

Проект РНФ №20–79–10325 «Разработка принципов и подходов к адаптивному управлению автономными мобильными киберфизическими системами в условиях изменяющегося окружения»

Материалы к отчету за 2020–2021 г.

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

К инфраструктуре киберфизических систем (КФС), работающих на открытых территориях, предъявляется ряд повышенных требований. Это связано с возможностью возникновения как случайных, так и преднамеренных деструктивных воздействий со стороны внешней среды. Открытые территории имеют свою специфику: они обширны, имеют сложную структуру и подвержены динамическим изменениям. Функционирование в условиях динамической среды сопряжено с повышенными рисками выхода из строя отдельных компонентов и отсутствия устойчивых каналов связи между элементами системы. Для безаварийного функционирования КФС необходимо, чтобы они были способны к реорганизации. Стандартные централизованные подходы к построению КФС при относительной простоте и удобстве в управлении имеют ряд недостатков – в частности, ограниченную масштабируемость, наличие узких мест и критических компонентов, отказ которых может существенно нарушить связность КФС, а также проблемы с доступностью на

больших пространствах [W. Shi, J. Cao, Q. Zhang, Y. Li and L. Xu, "Edge Computing: Vision and Challenges," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 3, no. 5, pp. 637-646, Oct. 2016, DOI: 10.1109/IJOT.2016.2579198]. Таким образом, имеет место необходимость в создании устойчивых, связанных, децентрализованных КФС с возможностью динамического подключения и отключения их компонентов. При этом следует принимать во внимание ограниченную вычислительную мощность аппаратного обеспечения узлов КФС, необходимость эффективного управления энергопотреблением, интеграции коммуникационных возможностей узлов и учёта требований информационной безопасности [Lavric, A., & Popa, V. (2017, July). Internet of things and LoRa low-power wide-area networks: a survey. In *Signals, Circuits and Systems (ISSCS)*, 2017 International Symposium on (pp. 1-5). IEEE].

Рассмотрим проблему построения и выбора стратегий поведения КФС в случае потери связности системы, а также проблему самоорганизации КФС при отказе отдельных её компонентов или составных частей. Для этого построим классификацию ситуаций (инцидентов), которые могут привести к отказам в КФС, исследуем известные подходы к построению КФС, устойчивой к таким инцидентам, и проведём анализ соответствия известных решений поставленным требованиям.

Классификация инцидентов

Спектр инцидентов достаточно обширен, что обусловлено распределённостью КФС, гетерогенностью и широкой автономностью их компонентов, их большим количеством и уязвимостью по отдельности, использованием беспроводных технологий, активным взаимодействием с изменяющейся окружающей средой [Alguliyev R., Imamverdiyev Y., Sukhostat L. Cyber-physical systems and their security issues. *Computers in Industry*, V. 100, 2018, pp. 212-223, DOI: 10.1016/j.compind.2018.04.017; C.H. Liu, Y. Zhang *Cyber Physical Systems: Architectures, Protocols and Applications* CRC Press, Taylor & Francis Group Florida (2016)].

Инциденты, которые порождают потерю связности в КФС, можно классифицировать по разным критериям:

- По причине возникновения: случайные (неисправность компонента КФС; неверная стратегия поведения КФС); связанные с влиянием окружающей среды; умышленные (атака злоумышленника) [ISO/IEC 27001:2013].
- По уровню возникновения: физический, канальный, сетевой, транспортный, сеансовый, уровень представления, прикладной уровень (в данном случае используется стандартная модель взаимодействия открытых систем ISO/OSI [ISO/IEC standard 7498-1:1994], в практических реализациях отдельные уровни могут быть объединены).
- По критичности с точки зрения выполнения конкретной задачи КФС: не влияющие на выполнение задачи; снижающие эффективность выполнения задачи; исключающие выполнение задачи.
- По критичности с точки зрения функционирования КФС: не влияющие; снижающие эффективность КФС; делающие невозможным дальнейшее функционирование КФС.
- По затрагиваемому аспекту информационной безопасности: целостность, доступность, конфиденциальность, подотчётность и т.п.

В контексте рассматриваемой проблемы наиболее актуальны угрозы, связанные с влиянием окружающей среды. Развёртывание КФС на больших территориях может приводить к тому, что отдельные компоненты КФС будут сталкиваться с трудностями навигации, выходить из строя под влиянием среды, покидать пределы зоны покрытия беспроводных сетей или достижимости ретрансляторов, что приведёт к потере связности.

Исследование подходов к построению КФС для снижения вероятности возникновения инцидентов

Для классификации существующих подходов удобно сгруппировать их в соответствии с уровнями модели ISO/OSI. Решения, которые ограничиваются способами передачи данных по каналам связи или организацией этих каналов, относятся к физическому и канальному уровню. К сетевому, транспортному, сеансовому уровню относятся решения, основанные на маршрутизации данных и создании оверлейных сетей и виртуальных каналов связи. Решения, учитывающие прикладные задачи КФС и роли их узлов, отнесены к прикладному уровню и уровню представления.

Физический и канальный уровни

Известен ряд решений на основе протокола LoRaWAN и его аналогов, которые позволяют повысить надёжность, дальность и эффективность коммуникации между узлами КФС. Так, в работе [Lavric, A., & Popa, V. (2017, October). A LoRaWAN: Long range wide area networks study. In Electromechanical and Power Systems (SIELMEN), 2017 International Conference on (pp. 417-420). IEEE] представлена оценка эффективности беспроводных сетей LoRa. Используемые полосы частот относятся к нелицензированной полосе частот ISM (Industrial, Scientific and Medical). Таким образом, проанализированные параметры: ToA (Time on Air), битрейт и фактор распространения (SF) влияют на уровень производительности. Из полученных результатов можно заметить, что с увеличением параметра SF увеличивается время, в течение которого передается пакет связи LoRa по воздуху. Если полоса пропускания канала связи увеличена, параметр ToA значительно уменьшится. Основным параметром модуляции LoRa является коэффициент размножения (SF), который может варьироваться от 7 до 12. Максимальная полезная нагрузка LoRaWAN зависит от SF-фактора, выбранного на уровне приложения, максимальный размер составляет 256 байтов. Модуль Gateway обслуживает несколько устройств с использованием

топологии сетевой сети. Таким образом, сообщения повторно передаются из модуля LoRa на сетевой сервер через модуль шлюза.

В работе [Cagatan, G. K. B., Magsumbol, J. A. V., Baldovino, R., Sybingco, E., & Dadios, E. P. (2017, December). Connectivity analysis of wireless sensor network in two-dimensional plane using Castalia simulator. In Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM), 2017 IEEE 9th International Conference on (pp. 1-8). IEEE] рассмотрена беспроводная сенсорная сеть (WSN), смоделированная в симуляторе Castalia с использованием технологии Long Range (LoRa). Было выполнено моделирование с использованием различных характеристик передатчика и размеров полей. Был проведен анализ карты соединений для наблюдения за влиянием помех и расстояния, и сделаны выводы, что узлы препятствий увеличивают потерю пакетов в узлах связи, успешный прием пакетов обратно пропорционален размеру поля, неблокированные соседние узлы взаимодействуют с более низкой потерей пакетов, мощность передатчика прямо пропорциональна успешной передаче пакетов на определенном расстоянии, а удельная мощность передатчика имеет пороговый предел.

Начальный размер поля составлял $10 \times 10 \text{ м}^2$ и варьировался с шагом $10 \times 10 \text{ м}^2$. Узлы были распределены в топологии mesh, каждый узел связывался со всеми другими узлами сети. Один узел действовал как центральный, а другие – как узлы-датчики, которые собирают информацию в течение определенного периода времени. Центральный узел принимает данные датчиков, обрабатывает их и отправляет управляющие сигналы на основе принятого узла датчика. Также отмечается, что существует прямая линия пути связи к центральному узлу, которая минимизирует интерференцию. Однако по мере увеличения размера поля относительная доля успешных передач пакетов существенно снижалась, что связано с влиянием помех и недостаточным количеством и мощностью передатчиков для покрытия территории поля.

В работе [Rahim, H., Ghazel, C., & Saidane, L. A. (2018, June). An Alternative Data Gathering of the Air Pollutants In the Urban Environment using LoRa and LoRaWAN. In 2018 14th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC) (pp. 1237-1242). IEEE] представлена стратегия сбора данных о загрязнителях воздуха. Стратегия основана на применении протоколов LoRa и LoRaWAN, а также на использовании симулятора NS3. Эксперименты показали, что разработанная стратегия показывает лучшие результаты с точки зрения коэффициента доставки пакетов.

Использованы статические устройства с батарейным питанием класса А, которые будут размещаться на линии прямой видимости со шлюзом. Архитектура основана на идее совместного использования и распределения времени соединения между устройствами, чтобы избежать одновременной связи со шлюзами, развернутыми в интересующей области. Зона мониторинга была разделена на субрегионы (по четыре региона на шлюз). Таким образом, каждое устройство в субрегионах имело высокую вероятность достижения соответствующего шлюза. Период мониторинга (MP) разделяется на набор фиксированных окон времени (TW), эквивалентный количеству субрегионов интересующей области и продолжительности ожидания шлюза.

В экспериментах после установки порядка передачи устройства генерировали случайную передачу в пределах TW, чтобы избежать столкновения со своими соседями в подобласти. Соответствующие устройства собирали и отправляли информацию о атмосферных загрязнителях в шлюз, тогда как другие устройства переключались в разные периоды ожидания в зависимости от порядка сбора устройств. В конце периода TW участвующие устройства переключились на период ожидания, и новые устройства из другого субрегиона начали собирать данные. Таким образом, используемое смещение состоит в том, чтобы избежать коллизий, которые могут произойти между предыдущей и следующей передачами TW.

Кроме того, длительности сна датчиков в *МР*, рассчитанные по целочисленному значению N , были равны. После передачи пакетов датчики увеличивают *МР*-таймер. Они устанавливают N и ждут до времени остановки TW , чтобы сохранить синхронизацию со следующим *МР*. К этому времени датчики рассчитали свою соответствующую продолжительность сна. После этого они перешли в режим ожидания, а затем в режим сна. По истечении времени ожидания датчики либо реорганизуются и вводят новое значение *МР*, либо отправляют новый пустой кадр восходящей линии связи для синхронизации с сервером. В этой стратегии первый сценарий уменьшил количество устройств, подключающихся к шлюзу, и создал псевдосамоорганизующуюся сеть, а второй уменьшил вероятность коллизии между узлами в пределах той же субрегион.

В работе [Barriquello, C. H., Bernardon, D. P., Canha, L. N., e Silva, F. E. S., Porto, D. S., & da Silveira Ramos, M. J. (2017, August). Performance assessment of a low power wide area network in rural smart grids. In Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2017 52nd International (pp. 1-4). IEEE] изучается возможность использования LPWAN в сельских районах. Благодаря симуляциям оценивается производительность LoRaWAN, которая является одной из основных доступных технологий LPWA, с точки зрения показателей производительности сети, таких как диапазон, охват, время ожидания и коэффициент доставки пакетов. Для моделирования был выбран пример реальной сети, которая охватывает примерную площадь 4000 км² в Южной Бразилии и обеспечивает доступ более чем 200 потребителям.

Представлено исследование влияния времени отчетности в отношении доставки пакетов. Для этого был установлен размер полезной нагрузки МАС в 40В и изменялось время отчетности для каждого узла с 10 секунд до 10 минут. Из результатов эксперимента был сделан вывод о том, что увеличение времени отчетности также увеличивает коэффициент доставки. Для достижения коэффициента доставки не менее 0,9 следует установить время

отчетности более 1 минуты. Время отправки в 2 минуты позволит обеспечить коэффициент доставки выше 0,95.

При проектировании КФС, работающих на открытых территориях, необходимо также учитывать, что окружающая среда может оказывать существенное влияние на распространение радиосигнала и таким образом препятствовать коммуникации компонентов КФС. Так, в работе [Швецова А. А. Влияние атмосферных условий на передачу радионавигационных сигналов // Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы-2019. – 2019. – С. 254-257. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41467808>] указывается, что влияние внешней среды на радиосигнал проявляется как через изменения времени прохождения радиосигналов от передатчика до приемника, так и через возникновение многопутности, обусловленной отражениями упомянутых радиосигналов от тех или иных отражающих поверхностей, расположенных в непосредственной близости от приемника. Распространение радиоволн в атмосфере сопровождается их преломлением, поглощением, отражением и рассеянием. Интенсивность этих явлений определяется свойствами пространственного распределения показателя преломления воздуха, являющегося функцией давления, температуры и влажности, а также наличием и свойствами гидрометеоров (продукты конденсации влаги в атмосфере — капли дождя, тумана, облаков) и различных примесей.

В статье [Волков В. В., Гордяскина Т. В. Исследование аналогового радиотехнического канала связи в программном пакете Mathcad. URL: http://xn-----7kcgqcbassog3b.xn--p1ai/2020/PDF/9_6.pdf] процессе распространения в окружающей среде электромагнитные колебания подвергаются негативному воздействию случайных внешних сигналов — радиотехнических помех, имеющих техногенный или природный характер. Техногенные шумы — электромагнитные колебания, имеющие «рукотворную» природу, например излучения соседней передающей станции с нарушениями требований по электромагнитной совместимости (ЭМС —

способность эффективно функционировать в условиях существующих помех и при этом не создавать помех соседней аппаратуре), промышленные помехи и т.д. Помехи природного характера – электромагнитные шумы от излучений молний, космическое излучение и т.д. В статье [Демиденко О. М., Кулинченко В. Н. Изучение влияния внешних помех на качество сигнала в сетях WI-FI. – 2015. http://pfmt.gsu.by/files/pfmt_2015_4_25.pdf#page=96] также отмечается, что различные препятствия (стены, металлические конструкции и т. д.), расположенные между радиоустройствами, могут частично или значительно отражать/поглощать радиосигналы, что приводит к частичной или полной потере сигнала. В городах с многоэтажной застройкой основным препятствием для радиосигнала являются здания: наличие капитальных стен, листового металла, штукатурки на стенах, стальных каркасов и т. д. влияет на качество радиосигнала и может значительно ухудшать работу радиоустройств. Внутри помещения причиной помех радиосигнала также могут являться зеркала и тонированные окна. Также помехи при радиопередаче могут вызывать сигналы от устройств операторов мобильной связи. Причиной появления радиопомех может быть различная техника (в том числе бытовая), работающая в зоне покрытия радиоустройства, в том числе: двигатель автомобиля и другая техника, оборудованная мощными электромоторами; мониторы и телевизоры с электронно-лучевыми трубками, средства связи и др. Посторонние радиоустройства, работающие в том же частотном диапазоне, что и используемые устройства, могут оказывать негативное влияние на работу системы.

Во избежание конфликтов разные беспроводные сети, расположенные в пределах одной зоны действия, следует настраивать на непересекающиеся каналы, что позволит минимизировать влияние устройств одного типа друг на друга [Борздыко И. А., Иванашко Е. А. Причины помех и ошибок в сети Wi-Fi // Ученые записки Брянского государственного университета. – 2017. – №. 1. – С. 7-10. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30291232>].

При том, что ряд указанных решений позволяет расширить зону связности и повысить надёжность и эффективность обмена данными, очевидно, что они не предоставляют исчерпывающих возможностей обеспечения связности КФС на больших пространствах. Кроме того, рассмотренные методы не учитывают, что сама окружающая среда может содержать физические препятствия для передачи сигналов, и не рассматривают случаи, когда эта среда не исследована и изменчива.

Сетевой, транспортный, сеансовый уровни

Известны решения, позволяющие улучшить связность КФС, распределив функции передачи данных между узлами и обеспечив маршрутизацию данных. Такие решения позволяют выполнять самоорганизацию КФС на сетевом, транспортном, сеансовом уровне и обычно основаны на подходе WSN (беспроводная сенсорная сеть), использовании mesh-сетей и установлении многопереходных соединений. Так, в работе [Rabie, T., & Suleiman, S. (2016, December). A novel wireless mesh network for indoor robotic navigation. In 2016 5th International Conference on Electronic Devices, Systems and Applications (ICEDSA) (pp. 1-4). IEEE] рассматривается система передачи данных для постоянно перемещающихся военных мобильных групп. Разрабатывается платформа мобильной и беспроводной сети, способная поддерживать связь с удалёнными районами военных операций. Успешно разработан прототип военного устройства на основе подхода WSN с возможностью использования устройства для поиска и спасения пострадавших. Прототип способен считывать и отправлять на базовую станцию данные о состоянии, в том числе смерти, пользователя, его местоположения и перемещения. В работе описывается использование mesh-сети из разработанных прототипов. Подобная сеть позволяет действовать узлам независимо друг от друга для приема и передачи данных.

В статье [Jiménez A. C., García-Díaz V., Bolaños S. A decentralized framework for multi-agent robotic systems // Sensors. – 2018. – Т. 18. – №. 2. – С.

417. DOI: 10.3390/s18020417] описывается подход к организации связи, в которой каждый агент в системе может покинуть сеть или принять новые соединения, отправив свою информацию на основе истории передачи всех узлов в сети. С этой целью каждый агент должен поддерживать 4 протокола для участия в системе, а также дополнительный протокол передачи данных в ближайшие узлы, который основан на индикаторе уровня принятого сигнала (RSSI) и истории данных.

Поскольку предлагаемая система является неоднородной, возможны два типа агентов, основанные на принципе узлов WSN. Первый тип узла - это робот-агент, которым могут быть БЛА или наземные платформы. Второй тип агента - это блоки мониторинга и беспроводные датчики, которые представляют собой статических агентов, характеризующихся наличием блока беспроводной связи, который принимает режим специальной инфраструктуры для установления связи с системой, блока обработки для управления полученными данными и либо датчика, либо графический интерфейс пользователя (GUI) для взаимодействия со средой или пользователем, в зависимости от того, является ли он узлом WSN или агентом мониторинга.

В статье [Jawhar I. et al. Communication and networking of UAV-based systems: Classification and associated architectures // Journal of Network and Computer Applications. – 2017. – Vol. 84. – pp. 93-108] определены функции, услуги и требования систем связи на базе беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Также представлены сетевые архитектуры, базовые структуры и требования к трафику данных в этих системах, а также в общих чертах проанализированы различные протоколы и технологии, которые могут использоваться на различных линиях связи БЛА и сетевых уровнях. Кроме того, в статье рассматриваются услуги уровня промежуточного программного обеспечения, которые могут предоставляться для обеспечения бесперебойной связи и поддержки разнородных сетевых интерфейсов. Обсуждается новая важная область исследований, которая включает

использование БЛА для сбора данных из беспроводных сенсорных сетей (WSN). Рассмотрены несколько подходов, которые можно использовать для сбора данных из различных типов WSN, включая топологии, такие как линейные сенсорные сети (LSN), геометрические и кластерные WSN. В общем виде проанализировано преимущества использования БЛА для этой функции, которые включают в себя значительное снижение энергопотребления сенсорного узла, снижение помех и предлагают значительно повышенную гибкость в управлении плотностью развернутых узлов.

