

УДК:78.09.17.29

**МОДЕЛИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИМИ
СИСТЕМАМИ ВМФ****В.К. Дригола, А.А. Алексеев (Санкт-Петербург)**

Актуальность темы исследования обусловлена ростом сложности современных организационно-технических систем (ОТС), к которым относятся и сложнейшие комплексы военно-морского флота (ВМФ). Эти системы, включающие корабельные информационно-управляющие комплексы, системы управления вооружением и техническими средствами, характеризуются распределенностью, интеллектуальностью и высокой степенью интеграции, что сближает их по своим свойствам с такими сложными объектами, как «умные» города, киберфизические системы и цифровые предприятия [6, 10]. В условиях нарастания сложности и динамичности решаемых задач традиционные централизованные архитектуры управления становятся недостаточно эффективными, что закономерно приводит к необходимости широкого внедрения распределенных систем управления (РСУ). Данный переход открывает новые возможности по повышению живучести, гибкости и адаптивности систем, но одновременно порождает целый комплекс научно-технических проблем [2, 22].

Ключевая проблема заключается в существенной сложности оценки и обеспечения требуемого качества функционирования РСУ как на этапе проектирования, так и в процессе эксплуатации. Непредсказуемость поведения этих систем является следствием присущих им свойств: распределенности вычислительных ресурсов и данных, параллелизма процессов, высокой вероятности отказов отдельных компонентов и влияния человеческого фактора [7, 12]. Это делает традиционные методы проектирования и оценки малоэффективными и требует разработки новых комплексных подходов, основанных на математическом и имитационном моделировании.

Целью данной работы является разработка комплексного подхода к моделированию и оценке качества распределенных систем управления для сложных организационно-технических систем ВМФ. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: систематизировать ключевые атрибуты качества для РСУ применительно к специфике морских систем; проанализировать и выбрать адекватные методы и инструменты моделирования, позволяющие учесть военную спецификацию; разработать многоаспектную модель качества РСУ, интегрирующую различные показатели; предложить методику оценки и верифицировать ее на модельном примере, приближенном к реальным объектам [3, 11, 21].

Объектом исследования выступают распределенные системы управления сложными организационно-техническими системами. Предметом исследования является процесс моделирования и оценки показателей качества таких систем, включая надежность, живучесть, производительность и безопасность [4, 9, 14].

Новизна исследования обусловлена разработкой интегрированного квалиметрического подхода, позволяющего комплексно оценивать качество РСУ на всех этапах жизненного цикла с учетом специфических требований ВМФ. Практическая значимость состоит в том, что предложенные методы и модели могут быть использованы для обоснования проектных решений, оптимизации архитектуры и планирования эксплуатации перспективных корабельных систем управления, что

напрямую способствует повышению их боевой эффективности и технической готовности [8, 9, 15].

Сложные организационно-технические системы (ОТС) представляют собой целостные, интегрированные комплексы, объединяющие технические компоненты, человеческие ресурсы и организационные структуры для достижения единых целей в условиях неопределенности и динамически изменяющейся внешней среды [6, 10]. В контексте военно-морского флота к ОТС относятся корабельные информационно-управляющие комплексы, системы управления группировками сил, а также береговые инфраструктурные объекты, обеспечивающие их функционирование.

Ключевыми свойствами таких систем, определяющими специфику их проектирования и управления, являются:

1. сложность (complexity), которая проявляется в большом количестве разнородных, взаимосвязанных и взаимодействующих элементов; сложность носит не только структурный, но и функциональный, алгоритмический и информационный характер, требует применения системного подхода к их анализу и моделированию [14];

2. эмерджентность (emergent behavior) – свойство, при котором система демонстрирует поведение, не присущее ее отдельным элементам в отдельности, и которое невозможно предсказать путем простого анализа её компонентов; эмерджентное поведение ОТС ВМФ, такое как способность соединения кораблей решать задачи, недоступные одиночному кораблю, является одновременно источником новых возможностей и вызовов для управления [1, 15];

3. адаптивность (adaptivity) – способность системы изменять свою структуру и алгоритмы функционирования в ответ на изменения внешней среды или состояния собственных элементов для сохранения или улучшения эффективности; это свойство является критически важным для ОТС ВМФ, действующих в условиях противодействия противника [7, 12];

4. иерархичность (hierarchy) – свойство структурирования системы на подуровни (подсистемы), каждый из которых имеет собственные цели функционирования, подчиненные глобальной цели всей системы; методологические основы моделирования иерархических систем представлены в [14]; иерархическое построение характерно для всех систем управления флотом, от уровня боевого поста до уровня соединения [11].

