

# АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-449-458

EDN WVZEVZ

## METHODOLOGY FOR FORMING AN INTEGRAL ASSESSMENT OF THE RELIABILITY OF AUTOMATED CONTROL SYSTEMS OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE AT THE DESIGN STAGE

**V. V. Korotkov**

Admiral Makarov University of Maritime and Inland Shipping,  
St. Petersburg, Russian Federation

*Transport systems, as objects of automated control, impose a number of specific requirements on the reliability of such control. Firstly, in addition to ensuring the reliability of individual technical components and subsystems, it is necessary to guarantee the security of information flows circulating within the human-machine control loop under conditions of increasing digitalization. Secondly, the same requirements apply to the software being developed. Thirdly, the use of cloud technologies for big data storage necessitates the consideration of protective measures of both technical and algorithmic nature at the design stage. Finally, the functional heterogeneity of a wide range of technical devices included in both the controller and the controlled object requires, at the design stage, the development of a methodology for a generalized, integrated, and predictive assessment of the reliability of the automated control system as a basis for evaluating alternative options for its structure and composition. In this context, the high vulnerability of water transport system facilities to various risks and vulnerabilities, both seasonal and permanent, must be considered. This underscores the relevance of developing a method for constructing an integrated assessment of the reliability of automated control systems for water transport facilities, which is the aim of this study. Within this general task, the following issues are addressed: determining the dimension and structure of the integral indicator; including qualitatively described vulnerabilities inherent in the control object and control loop; constructing a mathematical model of the functioning of the designed automated control system; building, on this basis, a management simulation model to analyze the “bottlenecks” that most significantly impact the assessment; and using probabilistic and theoretical methods of active risk management at the stage of considering alternative options for individual parts of the project. The methodological basis of the study includes the general provisions of applied probability theory, the theory of experimental design on simulation models, and the optimization of the design reliability indicator using mathematical programming tools. The result is a method for constructing an integral indicator of the design reliability of an automated control circuit for large water transport systems, aggregating the probabilities of heterogeneous technical vulnerabilities, information vulnerabilities at cloud interface points, and potential software errors.*

*Keywords: water transport systems, mathematical modeling, methodology, automated control systems, technical system reliability, random variable distribution, optimization.*

### For citation:

Korotkov, Vitaliy V. “Methodology for forming an integral assessment of the reliability of automated control systems of transport infrastructure at the design stage”. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.3 (2025): 449–458. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-449-458.

УДК 004.6:656.6

## МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

**В. В. Коротков**

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Темой исследования являются большие системы водного транспорта, в частности порты, судоходные компании, судостроительные и судоремонтные предприятия, логистические центры, шлюзованные судоходные каналы, регулируемые внутренние водные пути, которые как объекты автоматизированного управления предъявляют следующие требования к его надежности: обеспечение на необходимом уровне безопасности и надежности отдельных технических узлов и подсистем и информационных потоков, циркулирующих в человеко-машинном контуре управления в условиях нарастающей цифровизации транспорта (аналогичное требование должно быть установлено для разрабатываемого программного обеспечения); использование облачных технологий хранения больших данных, что требует учета на стадии проектирования защитных мероприятий как технического, так и алгоритмического характера; разработка на стадии проектирования методики обобщенной интегрированной прогнозной оценки надежности АСУ как основы рассмотрения альтернативных вариантов ее структуры и состава ввиду функциональной разнородности широкого спектра технических устройств, входящих как в субъект, так и в объект управления. Отмечается, что при этом должна быть учтена высокая подверженность объектов воднотранспортной системы многообразным рискам и уязвимостям, как сезонным, так и постоянно действующим (тем самым определяется актуальность разработки метода построения интегральной оценки надежности АСУ для объектов водного транспорта как цели исследования). В рамках общей задачи предлагается решение следующих вопросов: определение размерности и структуры интегрального показателя; включение качественно описываемых уязвимостей, имманентно присущих объекту управления и контуру управления; построение математической модели функционирования проектируемой АСУ; построение на этой основе имитационной модели управления с целью анализа «узких мест», в наибольшей степени влияющих на ухудшение оценки; использование теоретико-вероятностной методики активного управления рисками на стадии рассмотрения альтернативных вариантов отдельных частей проекта. Методологическую основу исследования составляют общие положения прикладной теории вероятностей, теория планирования эксперимента на имитационной модели, оптимизация проектного показателя надежности средствами математического программирования. Результатом работы является метод построения интегрального показателя проектной надежности контура автоматизированного управления для больших систем водного транспорта, агрегирующего вероятности проявления разнородных уязвимостей технических узлов, информационных уязвимостей в точках выхода в облачную среду и потенциальных ошибок в программном обеспечении.

