюме. Цель. Предложить методический подход к вероятностному прогнозированию и сравнению качества функционирования систем, производящих материальную и/или информационную продукцию, проиллюстрировать практичность предложенного подхода примерами в различных приложениях. **Методы.** Предложены к использованию методы и модели, построенные на основе методов теории вероятностей и системного анализа, доведенные до реализации в национальных стандартах системной инженерии. **Результаты.** Модели сложных систем, производящих материальную и/или информационную продукцию, адаптированы в интересах прогнозирования и сравнения для одной и той же системы в разных условиях функционирования, для разных систем применительно к одному периоду времени или для разных периодов времени с одинаковыми или отличающимися продолжительностью и условиями функционирования. Предложенный подход охватывает: методы оценки относительной части функций системы, выполняемых с приемлемым качеством, оценки затрат в жизненном цикле систем, оценки относительной степени удовлетворенности заинтересованных сторон, связанной с качеством и затратами при функционировании системы. **Выводы.** Продемонстрирована работоспособность предложенного методического подхода к вероятностному прогнозированию и сравнению качества функционирования систем различного приложения в условиях неопределенности. Подход может быть принят за основу системного анализа и оптимизации качества функционирования систем, производящих материальную и/или информационную продукцию, обоснования количественных системных требований и инженерных решений, направленных на удовлетворение потребностей заинтересованных сторон.

Abstract. Aim. To propose a methodological approach to probabilistic forecasting and comparison of the performance of systems producing material and/or information products, to illustrate the practicality of the proposed approach with examples in various applications. **Methods.** Methods and models based on the methods of probability theory and system analysis, brought to implementation in national standards of system engineering, are proposed for use. **Results.** Models of complex systems producing material and/or information products are adapted for predicting and comparing for the same system under different operating conditions, for different systems applied to the same time period or for different time periods with the same or different duration and operating conditions. The proposed approach covers methods for assessing the relative part of the system functions performed with acceptable quality, estimating costs in the life cycle of systems, assessing the relative degree of satisfaction of stakeholders associated with quality and costs in system operation. **Conclusions.** The efficiency of the proposed methodological approach to probabilistic forecasting and comparison of the performance of systems of various applications under conditions of uncertainty is demonstrated. The approach can be used for system analysis and optimisation of the performance of systems producing material and/or information products, substantiation of quantitative system requirements and engineering solutions aimed at meeting the needs of stakeholders.

Ключевые слова: анализ, вероятность, модель, оценка, прогнозирование, качество функционирования системы.

Keywords: analysis, probability, model, prediction, system performance.

Для цитирования: Костогрызов А.И., Нистратов А.А. Методический подход к вероятностному прогнозированию и сравнению качества функционирования систем в условиях неопределенности // Надежность. 2024. №1. С. 10-24. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-1-10-24>

For citation: Kostogryzov A.I., Nistratov A.A. Methodological approach to probabilistic prediction and comparison of systems operation quality under conditions of uncertainty. Dependability 2024;1:10-24. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-1-10-24>

Поступила: 29.03.2023 / **После доработки:** 18.01.2024 / **К печати:** 15.03.2024

Received on: 29.03.2023 / **Revised on:** 18.01.2024 / **For printing:** 15.03.2024

Введение

Для различных систем важной задачей является периодический прогноз и сравнение качества их функционирования в условиях неопределенности с учетом специфических свойств оперируемой информации и затрат. Многие современные стандарты рекомендуют решать эту проблему методами системного анализа (например, см. ГОСТ 22.2.04 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Техногенные аварии и катастрофы. Метрологическое обеспечение контроля состояния сложных технических систем. Основные положения и правила», ГОСТ Р ИСО 13381-1 «Контроль состояния и диагностика машин. Прогнозирование технического состояния. Часть 1. Общее руководство», ГОСТ Р 51901.1 «Менеджмент риска. Анализ риска технологических систем», ГОСТ Р 57272.1 «Менеджмент риска применения новых технологий. Часть 1. Общие требования», ГОСТ Р МЭК 61069 «Измерение, управление и автоматизация промышленного процесса. Определение свойств системы с целью ее оценки», ГОСТ Р 58494-2019 «Оборудование горно-шахтное. Многофункциональные системы безопасности угольных шахт. Система дистанционного контроля опасных производственных объектов (ОПО)», ГОСТ Р 58771 «Менеджмент риска. Технологии оценки риска», ГОСТ Р 59341 «Системная инженерия. Защита информации в процессе управления информацией системы», ГОСТ Р 59989 «Системная инженерия. Системный анализ процесса управления качеством системы», ГОСТ Р 59991 «Системная инженерия. Системный анализ процесса управления рисками для системы» и др.).

Примечание. Под риском понимается 1) мера опасности с ее последствиями (по ФЗ «О техническом регулировании», ГОСТ Р 51898-2002 «Аспекты безопасности. Правила включения в стандарты», ГОСТ Р 51901.1-2002 «Менеджмент риска. Анализ риска технологических систем», ГОСТ Р 51897-2011 «Менеджмент риска. Термины и определения», ГОСТ Р МЭК 61508-4-2012 «Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Термины и определения» и др.) или как более общее определение – 2) эффект неопределенности в целях и/или задачах (по ГОСТ Р ИСО 58771 «Менеджмент риска. Технологии оценки риска»).

Учитывая практические потребности, в настоящей работе предложен аналитический подход для прогнозирования и сравнения качества функционирования сложных

систем, выходными результатами которых могут выступать материальная и/или информационная продукция. Предлагаемый подход развивает существующие подходы [1–22] и может быть полезен при проведении анализа качества функционирования для одной и той же системы в различных условиях функционирования, для разных систем применительно к одному периоду времени или для разных периодов времени с одинаковыми или различающимися продолжительностью и условиями. Для расчетов с помощью этого подхода также могут быть применены другие вероятностные методы и модели, позволяющие оценивать вероятности успеха или риски неудач на уровне их функций распределения (ФР).

1. Допущения и идеи предлагаемого подхода

Полагается, что в общем случае все выходные результаты функционирования рассматриваемых систем могут быть разделены на материальную продукцию, информационную продукцию (в т.ч. справки, отчеты, управленческие решения, рекомендации от систем искусственного интеллекта) или продукцию, являющуюся комбинацией материальной и информационной продукции.

Использование предлагаемых методов и моделей базируется на следующих идеях и допущениях.

Идея 1. Для каждого элемента сложной системы существуют потребности в количественной оценке достигнутого уровня качества (как в результате измерений, так и в итоге гипотетических ожиданий):

а) относительно выходных материальных результатов (в том числе в зависимости от частоты существенных изменений условий и требований к качеству, частоты и длительности контроля качества, времени осуществления мер по восстановлению допустимого качества функционирования системы);

б) относительно выходных информационных результатов – в первую очередь в зависимости от возможностей системы по надежному и своевременному обеспечению полной, достоверной и, при необходимости, конфиденциальной информацией для ее использования по назначению;

Идея 2. Поскольку модели математические, то путем смыслового переобозначения исходных данных и, соответственно, расчетных показателей возможно использование одних и тех же моделей для оценки разных показателей. С учетом сложности системы в

зависимости от заданного набора выполняемых функций для системы возможно ее структурно-логическая декомпозиция до элементов и формальное описание целостности элементов и системы в целом в терминах «И», «ИЛИ».

Примечание. Под целостностью системы (элемента) понимается такое ее (его) состояние, при котором обеспечивается достижение целей ее (его) функционирования. В качестве логических элементов могут выступать составные элементы системы, подсистемы или отдельная система (как единое целое).

Идея 3. Для комплексной оценки в приложении к системам сколь угодно сложной параллельно-последовательной структуры (с формальным использованием логики в терминах «И», «ИЛИ») предлагается использовать следующий алгоритм генерации новых моделей [1, 2, 6–12].

Сложность системы оценивается количеством составных элементов. Для характеристики элементов достаточно логического переопределения понятия наработки в привязке к специфике системы (например, для анализа надежности это – наработка на отказ, а для качества – наработка на нарушение целостности).

Рассмотрим простейшую структуру из двух независимых элементов, соединенных последовательно, что означает логическое соединение «И» (рис. 1), или параллельно, что означает логическое соединение «ИЛИ» (рис. 2). Предположение независимости имеет место быть.