Одной из наиболее важных проблем проектирования, с которой сталкиваются системы с несколькими БЛА, является выбор протокола маршрутизации, который является необходимым условием совместной работы БЛА. В исследовании [Kakamoukas G. A., Sarigiannidis P. G., Economides A. A. FANETs in Agriculture-A routing protocol survey //Internet of Things. – 2020. – С. 100183] проведен обширный обзор протоколов маршрутизации Flying Ad-hoc (FANET), где подробно описаны их различные стратегии и методы маршрутизации. Проведена классификация развертывания БЛА в сельском хозяйстве, в результате чего было получено шесть различных применений: разведка урожая, обследование и картирование урожая, страхование (сохранение) урожая, планирование и управление выращиванием, применение химических веществ и геофоны. Наконец, выполняется теоретический анализ, который показывает, какой протокол маршрутизации может лучше обслуживать каждое приложение, в зависимости от моделей мобильности и требований конкретного приложения. Примером использования FANET может служить работа [Ali Khan, Farooq Aftab, Zhongshan Zhang. Self-organization based clustering scheme for FANETs using Glowworm Swarm Optimization, Physical Communication, Volume 36, 2019, 100769, DOI: 10.1016/j.phycom.2019.100769], где предложен подход к самоорганизации групп БЛА, вдохновлённый поведением роя светлячков, что позволяет выполнять кластеризацию БЛА для решения

прикладных задач. Тем не менее, способ предполагает использование для части задач центрального узла – наземной станции управления.

Подходы на сеансовом уровне состоят, как правило, в создании логической (оверлейной) сети поверх существующей физической. Оверлейные сети абстрагируются от нижележащих протоколов, так, например, сеть может использовать различную среду передачи данных в разных сегментах гетерогенной сети. Единственным требованием к сетям, поверх которых работает оверлейная сеть, является наличие маршрута между подсетями. Узлы в каждый момент времени поддерживают избыточное количество соединений (сеансов), обеспечивая резервирование каналов передачи данных.

Одним из критериев надежности проектируемой оверлейной сети являются временные задержки. Предполагается, что оверлейная сеть должна обеспечивать надежность доставки сообщений при временной недоступности связи между узлами-соседями, в том числе из-за преднамеренных или непреднамеренных дефектов. Кроме того, необходимо учесть специфику применения предлагаемой сети для автономных робототехнических комплексов, когда приоритетом является мгновенная доставка сообщения, причем временный сбой при доставке предпочтительнее, чем получение сообщения с длительной задержкой (в некоторых задачах от 500 мс). Другой особенностью является независимость сообщений друг от друга. Оверлейные сети могут быть управляемыми, где каждому узлу сети известны все узлы сети и их возможности, и неуправляемыми, где ни одному из узлов не известна полная топология сети [Srinivasan S. Design and use of managed overlay networks: дис. Georgia Institute of Technology, 2007].

В работе [Ермаков А. В., Сучкова Л. И. Разработка алгоритмов для надежного обмена данными между автономными роботами на основе принципов самоорганизующейся сети // Надежность. – 2020. – Т. 20. – №. 2. – С. 35-42. URL: <https://www.dependability.ru/jour/article/view/372/609>] выбран вариант организации надежной доставки сообщений с помощью оверлейных

сетей, позволяющих расширить функционал сетей со стабильной конфигурацией. Для обмена данными автономными роботами предлагается использовать оверлейную сеть, в которой обмен информацией осуществляется на прикладном уровне по модели OSI поверх стандартных протоколов TCP и UDP. Клиентское вычислительное устройство, например, бортовой компьютер автономного робота, для подключения к оверлейной сети использует программное обеспечение, которое устанавливает соединения с другими узлами сети и осуществляет пересылку данных между промежуточными узлами. Сеть обмена данными между автономными роботами является управляемой, то есть для нее существует глобально обновляемый статус, содержащий сведения обо всех узлах сети. Информация о статусе сети хранится в полном объеме на каждом узле, таким образом, дублирование информации увеличивает надежность сети и ее отказоустойчивость в целом. При добавлении нового узла для обнаружения других узлов сети в локальной сети используется широковещательная рассылка, при успешном обнаружении устанавливаются соединения с соседними узлами и синхронизируется статус сети. На этом этапе осуществляется обмен сообщениями одновременно по всем каналам («лавинная» рассылка).

В результате исследования были предложены общие принципы функционирования сети, описана структура сообщений для алгоритма доставки, произведено выделение служебных маршрутизируемых потоков данных, описаны алгоритмы пересылки сообщений между узлами сети, разработаны алгоритмы сбора и синхронизации глобального статуса сети. Для повышения надежности и отказоустойчивости работы сети предложено хранение глобального статуса сети на каждом из узлов. Предлагаемый в работе подход является перспективным направлением в обеспечении связи между робототехническими устройствами. Тем не менее, эта разработка требует больших вычислительных мощностей на каждом устройстве, а также

работа сети зависит от количества устройств: чем меньше устройств, тем ниже будет уровень связи.

Основная идея работы [Majcherczyk N. et al. Decentralized connectivity-preserving deployment of large-scale robot swarms //2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – IEEE, 2018. – С. 4295-4302. <https://sci-hub.do/10.1109/IROS.2018.8594422>] - построить топологию логического дерева поверх физической сети, сформированной роботами. Логическое дерево используется роботами как каркас для выполнения подключений. Изучаются и сравниваются два алгоритма формирования логического дерева: наружу и внутрь. Эти алгоритмы различаются порядком, в котором роботы присоединяются к дереву: внешний алгоритм начинается с корня дерева и растет к целям, в то время как внутренний алгоритм действует противоположным образом. Оба алгоритма выполняют периодическую реконфигурацию, чтобы не допустить остановки роста дерева из-за неоптимальных топологий. Цель работы - создать стратегию постепенного развертывания, которая может решить произвольное количество задач географической удаленности при соблюдении ограничений на возможность подключения. В частности, окончательная конфигурация топологии сети должна обеспечивать связь между любыми двумя целевыми местоположениями. Результаты работы показывают, что в мелкомасштабных сценариях рост дерева наружу, соответствующий формированию остова дерева, является жизнеспособным подходом. Однако по мере увеличения масштаба среды и количества задействованных роботов предпочтительным подходом является более направленный рост внутрь от целевых местоположений к корню дерева. Ограничение состоит в том, что метод рассчитан только на стационарные устройства.

Существуют и другие решения в области организации сетей, позволяющие повысить связность КФС, используя возможность самоорганизации. Примером такого подхода является MANET - беспроводная децентрализованная самоорганизующаяся сеть связи для

гражданского и военного применения, состоящая из мобильных устройств, способных устанавливать соединения между произвольными узлами [Chai Keong Toh Ad Hoc Mobile Wireless Networks, Prentice Hall Publishers, 2002. ISBN 978-0-13-007817-9]. Каждое такое устройство может независимо передвигаться в любых направлениях, и, как следствие, часто разрывать и устанавливать соединения с соседями. В сети Ad hoc основные исследования сосредоточены на проблемах маршрутизации и автоматической настройки, а также на недостатке механизмов защиты. Основными проблемами в таких сетях является производительность в динамически меняющейся топологии и безопасность. Существуют различные методы обеспечения безопасности. В работе [Sahban S. et al. Group Communication Management in UAV-MBN Networks //International Journal of Pure and Applied Mathematics. – 2018. – Т. 118. – №. 7. – С. 349-355] представлен подробный обзор взаимодействия ключевых групп и их проблем в сети UAV-MBN. Статья также фокусируется на инцидентах в подобных сетях и особенностях безопасности используемых протоколов.

Статья [Megyesi D., Leško J., Schreiner M. Evaluation of multihop UAV communication model based on protocol-independent and protocol-dependent methods //2019 Modern Safety Technologies in Transportation (MOSATT). – IEEE, 2019. – С. 108-112] посвящена беспроводной связи между БЛА и наземной станцией. Исследования в этой статье направлены на установление и передачу информации между устройством и станцией в случае, когда прямой радиосвязи не существует. Идея Fly Ad-Hoc Network (FANET) реализована для установления многопереходного соединения между устройствами. Представлена теория и классификация протоколов маршрутизации для FANET как особого типа мобильных одноранговых сетей (MANET). В этой статье предлагается коммуникационная модель, обеспечивающая связь в этом случае, и ее функциональность подтверждается выполнением симуляций для различных типов моделей мобильности и уровней скорости для БЛА.

Статья [Alexander Smirnov, Nikolay Shilov. Service-Based Socio-Cyberphysical Network Modeling for Guided Self-Organization, *Procedia Computer Science*, Volume 64, 2015, Pages 290-297, DOI: 10.1016/j.procs.2015.08.492] посвящена моделированию децентрализованных социокИБерфизических систем в виде взаимодействующих сервисов и построению подхода к управляемой самоорганизации таких систем. Статья уделяет основное внимание построению наиболее реалистичных моделей поведения человека как компонента социокИБерфизической системы и их реализации в виде социоинспирированных сервисов. Подход не затрагивает вопросы устойчивости, связности, робастности КФС напрямую, но построенные модели могут применяться для учёта влияния внешней среды на КФС.

В работе [Malandra, F., & Sansò, B. (2018). A Markov-modulated End-to-end Delay Analysis of Large-scale RF-Mesh Networks with Time-slotted ALOHA and FHSS for Smart Grid Applications. *IEEE Transactions on Wireless Communications*] предложена новая математическая модель и методология для оценки эффективности широкомасштабных сетей RFMesh. Выведена аналитическая формулировка задержки, основанная на марковско-модулированном моделировании системы. Формула может быть расширена для оценки других важных показателей производительности. Предлагаемая методология применяется к крупномасштабной сети из нескольких тысяч узлов, а числовые результаты, как сообщается, показывают широкий набор оценочных показателей эффективности. Показана полезность оценки осуществимости различных типов приложений (например, интеллектуального учета, сенсорных сетей). Также представлен анализ масштабируемости этой методологии и сравнение с результатами моделирования.

Система WMN состоит из множества N узлов сетки, набора R сетевых маршрутизаторов и набора G шлюзов. Множество $V = N \cup R \cup G$ используется для обозначения всех узлов в топологии. Во второй части

работы рассматривается AMI RF-Mesh, в которой N представляет собой интеллектуальные счетчики, G представляет сборщики данных, а R - маршрутизаторы. Чтобы определить ссылки, использовался покрывающий луч для каждого узла i в топологии. Покрывающий луч узла i представляет собой максимальное расстояние, на котором узел j может быть для связи (i, j) , для существования. Предполагаются два охватывающих луча: один для маршрутизаторов и коллекторов, а другой для интеллектуальных счетчиков. Значения для луча покрытия изменяются в соответствии с рассмотренным сценарием: например, интеллектуальный измерительный луч составляет порядка нескольких сотен метров в городском сценарии, тогда как он может простираться за пределы 1 км в сельской местности. Маршрутизаторы и коллекторы имеют, как правило, больше покрывающих лучей, поскольку они оснащены лучшими радиоприемниками и обычно устанавливаются на более высоких участках (например, полюсах света).

В ходе анализа были рассмотрены различные сценарии трафика. Каждое приложение может быть идентифицировано по его требованиям в отношении связи (например, желаемая средняя задержка при приеме пакетов), и его осуществимость может быть оценена с использованием предлагаемой модели, как показали результаты. Использование распределенного по Пуассону трафика позволяет проводить комбинированный анализ различных приложений в одной и той же инфраструктуре связи, который особенно необходим в области Smart Grid / IoT, где число приложений велико. При вычислении вероятности столкновения учитывались беспроводные помехи. Также была предложена аналитическая формулировка задержки.

Приведённые подходы существенно и качественно повышают связность КФС и создают широкие возможности функционирования КФС на открытых пространствах. Они позволяют динамически перестраивать маршруты передачи данных при подключении и отключении узлов КФС. Тем не менее, они не предлагают решений для ситуации, когда маршрут для

передачи данных невозможно построить (к примеру, на местности, где невозможно развернуть узлы-передатчики с достаточной плотностью). К тому же, сетевой и транспортный уровень не затрагивают проблему перераспределения задач и ролей узлов в случае отказа частей КФС, выполняющих прикладные функции. Для этого необходимы решения, учитывающие прикладной уровень функционирования КФС и предоставляющие возможность её самоорганизации.

Прикладной уровень

На прикладном уровне учитываются роли и прикладные задачи КФС, а существующие подходы позволяют перераспределять эти роли и задачи между узлами (агентами) КФС и управлять ими. Так, в статье [Петручук Е.В., Иванов Д.Я. Организация информационного обмена в децентрализованных роевых системах управления мультиробототехническими комплексами с использованием технологии ZigBee // Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова. 2019. №7] рассмотрены основные методы управления группами роботов, такие как единоначальный, иерархический, коллективный, стайный, роевой, а также описаны задачи, которые возникают при организации информационного обмена в группах малоразмерных роботов на разных уровнях:

- управление потоками информации и маршрутизация пакетов в сети;
- определение многоцелевого режима сопровождения;
- создание алгоритмов, отвечающих за адаптивную аналого-дискретную фильтрацию;
- создание алгоритма оптимизированного оценивания поступающей информации;
- создание безопасного канала (устойчивого, скрытого) информационного обмена между оператором и группой;
- создание алгоритма, позволяющего агентам обучаться;

- создание алгоритма оптимального оценивания, инвариантного ко времени поступления измерений.

Каждому участнику требуется постоянная осведомлённость как о своих «соседях», так и о поставленных целях – для решения данной задачи используется многоцелевой режим сопровождения (МЦС). Проблема МЦС заключается в достаточно большом интервале времени между поступающими сигналами измерений от одной цели, тогда как сигналы управления должны формироваться непрерывно. Следует учесть, что способ обработки поступающих сигналов на стандартных алгоритмах оптимального оценивания при одновременной обработке является нерентабельным, т.к. время обработки сигналов каждым датчиком различно, и кроме того расположение в пространстве участников влияет на время поступления сигнала. Поэтому возможности такой сети определяются возможностями используемого оборудования. Для расширения области применения алгоритма следует применять технологии беспроводной связи.

Необходимо учитывать, что при использовании беспроводной линии связи возникают риски негласного получения информации, несанкционированного доступа и компрометации информации. Для защиты предлагается использовать не аппаратное, а программное шифрование, что позволит снизить вес и цену малоразмерного робота. Основной проблемой предлагаемого метода является большой временной интервал между поступающими сигналами от одной цели, в то время как сигналы управления должны формироваться непрерывно, что может привести к выходу из строя не только одного устройства, но и всей сети. Данный метод рассчитан на небольшое количество устройств в сети.

Существуют работы, которые рассматривают вопросы координации автономных роботов при выполнении различных прикладных задач. Так, вклад работы [Potrino G., Serianni A., Palmieri N. Drones coordination protocols in the precision agriculture context //Autonomous Air and Ground Sensing Systems for Agricultural Optimization and Phenotyping IV. – International Society

for Optics and Photonics, 2019. – Т. 11008. – С. 110080G] состоит в анализе протоколов связи, примененный к проблеме управления парком БЛА для борьбы против нападений паразитов на зерновые культуры. Более того, изучение различных подходов направлено на измерение их производительности и затрат. В частности, различные подходы к проблемам исследования территории в кратчайшие сроки, чтобы избежать изучения одной и той же области с помощью большого количества дронов, обнаружения паразитов и предотвращения их распространения, распыляя необходимое количество пестицидов. Дроны, оснащенные ограниченным количеством топлива и пестицидов, могут обратиться за помощью к другим беспилотникам, чтобы завершить уничтожение паразитов.

Сотрудничество малых и минибеспилотников в сети способно улучшить производительность и зону покрытия беспилотных летательных аппаратов. Перед широким внедрением разнородных летающих специальных сетей (FANET) на основе нескольких БЛА предстоит решить множество новых задач, включая создание устойчивой сетевой структуры. Также необходим эффективный алгоритм выбора шлюза и механизм управления. Тем не менее, контроль стабильности иерархической сети БЛА гарантирует эффективное взаимодействие дронов. В статье [Wang J. et al. Taking drones to the next level: Cooperative distributed unmanned-aerial-vehicular networks for small and mini drones //Ieee vehIcular technology magazIne. – 2017. – Т. 12. – №. 3. – С. 73-82] выполнен обзор структуры FANET и архитектуры ее протокола. Затем рассматриваются различные распределенные алгоритмы выбора шлюза и облачные механизмы контроля устойчивости, дополняемые рядом открытых задач.

В статье [Tropea M. et al. Reactive flooding versus link state routing for FANET in precision agriculture //2019 16th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC). – IEEE, 2019. – С. 1-6] предлагается сравнение двух разных координационных протоколов для управления БЛА в области сельского хозяйства. В точном земледелии

присутствие паразитов или внезапные климатические изменения представляют собой важную проблему для фермеров из-за деградации сельскохозяйственных культур и качества выращивания. Использование новых технологий, таких как устройства БЛА, новые сети, такие как FANET, и использование новых датчиков и исполнительных механизмов внутри БЛА могут оказать помощь фермерам и сельскому хозяйству. Существенным аспектом, безусловно, является адекватное управление и координация этих новых устройств для планирования конкретных стратегий, способных адекватно поддерживать операторов сельского хозяйства.

Для правильного управления командой БЛА, оснащенной несколькими датчиками и исполнительными механизмами, необходимо разработать надлежащие стратегии и методы координации, способные эффективно управлять командой. С этой целью в статье [De Rango F. et al. A simulator for UAVs management in agriculture domain //2017 International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems (SPECTS). – IEEE, 2017. – С. 1-8] предлагается симулятор, подходящий для сельскохозяйственной области, для разработки новых методов координации и контроля команды БЛА. Кроме того, можно определить основные переменные и параметры этой области интересов. В работе было представлено много методов координации как для мониторинга области, так и для координации действий дронов в присутствии паразитов, чтобы проанализировать, как производительность может значительно измениться, если больше ограничений, таких как энергия, дальность связи, ресурсные возможности.

В статье [Юдинцев Б. С., Алексеев А. Ю. Синтез распределенной системы управления группой мобильных роботов // Труды Института механики им. П.П. Мавлютова УНЦ РАН. – 2017. – Т. 12. – №. 2. – С. 199-205] рассматривается методика синтеза специализированной архитектуры системы управления, учитывающей особенности организации коллектива роботов, специфику информационных потоков и аппаратных средств.

Предлагаемая к реализации архитектура содержит три уровня, поддерживает облачные и мультипоточные технологии обработки информации, ориентирована на современные типы контроллеров и процессоров. Специфика коллективного управления роботом (в отличие от роевого [Шляхов Н.Е., Ватаманюк И.В., Ронжин А.Л. Обзор методов и алгоритмов агрегации роя роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18, № 1. С. 22–29] и стайного управления) базируется на принципах единого информационного пространства и общности целей, что означает реализацию такого «сообщества», где объекты, входящие в группу, имеют возможность не только обмениваться друг с другом информацией, но и осведомлены о целях и задачах коллектива, имеют сведения о его составе.

Группа мобильных роботов (МР) имеет собственное закрытое информационное пространство, в котором распределена общая база данных (БД), при этом каждый агент содержит лишь часть информации (строки определенных таблиц БД). Оператор, отправляя запрос БД, последовательно получает необходимые части данных (или все данные) от каждого из агентов и «собирает» их в единый блок.

Облачная модель взаимодействия предполагает, что каждый агент группы может быть интерфейсом для подключения к распределенной БД (точкой входа в облако), если у него имеются соответствующие средства связи. Таким образом, каждый участник группы может получать необходимую информацию обо всей группе в рамках общего информационного пространства, а также корректировать запись о своем текущем состоянии, при этом подключение может быть инициировано как со стороны оператора к агенту, так и со стороны агента к оператору.

Общее информационное пространство группа МР создает с помощью сетевых (беспроводных) связей между участниками группы, образуя собственную информационную сеть — интрасеть агентов с подключением по IP. Данный метод требует больших вычислительных мощностей на каждом

из устройств. В работе не учитывается процесс построения сети, а вся работа направлена на уже сконфигурированную сеть робототехнических устройств.