*Ключевые слова:* системы водного транспорта, математическое моделирование, методика, автоматизированные системы управления, надежность технической системы, распределение случайных величин, оптимизация.

**Для цитирования:**

Коротков В. В. Математическая модель формирования интегральной оценки надежности автоматизированной системы управления на стадии проектирования / В. В. Коротков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 3. — С. 449–458. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-449-458. — EDN WVZEVZ.

## Введение (Introduction)

Оценка надежности автоматизированной системы управления объектом водного транспорта, будучи одним из необходимых начальных этапов проектирования, имеет своей методологической основой соответствующий государственный стандарт, в соответствии с которым системными показателями надежности АСУ должны служить неформализованные детально в указанном ГОСТе возможность надлежащей реализации функций управления и количественная оценка прогнозной частоты рискованных происшествий. Особенно важное значение имеет обеспечение надежности информационной управляющей инфраструктуры в ситуациях, когда объекты управления являются критически важными, в перечень которых, в соответствии с решением СБ РФ от 08.11.2005 г., входит водный транспорт. Тем самым определяется актуальность проблемы разработки методики построения обобщающего интегрального показателя проектной надежности, который при его наличии допускает следующие виды использования: *пассивное* — информирование заказчика, *оптимизирующее* — представленное в качестве целевой функции при наличии вариантов аппаратного исполнения, технологий хранения и защиты данных. Во втором случае существенный интерес представляет возможность соотнесения показателя надежности и обеспечивающего его уровня затрат, которая может быть реализована с помощью использования расчетной модели в диалоговом режиме. Разнородность составляющих функциональных подсистем, неполнота, а подчас и отсутствие статистических данных о возможных отказах и других рискованных происшествиях,

в том числе на уровне данных, приводят к совместному использованию теоретико-вероятностных процедур, метода экспертных оценок, математического и на этой основе имитационного моделирования.

Автоматизированное управление объектами транспортной инфраструктуры реализуется при помощи сложных технических систем, надежность функционирования которых предполагает, во-первых, надежность (безотказность) аппаратных средств, предусматриваемых проектом, во-вторых, надежность (безопасность) хранения данных, и, в-третьих, надежность (отсутствие ошибок) программного обеспечения. Интегральный показатель надежности проектного решения АСУ должен в формализованном виде учитывать все три указанных аспекта.

В рыночных условиях проектировщик и будущий пользователь АСУ (заказчик) осуществляют свою деятельность в рамках ограниченного бюджета. Отсюда следуют две возможные постановки задачи обеспечения надежности системы управления. В первом случае при заданной верхней границе стоимости всей совокупности аппаратных и программных средств проектируемой АСУ обеспечивается максимум предварительно сформулированного обобщенного (интегрального) показателя надежности, выражаемого фиксированной единицей измерения, в том числе априори возможен безразмерный показатель. Во втором случае задается необходимое значение показателя надежности и выбирается аппаратно-информационная структура АСУ, обеспечивающая минимум стоимости. В обоих случаях отправной точкой проектного обеспечения надежности является формирование соответствующего показателя. Существенный интерес представляет агрегирование показателя, дающего возможность соотнесения показателя надежности и обеспечивающего его уровня затрат (такое соотнесение может быть реализовано расчетной моделью в диалоговом режиме).

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Рассмотрим априорные предпосылки для формального определения интегрального показателя надежности  $H$ . Представляется, что он должен иметь мультипликативную структуру, при которой низкая надежность одной из составляющих (аппаратной, программной) либо сохранности данных не будет нивелироваться высокими значениями других составляющих. Кроме того, мультипликативная структура исключает проблему разной размерности отдельных составляющих, которая имеет место при аддитивном построении  $H$ . В соответствии с этим определим показатель  $H$  в виде

$$H = H_{\text{ап}} H_{\text{пр}} H_{\text{д}}, \quad (1)$$

где  $H_{\text{ап}}$  — надежность аппаратного контура;

$H_{\text{пр}}$  — надежность программного обеспечения;

$H_{\text{д}}$  — надежность хранения данных.

