

МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Стародубцев Ю. И.¹, Лепешкин О. М.², Худайназаров Ю. К.³

DOI:10.21681/3034-4050-2025-5-2-17

Ключевые слова: модель, система управления, робототехнические комплексы, задачи управления, структура системы управления, принципы управления, информационный процесс, информационно-управляющая система, суперсистема.

Аннотация

Цель: на основе общих теоретических положений и актуальных релевантных работ раскрыть содержательную (вербальную) модель системы управления робототехническими комплексами (РТК).

Метод: на основе системного подхода выполнен анализ методов, моделей и технологий управления современных и перспективных РТК. Методом классификации и методом аналогий определены основные категории предметной области управления РТК специального назначения (СН).

Результат: приведены результаты анализа известных моделей, разработанных при проектировании и исследовании систем управления РТК СН. Определены основные принципы управления и технологии, применяемые для обеспечения управления РТК СН.

Научная новизна: заключается в обобщении и систематизации известных моделей и методов, а также технологий управления РТК СН. Сформирована вербальная модель системы управления РТК СН. Известные в настоящее время модели СУ РТК СН не в полной мере характеризуют свойства системы управления РТК как интеллектуальной системы со свойствами суперсистемы.

Введение

Наиболее общие законы управления системами различной природы изучаются в кибернетике, общей теории систем, общей теории управления. При исследовании особенностей современных информационных технологий, используемых при управлении робототехническими средствами и комплексами, а также прикладных аспектов систем специального назначения интерес представляют теория информации, теория координации, теория многоагентных систем и теория управления в системах военного назначения.

Модель управления представляет собой формализованное представление, отражающее основные существенные свойства информационного процесса в системе управления. По степени формализации различают модели вербальные (содержательные), концептуальные и формальные (математические). Содержательная модель всегда избыточна и представляет собой описание процесса и объекта на естественном языке. Основными требованиями к вербальной модели являются полнота и отсутствие противоречивости.

В современных условиях безопасность, надежность и устойчивость применения современных технологий, особенно искусственного интеллекта в РТК СН, ставится во главу угла регулирования данной сферы, в том числе в аспектах сбора и обработки информации [1].

Особое внимание научной общественности обращают на себя проблемы внедрения новых технологий в системы управления РТК, включая такие ключевые элементы как большие генеративные модели, фундаментальные модели и перспективные методы искусственного интеллекта [2].

Общие теоретические основы управления системами СН

Выделяют следующие основные функции управления системами специального назначения:

- 1) формирование и обработка информации о состоянии объекта управления (ОУ) и окружающей среды;
- 2) сравнительная оценка существующего и желаемого состояния объекта управления, выработка информационных управляющих

¹ Стародубцев Юрий Иванович, доктор военных наук, профессор, профессор кафедры Безопасности инфокоммуникационных систем специального назначения Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: starodub@mail.ru

² Лепешкин Олег Михайлович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры Информационных технологий и систем безопасности Государственного гидрометеорологического университета, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: lepechkin1@yandex.ru

³ Худайназаров Юрий Кахрамонович, кандидат технических наук, докторант кафедры безопасности инфокоммуникационных систем специального назначения Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: yu-78@ya.ru

воздействий для перевода объекта управления в состояние, приближающееся к цели управления;

- 3) доведение выработанных информационных воздействий до объектов управления⁴.

В связи с этим существуют прямые и обратные связи между объектом управления и управляющим объектом (УО).

Управление имеет циклический характер и включает три основных этапа (фазы)⁵:

- 1) определение цели управления, оценка обстановки;
- 2) обработка информации, формирование вариантов и принятие решения;
- 3) реализация принятого решения.

Путь по которому циркулирует информация между ОУ и УО называют контуром управления, в зависимости от особенностей которых различают одноконтурное и многоконтурное управление, замкнутые, вложенные и разомкнутые (открытые) системы.

С одной стороны, чем большей информацией располагает УО, тем более обоснованным может быть решение. Однако на получение

информации (формирование информационной базы управления) расходуются определенные ресурсы (материальные, энергетические, время, пропускная способность каналов и сетей связи, вычислительные ресурсы средств обработки информации). Существует предел в их затратах, за которыми незнание каких-либо сведений об обстановке становится целесообразнее знания. Поэтому одним из условий эффективного управления является оптимальная информированность управляющего объекта.

Оценка качества управления может быть одно или многокритериальной. В зависимости от заданных требований к управлению (устойчивость, непрерывность, оперативность, скрытность). Основой для формирования оценки качества управления со стороны управляющего объекта является вектор ошибки управления. Он описывает отклонение параметров реального процесса (вектора состояния) от предписанного вектором целей идеального режима и также несет в себе некоторую неопределенность, «унаследованную» от вектора состояния [6].



Рис. 1. Классификация задач управления РТК СН.

4 Попов А. А., Телушкин И. М., Бушуев С. Н. Основы общей теории систем. СПб.: ВАС, 1992. 248 с.

5 Боговик А. В., Игнатов В. В. Теория управления в системах военного назначения: Учебн. — СПб.: ВАС, 2008. — 460 с.

Характеристика задач управления РТК СН

Решение всех задач управления направлено на выработку управляющих воздействий. Основные классификационные признаки задач управления следующие: принадлежность к звену управления и функциональным подсистемам управления; периодичность решения; степень определенности исходной информации; принадлежность к форме мышления; характер преобразования информации; вид постановки и используемый математический аппарат. Наиболее широким классом задач являются расчетные задачи, они могут быть следующих типов: согласования действий, распределения ресурсов, массового обслуживания, состязательные, маршрутизации (рис. 1). Общая характеристика информационных процессов в системах управления РТК СН.

В общем случае информационный процесс (ИП) есть целенаправленная совокупность операций по преобразованию информации, реализуемых в определенной среде, начиная с момента поступления ее в систему и заканчивая выдачей ее пользователю.

Алгоритмом управления называют совокупность правил, в соответствии с которыми информация состояния преобразуется в командную информацию. Для удобства исследования ИП целесообразно их классифицировать следующим образом (рис. 2)⁴.

Анализ информационных процессов в системе управления включает в себя следующие аспекты: содержательный, формальный, коммуникационный и временной.

Содержательный аспект включает в себя структурное, статистическое, семантическое и прагматическое направления.

В рамках структурного направления анализируются строение массивов информации, их взаимосвязь и объемные характеристики, а также вопросы обеспечения безопасности информации.

Статистическое направление оперирует понятием энтропии. Степень неопределенности состояния объекта управления определяется вероятностными характеристиками.