Обозначив для i -го элемента функцию распределения (ФР) времени наработки на нарушение целостности через $B_i(t) = P(\tau_i \leq t)$, используем следующие рассуждения:

1) для последовательно соединенных независимых элементов время до нарушения целостности равно минимуму из двух времен τ_i : выхода из строя 1-го или 2-го элементов (т.е. система переходит в состояние нарушенной целостности, когда откажет либо 1-й, либо 2-й элемент). В этом случае для системы в целом ФР времени наработки $B(t)$ на нарушение целостности определяется выражением

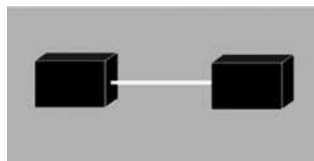
$$B(t) = P(\min(\tau_1, \tau_2) \leq t) = 1 - P(\min(\tau_1, \tau_2) > t) = 1 - P(\tau_1 > t)P(\tau_2 > t) = 1 - [1 - B_1(t)][1 - B_2(t)]; \quad (1)$$

2) для параллельно соединенных независимых элементов при горячем резервировании (когда оба элемента находятся в рабочем состоянии и при выходе из строя одного из них другой продолжает функционировать) время до нарушения целостности равно максимуму из двух времен τ_i : выхода из строя 1-го и 2-го элементов, т.е. система переходит в состояние нарушенной целостности, когда выйдут из строя оба – и 1-й и 2-й элементы. В этом случае ФР времени наработки на нарушение целостности для системы в целом

$$B(t) = P(\max(\tau_1, \tau_2) \leq t) = P(\tau_1 \leq t)P(\tau_2 \leq t) = B_1(t)B_2(t). \quad (2)$$

Применяя приведенные рекуррентные соотношения (1)–(2), можно получать соответствующие оценки для сколь угодно сложной логической структуры с параллельно-последовательным соединением элементов.

Примечание. Подобные задачи формулировались еще Вентцель Е.С. для упражнений студентам в ее учебниках по теории вероятностей и исследованию операций.



ФР времени наработки на нарушение целостности

$$B(t) = 1 - [1 - B_1(t)][1 - B_2(t)]$$

Рис. 1. Система из последовательно соединенных элементов



ФР времени наработки на нарушение целостности

$$B(t) = B_1(t)B_2(t)$$

Рис. 2. Система из параллельно соединенных элементов

Идея 4. В условиях неопределенности для прогнозирования и сравнения используются следующие системные показатели, являющиеся достаточно универсальными независимо от специфики производимой продукции:

- относительная часть функций системы, выполняемых с приемлемым качеством;
- математическое ожидание затрат с учетом возможных случаев нарушения приемлемого качества функционирования системы;
- относительная степень удовлетворенности заинтересованных сторон, связанной с качеством и затратами при функционировании системы.

Примечание. Считается, что для анализируемого периода прогноза в жизненном цикле могут быть приблизительно оценены предварительные затраты на обеспечение качества функционирования рассматриваемых систем (без учета возможных нарушений).

2. Предлагаемые модели для вероятностных оценок

В соответствии с допущениями и идеями, выполнение каждой функции может быть описано и исследовано с помощью следующих достаточно общих моделей, предполагающих производство материальной или информационной продукции или получение комбинированных выходных результатов функционирования системы. В общем случае моделирование основано на использовании понятий вероятностей «успеха» и/или «неудачи» в течение данного прогностического периода времени (с учетом последствий вероятность «не-

удачи» характеризует риск «неудачи»). Рекомендуется использовать существующие модели «черного ящика», для которых создается вероятностное пространство (Ω, B, P) , где: Ω – конечное пространство элементарных событий, B – класс всех подмножеств множества Ω , удовлетворяющий свойствам сигма-алгебры; P – мера вероятности на пространстве элементарных событий Ω – см., например, [1 – 12]. При этом, поскольку пространство $\Omega = \{\omega_k\}$ – конечное, достаточно установить отображение $\omega_k \rightarrow p_k = P(\omega_k)$ такое, что $p_k \geq 0$ и $\sum_k p_k = 1$.

Такое соответствие установлено в предлагаемых моделях, используемых для систем простой и сложной структуры. Примеры созданных моделей см., например, в ГОСТ Р 58494, ГОСТ Р 59329 – ГОСТ Р 59357, ГОСТ Р 59989 – ГОСТ Р 59994 и др.

Под простой структурной системой для моделирования понимается система, состоящая из одного элемента или набора элементов, логически объединенных для анализа как единый элемент (который может быть декомпозирован и в этом случае по сути также может представлять собой сложную систему). Анализ системы простой структуры проводится по принципу «черного ящика», когда известны входы и выходы, но неизвестны внутренние детали работы системы. Система сложной структуры для моделирования представляется в виде набора взаимодействующих элементов, каждый из которых представлен в виде «черного ящика», работающего в своих условиях неопределенности со своими характеристиками.

2.1 Модели для оценки систем, производящих материальную продукцию

Для оценки систем, производящих материальную продукцию, существуют многочисленные модели, в том

числе авторские [1–22]. Например, в модели «Анализ возможных изменений конкурентоспособности» [6, 7, 10] по каждому из анализируемых типов продукции в качестве исходных данных используются:

ξ^{-1} – ожидаемая частота значимых изменений требований рынка относительно качества выпускаемой продукции (т.е. ξ – это среднее время между значимыми изменениями, когда продукция может оказаться на рынке неконкурентоспособной);

q – среднее время между соседними моментами контроля качества продукции;

b – среднее время между адекватными адаптациями системы к изменениям требований рынка с восстановлением приемлемого качества выпускаемой продукции.

Пример моделируемых случаев соотношений между временами значимого изменения требований рынка относительно конкурентоспособности выпускаемой продукции, изменения требований рынка и времени адаптации системы к изменениям приведены на рис. 3. Элементарных событий два: «Конкурентоспособность обеспечивается» и «Конкурентоспособность не обеспечивается».

В результате расчетов оцениваются вероятность сохранения конкурентоспособности выпускаемой продукции (P) и риск утраты конкурентоспособности выпускаемой продукции ($R = 1 - P$ с учетом возможного ущерба):

$$P = \frac{\xi^2}{q(\xi + b)} \left[1 - \exp\left(-\frac{q}{\xi}\right) \right]. \quad (3)$$

Другим примером для прогнозирования рисков применительно к системам, производящим материальную продукцию, могут служить типовые методы и модели, рекомендуемые ГОСТ Р 59989 «Системная инженерия. Системный анализ процесса управления

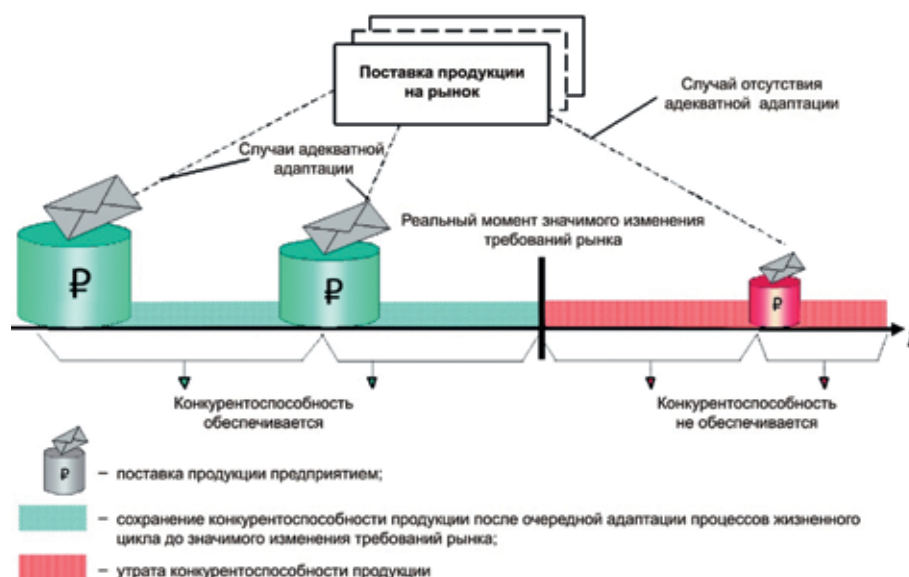


Рис. 3. Пример моделируемых случаев относительно конкурентоспособности выпускаемой продукции, изменения требований рынка и времени адаптации системы к изменениям (абстракция)

качеством системы». Прогнозирование и сравнение могут быть проведены при этом применительно к реализации процесса управления качеством системы. Для моделируемой системы нарушение реализации процесса управления качеством системы с учетом дополнительных специфических требований характеризуется переходом системы в такое элементарное состояние, при котором имеет место или оказывается возможным ущерб по следующим причинам: из-за невыполнения необходимых действий процесса либо из-за нарушения сроков выполнения необходимых действий, либо из-за наличия недопустимого брака в поставляемых продукции и/или услугах, либо из-за нарушения дополнительных специфических системных требований, либо из-за комбинации перечисленных причин. Прогнозирование и сравнение предлагается строить на основе следующих показателей:

- риска нарушения надежности реализации процесса управления качеством системы без учета дополнительных специфических системных требований – см. ГОСТ Р 59989, модель В.2;

- обобщенного риска нарушения реализации процесса управления качеством системы с учетом дополнительных специфических системных требований – см. модели и методы ГОСТ Р 59989, приложения В.3, В.4.