Ряд подходов позволяют получить достаточно гибкие, но при этом ресурсоёмкие решения. Например, в статье [Андреев В. П., Плетенев П. Ф. Метод информационного взаимодействия для систем распределённого управления в роботах с модульной архитектурой // Информатика и автоматизация. – 2018. – Т. 2. – №. 57. – С. 134-160] предлагается достичь полной функциональности модулей робота путем проектирования каждого модуля как устройства со своей собственной информационно-измерительной и управляющей системой (ИИУС), содержащей все необходимые компоненты, включая вычислительные устройства. Такая функциональная завершенность является основным отличием решения от гетерогенных роботов, где модуль-супервизор управляет работой всех модулей-исполнителей на исполнительном уровне. Метод предназначен для организации межмодульного информационного взаимодействия в системе распределенного управления гетерогенных модульных роботов с функционально-модульной структурой, работа которой основана на следующих принципах:

1. Информационно-измерительная и управляющая система робота строится как локальная вычислительная сеть, узлами которой являются встраиваемые вычислительные устройства.

2. Каждый модуль является полнофункциональным электронным или мехатронным устройством со своей собственной ИИУС.

3. Включение любых мехатронных или электронных устройств в сетевую структуру робота осуществляется с помощью специального программного обеспечения — драйверов.

Данный метод узкоспециализирован и рассчитан только на модульных роботов, находящихся на близком расстоянии друг от друга. Более универсальным подходом является использование микро-виртуальных машин (MicroVM) в КФС с обеспечением возможности их миграции, но

такое решение также является достаточно ресурсоёмким [J.V. Pradilla, C.E. Palau. Chapter 7 - Micro Virtual Machines (MicroVMs) for Cloud-assisted Cyber-Physical Systems (CPS). Editor(s): Rajkumar Buyya, Amir Vahid Dastjerdi. Internet of Things, Morgan Kaufmann, 2016, Pages 125-142, DOI: 10.1016/B978-0-12-805395-9.00007-1]. Кроме того, часть управляющих операций всё равно выполняется на критических узлах КФС, поэтому в данном случае нельзя говорить о децентрализованной архитектуре.

В статье [Schneider G.F., Wicaksono H., Ovtcharova J. Virtual engineering of cyber-physical automation systems: The case of control logic //Advanced Engineering Informatics. – 2019. – Т. 39. – С. 127-143] обсуждается сквозной подход к адаптируемым киберфизическим производственным системам, основанный на контейнерных технологиях. Представленный подход повышает гибкость в киберфизической производственной системе посредством динамической адаптации системы автоматизации и графика производства, основанного на происходящих событиях. Но несмотря на то, что операции обработки и агрегации данных частично перенесены на периферийные устройства, высокоуровневое управление производственными операциями в рамках предложенного авторами подхода выполняется на централизованном узле.

Таким образом, при использовании представленных выше подходов, как правило, остается потребность в критических стационарных узлах управления и узлах агрегации данных, что далеко не всегда может быть обеспечено в условиях открытых территорий с изменяющимся окружением.

Краткое изложение существующих децентрализованных архитектур систем управления, которые могут применяться в области промышленной автоматизации, приводится в работе [Foehr M., Vollmar J., Calà A., Leitão P., Karnouskos S., Colombo A.W. Engineering of next generation cyber-physical automation system architectures //Multi-Disciplinary Engineering for Cyber-Physical Production Systems. – Springer, Cham, 2017. – С. 185-206]. Авторы указывают на различия между традиционной централизованной и

иерархической архитектурами по сравнению с КФС, которые опираются на децентрализованное принятие решений и управление. Обсуждаются вопросы перехода архитектуры промышленного предприятия к децентрализованным решениям.

В статье [Evans Sowah Okpoti, In-Jae Jeong. A reactive decentralized coordination algorithm for event-driven production planning and control: A cyber-physical production system prototype case study. *Journal of Manufacturing Systems*, Volume 58, Part A, 2021, Pages 143-158, DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.11.002] предложен децентрализованный алгоритм координации компонентов киберфизических производственных систем. Алгоритм в среднем на 50% превосходит альтернативные централизованные алгоритмы по показателям пропускной способности, скорости работы и задержки. Подобные решения, при их эффективности, применимы лишь ограниченно, так как для них необходимо известное и статическое окружение, а децентрализация распространяется лишь на отдельные задачи КФС.

В статье [Gerostathopoulos I., Bures T., Hnetyinka P., Keznikl J., Kit M., Plasil F., Plouzeau N. Self-adaptation in software-intensive cyber–physical systems: From system goals to architecture configurations // *Journal of Systems and Software*. – 2016. – Т. 122. – С. 378-397] представлен метод, позволяющий разрабатывать автономно адаптирующиеся КФС с акцентом на аспектах надежности. Основная идея метода состоит в том, чтобы описать изменчивость системы с помощью альтернативных инвариантных разложений, а затем стимулировать адаптацию системы, используя знание целей системы высокого уровня и их формальные представления в контексте вычислительной деятельности. Однако предложенный авторами метод также основан на централизованном формировании оценок актуальности альтернатив системной конфигурации.

Другие существующие подходы к адаптации КФС охватывают лишь отдельные аспекты, например адаптацию сетевой инфраструктуры под

нужды прикладных приложений за счет реализации модуля взаимодействия между основным модулем контроля сетевых коммуникаций и системой управления приложениями [Rosenthal F., Jung M., Zitterbart M., Hanebeck U.D. CoCPN–Towards Flexible and Adaptive Cyber-Physical Systems Through Cooperation //2019 16th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC). – IEEE, 2019. – С. 1-6; Rosenthal F., Hanebeck U. D. A Control Approach for Cooperative Sharing of Network Resources in Cyber-Physical Systems //2019 IEEE International Conference on Industrial Cyber Physical Systems (ICPS). – IEEE, 2019. – С. 361-367].

В контексте функционирования КФС в условиях динамической среды и отсутствия устойчивых каналов связи между компонентами системы также присутствуют работы, посвященные обеспечению устойчивости работы КФС в целом [Павленко Е. Ю. Обеспечение информационной безопасности киберфизических систем на основе принципа гомеостаза. – 2018; Зегжда Д.П., Павленко Е.Ю., Лаврова Д.С., Штыркина А.А. Подход к созданию критерия устойчивого функционирования киберфизических систем // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2019. – №. 2. – С. 156-163]. В данных работах предложен подход к обеспечению динамической защиты КФС путем автоматического поддержания устойчивости их функционирования. При этом акцент делается на функционирование КФС в условиях компьютерных атак и возможного наличия вредоносного ПО. Восстановление связи при отказе как каналов связи, так и компонентов КФС рассматривается также в работе [Minelli M., Panerati J., Kaufmann M., Ghedini C., Beltram, G., Sabattini L. Self-optimization of resilient topologies for fallible multi-robots //Robotics and Autonomous Systems. – 2020. – Т. 124. – С. 103384]. Методология основана на использовании обратной связи и оптимизационной стратегии, определяющей выбор управляющих параметров для каждого компонента. Данный подход позволяет не только сохранять связанность, но и выстраивать «эластичную», резистентную к отказам топологию, однако предполагает реализацию

централизованного управления КФС. Кроме того, в исследовании остался открытым ряд вопросов, связанных с выбором оптимальных управляющих стратегий и их реализациями.

Актуальным направлением исследований, нацеленным на обеспечение полной мобильности КФС и повышение адаптивности КФС к динамическим окружениям, является использование различных групп роботов в качестве основы для развертывания КФС. Подробный обзор мобильных КФС приведен в работе [Guo Y., Hu X., Hu B., Cheng J., Zhou M., Kwok R.Y. Mobile cyber physical systems: Current challenges and future networking applications //IEEE Access. – 2017. – Т. 6. – С. 12360-12368], в которой рассмотрены основные исследовательские задачи мобильных КФС, касающиеся безопасности, энергопотребления, динамического окружения и обеспечения стабильности системы. Применение мобильных роботов в КФС также освещено в другом обзоре [Chaâri R., Ellouze F., Koubâa A., Qureshi B., Pereira N., Youssef H., Tovar E. Cyber-physical systems clouds: A survey //Computer Networks. – 2016. – Т. 108. – С. 260-278]. В частности, авторы фокусируются на обеспечении удаленных вычислений, обработке больших данных, а также виртуализации КФС при помощи облачных технологий.

В работе [Geng M. et al. Learning to cooperate via an attention-based communication neural network in decentralized multi-robot exploration //Entropy. – 2019. – Т. 21. – №. 3. – С. 294] представлен подход Attention-based Communication neural network (CommAttn) для автоматического «изучения» стратегий сотрудничества в децентрализованной задаче исследования нескольких роботов. Коммуникационная нейронная сеть позволяет роботам изучать стратегии сотрудничества с явным обменом данными. Механизм, который вводится в работе, может рассчитать, необходима ли связь для каждой пары агентов, учитывая релевантность каждого полученного сообщения, что позволяет роботам общаться только с необходимыми партнерами. Ограничение состоит в том, что представленные в работе

нейронные сети долго обучаются и не предназначены для применения в изменчивых условиях.

В работе [Токарев Д. Г., Францева Ю. А. Аппаратно-программное обеспечение модернизированной системы управления роботом //Символ науки. – 2017. – Т. 2. – №. 4] проведена модернизация позиционной системы управления промышленного робота ТУР-10. Разработано программно-аппаратное обеспечение системы на базе микроконтроллеров Microchip, поддерживающее распределенное управление на основе децентрализованной связи между модулями. Обеспечена поддержка мониторинга состояния системы и ручного управления роботом.

При модернизации системы управления роботом авторы работы предлагают использовать не дорогостоящие промышленные контроллеры, а сравнительно дешевые микроконтроллеры, не уступающие в производительности, что приведет к удешевлению системы управления без ухудшения её параметров. Проблемой отказа от промышленных контроллеров являются: 1) усложнение разработки алгоритмов управления по причине отсутствия готовых программных блоков, решающих типовые задачи; 2) отсутствие поддержки протоколов взаимодействия со стандартными SCADA-пакетами; 3) сложности при изменении программного кода системы управления, так как программы используют язык С, а не языки программирования промышленных контроллеров. Разработанное программное обеспечение для передачи данных обеспечивает полноценную децентрализованную связь между модулями, которая является основной в архитектуре системы.

Данный метод обеспечения связи предназначен для использования в модульных робототехнических системах для узкого круга устройств. Сильное удешевление используемых управляющих элементов приводит к снижению срока службы устройства.

В статье [Гурьянов Е. Д., Дубов М. А. ПОСТРОЕНИЕ САМООРГАНИЗУЮЩЕЙСЯ РАДИОСЕТИ ДЛЯ МАЛЫХ МОБИЛЬНЫХ

ОБЪЕКТОВ // Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий-РЭУС-2019. – 2019. – С. 100-103]

рассматривается построение самоорганизующейся сети для малых мобильных объектов. В роли малых мобильных объектов выступает группа малогабаритных мобильных роботов, которые выполняют задачу исследования лабиринта. Группа роботов является однородной по своему составу. Для организации связи между роботами строится ячеистая радиосеть по технологии mesh. В статье объясняется выбор именно такого типа сети в связи с типом организации роботов в группе. Также в статье приводится описание малогабаритного робототехнического комплекса, разработанного для моделирования задач группового управления. В работе практически нет научной новизны. Ячеистая топология сети имеет много преимуществ, но представленная в работе ее реализация предназначена для использования только на малых участках в прямой видимости между устройствами. Также нет защиты от выхода из строя одного из устройств.

В работе [Григорьев В. В. и др. Способ создания аппаратно-программного комплекса централизованного и децентрализованного управления группировкой робототехнических комплексов. – 2017] рассмотрена организация информационного обмена между роботами, входящими в состав группировки, и между каждым роботом и центральным пунктом управления группировкой.

Рассмотрен способ создания программно-аппаратного комплекса централизованного и децентрализованного управления группировкой робототехнических комплексов, заключающийся в том, что воспроизводят итерационную процедуру процессов централизованного и децентрализованного управления по регламенту или по мере накопления отличий реальной обстановки от имеющейся модели.

Рассмотрен способ (базовая технология) создания аппаратно-программного комплекса централизованного и децентрализованного управления группировкой робототехнических комплексов, основанный на

итерационной процедуре, включающей процессы централизованного управления, заключающиеся в оптимальном распределении заданий разнородным робототехническим средствам на основе известных методов максимального элемента или неопределенных множителей Лагранжа с доведением индивидуальных заданий до робототехнических средств посредством мультисервисной системой связи, и процессы децентрализованного управления робототехническими средствами на основе технологий мультиагентных систем с постоянным возобновлением итерационного цикла управления, обусловленного необходимостью перераспределения задач робототехническим средствам в связи с изменением обстановки или по установленному регламенту возобновления цикла централизованного управления. Данный метод тоже рассчитан на малое количество устройств в сети, находящихся в прямой видимости друг с другом.

В [Li K. et al. Decentralized robust connectivity control in flocking of multi-robot systems //IEEE Access. – 2020. – Т. 8. – С. 105250-105262] предлагается метод глобального управления связностью для децентрализованных систем с несколькими роботами. Этот метод может обеспечить децентрализованное управление связностью сети с несколькими роботами в условиях возмущений, что не влияет на объективное управление группой роботов. Основываясь на градиенте между позициями связности и робота, предлагаемый метод управления связностью может заставить каждого робота двигаться в желаемом направлении градиента, чтобы обеспечить управление глобальной связностью. Метод фlocksирования (the flocking method), основанный на потенциале притяжения и отталкивания, может гарантировать, что расстояние между роботами будет стабильным в желаемом диапазоне. Тогда безопасность фlocksирования и стабильность связи гарантированы. В этой статье доказывається, что как связность, так и объективное управление фlocksированием не влияют на стабильность друг друга при условии, что оба контроллера ограничены. Таким образом,

глобальная связность и конфигурация системы позволяют достичь желаемых состояний. В работе разработан метод управления, основанный на интегральном скользящем режиме, который может противодействовать внешним возмущениям и обеспечивать динамику систем с несколькими роботами. Данный метод подходит только для систем из нескольких роботов, находящихся в прямой видимости друг от друга или в зоне действия сети.

Среди моделей, которые подходят для организации информационного обмена в коалициях мобильных роботов, выделяются хаотические модели [Шабанов В.Б., Иванов Д.Я. Применение хаотических моделей и блокчейн-технологий для организации защищенного информационного обмена в группах роботов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. №10], обладающие следующими особенностями:

- Ортогональность: из-за нерегулярности хаотических сигналов их автокорреляционная функция имеет сильное затухание, что наилучшим образом указывает на применение в многоагентных системах, ввиду большого количества устройств находящихся на одной частоте

- Криптостойкость: сигналы не регулярны и имеют сложную структуру, один и тот же генератор может выдавать разные сигналы при незначительных изменениях. Ввиду этого спрогнозировать изменения сигнала в долгосрочной и среднесрочной перспективе не представляется возможным.

- Широкополосность: сигналы непериодичны и обладают широким спектром. Используется блочный алгоритм шифрования, характерной особенностью которого является использование прямого и обратного преобразования, при этом оба процесса преобразования аналогичны по своей сути. Шифруемая информация разбивается на блоки фиксированной длины, и происходит их последовательная обработка.

Хэширование блоков используется для сохранения данных, используемый хэш предыдущего блока позволяет всегда знать место хранения информации и запросить данные в любое время. Также стоит

отметить преимущество хэш-функций, заключающееся в возможности проверить изменения, что обеспечивает надежное хранение данных. В случае коллизии сети, если устройства создадут одновременно блоки с одним и тем же индексом, приоритет выполнения останется за цепочкой с большим количеством блоков.

Применительно к тематике управления группами малоразмерных роботов, целесообразно использовать вариант синхронизации, при котором при подключении узла к новому пиру запрашивается информация о последнем сгенерированном блоке.

Используемая распределенный реестр система, описанная в [Шабанов В. Б., Капустян С. Г. УПРАВЛЕНИЕ ГРУППАМИ ХАОТИЧЕСКИХ МИКРОРОБОТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСПРЕДЕЛЁННОГО РЕЕСТРА //Материалы XII мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2019). – 2019. – С. 112-115], позволяет устранить недостатки системы знаний, образующихся в коллективах роботов. Даже в случае территориальной разрозненности членов группы распределенный реестр не позволяет создать точки отказа из-за согласованности используемых протоколов и репликации данных среди пиров сети. Использование блочного алгоритма шифрования в предлагаемой системе позволяет создать не ресурсоёмкий защищенный канал связи между коллективами роботов для синхронизации и передачи данных в распределенный реестр. Применительно к коллективам роботов использование хаотических моделей и распределенного реестра позволяет создать децентрализованный коллектив с защищенной извне инфраструктурой.

В статье [Шабанов В. Б. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РАСПРЕДЕЛЕННОГО РЕЕСТРА В ГРУППАХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ //XII Мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2019). – 2019. – С. 164-166] рассмотрена возможность использования распределенного реестра для достижения криптозащищенного децентрализованного хранилища данных, с возможностью решения конфликтных ситуаций. Для

реализации информационного обмена между роботами предлагается использовать модель управления группами, основанную на использовании распределенного реестра. Этот подход позволяет создать децентрализованную систему, приходящую к всеобщему консенсусу без внешнего влияния.

В рассмотренных методах для обеспечения целостности, доступности и конфиденциальности данных используются сложные алгоритмы шифрования, что обеспечивает высокий уровень защищенности, но требует от каждого устройства в сети наличия больших вычислительных ресурсов. Но данный метод, как и вся технология блокчейн, подвержен атаке 51%, что может привести к полному реформированию сети злоумышленниками. Также данный метод не решает проблемы организации сети в местностях со сложным рельефом и большим числом преград. В работах не рассматривается поведение сети при перемещении роботов, а также влияние коллизий передачи данных и преград, что закрывают прямую видимость.

Другой подход к передаче информации через достижение консенсуса рассматривается в [Амелин К. С., Амелина Н. О. Передача информации через достижение консенсуса в децентрализованной сети робототехнических комплексов // Стохастическая оптимизация в информатике. – 2019. – Т. 15. – №. 2. – С. 3-12]. Для этого в статье описаны принцип построения сети робототехнических комплексов с децентрализацией как на программном, так и на аппаратном уровне. Предложенная система нетребовательна к вычислительным ресурсам, но не лишена элемента централизации – она требует обязательного наличия одного центрального агента для точного выполнения маршрутизации. Без него система может поддерживать построенные связи, но неспособна обновлять их и строить новые.

Известна программная платформа [Ваулин Ю. В. и др. Реконфигурируемая система управления и навигации для многофункциональных подводных роботов // Подводные исследования и робототехника. – 2017. – №. 1. – С. 4-13], разработанная с целью унификации

информационного взаимодействия разнородных компонентов в задаче управления автономными необитаемыми подводными аппаратами-роботами (АНПА). При разработке платформы учитывались следующие требования:

- кроссплатформенность (возможность функционирования в разных операционных системах, включая ОС реального времени);
- реконфигурируемость (возможность добавления/удаления оборудования и программного обеспечения с минимальными изменениями);
- малая ресурсоемкость и возможность использования в низкопроизводительных встроенных вычислительных сетях;
- возможность сохранения (логирования) всего или избранного потока данных;
- интерфейс пользователя с поддержкой мобильных устройств;
- тесная интеграция с существующими и создаваемыми системами управления АНПА;
- возможность имитации аварийных ситуаций и моделирования поведения АНПА в ускоренном режиме.

