

**Отчет по проекту РНФ №20–79–10325 «Разработка принципов
и подходов к адаптивному управлению автономными
мобильными киберфизическими системами в условиях
изменяющегося окружения» за 2022–2023 гг**

1. Сведения о фактическом выполнении плана работы в отчетный период

В ходе заключительного этапа выполнения работ над проектом научным коллективом была успешно разработана методика тестирования и критерии оценки выполнения сценариев апробации мобильной кибер-физической системы, предназначенной для решения прикладных задач в условиях динамического окружения. К числу указанных сценариев апробации относятся:

1. Развертывание узлов КФС для обеспечения связи с группами пользователей;
2. Доставка грузов и оборудования к месту дислокации пользователей;
3. Быстрое реагирование для оказания медпомощи;
4. Мониторинг состояния окружения и инфраструктуры (детектирование людей в неположенных местах, детектирование несанкционированной деятельности);
5. Поиск и сбор целевых объектов с учетом грузоподъемности роботизированных агентов;
6. Замена неисправных модулей робототехнических средств, входящих в состав КФС.

Представленные сценарии позволяют в полной мере апробировать широкий набор прототипов мобильных КФС, предназначенных для решения прикладных задач в условиях динамического окружения, выполняемых посредством согласованного взаимодействия групп агентов, представленных гетерогенными РС.

Оценка эффективности КФС при решении прикладных задач, отраженных в представленных выше сценариях, может производиться исходя из доли успешно выполненных сценариев в условиях различных смоделированных динамических сцен. При этом в качестве варьируемых параметров могут выступать:

1. Параметры симуляции (рельеф, размер территории, специфика местности, число создающих препятствие для функционирования динамических объектов);
2. Спецификация системы (число роботизированных агентов различного типа) – в данном случае следует рассматривать исключительно вариации системы, выполняющие минимальные требования к поддержанию отказоустойчивости (см. ниже);

В свою очередь, оценка уровня отказоустойчивости системы при решении прикладных задач, отраженных в представленных выше сценариях, может производиться исходя из:

1. Доли успешно выполненных сценариев в условиях возникновения внешних воздействий и неисправностей в рамках различных смоделированных динамических сцен;
2. Доли случаев успешного перераспределения инфраструктурных ролей с учетом изменения функциональной полноты агентов КФС.

При этом в качестве варьируемых параметров могут выступать:

1. Параметры симуляции (рельеф, размер территории, специфика местности, число вредоносных динамических объектов);
2. Спецификация системы (число роботизированных агентов различного типа) – в данном случае следует рассматривать исключительно вариации системы, выполняющие минимальные требования к поддержанию отказоустойчивости;
3. Тип внешнего воздействия / неисправности. Следует рассматривать прикладные сценарии внешних воздействий, которые приводят: к нарушению отдельных выходных функций отдельных агентов КФС (либо напрямую постулировать соответствующие нарушения) – функциональная плоскость; к утрате теми или иными агентами КФС способности исполнять определенные инфраструктурные роли, принятые ими (предназначенные им) в рамках текущей конфигурации системы – инфраструктурная плоскость.

Результирующая оценка эффективности и отказоустойчивости системы должна производиться путем взвешенного сопоставления результатов исполнения прикладных сценариев с учетом способности КФС к самовосстановлению и реконфигурации в условиях нарушения работы модулей отдельных агентов, выхода из строя отдельных агентов, нарушения инфраструктурной целостности системы и тд. Конечный перечень инфраструктурных ролей определен в соответствии с представленным ранее (см. раздел «Подход к адаптивному управлению инфраструктурой КФС, сформированной на базе множества гетерогенных РС») подходом к адаптивному управлению инфраструктурой КФС, сформированной на базе множества гетерогенных РС, ориентированным на обеспечение отказоустойчивости системы в изменяющейся среде, а также в случае утраты работоспособности отдельными РС. Согласно предложенному решению следует выделить следующий список ключевых инфраструктурных ролей в КФС: хранение данных (namenode, datanode); передача данных (transmission role) – с различными подтипами в зависимости от типа, скорости и дальности связи; обработка данных (processing role); сбор данных, анализ окружения (sensing role) – также включает ряд подтипов в зависимости от спецификации сенсорного оборудования; оперирование окружением (manipulation / actuator role); управление (управление распределением инфраструктурных ролей, управление распределением прикладных задач внутри системы).

Таким образом, предлагаемая методика тестирования разработанного прототипа мобильной КФС может быть разделена на несколько ключевых этапов:

1. Первичное функциональное тестирование КФС на примере базовых сценариев, исполняемых в независимом режиме;

2. Первичное тестирование отказоустойчивости КФС для заданных типов внешних воздействий, возникающих независимо в процессе исполнения базовых сценариев;

Рассмотрим каждый из представленных выше этапов подробнее. На первом этапе производится независимое тестирование базовых сценариев КФС в различных условиях моделируемой среды с варьированием спецификации КФС, а также ряда управляемых параметров моделирования. К управляемым параметрам тестирования в первую очередь относятся характеристики моделируемого окружения. С данной целью осуществляется генерация набора сцен A , каждый объект которого a_i может быть описан следующей группой параметров:

Спецификатор местности q_i – данный параметр задает рельеф местности для генерируемой сцены, значение параметра выбирается из конечного набора предварительно подготовленных моделей территории, каждая из которых может быть определена как облако точек трехмерного пространства заданного масштаба;

Размер моделируемой сцены – данный параметр определяет конечную площадь рабочей области КФС и специфицируется на основе спецификатора местности q_i , как произвольный сектор на соответствующей модели местности с заданной площадью s .

Спецификатор динамических препятствий – данный параметр определяет набор динамических препятствий o_i , подлежащих внесению на моделируемую сцену. Предложенная методика, предполагает предварительную генерацию конечного множества O наборов динамических препятствий различного размера, при этом для каждого отдельно взятого динамического объекта O_{ij} должны быть определены не только его габариты, но и алгоритм движения, в соответствии с которым соответствующее препятствие будет осуществлять перемещение в моделируемой среде.

К следующей группе управляемых параметров тестирования следует отнести спецификацию КФС. В качестве основных требований к соответствующим спецификациям следует выделить требования в функциональной и инфраструктурной полноте тестируемых спецификаций. При этом следует отметить, что функциональная полнота в рамках данного этапа тестирования является сценарно-зависимой характеристикой поскольку в зависимости от апробируемого сценария, требуется различное базовое функциональное наполнение КФС. В то же время набор инфраструктурных ролей, распределяемый между агентами КФС, остается неизменным и не зависит от тестируемого сценария. Принимая во внимание, что функциональная полнота и распределение полного набора инфраструктурных ролей могут быть успешно реализованы на различных наборах роботизированных агентов, каждая спецификация КФС, подлежащая тестированию в рамках некоторого базового сценария k , может быть описана следующим набором параметров:

Набор роботизированных агентов наземного типа L_i . Каждый агент L_{ij} в заданном наборе характеризуется группой входящих в его состав программно-аппаратных модулей, реализующих некоторый набор выходных функций $L_{f_{ij}}$.

Набор роботизированных агентов воздушного типа UAV_i . Каждый агент UAV_{ij} в заданном наборе характеризуется группой входящих в его состав программно-аппаратных модулей, реализующих некоторый набор выходных функций $UAV_{ij}f_{ij}$.

В общем случае, к выходным функциям роботизированного агента можно отнести: функции мобильности, функции связи и передачи данных, функции анализа окружения, функции манипулирования объектами окружения, функции хранения и обработки данных, функции управления и принятия решений, а также специальные прикладные функции. Таким образом, набор выходных функций некоторого роботизированного агента определяет не только набор доступных для реализации с его помощью задач в рамках исполнения прикладных миссий и сценариев, но и доступные для него инфраструктурные роли в рамках обеспечения внутренней работоспособности КФС. Таким образом, спецификации КФС, пригодные для апробации базовых сценариев, согласно предлагаемой методике, должны соответствовать заданному набору ограничений. Предполагая, что реализация некоторого сценария k требует от КФС наличия некоторого набора выходных функций f_k , в совокупности с требованием к инфраструктурной полноте КФС, соответствующие ограничения на спецификацию КФС могут быть определены следующим образом:

Ограничение на достаточность выходных функций КФС:

$$f_k \subset \left(\bigcup_{j=1}^J Lf_{ij} \cup \bigcup_{j=1}^J UAV_{ij} \right); \quad (5.1)$$

Требование к инфраструктурной полноте КФС:

$$I_{base} \subset I \left(\bigcup_{j=1}^J Lf_{ij} \cup \bigcup_{j=1}^J UAV_{ij} \right) \quad (5.2)$$

где I_{base} – минимальный набор инфраструктурных ролей, распределенных между агентами КФС, необходимый для обеспечения внутренней работоспособности системы; $I()$ – представляет собой отображение из множества выходных функций агентов КФС во множество инфраструктурных ролей КФС.

Следующий группой управляемых параметров тестирования на данном этапе является исходное состояние и структура размещения агентов КФС на моделируемой сцене. В данном случае для каждого из задействованных агентов необходимо определить следующий набор параметров:

Стартовое положение и направление движения агента – координаты агента в трехмерном пространстве моделируемой сцены, а также направление, скорость и текущий маршрут движения агента в момент инициализации симуляции;

Начальное состояние агента – включает в себя следующий набор характеристик в отношении каждого наземного L_i и воздушного UAV_i агента КФС: уровень заряда АКБ, целостность программно-аппаратных модулей, отображаемая в фактический набор выходных функций агента, наличие, а также массогабаритные характеристики транспортируемых грузов;

Текущий перечень задач КФС – общий набор текущих задач, поставленных перед КФС, ранжированный по уровням приоритета и транслированный в приоритезированные списки задач на уровне каждого отдельно взятого агента КФС.

В качестве заключительной группы управляемых параметров тестирования на данном этапе можно выделить текущее состояние и местоположение группы пользователей на моделируемой сцене. Статус соответствующей группы можно отразить с использованием следующего набора параметров:

Фактическое положение и направление движения группы – фактические координаты группы пользователей в трехмерном пространстве моделируемой сцены, а также направление, скорость и текущий маршрут движения участников в момент инициализации симуляции (при необходимости независимо по каждому из членов группы пользователей);

Актуальные данные КФС в отношении группы пользователей – текущие данные в отношении местоположения группы пользователей, а также направления, средней скорости и предполагаемого маршрута движения участников в момент инициализации симуляции (при необходимости независимо по каждому из членов группы пользователей);

Указанные наборы параметров необходимы в том числе для реализации достоверного отражения неполноты данных агентов КФС в отношении актуального статуса группы пользователей в процессе исполнения КФС возложенных на нее задач.

В рамках предложенной методики на первом этапе не осуществляется оценка отказоустойчивости системы к возникновению внешних воздействий со стороны окружения, таким образом, в рамках соответствующих модельных экспериментов не предполагается генерация внешних воздействий, приводящих к нарушению функционирования каких-либо агентов КФС. Таким образом, на первом этапе тестирования выполняется серия независимых экспериментов, посвященных апробации тестовых сценариев, как для случая различных спецификаций КФС, так и в отличающихся условиях моделируемой среды.

В процессе моделирования осуществляется оценка времени исполнения миссии, а также обеспечивается протоколирование успешности реализации рассматриваемого сценария. С целью формирования репрезентативного набора экспериментальных данных для последующего анализа, разработанная методика предполагает апробацию каждого из рассматриваемых сценариев с каждым из сформированных наборов управляемых параметров, где выполняются условия (5.1) и (5.2). На основе полученных выходных данных по результатам проведенной серии экспериментов выполняется анализ следующих зависимостей и показателей:

1. Средняя доля успешно выполненных миссий в разрезе выбранных базовых сценариев;
2. Зависимость доли успешно выполненных миссий от: класса рельефа местности, размера моделируемой сцены, числа динамических препятствий, уровня избыточности функционального наполнения спецификации КФС, среднего уровня заряда агентов КФС, уровня соответствия фактических и системных данных КФС в

отношении местоположения группы пользователей – как совокупно по всем базовым сценариям, так и по каждому в отдельности;

3. Зависимость времени исполнения миссии (для успешно выполненных миссий) от: класса рельефа местности, размера моделируемой сцены, числа динамических препятствий, уровня избыточности функционального наполнения спецификации КФС, среднего уровня заряда агентов КФС, уровня соответствия фактических и системных данных КФС в отношении местоположения группы пользователей – как совокупно по всем базовым сценариям, так и по каждому в отдельности;

Отдельно на основе полученных выходных данных также осуществляется поиск спецификаций КФС, продемонстрировавших: наиболее высокую долю успешно выполненных миссий, а также минимальное среднее время исполнения миссий при наиболее низком уровне избыточности функционального наполнения спецификации КФС – как совокупно по всем базовым сценариям, так и по каждому в отдельности. Согласно предложенной методике, заключительный аналитический блок первого этапа потенциально позволит идентифицировать наиболее перспективные базовые спецификации КФС для выполнения тех или иных прикладных задач (в соответствии с предложенными базовыми сценариями).

Второй этап предложенной методики посвящен первичному тестированию отказоустойчивости системы для заданных типов внешних воздействий, возникающих независимо в процессе исполнения базовых сценариев. На данном этапе также производится независимое тестирование базовых сценариев КФС в различных условиях моделируемой среды с варьированием ряда управляемых параметров, включая начальную спецификацию системы. По аналогии с первым этапом, такие характеристики моделируемого окружения, как спецификатор местности, размер моделируемой сцены и спецификатор динамических препятствий также входят в число управляемых параметров.

В рамках второго этапа каждая спецификация КФС, подлежащая тестированию в рамках некоторого базового сценария k , может быть описана набором параметров и ограничений, в полной мере тождественном набору, представленному в рамках первого этапа. Аналогичным образом могут быть описаны исходное состояние и структура размещения агентов КФС, а также текущее состояние и местоположение группы пользователей на моделируемой сцене.

В то же время на данном этапе методики добавляется дополнительный набор управляемых параметров, характеризующий возникающие внешние деструктивные воздействия в процессе функционирования системы. Каждое из указанных деструктивных воздействий может быть описано с использованием следующего набора параметров:

Агент с воздействием – данный параметр отражает тип и порядковый идентификатор роботизированного агента, которые подвергается соответствующему воздействию. Определяет набор L_i или UAV_i , а также индекс j соответствующего РС в данном наборе;

Степень воздействия – отражает набор выходных функций агента $f_d \in f_{ij}$, которые подвергаются деструктивному воздействию и далее становятся недоступными для данного агента.

Время воздействия – характеризует момент возникновения деструктивного воздействия t_d в соответствии с временной шкалой моделируемой среды.

Возникновение деструктивных воздействий в процессе сценарного моделирования предполагает динамическое переоценку оставшихся ресурсов КФС с целью проверки соблюдения условий (5.1) и (5.2) в отношении обновленной спецификации системы. В случае достаточности ресурсов (условия (5.1) и (5.2) – выполняются) управляющие модули КФС должны осуществить перераспределение инфраструктурных ролей и переназначение прикладных задач между прочими агентами КФС. В случае несоблюдения (5.1) – КФС протоколирует отказ от миссии в связи с недостаточностью ресурсов, однако сохраняет свою структурную целостность и способность к выполнению менее ресурсоемких задач, в случае несоблюдения (5.2) – КФС оказывается не в состоянии восстановить инфраструктурную полноту на базе выходных функций оставшихся агентов, что приводит к аварийному прерыванию деятельности системы.

Таким образом, второй этап тестирования, согласно предложенной методике, направлен на проведение серии независимых экспериментов, посвященных тестированию отказоустойчивости различных спецификаций мобильной КФС к деструктивным воздействиям при апробации тестовых сценариев в отличающихся условиях моделируемой среды. По аналогии с предыдущим этапом в процессе моделирования осуществляется оценка времени исполнения миссии, а также обеспечивается протоколирование успешности реализации рассматриваемого сценария, дополнительно отслеживаются факты успешного перераспределения инфраструктурных ролей и ведется протоколирование случаев отказа от миссии, а также аварийного завершения работы КФС. По результатам проведенной серии экспериментов на основе полученных выходных данных выполняется анализ следующих зависимостей и показателей:

1. Результирующая доля успешного перераспределения инфраструктурных ролей в ответ на возникновение внешних деструктивных воздействий;
2. Средняя доля успешно выполненных миссий, случаев отказа от миссий, а также случаев аварийного завершения работы КФС в разрезе выбранных базовых сценариев;
3. Зависимость доли успешного перераспределения инфраструктурных ролей от: числа деструктивных воздействий, числа агентов, подвергнутых деструктивным воздействиям, класса рельефа местности, размера моделируемой сцены, числа динамических препятствий, уровня избыточности функционального наполнения спецификации КФС, среднего уровня заряда агентов системы – как совокупно по всем базовым сценариям, так и по каждому в отдельности;
4. Зависимость доли случаев отказа от миссии и случаев аварийного завершения работы КФС от: числа деструктивных воздействий, числа агентов, подвергнутых деструктивным воздействиям, класса рельефа местности, размера моделируемой сцены, числа динамических препятствий, уровня избыточности функционального наполнения спецификации КФС, среднего уровня заряда агентов системы – как совокупно по всем базовым сценариям, так и по каждому в отдельности;
5. Зависимость времени исполнения миссии (для успешно выполненных миссий) от: числа деструктивных воздействий, числа агентов, подвергнутых деструктивным

воздействиям, числа случаев перераспределения инфраструктурных ролей в процессе исполнения миссии – как совокупно по всем базовым сценариям, так и по каждому в отдельности;

Отдельно на основе полученных выходных данных также осуществляется поиск спецификаций КФС, продемонстрировавших: наиболее высокую долю успешно выполненных миссий при наиболее низком уровне избыточности функционального наполнения спецификации КФС и наибольшем объеме деструктивных воздействий – как совокупно по всем базовым сценариям, так и по каждому в отдельности. Согласно предложенной методике, выявление подобных спецификаций КФС позволит идентифицировать наиболее перспективные варианты мобильной системы такого типа с точки зрения уровня отказоустойчивости соответствующих решений при выполнении тех или иных прикладных задач.