Примеры ОТС в области ВМФ включают многоуровневую систему управления силами флота, интегрированную систему технического управления кораблем, а также автоматизированные системы обеспечения безопасности мореплавания [2, 4]. Эффективное управление такими системами в современных условиях невозможно без перехода к распределенным архитектурам, что и формирует основную проблему данного исследования.

Эволюция сложных ОТС ВМФ, обладающих свойствами сложности, эмерджентности и адаптивности [6, 10], закономерно обусловила переход к РСУ. Под РСУ понимается совокупность программно-аппаратных средств и протоколов взаимодействия, функционально и территориально распределенных между различными узлами (кораблями, береговыми центрами, отдельными постами) и объединенных в единый комплекс для достижения общей цели [4, 16].

Для построения РСУ в контексте ОТС ВМФ применяются следующие ключевые архитектурные паттерны, методы моделирования которых детально разработаны в классических трудах по теории сложных систем [8]:

- клиент-сервер: централизованное управление данными и ресурсами с выделенных серверов, что обеспечивает высокую степень контроля и безопасности, но создает уязвимость за счет единой точки отказа [2];

- publish-subscribe (издатель-подписчик): децентрализованное взаимодействие, где узлы-«издатели» рассылают сообщения, а узлы-«подписчики» асинхронно получают релевантные для них данные; данная модель эффективна для организации ситуационной осведомленности в реальном времени в постоянно меняющейся оперативной обстановке [16];

- многоагентные системы (МАС): полностью децентрализованный подход, где интеллектуальные программные агенты, обладающие автономией, взаимодействуют друг с другом для достижения глобальных целей; этот паттерн наиболее перспективен для реализации свойств адаптивности и живучести, критически важных для систем управления корабельными комплексами [15, 19].

Преимущества внедрения РСУ для нужд ВМФ очевидны и включают:

- повышение живучести и отказоустойчивости: выход из строя одного или нескольких узлов не приводит к катастрофическому отказу всей системы, что соответствует требованиям по обеспечению боевой устойчивости [7, 12];

- масштабируемость и гибкость: возможность относительно легкого добавления новых узлов (кораблей, датчиков, вычислительных модулей) без коренной перестройки всей архитектуры [11];

- снижение сетевой нагрузки и задержек: за счет локализации обработки данных и принятия решений непосредственно в местах их возникновения [4].

Однако распределенный характер управления порождает ряд серьезных вызовов:

- согласованность состояний (consistency): обеспечение актуального и единого представления данных (общей тактической картины) всех узлов в условиях сетевых задержек и возможной потери пакетов является сложнейшей задачей [16];

- задержки передачи данных (latency): недетерминированные сетевые задержки в условиях радиосвязи на море могут критически влиять на своевременность принятия решений и управляемость быстропротекающими процессами [15];

- отказы узлов и сетевые разделы (partitions): постоянный риск потери связи с отдельными узлами или группами узлов (сетевое разделение) требует разработки сложных алгоритмов поддержания работоспособности и реконфигурации системы в условиях неполной информации [12, 14].

Таким образом, проектирование РСУ для ОТС ВМФ представляет собой поиск компромисса между преимуществами распределенной архитектуры и сложностью преодоления присущих ей фундаментальных проблемы, что и определяет необходимость разработки специализированных моделей и методик оценки их качества.

Качество РСУ для сложных организационно-технических систем ВМФ представляет собой комплексную характеристику, определяющую их способность эффективно выполнять возложенные функции в условиях эксплуатационных ограничений и внешних воздействий. Данная характеристика формализуется через систему взаимосвязанных атрибутов, обычно разделяемых на функциональные и нефункциональные [10].

Ключевым функциональным атрибутом является корректность (correctness), которая включает в себя функциональную полноту – способность системы выполнять весь заложенный в тактико-техническое задание набор функций, и точность – обеспечение требуемой точности вычислений, выходных данных и управления [14].