Семантическое направление учитывает смысл, содержательность сообщений. Методы точного количественного определения смыслового содержания информации в настоящее время еще недостаточно разработаны. Р. Карнапп и Бар-Хиллел предложили определять величину семантической информации через логическую вероятность, которая представляет собой степень подтверждения той или иной гипотезы. Мера семантической информации учитывает не только структуру и содержание самого сообщения, независимого от получателя, но и запас знаний и предположений (гипотез) получателя. Аксиологическая вероятность при этом характеризует степень «ожидаемости» реализации гипотезы с учетом субъективных оценок управляющего объекта об объекте управления.

Прагматический подход к определению количества информации учитывает ее ценность и полезность.

Формализация информационных процессов управления РТК СН

Любая информационная единица (условный информационный квант) (I), обладающая некоторой ценностью, характеризуется содержанием (S), формой (F), пространственным расположением (L) и временем (T), $I = \{S, F, L, T\}$.

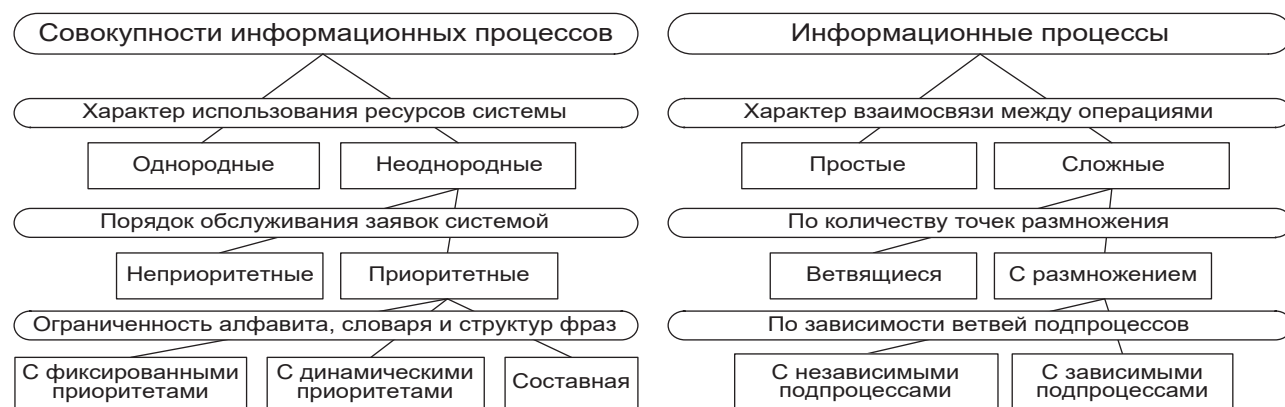


Рис. 2. Классификация информационных процессов в системе управления РТК СН

Каждая из характеристик может изменяться в процессе преобразования информации. Различают следующие виды преобразований информации:

- 1) содержательное (семантическая обработка, получение новой информации);
- 2) преобразование формы (кодирование, декодирование);
- 3) преобразование в пространстве и времени (передача, хранение).

Элементарным действием в информационном процессе (квантовым преобразованием) является операция. Основные атрибуты операции – информация (объект преобразования), оператор Q (субъект преобразования, $Q \rightarrow (S|F|L|T)$) и цель C (требования к преобразованию). Информационная операция характеризуется типом (V), сложностью (U , $U = \langle V, C \rangle$), временем (t , $t = \langle U, I \rangle$), ресурсоемкостью (R).

Информационный процесс структурно можно представить следующим множеством подпроцессов (рис. 3).

В зависимости от вида преобладающих преобразований выделяют следующие подпроцессы (процессный базис системы управления):

- 1. Формирование (подготовка) информации, при котором доминирующим является преобразование формы (F).
- 2. Передача информации с целью переноса от источника к потребителю, при которой доминирующим является преобразование в пространстве (L).

- 3. Семантическая обработка содержания информации (S) с получением новой информации, на основе которой формируется управляющее воздействие. Этот подпроцесс идентифицирует всю систему управления и в основном определяет ее эффективность.
- 4. Хранение информации с целью обеспечения существования информации во времени, при котором основным является преобразование во времени (T).
- 5. Формализация процесса управления предполагает выделение задач, их постановку и алгоритмизацию. Процесс считается полностью формализованным, если алгоритмы к задачам представлены математически и при решении задач уже не нужно учитывать их физическое содержание.

Разделение процессов принятия и реализации решений возникает в процессе управления естественным образом и обуславливает двойственную природу информационно-управляющих систем, что отражается и на архитектуре, включающей в себя систему поддержки принятия решений (СППР) и автоматизированную систему управления (АСУ). СППР обеспечивают сбор, обработку информации об объекте управления и условиях среды функционирования, а также обоснование выбора оптимального варианта управления [5].

Задача принятия решения в условиях неопределенности требует учета разновидностей неопределенности, характерных для различных информационных процессов в управлении РТК СН. Виды неопределенности можно представить в виде дерева (рис. 4).



Рис. 3. Структура информационного процесса в системе управления РТК СН



Рис. 4. Классификация неопределенности описания задач управления РТК СН

Организация информационных процессов в СУ РТК СН

Под организацией информационного процесса понимается процесс создания, обеспечения эффективного функционирования и совершенствования системы управления.

В сохранении целостности системы решающая роль принадлежит информационным связям между элементами системы, от эффективности организации информационного процесса в СУ во многом будет зависеть выполнение основных функций управления: прогнозирования, планирования, оперативного управления, учета, контроля и анализа.

Информационный процесс преобразования информации состояния в командную в системе управления является выражением информационного аспекта управления. Структурно его можно представить совокупностью взаимосвязанных процессов сбора, обработки, выдачи должностным лицам информации в интересах управления, а также процессов принятия решений, доведения до объектов управления и контроля их исполнения.

Целью организации ИП является обеспечение должностных лиц системы управления командной информацией от вышестоящих органов управления и информацией состояния об объектах управления, выполнение оперативно-технических расчетов для оценки обстановки, принятия решений, постановки задач объектам управления с требуемыми значениями показателей устойчивости, оптимальности, непрерывности, оперативности, скрытности и адекватности. Для управления РТК СН критичным является скрытность и имитозащищенность процесса управления [3]. Кроме того для систем реального времени непринятое решение становится более критичным, чем принятое неоптимальное решение [4].

Управление информационным процессом заключается в целенаправленном и постоянном воздействии должностных лиц пунктов управления на элементы системы автоматизации на основе сбора и обработки информации о них в ходе операции.