Риск нарушения надежности реализации процесса управления качеством системы без учета дополнительных специфических системных требований характеризуется:

- риском невыполнения необходимых действий процесса, определяемым вероятностью невыполнения необходимых действий процесса;

- риском нарушения сроков выполнения необходимых действий процесса, определяемым вероятностью нарушения сроков выполнения необходимых действий процесса;

- риском наличия недопустимого брака в поставляемых продукции и/или услугах (в том числе внутри системы для обеспечения ее качества), определяемым вероятностью наличия недопустимого брака в поставляемых продукции и/или услугах.

Вероятность $R_{\text{без}}(T_{\text{зад}})$ нарушения надежности реализации процесса управления качеством системы без учета дополнительных специфических системных требований определяется в ГОСТ Р 59989 для случаев, когда учитываются:

- все действия и поставки (как с выполненными, так и с нарушенными условиями по выполнению необходимых действий процесса, срокам выполнения необходимых действий, отсутствию недопустимого брака) или

- лишь те поставки, для которых условия по выполнению необходимых действий процесса, срокам выполнения необходимых действий, отсутствию недопустимого брака были нарушены (именно они определяют возможные ущербы от наличия брака).

Прогнозирование рисков нарушения дополнительных специфических системных требований осуществляется

на основе применения специальных математических моделей, учитывающих специфику самих требований, а также технологий, мер и способов их выполнения. При этом в полной мере применимы модели и методы прогнозирования риска нарушения дополнительных специфических системных требований из ГОСТ Р 59993–2022 «Системная инженерия. Системный анализ процесса управления инфраструктурой системы» (приложение В.3). Для расчета вероятностных показателей применительно к моделируемой системе, где анализируемые сущности могут быть представлены в виде «черного ящика», используются исходные данные, формально определяемые применительно к процессу следующим образом:

σ – частота возникновения источников угроз нарушения дополнительных специфических системных требований в рассматриваемом процессе;

β – среднее время развития угроз с момента возникновения источников угроз до нарушения нормальных условий (например, до нарушения установленных дополнительных специфических системных требований в системе или до инцидента);

$T_{\text{меж}}$ – среднее время между окончанием предыдущей и началом очередной диагностики возможностей по обеспечению выполнения дополнительных специфических системных требований в моделируемой системе;

$T_{\text{диаг}}$ – среднее время системной диагностики возможностей по обеспечению выполнения дополнительных специфических системных требований;

$T_{\text{восст}}$ – среднее время восстановления нарушенных возможностей по обеспечению выполнения дополнительных специфических системных требований в моделируемой системе;

$T_{\text{зад}}$ – задаваемая длительность периода прогноза.

В качестве расчетного показателя для выбранной структуры системы с учетом возможного ущерба используется $R_{\text{наруш}}(\sigma, \beta, T_{\text{меж}}, T_{\text{диаг}}, T_{\text{восст}}, T_{\text{зад}})$ – вероятность нарушения дополнительных специфических системных требований в моделируемой системе в течение периода прогноза $T_{\text{зад}}$. Формульные выражения см. в ГОСТ Р 59993–2022, приложение В.3.

Обобщенный риск нарушения реализации процесса управления качеством системы с учетом дополнительных специфических системных требований $R_{\text{обобщ}}(T_{\text{зад}})$ характеризуется сочетанием риска нарушения надежности реализации процесса управления качеством системы без учета дополнительных специфических системных требований и риска нарушения дополнительных специфических системных требований в этом процессе. Расчетным вероятностным показателям сопоставляется возможный ущерб, оцениваемый тяжестью последствий для системы и ее заинтересованных сторон в случае реализации угроз.

Обобщенная вероятность нарушения реализации процесса управления качеством системы с учетом до-

полнительных специфических системных требований $R_{\text{обобщ}}(T_{\text{зад}})$ вычисляется по формуле

$$R_{\text{обобщ}}(T_{\text{зад}}) = 1 - \left[1 - R_{\text{без}}(T_{\text{зад}}) \right] \cdot \left[1 - R_{\text{наруш}}(\sigma, \beta, T_{\text{меж}}, T_{\text{диаг}}, T_{\text{восст}}, T_{\text{зад}}) \right]. \quad (4)$$

Обобщенный риск определяется путем сопоставления расчетной вероятности нарушения реализации процесса в течение периода прогноза, рассчитанной по формуле (4), с возможным ущербом за этот период.

2.2 Модели для оценки систем, производящих информационную продукцию

То же пространство (Ω, B, P) построено для предлагаемых моделей, позволяющих оценивать надежность и своевременность предоставления достаточно полной, достоверной и, при необходимости, конфиденциальной информации для использования по назначению (рис. 4) [3–5].

Предлагаемые авторские модели детально описаны в [3–5 и др.], они реализованы в рамках ГОСТ Р 59341-2022, приложения В. Модели позволяют оценить показатели надежности и своевременности предоставления, полноты, достоверности и безопасности используемой информации. Достоверность выходной информации определяется истинностью исходных данных, безошибочностью входной информации, корректностью обработки, безошибочностью при хранении и передаче информации и сохранением ее актуальности на момент использования. Учет «человеческого фактора» осуществляется на уровне безошибочности действий пользователей и персонала

системы. В свою очередь безопасность информации характеризуется таким состоянием ее защищенности, при котором обеспечены конфиденциальность, доступность и целостность информации.

К рекомендуемым относятся математические модели для оценки (см. [3–5], ГОСТ Р 59341-2022, приложение В):

- надежности предоставления используемой информации (расчетный показатель: $P_{\text{rel}}(T_{\text{зад}})$ – вероятность надежного функционирования системы в течение заданного периода прогноза $T_{\text{зад}}$);

- своевременности предоставления используемой информации (расчетный показатель: P_{tim} – вероятность своевременной обработки запроса в течение данного периода прогноза; относительная доля всех своевременно обработанных запросов; относительная доля своевременно обработанных запросов тех типов, для которых выполняются требования заказчика C_{tim});

- полноты оперативного отражения в системе новых объектов и явлений (расчетный показатель: P_{compl} – вероятность того, что в системе отражена полная информация о состояниях всех объектов и явлений);

- актуальности обновляемой информации (расчетный показатель: P_{actual} – вероятность сохранения актуальности информации на момент ее использования);

- безошибочности информации после контроля (расчетный показатель: P_{check} – вероятность отсутствия ошибок в информации после ее контроля);

- корректности обработки информации (расчетный показатель: P_{process} – вероятность получения корректных результатов обработки информации);

- оценки безошибочности действий пользователей и персонала системы (расчетный показатель: $P_{\text{map}}(T_{\text{зад}})$ – вероятность безошибочных действий пользователей

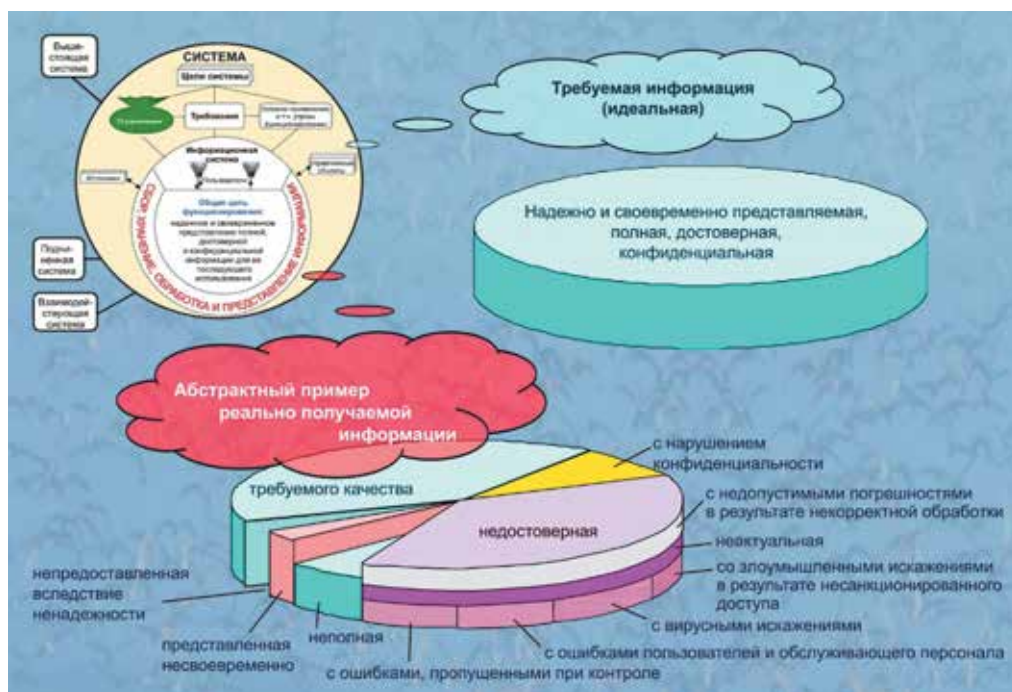


Рис. 4. Пример качества выходной информационной продукции (абстракция)