Обмен между процессами осуществляется посредством сообщений – особым образом структурированных блоков информации, которые посылаются в асинхронном режиме. После публикации сообщения поставщик не блокируется до получения ответного сигнала, а действует по принципу «опубликовал–забыл». Все сообщения обладают уникальным идентификатором (имя сообщения), который равен символьному представлению типа данных. Такой подход позволяет гарантировать отсутствие пересечений идентификаторов у сообщений разных типов. Разные сообщения логически объединены в интерфейсы. Ограничение состоит в том, что разработка предназначена только для использования под водой или над водой в прямой видимости между устройствами.

Протокол функционирования беспроводной децентрализованной самоорганизующейся сети связи для обеспечения взаимодействия группы интеллектуальных мобильных роботов в процессе решения поставленных

перед ними кооперативных задач представлен в [Хохлов Н. И. и др. A protocol for organizing a decentralized wireless communication network for ensuring the interaction of a group of intelligent mobile robots //Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2020. – Т. 63. – №. 12]. Он представляет совокупность четырех алгоритмов, при помощи которых организуется связь между узлами:

- подключение узла к беспроводной сети (процедура Handshake, „рукопожатие“);
- проверка связи между узлами-соседями (процедура Hello);
- поиск маршрута к заданному узлу (процедура Route);
- пересылка данных между узлами.

При планировании мобильной сетевой инфраструктуры следует стремиться к максимальной связности между передатчиками данных, чтобы обеспечить как можно более короткие пути для передачи сообщений. Данный протокол рассчитан на большое количество устройств в сети. Однако при использовании данного метода с малым количеством устройств будет снижаться уровень сигнала, при большом — уровень сигнала будет выше, но начнутся проблемы с коллизиями передачи данных.

В работе [Хохлов Н. И. и др. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТОКОЛА МАРШРУТИЗАЦИИ БЕСПРОВОДНОЙ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ САМООРГАНИЗУЮЩЕЙСЯ СЕТИ //Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – №. 6] представлена программная модель, предназначенная для более детального исследования указанного протокола. Установлено, что:

1. Чем больше степень связности узлов в сети, тем больше в сети коротких маршрутов передачи сообщений между любой парой узлов. В результате время передачи данных в такой сети значительно ниже, чем в сетях, состоящих из такого же количества узлов, но с меньшей степенью их связности.

2. С уменьшением значения константы времени подключения (меньше 350 миллисекунд) коэффициент загрузки сети растет экспоненциально и при большом количестве узлов, составляющих сеть, приближается к единице. В этом случае в общий коэффициент загрузки наибольший вклад вносит служебный трафик.

3. При малых значениях константы времени подключения в сети превалирует служебный трафик и отсутствует запас пропускной способности для передачи значительных объемов прикладных данных. Все это приводит к потерям прикладных пакетов.

4. При увеличении степени связности узлов в сети общий коэффициент загрузки сети при передаче тестового объема данных уменьшается, что можно объяснить существованием более коротких маршрутов для передачи потоков данных и соответственно меньшей нагрузкой на сеть при ретрансляции данных между транзитными узлами.

В работе [Канушкин С. В. Синергетический подход в управлении группой беспилотных летательных аппаратов системы охранного мониторинга //Правовая информатика. – 2018. – №. 3] предложен способ «стайного» управления группой роботов. Основная идея к реализации стайного управления в группе роботов заключается в постоянной адаптации (самообучении) каждого робота к согласованным действиям в составе стаи на основе результатов измерений реакции среды на действия стаи. Техническим средством, наиболее подходящим для организации процесса самообучения, являются нейронные сети. Поэтому систему управления роботов, входящих в стаю, целесообразно строить на базе нейронной сети. Однако такие сети долго обучаются, не предназначены для применения в изменчивых условиях, непредсказуемы, а результат обучения нейронных сетей не всегда соответствует ожиданиям.

Авторы статьи [Matoui F. et al. Path planning of a group of robots with potential field approach: decentralized architecture //IFAC-PapersOnLine. – 2017. – Т. 50. – №. 1. – С. 11473-11478] рассматривают группу мобильных роботов

как сеть с децентрализованной архитектурой. Каждый робот планирует свою траекторию в соответствии со своим фактическим положением, положением других соседних роботов, положением препятствий и положением своей целевой точки. Таким образом, каждый робот должен взаимодействовать с другими роботами в сети, чтобы сотрудничать вместе, чтобы спланировать траекторию каждого из них. Планирование пути происходит на основе подхода потенциального поля. Сеть реагирует на изменения рабочего пространства в реальном времени, обновляя системные уравнения, связанные с каждым роботом. Основная цель этой работы - избежать столкновения роботов с препятствиями, чтобы обеспечить безопасность роботов. Решение протестировано и смоделировано с помощью Matlab / Simulink и Solidworks / Simmechanics. Данный метод требует расположения устройств на близком расстоянии друг с другом. Он больше подходит для территорий с полным покрытием радиосигнала Wi-Fi и не предназначен для использования на больших территориях без повсеместного покрытия радиосигналом.

В работе [Chen L. et al. Non-Communication Decentralized Multi-Robot Collision Avoidance in Grid Map Workspace with Double Deep Q-Network // Sensors. – 2021. – Т. 21. – №. 3. – С. 841] представлен децентрализованный метод предотвращения столкновений с несколькими роботами с глубоким обучением с подкреплением, который не только подходит для системы с несколькими роботами в рабочем пространстве с крупномасштабной сеточной картой, но также напрямую обрабатывает сигналы лидаров вместо обмена данными между роботами. В соответствии с особенностями рабочего пространства авторы работы вручную создали функцию вознаграждения, которая учитывает, как предотвращение столкновений между роботами, так и минимально возможное изменение направления роботов во время вождения. Используя Double Deep Q-Network (DDQN), роботы были обучены в рабочем моделируемом пространстве с сетчатой картой (grid map).

Авторы работы рассматривают проблему как частично наблюдаемый марковский процесс принятия решений (partially observable Markov decision

process POMDP) и решили ее, разработав структуру обучения с подкреплением. POMDP формально определяется кортежем из семи переменных $(S, A, Pr, R, O, Z, \gamma)$, где S - пространство состояний, A - пространство действий, Pr - функция перехода состояний, R - награда. функция, $\gamma \in [0,1]$ - коэффициент дисконтирования, O - конечный набор наблюдений ($o \in O$), а Z - функция наблюдения ($o \sim Z(s)$). Ограничения подхода состоят в том, что нейронные сети долго обучаются, не предсказуемы, данный метод рассчитан на использовании в условиях полного покрытия территории радиосигналом.

В [Dutta R., Sun L., Pack D. A decentralized formation and network connectivity tracking controller for multiple unmanned systems //IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2017. – Т. 26. – №. 6. – С. 2206-2213] представлен новый децентрализованный контроллер для нескольких БЛА, которые могут летать в симметричном строю, окружающем враждебную мобильную цель, при этом поддерживая и контролируя подключение к сети. Топология обмена информацией с несколькими БЛА рассматривается как изменяющаяся во времени функция расстояний между агентами. Исследуется влияние параметров контроллера на поведение группы БЛА для поддержания связи. Также изучается использование предлагаемого контроллера для отслеживания желаемого профиля связи вместе с управлением БЛА в целенаправленном построении. Результаты моделирования подтверждают эффективность предложенного контроллера. В работе авторы фокусируются на управлении системой с несколькими БЛА и предполагают, что истинные состояния передаются в контроллер формации; однако в реальных приложениях состояния оцениваются с использованием прогнозирования движения с объединением информации датчиков перед подачей в контроллер. Фактически, несовершенная оценка местоположения БЛА может оказать неблагоприятное влияние на управление формированием, например: 1) потерю остова дерева из-за неправильной информации о расстояниях между БЛА во время процесса формирования; 2) сбой

сходимости по замкнутому контуру из-за многократной потери остовных деревьев; и 3) искажение окончательной топологии пласта далеко от желаемой симметричной формы пласта.

Децентрализованная двусторонняя телеоперация (The decentralized bilateral teleoperation) для сети мобильных роботов представлена в работе [Lin C. W., Liu Y. C. Decentralized estimation and control for bilateral teleoperation of mobile robot network with task abstraction //2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – IEEE, 2017. – С. 5384-5391] с использованием модифицированного PI-средства оценки и предлагаемого нового контроллера. В рамках системы управления человек-оператор может дистанционно управлять группой мобильных роботов, общаясь только с одним из роботов в группе. Другие роботы должны оценить глобальную целевую функцию, которая используется в алгоритмах управления. С использованием децентрализованного фреймворка положением и размером группы мобильных роботов можно управлять дистанционно для выполнения различных миссий. Эксперименты показывают, что система стабильна и гарантирует качество слежения. Данный метод требует больших вычислительных мощностей на каждом устройстве, что сильно удорожает разработку и делает ее неприемлемой для малых БЛА.

Авторы работы [Kit J. L., Mateo D., Bouffanais R. A decentralized mobile computing network for multi-robot systems operations //2018 9th IEEE Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON). – IEEE, 2018. – С. 309-314] вдохновлялись коллективным поведением животных, которое является парадигматическим примером полностью децентрализованных операций, включающих сложные коллективные вычисления, такие как коллективные очереди в стаях птиц или коллективный сбор муравьев. Эти системы являются уникальным источником вдохновения для разработки отказоустойчивых и самовосстанавливающихся систем с несколькими роботами, способных работать в динамических средах – например, роевые роботы. В данной

работе авторы представляют структуру коллективных вычислений, основанную на парадигме «роения», которая демонстрирует ключевые врожденные особенности роя: надежность, масштабируемость и гибкость. В отличие от пограничных вычислений, предлагаемая среда коллективных вычислений действительно децентрализована и не требует вмешательства пользователя или дополнительных серверов для поддержания своей работы. Эта структура коллективных вычислений применяется к сложной задаче коллективного картирования, в которой несколько роботов стремятся совместно нанести на карту большую территорию.

Результат локальных вычислений на одном узле влияет на динамику узла, который влияет на сеть ближайших соседей и на сети роя, подключенных к ней посредством сложного процесса распространения. И динамика узла, и сети определяют стратегию совместного управления. Очевидно, что система роения работает с локальными вычислениями и стратегией совместного управления. Для корректной работы такой сети все устройства должны находиться на близком расстоянии друг от друга. При этом система не защищена от выхода из строя одного из устройств, что может привести к потере связи с частью устройств сети.

Модульные мобильные платформы как аппаратная база самоорганизующихся КФС

Использование мобильных робототехнических платформ с различным оснащением позволяет решать прикладные задачи без участия человека или совместно с ним. Разработка модульных компонентов и программного обеспечения для робототехнических платформ позволяет изменять конфигурацию роботов, расширяя возможности по их использованию в различных средах и ситуациях. Также модульные компоненты позволяют эффективнее решать задачи обеспечения отказоустойчивости робототехнических средств и осуществлять быструю замену вышедших из строя частей, чтобы обеспечить полноценное функционирование РТК.

В работе [Демин, А. В., Адаптивное управление роботами с произвольно заданной модульной конструкцией // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Математика». – 2019. – Т. 29. – С. 10–21.] предложен подход к адаптивному управлению модульными роботами с произвольной конструкцией в рамках заданных пользователем ограничений. Данный подход обеспечивает возможность настройки формируемой конфигурации робота путем ввода набора базовых предикатов. При этом набор предикатов задается не для каждого отдельного типа роботов, а для всего класса схожих конструкций. Для этого конструкция робота представляется в виде дерева элементов, в котором каждая вершина – модуль, а ребра – соединения между вершинами. Это позволяет уменьшить участие человека в процессе реконфигурации, но предъявляет требования к разработке наборов предикатов, в которых необходимо учитывать все возможные параметры роботов, используемые для обучения системы управления.

В работе [Andreev, V. Control system and design of the motion module of a heterogeneous modular mobile robot / V. Andreev, V. Kim // Annals of DAAAM & Proceedings. – 2016. – Vol. 27. – P. 586–595.] представлен функциональный модуль для приведения в движение гетерогенного модульного робота, включающий в себя колеса, приводы и датчики. В представленном роботе каждый отдельный модуль способен выполнять основные функции, необходимые для работы всего устройства. Плюсом конструкции является то, что модули могут находиться в структуре робота в произвольных местах, определяемых при сборке робота в зависимости от его назначения, а сам модуль движения конструктивно независим от других модулей робота. К недостаткам системы в целом можно отнести невозможность автоматического отсоединения модуля из конструкции в случае неполадок.

В работах [Saikin A. M. Perspectives of the unmanned cargo transport with electric traction development under the conditions of the Russian Federation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2019. –

Т. 534. – №. 1. – С. 012002.; Ježek J. et al. TRANSMISSION DESIGN FOR AN AUTONOMOUS MODULAR PLATFORM.] представлена автономная грузовая платформа GM SURUS с водородными элементами питания от General Motors (рис. 1). Движение данного устройства обеспечивается двумя электродвигателями. Заявленный запас хода составляет 640 км по дорогам общего пользования. Платформа разработана как средство с высокой проходимостью и управляемостью в сложных погодных условиях и изменяющейся среде. Платформы SURUS предлагается использовать как: грузовики (внедорожные и дорожные), энергогенераторы на колесах, специальные автомобили для армии, медицинских и спасательных служб. Ввиду отсутствия практических результатов экспериментальной проверки используемых в платформе технических решений и технологий, продемонстрированных в прототипе, не представляется возможным дать объективную оценку работе платформы и ее программного обеспечения.



Рис. 1. Платформа GM SURUS

В работе Saleh, T. Modular robotic platform for autonomous machining / T. Saleh, M.R. Khan // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2019. – Vol. 105(5), – P. 2557–2567.] представлена модульная роботизированная платформа для автономной обработки материалов с использованием числового программного управления в условиях, когда невозможно обработать заготовку в заводских условиях. Платформа состоит из модулей шасси – шестиногого шагающего робота, сменного рабочего органа и органов управления камерой, подсветкой и интерфейсом для

управления. В реализованном прототипе в качестве рабочего органа использовался сверлильный аппарат с шпинделем на треугольном шатуне. Для компенсации ошибок позиционирования рабочего органа авторы проекта разработали собственный специализированный алгоритм, благодаря которому прототип имеет повторяемость менее 10 мкм при сверлении на 2500 оборотах в минуту и скорости перемещения головки рабочего органа 200 мм в минуту. Предложенное решение разработано как мобильная автономная альтернатива промышленным ЧПУ-станкам с тремя осями координат, однако, из-за особенностей механизированной обработки различных материалов, а также ограничений самой конструкции, имеет узкую область применения и должно быть модифицировано вручную под каждую отдельную прикладную задачу.

В работе [Zarco, L. Software Model Requirements Applied to a Cyber-Physical Modular Robot in a Production Environment / L. Zarco , J. Siegert , T. Bauernhansl // *Procedia CIRP*. – 2019. – Vol. 81. – P. 352–357.] представлен подход к моделированию гибкой и адаптируемой киберфизической системы для интеграции модульного робота в производственную среду. Вводится понятие функциональной единицы, как набора базовых компонентов, объединенных посредством физического или информационного взаимодействия и выполняющих одну или несколько задач в производственных процессах. Модель функциональной единицы включает характеристики компонентов базового блока, модели устройства и спецификации. Базовый модуль может описываться характеристиками электронных компонентов, механики или программного обеспечения, что также позволяет использовать его как отдельное устройство или как модуль более сложного устройства. Подход продемонстрирован на модульном роботе IFF (рис. 2). Преимуществом представленного решения является описание функциональных единиц, разделяющее различные рабочие органы по параметрам и назначению, что позволяет описывать всю систему как

набор модулей. Минусом решения является неоднородность описания модулей в зависимости от их типа, конструкции и назначения.

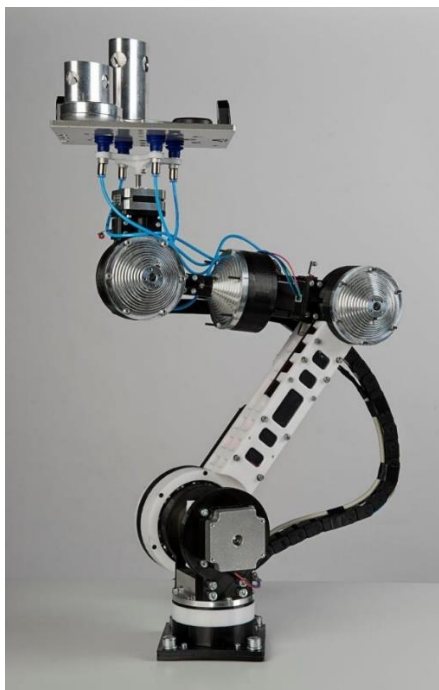


Рис. 2. Киберфизический робот IFF

В работах [Cordie, T. Modular Field Robots for Extraterrestrial Exploration / T. Cordie, R. Steindl, R. Dungavell, T. Bandyopadhyay // *Advances in Astronautics Science and Technology*. – 2020. – Vol. 3(1). 37–47; Hirsig B. et al. Passive reconfigurable limb-link for mobile field robotics // *Proceedings of Australasian Conference on Robotics and Automation 2019: ACRA 2019*. – 2019; Cordie T. P. et al. Modular field robot deployment for inspection of dilapidated buildings // *Journal of Field Robotics*. – 2019. – Т. 36. – №. 4. – С. 641-655.] описывается встраиваемая система модульных колес NeWheel (рис. 3). Система разработана для обеспечения быстрой реконфигурации шасси колесных вездеходов до или во время разворачивания. Это позволяет изменять количество и схему расположения модулей системы на шасси вездехода и не требует симметричного расположения, что удобно по сравнению с обычными колесами. Каждый модуль состоит из приводного колеса, поворотного механизма, бортового контроллера и аккумулятора. Система позволяет комбинировать модули NeWheel с обычными колесами.

Представлены сценарии работы системы в случае полной или частичной неисправности одного или нескольких модулей: поворотный модуль с неработающим приводным колесом, приводной модуль с неработающим поворотным механизмом, а также исключение полностью неисправного модуля из структуры системы. Недостатком решения является сложность объединения встроенных вычислительных и энергетических ресурсов каждого модуля в единую систему.