Целью управления информационным процессом является своевременное и качественное

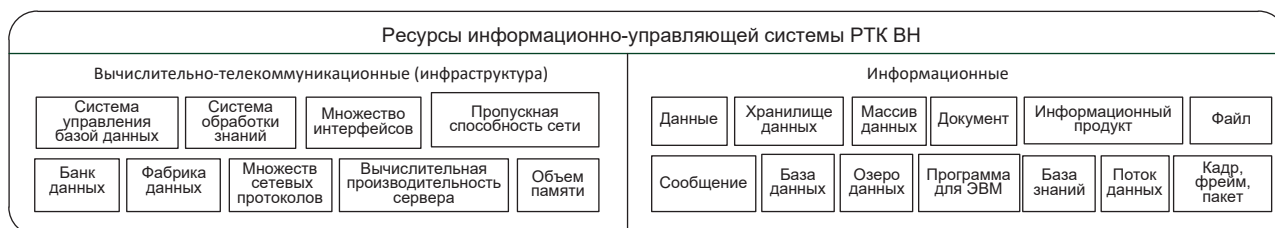


Рис. 5. Ресурсы информационно-управляющей системы РТК СН (разработано авторами)

удовлетворение информационных потребностей лиц, принимающих решение. Необходимость в управлении информационным процессом обусловлена: целенаправленностью информационного процесса в АСУ; требованиями адаптации информационного процесса к условиям обстановки; выбором из имеющихся вариантов организации информационного процесса более предпочтительного.

К задачам управления информационным процессом относятся задачи анализа (расчет показателей, характеризующих качество функционирования АСУ при известной ее конфигурации и заданных параметрах компонентов, а также известных параметрах потока заявок); задачи синтеза (определение оптимальной конфигурации вычислительных подсистем, их числа и размещения, территориальной привязки, распределения работ между вычислительными мощностями системы, определение топологии и пропускных способностей каналов связи, распределение резервных мощностей в системе).

Количественные характеристики информационного процесса могут быть получены на основе моделей составляющих этапов. Эти модели должны отображать процесс потребления ресурсов информационно-управляющей системы (рис. 5).

В общем случае для реализации некоторых операций, подпроцессов и процессов могут потребоваться несколько типов ресурсов. В большинстве случаев можно выделить какой-то основной ресурс, который является критическим в плане совместной реализации нескольких операций, подпроцессов или процессов. Другие совместно используемые ресурсы при описании взаимодействия ИП либо вообще могут не учитываться, либо учитываться косвенно путем введения некоторых ограничений.

Структура процесса принятия решения в СУ РТК СН характеризуется следующими параметрами: субъект S , принимающий решение; множество допустимых решений; критерий эффективности; возмущающие, неконтролируемые, неуправляемые факторы; информированность субъекта управления; возможности субъекта управления по получению дополнительной информации; возможности по реализации выбранного решения; решающее правило выбора оптимального решения.

Процессы обоснования и принятия решения состоят из циклически повторяющихся действий, обеспечивающих выработку и коррекцию альтернативных вариантов достижения соответствующей цели, составляющих содержание циклов выработки варианта. Моменты, в которых принимается одно из решений (повторить расчеты, откорректировать вариант, принят вариант) для его реализации на следующем этапе функционирования системы управления называются **точками принятия решения**.

Под операцией в СУ РТК СН понимают этап функционирования системы, ограниченный достижением определенной цели. Операция реализуется системой, обладающей некоторым ресурсом, который расходуется в ходе операции.

При моделировании системы управления РТК СН целесообразно дополнительно к традиционным положениям теории систем, теории управления и теории принятия решения использовать основные положения и современное представление об управлении сложными организационно-техническими системами в достаточно общей теории управления [6].

Система управления РТК СН как суперсистема

Дополнительно к традиционным представлениям кибернетики, теории систем и теории управления в системах военного назначения, в достаточно общей теории управления рассматривается постановка двух задач управления: управление и самоуправление. При этом управление в принципе невозможно, если поведение объекта непредсказуемо в достаточной для этого мере. Поэтому, ключевым понятием достаточно общей теории управления является **устойчивость по предсказуемости** поведения объекта управления.

Состояние объекта управления и среды не может быть оценено идеально по причине искажения сигналов в среде, ограниченной чувствительностью измерительных средств (датчиков), ошибками при передаче и обработке информации, а также при восприятии управляющим объектом, поэтому существует объективная неопределенность оценки истинного состояния объекта управления и среды.

Система стереотипов отношений и преобразований информационных модулей, составляющих информационную базу управляющего

объекта, моделирующего на их основе поведение объекта управления в среде называют **полной функцией управления** (ПФУ) [6]:

1. Оpoznание факторов среды, в которой функционирует объект управления.
2. Формирование стереотипа распознавания воздействующих факторов среды.
3. Формирование вектора целей управления (самоуправления) в отношении каждого воздействующего фактора (решение задачи об устойчивости по предсказуемости поведения объекта с учетом воздействующего фактора).
4. Формирование концепции управления и частных целевых функций управления с заданным качеством на основе решения задачи об устойчивости по предсказуемости.
5. Организация (реорганизация) управляющих структур, несущих целевые функции управления;
6. Контроль за деятельностью управляющих структур и координация их взаимодействия;
7. Поддержание управляющих структур в работоспособном состоянии или ликвидация в случае ненадобности.

Кроме известных способов централизованного, децентрализованного, матричного управления в зависимости от способа распространения управляющей информации [6] различают структурное и бесструктурное управление. Бесструктурное управление характерно для больших организационно-технических систем, однако находит в настоящее время применение в информационно-телекоммуникационных сетях, например, при широкополосной передаче сообщений в соответствии с сетевыми протоколами.

Важным дополнением, которое отражает существенные свойства больших разнородных групп РТК является используемое в [6] понятие суперсистемы. **Суперсистема** – это множество элементов, хотя бы частично функционально аналогичных друг другу в некотором смысле и потому хотя бы отчасти взаимозаменяемых. Все элементы суперсистемы самоуправляемы (или управляемы) в пределах высшего объемлющего управления на основе информации, хранящейся в их памяти; каждый из них может выдавать информацию другим элементам своего множества и окружающей среде и потому способен к управлению, и через него возможно управление

другими элементами и окружающей средой; все процессы отображения информации как внутри элементов, так и между ними в пределах суперсистемы и в среде, ее окружающей, подчинены вероятностным предопределенностям, выражающимися в статистике.

Также для описания современных информационно-телекоммуникационных сетей, использующих технологии **SDN** и **NFV**, технологии наложенных сетей, облачные технологии, важным дополнением общей теории систем является используемое в [6] понятие виртуальности структур. Под **виртуальностью структур** понимается существование элементов, в разные моменты времени принадлежащих к нескольким суперсистемам, и как следствие предполагает существование структур, внезапно появляющихся и исчезающих. Аналогичные свойства имеют процессы виртуализации устройств, сетей передачи данных, а также процессы супервизорного управления виртуальными операционными системами и сетями с виртуализацией функций.

Кроме того, в достаточно общей теории управления используется понятие **эволюционирующая суперсистема**, которая во-первых, обладает запасом устойчивости по отношению к воздействию среды; а во-вторых, некоторым потенциалом развития своих качеств за счет изменения организации внутри системы и внутри ее элементов.