Далее в соответствии с разработанной методикой, научным коллективом было проведено комплексное экспериментальное тестирование функциональных возможностей разработанного прототипа мобильной КФС при решении прикладных задач в условиях динамического окружения.

Перед началом тестирования прототипа КФС в моделируемой среде приведем общее описание типов роботизированных агентов, задействованных в качестве компонентов мобильной КФС в рамках экспериментов.

Наземный РС исполнительного типа (РС тип 1). Данный роботизированный агент представляет собой наземное РС колесного типа среднего размера и характеризуется повышенными характеристиками проходимости в условиях сложного рельефа, а также сравнительно высокими объемом АКБ. Данное РС способно к транспортировке и манипуляции объектами полезной нагрузки, для чего оснащено транспортировочным лотком и много-осевым манипулятором с захватным механизмом. Данное РС обладает базовым набором навигационного и сенсорного оборудования, включая GPS-передатчик, камеры видимого спектра, а также лазерный дальномер, необходимые для навигации РС и обеспечения его мобильности в условиях динамической среды. Данный роботизированный агент снабжен двумя типами передатчиков: радио-модулем, характеризующимся значительной площадью покрытия и малой пропускной способностью, предназначенный, преимущественно для приема и передачи управляющих сигналов, а также данных телеметрии; wi-fi модулем с высокой пропускной способностью, предназначенным для передачи крупных блоков мультимедийных и сложноструктурированных данных на малой дистанции до нескольких десятков метров. Данное РС не обладает значительными физическими хранилищами данных или вычислительными ресурсами и в рамках мобильной КФС рассматривается в качестве стандартного наземного агента исполнительного типа.

Наземный РС управляющего типа (РС тип 2). Данное РС является роботизированным агентом колесного типа, однако не обладает высокой мобильностью или же значительными характеристиками проходимости, при этом также имеет высокий объем АКБ. Данный агент не ориентирован на эффективное исполнение задач по транспортировке грузов, однако обладает отсеком хранения значительного объема, предназначенным для временного размещения и хранения наборов грузов, а также запасных комплектующих

других РС. Вместе с тем данный агент характеризуется продвинутыми механизмами для манипуляции объектами хранения, а именно, имеет бортовой много-осевой манипулятор с захватным механизмом, а также специализированный приводной механизм, предназначенный для замены АКБ и иных съемных узлов у прочих агентов КФС. Кроме того, данное РС оборудовано сервисной площадкой для воздушных агентов системы (посадочная площадка БПЛА). Данное РС оснащено базовым набором навигационного оборудования, включая GPS-передатчик, камеры видимого спектра, а также лазерный дальномер, необходимые для навигации РС на местности. При этом данный агент дополнительно оборудован широким перечнем специализированных сенсорных устройств (датчики давления, приближения, ИК-сенсоры и т.д.), необходимых для исполнения задач по обслуживанию других роботизированных агентов. По аналогии с наземным РС исполнительного типа, данный РС снабжен двумя типами передатчиков: радио-модулем, а также модулем связи дальнего действия (до 3 км) с высокой пропускной способностью. Данный агент имеет значительные мощности по агрегации, обработке и хранению данных на уровне системных кластеров и даже всей КФС в целом. Таким образом, данное наземное РС способно не только к реализации сервисных функций в отношении прочих агентов мобильной КФС, но и в соответствии с терминологией, представленной ранее в подходе к адаптивному управлению инфраструктурой КФС, способен в полной мере реализовывать функционал мобильной роботизированной станции хранения и обработки данных (МРСХОД).

Воздушный РС комбинированного типа (РС тип 3). Данный агент представляет собой БПЛА типа VTOL и отличается повышенными характеристиками мобильности, а также способностью к исполнению длительных полетных миссий продолжительностью до 2-х часов. Данное РС не обладает бортовыми отсеками для транспортировки и хранения грузов, а также органами манипуляции полезной нагрузкой и предназначен, главным образом, для исполнения миссий аэромониторинга крупных участков местности, площадью до 1000 км². Данное РС оснащено специализированным набором навигационного и сенсорного оборудования, включающим GPS-передатчик, лидар и камеры видимого спектра повышенного разрешения. Указанный набор оборудования ориентирован на исполнение миссий аэромониторинга на больших высотах в сравнении с БПЛА мультироторного типа. Данный агент снабжен набором модулей связи и передачи данных следующих типов: радио-модулем, характеризующимся значительной площадью покрытия и малой пропускной способностью, предназначенным в первую очередь для приема и передачи управляющих сигналов, а также данных телеметрии; модулем связи дальнего действия с высокой пропускной способностью, предназначенным для передачи мультимедийных и сложноструктурированных данных на дистанции до 3 км. Данное воздушное РС обладает ограниченными физическими хранилищами данных и сравнительно малыми вычислительными ресурсами, а потому в рамках мобильной КФС рассматривается преимущественно в качестве стандартного воздушного агента мониторингового типа.

Воздушный РС мультироторного типа (РС тип 4). Данное РС является БПЛА мультироторного типа и характеризуется повышенным уровнем устойчивости движения в условиях сложных погодных условий, а также значительным резервом АКБ, позволяющим осуществлять непрерывные полетные миссии продолжительностью до 30 минут. Данный роботизированный агент обладает захватным механизмом и пригоден к транспортировке

грузов массой до 12 кг, устройство не обладает способностью к манипуляции полезной нагрузкой и предполагает размещение грузов на борту средствами наземных РС. Данное РС оснащено расширенным набором навигационного и сенсорного оборудования, включая GPS-передатчик, лидар, камеры видимого спектра, при необходимости в секции размещения полезной нагрузки могут быть дополнительно установлены различные мультиспектральные сенсоры. Указанный набор оборудования обеспечивает широкие возможности данного РС в области мониторинга, а также позволяет поддерживать высокий уровень мобильности агента в условиях динамической среды. Данный БпЛА снабжен двумя типами передатчиков: радио-модулем, характеризуемым значительной площадью покрытия и малой пропускной способностью, предназначенный в первую очередь для приема и передачи управляющих сигналов, а также данных телеметрии; модулем связи дальнего действия с высокой пропускной способностью, предназначенным для передачи мультимедийных и сложноструктурированных данных на дистанции до 3 км. Данный агент имеет значительные мощности по агрегации и хранению данных на уровне удаленных системных кластеров. Таким образом, данный мультироторный БпЛА способен реализовывать не только миссии по транспортировке малогабаритных грузов, а также мониторинговые миссии на малых и средних участках местности до (50 км²), но и согласно представленному ранее подходу к адаптивному управлению инфраструктурой КФС, способен выступать в роли беспилотного воздушного хранилища данных (БВХД).

Далее с учетом специфики предложенного прототипа КФС, а также известной группы сценариев, подлежащих тестированию, приведем детализированный перечень выходных функций роботизированных агентов КФС:

- **Функция хранения данных КФС**
 - Хранение системных управляющих команд. Не требуется хранилище большой вместимости, однако должна быть обеспечена высокоскоростная реализация CRUD операций.
 - Хранение мультимедийных и сложноструктурированных данных. Требуется значительный объем хранилища данных у агента, а также низкая стоимость операций внесения и чтения данных.
- **Функция связи и передачи данных КФС**
 - Передача системных данных и управляющих команд. Требуется передатчик большой дальности действия, при этом требований к пропускной способности канала связи остаются весьма низкими.
 - Передача мультимедийных и сложноструктурированных данных. Ключевым требованием является возможность высокоскоростной передачи данных. Эффективная дистанция устойчивой связи определяет потенциал использования агента в роли обеспечения связности КФС на уровне отдельного кластера агентов (малая дистанция связи), на уровне всей системы (значительная дистанция связи).
- **Функция обработки данных КФС.** Основным требованием к реализации данной функции является наличие значительных вычислительных ресурсов у агента, а также способность к параллельной обработке различных потоков данных гетерогенной природы.

- Функция манипулирования объектами окружения КФС. Ключевым требованием является наличие у агентов профильных органов для взаимодействия с объектами окружения и манипулирования ими.
- Функция сбора данных из окружения КФС. Требуется наличие профильного сенсорного оборудования для извлечения различных категорий данных в локальном окружении агентов КФС.
- Функция управления и принятия решений в рамках КФС. Для реализации данной функции роботизированный агент должен обладать достаточными вычислительными ресурсами, а также соответствовать требованиям к реализации функции передачи системных и управляющих команд.
- Функция мобильности агента КФС. Базовая функция роботизированного агента, отражающая его способность к перемещению в рамках динамической среды, ключевыми требованиями для реализации данной функции является наличие механизмов движения у агента, а также необходимых сенсорных и вычислительных компонентов для контроля за процессами движения.

Указанный перечень сформирован на универсальной основе для всех представленных выше типов агентов и включает в себя исключительно функции, несвязанные с поддержанием первичной внутренней работоспособности агента. На следующем шаге приведем характеристику представленных ранее типов роботизированных агентов в разрезе доступных для реализации ими выходных функций (Таблица 1). Для приведения более точной характеристики, степень пригодности агента некоторого типа для реализации той или иной функции будет отражаться согласно порядковой шкале, где 5 – полное соответствие агента для реализации выходной функции; 4 – способность агента к полноценной реализации выходной функции, однако со сниженной эффективностью; 3 – способность агента к частичной реализации функции, неспособность агента к исполнению части второстепенных процедур (фактическое ограничения набора решаемых задач, заложенных в выходную функцию); 2 – базовая неспособность агента к исполнению ряда ключевых процедур, необходимых для реализации функции (режим аварийной реализации функции исключительно в целях сохранения целостности системы, агент переходит в аварийный режим и неспособен предоставлять системе иные реализуемые им функции); 1 – полная неспособность агента к реализации функции даже в аварийном режиме.

Таблица 1. Характеристика роботизированных агентов в разрезе их способности к реализации выходных функций в рамках КФС.

№	Выходная функция КФС	РС тип 1	РС тип 2	РС тип 3	РС тип 4
1	Функция хранения данных КФС				
1.1	Хранение системных управляющих команд	4	5	4	5
1.2	Хранение мультимедийных и сложноструктурированных данных	3	5	3	4
2	Функция связи и передачи данных КФС				
2.1	Передача системных данных и управляющих команд	4	5	4	5

2.2	Передача мультимедийных и сложноструктурированных данных	2	5	3	5
3	Функция обработки данных КФС	2	5	2	4
4	Функция манипулирования объектами окружения КФС	4	5	1	1
5	Функция сбора данных из окружения КФС	3	3	5	5
6	Функция управления и принятия решений в рамках КФС	2	5	2	4
7	Функция мобильности агента КФС				
7.1	Наземная мобильность агента КФС	5	3	1	1
7.2	Воздушная мобильность агента КФС	1	1	5	3

Как можно заметить по результатам отражения характеристик агентов в степень их пригодности к реализации тех или иных выходных функций КФС, каждое из приведенных РС имеет свою собственную специализацию: агенты типа 2 и 4 способны к реализации управляющих функций и функций работы с данными, но в тоже время характеризуются сниженными сенсорными возможностями (агенты типа 2), а также более низкой мобильностью (агенты типа 2 и 4). В то же время агенты типа 1 и 3, обладающие ограниченным потенциалом к реализации функций управления и оперирования данными, имеют при этом наивысший уровень мобильности (наземной и воздушной соответственно).

Теперь после того, как были определены выходные функции, предоставляемые различными типами агентов КФС, можно перейти к инфраструктурному описанию прототипа системы. Как было указано ранее, реализация каких-либо прикладных сценариев посредством некоторой спецификации мобильной КФС возможна только при условии инфраструктурной полноты такой системы. Ранее, в рамках подхода к адаптивному управлению инфраструктурой КФС, сформированной на базе множества гетерогенных РС, были определены ключевые инфраструктурные роли в мобильной КФС, к ним относятся: хранение данных (storage role); передача данных (transmission role); обработка данных (processing role); сбор данных из окружения (sensing role); оперирование окружением (manipulation role); управление распределением инфраструктурных ролей и прикладных задач внутри системы (control role). В общем случае распределение всех указанных выше ролей между роботизированными агентами позволяет достичь инфраструктурной полноты мобильной КФС.

Каждое РС в процессе своего функционирования в рамках системы исполняет одну или же несколько инфраструктурных ролей. При этом сразу несколько агентов могут исполнять идентичные инфраструктурные роли, что наиболее ярко просматривается для таких ролей как «передача данных» и «сбор данных из окружения». В тоже время для исполнения некоторой инфраструктурной роли, компонент системы, которому делегируется данная роль, должен обладать полным набором требуемых выходных функций. В случае мобильной КФС, изначально характеризуемой слабой связностью между компонентами, создание некоторого абстрактного компонента КФС, включающего ряд выходных функций от разных роботизированных агентов, с целью использования такового в качестве акцептора некоторой инфраструктурной роли является недопустимым. Иными словами, в случае мобильной КФС, организованной на базе группы гетерогенных РС, делегирование какой-либо инфраструктурной роли возможно только непосредственно по агентам, и

соответственно такой агент должен обладать всем необходимым набором выходных функций для принятия на себя предложенной роли. Однако, стоит отметить, что при этом выходные функции остаются разделяемыми в случае, если отдельный агент исполняет сразу несколько инфраструктурных ролей. Таким образом, в рамках проекта при тестировании прототипа мобильной КФС, был определен следующий перечень требований к распределению инфраструктурных ролей между агентами КФС с точки зрения наличия у РС определенных выходных функций. Полученный перечень представлен в таблице 2.

Таблица 2. Перечень требований к распределению инфраструктурных ролей между агентами КФС в разрезе выходных функций.

Инфраструктурная роль	Требуемые выходные функции (\geq)									
	1.1	1.2	2.1	2.2	3	4	5	6	7.1	7.2
Хранение данных	4	4	-	4	-	-	-	-	-	-
Передача данных	4	-	5	4	-	-	-	-	3	
Обработка данных	-	3	-	3	4	-	-	-	-	-
Сбор данных из окружения	-	3	-	3	-	-	3	-	4	
Оперирование окружением	-	-	-	-	-	4	3		3	
Управление распределением ролей и задач	4	3	5	3	3	-	-	4	-	-

В представленном выше перечне отражена минимально необходимые значения показателя эффективности реализации тех или иных выходных функций, которым должен соответствовать заданный роботизированный агент, чтобы иметь возможность успешно принять на себя и исполнять каждую из представленных ранее инфраструктурных ролей. В таблице 2 символ (-) означает, что каких-либо требований в разрезе данной выходной функции при распределении рассматриваемой инфраструктурной роли не выдвигается. С учетом ранее представленной информации о характеристиках задействованных РС, можно заключить, что роли хранения данных, передачи данных и управления доступны для РС типа 2 и 4, роль обработчика – также для типов 2 и 4, роль сбора данных – для типов 3 и 4, роль оперирования окружением – для РС типа 1 и 2.

На заключительном шаге непосредственно перед проведением экспериментального тестирования прототипа КФС, в соответствии с предложенной в рамках проекта методикой необходимо определить минимальный набор выходных функций КФС, необходимый для реализации каждого из базовых сценариев, подлежащих тестированию в процессе экспериментов. Ранее коллективом было выделено 6 базовых сценариев прикладного использования мобильной КФС в условиях динамического окружения. Соответствующие требования по каждому из сценариев приведены ниже в таблице 3.

Таблица 3. Перечень выходных функций КФС, необходимых для потенциально успешной реализации сценариев применения мобильной КФС в разрезе базовых сценариев.

Сценарий применения КФС	Требуемые выходные функции (\geq)									
	1.1	1.2	2.1	2.2	3	4	5	6	7.1	7.2

Оперативное развертывание узлов КФС для обеспечения связи с группами пользователей	3	3	5	3	3	3	4	3	4	5
Доставка грузов и оборудования к месту дислокации пользователей	3	-	5	-	-	4	-	4	4	
Оперативное реагирование для оказания медицинской помощи	3	-	5	5	-	4	3	4	5	5
Мониторинг состояния окружения и инфраструктуры	3	3	3	4	4	-	5	3	-	4
Поиск и сбор целевых объектов с учетом грузоподъемности роботизированных агентов	3	3	4	4	4	4	4	3	4	
Замена неисправных модулей РС, входящих в состав КФС	3	-	4	-	-	5	-	3	3	-

В представленной выше таблице 3 зеленым цветом выделены те выходные функции роботизированных агентов, реализация которых на достаточном для потенциального исполнения сценария уровне достигается автоматически при распределении инфраструктурных ролей между РС в процессе развертывания КФС. Красным цветом выделены те выходные функции роботизированных агентов, в отношении степени реализации которых в рамках сценария выдвигаются более жесткие требования, чем при распределении инфраструктурных ролей в процессе развертывания системы. Символ (-) обозначает отсутствие минимальных требований в разрезе данной выходной функции в рамках рассматриваемого сценария. Таким образом, большинство заявленных сценариев изначально требуют выделения дополнительных ресурсов в виде профильных роботизированных агентов для его успешной реализации.

Далее перейдем к тестированию разработанного прототипа мобильной КФС в соответствии с предложенной ранее методикой. На первом этапе эксперимента, согласно данной методике, производится независимое тестирование базовых сценариев КФС в различных условиях моделируемой среды с варьированием спецификации КФС, а также ряда управляемых параметров моделирования.