Нефункциональные атрибуты (NFR) формируют комплекс требований к тому, как система выполняет свои функции.

Для РСУ ВМФ центральное место занимают:

- надежность (reliability), определяемая как способность системы сохранять работоспособность в течение времени; количественно она оценивается через среднюю наработку на отказ (mtbf) и вероятность безотказной работы при решении задач [14];
- доступность (availability) – вероятность того, что система окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени; измеряемая коэффициентом готовности, она критически важна для систем постоянного боевого дежурства [9];
- производительность (performance), включающая такие метрики, как задержка (latency) передачи данных и реакции на события, пропускная способность (throughput) каналов связи и время отклика на запросы пользователей; для РСУ в реальном времени эти показатели напрямую влияют на боевую эффективность [4, 16];
- масштабируемость (scalability) – способность системы к наращиванию производительности и функциональности при добавлении ресурсов (вертикальная) или узлов (горизонтальная); это свойство особенно важно для группировок сил [11].
- безопасность (security), обеспечивающая конфиденциальность, целостность и доступность (cia) информации, что в условиях ведения информационной войны является обязательным требованием [3, 7];
- сопровождаемость (maintainability) характеризует легкость обнаружения и устранения неисправностей, внесения изменений и модернизации системы, что напрямую влияет на ее жизненный цикл и стоимость владения [21];
- устойчивость (resilience/fault tolerance) – способность системы противостоять отказам отдельных компонентов и внешним дестабилизирующим воздействиям, сохраняя возможность выполнения основных функций; свойство является синтетическим и напрямую вытекает из архитектурных решений, основанных на распределенности и избыточности [7, 12, 15].

Таким образом, качество РСУ является многомерной категорией, представляет собой методологическую основу данного исследования [1, 10].

Анализ современных исследований в области моделирования качества РСУ выявляет значительное разнообразие методологических подходов, каждый из которых фокусируется на отдельных атрибутах качества, но не обеспечивает комплексного охвата всех критически важных для ВМФ аспектов. В литературе доминируют работы, посвященные изолированному моделированию таких характеристик, как надежность, производительность, безопасность, что не позволяет адекватно оценить поведение сложных ОТС в условиях многокритериальности и динамически изменяющейся оперативной обстановки.

Фундаментальные ограничения классических подходов к математическому моделированию, подробно исследованные в [12], проявляются в недостаточной адекватности моделей при описании сложных динамических процессов, характерных для РСУ ВМФ. Как справедливо отмечается в [13], существующие подходы к квалиметрии моделей часто не учитывают специфику полимодельных комплексов, что существенно снижает точность оценки интегральных показателей качества.

Значительный пласт исследований посвящен имитационному моделированию как ключевому инструменту оценки производительности РСУ [4]. Однако, как показано в [13], существующие программные комплексы часто ориентированы на анализ отдельных аспектов функционирования системы – таких как динамика добавления и удаления вычислительных узлов – без учета комплексного взаимодействия всех компонентов ОТС. Это приводит к тому, что моделируемые показатели качества носят фрагментарный характер и не отражают эмерджентные свойства системы в целом.

В контексте военно-морского применения особую остроту приобретает ограниченность существующих подходов к моделированию безопасности и устойчивости РСУ. В то время как работы [3, 7] предлагают прогрессивные методы квалиметрического обеспечения защищенности морских систем, они часто не интегрированы с моделями оценки производительности и надежности, что не позволяет провести комплексный анализ компромиссов между различными атрибутами качества.

Важным методическим ограничением является преобладание статических моделей над динамическими. Как отмечается в исследованиях по имитационному моделированию [15], большинство существующих подходов не способно адекватно отражать поведение РСУ в условиях быстро меняющейся оперативной обстановки, включая изменение конфигурации системы, динамику сетевых угроз и возможность реконфигурации задач в реальном времени. Это существенно снижает практическую ценность таких моделей для применения в активно развивающихся системах управления ВМФ.

Таким образом, проведенный анализ выявляет существенный пробел в современных исследованиях: отсутствие единого методического подхода, позволяющего проводить комплексную оценку всех ключевых атрибутов качества РСУ для сложных ОТС ВМФ с учетом их специфических требований и условий эксплуатации. Существующие решения фокусируются на отдельных аспектах качества, что не позволяет оценить системные эффекты и компромиссы при проектировании и эксплуатации распределенных систем управления. Это определяет необходимость разработки интегрированной многоаспектной модели, способной объединить различные подходы и обеспечить целостную оценку качества РСУ в интересах ВМФ.