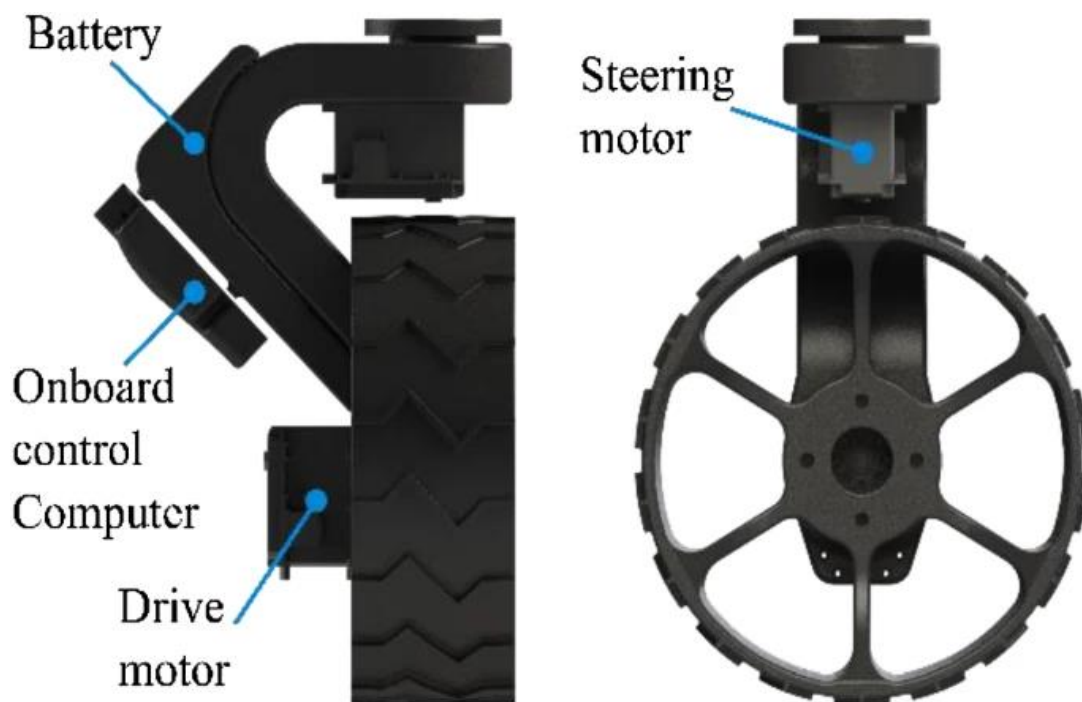


Рис. 3. Встраиваемая система модульных колес NeWheel

В работе [Blomqvist, Kenneth, et al. "Go fetch: mobile manipulation in unstructured environments." arXiv preprint arXiv:2004.00899 (2020)] представлена роботизированная платформа со всенаправленными шасси Clearpath Ridgeback, предназначенная для манипуляций различными объектами. Шасси на всенаправленных колесах обеспечивает точное позиционирование в условиях ограниченного пространства, робот оснащен датчиками LiDAR и IMU. Грузоподъемность робота составляет 100 кг при габаритах 0,96x0,79x0,3 метра, при весе самой платформы 135 кг. Мобильный робот интегрирован в среды ROS и Gazebo для проведения симуляционного моделирования, поддерживает функцию быстрого встраивания широкого набора манипуляционных систем различных

производителей (рис. 4). Конструкция платформы не предусматривает расширение функциональности с помощью дополнения аппаратного обеспечения самого устройства. Также к недостаткам платформы можно отнести вынос антенн связи на поверхность, предназначенную для размещения полезной нагрузки, что затрудняет установку и базирование дополнительного оборудования.

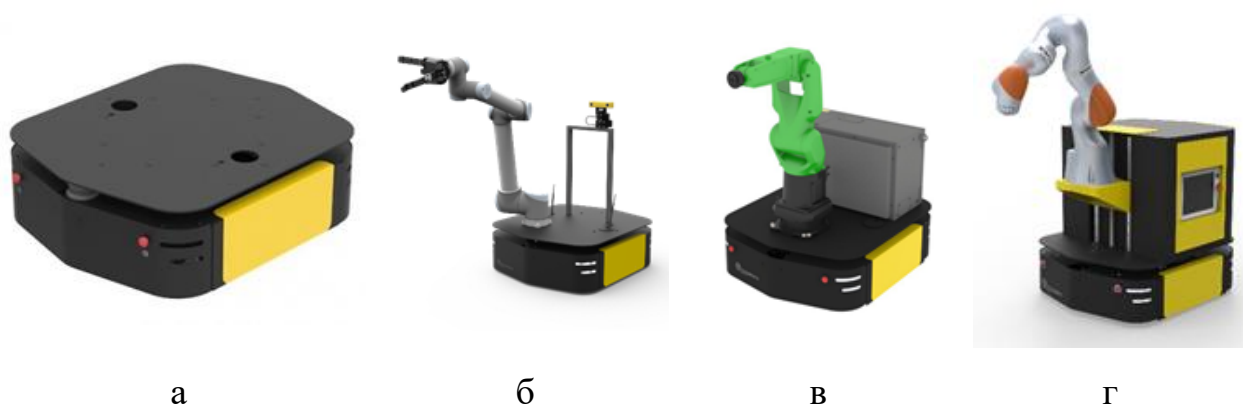


Рис. 4. Платформа Clearpath Ridgeback с установленным на нее оборудованием сторонних производителей: а) базовая платформа, б) UR5, в) Fanuc, г) KUKA

В работе [Pecka A. et al. Conceptual Design of Modular Multi Functional Agricultural Mobile Robot //Research for rural development. – 2018. – Т. 1.] представлен концептуальный дизайн мобильного робота Formica 01 для различных сельскохозяйственных задач. Модульная конструкция мобильного сельскохозяйственного робота разработана с целью увеличения количества задач, которые способен выполнять один роботизированный блок, за счет сменной центральной рамы, что повышает его экономическую эффективность. Также модульная конструкция робота приспособлена к использованию на полях с различной шириной грядок. Недостатком робота является узкая специализированность под заданный ограниченный набор сценариев использования, не предполагающая переоборудование или дополнение различными модулями в случае необходимости расширения функционала. Используется усложненная система управления колесами, каждое колесо имеет собственный привод, но не имеет поворотного

механизма, при этом заявляется возможность расширения рамы при необходимости, что усложнит маневрирование робота во время работы на открытых территориях с неоднородной местностью и с различными культурами.

В работе [Luo Z. et al. Module-based structure design of wheeled mobile robot //Mechanical Sciences. – 2018. – Т. 9. – №. 1. – С. 103-121.] предложен подход к синтезу конструкции колесных мобильных роботов. Предлагаемый метод синтеза сформулирован с использованием теории множеств и связанных с ней операций. Ссылаясь на типовые компоненты, используемые в мобильных роботах, были классифицированы и охарактеризованы три набора базовых модулей, которые включают набор модулей колесных приводов, образованный четырьмя типами механизмов; комплект подвесного модуля, состоящий из пяти типов конструкций, и набор модулей шасси, состоящий из пяти типов жестких или шарнирных конструкций. Это позволяет получать различные комбинации структур модульных платформ с высокой проходимостью и большим количеством опорных точек. Недостатком решения является необходимость ручной проверки результатов синтеза, так как полученные результаты могут быть неподходящими для практического применения.

Робототехническая система KMR iiwa (рис. 5) состоит из модульного манипулятора LBR iiwa и мобильной платформы. Преимуществом системы является точность позиционирования манипулятора, составляющая $\pm 0,1$ мм при возможности взаимодействия с объектами на расстоянии до 80 см. Грузоподъемность платформы – 400 кг. Модуль манипулятора, устанавливаемый на платформе, может поднимать до 14 кг. В работах [Heggem C., Wahl N. M., Tingelstad L. Configuration and Control of KMR iiwa Mobile Robots using ROS2 //2020 3rd International Symposium on Small-scale Intelligent Manufacturing Systems (SIMS). – IEEE, 2020. – С. 1-6., Ramasubramanian A. K., Papakostas N. Operator-mobile robot collaboration for synchronized part movement //Procedia CIRP. – 2021. – Т. 97. – С. 217-223.,

Meier, F. (2016). Industry 4.0: Is your logistics equipped for the future?. MHD Supply Chain Solutions, 46(6), 20-22. Frankovský, P., Pástor, M., Dominik, L., Kicko, M., Trebuňa, P., Hroncová, D., & Kelemen, M. (2018, May). Wheeled mobile robot in structured environment. In 2018 ELEKTRO (pp. 1-5). IEEE.] описываются сценарии взаимодействия с роботом, управляемым ROS2, а также взаимодействие оператора и платформы при решении совместных задач и интеграция в производство в рамках индустрии 4.0. К недостаткам решения относится отсутствие возможности модернизации платформы в целях расширения функционала.



Рис. 5. KMR iiwa

Компания Pudu Robotics занимается производством интеллектуальных роботов для автоматизации доставки товаров, например, BellaBot (рис. 6). Робот оснащен 2 камерами глубины Intel RealSense D435i со встроенными инерционными датчиками, что позволяет ему строить трехмерную карту окружающей среды и ориентироваться в помещениях при помощи SLAM-алгоритмов. Для координации и взаимодействия нескольких устройств в одном помещении используется децентрализованная система управления, которая также обеспечивает связь между устройствами. Это позволяет любому роботу напрямую обмениваться данными с другим роботом в той же сети при выполнении расчетов и принятии решений, что снижает вычислительную нагрузку на центральный вычислительный узел. Для

обеспечения устойчивости робот оснащен подвеской с рычажным механизмом, позволяющим ему адаптироваться к неровностям поверхности, по которой он движется. В описываемом роботе для стабилизации используется подвеска с ведущими колесами и двумя опорными роликами [Wilson, E. D., Assaf, T., Rossiter, J. M., Dean, P., Porrill, J., Anderson, S. R., & Pearson, M. J. (2021). A multizone cerebellar chip for bioinspired adaptive robot control and sensorimotor processing. *Journal of the Royal Society Interface*, 18(174), 20200750. Baxendale, M. D. (2020). Calibration of Sound Source Localisation for Robots Using Multiple Adaptive Filter Models of the Cerebellum (Doctoral dissertation, University of the West of England)]. Несущая платформа BellaBot используется как основа в двух других конфигурациях: Puductor 2 и Holabot, где функциональное назначение определяется установленным на платформу модулем. В первом случае робот используется для автоматизированной дезинфекции помещений, а во втором – для перевозки посуды в ресторанах. К недостаткам решения можно отнести ограниченный набор разработанных устанавливаемых функциональных модулей, а также невозможность использования базового устройства платформы без функциональных модулей.



а



б



в

Рис. 6. а) BellaBot, б) Puductor, в) Holabot

В работах [Grimstad, Lars, and Pål J. From. "Software components of the Thorvald II modular robot." (2018): 157-165. Grimstad, L. and From, P. J. Thorvald II - a Modular and Re-configurable Agricultural Robot. In IFAC 2017 World Congress. 2017a. doi:10.1016/j.ifacol.2017.08.1005.] представлены ключевые программные компоненты мобильной роботизированной платформы Thorvald II (рис. 7). Thorvald II — это модульная система, разработанная для создания роботов произвольной формы и размера, в первую очередь для сельскохозяйственной сферы. Было построено несколько роботов, которые в настоящее время работают на фермах и в университетах в различных частях Европы. Роботы могут быть сконфигурированы для формирования дифференциального привода, рулевого управления Аккермана, полного привода, полного рулевого управления с любым количеством колес и функциональных элементов. Авторы представляют архитектуру программного обеспечения, обеспечивающую возможность заранее настраивать конфигурацию робота. Представленное программное обеспечение организовано в виде набора пакетов ROS, доступных пользователю. Эти пакеты позволяют пользователю создавать свои собственные конфигурации роботов и моделировать этих роботов в Gazebo с помощью предоставленного плагина. Данное решение совместимо только с роботами Thorvald, но представленные пакеты могут быть полезны для тестирования различных конфигураций роботов в моделировании.



Рис. 7. Модульный робот Thorvald II

Авторами работ [Di Castro, Mario, Manuel Ferre, and Alessandro Masi. "CERN-TAURO: A modular architecture for robotic inspection and telemanipulation in harsh and semi-structured environments." IEEE Access 6 (2018): 37506-37522; Prados Sesmero C. Mechatronic design of an omnidirectional robotic platform and its navigation based on graphSLAM implementation: дис. – Universidad Politecnica de Madrid (ES).] описывается модульная платформа для автономных и контролируемых дистанционно операций в условиях, исключающих присутствие человека. Предлагаемая платформа может быть сконфигурирована в зависимости от условий предполагаемой рабочей среды. Роботизированное решение, предложенное в данной статье, способно перемещаться автономно, безопасно исследуя неизвестную среду. В устройстве используется система управления реального времени, что обеспечивает быструю реакцию на изменения окружающей среды и адаптацию к различным типам ситуаций, с которыми платформа может столкнуться в частично наблюдаемой и динамически изменяющейся среде. Компонентами представленной платформы являются: система управления ведущий-ведомый, роботизированная платформа под названием CERNbot (рис. 8) и мультимодальный интерфейс человек-робот, также используемый для обучения операторов, что позволяет техническим специалистам, не имеющим опыта работы с роботами, получить опыт использования таких систем при выполнении базовых операций. Предлагаемая система была протестирована в комплексе CERN. Платформа не имеет вспомогательных систем на случай выхода из строя канала связи или при возникновении помех для возвращения в исходную позицию в автономном режиме.

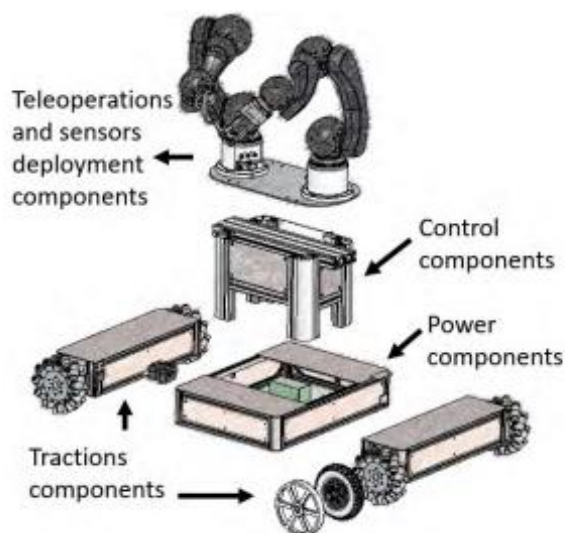


Рис. 8. CERNbot

В работе [Edlinger R., Nuechter A. MARC-Modular Autonomous Adaptable Robot Concept //2019 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR). – IEEE, 2019. – С. 1-7.] представлена многофункциональная модульная адаптируемая платформа, к которой можно подключать сенсоры визуальной одометрии, манипуляторы и захватные устройства. Принцип «plug-and-play» предполагает, что подключаемые модули автоматически интегрируются в ПО платформы, что значительно сокращает время настройки системы и калибровки датчиков. На основе предложенной платформы был реализован прототип спасательного робота (рис. 9). Представленный прототип имеет ограниченный функционал и используется только для отработки концепции подключения модулей без возможности их автономного отключения.



Рис. 9. Прототип модульной адаптируемой платформы

В работе [Liu Y. et al. A DESIGNATION OF MODULAR MOBILE RECONFIGURABLE PLATFORM SYSTEM //Journal of Mechanics in Medicine and Biology. – 2020. – Т. 20. – №. 09. – С. 2040006.] представлены модульные реконфигурируемые мобильные роботы с механизмом соединения кулачкового типа. В шасси роботов используется механизм треугольной гусеницы-колеса, сочетающего в себе преимущества мобильных роботов колесного и гусеничного типа, что обеспечивает высокую адаптивность к местности и проходимость транспортных средств. Описан механизм соединения кулачкового типа, обеспечивающий надежность и гибкость соединения модульной реконфигурируемой мобильной робототехнической системы. По результатам экспериментов доказано повышение проходимости мобильного робота на неоднородной местности (рис. 10). Прототип устройства разработан для проведения экспериментальной апробации предлагаемой системы гусениц-колес, позволяющих перемещаться по лестницам и крутым спускам, а также механизма соединения между двумя гомогенными роботами, не имеющими возможности перевозить полезную нагрузку. В описанном прототипе не предусмотрена возможность взаимодействия с объектами и обратной связи на основе данных об окружающей среде.

В [Yuyao, S., Elara, M. R., Kalimuthu, M., & Devarassu, M. (2018). sTetro: A Modular Reconfigurable Cleaning Robot. 2018 International Conference on Reconfigurable Mechanisms and Robots (ReMAR). doi:10.1109/remar.2018.8449883.] представлен модульный реконфигурируемый робот-уборщик sTetro, в основе которого лежит конвейерный механизм. Предлагаются системные модели для оценки крутящего момента двигателя конвейера и анализа центра тяжести для определения устойчивости платформы. Описывается ПИД-регулятор для обеспечения стабильного движения. Эксперименты, проведенные с реальным роботом, продемонстрировали эффективность и валидность разработанных

системных моделей и подходов к управлению. Предлагаемая модель является концепцией и на данном этапе исследования не предполагает решения таких практических задач, как перевозка грузов и взаимодействие с объектами окружающей среды или взаимодействие с пользователем.

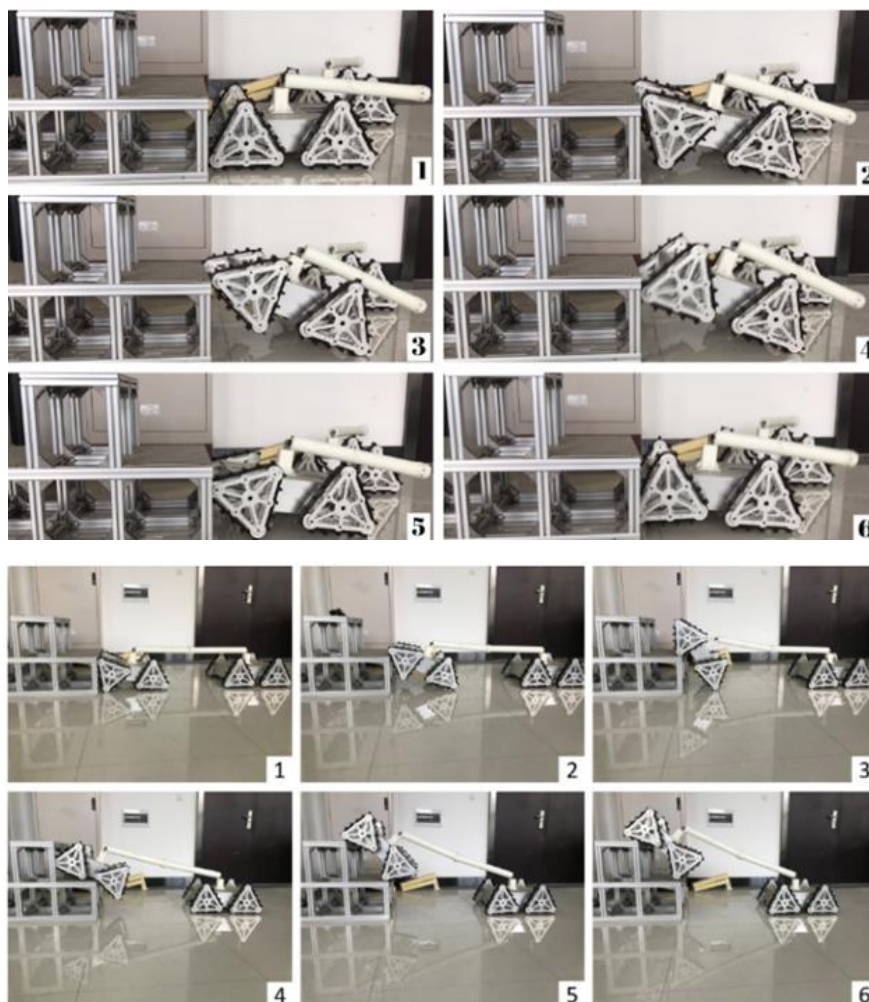


Рис. 10. Модульные реконфигурируемые мобильные роботы

Рассмотренные выше робототехнические платформы отличаются в первую очередь модульной структурой, обеспечивающей изменение конфигурации или аппаратного обеспечения одного, либо группы роботов и их адаптацию под различные задачи. В таблице 1 представлены характеристики рассмотренных модульных робототехнических платформ.