Освоение потенциала развития суперсистемы за счет изменения внутренней организации и ее элементов сопровождается возрастанием запаса устойчивости в отношении воздействующих факторов и ростом производительности суперсистемы.

Запас устойчивости суперсистемы в отношении ее пребывания в среде определяется общей численностью элементов, не задействованных для компенсации деструктивных воздействий среды. Этот запас устойчивости одновременно определяет и возможную производительность суперсистемы в отношении среды. Освоение потенциала развития суперсистемы – выведение ее на максимальную производительность в отношении среды соответственно вектору целей. Оценками качества управления суперсистемой в таком случае являются запас устойчивости и производительность в отношении среды [6].

Если рассматривать большую группу РТК как суперсистему, то первоначально двухуровневая структура управления суперсистемой («элемент-суперсистемы») по мере



Рис. 6. Обобщенная схема организации управления РТК СН (разработано авторами)

развития становится трехуровневой («элемент-фрагмент (кластер)-суперсистема»), а затем переходит в иерархию структур, непрерывно изменяющуюся в ходе взаимоперетекания процессов бесструктурного и структурного управления [6].

Приведенные категории адекватно отражают особенности информационных процессов в системе управления большой группировки РТК СН, что обуславливает возможность применения достаточно общей теории управления для формализации объекта исследования, такого как группа РТК СН (рис. 7).

Анализ известных вербальных моделей СУ РТК СН

Моделированию управления в сложных иерархических системах и системах управления РТК посвящены работы Лепешкина О. М., Маслوبةва А. В., Тачкова А. А., Свиридова В. В., Иванова С. В.

Проведение анализа на основе системного подхода существующих СУ РТК СН показал иерархическую структуру их построения с ярко выраженными уровнями, элементами управления, функциональным набором целей, требований, регламентов, задач по их решению, а также существующим набором территориально распределенных ресурсов. Поэтому для обеспечения управления в сложных

иерархических системах возникает необходимость согласования функциональных требований между уровнями управления для достижения целевой функции системы в целом.

Для создания эффективных механизмов обеспечения условий функционирования сложных иерархических систем недостаточно использовать подход, реализующий лишь методы, основанные на анализе, т. к. эти рамки могут привести к недостижению требуемого результата по управлению (не обеспечивается адекватность процесса), а также восстановления способности нормального функционирования сложных иерархических системах после изменения обстановки. Это обусловлено необходимостью согласования лицом, принимающим решение (ЛПР) ресурсов на каждом этапе выполнения регламента, что приводит к увеличению времени принятия решения ЛПР, появлению нештатных состояний и разрушению процесса управления сложных иерархических систем.

При таком подходе к исследованию функционирования сложных иерархических систем проводится анализ влияния совокупности параметров ИУС, внешней среды и множества задач информационного обмена на возможность и качество выполнения регламентов.

При этом вопросы обеспечения управления оказываются связанными с возможностью

перераспределять ресурсы системы на решение тех или иных задач, что приводит к двум принципам обеспечения управления многофункциональных систем:

- перераспределение ресурсов после отказа одного или нескольких элементов между остальными элементами системы должно проводиться таким образом, чтобы показатель качества системы был максимальным;
- сокращение множества решаемых задач должно начинаться с менее важных по мере выхода из строя элементов системы [4].

В работах Макаренко С. И. [7] рассматриваются СУ РТК на примере беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) двух вариантов: большие БПЛА, принципы построения которых соответствуют пилотируемым и малые БПЛА, имеющие иерархическую трехуровневую компоновку:

- уровень отдельных устройств (нижний);
- уровень управления полетом с помощью бортовых контроллеров, модулей ввода-вывода сигналов и коммутационного оборудования (средний);
- уровень диспетчеризации и администрирования БПЛА, обеспечивающий взаимодействие оператора через программный интерфейс с контроллерами среднего уровня (верхний).

Особенности группового управления РТК связаны с взаимодействием РТК между собой, а также обеспечением доступа РТК к групповым информационным ресурсам. В работе [8] рассматривается программно-коммуникационная инфраструктура взаимодействия мобильных роботов, определены требования для реализации концепции облачной робототехники ограничивающие применение существующих технологий межмашинного обмена. Авторами разработана концептуальная модель и вариант архитектуры программно-коммуникационной инфраструктуры для поддержки парных взаимодействий роботов между собой и с облачными сервисами и ресурсами. Методологической базой исследования является теория многоагентных систем, теория коллективного поведения агентов, модели взаимодействия распределенных сущностей в беспроводных сетях с динамической топологией.

Введено понятие абстрактного пространства, включающее робота, его информационное, физическое и коммуникационное

окружение. В этой связи развивается научное направление облачной робототехники, что позволяет получить следующие преимущества:

1. Перенос трудоемких вычислений на виртуальные машины, упрощение программного обеспечения и энергопотребления робота.
2. Доступ к большому объему данных.
3. Доступ к широкому перечню процедур, расширяющих способности робота и варианты его поведения.
4. Коллективное обучение роботов.
5. Дистанционное обновление процедурных знаний робота.

Показано, что при реализации концепции облачной робототехники с помощью известных методов и технологий возникает проблема параллельного или конкурентного доступа к данным и проблема координации параллельных потоков.

Предложенная концептуальная структура системы группового управления роботами включает в себя пять уровней:

1. Уровень поддержки командной работы.
2. Уровень сервисной инфраструктуры.
3. Уровень транспортной инфраструктуры.
4. Уровень исполнения внутренних агентов.
5. Уровень физического управления роботом.

Особенности РТК ВН при их групповом применении учитываются в подходах и моделях, разрабатываемых в исследованиях Тачкова А. А., Максимова А. А., Шеремета И. Б. Так в работе [9] представлена модель иерархической системы управления группой наземных робототехнических средств с комбинированной структурой системы управления. В модели учитываются ограничения по быстродействию, количеству управляемых объектов и функциональной гибкости, а также территориальная распределенность РТК. Предложена конечно-автоматная модель для описания взаимодействия РТК в группе путем обмена сообщениями. Комбинированный подход к построению структуры системы управления предполагает, что оператор ставит задачу для группы РТК и контролирует ход ее выполнения. Задачи для отдельных РТК автоматически синтезируются с помощью специального транслятора, преобразующего решение оператора в сеть Петри. Затем задачи декомпозируются с учетом заданных типовых алгоритмов в элементарные действия. Общий алгоритм работы системы управления включает формирование оператором с помощью

программного интерфейса групповой задачи, трансляцию групповой задачи в задачи отдельных РТК, формирование элементарных действий РТК, выполнение элементарных действий РТК, контроль оператором выполнения отдельных задач.