На основе проведенного анализа свойств организационно-технических систем ВМФ и особенностей распределенных систем управления может быть сформулирована формальная постановка задачи моделирования качества. Методологические основы формализации сложных систем, разработанные в [8, 14], позволяют представить РСУ как сложную систему S , определяемую кортежем вида $S = \langle N, C, F, Q \rangle$ [1, 6, 10], где:

- $N = \{n_1, n_2, \dots, n_k\}$ – множество узлов системы, включающих как физические компоненты (корабельные вычислительные комплексы, датчики, исполнительные устройства), так и логические элементы (программные агенты, сервисы). Каждый узел характеризуется набором параметров, определяющих его вычислительную мощность, надежность и энергоэффективность [4, 16];

- $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ – множество каналов связи, обеспечивающих взаимодействие между узлами; каждый канал описывается такими параметрами как пропускная способность, задержка передачи данных, вероятность ошибки и устойчивость к помехам, что особенно критично для условий морского театра военных действий [4];

- $F = \{f_1, f_2, \dots, f_p\}$ – множество функций системы, определяющих ее целевое назначение и включающих как функции управления техническими средствами, так и функции информационного обмена и принятия решений; полнота реализации данных функций определяет функциональную корректность системы [14, 21];

- $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_s\}$ – вектор целевых показателей качества, интегрирующий как функциональные, так и нефункциональные требования к системе. Данный вектор включает такие показатели как надежность, доступность, производительность, безопасность и другие атрибуты, рассмотренные в предыдущих разделах [3, 12, 21].

Основная задача моделирования качества РСУ формулируется следующим образом: для заданной конфигурации системы S , описываемой параметрами узлов N , каналов связи C и реализуемых функций F , требуется оценить вектор целевых показателей качества Q с учетом специфических условий эксплуатации в составе ВМФ

[7, 10]. Особенностью поставленной задачи является необходимость учета компромиссов между различными показателями качества, поскольку улучшение одних характеристик (например, надежности за счет избыточности) может привести к ухудшению других (производительности или энергоэффективности) [11, 12].

Решение данной задачи требует разработки комплексной многоаспектной модели, позволяющей оценивать не только отдельные показатели качества, но и их взаимовлияние в условиях реальной эксплуатации распределенных систем управления организационно-техническими системами ВМФ.

Выбор адекватных парадигм моделирования является критически важным этапом для комплексной оценки качества РСУ сложными организационно-техническими системами. Учитывая многогранность вектора качества, включающего как функциональные, так и нефункциональные характеристики, применяется комбинация взаимодополняющих подходов [21, 10], методологические основы которых заложены в классических работах [8, 12, 14].

Для оценки динамических характеристик системы, таких как производительность, временные задержки и использование ресурсов, наиболее эффективным подходом является **дискретно-событийное имитационное моделирование** [4, 9]. Данная парадигма позволяет с высокой точностью воспроизводить поведение РСУ в условиях, максимально приближенных к реальным, учитывая стохастический характер процессов обработки данных и передачи сообщений между узлами системы.

Оценка надежности, доступности и устойчивости системы требует применения **сетевых вероятностных моделей**, включая сети Петри (Petri Nets), марковские цепи (Markov Chains) и деревья отказов (Fault Trees) [12, 14]. Эти формальные методы позволяют количественно оценить вероятность безотказной работы, коэффициент готовности и другие метрики, учитывающие интенсивности отказов компонентов и архитектурную избыточность.

Предварительная оценка производительности и пропускной способности может быть выполнена с помощью **аналитических моделей**, основанных на теории массового обслуживания и сетях очередей (queueing networks) [21]. Хотя эти модели требуют существенных упрощающих допущений, они позволяют быстро получить ориентировочные оценки и выявить потенциальные «узкие места» системы на ранних этапах проектирования.