В рамках подготовки симуляционного набора данных, в первую очередь, были определены характеристики моделируемого окружения КФС. С данной целью был сгенерирован набор из 1000 различных сцен, при этом для каждой сцены были заданы следующие параметры: спецификатор местности – были предварительно подготовлены 10 независимых моделей территории с различным рельефом из которых для каждой сцены конкретный экземпляр опорной модели территории выбирался случайным образом, при определении спецификатора местности также случайным образом выбирался центр будущей сцены (С) как случайная точка в трехмерном пространстве, принадлежащая модели территории; размер моделируемой сцены – характеризует конечную площадь участка местности, принадлежащую сцене, для каждой сцены значение данного параметра определялось случайным образом на основе равномерного распределения в диапазоне значений от 5 до 100 км², при этом конечная форма сцены определялась как круг указанной площади с центром в точке С; спецификатор динамических препятствий – данный параметр

определяет набор динамических препятствий, подлежащих внесению на моделируемую сцену, в данном случае с использованием симуляционной среды на сгенерированную сцену вносилось от 100 до 10000 динамических объектов наземного и воздушного базирования, указанные препятствия случайным образом выбирались из предварительно заготовленного набора в 100 000 объектов, включающего объекты с различными массогабаритными характеристиками и соответствующими базовыми алгоритмами перемещения в среде.

Следующей группой управляемых параметров тестирования являлась спецификация КФС. Спецификация КФС, согласно предложенной методике, а также исходя из данных, представленных в таблице 3, является сценарно-зависимой характеристикой системы. Таким образом, при подготовке наборов тестируемых спецификаций, предварительно для каждого из сценариев были определены минимальные требования к числу роботизированных агентов каждого типа, которые должны быть включены в состав спецификации. Соответствующие данные представлены в таблице 4.

Таблица 4. Минимальные требования к числу роботизированных агентов каждого типа, которые должны быть включены в состав спецификации КФС для исполнения различных сценариев.

Сценарий применения КФС	РС типа 1 (\geq)	РС типа 2 (\geq)	РС типа 3 (\geq)	РС типа 4 (\geq)
Оперативное развертывание узлов КФС для обеспечения связи с группами пользователей	1	1	1	
	1		1	1
Доставка грузов и оборудования к месту дислокации пользователей	1	1		
	1			1
Оперативное реагирование для оказания медицинской помощи	1	1	1	
	1		1	1
Мониторинг состояния окружения и инфраструктуры		1	1	
	1		1	1
		1	1	1
Поиск и сбор целевых объектов с учетом грузоподъемности роботизированных агентов		1	1	
	1			1
Замена неисправных модулей РС, входящих в состав КФС	1	1		
		1	1	
		1		1

В таблице 4 на каждой из приведенных комбинаций РС различного типа достигается как инфраструктурная полнота КФС, так и обеспечивается функциональная достаточность для реализации соответствующего сценария. Таким образом в процессе подготовки наборов тестируемых спецификаций для каждого из сценариев выбиралась одна из минимальных спецификаций или же ее расширение, при этом предельное число агентов каждого типа было ограничено количеством в 10 штук. Всего для реализации сценариев было подготовлено 120 случайных спецификаций, удовлетворяющих представленным выше условиям.

Следующий группой управляемых параметров является исходное состояние и структура размещения агентов КФС на моделируемой сцене. При подготовке симуляционного набора данных для тестирования в разрезе каждого сценария, для каждой

из определенных выше спецификаций КФС было определено по 100 различных комбинаций параметров размещения и начального состояния агентов. При подготовке данных комбинаций случайным образом варьировались значения следующих параметров: координаты стартового положения агентов на сцене, направление и скорость движения агентов в момент инициализации симуляции, а также начальный уровень заряда АКБ агентов.

В качестве заключительной группы управляемых параметров тестирования выступают текущее состояние и местоположение группы пользователей на моделируемой сцене. В процессе подготовки симуляционного набора данных, для каждой из сгенерированных ранее сцен было предложено по 100 независимых наборов значений соответствующих параметров в отношении группы пользователей. К числу данных параметров относятся: фактические координаты группы пользователей в трехмерном пространстве моделируемой сцены, а также направление, скорость и текущий маршрут движения участников группы; текущие данные КФС в отношении местоположения группы пользователей, а также направления, средней скорости и предполагаемого маршрута движения участников в момент инициализации симуляции.

Таким образом, для выполнения первого этапа эксперимента был получен набор данных в отношении управляемых параметров моделирования, содержащий 1,2 млрд уникальных записей. В процессе эксперимента из полученного набора было выбрано 60 000 уникальных записей, данные каждой из которых затем были использованы для инициализации симуляции по исполнению некоторого базового сценария заданной спецификацией прототипа КФС в моделируемой среде с известными параметрами сцены. При этом в процессе выбора экземпляров наборов значений управляемых параметров моделирования (из общего симуляционного набора данных) соблюдалось требование к равномерной выборке записей с точки зрения тестируемого сценария функционирования КФС, соответственно на каждый из сценариев приходилось по уникальных 10 000 симуляций. В процессе моделирования осуществлялась оценка времени исполнения миссии, а также обеспечивалось протоколирование успешности реализации рассматриваемого сценария функционирования КФС.

По результатам проведенной серии модельных экспериментов в качестве отправной точки для дальнейшего анализа была проведена оценка доли успешно реализованных сценариев в зависимости от апробируемого сценария функционирования КФС, полученные результаты представлены ниже на рис. 1.

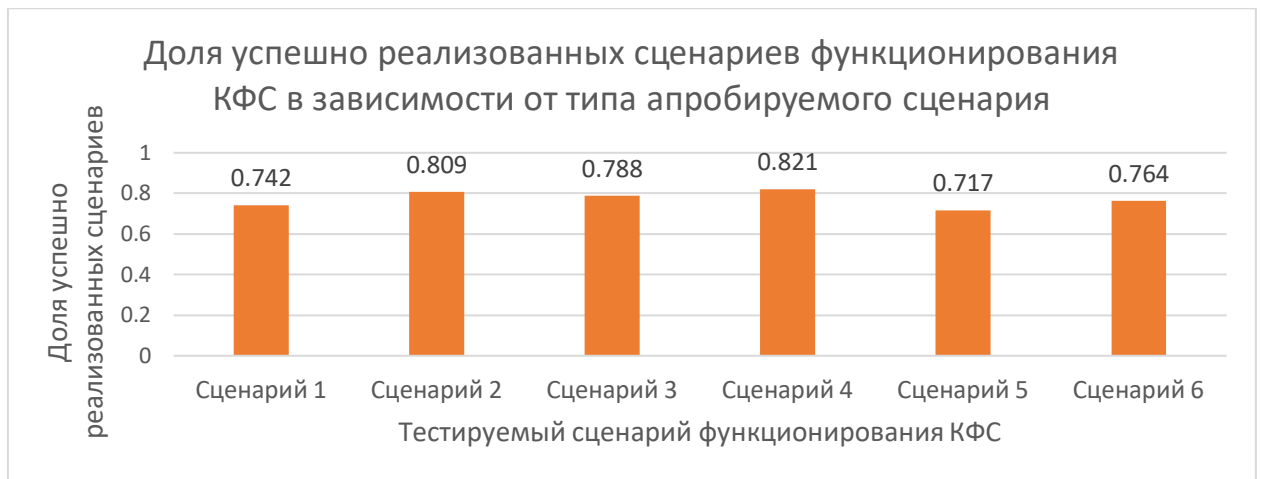


Рисунок 1. Доля успешно реализованных сценариев функционирования КФС в зависимости от типа апробируемого сценария

На основе диаграммы, представленной на рис. 1, можно заключить, что для всех апробированных сценариев разработанный прототип КФС, несмотря на различия в конкретных спецификациях системы и в условиях их функционирования, продемонстрировал удовлетворительное качество реализации сценариев. Усредненная доля успешно завершенных миссий в рамках эксперимента составила 77,4%. При этом доля успешных реализаций в случае сценария оперативного развертывания узлов КФС для обеспечения связи с группами пользователей (сценарий 1) и сценария поиска и сбора целевых объектов с учетом грузоподъемности роботизированных агентов (сценарий 5) оказалась несколько ниже, чем для прочих сценариев. Полученные результаты могут потенциально объясняться как спецификой самих сценариев, так и ограниченными аппаратными возможностями роботизированных агентов: дальность устойчивой связи (сценарий 1), качество детектирования целевых объектов средствами технического зрения РС (сценарий 5).

В целях проведения более глубокого анализа экспериментальных данных был исследован ряд зависимостей на общем наборе результатов по всем проведенным симуляциям. В частности, были исследованы зависимости доли успешно реализованных сценариев функционирования КФС от площади моделируемой сцены, плотности динамических препятствий на сцене, а также от числа задействованных роботизированных агентов в спецификации КФС. В первую очередь, рассмотрим зависимость доли успешно реализованных сценариев от площади моделируемой сцены, представленную на рисунке 2.

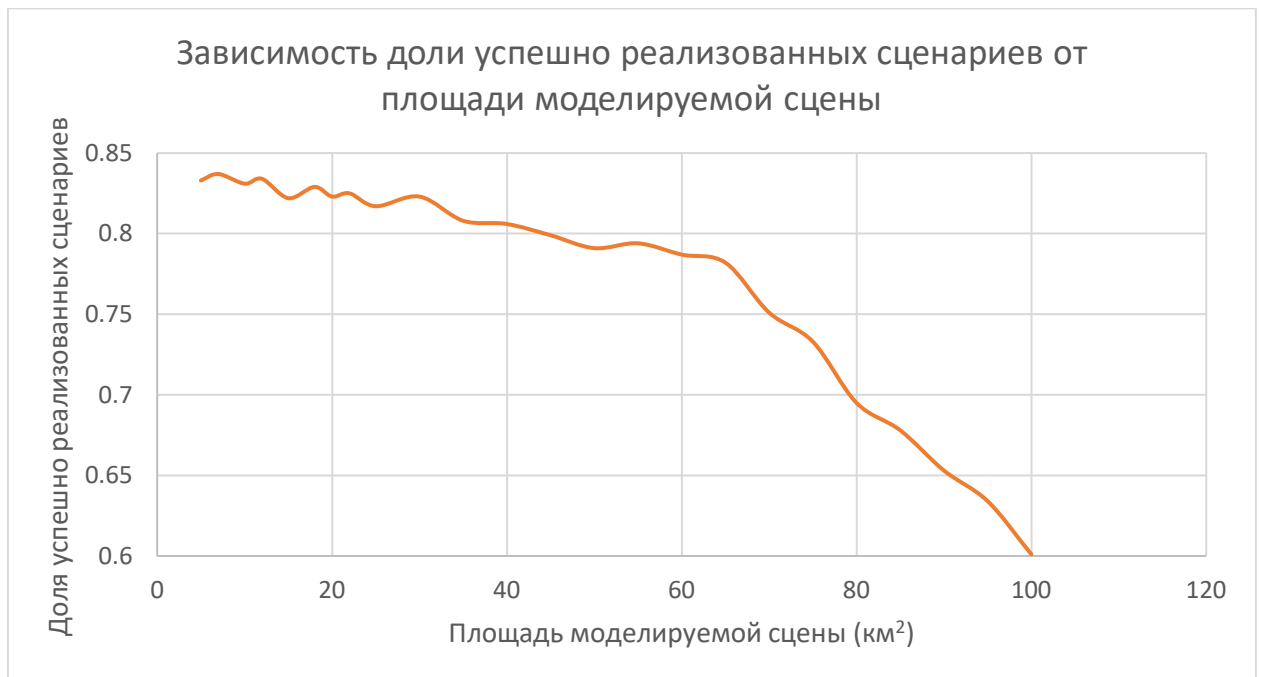


Рисунок 2. График зависимости доли успешно реализованных сценариев функционирования КФС от площади моделируемой сцены

Согласно представленному на рисунке 2 графику, можно сделать вывод, что рассматриваемая зависимость носит убывающий характер, иными словами, с увеличением площади моделируемой сцены доля успешно реализованных сценариев функционирования КФС имеет тенденцию к снижению. При этом полученная зависимость может быть аппроксимирована двумя линейными функциями с различными угловыми коэффициентами. Первая аппроксимирующая прямая просматривается на диапазоне площадей сцены от 5 до 65 км², вторая – на диапазоне от 65 до 100 км². При превышении площади моделируемой сцены за отметку в 65 км², модуль углового коэффициента аппроксимирующей прямой существенно возрастает, что соответствует увеличению темпов снижения доли успешно реализованных сценариев функционирования КФС. В целом убывающий характер полученной зависимости является ожидаемым и напрямую связан с ростом сложности автономного исполнения миссий в условиях крупных территорий, также с ростом площади сцены существенно возрастают внутренние ресурсные затраты КФС на поддержание собственной целостности, что снижает объем выходных функций роботизированных агентов, доступных для применения в целях решения прикладных задач КФС. В свою очередь, резкое увеличение темпов снижения доли успешно реализованных сценариев при превышении площадью моделируемой сцены отметки в 65 км², может объясняться как техническими возможностями роботизированного агента типа 4, чьи мониторинговые и соответственно полетные возможности ограничены эффективной площадью в 50 км², а также эффективной дистанцией модулей связи и передачи данных дальнего действия.

Следующей рассмотрим зависимость доли успешно реализованных сценариев функционирования КФС от плотности динамических препятствий на сцене. Полученная зависимость представлена ниже на рисунке 3.

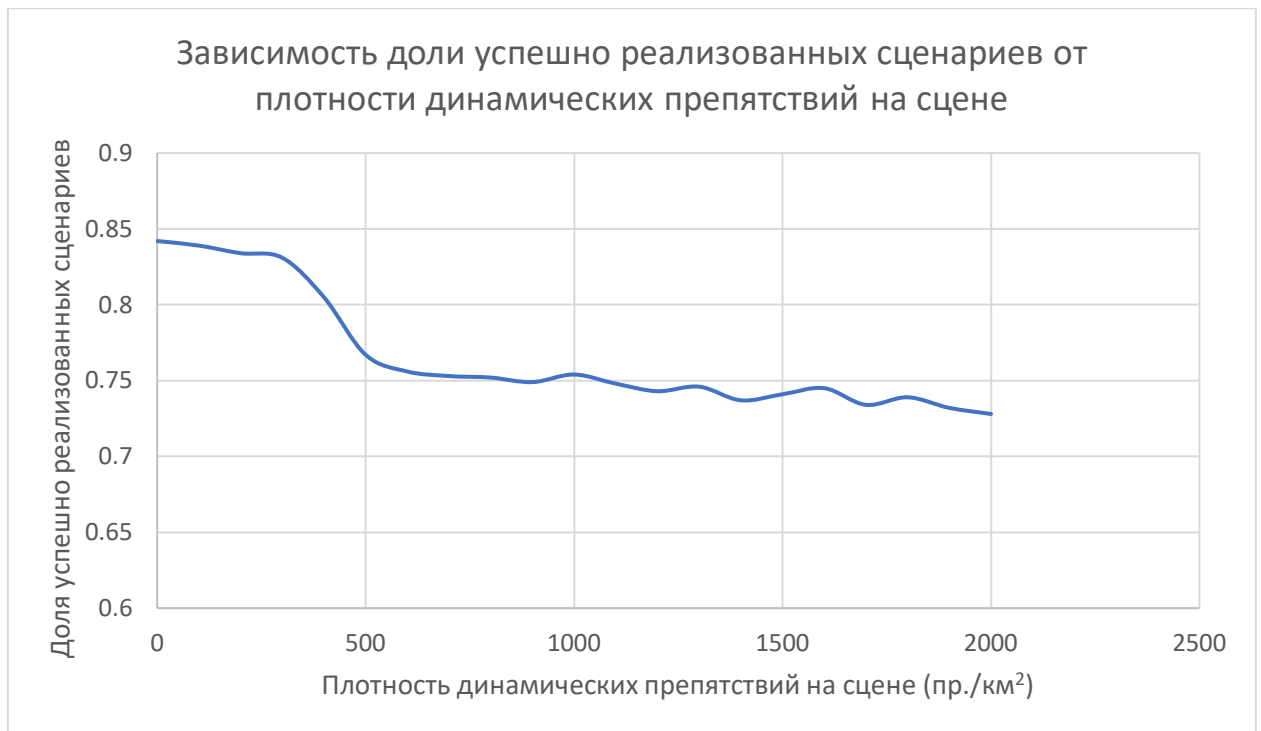


Рисунок 3. График зависимости доли успешно реализованных сценариев функционирования КФС от плотности динамических препятствий на моделируемой сцене

В процессе анализа экспериментальных данных в качестве плотности динамических препятствий рассматривалась величина, определенная как среднее число препятствий на единицу площади моделируемой сцены (1 км²). Согласно графику, представленному на рисунке 3, данная зависимость носит убывающий характер. При этом в целом коэффициент снижения доли успешно реализованных сценариев с ростом плотности препятствий остается стабильным за исключением диапазона плотности препятствий от 300 до 500 (шт./км²). На данном участке графика наблюдается стремительное снижение доли успешных реализаций сценариев функционирования КФС с 8,84 до 0,77. В целом наличие динамических препятствий в зоне действия мобильной КФС негативным образом сказывается на эффективности движения роботизированных агентов, таким образом, общий убывающий характер полученной зависимости не вызывает вопросов, возникновение же участка резкого снижения доли успешно реализованных сценариев может быть объяснено тем, что при превышении плотностью препятствий некоторого предельного значения, алгоритмы управления роботизированными агентами вынужденно переходят в режим активного маневрирования с целью избегания столкновений, данный режим движения является как более ресурсоемким независимо от типа движущегося агента, так и менее эффективным в связи со сложностью генерируемых безколлизийных траекторий движения и соответственно более низкой скоростью перемещения агентов на сцене.

Далее в ходе анализа экспериментальных данных была исследована базовая зависимость доли успешно реализованных сценариев от общего числа задействованных роботизированных агентов в спецификации КФС, соответствующая зависимость представлена на рисунке 4.