В ходе выполнения элементарных действий РТК обмениваются информацией о местонахождении, корректируют скорость и направление движения в группе.

Разработке моделей системы управления РТК в условиях неопределенности посвящены работы Зайцева А.В., Канушкина С.В., Емельянова С.В. Так в работе [10] под неопределенностью понимается ситуация полного или частичного отсутствия информации о вероятности будущих событий. Автором определены следующие виды неопределенности при управлении мобильными РТК: **параметрическая, функциональная, структурная, сигнальная**. Отсутствие полных сведений относительно параметров или характеристик объекта управления приводит к структурной параметрической неопределенности математической модели. Основными факторами, влияющими на появление разброса параметров в системе (параметрической неопределенности) являются неточность проектирования, технологические, эксплуатационные.

Область применения предложенного алгоритма ограничена одиночными или малыми группами РТК, неопределенность в управлении которыми может быть компенсирована за счет сокращения цикла реагирования на возмущения. Для групп гетерогенных РТК большого порядка необходимо исследовать возможности применения способа предиктивного управления (по схеме предиктор-корректор) [6], который позволяет за счет предсказания наиболее вероятного развития ситуации с помощью заблаговременных управляющих воздействий сохранить в заданных пределах параметры объекта до проявления его реакции на возмущение.

Применение РТК ВН в составе разнородной группы является приоритетным направлением развития практики и теории управления, а специфика данного направления требует учета неопределенностей, обусловленных не только динамичностью, но и конфликтностью условий функционирования. В связи с этим, актуальной задачей является управление движением в разнородной группе мобильных РТК с обеспечением скрытого и имитозащищенного взаимодействия между ними,

а также с оператором. В данном направлении известны научные работы Будко П.А., Жукова Г.А., Диане С.А.К., Исхакова А.Ю., Исхаковой А.О. Так в работе [11] представлена модель защищенного межмашинного обмена при их коммуникации вне зоны контролируемой территории. В качестве целевой функции защищенности задается минимизация количества ретрансляций радиосигналов между роботами. Также в качестве целевой функции может быть оптимизация маршрутов движения роботов для уклонения от расположенных на местности препятствий на основе комбинаторных методов с помощью имитационного моделирования и эволюционного программирования.

В то же время в используемой авторами модели недостаточно учтены взаимосвязи показателей скрытности и безопасности с показателями качества функционирования элементов и системы управления РТК в целом, что ограничивает область применения разработанных имитационных моделей и программных средств.

Предложенная в работе [12] модель системы управления мобильными РТК различного назначения отражает структуру типовой системы управления (СУ) РТК, а также зависимость показателей эффективности ее функционирования от параметров, характеризующих облик системы.

Предложенная модель не в полной мере может использоваться для анализа и синтеза систем управления группами РТК. Также ограничивает область применения модели недостаточно учитываемые зависимости показателей качества функционирования СУ РТК от скорости движения РТК и допустимого кругового вероятного отклонения его от цели.

Одной из актуальных задач исследования СУ РТК является разработка алгоритмов координации их взаимодействия в группе для достижения максимального значения целевого показателя. Указанная задача исследуется в работе [13]. Авторами предложена методика обоснования структуры распределенной системы управления группой ударных БПЛА и алгоритма координации их взаимодействия при работе в автономном режиме. Основные недостатки существующих СУ группами РТК обусловлены ее централизованной структурой. Для действий группы РТК за пределами контролируемой зоны каналы управления и передачи данных могут быть легко обнаружены, подавлены и перехвачены средствами

радиотехнической разведки и радиоэлектронной борьбы. Применение децентрализованной структуры СУ РТК позволяет обеспечить скрытность и устойчивость управления группой РТК. В работе рассматривается сценарий преодоления группой РТК зоны препятствий и ее самоорганизация для выполнения групповой задачи за пределами контролируемой зоны. Для самоорганизации группы РТК важным условием является идентификация РТК в группе и распределение задач между РТК, оставшимися работоспособными после преодоления зоны с препятствиями.

Предложенная модель не в полной мере учитывает особенности недетерминированной среды, в частности, формы и способы противодействия группам РТК, а также изменение целей. Оптимальность управления группами РТК для противодействия противнику определяется степенью обоснованности принимаемых решений на их боевое применение. Центральное место в этой задаче имеет процедура автоматического целераспределения группы в условиях недетерминированных динамических сред. Автором [14] предложен комплекс моделей и методика, позволяющие реализовать алгоритм адаптивного управления (самоорганизации) группы РТК в недетерминированных условиях обстановки при выполнении задач по охране критически важных объектов, учитывающий влияние условий местности и характеристик противника, а также соотношения численности сторон и тактико-технических характеристик стрелкового оружия.

Область применения представленного комплекса моделей и методики ограничена решением только одной задачи целераспределения при управлении группой РТК для выполнении задач охраны критически важных объектов. Не в полной мере отражается процесс внутреннего взаимодействия РТК в группе, синхронизации данных РТК о фоноцелевой обстановке при неопределенности информации (зашумленности) о своем положении, положении соседей и маршрутах движения.

В работе [15] представлена обобщенная модель роя РТК как системы искусственного интеллекта. Модель отражает основные характеристики группового движения и информационного взаимодействия РТК в группе, которые определяют необходимые условия формирования управления группой РТК при их роевом применении.

Принципиальным отличием роя РТК является консолидированное и согласованное по времени, месту и цели применение значительного количества РТК, которое обеспечивается системой управления. Управление может осуществляться оператором или программным средством с элементами искусственного интеллекта. Каждый РТК при этом управляется собственной бортовой автоматикой с элементами искусственного интеллекта (ИИ) более низкого уровня. В связи с этим, рой РТК – это всегда целенаправленно созданная, интеллектуальная, высокоавтоматизированная система, обеспечивающая рациональное поведение каждого РТК в ее составе во взаимодействии с другими РТК роя в интересах эффективного выполнения поставленной задачи в условиях стохастически меняющейся обстановки.

В зависимости от ситуации выделяют следующие типы роевой структуры: однородная структура с составе однотипных по характеристиками и предназначению РТК; разнородная структура; структура с централизованным внешним управлением; структура с централизованным автономным управлением (при необходимости с переходом управления от одного РТК к другому по заданному алгоритму); структура с децентрализованным внешним или автономным управлением.

Иерархическая организация управления применяется при необходимости управлять большой группой РТК, решающих одну сложную задачу, которую можно декомпозировать на несколько несвязанных между собой подзадач. В группе выделяют подгруппы РТК для выполнения подзадач, в каждой подгруппе определяется управляющий РТК (лидер), который имеет каналы связи только со своей подгруппой и управляющим РТК вышестоящего уровня иерархии.