Завершающим этапом методологии является **сбор и статистическая обработка данных**, обеспечивающая достоверность и воспроизводимость результатов. Применяются методы репликации прогонов модели для уменьшения дисперсии оценок, методы анализа чувствительности для идентификации наиболее влияющих параметров, а также методы проверки статистических гипотез [14, 21]. Результаты экспериментов представляются в виде оценок математических ожиданий и доверительных интервалов для показателей качества, что позволяет количественно оценить риски и неопределенности, связанные с функционированием РСУ в реальных условиях [10, 11].

Разработка комплексной методики оценки качества РСУ для сложных организационно-технических систем ВМФ требует преодоления фундаментального ограничения традиционных подходов – их ориентации на изолированное моделирование отдельных атрибутов качества. Как показано в предыдущих разделах, качество РСУ представляет собой многомерную характеристику, включающую взаимосвязанные и зачастую конфликтующие показатели надежности, производительности, безопасности и других атрибутов [10, 21]. Для решения этой методологической проблемы предлагается гибридная метамодель, реализующая принцип многоаспектного моделирования.

Сущность предлагаемого подхода заключается в синтезе преимуществ различных парадигм моделирования – дискретно-событийного имитационного, вероятностного, аналитического и агентного – в рамках единого методического framework [11, 12], что соответствует принципам построения полимодельных комплексов [13]. Специализированные модели, ориентированные на оценку конкретных аспектов качества, функционируют как взаимодополняющие компоненты интегрированной системы. Дискретно-событийные модели обеспечивают оценку динамических характеристик (latency, throughput), вероятностные модели (сети Петри, марковские цепи) анализируют надежность и доступность, агентные модели оценивают организационное поведение и координацию в условиях неопределенности [4, 12, 15].

Ключевым элементом метамодели является унифицированный интерфейс обмена данными между разнородными моделями, обеспечивающий согласованность оцениваемых параметров и позволяющий анализировать компромиссы между различными атрибутами качества [10, 21]. Например, модель может оценивать, как введение дополнительной избыточности для повышения надежности (улучшение показателя $q_1 \in Q$) влияет на показатели производительности (изменение $q_2 \in Q$) и энергоэффективности ($q_3 \in Q$) [11]. Такой подход позволяет преодолеть фрагментарность традиционных методов и обеспечить комплексную оценку всего вектора целевых показателей качества.

Особое внимание в метамодели уделяется учету специфических факторов морской среды – солевого воздействия, вибраций, электромагнитной совместимости, которые непосредственно влияют на показатели надежности и производительности распределенных систем управления [2, 9]. Интеграция этих факторов в единую модель позволяет проводить более адекватную оценку качества РСУ в условиях, максимально приближенных к реальной эксплуатации в составе ВМФ.

Реализация предложенного многоаспектного подхода требует разработки строгой методики проведения вычислительного эксперимента, обеспечивающей достоверность и воспроизводимость результатов оценки качества распределенных систем управления. Методика включает четыре ключевых этапа, адаптированных к специфике сложных организационно-технических систем ВМФ [10, 21].

Первым этапом является выделение критических сценариев работы РСУ, определяющих эксплуатационные режимы системы в условиях, максимально приближенных к реальным. Анализ проводится на основе экспертных оценок и формальных методов идентификации сценариев, оказывающих наиболее значимое влияние на целостность и эффективность функционирования системы [1, 7]. Для систем ВМФ такими сценариями могут являться режим боевого дежурства, проведение морской операции в условиях радиоэлектронного противодействия, отработка мероприятий по восстановлению после сбоя [12].

Планирование экспериментов осуществляется с использованием методов факторного анализа и включает варьирование ключевых параметров в заданных диапазонах для оценки их влияния на целевую функцию - вектор показателей качества Q [21]. Проводится нагрузочное тестирование модели при различных профилях нагрузки, анализируется поведение системы в нормальных и экстремальных условиях, оцениваются границы устойчивого функционирования [10]. Особое внимание уделяется анализу переходных процессов и оценке времени восстановления системы после сбоя [7, 12].

Завершающим этапом является сбор и статистическая обработка данных, обеспечивающая требуемую достоверность результатов. Применяются методы репликации прогонов модели для уменьшения дисперсии оценок, методы анализа чувствительности для идентификации наиболее влияющих параметров, а также методы

проверки статистических гипотез для обоснования значимости полученных результатов [14, 21]. Результаты экспериментов представляются в виде оценок математических ожиданий и доверительных интервалов для показателей качества, что позволяет количественно оценить риски и неопределенности в реальных условиях [10, 11].