Таблица 1. Характеристики рассмотренных модульных платформ

Название	Базовый модуль	Функциональность	Принцип установки модуля
NeWheel	Мотор-колесо	Обеспечение отказоустойчивости системы и сохранение возможности перемещения	Ручная сборка, автоматическое отсоединение неисправных модулей
Thorvald II	Мотор-колесо	Повышение проходимости робота, расширение функциональных возможностей устройства по взаимодействию с окружающей средой за счет подбора оптимальной конфигурации из набора готовых компонентов, замена неисправных модулей	Вручную
CERNbot	Вычислительный модуль	Выполнение операций оператором через систему телеуправления	Вручную
sTetro	Вычислительный модуль	Повышение проходимости устройства	Автоматически
MARC	Гусеничное шасси	Изменение конфигурации сенсорных устройств и исполнительных механизмов без отключения системы.	Вручную
MMRPS	Гусеничное шасси	Повышение проходимости устройства	Автоматически
Formica 01	Колесное шасси	Адаптация под агротехнические задачи, например под работу с грядками разной ширины	Вручную
WMR	Колесное шасси	Повышение проходимости устройства	Вручную

В настоящее время в модульных робототехнических платформах с возможностью автоматического соединения модулей сами модули представлены полностью независимыми устройствами, пригодными к использованию отдельно. При этом соединительные механизмы обеспечивают только физическое соединение, не дающее высокой точности позиционирования устройств относительно друг друга. В случае, когда необходимо обеспечить точное позиционирование модулей робота относительно друг друга, а также информационное взаимодействие и

энергопитание, как правило, реконфигурацию системы и замену модулей осуществляет пользователь вручную. При этом сами модули могут быть представлены как готовые устройства, а также как отдельные элементы структуры модульного робота.

Рассмотрим некоторые проприетарные решения промышленных модульных робототехнических платформ. Автономный логистический оператор TIAGo Base (рис. 11), разработанный компанией PAL Robotics, позволяет улучшить логистику, сократить расходы и повысить эффективность и продуктивность в различных сферах. TIAGo Base представляет собой робототехническую платформу, адаптирующуюся к изменениям окружающей среды и способную планировать траекторию передвижения с учетом препятствий и людей [Chebotareva E. et al. Person-Following Algorithm Based on Laser Range Finder and Monocular Camera Data Fusion for a Wheeled Autonomous Mobile Robot //International Conference on Interactive Collaborative Robotics. – Springer, Cham, 2020. – С. 21-33; Ruslanovich K. A. et al. RFID-based warehouse management system prototyping using a heterogeneous team of robots. – 2020.]. С помощью предложенных модулей можно перевозить предметы нестандартных габаритов. К недостаткам можно отнести неэффективную конфигурацию верхней плоскости платформы. Вынесенные антенны связи и кнопки аварийной остановки платформы могут мешать при установке функциональных модулей, а доступ к ним затрудняется при установке различных модулей. К тому же, по умолчанию верхняя плоскость платформы не имеет фиксирующих элементов для груза. Сама платформа без дополнительных модулей обладает ограниченной функциональностью по перевозке грузов.



Рис. 11. TIAGo Base и варианты устанавливаемых модулей

Компанией WAYPOINT Robotics было представлено устройство MAV3K, позволяющее перевозить в складском помещении паллеты с различными грузами массой до 1500 кг [Wilkins J. The Challenges of Using Mobile Robots //Environment. – 2020.]. Данное устройство имеет место под установку манипулятора. Аналогичная серия робототехнических устройств SEIT представлена компанией MILVUS Robotics. Платформы SEIT могут перевозить полезный груз до 1500 кг. Максимальная ошибка позиционирования 1 см. Максимальная скорость устройств равна 1.5 м/с. Для ориентации в пространстве используются лидары. В данной линейке роботов предусмотрена установка таких модулей, как: роликовый конвейер; манипулятор; тележка, подъемный механизм, ультрафиолетовый санитайзер [O'Brien J. et al. A feasibility and comparison study of Autonomous Robotic Vehicles for the FMCG manufacturing sector. – 2019.]. Несмотря на наличие подвески, конструкция платформ подразумевает использование строго в складских помещениях и требует гладкой поверхности без неровностей и препятствий.

Компанией OTTO Motors была представлена серия роботизированных платформ ОТТО, с возможностью установки дополнительных модулей на поверхности устройства. Грузоподъемность в зависимости от модели варьируется от 100 до 1500 кг. Срок работы платформ при полном заряде батарей составляет 10 часов. Точность позиционирования в стандартной комплектации составляет ± 10 мм, возможно улучшение системы до точности

позиционирования ± 5 мм. Для ориентации в помещении в устройствах используются лидары и 3D камеры [Chitta S. et al. *ros_control: A generic and simple control framework for ROS* //The Journal of Open Source Software. – 2017. – Т. 2. – №. 20. – С. 456-456; Chun B., Knight H. *The Robot Makers: An Ethnography of Anthropomorphism at a Robotics Company* //ACM Transactions on Human-Robot Interaction (THRI). – 2020. – Т. 9. – №. 3. – С. 1-36.]. Компанией OTTO Motors также предложена линейка специализированных модулей, устанавливаемых на мобильную платформу OTTO 1500. Благодаря данным модулям, роботы OTTO Motors могут применяться как вспомогательные устройства, используемые персоналом для перевозки грузов или как часть конвейерной линии, а также как автономные грузовые роботы. К недостаткам можно отнести отсутствие функциональных модулей или навесного оборудования, предназначенного для автономного взаимодействия с объектами, погрузка грузов на платформу должна осуществляться вручную либо при помощи иных робототехнических средств.

Мобильная платформа OMRON LD-60/90 (рис. 12) представляет собой полностью автономное устройство, разработанное в соответствии с последними отраслевыми требованиями. Платформа предназначена для освобождения персонала от выполнения рутинных операций, не требующих специальной подготовки. Программное обеспечение способно интегрироваться с другими системами на производстве, что обеспечивает встраиваемость робота в рабочий процесс за минимальное время. В отличие от многих автоматических тележек, представленных на рынке, OMRON LD способна использовать естественные элементы производственных площадок и не требует дополнительной доработки конструкции или программного обеспечения [Vehkapuro R. *Mobiilirobottien käyttöön otto ja testaus* Kemppi Oy: n tuotannossa. – 2020.]. Как и во многих других случаях, недостатком платформы является вынос коммуникационных антенн на верхнюю плоскость платформы, используемую для перевозки грузов или установки навесного оборудования. Это создает сложности с размещением полезной

нагрузки или функциональных модулей, используемых для расширения функционала платформы.



Рисунок 12. Мобильная платформа OMRON LD-60/90 и устанавливаемые модули

Mobile Robot 200 (MiR200) (рис. 13) – автономное роботизированное устройство, представленное компанией FLEXTEK AUTOMATION. MiR200 способно автономно транспортировать до 200 кг. Платформа MiR200 маневрирует вокруг людей и препятствий, проходит через дверные проемы, а также входит и выходит из лифтов. Возможна загрузка проекта помещений здания в память устройства или программирование с помощью веб-интерфейса, не требующего предварительного опыта программирования. Задачу робота можно корректировать и адаптировать под новые условия с помощью смартфона, планшета или компьютера, подключенного к сети. Разработан набор устанавливаемых верхних модулей, таких как стеллажи, подъемники, конвейеры или манипулятор, также представлена док-станция для автоматической подзарядки аккумуляторной батареи устройства. Встроенные датчики препятствий, камеры и программное обеспечение обеспечивают определение окружающих объектов и планирование безопасного маршрута движения [Recker T., Heinrich M., Raatz A. A Comparison of Different Approaches for Formation Control of Nonholonomic Mobile Robots regarding Object Transport //Procedia CIRP. – 2021. – Т. 96. – С. 248-253.]. К недостаткам решения относится ограниченный набор внешних органов управления, необходимых для экстренной остановки работы устройства в случае неполадок.



Рис. 13. Мобильная платформа MiR 200 и устанавливаемые модули

Компания Beijing Geekplus Technology представила автономную роботизированную платформу Geek+ с возможностью установки дополнительного навесного оборудования. Система роботизированной транспортировки обеспечивает полностью автоматическую интеграцию различных этапов обработки на производстве, объединяя как оборудование отдельных станков с ручным управлением, так и автоматические обрабатывающие центры в гибкую производственную линию. Автономные роботизированные тележки свободно перемещаются по помещению, планируют маршруты и загрузку-выгрузку без участия человека. Не требуется прокладка рельсов или иных направляющих. Это дает возможность организовывать эффективные и легко настраиваемые процессы транспортировки узлов и материалов на производстве. Системы интеллектуальной транспортировки быстро разворачиваются, легко масштабируются и настраиваются при внесении изменений в производственный процесс [Yin, Hanlin. "The Development and prospection of Automatic Courier sorting robot." Proceedings of the 2020 2nd International Conference on Robotics, Intelligent Control and Artificial Intelligence. 2020.]. На рисунке 14 представлена версия Geek+ M100, имеющая полезную нагрузку до 200 кг, с возможностью установки разного навесного оборудования. Система навигации и обнаружения препятствий, реализованная на SLAM алгоритмах, позволяет осуществлять безопасное перемещение грузов в помещениях с изменяющейся конфигурацией проездов, а также в присутствии людей. К недостаткам относится то, что в базовой комплектации устройство не оборудовано универсальными фиксаторами для закрепления

перевозимого груза, так как предполагается дооснащение базовой комплектации платформы навесным оборудованием под задачу, определяемую пользователем.



Рис. 14. Платформа Geek+ и образцы навесного оборудования

Компания Fetch Robotics представила платформы Fetch, Freight и TagSurveyor, работающие в складских помещениях [Wise M. et al. Fetch and freight: Standard platforms for service robot applications //Workshop on autonomous mobile service robots. – 2016. Lee, H.-Y., & Murray, C. C. (2018). Robotics in order picking: evaluating warehouse layouts for pick, place, and transport vehicle routing systems. International Journal of Production Research, 1–21. doi:10.1080/00207543.2018.1552031, Chen, Y., Leighton, B., Zhu, H., Ke, X., Liu, S., & Zhao, L. (2020). Submap-based indoor navigation system for the Fetch robot. IEEE Access, 8, 81479-81491. Schulz, T., Holthaus, P., Amirabdollahian, F., & Koay, K. L. (2019, March). Humans' perception of a robot moving using a slow in and slow out velocity profile. In 2019 14th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI) (pp. 594-595). IEEE.]. Данные платформы оснащены манипулятором, набором датчиков препятствий, лидаром, камерами и ПО для восприятия объектов, навигации и манипуляций в динамических средах. Шасси платформ Fetch, Freight и TagSurveyor имеют одинаковую конструкцию и программно-аппаратное обеспечение. Платформы отличаются функциональностью: одна из платформ разработана для работы погрузчиком, а другая – доставщиком. Погрузчик оснащен манипулятором с 7 степенями свободы, способным удерживать до 6 кг

полезной нагрузки. Доставщик позволяет транспортировать груз до 70 кг. Платформы оснащены модульным захватом, механическое крепление основано на стандарте ISO, а электрический интерфейс представляет собой простой источник питания 24 В, также доступен интерфейс Ethernet. В случае стандартного использования Fetch и Freight рассчитаны на работу в течение четырех лет без капитального обслуживания. TagSurveyor автоматизирует подсчет цикла инвентаризации и сокращает потери инвентаря за счет сбора, обнаружения и отслеживания RFID-меток на продуктах и ящиках на складах и фабриках. TagSurveyor может служить в качестве специального решения для автоматического сбора данных, а также может дополнять существующие стратегии отслеживания RFID. К недостаткам платформы можно отнести невозможность использования базового устройства платформы без функциональных модулей. Предполагается использование платформ либо с предустановленным навесным оборудованием, либо работа платформ в составе группы, в которой одна часть устройств оснащена манипуляторами, а другая контейнерами для перевозки грузов.

В таблице 2 приведены характеристики модульных платформ промышленного применения.

В платформах, где базовым модулем является полностью законченное устройство, для установки дополнительных модулей, представленных также готовыми к использованию устройствами, используется полностью ручной метод реконфигурации, осуществляемый пользователем. В настоящее время модульная структура робототехнических платформ в большинстве сценариев применения характеризуется разделением не всех узлов устройства сразу, а разделением на независимые и отдельно применимые. Это позволяет менять конфигурацию устройств заранее, подготавливая их к выполнению конкретной задачи и не подразумевает адаптацию устройств к изменяющимся условиям без вмешательства со стороны. Недостатком данных систем является отсутствие возможности замены таких модулей автоматизировано, без взаимодействия с человеком.

Таблица 2. Характеристики промышленных модульных платформ

Название	Базовый модуль	Функциональность	Принцип установки модуля
BellaBot (HolaBot, Puductor 2)	Платформа с базовым функционалом локомоции и навигации	официант, дезинфектор, сборщик	Вручную
Fetch и Freight	Платформа с базовым функционалом локомоции и навигации	манипулятор, грузовой контейнер, модуль инвентаризации	Вручную
Geek+	Платформа с базовым функционалом локомоции и навигации	тележка, конвейер, транспортировочные полки и палеты	Вручную
SURUS	Платформа с базовым функционалом локомоции и навигации	медицинский модуль, тягач, электрогенератор	Вручную
Mobile Robot 200	Платформа с базовым функционалом локомоции и навигации	тягач, конвейер, манипулятор	Вручную
KMR iiwa	Платформа с базовым функционалом локомоции и навигации	манипулятор, грузовой контейнер	Вручную
OMRON LD-60/90	Платформа с базовым функционалом локомоции и навигации	тележка, конвейер, транспортировочные полки и палеты	Вручную
OTTO 1500	Платформа с базовым функционалом локомоции и навигации	конвейер, манипулятор, подъемный механизм	Вручную
SEIT 1500	Платформа с базовым функционалом локомоции и навигации	конвейер, манипулятор, подъемный механизм, тележка	Вручную
MAV3K	Платформа с базовым функционалом локомоции и навигации	манипулятор	Вручную
TIAGo Base	Платформа с базовым функционалом локомоции и навигации	тележка, конвейер, транспортировочные полки и палеты	Вручную
Clearpath Ridgeback	Платформа с базовым функционалом локомоции и навигации	линейка встраиваемых манипуляторов	Вручную
Bolt	Платформа с базовым функционалом локомоции и навигации	тележка, конвейер, транспортировочные полки и палеты, манипулятор	Вручную

Предлагаемые на данный момент автономные мобильные платформы представляют из себя набор функциональных модулей, каждый из которых предназначен для выполнения типовых задач. Наиболее часто отдельными

модулями представлены шасси, манипулятор и контейнер для груза. Модуль шасси представляет из себя готовое устройство, осуществляющее локализацию, навигацию и движение всего робота. Модуль манипулятора позволяет осуществлять взаимодействие с окружающей средой. Модуль контейнера для груза предназначен для фиксации и транспортировки грузов. Помимо этого, автономные мобильные платформы могут быть оснащены дополнительными устройствами, такими как, например, вспомогательные модули для более точного распознавания людей и объектов окружающей среды. В ряде разработок реализуются дополнительные модули для более точной навигации и позиционирования платформ в зависимости от условий, в которых должен работать робот. Для ряда рассмотренных решений разрабатывается навесное оборудование, обеспечивающее использование устройства в качестве вспомогательных полуручных тележек.

Выводы

Проблемы, связанные с построением децентрализованных архитектур КФС, поведением КФС в случае потери связности системы, самоорганизацией КФС при отказе отдельных её компонентов или составных частей являются предметом исследования многих ведущих научных коллективов. Однако, при наличии множества отдельных разработок в этих областях, отсутствует целостный, исчерпывающий подход, в рамках которого возможно построение устойчивых КФС, функционирующих на открытых территориях в динамической среде. Основными ограничениями существующих подходов являются:

- требование прямой видимости между устройствами и/или малого расстояния между ними;
- необходимость в большом количестве устройств для поддержания достаточного уровня связи;
- применимость только для стационарных устройств КФС;

- необходимость в больших вычислительных мощностях устройств КФС;
- возможность работы только в статичном и определённом окружении, либо необходимость в длительном и ресурсоёмком процессе переобучения;
- наличие центральных, критических узлов и узких мест, выход из строя или перегрузка которых приведёт к отказам в системе;
- ограниченный спектр задач децентрализации;
- узкая специализация децентрализованных КФС.

Можно сформировать рекомендации и предложения, которые следует использовать для построения КФС, отвечающих поставленным в проекте требованиям:

- следует использовать типовые многоцелевые узлы КФС, которые различаются по набору поддерживаемых функций, физическим и вычислительным мощностям, что позволит таким узлам заменять друг друга и при этом не приведёт к необходимости разработки универсальных узлов;
- следует выделять роли, доступные каждому виду узлов, и реализовывать алгоритмы их динамического назначения; роли подразделяются на прикладные (выполнение задач КФС) и служебные (ретрансляция сигналов, управление другими компонентами КФС);
- следует избегать наличия незаменимых (критических) узлов КФС, выход из строя которых сделает невозможным выполнение задач КФС при наличии остальных исправных узлов;
- следует обеспечить избыточность узлов КФС каждого вида для перераспределения ролей и задач в случае выхода отдельных узлов из строя, а также для дублирования каналов связи;
- следует использовать оборудование, которое обладает достаточным для исследуемой местности уровнем защиты от воздействия

окружающей среды (влаги, пыли, температур), чтобы снизить вероятность выхода оборудования из строя;

- следует поддерживать актуальные данные о территории, что включает в себя как предварительный сбор данных (например, радиообследование территории вручную или при помощи БЛА с построением карты препятствий для распространения радиосигнала и передвижения роботов – постройки, густая растительность, водоемы), так и переобучение КФС в процессе работы (например, с использованием алгоритмов SLAM).

Кроме того, для функционирования КФС необходимо обеспечить ряд принципов построения сети:

- в любой момент времени сеть должна обеспечивать прием/передачу данных на приемлемой в контексте выполняемых задач скорости в любой точке сети;
- сеть должна поддерживать бесшовное подключение («бесшовный роуминг»), т. е. автоматическое переподключение без задержек от одного ретранслятора к другому;
- сеть должна обеспечивать избыточность путей передачи данных в каждый момент времени;
- сеть должна быть расширяемой, гибкой в конфигурировании и администрировании;
- сеть должна быть защищена от несанкционированного доступа и подключения сторонних неавторизованных устройств.

Решения, которые лишены указанных выше недостатков и в полной мере соответствуют изложенным требованиям и принципам, на данный момент не встречаются. КФС, способные к быстрому развертыванию и оперативной адаптации собственной инфраструктуры к изменяющимся условиям окружения, на сегодняшний день практически отсутствуют. Это не

только ограничивает применение таких систем на изменяющихся, открытых территориях, но и практически полностью устраняет возможности ситуативного краткосрочного использования КФС, поскольку в таких случаях время развертывания КФС будет в значительной мере превышать время их целевого функционирования. Частичным выходом может быть интеграция существующих решений на разных уровнях модели ISO/OSI, но это также требует дополнительных исследований. Таким образом, поставленная цель порождает необходимость решения ряда научных и инженерных задач, которым посвящен данный проект, а именно:

- разработка метода автономного распределения инфраструктурных ролей между множеством компонентов киберфизической системы, представленных гетерогенными робототехническими средствами, в условиях изменяющегося окружения и возможного выхода из строя отдельных узлов киберфизической системы;
- 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 робототехническими средствами;
- проектирование модели робототехнических средств, позволяющей реализовать автоматизированную замену отдельных модулей робототехнических средств посредством других роботизированных агентов.

На основе указанных метода и моделей планируется реализовать программные модули, системы и иные компоненты соответствующей киберфизической системы.