В зависимости от способа управления роем носителями роевого ИИ могут быть наземный пункт управления, РТК-лидер (при иерархическом управлении), каждый РТК (при самоорганизующемся стайном управлении).

Авторами представлены в работе модель управления динамикой агента, модель управления роем на основе протокола локального голосования и обобщенная модель роя РТК как системы искусственного интеллекта. Однако, практически не решенными остаются проблемы формирования и управления роевыми структурами РТК.

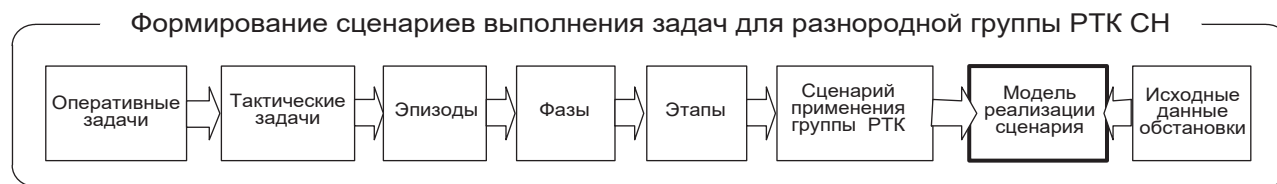


Рис. 7. Схема функционирования системы управления РТК СН при принятии решения (разработано авторами)

В качестве основных задач обеспечения применения роевых структур определены следующие: создание малоразмерных БПЛА-носителей искусственного интеллекта; разработка системы искусственного интеллекта для децентрализованного способа управления роем.

В работе [5] сформулирована модель развития информационно-управляющих систем (ИУС) на основе принципов датацентризма, сетецентризма и командноцентризма, а также представлений об информационно-управляющих системах как о кибернетических системах первого, второго и третьего порядка. Авторы разделяют системы управления на два класса: системы поддержки принятия решений (командноцентрические) и автоматизированные системы управления (датацентрические). Первые решают задачи информатизации процессов принятия решений, а вторые решают задачи информатизации процессов реализации решений.

Развитие систем командноцентрического (ситуационных центров) и датацентрического (датацентров) характера сопровождается их сетевизацией, то есть включением объекта управления в процессы принятия и реализации решений (сетецентрические информационно-управляющие системы) [5].

Обобщенная модель СУ РТК СН

Обобщая результаты анализа, можно утверждать, что в известных моделях управления РТК учитываются не все существенные особенности функционирования большой неоднородной группы РТК. В общем случае количество ОУ и УО, контуров и цикличность процесса управления могут изменяться при изменении цели и обстановки, а ОУ и УО могут меняться ролями. Понятие группировки РТК СН не в полной мере формализовано [16] и требует развития существующих вербальных и формальных моделей.

Можно выделить основные этапы функционирования СУ РТК СН на этапе принятия

решения (рис. 7): определение оперативных задач и трансляция их в тактические задачи (оперативно-тактические модели), формирование тактических задач (определение эпизодов фаз, этапов), формирование сценария применения группы (распределение ресурсов, определение состава группы, согласование регламентов действий), формирование модели реализации сценария (определение обеспечивающих действий и необходимых ресурсов с учетом данных обстановки).

Соответствующие основные функции, которые должна обеспечивать СУ РТК СН на этапах функционирования следующие:

1. Сбор информации. СУ РТК СН формирует базы данных от различных сенсоров и устройств, установленных на РТК, а также от внешних источников, таких как камеры наблюдения, GPS и т.д.
2. Получение оперативных задач, анализ данных обстановки. СУ РТК СН обеспечивает обработку и анализ собранных данных для обучения баз знаний и подготовки вариантов решений. Также выполняет трансляцию оперативных задач в оперативно-тактические модели и сценарии.
3. Планирование задач. СУ РТК распределяет задачи между видовыми группами РТК (космических аппаратов (КА), беспилотных авиационных систем (БАС), морских робототехнических комплексов (МРТК), наземных робототехнических комплексов (НРТК)) на основе алгоритмов, которые могут учитывать текущее состояние группы РТК, ее расположение, и другие релевантные данные.
4. Мониторинг и контроль. СУ РТК непрерывно отслеживает состояние и выполнение задач каждой видовой и межвидовой группой РТК, а также может вмешиваться в случае возникновения проблем. Обеспечивает формирование, поддержание функционирования или ликвидацию управляющих структур группами РТК.

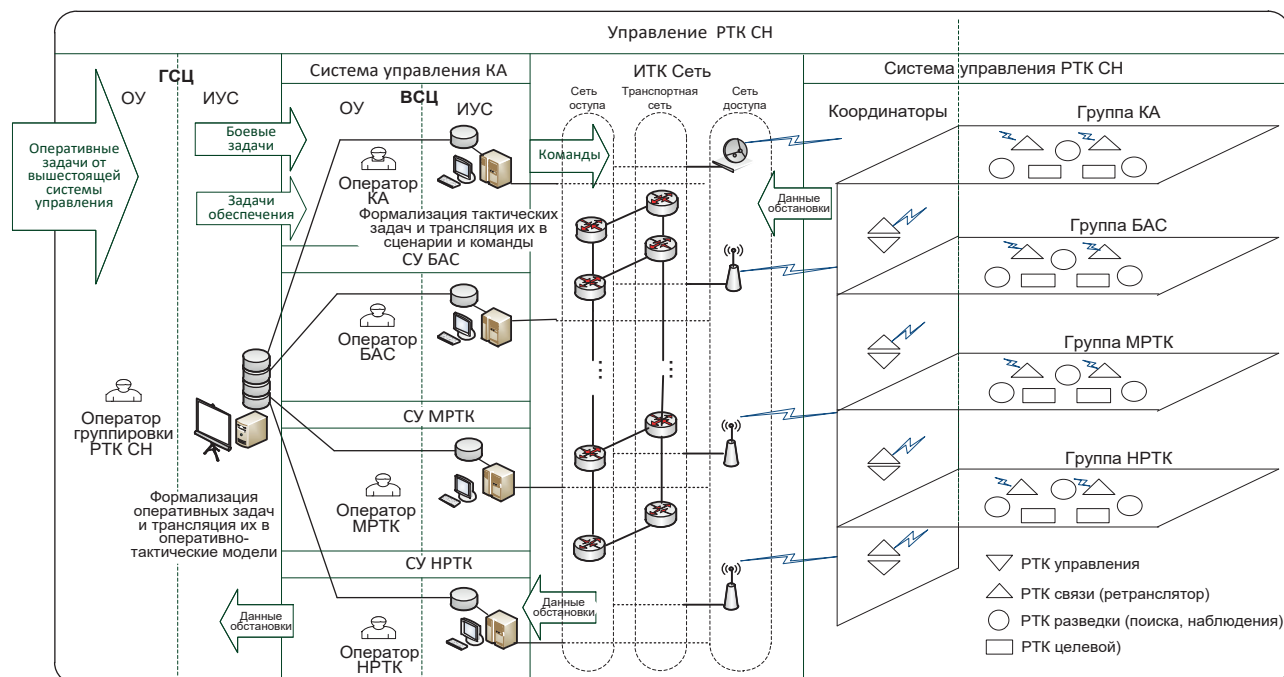


Рис. 8. Обобщенная схема функционирования системы управления РТК СН (разработано авторами)