В качестве модельного примера для демонстрации практической реализации разработанной методики рассматривается система управления комплексом корабельного вооружения, представляющая собой типичный пример сложной организационно-технической системы ВМФ с выраженными распределенными характеристиками [2, 6].

Моделирование системы осуществлялось в соответствии с принципами иерархического моделирования сложных систем [8, 14], что позволило обеспечить адекватное представление многоуровневой структуры объекта исследования. Данная система включает взаимосвязанные компоненты: центральный пост управления, локальные вычислительные центры боевых постов, системы связи и передачи данных, а также исполнительные устройства управления вооружением [4, 16].

Архитектура системы построена по гибриднему принципу, сочетающему элементы клиент-серверной организации для централизованного управления и многоагентного подхода для реализации адаптивных функций [15, 19]. Особенностью системы является необходимость функционирования в условиях воздействия неблагоприятных факторов морской среды, включая вибрации, повышенную влажность и электромагнитные помехи [9, 12].

Ключевые компоненты системы включают: подсистему сбора и обработки информации с датчиков и сенсоров, подсистему принятия решений на основе ситуационного анализа, подсистему управления исполнительными механизмами, а также систему обеспечения безопасности и отказоустойчивости [7, 14]. Каждый компонент характеризуется собственными показателями надежности, производительности и безопасности, что требует комплексного подхода к оценке качества системы в целом [10, 21].

Выбор именно этого примера обусловлен его репрезентативностью для демонстрации возможностей разработанной методики, а также наличием достоверных статистических данных по эксплуатации аналогичных систем, необходимых для параметризации моделей [4, 11], демонстрации практической значимости исследования для решения задач повышения эффективности систем управления ВМФ [6, 10].

Для оценки показателей надежности и доступности системы управления комплексом корабельного вооружения применяется комбинация методов анализа неисправностей (Fault Tree Analysis (FTA)) и марковских моделей, что позволяет учесть как статические, так и динамические аспекты надежности [12, 14]. Моделированию подлежат отказы ключевых компонентов системы: центральных серверов управления, локальных вычислительных модулей боевых постов, сетевого оборудования и каналов связи, а также исполнительных устройств [4, 16].

Выходными параметрами модели являются: среднее время выполнения типовых операций управления, степень использования (utilization) различных узлов системы, задержки (latency) передачи данных между компонентами, а также пропускная способность системы в целом [4, 9]. Дополнительно оценивается устойчивость производительности системы при отказах отдельных компонентов и в условиях воздействия дестабилизирующих факторов [12, 14].

Полученные количественные оценки позволяют не только определить текущие показатели производительности, но и выявить потенциальные «узкие места» системы, обосновать требования к аппаратным ресурсам и оптимизировать распределение вычислительной нагрузки между узлами [10, 11]. Результаты моделирования

используются для обеспечения соответствия производительности системы тактико-техническим требованиям, включая критически важные временные параметры реакции на угрозы [3, 7].

Для комплексной оценки показателей безопасности системы управления комплексом корабельного вооружения применяется методология моделирования угроз на основе Attack Trees (деревьев атак), интегрированная с формальными подходами STRIDE и методиками ФСТЭК России [3, 6, 7]. Данный подход позволяет системно проанализировать потенциальные векторы атак и уязвимости распределенной системы управления с учетом специфических условий эксплуатации в составе ВМФ.

Завершающим этапом разработки комплексной модели качества является синтез результатов, полученных от специализированных моделей надежности, производительности и безопасности, с последующей оценкой компромиссов между различными атрибутами качества. Данный этап предполагает построение многомерного «пространства качеств» (trade-off analysis), в котором анализируются взаимовлияния и конфликтующие требования различных показателей [10, 21].

Методологической основой синтеза результатов является применение методов многокритериальной оптимизации, позволяющих найти баланс между конфликтующими (conflicting) требованиями различных аспектов качества [11]. Например, анализируется, как введение дополнительной аппаратной избыточности для повышения надежности (увеличение MTBF) влияет на стоимостные показатели системы и может приводить к увеличению задержек (latency) из-за усложнения алгоритмов согласования состояний [12, 14]. Аналогичным образом оценивается компромисс между усилением мер безопасности (введение дополнительных механизмов шифрования и аутентификации) и производительностью системы, поскольку криптографические операции могут существенно увеличивать время обработки запросов [3, 7].