Проектные решения должны учитывать два аспекта общей надежности: аппаратный и стоимостной, расширяя тем самым информированность заказчика и позволяя при необходимости закладывать ограничения по стоимости в математическую оптимизационную модель.

*Показатель аппаратной надежности АСУ.* Структурно-функциональная схема АСУ позволяет разбить аппаратный контур на подсистемы  $S_1, \dots, S_k$ , работоспособность каждой из которых слабо влияет либо совсем не влияет на работоспособность других систем. Так, например, в первом приближении можно рассматривать как изолированные терминалы распределенной сети удаленных пользователей, системы хранения данных и т. п.

При формировании показателя  $H_{\text{ап}}$ , так как именно он, как правило, рассматривается в качестве общего показателя надежности АСУ, т. е. в качестве системного показателя, что снижает объективность целостной оценки, будем исходить из перечня  $Y_1^{(i)}, \dots, Y_n^{(i)}$  ( $i = 1, \dots, k$ ) устройств для каждой из выделенных подсистем. АСУ относятся к классу *восстанавливаемых систем*, поэтому для каждого устройства  $Y_j^{(i)}$  предполагаем известными функцию распределения  $f_j^{(i)}(t)$  случайной величины  $\eta_j^{(i)}$ , представляющей показатель длительности наработки на отказ,

и функцию распределения  $g_j^{(i)}(t)$  случайной величины  $\theta_j^{(i)}$ , представляющей показатель длительность восстановления. Таким образом, для оценки надежности отдельного устройства рассматривают обе ее составляющие: *безотказность* и *ремонтпригодность*. В формируемом частном показателе  $H_{\text{ап}}^{(i)}$  естественно использовать математические ожидания  $\bar{\eta}_j^{(i)}$  и  $\bar{\theta}_j^{(i)}$ . Для выбора распределений и определения их параметров для имеющихся статистических данных об отказах и восстановлениях рабочего состояния проверяются гипотезы о показательном, нормальном и Вейбулл – Гнеденко распределениях (гипотеза об одном из них принимается в качестве *нулевой*, а о другом — в качестве *конкурирующей*).

Изолированное рассмотрение случайных величин  $\eta_j^{(i)}$  и  $\theta_j^{(i)}$  в недостаточной мере раскрывает аппаратную надежность, поскольку большое значение длительности безаварийной работы устройства теоретически может быть сопряжено с большой длительностью восстановления. Агрегирование показателя  $H_{\text{ап}}^{(i)}$ , связывающего обе указанные характеристики, должно удовлетворять априорному требованию: возрастанию надежности по аргументу  $\eta_j^{(i)}$  и убыванию по аргументу  $\theta_j^{(i)}$  для каждого  $j$ . Представляется целесообразным выполнить это следующим образом. Пусть  $\eta_{\text{max}}^{(i)} = \max(\eta_1^{(i)}, \dots, \eta_{n_j}^{(i)})$ ,  $d_j^{(i)} = \eta_{\text{max}}^{(i)} / \eta_j^{(i)}$  — временной вес отказной характеристики устройства  $Y_j^{(i)}$  на длительности  $\eta_{\text{max}}^{(i)}$ . Тогда, согласно принципу мультипликативности, в качестве интегрального показателя подсистемы принимаем характеристику

$$H_{\text{ап}}^{(i)} = \prod_{j=1}^{n_j} d_j^{(i)} / \theta_j^{(i)}, \quad (1)$$

откуда

$$H_{\text{ап}} = \prod_{i=1}^k H_{\text{ап}}^{(i)}. \quad (2)$$

Построенный показатель является безразмерным. Если исходить из заданного горизонта оценивания  $[0, T]$ , привязанного, например, к циклу технико-экономического планирования транспортной системы), то можно перейти к показателю с размерностью времени

$$h_{\text{ап}} = H_{\text{ап}} T, \quad (3)$$

который назовем *системным временем безотказной работы*. Следует отметить, что данный подход является альтернативным в методологии нечетких множеств, реализованной в отраслевых публикациях [1] и [2].