и персонала системы в течение заданного периода прогноза $T_{\text{зад}}$);

- сохранения целостности моделируемой системы в условиях опасных программно-технических воздействий (расчетный показатель: $P_{\text{infl}}(T_{\text{зад}})$ – вероятность отсутствия опасного программно-технического воздействия на систему в течение заданного периода прогноза $T_{\text{зад}}$);

- защищенности активов от несанкционированного доступа (расчетный показатель: P_{prot} – вероятность обеспечения защищенности активов системы от НСД без привязки к заданному периоду прогноза);

- сохранения конфиденциальности используемой информации (расчетный показатель: $P_{\text{conf}}(T_{\text{зад}})$ – вероятность обеспечения защищенности активов системы от несанкционированного доступа в течение заданного периода прогноза $T_{\text{зад}}$).

При этом пространство элементарных событий для элемента моделируемой системы на временной оси образуют следующие основные состояния: «Целостность элемента моделируемой системы сохранена», если в течение всего периода прогноза обеспечена требуемая функциональность элемента и «Целостность элемента моделируемой системы нарушена» – в противном случае.

С учетом логических условий «И» и «ИЛИ» устанавливают элементарные состояния для каждого элемента и моделируемой системы в целом.

3. Методы оценки относительной части функций системы, выполняемых с приемлемым качеством

Предлагается следующая формула для расчета относительной части функций системы, выполняемых с приемлемым качеством в течение задаваемого прогнозного периода (здесь также могут учитываться гипотетические условия) [1, 2]:

$$S = \frac{\sum_{m=1}^M P_m \cdot a_m}{\sum_{m=1}^M a_m}, \quad (5)$$

где a_m – гипотетическая частота выполнения функции m -го типа в течение задаваемого прогнозного периода;

P_m – вероятность выполнения m -й функции с приемлемым качеством;

M – это полный набор существенных функций, которые выполняются системой и учитываются при прогнозировании и сравнении.

В общем случае для каждой m -й функции ($1 \leq m \leq M$) вероятность P_m выполнения m -й функции с приемлемым качеством вычисляется по следующим вариантам:

а) что касается материальной продукции, вероятность P_m выполнения m -й функции с приемлемым качеством рассчитывается по какой-либо модели из подраздела 2.1;

б) в отношении информационной продукции P_m рассчитывается по формуле:

$$P_m(T_{\text{зад}}) = P_{\text{rel},m}(T_{\text{зад}}) \cdot C_{\text{tim},m} \cdot P_{\text{compl},m} \cdot P_{\text{actual},m} \times \\ \times P_{\text{check},m} \cdot P_{\text{process},m} \cdot P_{\text{infl},m}(T_{\text{зад}}) \times \\ \times P_{\text{man},m}(T_{\text{зад}}) \cdot P_{\text{prot},m} \cdot P_{\text{conf},m}(T_{\text{зад}}), \quad (6)$$

где все показатели рассчитываются с помощью моделей, предложенных в подразделе 2.2;

в) для случая комбинации материальной и информационной продукции

$$P_m(T_{\text{зад}}) = P_{\text{combined},m} \cdot P_{\text{rel},m}(T_{\text{зад}}) \cdot C_{\text{tim},m} \cdot P_{\text{compl},m} \cdot P_{\text{actual},m} \times \\ \times P_{\text{check},m} \cdot P_{\text{process},m} \cdot P_{\text{infl},m}(T_{\text{зад}}) \times \\ \times P_{\text{man},m}(T_{\text{зад}}) \cdot P_{\text{prot},m} \cdot P_{\text{conf},m}(T_{\text{зад}}), \quad (7)$$

где $P_{\text{combined},m}$ рассчитывается по какой-либо модели из подраздела 2.1, а все остальные показатели – с использованием моделей из 2.2.

Для материальных выходных результатов $P_m(t)$ означает вероятность того, что m -я функция будет выполнена за период t с приемлемым качеством. Для информационных выходных результатов $P_m(t)$ по формуле (6) также характеризует вероятность того, что m -я функция будет выполнена с приемлемым качеством, то есть запрошенные информационные выходные результаты будут получены надежно и своевременно, будут полными, достоверными и, при необходимости, конфиденциальными для целевого использования. Для выходных результатов функционирования системы, комбинируемых из материальной и информационной продукции, результаты вычисления P_m по (7) характеризуют вероятность того, что m -я функция будет выполнена с приемлемым качеством. Понятие приемлемости может быть установлено в виде ограничений на значения расчетных показателей – см. пример 1 в разделе 6 настоящей статьи.

Для вычисления относительной части функций, выполненных с приемлемым качеством функционирования для реальных сравниваемых условий предлагается следующая формула [1, 2]:

$$S_{\text{real}} = \frac{\sum_{m=1}^M U_m \cdot a_{\text{real},m}}{\sum_{m=1}^M a_{\text{real},m}}, \quad (8)$$

где $a_{\text{real},m}$ – реальная частота выполнения функции m -го типа (или рассматриваемая как реальная) в течение данного периода прогноза;

U_m – это реальная часть функций, выполняемых с приемлемым качеством функционирования (измеряется от 0 до 1), получается в результате обработки собираемой статистики.

Если определение U_m в (8) является проблематичным, то для задаваемых условий (отличных или идентичных наблюдавшимся ранее условиям) в течение того же заданного времени может быть использована формула (4). В этом случае $U_m = R_{\text{обобщ},m}(T_{\text{зад}})$.

4. Оценка затрат в жизненном цикле

При решении различных оптимизационных задач в жизненном цикле систем [1, 2, 5–7] предлагается использовать показатели математического ожидания затрат. Математическое ожидание отличается от реальных затрат учетом неопределенности, связанной со случаями нарушения приемлемого качества функционирования системы.

В общем случае для оценки математического ожидания затрат с учетом случаев критичного нарушения приемлемого качества функционирования системы $C_{math}(t)$ за период прогноза t , в условных единицах (у.е.), предлагается следующая формула:

$$C_{math}(t) = C_{instal} + C_{main}(t) + \sum_{m=1}^M (a_{hyp,m} C_{hyp,m} \cdot t \cdot P_m + D_m \cdot N_m(t) \cdot (1 - P_m)) \text{ для } t \leq T_{life},$$

$$C_{math}(t) = C_{instal} + C_{main}(t) + \sum_{m=1}^M (a_{hyp,m} C_{hyp,m} \cdot T_{life} \cdot P_m + D_m \cdot N_m(T_{life}) \cdot (1 - P_m)) + C_{disposal} \text{ для } t > T_{life}, \quad (9)$$

где P_m по-прежнему означает вероятность того, что m -я функция выполнена с приемлемым качеством за период прогноза t , оцениваемая по формулам разделов 3, 4;

$a_{hyp,m}$ – это частота выполнения m -й функции, влияющей на затраты, в единицу времени;

C_{instal} – затраты для разработки и ввода системы в эксплуатацию (инсталляции системы) за период прогноза t ;

$C_{main}(t)$ – затраты для сопровождения системы к моменту времени t ;

$C_{hyp,m}$ – затраты для функционирования системы к моменту времени t для m -й выполняемой функции (например, за год);

$C_{disposal}$ – затраты для вывода системы из эксплуатации;

D_m – средние возможные или реальные ущербы для одного случая критичного нарушения качества функционирования системы применительно к m -й выполняемой функции;

$N_m(t)$ – прогнозируемое среднее количество случаев критичного нарушения качества функционирования системы к моменту времени t (приводящих к недопустимому ущербу);

T_{life} – время жизни системы.