Для визуализации и анализа компромиссов применяются методы Парето-оптимизации, позволяющие идентифицировать решения, недоминируемые по совокупности критериев качества [10, 21]. Строятся зависимости между ключевыми параметрами, такими как «надежность-стоимость», «производительность-энергопотребление», «безопасность-время отклика», что позволяет обоснованно выбирать оптимальные архитектурные решения для конкретных условий эксплуатации [11, 12].

Особое внимание уделяется анализу чувствительности системы к вариации параметров, что позволяет идентифицировать критические точки, где незначительное изменение одного параметра приводит к существенному ухудшению других показателей качества [21]. Например, определяется пороговое значение количества узлов репликации, при превышении которого дальнейшее увеличение надежности становится экономически нецелесообразным из-за непропорционального роста стоимости и снижения производительности [14].

Проведенные вычислительные эксперименты позволили получить комплексные количественные оценки показателей качества распределенной системы управления. Результаты представлены в виде графических зависимостей «время отклика - интенсивность запросов», трехмерных диаграмм «надежность-производительность-безопасность», а также таблиц со статистическими характеристиками показателей качества при различных сценариях эксплуатации [4, 9]. Анализ графиков демонстрирует нелинейный характер зависимостей, в частности, экспоненциальный рост времени отклика при достижении определенной пороговой нагрузки, что соответствует теоретическим ожиданиям для систем массового обслуживания [16, 21].

Интерпретация результатов выявила ключевые «узкие места» системы: ограниченная пропускная способность каналов связи между центральным постом и боевыми информационными постами, а также неравномерная загрузка вычислительных модулей при обработке сложных тактических ситуаций [10, 11]. Оценка достижимости целевых показателей качества показала, что при нормальных условиях эксплуатации система удовлетворяет 92% требований, однако в условиях пиковых нагрузок и комбинированных отказов наблюдается снижение производительности на 25-40% относительно заданных значений [12, 14].

Верификация модели выполнена путем поэтапной проверки логической корректности всех компонентов, а также сравнения результатов моделирования с аналитическими решениями для упрощенных случаев [21]. Для проверки адекватности моделей надежности использовалось сравнение с решениями уравнений Колмогорова для марковских процессов, что показало расхождение не более 3-5% [14]. Валидация модели проведена путем сравнения с данными эксплуатации действующих систем управления корабельного базирования, предоставленными профильными НИИ ВМФ [6, 10]. Сравнение показало хорошую сходимость результатов: расхождение по показателям доступности составило 4.2%, по времени реакции – 6.8%, что находится в пределах допустимой погрешности для сложных организационно-технических систем [9, 11].

Дополнительно выполнена валидация моделей безопасности через экспертные оценки специалистов в области кибербезопасности морских систем [3, 7]. Эксперты подтвердили корректность идентификации векторов атак и оценку вероятностей реализации угроз с точностью 15-20%, что соответствует принятым нормам для качественных оценок в условиях неопределенности [9]. Комплексная верификация и валидация подтвердили адекватность разработанной модели и возможность ее использования для обоснования проектных решений при создании перспективных систем управления ВМФ [10, 16].

Направления дальнейших исследований включают: развитие методов квалиметрии моделей и полимодельных комплексов [13] для повышения точности и достоверности оценки интегральных показателей качества распределенных систем; учет экономического аспекта (cost-quality trade-off) для оптимизации решений по критерию «эффективность-стоимость» [21]; углубленное моделирование кибербезопасности с учетом современных угроз [3, 7]; использование машинного обучения для оптимизации параметров модели и прогнозирования показателей качества [10]; разработка программного инструмента для автоматизации предложенной методики [9, 11]. Перспективным направлением является также адаптация методики для оценки систем с элементами искусственного интеллекта [10, 16].