Среди существующих разработок очень мало внимания уделяется обеспечению отказоустойчивости автономных мобильных платформ. Редко внимание уделяется исключению полностью неисправных модулей из

структуры системы, например, как в модульной системе NeWheel. Актуальной проблемой является отсутствие возможности быстрой замены полностью или частично неисправных частей мобильной платформы. Указанная проблема может быть решена, если устройства, сочетающие в себе различные программно-аппаратные решения для выполнения набора задач, будут разделены на узкоспециализированные модули, каждый из которых предназначен для решения конкретной задачи. В базовой конфигурации автономная мобильная платформа может состоять из следующих модулей: модули мотор-колес для приведения устройства в движение, модули сенсоров для обеспечения локализации и навигации устройства, вычислительные модули, модуль энергосистемы и модули связи. Для обеспечения отказоустойчивости робототехнических устройств, работающих в группе, предлагается разработать модель автономной мобильной платформы, ориентированной на взаимодействие группы мобильных агентов, представленных гетерогенными роботами и способными осуществлять замену неисправных или неподходящих модулей на отдельных устройствах в зависимости от стоящих перед группой в данный момент задач. Замена модулей может обеспечиваться использованием манипулятора со специализированным захватным механизмом, взаимодействующим с конструкцией модулей, предназначенным для соединения с подобными модулями или общей рамой. При этом манипулятор, как устройство, также может быть представлен как один из модулей автономной мобильной платформы.

Основой для модульной платформы, обеспечивающей быструю автоматизированную замену модулей, может служить рамная конструкция – каркас. Для этого каркас должен иметь посадочные места для установки модулей, а также проводную систему коммуникаций для обеспечения взаимодействия модулей в системе. Система коммуникаций при этом также может быть представлена в виде отдельного заменяемого модуля. При этом конструкция модулей должна обеспечивать взаимодействие с захватным

механизмом манипулятора, осуществляющего установку и замену модулей на платформе. Посадочные места, расположенные на каркасе, должны быть приспособлены для установки следующих типов модулей, разделяемых по назначению аппаратного обеспечения в них: вычислительный модуль, аккумуляторная батарея, двигательная система, модуль контроллеров, модуль беспроводной связи, модуль датчиков препятствий контактного типа, модуль ультразвуковых датчиков препятствий, модуль навигации и локализации, модуль компьютерного зрения, модуль управления питанием, модуль зарядки, модуль внутренних коммуникаций, модуль манипулятора. Для обеспечения надежного соединения конструкция посадочных мест должна обеспечивать высокую точность установки и базирования модулей относительно каркаса платформы. Для этого можно использовать крепление типа «ласточкин хвост» в сочетании с раздвижным или зажимными соединительными механизмами.

Таким образом, конструкция модульной платформы может быть представлена в виде несущего каркаса, на который устанавливается набор базовых и необходимых для выполнения поставленных задач модулей.

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

Общие положения

Для построения КФС, отвечающих поставленным в проекте требованиям, следует использовать типовые многоцелевые узлы КФС, которые различаются по набору поддерживаемых функций, физическим и вычислительным мощностям, что позволит таким узлам заменять друг друга и при этом не приведёт к необходимости разработки универсальных узлов. Следует также выделять роли, доступные каждому виду узлов, и строить алгоритмы их динамического назначения.

Пусть имеется множество узлов $\{N_i\}, i=1...k$ и ролей $\{R_j\}, j=1...n$. Способность узлов выполнять те или иные роли можно задать матрицей S размера $k \times n$.

Множество ролей имеет достаточно сложную структуру, и его можно разложить по уровням модели ISO/OSI, сгруппировав некоторые уровни, используя действующие на практике упрощения (рис. 15).

Уровни модели ISO OSI	Реализованные уровни	Задачи	Протоколы
Прикладной	Прикладной	Управление заданиями	Протоколы Hadoop, Spark, Kubernetes
Представления		Исполнение заданий	
Сеансовый			
Транспортный	Сетевой	Маршрутизация	IP, TCP, UDP Протоколы Mesh-Сетей (OSPF и т.п.)
Сетевой			
Канальный	Физический	Передача данных	Протоколы передачи данных (802.11 и т.п.)
Физический			

Рис. 15. Уровни, задачи и протоколы

Таким образом, отдельно рассматриваются роли, которые назначаются узлам на физическом (R_{ph}), сетевом (R_n) и прикладном (R_a) уровне:

$$R = R_{ph} \cup R_n \cup R_a$$

Кроме того, на прикладном уровне роли могут быть управляющими (R_{ynp}) – например, роль узла, хранящего реестр Hadoop или выполняющего распределение задач, и исполнительными ($R_{исп}$), связанными непосредственно с выполнением вычислительных задач или физических операций:

$$R_a = R_{ynp} \cup R_{исп}$$

Также следует учитывать зависимость ролей более высокого уровня от более низкого.

Множество назначенных ролей в системе может быть описано матрицей A размерности $k \times n$, где k – количество узлов в системе (включая не используемые).

Теперь рассмотрим назначение ролей в контексте выполнения задачи КФС. Можно ввести меру выполнимости задачи при конкретной конфигурации КФС. Она будет зависеть от конфигурации назначенных ролей A , состояния узлов, которое можно описать вектором S размерности k , и информации о необходимой конфигурации системы для выполнения задачи,

которую в простом случае можно охарактеризовать вектором Z размерности n , в котором необходимым для выполнения задачи ролям поставлены в соответствие единичные значения:

$$E = f(A, S, T)$$

В случае простых ассоциаций и линейных связей мера выполнимости может быть рассчитана в виде относительной доли реализуемых ролей в отрезке $[0; 1]$:

$$E = \frac{A^T S \cdot Z}{I \cdot Z},$$

где I – вектор размерности n , составленный из единиц.

О невыполнимости задачи сигнализирует значение E ниже порогового уровня E_n (в данном случае $E < 1$). В таком случае необходимо решить задачу выбора плана A , максимизирующего величину E при ограничениях:

$$E \geq E_n,$$

$$a_{ij} = 0 \text{ для всех } j = 1 \dots n, \text{ для которых } s_i = 0,$$

$$a_{ij} = 0 \text{ для всех } i, j, \text{ для которых } c_{ij} = 0.$$

Рассмотрим более подробно стратегии поведения КФС для распределения инфраструктурных ролей на разных уровнях функционирования.

Физический уровень

На физическом уровне случаем отказа является потеря соединения узла КФС с каналом связи. Сценарии работы системы на этом уровне находятся в зависимости от конкретных технологий, используемых для установки связи в КФС. При достаточно высокой плотности расположения ретрансляторов (дистанция порядка нескольких десятков метров) применимы Wi-Fi-сети, для больших расстояний широко используется технология LoRaWan.

Потеря соединения на узле может возникнуть по внешним (потеря сигнала от связанного узла - роутера) и внутренним (связанным с самим узлом) причинам. Внутренние причины могут быть связаны со сбоям

сетевого оборудования или с состоянием узла, установившимся вследствие его поведения (например, если узел покинул зону досягаемости роутера). В любом случае действия узла должны быть направлены на восстановление связи с другими узлами КФС. Диаграмма деятельности для этого случая изображена на рис. 16.

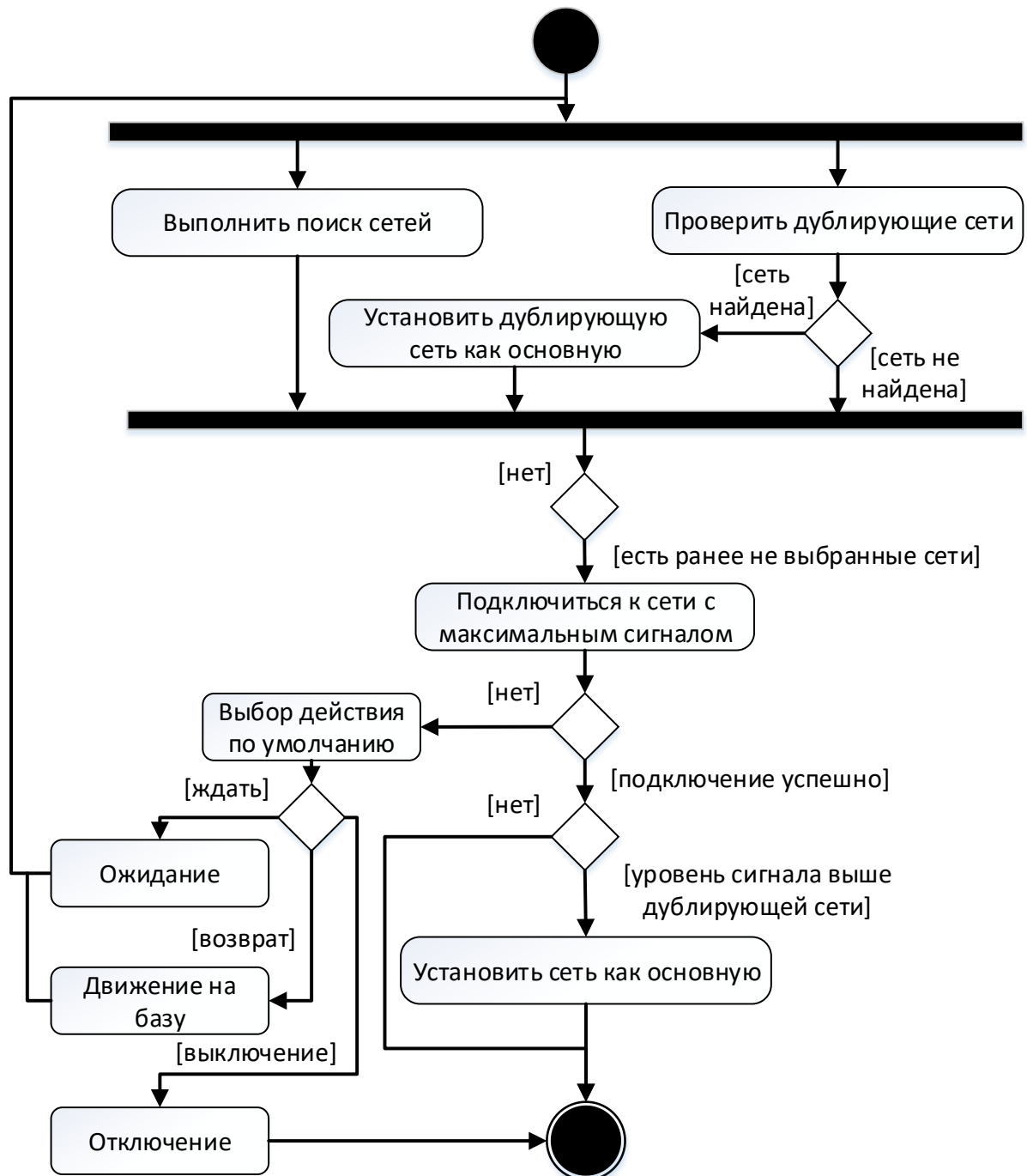


Рис. 16. Диаграмма деятельности для восстановления связи на физическом уровне

Следует отметить, что поведение узла КФС при отсутствии доступных сетей должно быть определено отдельно. К возможным вариантам поведения в таком случае могут относиться: ожидание, отправка сигнала бедствия, перемещение с целью поиска сетей или возврата на базу, отключение. Конкретные варианты поведения выбираются в зависимости от специфики задачи.

Сетевой уровень

К сетевому уровню относятся решения, основанные на маршрутизации данных и создании оверлейных сетей и виртуальных каналов связи. Такие решения позволяют выполнять самоорганизацию сетевой структуры КФС и обычно основаны на использовании мобильных ad hoc-сетей (mobile ad hoc networks, MANET) и, в частности, беспроводных mesh-сетей (сети с ячеистой топологией, Wireless Mesh Network, WMN) и, которые способны динамически устанавливать многопереходные соединения. Такие технологии подходят для случаев, когда заранее подготовленная сетевая инфраструктура (роутеры, коммутаторы) отсутствует, и полагаться на отдельные центральные узлы невозможно. В таких сетях все узлы могут брать на себя функцию маршрутизации пакетов.

Существует очень большое количество протоколов маршрутизации в таких сетях. Они в основном происходят из области беспроводных сенсорных сетей (Wireless Sensor Network, WSN) и MANET, частным случаем которых являются mesh-сети, узлы которых соединяются в динамический неполносвязный граф. При этом протоколы WSN имеют ограниченные возможности работы при высокой частоте изменения топологии. Протоколы MANET, напротив, приспособлены к таким изменениям и, кроме того, предназначены для двусторонней коммуникации [T.P. Lambrou and C.G. Panayiotou. 2009. A Survey on Routing Techniques Supporting Mobility in Sensor Networks. In Proceedings of the 5th international conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Networks (MSN'09). pp.78-85]. По этой причине для КФС целесообразно рассматривать протоколы MANET.

Маршрутизация в MANET может быть проактивной, когда узлы периодически распространяют свои таблицы маршрутизации по сети, и реактивной, когда маршрут находится по запросу с помощью специальных multicast-пакетов. Недостатком первого способа является необходимость поддерживать большой объём данных и медленная реакция сети при изменениях в ней. Второй способ характеризуется большими задержками при поиске пути и опасностью переполнения сети служебными пакетами. Существует гибридная маршрутизация, которая позволяет снизить влияние этих недостатков. Одним из её вариантов является протокол ZRP [The Zone Routing Protocol (ZRP) for Ad Hoc Networks. URL: <https://tools.ietf.org/html/draft-ietf-manet-zone-zrp-04>], особенностью которого является применение проактивного подхода (протокол IARP) при передаче данных внутри зоны и реактивного (протокол IERP) – между зонами. Таким образом обеспечивается кластеризация сети, и снижается объём поддерживаемых и передаваемых служебных данных. Процесс передачи данных наглядно показан на рис. 17.

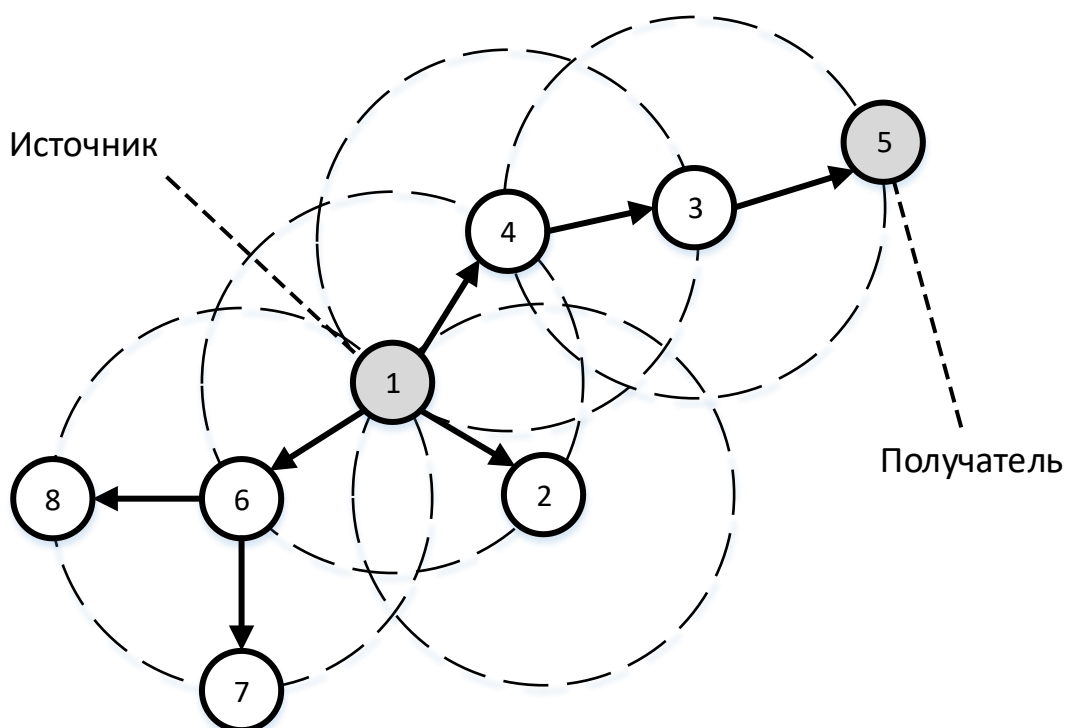


Рис. 17. Передача данных по протоколу ZRP

Для того, чтобы протоколы, подобные ZRP, могли выполнять доставку пакетов между любыми двумя точками сети, граф сети должен быть связным. В случае разрыва необходимо изменить топологию сети, обеспечив её восстановление. Это можно сделать с помощью перемещения узлов КФС или перераспределения их ролей, что выходит за рамки протокола маршрутизации и может сказаться на качестве выполнения прикладных задач. Тем не менее, известен ряд таких решений.

Имея архитектуру КФС из нескольких типов агентов, авторы [Ratasich, D., Höftberger, O., Isakovic, H., Shafique, M., & Grosu, R. (2017, May). A self-healing framework for building resilient cyber-physical systems. In 2017 IEEE 20th International Symposium on Real-Time Distributed Computing (ISORC) (pp. 133-140). IEEE.] для обеспечения отказоустойчивости системы применяют самовосстановление, достигаемое посредством структурной адаптации и онтологической базы знаний с описанием возможных отказов. Во время работы в систему могут быть внесены изменения: добавление и удаление компонентов или изменение их взаимодействия. Можно также использовать избыточность узлов КФС для её реконфигурации, при которой узлы могут заменять друг друга. Замена компонентов КФС может быть выполнена посредством онтологии [Höftberger, O., & Obermaisser, R. (2013, June). Ontology-based runtime reconfiguration of distributed embedded real-time systems. In 16th IEEE International Symposium on Object/component/service-oriented Real-time distributed Computing (ISORC 2013) (pp. 1-9). IEEE.]. В случае, если один узел выбирается для передислокации, представленный алгоритм определяет, можно ли заменить его, используя услуги, предоставляемые другими узлами.

Одним из вариантов является формирование беспроводных сетей с ячеистой топологией на базе радиомодулей, установленных на группе беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Рассмотрим разработанный алгоритм организации такой сети (рис. 18). Он позволяет определить целевые

координаты группы БЛА для поддержания требуемой скорости передачи данных в разворачиваемой сети.