В частном случае без учета критичных нарушений качества функционирования системы для оценки ожидаемых затрат используются следующие выражения:

$$C_{exp}(t) = C_{instal} + C_{main}(t) + t \sum_{m=1}^M a_{hyp,m} C_{hyp,m} \text{ для } t \leq T_{life},$$

$$C_{exp}(t) = C_{instal} + C_{main}(t) + T_{life} \sum_{m=1}^M a_{hyp,m} C_{hyp,m} + C_{disposal} \text{ для } t > T_{life}. \quad (10)$$

Выражение (10) получается из (9) в случае, когда за период прогноза отсутствуют критичные нарушения качества функционирования системы, то есть в этом случае $P_m = 1$.

5. Оценка относительной степени удовлетворенности заинтересованных сторон, связанной с качеством и затратами при функционировании системы

Пусть сравниваются две системы. Для сравнения выбран показатель относительной степени удовлетворенности заинтересованных сторон. При функционировании системы предлагается учитывать возможность возникновения удовлетворенности, связанной с качеством и/или с ожидаемыми затратами.

Степень удовлетворенности V , связанной с качеством, предлагается оценивать с использованием соотношения:

$$V = (S_1/S_2) \cdot 100\%, \quad (11)$$

где относительная часть функций, выполняемых с приемлемым качеством для 1-й системы S_1 и для 2-й сравниваемой системы в течение данного периода прогноза S_2 , вычисляется по формуле (5) или (8).

Относительную степень удовлетворенности $Z_{cost}(t)$, связанную с ожидаемыми затратами, предлагается оценивать с использованием соотношения:

$$Z_{cost}(t) = [C_{math}(t) / C_{exp}(t)] \cdot 100\%, \quad (12)$$

где ожидаемые затраты с учетом ($C_{math}(t)$) и без учета ($C_{exp}(t)$) критичных нарушений качества функционирования системы к моменту t рассчитываются по формулам (9) и (10).

Для предпочтительности 1-й системы по сравнению со 2-й относительная степень удовлетворенности заинтересованных сторон, связанной с качеством системы, должна быть более 100%. А для достижения некоторой удовлетворенности заинтересованных сторон с точки зрения затрат, расчетная относительная степень удовлетворенности, связанной с ожидаемыми затратами $Z_{cost}(t)$, должна быть меньше 100%.

6. Примеры

Пример 1. В примере обобщены многочисленные результаты расчетов в приложениях к информационным системам различного приложения, в том числе входящих в состав энергетических и нефтегазовых систем [1, 2, 5–7, 13–22], см. также ГОСТ Р 59341 «Системная инженерия. Защита информации в процессе управления информацией системы», где учтены результаты проведенных ранее исследований. Типовые допустимые значения показателей для систем, производящих информационную продукцию при ориентации на систему-эталон, представлены в табл. 1.

Табл. 1 Пример допустимых значения показателей для систем, производящих информационную продукцию при ориентации на систему-эталон (по ГОСТ Р 59341)

Показатель	Допустимое значение
Вероятность надежного предоставления информации в системе $P_{rel}(T_{зад})$	Не ниже 0,99
Вероятность своевременной обработки запросов в системе P_{tim}	Не ниже 0,90
Относительная доля своевременно обработанных в системе запросов $C_{tim,m}$	Не ниже 0,95
Вероятность того, что в системе полностью отражены состояния всех реально существующих критичных объектов и явлений $P_{compl,m}$	Не ниже 0,90
Вероятность сохранения актуальности информации в системе на момент ее использования $P_{actual,m}$	Не ниже 0,90
Вероятность отсутствия ошибок в информации после ее контроля P_{check}	Не ниже 0,97
Вероятность получения корректных результатов обработки информации $P_{process}$	Не ниже 0,95
Вероятность обеспечения безошибочных действий пользователей и персонала системы $P_{man}(T_{зад})$	Не ниже 0,95
Вероятность отсутствия опасного программно-технического воздействия на систему $P_{inf}(T_{зад})$	Не ниже 0,95
Вероятность обеспечения защищенности активов системы от НСД P_{prot}	Не ниже 0,99
Вероятность сохранения конфиденциальности информации $P_{conf}(T_{зад})$	Не ниже 0,999

Примечание. Период прогноза для расчетных показателей подбирают таким образом, чтобы вероятности успешного развития событий были не ниже устанавливаемых допустимых. Пересечение траектории ФР допустимой границы позволит определить такой период времени, за пределами которого приемлемое качество не гарантируется.

Пример 2. Предположим, что планируется создать специальную интеллектуальную систему (ИС) для «умного» мониторинга на производстве. С учетом результатов примера 1 проводится оценка функционирования ИС в течение ее жизненного цикла. Для упрощения положим, что в рамках примера выделены два типа критичных функций. Результатом каждой функции является комбинация материальной и информационной продукции. Это означает, что пример ориентирован на использование базовой формулы (7). Чтобы еще более упростить этот пример, используется только модель 2.1 и идентичная ей модель для оценки актуальности обнов-

ляемой информации. Другие показатели неизменны на уровне значений из таблицы примера 1.

Множество выполняемых функций делится на 2 типа – с более срочным ($m = 1$) и менее срочным ($m = 2$, $M = 2$) исполнением:

- для функций 1-го типа ($m = 1$) существенные изменения, касающиеся выходных данных для пользователей, происходят раз в месяц ($\xi = 1$ месяц). Сбор, подготовка и проверка данных для ввода в ИС $b = 2$ часа, системное обновление данных после проверки происходит один раз в сутки ($q = 1$ сутки);

- для функций 2-го типа ($m = 2$) существенные изменения, касающиеся материалов и информационных выходных данных, относящихся к любому из обслуживаемых пользователей, также происходят раз в месяц ($\xi = 1$ месяц). Сбор, подготовка и проверка выходных данных $b = 3$ дня, обновление системы после проверки происходит раз в неделю ($q = 1$ неделя).

Положим, на этапе разработки эта ИС была построена на предположениях, что каждый год будет поступать около 20 миллионов запросов на выполнение функции 1-го типа ($a_{hyp,1}$) и 80 миллионов запросов типа 2 ($a_{hyp,2}$). Для удовлетворения требований к качеству учитываются затраты около 705 миллионов у.е. в течение разработки и первых 5 лет эксплуатации системы.

Однако согласно реальным результатам 1-го года эксплуатации системы оказалось, что количество запросов 1-го типа ($a_{real,1}$) составило 10 миллионов (вместо 20), в то время как количество запросов 2-го типа ($a_{real,2}$) составило около 190 миллионов (вместо 80). В то же время частота существенных изменений, касающихся изменений потребностей обслуживаемых пользователей, удвоилась до двух раз в месяц (вместо 1 месяца). В итоге возникает острая необходимость прогнозных сравнений.

На стадии разработки была оценена прогнозная степень удовлетворенности пользователей качеством выходных результатов. Это помогло разработать рациональные технические решения. В начале функционирования ИС по мере сбора данных и прогнозирования ожидаемой удовлетворенности пользователей возникла необходимость улучшения работы ИС. Как могут помочь вероятностные прогнозы и сравнения?

Определены следующие исходные данные для прогнозирования: $C_{instal} = 200$ млн у.е.; $C_{main}(1 \text{ год}) = 1$ млн у.е.; $C_{exp,m} = 1$ у.е. для одного запроса; $N_1(1 \text{ год}) = 0$, $N_2(1 \text{ год}) = 0,01\%$, $D_2 = 10,000$ у.е.

Результаты моделирования по формулам (3), (5), (6) представлены на рисунках 5, 6 – вероятности выполнения функции с приемлемым качеством равны: на стадии разработки $P_1 = 0,98$, $P_2 = 0,81$; на стадии эксплуатации $P_1 = 0,96$, $P_2 = 0,67$.

Оценки степени удовлетворенности заинтересованных сторон функционированием системы, связанных с качеством и затратами, следующие:

- на стадии разработки $S = 0,844$, то есть удовлетворенность по качеству составит 84,4%;

- после 1-го года функционирования ИС $S_{real} = 0,685$, это означает, что удовлетворенность по качеству с учетом изменений в потоках запросов составит лишь 68,5%.