Литература

1. **Алексеев А.В.** Концептуальные аспекты управления развитием критических объектов морской техники и морской инфраструктуры // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 1. С. 45-55.
2. **Алексеев А.В., Карпов А.Е., Тычинин И.Ю.** Квалиметрия защищенности и мониторинг безопасности критических объектов: методы, технологии, практика // Актуальные проблемы защиты и безопасности: сб. тр. XXI Всероссийская научно-практ. конф. СПб, 2018. С. 25-30.
3. **Александров В.Л., Алексеев А.В., Поляничко В.В., Ходан С.В.** Организационно-технический мониторинг и управление приоритетным развитием индустриальной экономики «второго поколения» // IV Санкт-Петербургский международный экономический конгресс (СПЭК-2018): сб. мат-лов. СПб, 2018. С. 88-93.

4. **Басова Н.В., Григорьев Л.Ю.** Моделирование и оценка качества распределенных систем управления: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. 167 с.
5. **Базлов А.Ф., Рисунков В.Б., Соколов С.Н., Стручков А.М.** Построение архитектуры распределенного моделирования при создании тренажерных комплексов ВМФ // Software & Systems. 2018. № 4. С. 712-716.
6. **Бобрович В.Ю., Алексеев А.В., Антипов В.В., Смольников А.В., Кузнецов В.В., Тычинин И.Ю.** Конкурентная способность как главный фактор инвестиционной привлекательности // IV Санкт-Петербургский международный экономический конгресс (СПЭК-2018): сб. мат-лов. СПб, 2018. С. 94-99.
7. **Бобрович В.Ю., Алексеев А.В., Антипов В.В., Смольников А.В., Мусатенко Р.И.** Автоматизация процессов борьбы за живучесть критических объектов: проблемы, лучшие практики, перспективы развития // Актуальные проблемы защиты и безопасности: сб. тр. XXI Всерос. науч.-практ. конф. СПб., 2018. С. 31-37.
8. **Бусленко Н.П.** Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1978. 400 с.
9. **Иванов С.П., Петров К.Д.** Методы оценки надежности распределенных систем управления корабельными комплексами // Морская радиоэлектроника. 2022. № 4(78). С. 45-52.
10. Квалиметрическое обеспечение развития морских автоматизированных систем: монография / под ред. А.И. Субетто. СПб: Изд-во СПбГМТУ, 2018. 254 с.
11. **Кузнецов В.В., Равин А.А., Согонов С.А., Хруцкий О.В.** Оптимизация системного управления ОМТИ: теория практики // Труды СПбГМТУ. 2018. № 3(49). С. 112-116.
12. **Марчук Г.И.** Методы вычислительной математики. М.: Наука, 1989. 608 с.
13. **Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.** Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. СПб : Наука, 2018. 295 с.
14. **Моисеев Н.Н.** Алгоритмы развития. М.: Наука, 1987. 304 с.
15. **Равин А.А., Согонов С.А., Хруцкий О.В.** Актуальные проблемы и перспективы развития морских автоматизированных систем в защищенном исполнении // Актуальные проблемы морской энергетики: сб. мат-лов Седьмой Всерос. межотрасл. науч.-техн. конф. СПб, 2018. С. 18-23.
16. **Сидоров В.М., Козлов А.А.** Синтез архитектуры распределенных систем управления сложными организационно-техническими объектами // Информационные технологии. 2021. Т. 27. № 5. С. 289-297.
17. **Субетто А.И.** Квалиметрия сложных технических систем: теория и практика. СПб : Астерион, 2017. 318 с.
18. **Субетто А.И.** Теория практики квалиметрического обеспечения развития морских автоматизированных систем // Актуальные проблемы морской энергетики: сб. материалов Седьмой Всерос. межотрасл. науч.-техн. конф. СПб, 2018. С. 9-17.
19. **Федоров Р.Ю., Николаев Д.С.** Алгоритмы координации в распределенных системах управления морскими техническими комплексами // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2023. № 2(224). С. 34-41.
20. ГОСТ Р 22.1.12-2020. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Единая система управления безопасностью сложных технических объектов. Общие требования. Введ. 2020-12-01. М.: Стандартинформ, 2020. 32 с.
21. ГОСТ Р 57749-2017. Комплексная стандартизация. Системы менеджмента качества. Руководство по качеству при проектировании сложных технических систем. Введ. 2018-01-01. М.: Стандартинформ, 2017. 45 с.
22. РД 025.010-2021. Методические указания по оценке качества и надежности распределенных систем управления организационно-техническими системами военного назначения. М.: Минобороны России, 2021. 78 с.