*Стоимостной показатель надежности аппаратного контура АСУ.* Показатель надежности автоматизированной системы управления в стоимостном выражении должен служить наряду с другими показателями основанием для обоснованного выбора из проектных альтернатив формирования аппаратного контура, когда его функционал может быть обеспечен разными наборами устройств. Рассмотрим вначале случай отдельной функциональной подсистемы. Для устройства  $Y_j^{(i)}$  введем в рассмотрение длительность амортизационного периода  $a_j^{(i)}$ . Тогда ожидаемое число отказов составляет  $r_j^{(i)} = [a_j^{(i)} / \bar{\eta}_j^{(i)}]$ . Если пренебречь ошибкой округления до целого, то для горизонта  $[0, T]$  получим коэффициент  $q_j^{(i)} = r_j^{(i)} T / a_j^{(i)} = T / \bar{\eta}_j^{(i)}$ . Пусть  $s_j$  — средняя стоимость одного восстановления (стоимостное выражение ремонтпригодности). Тогда для всей подсистемы получим затраты  $S^{(i)} = \sum_j q_j^{(i)} s_j^{(i)}$ . При стоимости  $C$  аппаратного контура подсистемы приходим к безразмерному стоимостному показателю надежности, для которого естественно предполагать, что  $S^{(i)} < S_0^{(i)}$ :

$$H_{\text{ап}}^{\text{ст}}(i) = 1 - S^{(i)} / C. \quad (4)$$

После этого для совокупности  $k$  подсистем  $H_{\text{ап}}^{\text{ст}} = \prod_{i=1}^k H(i)$ .

Для сравнения проектных альтернатив возможен переход к показателю с размерностью стоимости. Если  $S = \sum_i S^{(i)}$  — проектная стоимость аппаратной части проекта, то полагаем

$$S_{\text{ап}}^{\text{ст}} = H_{\text{ап}}^{\text{ст}} S. \quad (5)$$

Методы математического моделирования позволяют дополнить изложенную методику проектного обеспечения и проектной оценки надежности оптимизационной моделью.

**Оптимизационная модель формирования аппаратного контура АСУ.** Помимо сравнения нескольких априорных вариантов технического оснащения возможна постановка задачи его оптимизации на основе показателей (1)–(5). Следуя общей логике теории математического программирования, а именно двойственности экстремальных задач, рассмотрим два подхода, в которых целевая функция и ограничения меняются местами.

**Первый подход.** Пусть функциональная подсистема должна включать (в соответствии с ее распределенной структурой) априорно заданное количество  $k_j$  однородных устройств с  $j$ -м выходным функционалом  $j = 1, \dots, n$ ;  $c_j$  — стоимость одного устройства. Тогда стоимость подсистемы

$$C = \sum_{j=1}^n k_j c_j. \quad (6)$$

Остальные обозначения для устройств сохраним в прежнем виде (без верхних индексов). Тогда

$$C = \sum_{j=1}^n C^{(j)},$$

где все слагаемые  $C^{(j)}$  вычисляются согласно выражению (6).

Если исходить из цели минимизации стоимости  $F$  контура, дополненной затратами на восстановление при отказах, то при заданном значении стоимостной надежности  $H$  приходим к невыпуклой задаче математического программирования с управляемыми переменными  $c_j, r_j, a_j, \eta_j$ :

$$F(c_j, r_j, a_j, \eta_j) \in LC + S \rightarrow \min,$$

при ограничениях на предельные нижние и верхние значения управляемых переменных:

$$X = (c_j, r_j, a_j, \eta_j) \in L;$$

$$H_{\text{ап}}^{\text{ст}} \geq H,$$

где  $L$  — параллелепипед в фазовом пространстве этих переменных.

Поскольку отсутствие выпуклости у целевой влечет возможное наличие более чем одного минимума, возможен также второй подход к поиску условного минимума [1]: в  $L$  выбирается регулярная либо случайная (методом Монте-Карло) совокупность стартовых точек, для которых осуществляется градиентный поиск минимума [2], совокупность которых признается достаточной, если ее количественное удвоение не дает новых минимумов. Теперь, если  $X_0$  — найденная точка минимума, то в качестве оптимального варианта формирования аппаратного контура выбирается из имеющихся альтернатив тот вариант, для которого декартово расстояние оказывается минимальным.