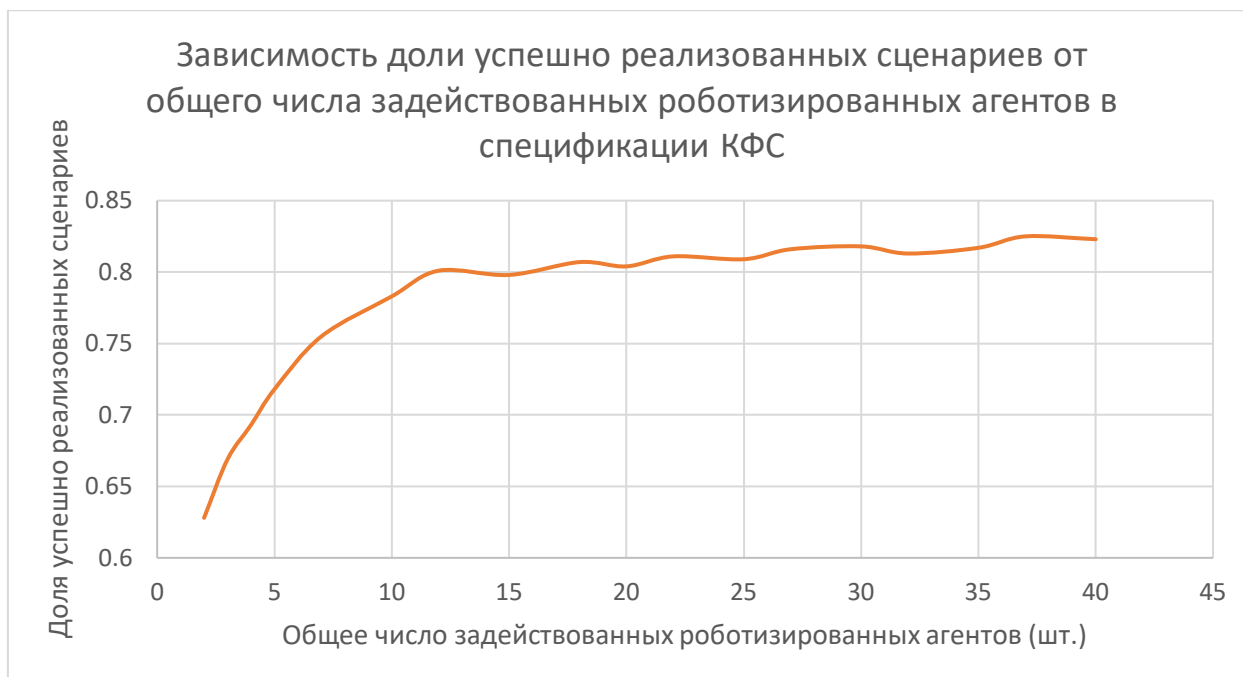


Рисунок 4. График зависимости доли успешно реализованных сценариев функционирования системы от общего числа задействованных роботизированных агентов в спецификации КФС

Согласно полученным данным, указанная зависимость носит устойчивый возрастающий характер: с ростом числа вовлеченных РС наблюдается сопутствующий рост доли успешно реализованных сценариев функционирования КФС. При этом стоит отметить, что эффект от вовлечения дополнительных агентов значительно снижается с ростом исходного числа задействованных РС. В соответствии с представленными на графике усредненными данными, привлечение дополнительных агентов приводит к устойчивому росту доли успешно реализованных сценариев до момента, пока общее число агентов, составляющих спецификацию КФС, является меньшим или равным 12, дальнейший эффект от вовлечения дополнительных агентов становится крайне ограниченным. Полученные результаты могут объясняться тем, что первичный рост числа вовлеченных РС приводит к значительному росту эффективности распределения инфраструктурных ролей в рамках спецификации КФС на 0,17 единиц. Позднее с достижением общего числа задействованных РС в 12 агентов, дальнейшее повышение эффективности деятельности КФС за счет оптимизации распределения инфраструктурных ролей становится невозможным, а последующий рост доли успешно реализованных сценариев объясняется повышением прикладных возможностей КФС в контексте мониторинговых и транспортировочных задач, а также задач по манипуляции объектами окружения.

Дальнейший анализ результатов первого этапа экспериментов был посвящен поиску оптимальных составов спецификаций КФС, для которых обеспечивается наибольшая эффективность реализации базовых сценариев функционирования КФС, заявленных в рамках проекта. Для решения указанной задачи в разрезе каждого из сценариев, апробированные спецификации КФС были ранжированы по доле успешных реализаций соответствующих сценариев. После чего из полученного ранжированного списка спецификаций была выделена 1-я квартиль, после чего на основе соответствующей

выборки были построены гистограммы распределения роботизированных агентов по типам РС, полученные диаграммы для каждого из рассматриваемых сценариев представлены ниже на рисунке 5.

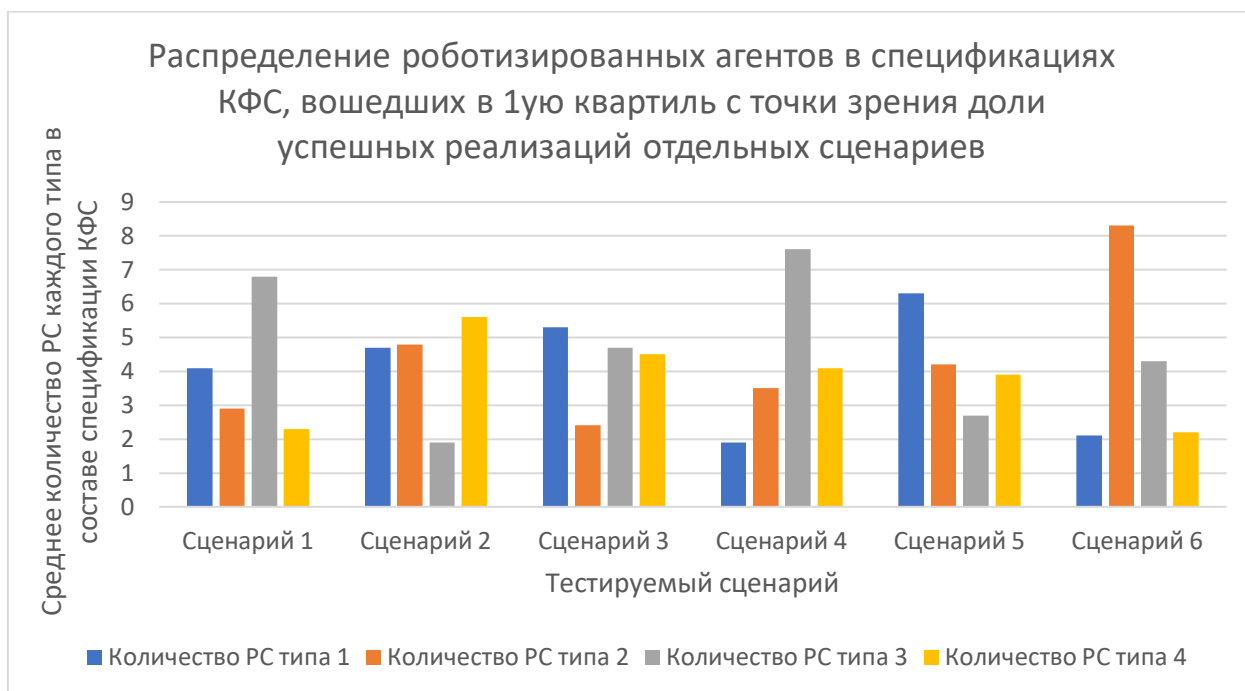


Рисунок 5. Диаграмма распределения роботизированных агентов в спецификациях КФС, вошедших в 1ую четверть с точки зрения доли успешных реализаций отдельных сценариев

На основе полученных результатов можно сделать вывод о значительных структурных отличиях в спецификациях КФС, продемонстрировавших наибольшую эффективность на разных сценариях. Так, в случае сценариев 1 и 4, наибольшую результативность продемонстрировали спецификации с высокой долей РС типа 3 со средним количеством РС в 6,9 и 7,5 соответственно, при этом в обоих случаях доля РС прочих типов оставалась значительно ниже. Подобный результат может объясняться тем, что для соответствующих сценариев критическим фактором является мобильность узлов КФС, а РС типа 3 являются наиболее мобильным типом агентов. В тоже время реализация сценария 1 в ряде случаев требует размещения автономных ретрансляторов сигнала посредством роботизированных агентов, что объясняет сравнительно высокую долю РС типа 1 в рамках данного сценария, поскольку данный тип РС является наиболее мобильным среди типов агентов, способных к размещения данных устройств. В то же время в сравнении со сценарием 1 реализация сценария 4 является более ресурсоемкой задачей, что объясняет большую долю РС типов 2 и 4, обладающих большим объемом вычислительных ресурсов. В случае сценариев 2 и 3, доля 3 типов РС в рамках распределения остается условно эквивалентной (1,9 и 4,8 соответственно), при этом доля оставшегося типа РС – вдвое и более меньшей. В случае сценария 2, малая доля РС типа 3 может быть объяснена ограниченной зависимостью эффективности реализации сценария от качества решения задачи по анализу больших участков местности, на чем и специализируется данный тип РС в первую очередь. В рамках сценария 3 мобильность узлов КФС непосредственно определяет эффективность исполнения сценария, а потому РС типа 2, характеризующихся наиболее низкой мобильностью в сравнении с прочими типами агентов, в данном распределении имеет

крайне ограниченную долю. В свою очередь, сценарий 5 требует как высокой эффективности решения задач по анализу местности, так и задач по оперированию окружением. При этом поскольку скорость исполнения наземных операций значительно ниже скорости реализации миссий мониторинга, в данном случае наблюдается сниженная доля РС типа 3 до 2,9, а также сравнительно высокая доля РС типа 1 имеющая значение 6,1, обладающих наивысшим уровнем наземной мобильности в совокупности со способностью к оперированию окружением. Повышенные требования к вычислительным ресурсам в данном случае могут объяснить относительно высокую долю РС 2 и 4 типов. В случае сценария 6, непосредственную реализацию данного сценария способен обеспечить исключительно РС типа 2 со значением 8,1, оборудованный продвинутыми органами манипулирования, что объясняет их преобладающую долю в соответствующей структуре распределения. Таким образом, на основе представленных выше результатов можно заключить, что распределение агентов по типам РС в составе спецификации системы оказывает критическое влияние на эффективность реализации сценариев, а структура оптимальных спецификаций системы значительно отличается в зависимости от тестируемого сценария.

В заключение первого этапа эксперимента был осуществлен поиск наиболее оптимальных спецификаций КФС, характеризующихся наибольшей долей успешных реализаций для всех апробируемых сценариев при минимальных временных затратах на исполнение последних. Для нивелирования влияния числа задействованных в КФС агентов на результаты поиска, в рамках данного эксперимента было сформировано 120 уникальных спецификаций КФС с идентичным числом вовлеченных РС, равным 17. В рамках эксперимента было повторно проведено 60 000 уникальных симуляций без изменения каких-либо параметров моделирования за исключением параметров спецификации КФС. В процессе эксперимента обеспечивалось протоколирование фактов успешной реализации сценариев, а также отслеживалось время их исполнения.

С целью повышения репрезентативности полученных результатов, в отношении каждого из сценариев (i) была определена спецификация, продемонстрировавшая наиболее высокую долю (r_{oi}) успешной реализации сценария, а также спецификация, характеризующаяся минимальным средним временем (t_{oi}) исполнения данного сценария. После чего, для каждой спецификации КФС (j) ее результативность на некотором сценарии i была определена следующим образом:

$$R_{ji} = \frac{r_{ji}}{r_{oi}}, T_{ji} = \frac{t_{oi}}{t_{ji}},$$

где R_{ji} – оценка результативности j спецификации КФС на i сценарии, T_{ji} – оценка временной эффективности j спецификации КФС на i сценарии.

На основе полученных данных итоговая оценка E_j оптимальности j спецификации КФС на всех апробированных сценариев была определена в соответствии со следующим выражением:

$$E_j = \sqrt{\sum_{i=1}^6 R_{ji}^2 + T_{ji}^2}.$$

Таким образом, на основе экспериментальных данных были сформированы оценки оптимальности для всех 120 протестированных спецификаций КФС, полученные результаты представлены ниже на рисунке 6.

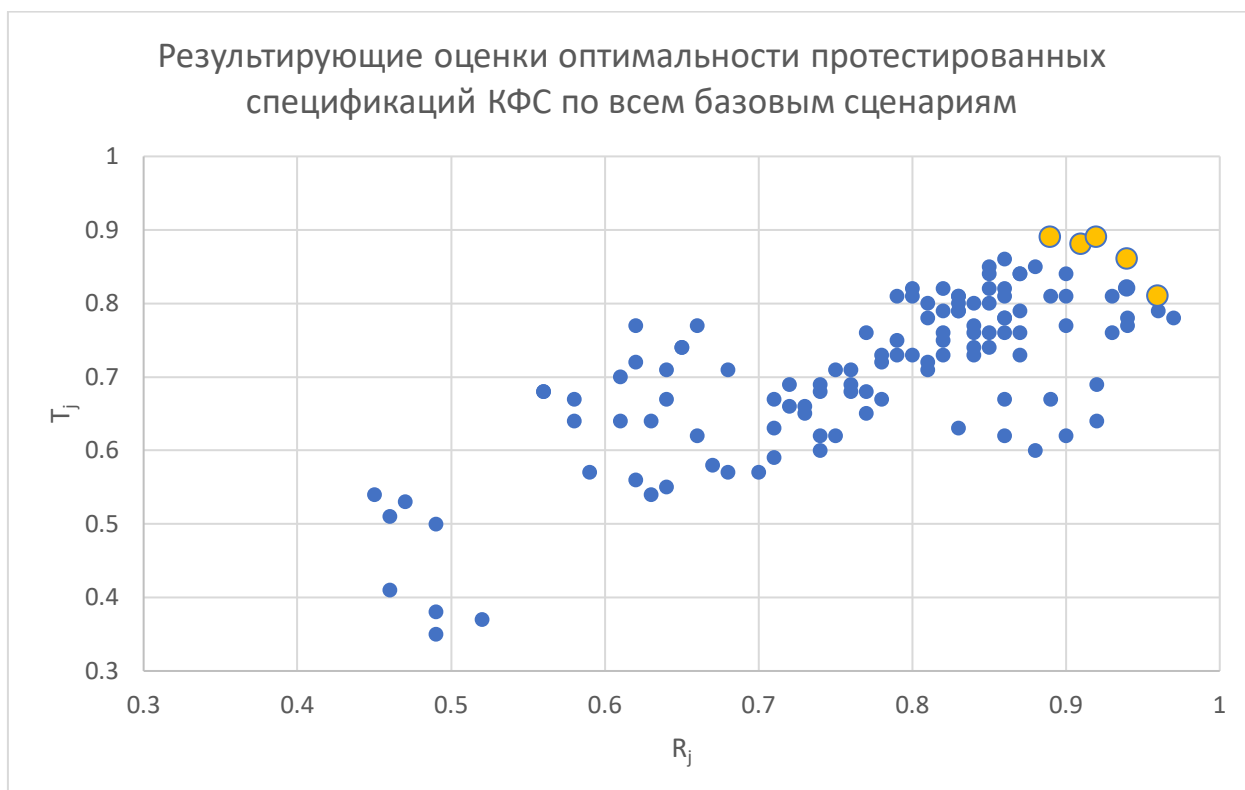


Рисунок 6. Результирующие оценки оптимальности протестированных спецификаций КФС по всем базовым сценариям

Результаты, представленные на рисунке 6, позволяют заключить, что подавляющее большинство спецификаций КФС продемонстрировали приемлемое качество реализации по всем базовым сценариям. При этом на диаграмме наблюдается высокая плотность результатов, полученных для большинства спецификаций КФС. Согласно полученным результатам, доля спецификаций, характеризуемых усредненной долей успешных реализаций базовых сценариев, превосходящей 80%, а также усредненной оценкой временной эффективности, превосходящей 0,8, составила 21,6%. На рисунке 6 оранжевым цветом выделены 5 спецификаций с наибольшими значениями итоговой оценки оптимальности, состав указанных спецификаций представлен в таблице 5.

Таблица 5. Распределение роботизированных агентов для 5 спецификаций, характеризуемых наибольшими полученными значениями итоговой оценки оптимальности.

№	E_j	R_j	T_j	РС типа 1	РС типа 2	РС типа 3	РС типа 4
1	1,280	0,921	0,890	4	4	3	6
2	1,274	0,943	0,858	3	4	5	5
3	1,265	0,907	0,884	4	3	4	6
4	1,258	0,890	0,889	4	4	4	5
5	1,256	0,959	0,810	3	5	4	5

Как можно заметить, все представленные в таблице 5 спецификации КФС имеют схожий состав с точки зрения включения различных типов роботизированных агентов. В целом по всем спецификациям наблюдается тенденция к равномерному распределению агентов по типам, с несколько превосходящей долей у РС типа 4. Все приведенные в таблице спецификации КФС продемонстрировали высочайший уровень успешной реализации по всем типам сценариев, с сохранением высокой временной эффективности исполнения соответствующих задач.

Таким образом, в рамках первого этапа тестирования была проведена оценка эффективности множества спецификаций разработанного прототипа КФС в моделируемой среде по результатам которой были идентифицированы как оптимальные варианты распределения роботизированных агентов при исполнении тех или иных базовых сценариев, а также определены конкретные спецификации КФС, продемонстрировавшие высокую эффективность функционирования для всех апробированных базовых сценариев.