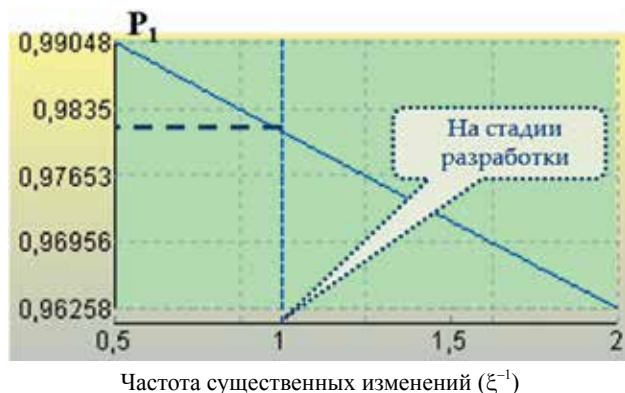


Рис. 5. Зависимость вероятности выполнения функции 1-го типа с приемлемым качеством от частоты существенных изменений



Рис. 6. Зависимость вероятности выполнения функции 2-го типа с приемлемым качеством от частоты существенных изменений

На стадии разработки, если не учитываются возможные критичные нарушения качества функционирования системы, прогнозные затраты $C_{exp}(5 \text{ лет}) = 705$ млн у.е., на стадии эксплуатации с учетом возможных критичных нарушений качества функционирования системы математическое ожидание затрат составит $C_{math}(5 \text{ лет}) = 998$ млн у.е. Относительная степень удовлетворенности заинтересованных сторон, связанная с качеством функционированием системы $V = 81,2\%$, с затратами $Z_{cost}(t) = 141,6\%$.

Если на стадии разработки уровень 84,4% для относительной степени удовлетворенности заинтересованных сторон по качеству функционирования системы установить как приемлемый, то уровень 68,5% запросов, выполненных с приемлемым качеством на стадии эксплуатации означает только 81,2% от этого уровня ($68,5/84,4 \approx 0,812$). Более того, этот результат достигается за счет затрат, на 41,6% превышающих изначально определенный допустимый уровень. Такая эффективность из инженерных соображений не может быть признана удовлетворительной для проанализированных ИС.

Пример 3 иллюстрирует применимость предложенных вероятностных методов и моделей для системного планирования возможностей выполнения функций искусственного интеллекта (ИИ). Пусть информация собирается от различных источников, накапливается в базе данных диспетчерского центра, обрабатывается и систематизируется для прогнозного моделирования и принятия решения при добыче угля, его обогащении, транспортировке и отгрузке потребителю. Для изучения эффективности комплекс поддержки принятия решений в различных областях обеспечения безопасности некоторой угольной компании (как сложной системы) декомпозируется на 9 подсистем (рис. 7).

Каждая из подсистем представляет собой подсистему с резервированием, где функции основного элемента по принятию решения возложены на человека-специалиста высшей квалификации, а резервного – на ИИ, обученный на уровне специалиста высшей квалификации, анализирующего данные мониторинга и осуществляющего вероятностное прогнозирование. Подсистемы от 1 до 6 являются компонентами многофункциональной системы безопасности угольных шахт: 1 – это система контроля и управления стационарными вентиляторными установками, вентиляторами местного проветривания и газоотсасывающими установками; 2 – система контроля и управления дегазационными установками и контроля подземной дегазационной сети; 3 – система аэрогазового контроля; 4 – система контроля запыленности воздуха и пылевых отложений; 5 – система контроля и прогноза динамических явлений; 6 – система противопожарной защиты. Подсистема 7 связана с обеспечением безопасности на обогатительной фабрике, подсистема 8 – с обеспечением безопасности при транспортировке, а подсистема 9 – с обеспечением безопасности в порту для отгрузки угля потребителю.

Для системного планирования возможностей выполнения функций важен ответ на главный вопрос: «Какие риски нарушения целостности могут быть в течение прогнозного периода, равного 1 году, 10 годам, 20 годам эксплуатации?» Поскольку по условиям примера все подсистемы поддерживаются возможностями ИИ, собственными специалистами высшей квалификации, ответ будет отражать оптимистический взгляд на возможности выполнения функций.

Пусть для каждого элемента системы частота возникновения источника опасности (σ) равна один раз в месяц, среднее время инициации с разрастанием опасности до угроз, приводящих к нарушению целостности системы (β) – приблизительно 1 день. Время между окончанием предыдущей и началом очередной диагностики целостности системы ($T_{меж}$) составляет 8 часов, длительность контроля ($T_{диаг}$) – приблизительно 10 минут, а среднее время восстановления целостности элемента ($T_{восст}$) составляет 1 сутки. Вследствие поддержки со стороны ИИ ответственные лица способны к распознаванию признаков критической ситуации после ее возникно-



Рис. 7. Результаты прогнозирования для случая, когда все подсистемы поддерживаются возможностями ИИ, свойственными специалистам высшей квалификации

вения. Специалисты, а также обученные ими системы ИИ, могут совершить ошибки в среднем не чаще, чем один раз в год, что является свойственным для высококвалифицированных специалистов.

Фрагмент построенной функции распределения на рис. 7 показывает: риск «неудачи» увеличивается от 0,000003 в течение года до 0,0004 в течение 10 лет и до 0,0013 в течение 20 лет. В итоге вычисляемое по построенной траектории ФР среднее время между соседними нарушениями целостности системы составит 283 года.

Это – оптимистические ответы на поставленный в примере 3 вопрос.

Пример 4 посвящен применению предложенных методов и моделей для системного планирования возможностей выполнения функций роботизированной системой обеспечения безопасности нефтегазовой платформы.

Отличие от предыдущего примера состоит в несколько большей степени неопределенности из-за более частых ошибок при распознавании подводных угроз и климатических неопределенностей при эксплуатации. При моделировании используется последовательная логическая структура системы (из 9 подсистем) и методы вероятностного моделирования, что и в примере 3 (рис. 8).

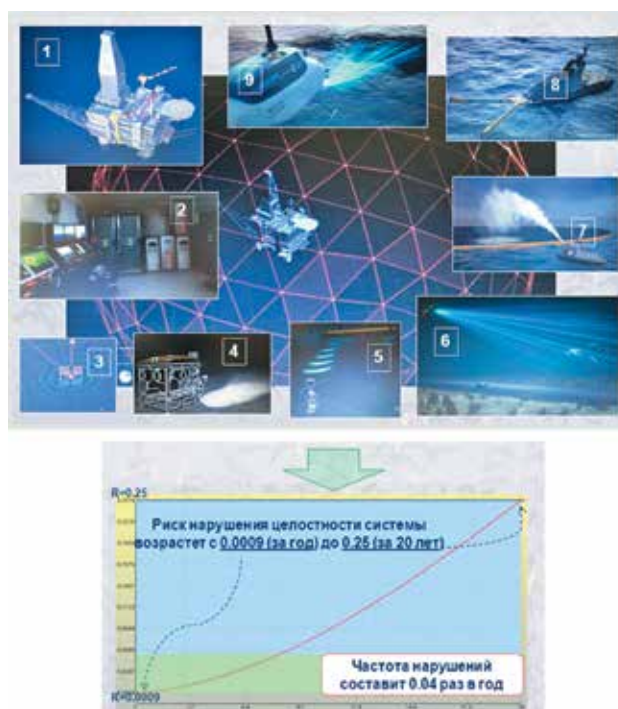


Рис. 8. Результаты прогнозирования для случая, когда все подсистемы поддерживаются возможностями ИИ, свойственными специалистам средней квалификации

Каждая из подсистем представляет собой подсистему с резервированием, где функции основного элемента по принятию решения возложены на роботизированное устройство с ИИ, а резервного – на человека-специалиста в диспетчерском центре. Подсистемы нефтяной платформы: 1 – конструкция платформы, 2 – диспетчерский центр управления комплексной роботизированной системой, 3 – подводный модем связи, 4 – телеуправляемый необитаемый подводный аппарат, 5 – гидроакустический маяк, 6 – автономный необитаемый подводный аппарат, 7 – безэкипажный катер с распылителем сорбента, 8 – безэкипажный катер с устройством сбора загрязнений; 9 – беспилотный летательный аппарат. Учет более частых ошибок при распознавании подводных угроз и климатических неопределенностей при эксплуатации формально характеризуется тем, что специалисты, а также обученные ими системы ИИ, могут совершить ошибки в среднем один раз в месяц (вместо 1 раза год для примера 3). Такой уровень ошибок свойственен для специалистов средней квалификации.

Для системного планирования возможностей выполнения функций роботизированной системой обеспечения безопасности нефтегазовой платформы важен ответ на прежний вопрос: «Какие риски нарушения целостности могут быть в течение прогнозного периода, равного 1 году, 10 годам, 20 годам эксплуатации?» Поскольку по условиям примера все подсистемы поддерживаются возможностями ИИ, свойственными специалистам средней квалификации, ответ будет отражать более реальный взгляд на возможности выполнения функций в сравнении со случаем высококвалифицированных специалистов примера 3.