С учетом проведенного анализа релевантных работ обобщенная модель СУ РТК СН (рис. 8) включает в себя следующие основные элементы:

1. Главный ситуационный центр (ГСЦ) выполняет функции: планирования, мониторинга и координации действий всей группировки РТК; управления общими задачами и распределения задач между группами; обработки данных, поступающих от всех групп РТК, с целью принятия решений.
2. Видовые ситуационные центры (ВСЦ) группами РТК выполняют функции: локального управления и контроля каждой видовой группы РТК; реализации задач, полученных от ГСЦ; обратной связи с ГСЦ, включая отчеты о выполнении задач и состоянии видовой РТК.
3. Информационно-телекоммуникационная сеть включает в себя: транспортную сеть и сеть доступа.
4. Сенсорные системы включают в себя: датчики и сенсоры, установленные на РТК для сбора информации о внешней среде и собственном состоянии (например, камеры, лидары, GPS, датчики положения и движения); средства обработки и передачи сенсорных данных для принятия решений и выполнения задач.
5. Аналитические модули могут включать в себя: модули для обработки данных и анализа

информации (например, модуль машинного зрения, модуль распознавания образов, алгоритмы машинного обучения); средства оптимизации маршрутов, прогнозирование ситуаций и принятие решений на основе анализа данных.

6. Интерфейсы пользователя включают в себя: консоли управления для операторов, где можно задавать задачи, контролировать состояние системы, получать отчеты и управлять отдельными РТК; графические интерфейсы, панели управления и системы визуализации.
7. Подсистема координации действий групп РТК и обеспечения безопасности (координаторы) могут включать: механизмы для предотвращения коллизий между РТК и с окружающей средой; средства аутентификации и защиты от несанкционированного доступа;
8. Энергетическая подсистема: источники питания для РТК и ситуационных центров; средства управления энергопотреблением и резервирования источников электроэнергии для устойчивой работы системы управления.

Таким образом, СУ РТК СН является многоуровневой динамичной организационно-технической системой, обеспечивающей формализацию оперативных задач, формирование тактических задач, определение

сценариев, эпизодов и фаз выполнения тактических задач, синхронизацию, координацию действий РТК в соответствии с заданными параметрами и регламентом сценария. В то же время, она должна обеспечивать возможность комбинирования различных схем управления (структурного и бесструктурного), адаптироваться к условиям обстановки с регулированием устойчивости и производительности системы.

Выводы

Выполненный анализ теоретических основ построения и функционирования систем управления сложными организационно-техническими системами показал необходимость учета новых существенных свойств объекта исследования. Группировка РТК СН в общем случае может насчитывать сотни, тысячи и десятки тысяч РТК. Характерные свойства такой группировки РТК вполне адекватно описываются в категориях достаточно общей теории управления. Для моделирования таких суперсистем целесообразно применение подходов и расширенных категорий

достаточно общей теории управления: бесструктурное управление, эволюционирующие суперсистемы, освоение потенциала развития, автосинхронизация. Описание и формализация процессов в суперсистемах имеет важное значение для проектирования систем управления РТК. Разработанная содержательная модель СУ РТК СН может использоваться в качестве исходных данных для концептуального моделирования современных и перспективных СУ РТК.

Для разработки методологии управления группировкой РТК СН как суперсистемой требуется формирование понятийного аппарата предметной области и применение системного подхода. В основе понятийного аппарата лежит модель тезауруса предметной области, его формирование предполагает обобщение существующих подходов, категорий и моделей кибернетики, общей теории систем, теории многоагентных систем, теории координации, теории искусственных нейронных сетей, а также стандартов в области технологий искусственного интеллекта.

Литература

1. Карцхия А. А., Макаренко Г. И. Правовые горизонты технологий искусственного интеллекта: национальный и международный аспект // Вопросы кибербезопасности. 2024. № 1. С. 2–14. DOI: 10/21681/2311-3456-2024-1-2-14.
2. Карцхия А. А., Макаренко Г. И. Правовые проблемы применения искусственного интеллекта в России // Правовая информатика 2024. № 1. С. 4–19. DOI: 10.21681/1994-1404-2024-1-4-19.
3. Стародубцев Ю. И., Лаута О. С., Худайназаров Ю. К. Особенности защиты информационных ресурсов систем управления робототехническими комплексами роботам // Телекоммуникации и связь. 2024. № 2. С. 43–52.
4. Burlov V. G., Lepeshkin O. M., Lepeshkin M. O., Gomazov F. A. The control model of safety management systems В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 8th International Scientific Conference «TechSys 2019» – Engineering, Technologies and Systems. 2019. С. 012088.
5. Купряшин Г. Л., Шрамм А. Е. О принципах датацентризма, сетцентризма и командноцентризма в контексте информатизации государственного управления // Государственное управление. Электронный вестник. 2019. № 76. С. 211–242.
6. Достаточно общая теория управления. (Вторая редакция 2003–2004 гг.) – М.: НОУ «Академия управления», 2011. – 416 с.
7. Макаренко С. И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам. Монография. – СПб.: Научное издание, 2020. – 204 с.
8. В. И. Городецкий, О. Л. Бухвалов. Модель и архитектура инфраструктуры системы группового управления роботами // Робототехника и техническая кибернетика 2017. № 1(14). С. 33–44.
9. Алексеев В. А., Яковлев Д. С., Тачков А. А. Моделирование иерархической системы управления группой наземных робототехнических средств // Инженерный журнал. 2018. № 4. DOI:10.18698/2308-6033-2018-4-1754.
10. Канушкин С. В. Управление робототехническими комплексами охранного мониторинга в условиях неопределенности // Правовая информатика 2019. № 2. С. 40–48.
11. Диане С. А. К., Исакова А. Ю., Исаковой А. О. Алгоритм сетцентрического управления движением группы мобильных роботов. Моделирование, оптимизация и информационные технологии 2022. № 10(1). С. 1–11

12. Березкин А. А., Вивчарь Р. М., Киричек Р. В. Модель системы управления мобильными роботизированными комплексами различного назначения // Электросвязь 2023. № 8. С.12–18.
13. Халимов Н. Р., Мефедов А. В. Распределенная сетевая система управления группой ударных беспилотных летательных аппаратов // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 3. С. 1–13.
14. В. В. Свиридов Методика оценки качества группового взаимодействия робототехнических комплексов в условиях изменяемой фоноцелевой обстановки / Труды МАИ. 2021. № 121. С.
15. М. М. Ступницкий, Л. О. Мырова, П. С. Королев Рой БПЛА — новая парадигма применения мало-размерных беспилотных летательных аппаратов // Электросвязь 2023. № 4. С.2–10.
16. Полевой Е. В., Гудошников А. А., Найденов Д. С., Лопатин Д. С. Анализ современного состояния группировки робототехнических комплексов МЧС России // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2021. №4 (51). С. 43–53.