Далее, в рамках второго этапа эксперимента, в соответствии с предложенной в ходе реализации проекта методикой, перейдем к тестированию отказоустойчивости прототипа КФС к заданным типам внешних воздействий, возникающих независимо в процессе исполнения сценариев функционирования КФС. На данном этапе, полученный ранее симуляционный набор данных должен быть расширен, в частности, в число управляемых параметров необходимо включить набор параметров, характеризующий возникающие внешние деструктивные воздействия в процессе функционирования системы. С данной целью к каждой записи в исходном симуляционном наборе данных должен быть добавлен набор кортежей, включающих следующие параметры: агент на которого происходит воздействие – отражает тип и порядковый идентификатор роботизированного агента, подвергающегося деструктивному воздействию; степень воздействия – набор выходных функций агента, которые становятся недоступны агенту по результатам внешнего воздействия; время воздействия – момент возникновения деструктивного воздействия в соответствии с временной шкалой моделируемой среды. Таким образом, при расширении симуляционного набора данных к каждой входящей в его состав записи был добавлен набор, включающий от 1 до 100 кортежей, каждый из которых содержит параметры некоторого деструктивного воздействия. Параметры деструктивных воздействий выбирались из предварительно заготовленного набора, включающего 100 000 соответствующих записей. В ходе эксперимента, по аналогии с первым этапом, из полученного набора было выбрано 60 000 уникальных записей, которые затем были использованы для инициализации симуляции по исполнению базовых сценариев функционирования КФС. В процессе моделирования также осуществлялась оценка времени исполнения миссии, а также обеспечивалось протоколирование успешности реализации сценариев функционирования КФС.

Анализ полученных результатов в дальнейшем проводился в полной аналогии с первым этапом эксперимента. В первую очередь, была получена доли успешно реализованных сценариев в зависимости от апробируемого сценария функционирования КФС, полученные результаты представлены ниже на рис. 7.

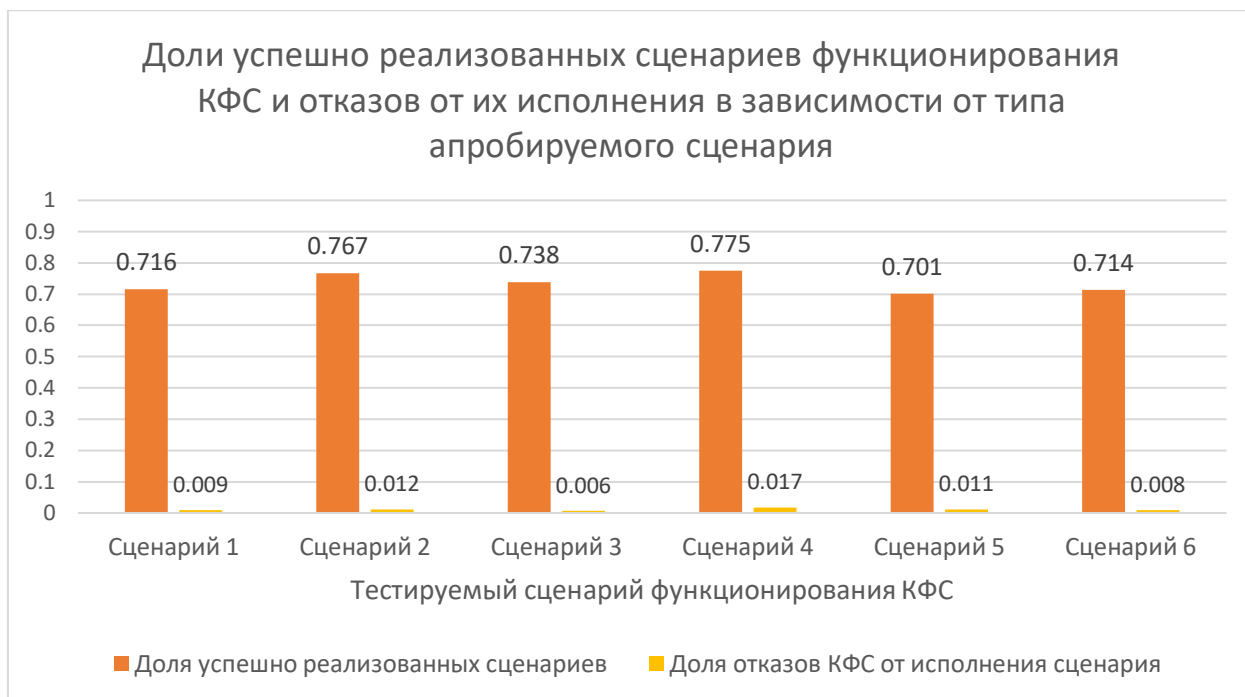
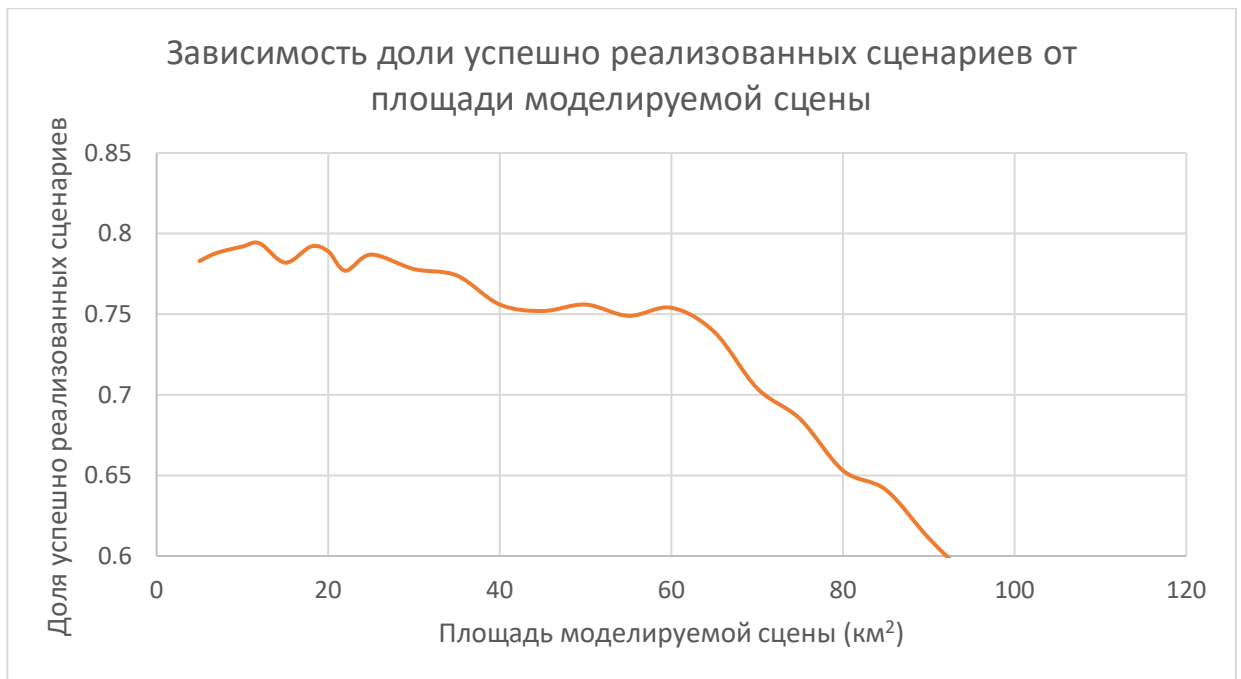


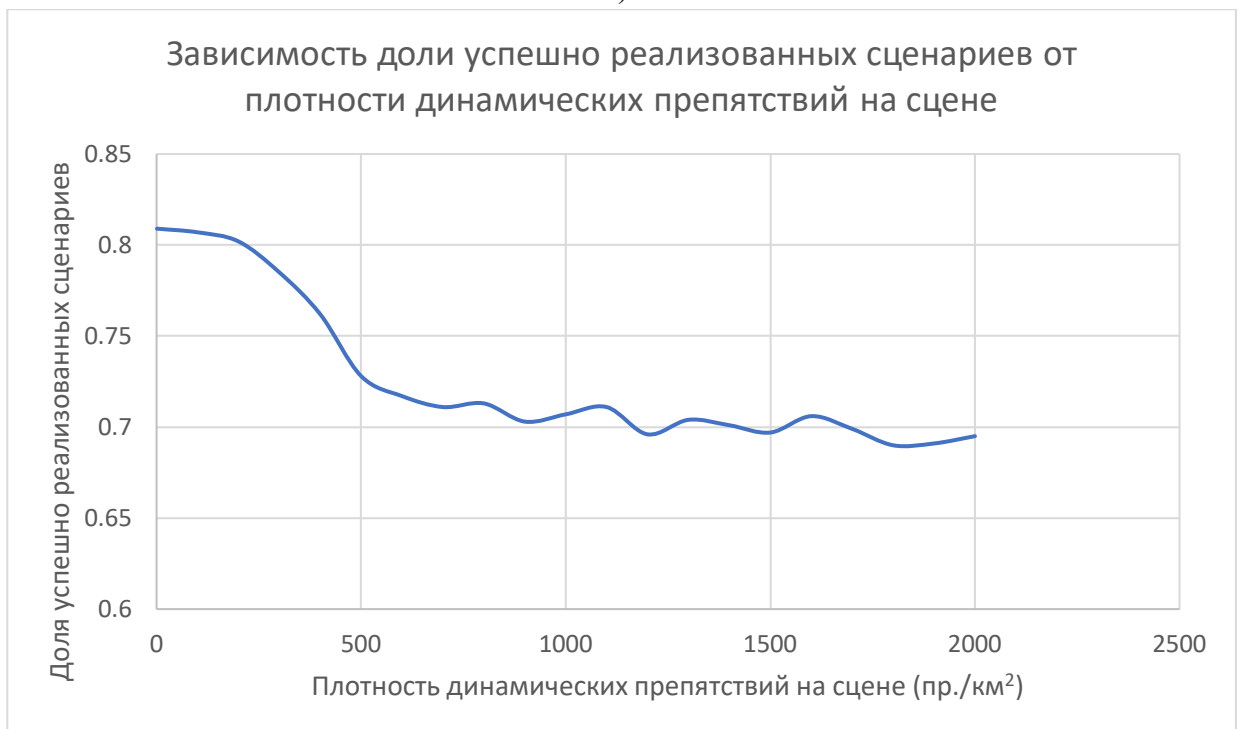
Рисунок 7. Доли успешно реализованных сценариев функционирования КФС и отказов от их исполнения в зависимости от типа апробируемого сценария

На основе диаграммы, представленной на рисунке 7, можно сделать вывод, что включение деструктивных воздействий негативным образом сказалось на качестве исполнения сценариев функционирования КФС. В ряде случаев возникновение деструктивных воздействий привело к невозможности продолжения миссии со стороны КФС, при этом система успешно осуществила перераспределение инфраструктурных ролей между действующими агентами, тем самым сохранив свою структурную целостность, усредненная доля отказов от исполнения миссии составила 1,05%. В целом по всем сценариям наблюдается схожая степень снижения доли успешно реализованных сценариев, а усредненная доля успешно завершенных миссий в данном случае составила 73,5%, что на 3,9% меньше, чем в симуляциях, где деструктивные воздействия отсутствовали.

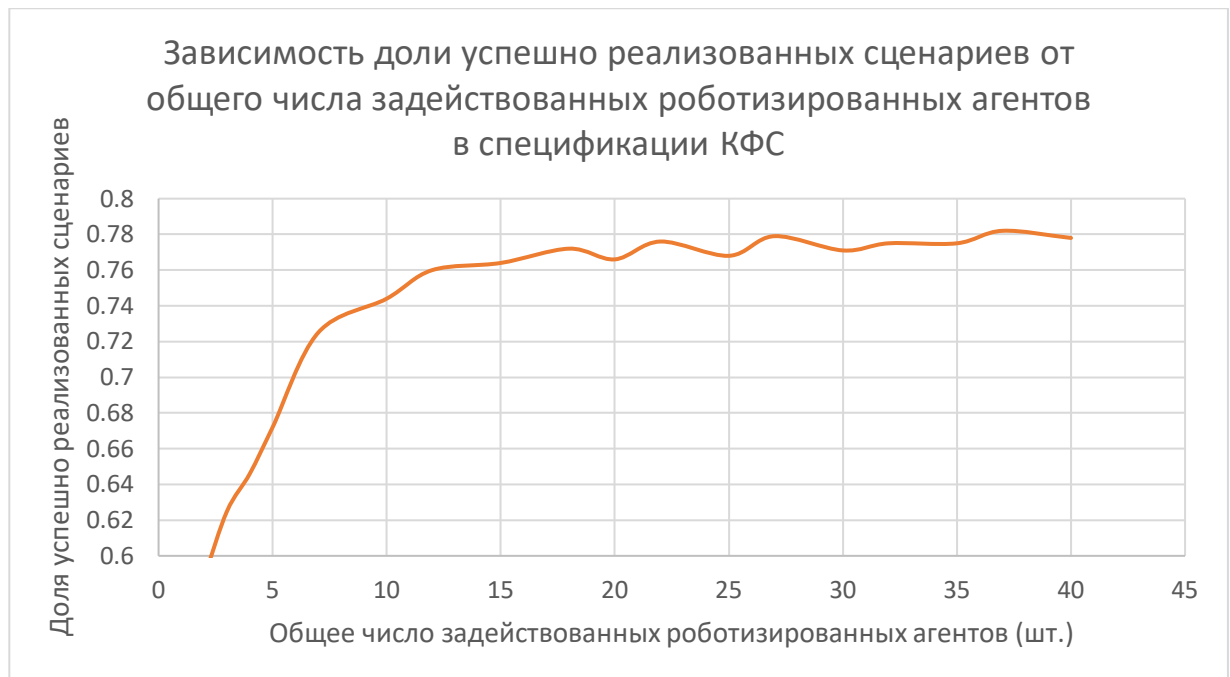
Далее, по аналогии с первым этапом эксперимента были исследованы зависимости доли успешно реализованных сценариев функционирования КФС от площади моделируемой сцены, плотности динамических препятствий на сцене, а также от числа задействованных роботизированных агентов в спецификации КФС, полученные зависимости представлена на рисунках 8.а, 8.б и 8.в соответственно.



а)



в)



в)

Рисунок 8. График зависимости доли успешно реализованных сценариев функционирования КФС от а) площади моделируемой сцены б) плотности динамических препятствий на моделируемой сцене в) общего числа задействованных роботизированных агентов в спецификации КФС

Как можно заметить на рисунке 8, все представленные зависимости сохранили свой порядок и характер: по-прежнему с увеличением площади моделируемой сцены или же плотности динамических препятствий на ней, доля успешно реализованных сценариев снижается. Аналогичным образом, с ростом числа вовлеченных РС по-прежнему наблюдается сопутствующий рост доли успешно реализованных сценариев функционирования КФС. В то же время можно отметить, что для всех приведенных зависимостей наблюдается рост разброса значений зависимой величины от ее аргумента. Ключевой причиной данных изменений представляется нелинейное влияние выхода из строя части функций агентов КФС на эффективность ее функционирования. Данный аргумент косвенно подтверждается смещением точки завершения устойчивого роста доли успешных реализаций сценариев на рисунке 8.в от точки, соответствующей 12 задействованным агентам, к точке соответствующей 16 агентам, включенным в спецификацию КФС.

В целях проведения более глубокого анализа влияния деструктивных воздействий на основе экспериментальных данных был построен график зависимости доли успешно реализованных сценариев функционирования КФС от числа возникших деструктивных воздействий, полученные результаты приведены на рисунке 9.

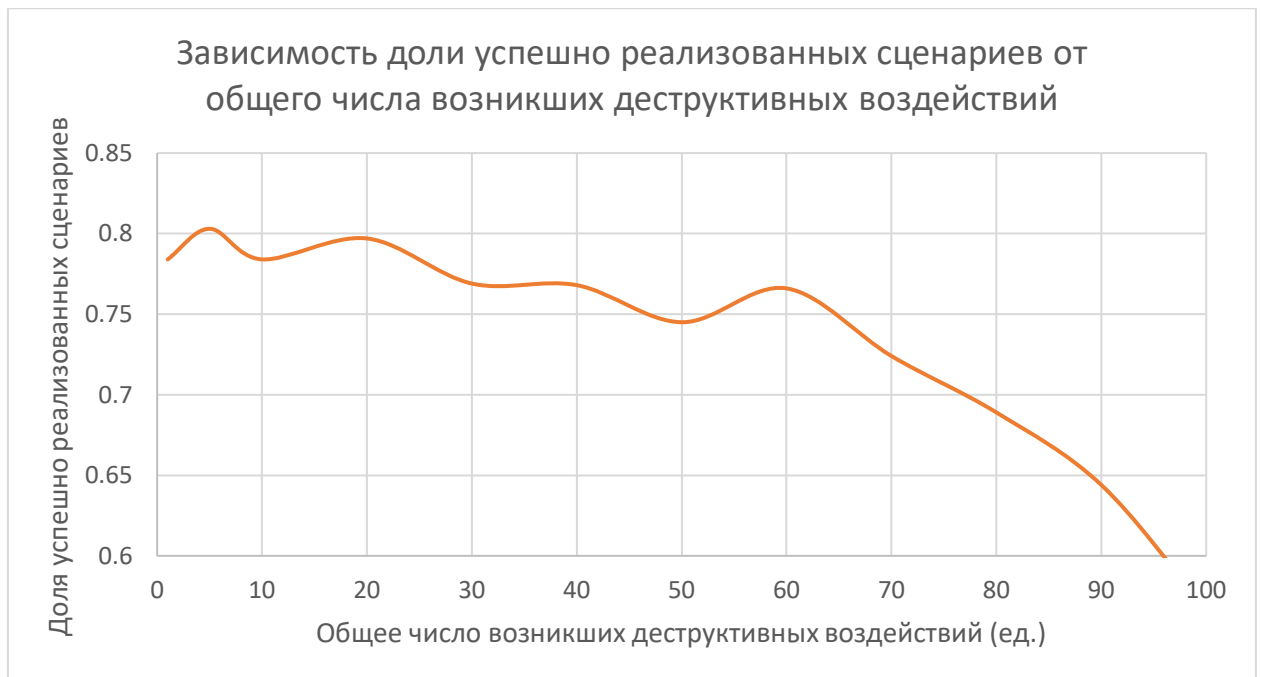


Рисунок 9. График зависимости доли успешно реализованных сценариев функционирования КФС от общего числа возникших деструктивных воздействий

Представленная на рисунке 9 зависимость носит явный убывающий характер, при этом наблюдается видимая тенденция к увеличению темпов снижения доли успешно реализованных сценариев функционирования КФС по мере роста числа деструктивных воздействий, возникших в процессе симуляции до минимального значения в 0,6. Убывающий характер полученной зависимости является ожидаемым и напрямую связан с общим снижением эффективности функционирования КФС вследствие необходимости в исполнении операций по перераспределению инфраструктурных ролей между агентами системы, а также ресурсными и временными затратами на исполнение данных операций.