Фрагмент построенной в результате вероятностного моделирования ФР на рис. 8 показывает: риск «неудачи» увеличивается от 0,0009 в течение года (вместо 0,000003 для примера 3) до 0,0844 в течение 10 лет (вместо 0,0004) и до 0,25 в течение 20 лет (вместо 0,0013). В итоге вычисляемое среднее время между соседними нарушениями целостности системы составит 24 года. То есть при использовании специалистов средней квалификации (или в более сложных условиях, приводящих к ошибкам, свойственным для специалистов средней квалификации – в среднем один раз в месяц) во взаимодействии с ИИ, обученным на том же уровне, риск «неудачи» возрастает на порядок и более по сравнению с использованием высококвалифицированных специалистов, поддерживаемых соответствующим ИИ (с ошибками в среднем один раз в год).

Это – реальный взгляд на возможности выполнения функций по сравнению с результатами примера 3.

Примечание. Поскольку при моделировании использовались одна и та же модель, структура системы и формулы, то выводы относительно возможностей выполнения функций с использованием высококвалифицированных специалистов и специалистов средней квалификации, поддерживаемых соответствующим ИИ, справедливы для обеих систем из примеров 3 и 4.

Пример 5 иллюстрирует возможный прагматический эффект. В России создан комплекс обеспечения техногенной безопасности на объектах газораспределения нефтегазовой отрасли, служащий ярким примером достижения прагматических эффектов с использованием идей, методов и моделей, изложенных выше в разделах 1-4. В созданном комплексе периферийные газорегуля-



Рис. 9. Техническая реализация

торные пункты дополнительно оснащены датчиками вибрации (фиксирование землетрясения), пожара, наводнения, несанкционированного доступа, урагана, видеоизображения внутренней и внешней обстановки, а также интеллектуальными средствами реакции, способными реализовать процедуры распознавания, идентификации и раннего прогнозирования развития нештатных ситуаций. Реализованные технологические возможности использования космической связи позволяют реагировать за секунды. Комплекс сопрягается с системами мониторинга и контроля других производителей в едином пространстве диспетчерских и ситуационных центров. Технические решения и реализация периферийной подсистемы на объектах укладывается в размеры «почтовой посылки». Периферийный пост – в виде огороженной бытовки, это приемлемо практически в любой области приложения в нефтегазовой отрасли (рис. 9). Практическая ценность в том, что адаптируемая функциональная, структурная и программная реализации позволяют эффективное его применение с любым вариантом построения конкретного объекта, обеспечивая информационное взаимодействие на территориях РФ фактически с любым количеством объектов.

Появившиеся функциональные возможности комплекса использованы в жизненном цикле объектов и систем на основе решения сформулированных оптимизационных задач минимизации затрат (на этапах создания) или рисков (на этапе эксплуатации) при задаваемых ограничениях.

Эксплуатация комплекса в Калужской и Курской областях обеспечила безаварийное функционирование нефтегазовых объектов (до этого наблюдалось по несколько аварийных ситуаций в год). Применение комплекса в течение 5 лет обеспечило возможность экономии 8,5 млрд рублей, что достигнуто за счет эффективного внедрения функций прогнозирования рисков и обеспечения техногенной безопасности в технологического процессы контроля и мониторинга газораспределения. Работа была удостоена премии Правительства РФ в области науки и техники [11].

Заключение

1. Предложен методический подход к вероятностному прогнозированию и сравнению качества функционирования систем различного приложения в условиях неопределенности. С использованием предложенного подхода прогнозирование и сравнение могут осуществляться для одной и той же системы в разных условиях функционирования, для разных систем применительно к одному периоду времени или для разных периодов времени с одинаковыми или отличающимися продолжительностью и условиями. Практичность предложенного подхода проиллюстрирована примерами. Эффективность от внедрения подхода в жизненный цикл сложной системы может быть соизмерима с затратами на создание системы.

2. Продемонстрирована работоспособность предложенного методического подхода. Подход может быть принят за основу системного анализа и оптимизации качества функционирования систем, производящих материальную и/или информационную продукцию, обоснования количественных системных требований и инженерных решений, направленных на удовлетворение потребностей заинтересованных сторон.

Библиографический список

1. Kostogryzov A., Kanygin P., Nistratov A. Probabilistic comparisons of systems operation quality for uncertainty conditions // RTA&A. 2020. No 1(56). Vol. 15. Pp. 63-73. DOI: 10.24411/1932-2321-2020-11007
2. Kostogryzov A. Estimations of “Smart” Engineering Systems Operation by Probabilistic Measures of Correctness and Reliability. RTA&A. 2020. No 3(58). Vol. 15. Pp. 19-35. DOI: 10.24411/1932-2321-2020-13002
3. Костокрызов А.И., Петухов А.В., Щербина А.М. Основы оценки, обеспечения и повышения качества выходной информации в АСУ организационного типа. М.: Изд. «Вооружение, политика и конверсия», 1994. 278 с.
4. Kostogryzov A.I. Software Tools Complex for Evaluation of Information Systems Operation Quality (CEISOQ). // Proceedings of the 34-th Annual Event of the Government Electronics and Information Association (GEIA), Engineering and Technical Management Symposium, USA, Dallas, 2000. Pp. 63-70.
5. Безкоровайный М.М., Костокрызов А.И., Львов В.М. Инструментально-моделирующий комплекс для оценки качества функционирования информационных систем КОК. 150 задач анализа и синтеза и примеров их решения. М.: Изд. «Вооружение. Политика. Конверсия», 2002. 304 с.
6. Костокрызов А.И., Нистратов Г.А. Стандартизация, математическое моделирование, рациональное управление и сертификация в области системной и программной инженерии: 2-е изд. М.: Изд. «Вооружение, политика, конверсия», 2005. 395 с.
7. Костокрызов А.И., Степанов П.В. Инновационное управление качеством и рисками в жизненном цикле систем. М.: Изд. «Вооружение, политика, конверсия», 2008. 404 с.
8. Zio En. An Introduction to the Basics of Reliability and Risk Analysis. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2006. 236 p.
9. Kolowrocki K., Soszynska-Budny J. Reliability and Safety of Complex Technical Systems and Processes. Springer-Verlag London Ltd., 2011.
10. Kostogryzov A., Nistratov G., Nistratov A. Some Applicable Methods to Analyze and Optimize System Processes in Quality Management. In book: Total Quality Management and Six Sigma. InTech, 2012. Pp. 127-196.
11. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Научные

основы техногенной безопасности / Под ред. Н.А. Махутова. М.: МГОФ «Знание», 2015. 936 с.

12. Eid M., Rosato V. Critical Infrastructure Disruption Scenarios Analyses via Simulation. In book: Managing the Complexity of Critical Infrastructures. Studies in Systems, Decision and Control, vol 90 / R. Setola, V. Rosato, E. Kyriakides, E. Rome (eds). Springer, Cham, 2016. Pp. 43-62.

13. Artemyev V., Kostogryzov A., Rudenko Ju. et al. Probabilistic methods of estimating the mean residual time before the next parameters abnormalities for monitored critical systems. In: Proceedings of the 2nd International Conference on System Reliability and Safety (ICSRS), Milan, Italy, 2017. Pp. 368-373.

14. Kostogryzov A., Atakishchev O., Stepanov P. et al. Probabilistic modelling processes of mutual monitoring operators actions for transport systems. In: Proceedings of the 4th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS), Canada, Banff, 2017. Pp. 865-871.

15. Kostogryzov A., Grigoriev L., Golovin S. et al. Probabilistic Modeling of Robotic and Automated Systems Operating in Cosmic Space. In: Proceedings of the International Conference on Communication, Network and Artificial Intelligence (CNAI), Beijing, China. DEStech Publications, Inc., 2018. Pp. 298-303.

16. Artemyev V., Rudenko Ju., Nistratov G. Probabilistic modeling in system engineering. Probabilistic methods and technologies of risks prediction and rationale of preventive measures by using “smart systems”. Applications to coal branch for increasing Industrial safety of enterprises. IntechOpen, 2018. Pp. 23-51. DOI: 10.5772/intechopen.71396

17. Kershenbaum V., Grigoriev L., Kanygin P. et al. Probabilistic modeling in system engineering. Probabilistic modeling processes for oil and gas systems. IntechOpen, 2018. Pp. 55-79. DOI: 10.5772/intechopen.71396

18. Kostogryzov A., Panov V., Grigoriev L. et al. Estimation of stakeholders satisfaction in application to socially significant systems // Actual Problems of System and Software Engineering: 6th International Conference Proceedings (Moscow, 12-14 November, 2019). Pp. 10-16.