**Показатель прогнозной надежности программного обеспечения АСУ.** Анализ источников, в том числе электронных (например, [7]–[13]), свидетельствует о том, что большинство предлагаемых методик оценки надежности программного обеспечения (ПО), не отличаясь, по сути, от методик оценки надежности аппаратных средств системы управления, имеют апостериорный характер и относятся к эксплуатационным характеристикам, базирующимся на анализе динамики отказов, что в данном случае означает проявление ошибок программирования. В связи с этим поскольку принципиальное отличие задачи оценки проектной надежности от эксплуатационной заключается в отсутствии имеющейся статистики, необходим альтернативный подход, связанный с модельной имитацией процесса эксплуатации АСУ.

С точки зрения технологии программирования показатель надежности ПО тесно взаимосвязан с рисками, возникающими при его разработке. Анализ последних (с привлечением оптимизирующих моделей) содержится в публикации [3], выводы которой можно принять в качестве методологической основы для дальнейшего развития, с тем уточнением, что в указанной работе предметом моделирова-

ния является предпроектное активное управление рисками (дополнительные затраты на снижение вероятностей последних), в то время как целью данного исследования служит формирование агрегированного показателя надежности  $H_{пр}$  уже разработанного, но еще не введенного в эксплуатацию ПО.

ГОСТ<sup>1</sup> качества ПО содержит общие неформализованные определения, из которых в рассматриваемом контексте важна «защищенность программного средства: «...совокупность свойств программного средства предотвращать несанкционированный доступ к программам и данным». Здесь мы будем трактовать это как обеспечение сохранности данных, циркулирующих в контуре управления. Другим аспектом надежности ПО, в данном случае следует считать вероятное отсутствие ошибок в коде. Здесь речь должна идти о семантических ошибках, которые, в отличие от синтаксических, не выявляются на этапе трансляции при проверке формальной корректности кода.

Наличие / отсутствие семантической ошибки не является характеристикой, имманентно присущей программе. Поэтому несмотря на известный тезис Э. Дейкстры [4] о невозможности доказательства полного отсутствия семантических программных ошибок, постпроектное тестирование является единственным способом оценки  $H_{пр}$ . Так же, как и в случае показателя аппаратной надежности, рассмотрим два варианта: *вероятностный* (безразмерный) и *стоимостной*. В отличие от концепции [3] во втором случае при агрегировании оценки будем использовать вероятные рисковые потери не разработчика, а пользователя.

Размер кода является наряду со сложностью наиболее существенным фактором возникновения ошибок [5]. Поэтому, как и ранее, будем формировать показатель  $H_{пр}$  мультипликативным образом в виде произведения надежности по ошибкам и надежности по сложности:  $H_{пр} = \lambda_{ош} \lambda_{слож}$ . Для первого множителя  $\lambda_{ош}$  определим финальное значение коэффициента надежности  $\lambda_{ош}$  в отношении ошибок программирования как прогноз на индекс  $2n$  по характеру значений показателя  $\lambda_i = t_i / L_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) — модельного времени наработки на отказ  $t_i$ , отнесенного к длине программы  $L_i$  (в ходе тестирования плановое значение  $L_i$ , как правило, монотонно возрастает). Укажем в этой связи на известный (тривиальный) тезис: тестирование показывает выявленные ошибки, не гарантируя при этом отсутствие не выявленных. Таким образом,

$$\lambda_{ош} = tr(2n),$$

где  $tr$  — сглаженная функция тренда.

Показатель  $\lambda_{ош}$  имеет размерность времени. Он может быть нормирован на безразмерную единицу: если  $\lambda = \max(\lambda_1, \dots, \lambda_n, \lambda_{ош})$ , то

$$\lambda_{ош}^{норм} = \lambda_{ош} / \lambda,$$

что расширяет возможности сравнения альтернативных проектных вариантов ПО.

Что касается второго множителя  $\lambda_{слож}$ , то прежде всего следует отметить, что, по крайней мере, с 1960-х гг. существует тенденция включать в число факторов, влияющих на пока не формализованную сложность программы — *размер финального кода* (например, в строках), который обозначим через  $R$ .

Представляется, что в качестве следующего фактора целесообразно включить в модель для  $\lambda_{слож}$  — *показатель функциональной неоднородности ПО*, который может быть определен как количество  $K$  разных по реализуемому функционалу больших модулей на укрупненной блок-схеме трафика информационных потоков (например, обслуживание баз данных, защита баз данных, планирование разного уровня для отдельных подразделений транспортной системы, сопровождение движения финансов и др.). Заметим, что показатель  $K$  логически соотносится с используемым в оценке рисков разработки ПО количеством: «...функционально-тематически ориентированных групп разработчиков подмодулей...» [3, с. 1106].