Дальнейший анализ результатов, по аналогии с первым этапом экспериментов, был посвящен поиску оптимальных составов спецификаций КФС, для которых обеспечивается наибольшая эффективность реализации базовых сценариев функционирования КФС, заявленных в рамках проекта. Полученные гистограммы распределения роботизированных агентов по типам РС в разрезе апробируемых базовых сценариев представлены ниже на рисунке 10.

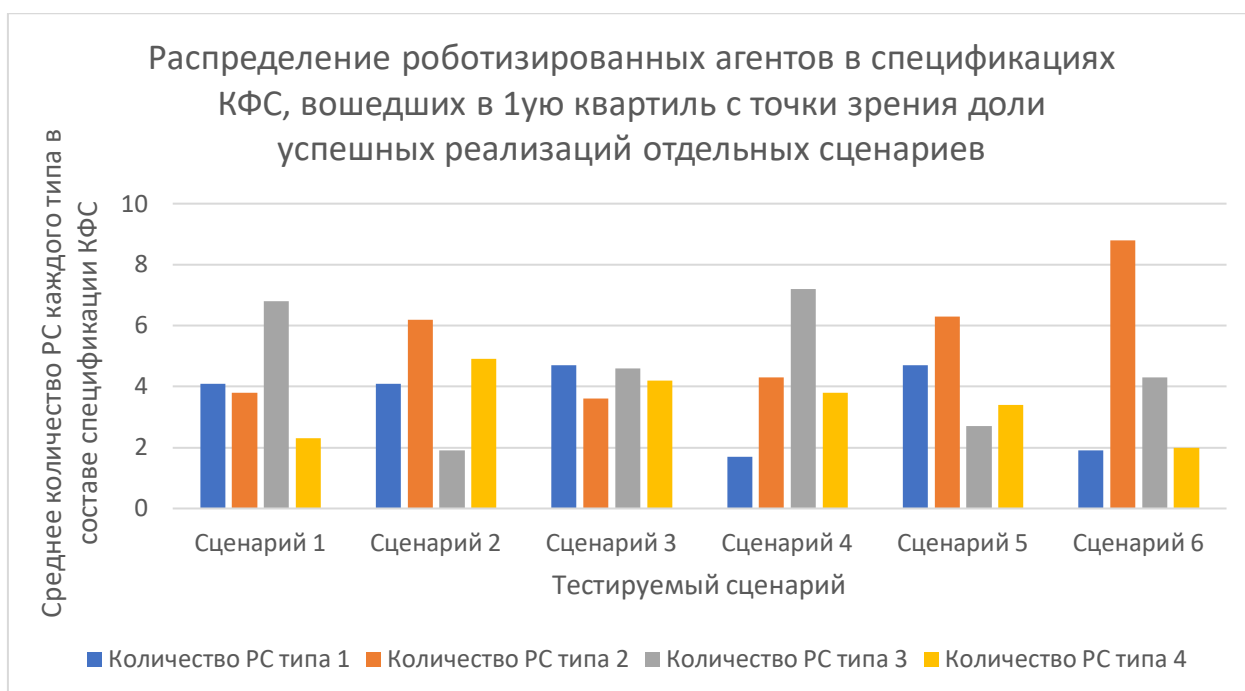


Рисунок 10. Диаграмма распределения роботизированных агентов в спецификациях КФС, вошедших в 1ую четверть с точки зрения доли успешных реализаций отдельных сценариев

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что в рамках второго этапа экспериментов по-прежнему наблюдаются значительные структурные отличия в спецификациях КФС, продемонстрировавших наибольшую эффективность на разных сценариях. При этом распределения агентов по типам РС сохраняют структуру схожую, с результатами, полученными в условиях отсутствия деструктивных воздействий. Ключевое отличие, наблюдаемое на данной диаграмме, заключается в значительном росте доли РС типа 2 для всех рассматриваемых сценариев – до 2,9; 6,1; 2,8; 4,2; 6,1 и 8,4 соответственно, что объясняется критической ролью агентов данного типа в процессах восстановления выходных функций прочих РС, поскольку только данный тип агентов обладает необходимым аппаратным обеспечением для манипулирования модулями прочих РС. Кроме того, РС данного типа активно задействуются в процессах перераспределения инфраструктурных ролей по причине наличия аппаратных возможностей для исполнения управляющих функций, реализующих перераспределение ролей между агентами.

На завершающем этапе эксперимента был выполнен поиск наиболее оптимальных спецификаций КФС, характеризуемых наибольшей долей успешных реализаций для всех апробируемых сценариев при минимальных временных затратах на исполнение последних. Процесс получения результирующих оценок оптимальности в отношении тестируемых спецификаций РС выполнялся по аналогии с первым этапом эксперимента, полученная диаграмма распределения оценок оптимальности протестированных спецификаций КФС приведена ниже на рисунке 11.

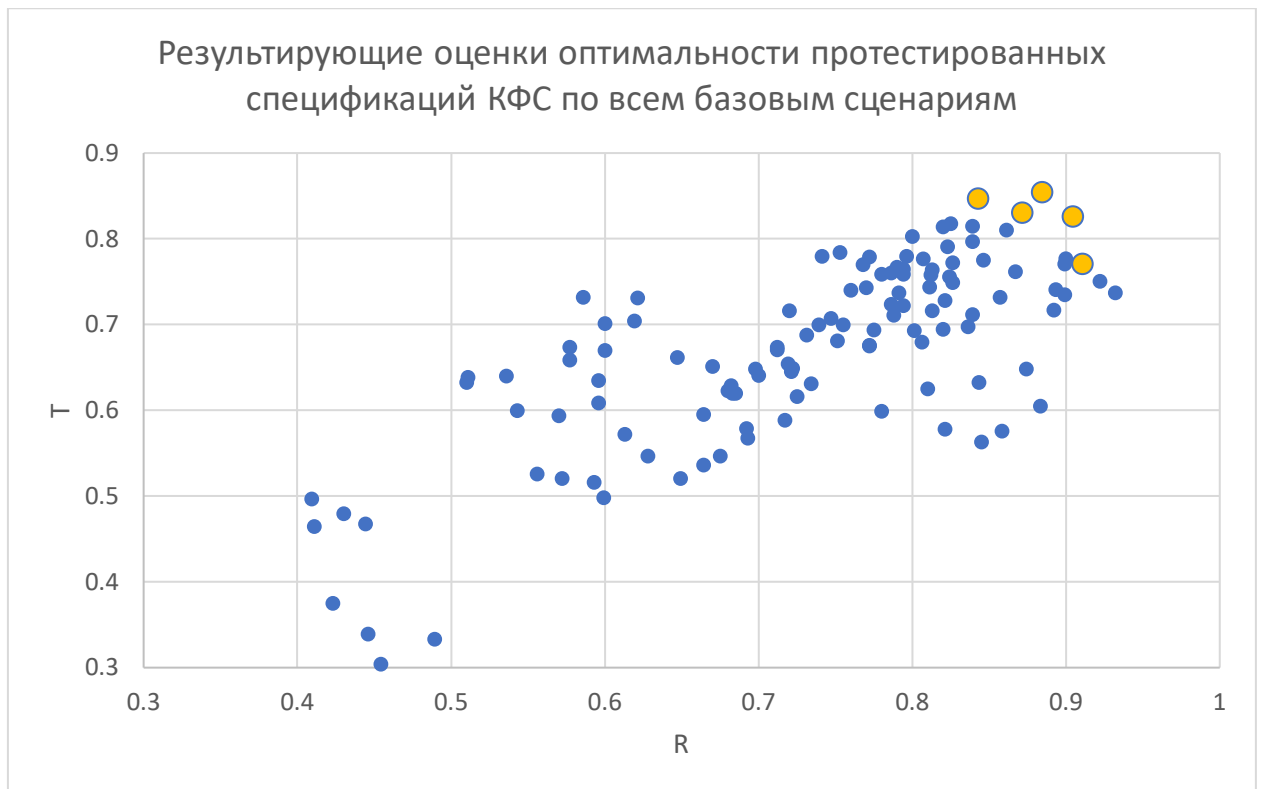


Рисунок 11. Результирующие оценки оптимальности протестированных спецификаций КФС по всем базовым сценариям в условиях наличия деструктивных воздействий

Результаты, представленные на рисунке 6, по большей части аналогичны тем, что были получены в ходе выполнения первого этапа эксперимента: на диаграмме по-прежнему наблюдается высокая плотность результатов, а структура распределения спецификаций на ней не претерпела значительных изменений. Тем не менее, в данном случае доля спецификаций, характеризующихся усредненной долей успешных реализаций базовых сценариев, превосходящей 80%, а также усредненной оценкой временной эффективности, превосходящей 0,8, существенно сократилась и составила лишь 7,5%. На рисунке 11 оранжевым цветом также были выделены 5 спецификаций с наибольшими значениями итоговой оценки оптимальности, состав указанных спецификаций представлен в таблице 6.

Таблица 6. Распределение роботизированных агентов для 5 спецификаций, характеризующихся наибольшими полученными значениями итоговой оценки оптимальности в условиях наличия внешних деструктивных воздействий.

№	Рейтинг на первом этапе тестирования	E_j	R_j	T_j	РС типа 1	РС типа 2	РС типа 3	РС типа 4
1	2	1,230	0,885	0,854	3	4	5	5
2	5	1,225	0,905	0,825	3	5	4	5
3	1	1,204	0,872	0,83	4	4	3	6
4	9	1,194	0,843	0,846	3	6	4	4
5	4	1,193	0,911	0,77	4	4	4	5

Структура распределения агентов в таблице 6 осталось в значительной степени схожей с результатами первого этапа экспериментов, в частности, 4 из 5 спецификаций, продемонстрировавших наилучшие результаты на первом этапе тестирования, достигли схожего уровня результативности и в данном случае в условиях наличия внешних

деструктивных воздействий. В то же время спецификация под номером 4 на втором этапе эксперимента поднялась с 9-й позиции на 4-ю, при этом можно отметить, что данная спецификация характеризуется большим числом РС типа 2, что потенциально могло обеспечить большую устойчивость в актуальных условиях эксперимента. Вместе с тем спецификация КФС, включающая 3 РС типа 2 и занимавшая по результатам первого этапа тестирования 3-е место, в данном случае опустилась на 16 позицию. Таким образом, среди спецификаций лидеров можно зафиксировать тенденцию в превалировании РС типа 2 в составе системы. Подводя итоге, можно заключить, что в данном случае все приведенные в таблице 6 спецификации прототипа КФС продемонстрировали высокий уровень успешной реализации по всем типам сценариев, с сохранением высокой временной эффективности исполнения соответствующих задач.

Таким образом, в рамках проекта был успешно разработан прототип мобильной КФС, организованный на базе группы гетерогенных РС наземного и воздушного базирования, множество спецификаций которого в последствии были успешно апробированы в моделируемой среде в различных условиях функционирования. Усредненная доля успешно завершенных миссий по реализации базовых сценариев в отсутствие деструктивных воздействий в рамках эксперимента составила 77,4%, а в случае их наличия, снизилась до уровня в 73,5%. В рамках эксперимента были успешно идентифицированы оптимальные варианты распределения роботизированных агентов при исполнении тех или иных базовых сценариев, а также определены конкретные спецификации КФС, продемонстрировавшие наиболее высокую эффективность функционирования по результатам их апробации на примере всех базовых сценариев. Таким образом, предложенный прототип мобильной КФС в рамках представленного эксперимента был успешно апробирован в соответствии с разработанной ранее «методикой тестирования функциональных возможностей мобильной КФС при решении прикладных задач в условиях динамического окружения» и продемонстрировал высокие показатели отказоустойчивости и эффективности функционирования в динамическом окружении при наличии деструктивных воздействий со стороны внешней среды.

2. Сведения о достигнутых конкретных научных результатах в отчетном периоде

В ходе заключительного этапа выполнения работ над проектом научным коллективом была успешно разработана методика тестирования и критерии оценки выполнения сценариев апробации мобильной кибер-физической системы, предназначенной для решения прикладных задач в условиях динамического окружения. К числу указанных сценариев апробации относятся:

1. Развертывание узлов КФС для обеспечения связи с группами пользователей;
2. Доставка грузов и оборудования к месту дислокации пользователей;
3. Быстрое реагирование для оказания медпомощи;
4. Мониторинг состояния окружения и инфраструктуры (детектирование людей в неположенных местах, детектирование несанкционированной деятельности);
5. Поиск и сбор целевых объектов с учетом грузоподъемности роботизированных агентов;
6. Замена неисправных модулей робототехнических средств, входящих в состав КФС.

Согласно предложенной методике, оценка эффективности КФС при решении прикладных задач, отраженных в представленных выше сценариях, может производиться исходя из доли успешно выполненных сценариев в условиях различных смоделированных динамических сцен. При этом в качестве варьируемых параметров могут выступать:

3. Параметры симуляции (рельеф, размер территории, специфика местности, число вредоносных динамических объектов);
4. Спецификация системы (число роботизированных агентов различного типа) – в данном случае следует рассматривать исключительно вариации системы, выполняющие минимальные требования к поддержанию отказоустойчивости (см. полный отчет);

В свою очередь, оценка уровня отказоустойчивости системы при решении прикладных задач, отраженных в представленных выше сценариях, может производиться исходя из:

3. Доли успешно выполненных сценариев в условиях возникновения внешних воздействий и неисправностей в рамках различных смоделированных динамических сцен;
4. Доли случаев успешного перераспределения инфраструктурных ролей с учетом изменения функциональной полноты агентов КФС.

При этом в качестве варьируемых параметров могут выступать:

4. Параметры симуляции (рельеф, размер территории, специфика местности, число вредоносных динамических объектов);
5. Спецификация системы (число роботизированных агентов различного типа) – в данном случае следует рассматривать исключительно вариации системы, выполняющие минимальные требования к поддержанию отказоустойчивости;
6. Тип внешнего воздействия / неисправности. Следует рассматривать прикладные сценарии внешних воздействий, которые приводят к нарушению отдельных выходных функций отдельных агентов КФС (либо напрямую постулировать соответствующие нарушения) в рамках текущей конфигурации системы.

Результирующая оценка эффективности и отказоустойчивости системы должна производиться путем взвешенного сопоставления результатов исполнения прикладных сценариев с учетом способности КФС к самовосстановлению и реконфигурации в условиях нарушения работы модулей отдельных агентов, выхода из строя отдельных агентов, нарушения инфраструктурной целостности системы и тд.

Приведенная коллективом методика позволяет не только оценить эффективность функционирования мобильной КФС на примере набора типовых сценариев, но и провести комплексную оценку отказоустойчивости системы к внешним деструктивным воздействиям различной природы. Кроме того, в процессе исполнения методики также могут дополнительно быть идентифицированы конкретные спецификации КФС, как наиболее адаптированные к функционированию в условиях определенных внешних деструктивных воздействий, так и наиболее приспособленные к решению определенной группы типовых задач. Предложенная методика имеет высокий уровень универсальности и может быть использована для тестирования широкого класса мобильных КФС как гражданского, так и военного назначения (см. полный отчет).

Также в ходе заключительного этапа реализации проекта был разработан прототип мобильной кибер-физической системы (КФС) с использованием предложенных на предыдущих этапах реализации данного проекта методов, подходов и программных средств, отличающейся устойчивостью к отказу компонентов системы, представленных множеством гетерогенных робототехнических средств (РС), а также способностью функционировать на открытых территориях в условиях динамического окружения. Разработанный прототип КФС базируется на нескольких типах роботизированных агентов наземного и воздушного базирования, общее техническое описание которых представлено ниже.

Наземный РС исполнительного типа (РС тип 1). Данный роботизированный агент представляет собой наземное РС колесного типа среднего размера и характеризуется повышенными характеристиками проходимости в условиях сложного рельефа, а также сравнительно высокими объемами АКБ. Данное РС способно к транспортировке и манипуляции объектами полезной нагрузки, для чего оснащено транспортировочным лотком и много-осевым манипулятором с захватным механизмом. Данное РС обладает базовым набором навигационного и сенсорного оборудования, включая GPS-передатчик, камеры видимого спектра, а также лазерный дальномер, необходимые для навигации РС и обеспечения его мобильности в условиях динамической среды. Данный роботизированный агент снабжен двумя типами передатчиков: радио-модулем, характеризующимся значительной площадью покрытия и малой пропускной способностью, предназначенный преимущественно для приема и передачи управляющих сигналов, а также данных телеметрии; wi-fi модулем с высокой пропускной способностью, предназначенным для передачи крупных блоков мультимедийных и сложноструктурированных данных на малой дистанции до нескольких десятков метров. Данное РС не обладает значительными физическими хранилищами данных или вычислительными ресурсами и в рамках мобильной КФС рассматривается в качестве стандартного наземного агента исполнительного типа.