19. Kostogryzov A., Korolev V. Probability, combinatorics and control. Probabilistic Methods for Cognitive Solving of Some Problems in Artificial Intelligence Systems. IntechOpen, 2019. Pp. 3-34. DOI: 10.5772/intechopen.89168

20. Нистратов А.А. Аналитическое прогнозирование интегрального риска нарушения приемлемого выполнения совокупности стандартных процессов в жизненном цикле систем высокой доступности. Часть 1. Математические модели и методы // Системы высокой доступности. 2021. Т. 17. № 3. С. 16-31. DOI: 10.18127/j20729472-202103-02

21. Нистратов А.А. Аналитическое прогнозирование интегрального риска нарушения приемлемого выполнения совокупности стандартных процессов в жизненном цикле систем высокой доступности. Часть 2. Программ-

но-технологические решения. Примеры применения // Системы высокой доступности. 2022. Т. 18. № 2. С. 42-57. DOI: 10.18127/j20729472-202202-03

22. Kostogryzov A., Makhutov N., Nistratov A. et al. Time Series Analysis – New Insights. Probabilistic predictive modeling for complex system risk assessments. IntechOpen, 2023. DOI: 10.5772/intechopen.106869

References

1. Kostogryzov A., Kanygin P., Nistratov A. Probabilistic comparisons of systems operation quality for uncertainty conditions. RTA&A 2020;1(56);15:63-73 <https://doi.org/10.24411/1932-2321-2020-11007>.

2. Kostogryzov A. Estimations of “Smart” Engineering Systems Operation by Probabilistic Measures of Correctness and Reliability. RTA&A 2020;3(58);15:19-35 <https://doi.org/10.24411/1932-2321-2020-13002>.

3. Kostogryzov A.I., Petuhov A.V., Scherbina A.M. [Foundations of evaluation, providing and increasing output information quality for automatized system]. Moscow: Vooruzheniye, politika i konversiya; 1994. (in Russ.)

4. Kostogryzov A.I. Software Tools Complex for Evaluation of Information Systems Operation Quality (CEISOQ). In: Proceedings of the 34-th Annual Event of the Government Electronics and Information Association (GEIA), Engineering and Technical Management Symposium. Dallas (USA); 2000. Pp. 63-70.

5. Bezkorovainy M.M., Kostogryzov A.I., Lvov V.M. Modelling Software Complex for Evaluation of Information Systems Operation Quality CEISOQ. 150 problems of analysis and synthesis and examples for their solutions. Moscow: Vooruzheniye, politika i konversiya; 2001. (in Russ.)

6. Kostogryzov A., Nistratov G. Standardization, mathematical modelling, rational management and certification in the field of system and software engineering (80 standards, 100 mathematical models, 35 software tools, more than 50 practical examples). Moscow: Vooruzheniye, politika i konversiya; 2004. (in Russ.)

7. Kostogryzov A.I., Stepanov P.V. Innovative management of quality and risks in systems life cycle. Moscow: Vooruzheniye, politika i konversiya; 2008. (in Russ.)

8. Zio, E. An Introduction to the Basics of Reliability and Risk Analysis. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.; 2006.

9. Kolowrocki, K. and Soszynska-Budny, J. Reliability and Safety of Complex Technical Systems and Processes. Springer-Verlag London Ltd.; 2011.

10. Kostogryzov A., Nistratov G., Nistratov A. Some Applicable Methods to Analyze and Optimize System Processes in Quality Management. In: Total Quality Management and Six Sigma; 2012. Pp. 127-196.

11. Akimov V., ..., Mahutov N. at al. Mahutov N.A., editor. [Security of Russia. Legal, Socioeconomic and Scientific Aspects. The Scientific Foundations of Technogenic Safety]. Moscow: Znanie; 2015. (in Russ.)

12. Eid M., Rosato V. Critical Infrastructure Disruption Scenarios Analyses via Simulation. Managing the Complex-

ity of Critical Infrastructures. A Modelling and Simulation Approach. SpringerOpen; 2016. Pp. 43-62.

13. Artemyev V., Kostogryzov A., Rudenko Ju., Kurpatov O., Nistratov G., Nistratov A. Probabilistic methods of estimating the mean residual time before the next parameters abnormalities for monitored critical systems. In: Proceedings of the 2nd International Conference on System Reliability and Safety (ICSRS). Milan (Italy); 2017. Pp. 368-373.

14. Kostogryzov A., Atakishchev O., Stepanov P., Nistratov A., Nistratov G., Grigoriev L. Probabilistic modeling processes of mutual monitoring operators actions for transport systems. In: Proceedings of the 4th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS). Banff (Canada); 2017. Pp. 865-871.

15. Kostogryzov A., Grigoriev L., Golovin S., Nistratov A., Nistratov G., Klimov S. Probabilistic Modeling of Robotic and Automated Systems Operating in Cosmic Space. In: Proceedings of the International Conference on Communication, Network and Artificial Intelligence (CNAI). Beijing (China). DEStech Publications, Inc.; 2018. Pp. 298-303.

16. Artemyev V., Rudenko Ju., Nistratov G. Probabilistic modeling in system engineering. Probabilistic methods and technologies of risks prediction and rationale of preventive measures by using “smart systems”. Applications to coal branch for increasing Industrial safety of enterprises. IntechOpen; 2018. Pp. 23-51. <http://www.intechopen.com/books/probabilistic-modeling-in-system-engineering>.

17. Kershenbaum V., Grigoriev L., Kanygin P., Nistratov A. Probabilistic modeling in system engineering. Probabilistic modeling processes for oil and gas systems. IntechOpen; 2018. Pp. 55-79. <http://www.intechopen.com/books/probabilistic-modeling-in-system-engineering>.

18. Kostogryzov A., Panov V., Grigoriev L., Zubarev I., Nistratov A., Nistratov G. Estimation of stakeholders satisfaction in application to socially significant systems. In: Proceedings of the Proceedings of the 6th International Conference Actual Problems of System and Software Engineering. Moscow (Russia); 12-14 November, 2019. Pp. 10-16.

19. Kostogryzov A., Korolev V. Probability, combinatorics and control. Probabilistic Methods for Cognitive Solving of Some Problems in Artificial Intelligence Systems. IntechOpen; 2019. Pp. 3-34. DOI: 10.5772/intechopen.89168.

20. Nistratov A.A. Analytical prediction of the integral risk of violation of the acceptable performance of the set of standard processes in a life cycle of highly available systems. Part 1. Mathematical models and methods. Highly Available Systems 2021;17:16-31. DOI: 10.18127/j20729472-202103-02. (in Russ.)

21. Nistratov A.A. Analytical prediction of the integral risk of violation of the acceptable performance of the set of standard processes in a life cycle of highly available systems. Part 2. Software-technological solutions. Examples. Highly Available Systems 2022;18:42-57. DOI: 10.18127/j20729472-202202-03. (in Russ.)

22. Kostogryzov A., Makhutov N., Nistratov A., Reznikov G. Time Series Analysis – New Insights. Probabilistic predictive modeling for complex system risk assessments. IntechOpen; 2023. DOI: 10.5772/intechopen.106869.

Сведения об авторах

Костогрызов Андрей Иванович – главный научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, ул. Вавилова 44, стр.2, Москва, Российская Федерация, 119333, e-mail: Akostogr@gmail.com

Нистратов Андрей Андреевич – старший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, ул. Вавилова 44, стр.2, Москва, Российская Федерация, 119333, e-mail: andrey.nistratov@gmail.com

About the authors

Andrey I. Kostogryzov, Dr., Prof., Chief Researcher, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44, bld.2 Vavilova St., Moscow, Russia, 119333, e-mail: Akostogr@gmail.com

Andrey A. Nistratov, Ph.D. (Eng.), Senior Researcher, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44, bld.2 Vavilova St., Moscow, Russia, 119333, e-mail: andrey.nistratov@gmail.com

Вклад авторов в статью

Костогрызов А.И. Разработка моделей, методов и стандартов системной инженерии. Формирование примеров, интерпретация результатов, выработка рекомендаций.

Нистратов А.А. Участие в разработке моделей и стандартов системной инженерии. Создание программных инструментариев для модельных расчетов. Моделирование по исходным данным примеров, участие в интерпретации результатов и выработке рекомендаций.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.