Кроме того, существенным для оценки сложности ПО (в той же логике соответствия риск – надежность) является количество  $F$  функциональных точек, связанных с отдельными функ-

<sup>1</sup> ГОСТ 28806–90. «Качество программных средств. Термины и определения». М., Госстандарт, 1990.

циями работы с данными и транзакций. Методика расчета  $F$  описана в регламенте ISO 20296: 2009 [7], а также в электронных изданиях (например, [9], [10]). Здесь будем исходить из уже сформированного значения  $F$ . Как и в предыдущих случаях, придадим агрегированному показателю мультипликативную структуру:

$$\lambda_{\text{слож}} = (KLF)^{-1}.$$

Частные производные по всем трем аргументам являются отрицательными, что согласуется с ожидаемым убыванием надежности ПО АСУ по мере увеличения частных показателей-аргументов  $K$ ,  $L$  и  $F$ .

**Показатель надежности хранения данных.** Стандартной современной аппаратно-технологической основой систем хранения данных (СХД), включенных в контур управления АСУ, являются дисковые системы с технологиями хранения / доступа (в порядке возрастания технических характеристик) RAID0: RAID7, SAS и SAT. Анализ публикаций последних лет (например, [9]) показывает, что во многих случаях авторы не проводят последовательного различия между надежностью хранения данных и отказоустойчивостью аппаратной части СХД (прежде всего (в основном) с временем наработки на отказ). В концепции данной публикации это должно быть отнесено к рассмотренным ранее показателям аппаратной надежности. Здесь рассмотрим только показатели, не связанные с отказами.

Наличие свободной памяти, не занятой актуальными данными, увеличивая себестоимость хранения (конкуренция стоимости и надежности неизбежна), уменьшает риски их потери (например, при переполнении), позволяя при необходимости использовать корректирующие и восстанавливающие коды, дублировать особо важную часть данных при возникновении внешних угроз. Поэтому представляется целесообразным включение в перечень агрегируемых в  $H_{\text{дан}}$  показателей безразмерного индикатора заполненности  $z$ , показывающего отношение усредненного по модельному времени суммарного объема свободной памяти всех хранилищ  $v_{\text{св}}$  к их номинальному объему  $v_{\Sigma}$  ( $0 < v_{\Sigma} < 1$ ):

$$z = v_{\text{св}} / v_{\Sigma}.$$

Информативным индикатором уровня надежности хранения данных является также отношение объема  $v_3 \neq 0$  данных, защищаемых корректирующими и исправляющими процедурами (типа кода Хэмминга) к общему объему данных:

$$k_{\text{в}} = v_3 / (v_{\Sigma} - v_{\text{св}}).$$

Наконец, при включенности в ПО защитных программных средств еще одним индикатором следует считать процент  $k_{\text{блок}} = v_3 / (v_{\Sigma} - v_{\text{св}})$  заблокированных модельных атак на данные (например, при подборе авторизованных ключей доступа).

В агрегировании, как и ранее, будем исходить из мультипликативного принципа:

$$H_{\text{д}} = zk_{\text{в}}k_{\text{блок}}.$$

Здесь любой из множителей может быть заменен на единицу при отсутствии данных без нарушения общего подхода к оценке надежности. Следует отметить, что информативными являются не только абсолютные значения показателей, но и их сопоставление для альтернативных вариантов проектов АСУ.

### Результаты исследования и их обсуждение (Results and Discussion)

Комплексная системная количественная оценка надежности разрабатываемой АСУ транспортно-системы может быть получена на стадии проектирования при совместном учете надежности аппаратного контура, надежности программного обеспечения и уровня сохранности данных на основе мультипликативного принципа:

$$H = H_{\text{ап}} H_{\text{пр}} H_{\text{д}}.$$

Это позволяет устранить проблему несовпадения размерностей при аддитивном агрегировании показателей отдельных сфер функционирования системы управления.