Наземный РС управляющего типа (РС тип 2). Данное РС является роботизированным агентом колесного типа, однако не обладает высокой мобильностью или

же значительными характеристиками проходимости, при этом также имеет высокий объем АКБ. Данный агент не ориентирован на эффективное исполнение задач по транспортировке грузов, однако обладает отсеком хранения значительного объема, предназначенным для временного размещения и хранения наборов грузов, а также запасных комплектующих других РС. Вместе с тем данный агент характеризуется продвинутыми механизмами для манипуляции объектами хранения, а именно, имеет бортовой много-осевой манипулятор с захватным механизмом, а также специализированный приводной механизм, предназначенный для замены АКБ и иных съемных узлов у прочих агентов КФС. Кроме того, данное РС оборудовано сервисной площадкой для воздушных агентов системы (посадочная площадка БПЛА). Данное РС оснащено базовым набором навигационного оборудования, включая GPS-передатчик, камеры видимого спектра, а также лазерный дальномер, необходимые для навигации РС на местности. При этом данный агент дополнительно оборудован широким перечнем специализированных сенсорных устройств (датчики давления, приближения, ИК-сенсоры и т.д.), необходимых для исполнения задач по обслуживанию других роботизированных агентов. По аналогии с наземным РС исполнительного типа, данный РС снабжен двумя типами передатчиков: радио-модулем, а также модулем связи дальнего действия (до 3 км) с высокой пропускной способностью. Данный агент имеет значительные мощности по агрегации, обработке и хранению данных на уровне системных кластеров и даже всей КФС в целом. Таким образом, данное наземное РС способно не только к реализации сервисных функций в отношении прочих агентов мобильной КФС, но и в соответствии с терминологией, представленной ранее в подходе к адаптивному управлению инфраструктурой КФС, способен в полной мере реализовывать функционал мобильной роботизированной станции хранения и обработки данных (МРСХОД).

Воздушный РС комбинированного типа (РС тип 3). Данный агент представляет собой БПЛА типа VTOL и отличается повышенными характеристиками мобильности, а также способностью к исполнению длительных полетных миссий продолжительностью до 2х часов. Данное РС не обладает бортовыми отсеками для транспортировки и хранения грузов, а также органами манипуляции полезной нагрузкой и предназначен, главным образом, для исполнения миссий аэромониторинга крупных участков местности, площадью до 1000 км². Данное РС оснащено специализированным набором навигационного и сенсорного оборудования, включающим GPS-передатчик, лидар и камеры видимого спектра повышенного разрешения. Указанный набор оборудования ориентирован на исполнение миссий аэромониторинга на больших высотах в сравнении с БПЛА мультироторного типа. Данный агент снабжен набором модулей связи и передачи данных следующих типов: радио-модулем, характеризующимся значительной площадью покрытия и малой пропускной способностью, предназначенным в первую очередь для приема и передачи управляющих сигналов, а также данных телеметрии; модулем связи дальнего действия с высокой пропускной способностью, предназначенным для передачи мультимедийных и сложноструктурированных данных на дистанции до 3 км. Данное воздушное РС обладает ограниченными физическими хранилищами данных и сравнительно малыми вычислительными ресурсами, а потому в рамках мобильной КФС рассматривается преимущественно в качестве стандартного воздушного агента мониторингового типа.

Воздушный РС мультироторного типа (РС тип 4). Данное РС является БПЛА мультироторного типа и характеризуется повышенным уровнем устойчивости движения в условиях сложных погодных условий, а также значительным резервом АКБ, позволяющим осуществлять непрерывные полетные миссии продолжительностью до 30 минут. Данный роботизированный агент обладает захватным механизмом и пригоден к транспортировке грузов массой до 12 кг, устройство не обладает способностью к манипуляции полезной нагрузкой и предполагает размещение грузов на борту средствами наземных РС. Данное РС оснащено расширенным набором навигационного и сенсорного оборудования, включая GPS-передатчик, лидар, камеры видимого спектра, при необходимости в секции размещения полезной нагрузки могут быть дополнительно установлены различные мультиспектральные сенсоры. Указанный набор оборудования обеспечивает широкие возможности данного РС в области мониторинга, а также позволяет поддерживать высокий уровень мобильности агента в условиях динамической среды. Данный БПЛА снабжен двумя типами передатчиков: радио-модулем, характеризуемым значительной площадью покрытия и малой пропускной способностью, предназначенный в первую очередь для приема и передачи управляющих сигналов, а также данных телеметрии; модулем связи дальнего действия с высокой пропускной способностью, предназначенным для передачи мультимедийных и сложноструктурированных данных на дистанции до 3 км. Данный агент имеет значительные мощности по агрегации и хранению данных на уровне удаленных системных кластеров. Таким образом, данный мультироторный БПЛА способен реализовывать не только миссии по транспортировке малогабаритных грузов, а также мониторинговые миссии на малых и средних участках местности до (50 км²), но и согласно представленному ранее подходу к адаптивному управлению инфраструктурой КФС, способен выступать в роли беспилотного воздушного хранилища данных (БВХД).

В ходе заключительного этапа проекта в соответствии с разработанной методикой, научным коллективом было проведено комплексное экспериментальное тестирование функциональных возможностей разработанного прототипа мобильной КФС при решении прикладных задач в условиях динамического окружения. В рамках тестирования прототипа КФС была проведена оценка эффективности множества спецификаций разработанного прототипа КФС в моделируемой среде, по результатам которой усредненная доля успешно завершенных миссий по реализации базовых сценариев в отсутствие деструктивных воздействий составила 77,4%, а в случае их наличия, снизилась до уровня в 73,5%. В рамках эксперимента были успешно идентифицированы оптимальные варианты распределения роботизированных агентов при исполнении тех или иных базовых сценариев, а также определены конкретные спецификации КФС, продемонстрировавшие наивысшую эффективность функционирования по результатам их апробации на примере всех базовых сценариев функционирования КФС. Таким образом, предложенный прототип мобильной КФС по результатам комплексного тестирования продемонстрировал высокие показатели отказоустойчивости и эффективности функционирования в динамическом окружении при наличии деструктивных воздействий со стороны внешней среды.

В данном разделе представлены основные результаты выполнения проекта за все года нарастающим итогом.

В контексте обеспечения гибкости инфраструктуры киберфизических систем (КФС) и адаптивного автономного управления данной инфраструктурой центральное место

занимают вопросы организации децентрализованного хранения и обработки данных с целью обеспечения их целостности и доступности в условиях динамического окружения и потенциальной возможности отказа отдельных компонентов. Задача хранения данных решается с помощью репликации. Подходы к репликации хорошо изучены [Byun S., Moon S. Resilient data management for replicated mobile database systems // *Data & knowledge engineering*. – 1999. – Т. 29. – №. 1. – С. 43-55.] и имеют программные реализации почти во всех распространённых системах управления базами данных [Truica C.O., Radulescu F., Boicea, A., Bucur I Performance evaluation for CRUD operations in asynchronously replicated document oriented database // *2015 20th International Conference on Control Systems and Computer Science*. – IEEE, 2015. – С. 191-196.]. Существуют решения, работающие в реальном времени в КФС [Xiong M., Ramamritham K., Haritsa J.R., Stankovic J.A. MIRROR: A state-conscious concurrency control protocol for replicated real-time databases // *Information systems*. – 2002. – Т. 27. – №. 4. – С. 277-297.]. При этом ограничение таких реализаций состоит в том, что топология сети передачи данных предполагается неизменной, либо ее изменения не затрагивают ключевые компоненты системы. Например, при репликации master-slave набор компонентов slave может меняться, что обеспечивает устойчивость и целостность данных при возможном их отказе, однако в случае же отказа компонента master будет парализована работа всего кластера. Для преодоления проблем, возникающих при жесткой связи программного обеспечения и данных с физическим носителем (робототехническим средством, РС) могут использоваться решения, позволяющие переносить программы и данные с одного РС на другое за счет применения технологий контейнеризации. Примером является живая миграция виртуальных машин. При том, что существуют методы минимизации переносимых данных, времени миграции и простоя [Noshy M., Ibrahim A., Ali H. A. Optimization of live virtual machine migration in cloud computing: A survey and future directions // *Journal of Network and Computer Applications*. – 2018. – Т. 110. – С. 1-10.], данный механизм является «тяжелым», так как требует переноса всего содержимого машины, включая операционную систему. Более легковесной формой виртуализации является использование контейнеров для модулей (например, Cloud Foundry, OpenShift, Kubernetes, Docker, Mesos, и другие) в том числе модулей инфраструктурного уровня. В работе [Dziurzanski P., Zhao S., Przewozniczek M., Komarnicki M., Indrusiak L.S. Scalable Distributed Evolutionary Algorithm Orchestration using Docker Containers // *Journal of Computational Science*. – 2020. – С. 101069.] рассмотрен пример развертывания Docker-контейнеров для оптимизации производственных процессов умных фабрик. Авторы отмечают децентрализованность полученного подхода и его высокую масштабируемость, но не рассматривают управление контейнерами в условиях изменчивого окружения и повышенного риска отказов, так как это лежит вне поставленной задачи. В работе [Mohamed M., Engel R., Warke A., Berman S., Ludwig H. Extensible persistence as a service for containers // *Future Generation Computer Systems*. – 2019. – Т. 97. – С. 10-20.] рассматривается вопрос связки устойчивых распределенных систем хранения данных с контейнеризированными модулями, для чего авторы разработали фреймворк Ubiquity, однако этот фреймворк требует внешнего статического конфигурирования. В статье [Ahmed B., Seghir B., Al-Osta M., Abdelouahed G. Container based resource management for data processing on IoT gateways // *Procedia Computer Science*. – 2019. – Т. 155. – С. 234-241.] предлагается решение для распределения вычислительного ресурса компонентов IoT. В статье [Dehury C. K., Sahoo P. K. Design and implementation of a novel service management framework for IoT devices in cloud // *Journal of Systems and Software*. – 2016. – Т. 119. – С. 149-161.] рассматривается архитектура, позволяющая реализовать децентрализованное управление сервисами IoT. В представленных выше работах предложены методы, модели

и архитектуры динамического управления ролями узлов в КФС с помощью контейнеров, но вопрос самоорганизации системы при отказе отдельных её узлов и/или контейнеров требует дополнительного исследования.

В рамках проекта при разработке подхода к адаптивному управлению инфраструктурой КФС, сформированной на базе множества гетерогенных РС, ориентированного на обеспечение отказоустойчивости системы в изменяющейся среде, а также в случае утраты работоспособности отдельными РС за основу будут взяты рассматриваемые в [Mohamed M., Engel R., Warke A., Berman S., Ludwig H. Extensible persistence as a service for containers // *Future Generation Computer Systems*. – 2019. – Т. 97. – С. 10-20.] [Ahmed B., Seghir B., Al-Osta M., Abdelouahed G. Container based resource management for data processing on IoT gateways // *Procedia Computer Science*. – 2019. – Т. 155. – С. 234-241.] [Dehury C. K., Sahoo P. K. Design and implementation of a novel service management framework for IoT devices in cloud // *Journal of Systems and Software*. – 2016. – Т. 119. – С. 149-161.] подходы к построению архитектур КФС с использованием контейнеризации для компонентов, реализующих роли управления данными в КФС, способствующие упрощению процесса распределения инфраструктурных ролей и поддержанию работоспособности КФС. Данные подходы также позволяют архитектурно разделить прикладные задачи узлов КФС и роли хранения, обработки и передачи данных, что позволяет достичь более высокой гибкости стандартных подходов к обеспечению избыточности и репликации данных за счёт дополнительного уровня виртуализации. В процессе разработки собственного подхода акцент планируется сделать на решении проблемы выбора стратегий поведения КФС при нарушении целостности данных в случае временной потери связности системы, а также проблемы самоорганизации КФС при отказе отдельных её узлов и/или контейнеров.

Методы формирования децентрализованных беспроводных сетей передачи данных с адаптивной топологией рассматриваются во множестве современных исследований [Cagatan G. K. B. et al. Connectivity analysis of wireless sensor network in two-dimensional plane using Castalia simulator // *2017 IEEE 9th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM)*. – IEEE, 2017. – С. 1-8.] [Lavric A., Popa V. A LoRaWAN: Long range wide area networks study // *2017 International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN)*. – IEEE, 2017. – С. 417-420.] [Swastika A.C., Pramudita R., Hakimi R. IoT-based smart grid system design for smart home // *2017 3rd International Conference on Wireless and Telematics (ICWT)*. – IEEE, –2017. – С. 49-53] [Hammi B. et al. IoT technologies for smart cities // *IET Networks*. – 2017. – Т. 7. – №. 1. – С. 1-13.] [Киричек Р. В. и др. Модельные сети для Интернета Вещей и программируемых сетей // *Информационные технологии и телекоммуникации*. – 2015. – №. 3. – С. 17-26.] [Футахи А., Парамонов А. И. Беспроводные сенсорные сети с мобильными временными головными узлами // *Электросвязь*. – 2016. – №. 9. – С. 48-54.] [Корнеева Т. В. Сенсорные сети для систем контроля и управления // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. – 2016. – №. 8. – С. 28-41.] [Кучерявый А. Е., Аль-Кадами Н. А. Адаптивный алгоритм кластеризации для беспроводных сенсорных сетей с мобильными узлами // *Электросвязь*. – 2015. – №. 3. – С. 22-26.]. С учетом заявленной специфики проекта в рамках разработки подхода к организации децентрализованных беспроводных сетей передачи данных динамической топологии на базе групп мобильных гетерогенных РС, основной акцент будет сделан на реализации автономного управления топологией сети с целью обеспечения повышенной устойчивости и надежности передачи данных в процессе функционирования КФС в условиях изменяющегося окружения.

Распределение задач между множеством гетерогенных РС остаётся важным вопросом в контексте организации автономного управления роевыми системами. Существующие децентрализованные методы [de Mendonça R. M., Nedjah N., de Macedo Mourelle L. Efficient distributed algorithm of dynamic task assignment for swarm robotics //Neurocomputing. – 2016. – Т. 172. – С. 345-355.], [Lee W., Kim D. E. Adaptive approach to regulate task distribution in swarm robotic systems //Swarm and evolutionary computation. – 2019. – Т. 44. – С. 1108-1118.] решают проблему распределения задач в динамических средах. Такие подходы достаточно эффективно обеспечивают поддержание отказоустойчивости, в случае утраты работоспособности отдельными РС. Недостатком данных методов является ограничение возможности их использования только на множества гомогенных РС. Исследование [Jose K., Pratihari D. K. Task allocation and collision-free path planning of centralized multi-robots system for industrial plant inspection using heuristic methods //Robotics and Autonomous Systems. – 2016. – Т. 80. – С. 34-42.] было направлено на разработку не только эвристических методов для распределения задач, но и планирования пути без столкновений для роботов, работающих в общем рабочем пространстве. Использованный в работе генетический алгоритм распределял задачи по РС, а также рассчитывал оптимальное количество задач для каждого робота, однако в данном подходе не учитывались как изменчивость окружения, так и гетерогенность роя.

Существует ряд методов эволюционной оптимизации, направленных на решение данной проблемы. Например, для решения проблемы распределения задач среди множества гетерогенных РС может быть использован метод Particle Swarm Optimization (PSO) [Wang D., Tan D., Liu L. Particle swarm optimization algorithm: an overview //Soft Computing. – 2018. – Т. 22. – №. 2. – С. 387-408.] или его улучшенная версия [Asma A., Sadok B. PSO-based Dynamic Distributed Algorithm for Automatic Task Clustering in a Robotic Swarm //Procedia Computer Science. – 2019. – Т. 159. – С. 1103-1112.]. В данной работе описывается метод, особенностью которого является реализация снижения размерности исследуемого пространства состояний путем кластеризации задач. Поскольку в реальных задачах, как правило, отсутствует информация о необходимом количестве кластеров, авторами исследования был предложен подход к кластеризации, обеспечивающий динамическое разделение задач на кластеры. Важным преимуществом метода также является его применимость для случая гетерогенных роевых систем. Предложенный авторами исследования подход состоит из двух этапов: первый этап заключается в группировке задач на кластеры с использованием алгоритма динамической оптимизации роя частиц (dynamic distributed particle swarm optimization - D2PSO); второй этап – в распределении РС по кластерам. Распределение РС по кластерам осуществляется в соответствии с расстояниями между РС и кластерами, а постановка задачи формулируется как множественная проблема коммивояжера (multiple traveling salesman problems – MTSP). Эксперименты показали, что подход эффективен с точки зрения времени кластеризации, стоимости и времени решения MRTA по сравнению с оптимизацией роя распределенных частиц (distributed particle swarm optimization – dPSO) [Hereford J. M. A distributed particle swarm optimization algorithm for swarm robotic applications //2006 IEEE International Conference on Evolutionary Computation. – IEEE, 2006. – С. 1678-1685.] и генетическим алгоритмом из [Jose K., Pratihari D. K. Task allocation and collision-free path planning of centralized multi-robots system for industrial plant inspection using heuristic methods //Robotics and Autonomous Systems. – 2016. – Т. 80. – С. 34-42.]. Однако, эффективность распределения роботов по кластерам задач, основанного на MTSP, существенным образом снижается в среде с динамическими препятствиями. Таким образом, для решения задачи децентрализованного автономного распределения задач между агентами роя гетерогенных РС в рамках проекта предлагается взять за основу метод

[Asma A., Sadok B. PSO-based Dynamic Distributed Algorithm for Automatic Task Clustering in a Robotic Swarm //Procedia Computer Science. – 2019. – Т. 159. – С. 1103-1112.] и осуществить модификацию его второго этапа. Время, затраченное на распределение роботов по кластерам, возможно уменьшить, используя подходы, основанные на клеточной декомпозиции, например, JPS (jump point search). Такие подходы способны оперативно находить оптимальный путь от РС до целевого кластера, в соответствии с заданным критерием оптимальности, и учитывая при этом статические и динамические препятствия.