MODEL OF A CONTROL FOR ROBOTIC COMPLEXES OF SPECIAL-PURPOSE

Starodubtsev Yu. I.⁶, Lepeshkin O. M.⁷, Khudainnazarov Yu. K.⁸

Keywords: classification, model, system, group management, structure, principles, grouping, scenario, task, action, information management system, management tasks, information process, supersystem.

Abstract

Objective: on the basis of general theoretical provisions and relevant relevant works, to reveal a meaningful (verbal) model of the control system for robotic complexes (RC).

Method: on the basis of a systematic approach, to analyze the forms, methods, models and management technologies of modern and promising RCs. By the method of classification and the method of analogies, the main categories of the subject area of special purpose (SP) RC management are determined.

Result: The results of the analysis of well-known models developed in the design and research of control systems (CS) of SP RC are presented. The basic principles of management and technologies used to ensure the management of SP RC are systematized. The main directions of the development of the methodology of group management of SP RC, the construction of the SP RC system are determined.

The scientific novelty consists It consists in generalizing and systematizing well-known models and methods, as well as management technologies of SP RC. A verbal model of the hierarchical RCCS has been formed. Currently known models of CS SP RC do not fully characterize the emergent properties of the RC control system as a complex intelligent system with the properties of a supersystem in terms of a fairly general control theory. The proposed content model provides a verbal basis for modeling the thesaurus of the subject area and conceptual modeling of the CS RC SP.

References

1. Karchija A. A., Makarenko G. I. Pravovye gorizonty tehnologij iskusstvennogo intellekta: nacional'nyj i mezhdunarodnyj aspekt // Voprosy kiberbezopasnosti. 2024. № 1. S. 2–14. DOI: 10/21681/2311-3456-2024-1-2-14.
2. Karchija A. A., Makarenko G. I. Pravovye problemy primenenija iskusstvennogo intellekta v Rossii // Pravovaja informatika 2024. № 1. S. 4–19. DOI: 10.21681/1994-1404-2024-1-4-19.
3. Starodubtsev Ju. I., Laut O. S., Hudajnazarov Ju. K. Osobennosti zashhity informacionnyh resursov sistem upravlenija robototekhnicheskimi kompleksami robotam // Telekomunikacii i svjaz'. 2024. № 2. S. 43–52.
4. Burlov V. G., Lepeshkin O. M., Lepeshkin M. O., Gomazov F. A. The control model of safety management systems V sbornike: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 8th International Scientific Conference «TechSys 2019» – Engineering, Technologies and Systems. 2019. C. 012088.

⁶ Yuri I. Starodubtsev, Dr.Sc. of Military Sciences, Professor, Professor of the Department of Security of Special Purpose Information and Communication Systems, Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E-mail: starodub@mail.ru

⁷ Oleg M. Lepeshkin, Dr.Sc. of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Information Technologies and Security Systems, State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia. E-mail: lepechkin1@yandex.ru

⁸ Yuriy K. Khudainazarov, Ph.D. of Technical Sciences, Doctoral Student of the Department of Security of Special Purpose Information and Communication Systems of the Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny, St. Petersburg, Russia. E-mail: yu-78@ya.ru

5. Kuprjashin G. L., Shramm A. E. O principah datacentrizma, setecentrizma i komandnocentrizma v kontekste informatizacii gosudarstvennogo upravlenija // Gosudarstvennoe upravlenie. Jelektronnyj vestnik. 2019. № 76. S. 211–242.
6. Dostatochno obshhaja teorija upravlenija. (Vtoraja redakcija 2003–2004 gg.) – M.: NOU «Akademija upravlenija», 2011. – 416 s.
7. Makarenko S. I. Protivodejstvie bespilotnym letatel'nyh apparatam. Monografija. – SPb.: Naukoemkie tehnologii, 2020. – 204 s.
8. V. I. Gorodeckij, O. L. Buhvalov Model' i arhitektura infrastruktury sistemy gruppovogo upravlenija robotami // Robototekhnika i tehničeskaja kibernetika 2017. № 1(14). S. 33–44.
9. Alekseev V. A., Jakovlev D. S., Tachkov A. A. Modelirovanie ierarhičeskoj sistemy upravlenija gruppoj nazemnyh robototehničeskix sredstv // Inženernyj zhurnal. 2018. № 4. DOI: 10.18698/2308-6033-2018-4-1754.
10. Kanushkin S. V. Upravlenie robototehničeskimi kompleksami ohrannogo monitoringa v uslovijah neopredelennosti // Pravovaja informatika 2019. №2. S. 40–48.
11. Diane S. A. K., Ishakova A. Ju., Ishakovoja A. O. Algoritm setecentričeskogo upravlenija dvizheniem gruppy mobil'nyh robotov. Modelirovanie, optimizacija i informacionnye tehnologii 2022. № 10(1). S. 1–11
12. Berezkin A. A., Vivchar' R. M., Kirichek R. V. Model' sistemy upravlenija mobil'nymi robotizirovannymi kompleksami različnogo naznachenija // Jeletrosvjaz' 2023. № 8. S.12–18.
13. Halimov N. R., Mefedov A. V. Raspredeleonnaja setecentričeskaja sistema upravlenija gruppoj udarnykh bespilotnyh letatel'nyh apparatov // Sistemy upravlenija, svjazi i bezopasnosti. 2019. № 3. S. 1–13.
14. V. V. Sviridov Metodika ocenki kachestva gruppovogo vzaimodejstvija robototehničeskix kompleksov v uslovijah izmenjaemoj fonocелеvoj obstanovki / Trudy MAI. 2021. №121. S.
15. M. M. Stupnickij, L. O. Myrova, P. S. Korolev. Roj BPLA — novaja paradigma primenenija malorazmernykh bespilotnyh letatel'nyh apparatov // Jeletrosvjaz' 2023. № 4. S. 2–10.
16. Polevoj E. V., Gudoshnikov A. A., Najdenov D. S., Lopatin D. S. Analiz sovremennogo sostojanija gruppirovki robototehničeskix kompleksov MChS Rossii // Nauchnye i obrazovatel'nye problemy grazhdanskoj zashhity. 2021. № 4(51). S. 43–53.