Для построения первого множителя  $H_{ан}$  привлекаются характеристики случайных величин наработки на отказ и длительности восстановления. Способ агрегации приводит к безразмерной величине. После привлечения множителя — горизонта времени анализа и планирования — ему можно придать размерность времени. Предложена оптимизационная по целевой функции затрат математическая модель формирования аппаратного контура в ходе разработки общего проекта аппаратной части АСУ, учитывающая потери, связанные с отказами и восстановлениями. В структуре второго множителя  $H_{пр}$  выделены и отражены в формализованном виде факторы, влияющие на ошибки программного кода, важнейшими из которых являются сложность программы, оцениваемая числом функциональных точек, и размер программы. Количественные значения факторов должны оцениваться в виде прогноза по тренду данных о выявленных ошибках на имитационной модели (разработка последней должна входить составной частью общего проекта).

В построении показателя надежности хранения данных  $H_{д}$  участвуют безразмерные коэффициенты средней заполненности хранилищ (без учета страховочного дублирования данных), коэффициент покрытия данных корректирующими и исправляющими процедурами, а также процент заблокированных модельных атак на СХД.

Предложенная методика может быть использована для интегрированной оценки надежности уже действующего автоматизированного управления систем водного транспорта с тем изменением, что модельная статистика заменяется фактически накопленной. Как и в других аналогичных ситуациях построения системных оценок, в случае интегрированного показателя проектной надежности АСУ следует считать не абсолютное ее значение, полученное на одном из вариантов проекта, а сопоставление оценок для альтернативных вариантов, полученных по единой методике.

### Заключение (Conclusion)

Разработка методики количественной общесистемной оценки надежности АСУ большими объектами воднотранспортной инфраструктуры на стадии их проектирования является актуальной научной проблемой, которая до настоящего времени не получила окончательного решения. Наличие подобной методики позволяет объективно оценивать укрупненные альтернативные варианты и уточнять оценки по мере продвижения проекта.

Предложенная методика основана на математических теоретико-вероятностном и оптимизационном моделировании. В основе ее заложен систематически используемый принцип мультипликативного агрегирования частных показателей, решающий вопросы унификации размерности. Выделены три аспекта, с различных сторон характеризующие общую надежность: надежность аппаратного контура, надежность программного обеспечения и надежность хранения данных в условиях удаленных СХД и облачных технологий. Для каждого из этих аспектов предложен набор существенных факторов, допускающих количественное выражение.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Химмельблау Д. М. Прикладное нелинейное программирование / Д. М. Химмельблау. — М.: Мир, 1975. — 536 с.
2. Гасников А. В. Современные численные методы оптимизации. Метод градиентного спуска / А. В. Гасников. — М.: МЦНМО, 2021. — 272 с.
3. Ястребов И. М. Управление рисками при разработке программного обеспечения в области защиты информации / И. М. Ястребов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 1105–1114. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1105-1114. — EDN ULIUUE.
4. Дал У. Структурное программирование / У. Дал, Э. Дейкстра, К. Хоор. — М.: Мир, 1975. — 247 с.
5. Голоскоков К. П. Моделирование транспортно-технологических процессов в автоматизированных системах / К. П. Голоскоков, Н. Б. Глебов, А. А. Астапкович // Вестник государственного университета

морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 154–162. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-154-162. — EDN NHWYWB.

6. *Голоскоков К. П.* Определение оптимального периода контроля вычислений в комплексах программ автоматизированных систем управления / К. П. Голоскоков, В. В. Коротков, А. А. Астапкович // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 5. — С. 885–892. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-885-892. — EDN DYDCRJ.

7. *Стрелавина О. Д.* Повышение надежности программного обеспечения для распределенных систем управления / О. Д. Стрелавина, С. Н. Ефимов, В. А. Терсков, М. А. Лихарев // Сибирский аэрокосмический журнал. — 2021. — Т. 22. — № 3. — С. 459–467. DOI: 10.31772/2712-8970-2021-22-3-459-467. — EDN SOQXMM.

8. *Найханова Л. В.* Расчет сложности программного продукта методом функциональных точек / Л. В. Найханова, С. В. Дамбаева, М. А. Пыкин // Научные исследования. — 2017. — Т. 1. — № 6(17). — С. 12–16. — EDN YPMQOX.

9. *Гуз И. Д.* Анализ эксплуатационной надежности оборудования систем хранения данных / И. Д. Гуз, В. А. Острейковский // Вестник кибернетики. — 2019. — № 3(35). — С. 35–42. DOI: 10.34822/1999-7604-2019-3-35-42. — EDN ZNASNT.