В процессе решения задач, выполняемых группой гетерогенных РС, отдельные робототехнические единицы частично или полностью могут выходить из строя в связи с полученными физическими повреждениями или же из-за понижения уровня заряда аккумуляторной батареи (АКБ), что может привести к снижению работоспособности группы РС, если из строя вышли устройства с критически важным для выполнения поставленной задачи оборудованием. Поскольку в рамках проекта планируется осуществлять развертывание КФС на базе множества гетерогенных РС, то риски сопряженные с утратой работоспособности отдельными РС становятся еще более значимыми.

В актуальных работах [Hong Y., Fang J., Tao Y. Ground control station development for autonomous UAV //International Conference on Intelligent Robotics and Applications. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2008. – С. 36-44.] [Kemper F. P., Suzuki K. A. O., Morrison J. R. UAV consumable replenishment: design concepts for automated service stations //Journal of Intelligent & Robotic Systems. – 2011. – Т. 61. – №. 1-4. – С. 369-397.] [Suzuki K. A. O., Kemper Filho P., Morrison J. R. Automatic battery replacement system for UAVs: Analysis and design //Journal of Intelligent & Robotic Systems. – 2012. – Т. 65. – №. 1-4. – С. 563-586.] [Liu Z.N., Liu X.Q., Yang L.J., Leo D., Zhao H.W. an Autonomous Dock and Battery Swapping System for Multirotor UAV //Unpublished, Retrieved from: <https://www.researchgate.net/publication/325077351> (may 2018). – 2018. – Т. 10.] [The Percepto Solution [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://percepto.co/solutions/>] представлены решения для РС, обеспечивающие подзарядку или замену аккумуляторного блока. Замена осуществляется посредством фиксации устройства, после чего манипулятор извлекает разряженный АКБ и устанавливает на его место заряженный АКБ, однако в данных работах решение предложено исключительно для устройств типа БЛА. Реализация самоорганизующейся группы РС, Kilobots, с функцией самовосстановления роя приведен в [Slavkov I., Carrillo-Zapata D., Carranza N., Diego X., Jansson F., Kaandorp J., ... and Sharpe J. Morphogenesis in robot swarms //Science Robotics. – 2018. – Т. 3. – №. 25. – С. eaau9178.] [Beltran F.A.V., Cruzat H.A. P., De Sagun, G.N.M., Magsino E.R. Implementing Collective Behaviors Using the Kilobot Platform //Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists. – 2018. – Т. 2.]. Kilobots предназначены для работы в группах до тысячи РС под управлением алгоритма S-DASH, в основе подхода лежит компенсация выхода из строя отдельных РС посредством определенных манипуляций на уровне всего роя с целью обеспечения возможности по дальнейшему выполнению поставленных перед ним задач, однако проблема непосредственного восстановления функций отдельных агентов в рамках данных исследований осталась нерешенной.

В рамках проекта для сохранения работоспособности группы РС при частичном выходе из строя отдельных устройств, предлагается разработать модель модульного наземного РС, рассчитанного на функционирование в составе группы РС, позволяющую осуществлять замену его компонентов средствами других агентов из данной группы с целью реализации функции восстановления работоспособности поврежденных РС.

Для того, чтобы определить степень возможного восстановления РС посредством других РС, будет осуществлена классификация устройств, применяемых в РС и пригодных к замене без серьезного вмешательства в процесс общего функционирования РС. Классификация позволит разбить устройства на группы по принципу работы, способу подключения к управляющей системе РС, а также габаритам устройств, что позволит спроектировать модель РС и разместить в ней устройства таким образом, чтобы замена последних и их подключение к управляющей системе РС были достаточно просты для автоматизации данного процесса.

Различные сенсорные системы, такие как фото-видеокамеры, микрофоны, ИК и УЗ сенсоры могут подключаться по технологии plug-and-play, что позволяет отключать, заменять и использовать их без прерывания работы всей РС. В рамках проекта для замены аккумуляторной батареи в РС без ее выключения или перезагрузки, в зависимости от общего энергопотребления системы, предлагается воспользоваться концепцией вспомогательной системы питания, где в качестве временного источника энергии может быть применен ионистор, или аккумулятор малой емкости. Таким образом, будет получена возможность обеспечить функционирование РС во время процедуры замены аккумуляторной батареи. Разработка соответствующей модели наземного РС позволит формировать группы перенастраиваемых модульных РС, в которых сенсорные устройства и элементы питания отдельных РС, в случае необходимости могут быть заменены посредством других РС.

Способность КФС, сформированной на базе роя гетерогенных РС, к выполнению поставленных перед ней задач во многом основывается на обеспечении реализации процессов передвижения участников роя в целевые местоположения без коллизий. Решение данной проблемы требует реализации планирования траекторий движения для роя гетерогенных РС в соответствии со следующими условиями: траектории роботов в каждый момент времени не должны пересекаться; в случае детектирования препятствий, траектории движения отдельных РС должны динамически корректироваться с целью обеспечения обхода данных препятствий; планирование путей должно осуществляться в соответствии с некоторым критерием оптимальности, к которым относятся: минимизация ожидаемого общего времени перемещения в целевые позиции всех участников роя [Karanoğlu M., Alikalfa M., Ozkan M., Parlaktuna O. A pattern-based genetic algorithm for multi-robot coverage path planning minimizing completion time //Journal of intelligent manufacturing. – 2012. – Т. 23. – №. 4. – С. 1035-1045.], минимизация длины пути каждого РС [Banharnsakun A., Achalakul T., Batra R. C. Target finding and obstacle avoidance algorithm for microrobot swarms //2012 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). – IEEE, 2012. – С. 1610-1615.], минимизация энергозатрат [Michel D., McIsaac K. New path planning scheme for complete coverage of mapped areas by single and multiple robots //2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. – IEEE, 2012. – С. 1233-1240.]. Кроме того, в соответствии с [Senanayake M., Senthoran I., Barca J.C., Chung H., Kamruzzaman J., Murshed M. Search and tracking algorithms for swarms of robots: A survey //Robotics and Autonomous Systems. – 2016. – Т. 75. – С. 422-434.] используемые алгоритмы планирования пути должны быть масштабируемыми и соответственно пригодными к использованию на малых и крупных роях РС.

Существуют различные методы планирования траекторий для множества РС, основанные на использовании графов [Yu J., LaValle S. M. Optimal multi-robot path planning on graphs: Structure and computational complexity //arXiv preprint arXiv:1507.03289. – 2015.] [Wang M., Liu J. N. K. Fuzzy logic-based real-time robot navigation in unknown environment

with dead ends //Robotics and autonomous systems. – 2008. – Т. 56. – №. 7. – С. 625-643.], клеточной декомпозиции [Лю В. Методы планирования пути в среде с препятствиями (обзор) //Математика и математическое моделирование. – 2018. – №. 1.], нейросетевых моделей [Li H., Yang S. X., Seto M. L. Neural-network-based path planning for a multirobot system with moving obstacles //IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews). – 2009. – Т. 39. – №. 4. – С. 410-419.] и генетических алгоритмов [Kalmár-Nagy T., Giardini G., Bak B. D. The multiagent planning problem //Complexity. – 2017. – Т. 2017.]. В рамках проекта для решения данной задачи предлагается воспользоваться методом [Wang H., Rubenstein M. Walk, Stop, Count, and Swap: Decentralized Multi-Agent Path Finding With Theoretical Guarantees //IEEE Robotics and Automation Letters. – 2020. – Т. 5. – №. 2. – С. 1119-1126.], адаптировав его для решения задачи в условиях наличия динамических препятствий. Выбранный метод основан на использовании клеточной декомпозиции и на сегодняшний день продемонстрировал одни из наиболее высоких результатов работы в контексте планирования путей для множества РС без коллизий. Авторы исследования задались вопросом перестроения роя РС в статической среде в предписанные фигуры. Предложенное авторами решение основано на разбиении целевой фигуры и пространства на сетку и представление этой сетки в виде графа поиска. Предложенный в работе метод решает задачу нахождения массива данных, который содержит в себе позиции каждого робота в любой момент времени. Соответствующие позиции составляют траекторию перемещения каждого РС без коллизий с другими роботами или статическими препятствиями. Предложенный подход можно разделить на две части: 1) нахождение оптимального пути для каждого РС с использованием алгоритма A^* , оптимальность при этом определяется исходя из длины рассчитанной траектории или в соответствии с некоторым заданным критерием стоимости пути. 2) Формирование протокола подсчёта (the count protocol): в таком протоколе каждому РС устанавливается в соответствии некоторый параметр α . Значение данного параметра передаётся всем соседним по отношению к текущему агенту РС. Если некоторое РС блокирует путь другому роботу, то значение параметра изменяется следующими образом: $\alpha_i = \alpha_i + 1$; если не блокирует, то: $\alpha_i = 0$. Непрерывный рост значения параметра α_i играет роль индикатора тупиков, препятствующих передвижению других РС по спланированным траекториям. Рассмотренный подход удовлетворяет следующим требованиям: нахождение решения в ситуациях, когда возникают тупики, предотвращение возникновения столкновений между роботами в вершинах графа и на его рёбрах. В рамках проекта данный подход планируется расширить методами детектирования и обхода препятствий в целях обеспечения его применимости в условиях динамической среды.

Для обеспечения мобильности распределенной КФС, сформированной на базе группы РС, в условиях динамического окружения, одними из ключевых задач являются: построение карты территории, локализация компонентов системы, навигация РС, а также обеспечение анализа геометрических характеристик внешней среды в режиме реального времени. Для решения данных задач в контексте разработки распределенной мобильной КФС предполагается использовать современные SLAM-алгоритмы. На данный момент существуют централизованные и децентрализованные SLAM-алгоритмы, которые могут быть применены для различного рода распределенных систем.

Централизованные SLAM-алгоритмы позволяют выделить одного или нескольких агентов-серверов в распределенной системе, которые будут отвечать за построение, хранение и оптимизацию карты окружения [Riauelo L., Civera J., Montiel J. M. M. C2tam: A cloud framework for cooperative tracking and mapping //Robotics and Autonomous Systems. –

2014. – Т. 62. – №. 4. – С. 401-413.]. Все остальные агенты-клиенты будут выступать в роли поставщиков данных. Одной из основных задач агента-сервера, является замыкание циклов – объединение данных с различных агентов для поиска общих точек пересечения маршрутов и их зацикливания. Подход к робастному замыканию циклов на основе EM-алгоритма является одним из перспективных при организации кооперативных SLAM-алгоритмов [Dong J. et al. Distributed real-time cooperative localization and mapping using an uncertainty-aware expectation maximization approach //2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – IEEE, 2015. – С. 5807-5814.]. Централизованный подход не всегда эффективен - в случае отказа агента-сервера требуется произвести смену ролей и переназначить ведущего агента в группе. Проблемы, связанные с использованием централизованных алгоритмов в адаптивных КФС с динамическим перераспределением ролей и задач частично могут быть решены за счет применения децентрализованных SLAM-алгоритмов [Lazaro M. T. et al. Multi-robot SLAM using condensed measurements //2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. – IEEE, 2013. – С. 1069-1076.].

В работе [Nerurkar E. D., Roumeliotis S. I., Martinelli A. Distributed maximum a posteriori estimation for multi-robot cooperative localization //2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. – IEEE, 2009. – С. 1402-1409.] представлен подход к кооперативной локализации с помощью оценки апостериорного максимума (MAP estimation). Данные и вычисления распределяются между роботами. Распределенное хранение ресурсов [Cunningham A., Indelman V., Dellaert F. DDF-SAM 2.0: Consistent distributed smoothing and mapping //2013 IEEE international conference on robotics and automation. – IEEE, 2013. – С. 5220-5227.], позволяет параллельно обрабатывать данные, локально доступные для каждого робота. Распределенный алгоритм сопряженных градиентов уменьшает ресурсоемкость расчетов оценки апостериорного максимума, используя все доступные вычислительные ресурсы в группе роботов. Помимо вычислений на различных агентах также необходимо производить распределенное динамическое сшивание карт, например, на основе алгоритмов консенсуса, которые не зависят от какой-либо конкретной топологии сети роботов [Aragues R., Cortes J., Sagues C. Distributed consensus on robot networks for dynamically merging feature-based maps //IEEE Transactions on Robotics. – 2012. – Т. 28. – №. 4. – С. 840-854.].

Оперативность принятия решений при реализации SLAM-алгоритмов в группе роботов зависит от качества связи. Размер пакетов в работе [Paull L. et al. Communication-constrained multi-AUV cooperative SLAM //2015 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA). – IEEE, 2015. – С. 509-516.] масштабируется линейно с количеством наблюдаемых признаков, и константно с размером группы роботов. Благодаря оптимальному алгоритму формированию пакетов связи в мобильной распределенной КФС возможно поддерживать баланс между скоростью передачи данных, их распределению по определенным узлам и времени обработки, что положительно влияет на скорость выполнения распределенных SLAM-алгоритмов.

Децентрализованные SLAM-алгоритмы состоят из множества мелких частей, рассмотренных выше и для их полноценного функционирования, требуется разработка достаточно сложных многоуровневых моделей. Поэтому при обеспечении мобильности распределенной КФС, сформированной на базе группы РС, в условиях динамического окружения для решения задач построения карты, локализации и навигации необходимо будет комбинировать рассмотренные выше SLAM-алгоритмы для обеспечения адаптивности системы к различным ситуациям.

Ниже в плане работ перечислены научные результаты и организационные мероприятия, которые будут выполнены в рамках проекта в течение 2020-2023 гг. В плане подчеркнута новизна предлагаемых моделей и программного обеспечения.

План работ в рамках проекта

1-ый год реализации проекта:

1. Анализ современного состояния исследований в контексте проблемы выбора стратегий поведения КФС при нарушении целостности данных в случае временной потери связности системы, а также проблемы самоорганизации КФС при отказе отдельных её узлов и/или компонентов.

2. Разработка метода автономного распределения инфраструктурных ролей между множеством компонентов КФС, представленных гетерогенными РС, в условиях изменяющегося окружения и возможного выхода из строя отдельных узлов КФС.

3. Разработка структурно-параметрической модели автономной мобильной КФС, ориентированной на функционирование на открытых территориях в условиях динамического окружения и решение прикладных задач, выполняемых посредством согласованного взаимодействия групп мобильных агентов, представленных гетерогенными РС.

4. Разработка тестовых сценариев апробации предложенной структурно-параметрической модели КФС для решения прикладных задач в условиях динамического окружения, выполняемых посредством согласованного взаимодействия групп мобильных агентов, представленных гетерогенными РС.

5. Подготовка серии статей по результатам текущих исследований в журналах и трудах конференций, индексируемых в РИНЦ, Scopus/WoS.

6. Разработка веб-страницы и материалов, посвященных проблематике проекта и представляющих его текущие научные результаты.

2-ой год реализации проекта:

1. Разработка подхода к адаптивному управлению инфраструктурой КФС, сформированной на базе множества гетерогенных РС, ориентированного на обеспечение отказоустойчивости системы в изменяющейся среде, а также в случае утраты работоспособности отдельными РС.

2. Разработка метода построения маршрутов движения группы РС и неколлизионного перемещения членов группы по сформированным маршрутам на основе метода [Wang H., Rubenstein M. Walk, Stop, Count, and Swap: Decentralized Multi-Agent Path Finding With Theoretical Guarantees //IEEE Robotics and Automation Letters. – 2020. – Т. 5. – №. 2. – С. 1119-1126], модернизировав его для применения в условиях наличия динамических препятствий.

3. Разработка метода автономного распределения прикладных задач между множеством агентов, представленных гетерогенными РС на основе модернизации алгоритма PSO-based Dynamic Distributed Algorithm посредством использования подходов на основе клеточной декомпозиции в процессе распределения РС по кластерам.

4. Проектирование модели РС, позволяющей реализовать автоматизированную замену отдельных модулей РС посредством других роботизированных агентов.

5. Разработка программного обеспечения для распределенного решения задач построения карты территории, локализации компонентов системы, навигации РС, а также обеспечения анализа геометрических характеристик внешней среды в режиме реального времени на основе применения распределенных SLAM-алгоритмов.

6. Подготовка серии статей по результатам текущих исследований в журналах и трудах конференций, индексируемых в РИНЦ, Scopus/WoS.

7. Сопровождение веб-страницы и разработка материалов, посвященных проблематике проекта и представляющих текущие научные результаты.

3-ий год реализации проекта:

1. Разработка прототипа мобильной КФС с использованием разработанных на предыдущих этапах реализации проекта методов, подходов и программных средств, отличающейся устойчивостью к отказу компонентов системы, представленных множеством гетерогенных РС, а также способностью функционировать на открытых территориях в условиях динамического окружения.

2. Разработка методики тестирования и критериев оценки выполнения сценариев апробации разработанного прототипа мобильной КФС для решения прикладных задач в условиях динамического окружения.

3. Тестирование разработанного прототипа мобильной КФС в искусственном окружении с параметрами, приближенным к реальным условиям функционирования, анализ полученных результатов.

4. Подготовка монографии, посвященной анализу проблем разработки мобильных КФС, предназначенных для работы в условиях динамического окружения и повышенных рисков выхода из строя отдельных компонентов системы, и решениям, предложенным в результате выполнения проекта.

5. Сопровождение веб-страницы и разработка материалов, посвященных проблематике проекта и представляющих текущие научные результаты.

6. Подготовка серии статей по результатам текущих исследований в журналах и трудах конференций, индексируемых в РИНЦ, Scopus/WoS.