10. *Звонарева А. А.* Основные аспекты надежности программного обеспечения систем управления / А. А. Звонарева, А. О. Толоконский // Вестник Национального исследовательского ядерного университета “МИФИ”. — 2021. — Т. 10. — № 5. — С. 429–435. DOI: 10.1134/S2304487X21050126. — EDN HZYDBT.

11. *Михалевич И. Ф.* Концептуальные проблемы транспортной безопасности водных интеллектуальных транспортных систем / И. Ф. Михалевич // Надежность. — 2024. — Т. 24. — № 2. — С. 72–87. DOI: 10.21683/1729-2646-2024-24-2-72-87. — EDN CNEDVC.

12. *Нетес В. А.* Типичные недостатки в публикациях по надежности / В. А. Нетес // Надежность. — 2025. — Т. 25. — № 1. — С. 40–45. DOI: 10.21683/1729-2646-2025-25-1-40-45. — EDN DVKYBN.

13. *Гладких Т. Д.* Модель надежности автоматизированной системы управления технологическим процессом / Т. Д. Гладких // Современные наукоемкие технологии. — 2023. — № 2. — С. 30–35. DOI: 10.17513/snt.39520. — EDN LDBRSQ.

## REFERENCES

- Himmelblauy D. M. *Applied nonlinear programming*. Moscow: Mir, 1975: 536.
- Gasnikov A. V. *Modern Numerical Optimization Methods. Gradient Descent Method*. M.: MCNMO, 2021: 272.
- Yastrebov, I. M. “Risk management in software development in the field of information protection.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 15.6 (2023): 1105–1114. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1105-1114.
- Dahl, O. -J., E. W. Dijkstra, and C.A.R. Hoare *Structured Programming*. Moscow: Mir, 1975: 247.
- Goloskokov, K. P., N. B. Glebov and A. A. Astapkovich. “Modeling of transportation and technological processes in automated systems.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 16.1 (2024): 154–162. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-154-162.
- Goloskokov, K. P., V. V. Korotkov and A. A. Astapkovich. “Determination of the optimal period for computations control in complexes of automated control systems programs.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 15.5 (2023): 885–892. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-885-892.
- Strelavina, O. D., S. N. Efimov, V. A. Terskov and M. A. Likharev. “Increasing software reliability of a distributed control systems.” *Sibirskiy aerokosmicheskiy zhurnal* 22.3 (2021): 459–467. DOI: 10.31772/2712-8970-2021-22-3-459-467.
- Naykhanova, L. V., S. V. Dambaeva and M. A. Pykin. “Raschet slozhnosti programmogo produkta metodom funktsional’nykh tochek.” *Nauchnye issledovaniya* 1.6(17) (2017): 12–16.
- Guz, I. D. and V. A. Ostreykovskiy. “Operational reliability analysis of hardware of data storage systems.” *Vestnik kibernetiki* 3(35) (2019): 35–42. DOI: 10.34822/1999-7604-2019-3-35-42.
- Zvonareva, A. A. and A. O. Tolokonkiy. “Basic aspects of the reliability of control system software.” *Vestnik Natsional’nogo issledovatel’skogo yadernogo universiteta MIFI* 10.5 (2021): 429–435. DOI: 10.1134/S2304487X21050126.
- Mikhalevich, I. F. “Kontseptual’nye problemy transportnoy bezopasnosti vodnykh intellektual’nykh transportnykh sistem.” *Dependability* 24.2 (2024): 72–87. DOI: 10.21683/1729-2646-2024-24-2-72-87.

12. Netes, V. A. “Typical shortcomings in the dependability-related publications.” *Dependability* 25.1 (2025): 40–45. DOI: 10.21683/1729-2646-2025-25-1-40-45.

13. Gladkikh, T. D. “The dependability model of the industrial control system.” *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* 2 (2023): 30–35. DOI: 10.17513/snt.39520.

---

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Коротков Виталий Валерьевич** —  
доцент кафедры комплексного обеспечения  
информационной безопасности ГУМРФ  
им. адмирала С. О. Макарова  
198035, Россия, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, д. 5/7.  
e-mail: korotkovvv@gumrf.ru

---

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Korotkov Vitaliy Valeryevitch** —  
assistant professor of Department of Integrated  
Information Security,  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
Dvinskaya street, 5/7, 198135, Saint Petersburg, Russia  
e-mail: korotkovvv@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 19 марта 2025 г.*

*Received: Mar. 19, 2025.*