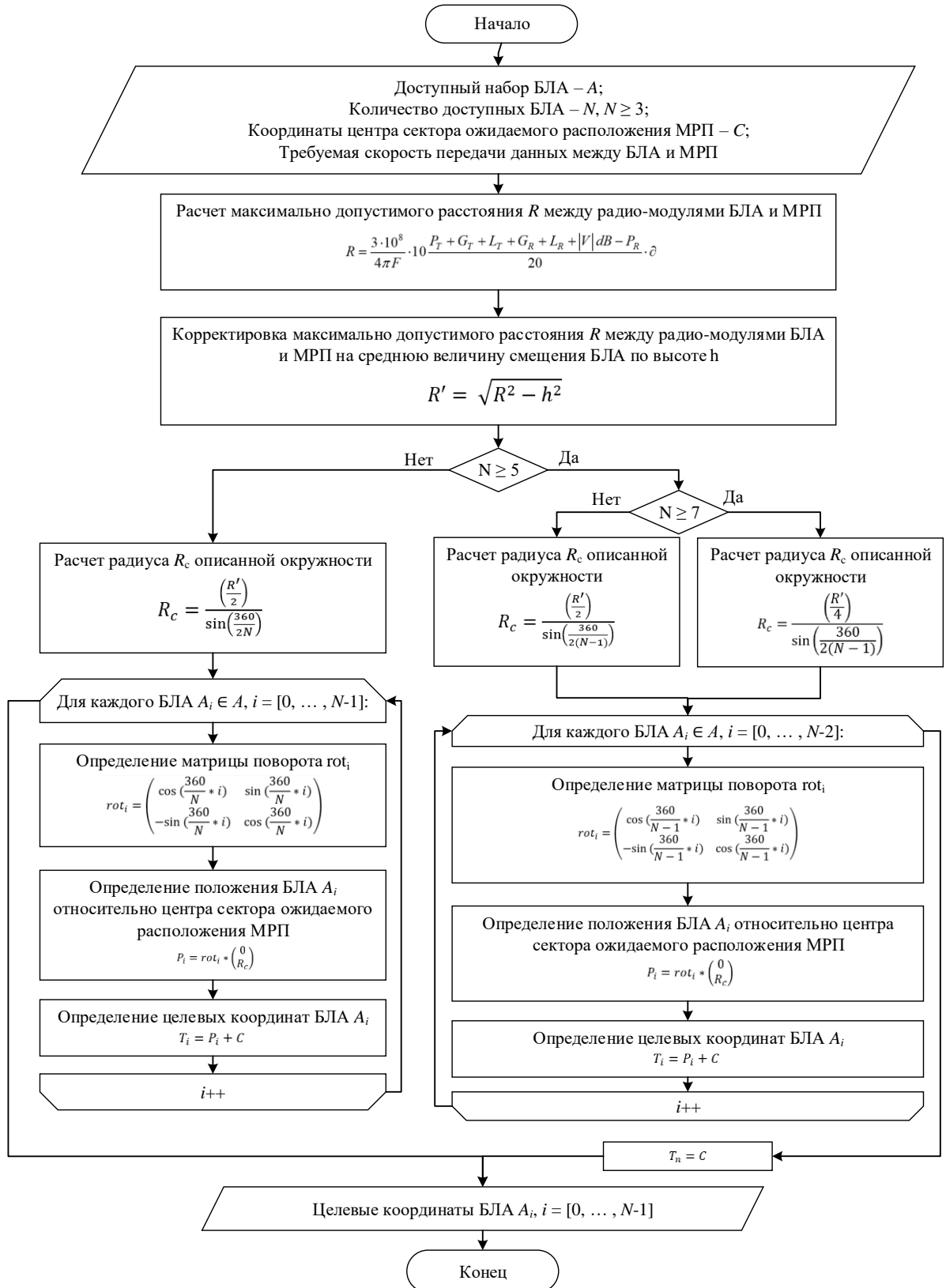


Рис. 18. Алгоритм организации ячеистой сети на основе радио-модулей, установленных на БЛА

В данном исследовании в качестве базовой технологии для организации беспроводной сети передачи данных используется технология LoRa, которая поддерживает большой диапазон частот, обладает широкой полосой передачи сигнала и защищенным протоколом передачи данных, отличается низкой стоимостью радиомодулей, а также позволяет устанавливать устойчивую связь между модулями на дистанции до 3 км. На вход алгоритм принимает текущие координаты БЛА, количество БЛА в данном наборе, координаты центра сектора ожидаемого расположения МРП, а также требуемую скорость передачи данных между радиомодулями, установленными на БЛА и МРП, и другие параметры связи. Для обеспечения требуемой скорости передачи данных между элементами сети на первом этапе работы алгоритма осуществляется расчет максимально допустимого расстояния R между радиомодулями (1):

$$R = \frac{3 \cdot 10^8}{4\pi F} \cdot 10^{\frac{P_T + G_T + L_T + G_R + L_R + |V|dB - P_R}{20}} \cdot \partial \quad (1)$$

где R – искомая дальность связи, м; F – частота, Гц; P_T – мощность радиопередатчика, дБм; G_T – усиление антенны передатчика, дБ; L_T – потери в кабеле к антенне передатчика, дБ; G_R – усиление антенны приемника, дБ; L_R – потери в кабеле к антенне приемника дБ; P_R – чувствительность радиоприемника, дБм; $|V|dB$ – множитель ослабления, учитывающий дополнительные потери за счет влияния поверхности Земли, растительности, атмосферы и других факторов, дБ, ∂ – корректирующий коэффициент, равный 0,85 [Денисов А.В. Разработка рекомендательной системы расчета параметров беспроводной сети сенсорных комплексов // МОИТ. - 2019. - 7(4). DOI: 10.26102/2310-6018/2019.27.4.025].

Прикладной уровень

С учетом требований гибкости, масштабируемости, децентрализованности, устойчивости к отказам, на прикладном уровне следует в первую очередь рассматривать фреймворки и инструменты для

работы с большими объемами данных. Такое программное обеспечение должно иметь подходящую оболочку, файловую систему и набор утилит, которые обеспечат быструю передачу, надежное хранение, репликацию и обмен данными. Большинство таких решений базируются на открытых фреймворках и технологиях вроде Hadoop, Spark и концепции MapReduce.

Основное преимущество этих технологий – в возможности распределенного выполнения операций предварительной обработки (map) и свертки (reduce) большого объема данных, а при отказе узла его работа автоматически передается другому рабочему узлу при условии доступности входных данных для проводимой операции.

Присутствуют и недостатки: в системе есть единичные точки отказа – узел имён (Name Node, NN), а высокие задержки распределенных вычислений, приемлемые в пакетном режиме обработки, не позволяют использовать классический MapReduce для потоковой обработки в режиме реального времени, повторяющихся запросов и итеративных алгоритмов на одном и том же датасете – к примеру, в задачах машинного обучения. Для решения этой проблемы, свойственной Apache Hadoop, были созданы другие Big Data фреймворки, в частности, Apache Spark, также входящий в экосистему Hadoop.

Необходимо учитывать также, что КФС должна быть изолирована от внешних воздействий в целях безопасности. Она также должна работать при отсутствии или частичном отсутствии соединений с сетью. Одним из выходов в данной ситуации может стать использование решений на базе связки Kubernetes + Spark или Cloudera (дистрибутив Hadoop). Kubernetes – открытое программное обеспечение для автоматизации развёртывания, масштабирования контейнеризированных приложений и управления ими. Поддерживает основные технологии контейнеризации, включая Docker, rkt, также возможна поддержка технологий аппаратной виртуализации.

Преимущества Kubernetes – автоматическая балансировка нагрузки, удобное управление, обеспечение информационной безопасности за счет

механизма сетевых политик и ролевой авторизации пользователей по ключу, наличие средств логической изоляции приложений, поддержка распределенных и сетевых файловых систем.

Рассмотрим поведение системы в случае отказа узлов. Развёртывание экземпляра HDFS предусматривает наличие узла имён, хранящего метаданные файловой системы, метаинформацию о распределении блоков и выполняющего координацию узлов данных (data node), где выполняется непосредственно хранение и обработка блоков данных. Соответственно, необходимы отдельные сценарии поведения для случаев отказа как узла имён, так и узла данных.

Узел имён периодически получает контрольный сигнал (heartbeat) и отчет о блоках (block report) от каждого узла данных. Если узел имён не получает контрольных сигналов дольше определённого порогового значения от определенного узла данных, то он считается «мертвым» или неисправным. В этом случае система запускает процесс репликации блоков, которые были расположены на неисправном узле согласно его последнему отчёту, на новый узел. Данные для репликации передаются напрямую от одного узла данных к другому, минуя узел имён. Диаграмма деятельности для этой ситуации представлена на рис. 19.

Следует отметить, что для успешного выполнения этой операции необходимо наличие в системе реплик всех блоков неисправного узла. В случае, если блоки не имеют достаточно реплик для восстановления (under-replicated/missing blocks), либо их реплики недоступны из-за несоответствия расположения политике (misreplicated blocks), либо повреждены (corrupt), то выполнимость задачи ставится под сомнение.

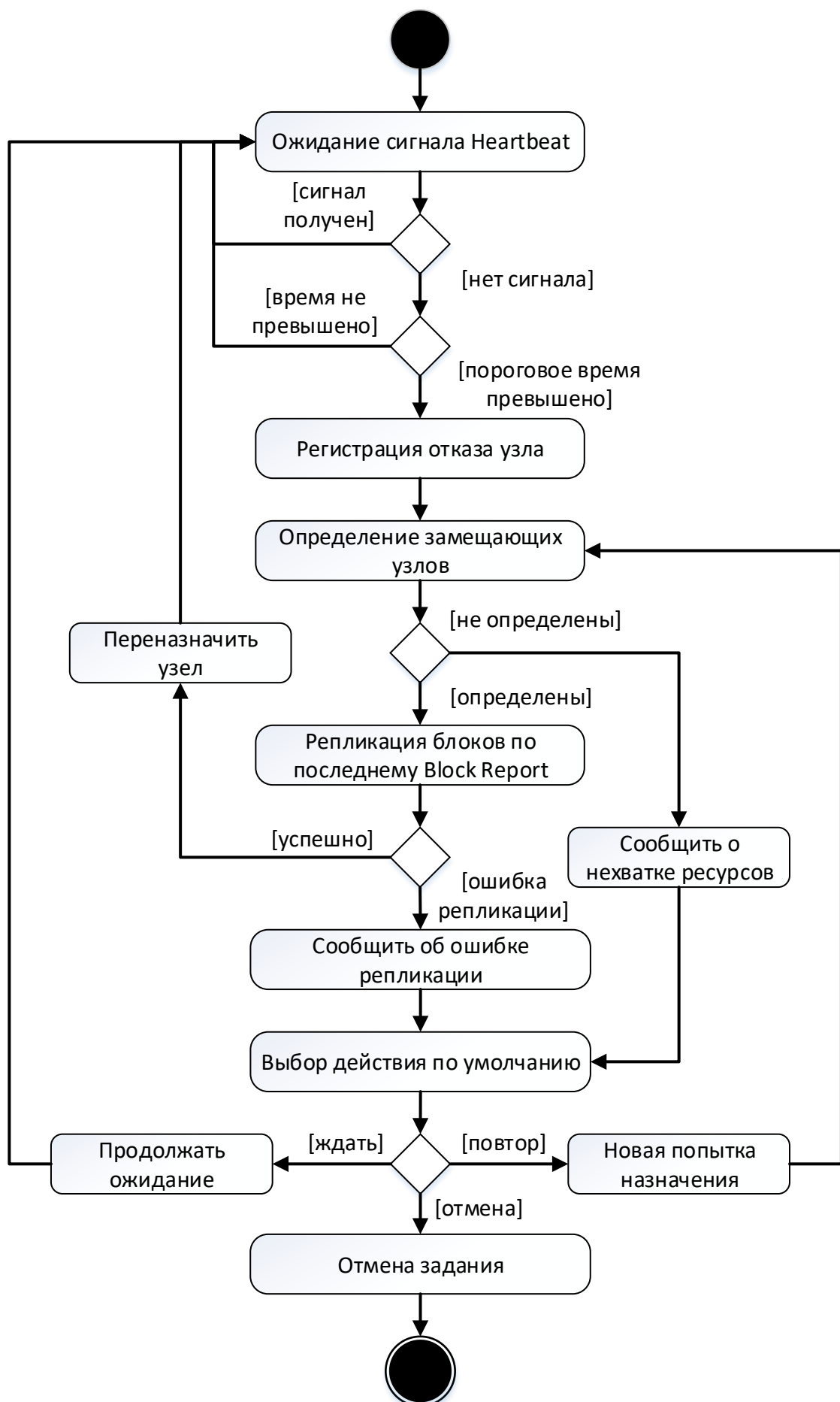


Рис. 19. Диаграмма деятельности для случая отказа узла данных

Устойчивость системы по отношению к сбою узла имён обеспечивается использованием вторичного узла имён (Secondary Name Node, SNN). Узел имён хранит данные в файловой системе в виде журнала изменений. При запуске сервис считывает состояние HDFS из файла образа (fsimage), а затем применяет изменения из файла журнала. Затем он записывает новое состояние HDFS в файл fsimage и начинает работу с пустым журналом изменений. Поскольку узел объединяет fsimage только во время запуска, файл журнала изменений может со временем стать очень большим, а перезапуск узла имён может занять больше времени. В свою очередь SNN периодически объединяет файлы журнала изменений с fsimage. Таким образом, он не только обеспечивает возможность восстановления главного узла, но и позволяет оптимизировать использование ресурсов.

При этом SNN не является репликой главного узла имён и не предназначен для выполнения его операций, поэтому в устойчивой системе должны находиться узлы, способные взять на себя роль как главного, так и вторичного узла имён в случае отказа одного из них. Система может содержать произвольное количество узлов имён, но лишь один может быть активным в каждый момент времени.

Диаграмма деятельности для восстановления узла имён показана на рис. 20. Блок «Восстановление работоспособности SNN» на указанной диаграмме не раскрывается, но необходимые в этом случае действия соответствуют тому же сценарию, что и для восстановления основного узла имён.

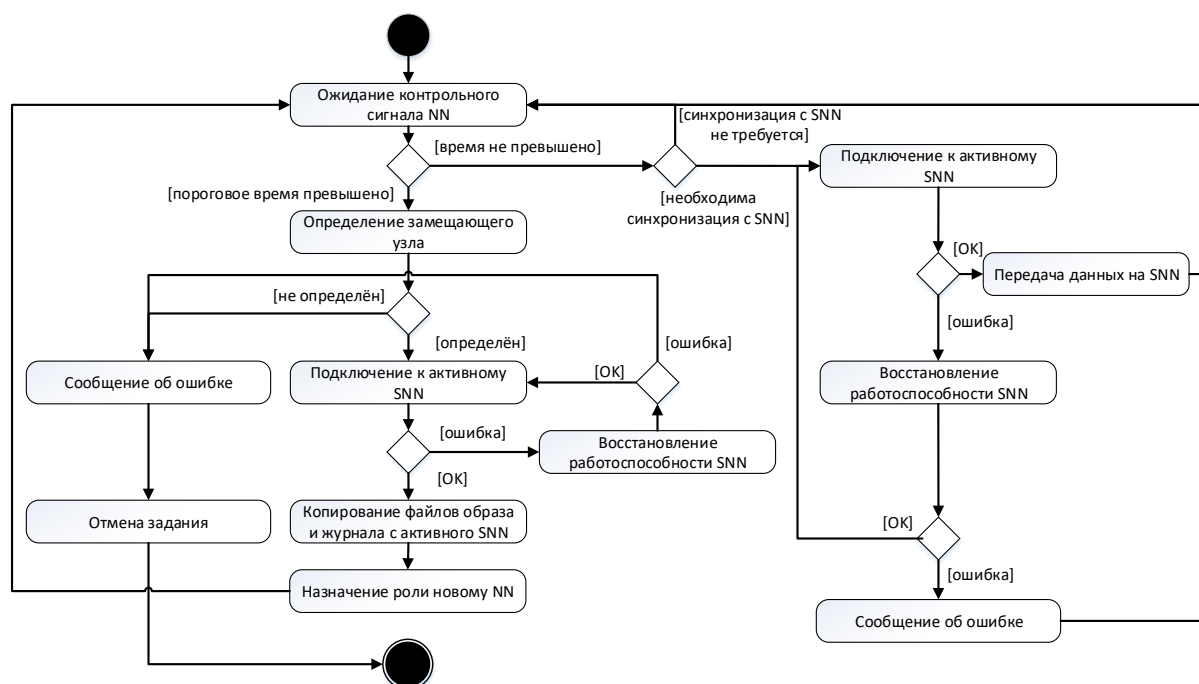


Рис. 20. Диаграмма деятельности для восстановления узла имён

Выводы

В главе рассмотрены характеристики узлов КФС и их инфраструктурные роли на разных уровнях функционирования КФС, определено поведение системы при выходе отдельных узлов из строя и даны сценарии перераспределения ролей для устойчивого функционирования в условиях изменяющегося окружения. Выполненная формализация состава, свойств и поведения КФС позволяет выполнить синтез 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 робототехническими средствами (РС).

В качестве входных данных для этой модели должно использоваться конечное множество гетерогенных РС и их типов, которые характеризуются набором параметров, связанных с наличием физических и логических компонентов, датчиков и исполнительных механизмов. На выходе требуется получить набор недостающих функциональных компонентов КФС для

дальнейшего уточнения состава системы в целях её устойчивого функционирования.

Для построения модели требуется определить пространство активации оборудования, в рамках которого выполняется управление избыточной дублирующей функциональностью РС, которая в начальном состоянии используется частично, но активизируется в процессе перераспределения ролей при адаптации КФС. Это позволит построить итоговое параметрическое представление КФС и саму модель функционирования, которая в полной мере отражает процесс функционирования автономных мобильных КФС в динамических средах. Такая модель позволит сформировать перечень недостающих функциональных компонентов для устойчивого функционирования КФС и скорректировать её состав.

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

В общем случае автономная мобильная КФС CPS может быть представлена как конечный набор гетерогенных РС:

$$CPS = \{RS_n | n = \overline{1, N}\},$$

где RS_i – некоторое робототехническое средство, а N – общее число гетерогенных РС, на базе которых развернута данная КФС.

В основе структуры такой киберфизической системы лежит конечное число V различных типов РС, и каждое робототехническое средство RS_i входит в состав одного из наборов гомогенных РС $RSet_v$. ($RS_i \in RSet_v$). Соответственно, автономная мобильная КФС может также быть определена следующим образом:

$$CPS = \{RSet_v | RSet_v = \{RS_{vi} | i = \overline{1, I_v}\}, v = \overline{1, V}\},$$

где I_v – общее число задействованных в формировании КФС РС данного типа.

Каждое РС RS_{vi} некоторого типа v в свою очередь, может быть представлено следующим кортежем параметров:

$$RS_{vi} = \langle Ph_{vi}, Sens_{vi}, Act_{vi} \rangle,$$

где Ph_{vi} – набор физических компонентов, $Sens_{vi}$ – набор датчиков, а Act_{vi} – набор исполнительных механизмов данного РС.

К физическим компонентам Ph_{vi} относятся различного рода инженерные модули, аппаратное обеспечение и его компоненты, а также сетевая инфраструктура физического уровня, составляющие технологическую основу РС. Отметим также, что протекающие в данных компонентах процессы имеют исключительно физический характер и

включают в себя различного рода процессы по преобразованию и передаче энергии.

Датчики $Sens_{vi}$ и исполнительные механизмы Act_{vi} , согласно [Pallás-Areny R, Webster J (2001) *Sensors and Signal Conditioning* (John Wiley & Sons, New York, NY) 2nd Edition.], являются входными и выходными преобразователями соответственно. Датчики собирают информацию о физическом состоянии среды функционирования РС для последующей обработки на уровне логических компонентов, в то время как исполнительные механизмы изменяют его, в результате получения управляющих сигналов. Модель функционирования датчиков может включать в себя описание процессов предобработки сигнала, аналого-цифрового преобразования, калибровки, дискретизации и сопоставления метаданных. Исполнительные механизмы могут быть представлены широким рядом механических устройств, начиная от вибромоторов и цветковых индикаторов, заканчивая сложными промышленными манипуляторами.

При разработке автономной мобильной КФС повышенного внимания требует вопрос обеспечения отказоустойчивости такой системы к деструктивным воздействиям со стороны внешней среды. В рамках настоящего проекта одним из элементов обеспечения повышенной отказоустойчивости КФС является внедрение дублирующих компонентов на уровне каждого отдельного РС. Таким образом, для каждого РС, входящего в состав автономной мобильной КФС, характерно наличие идентичных компонентов в наборах Ph_{vi} , $Sens_{vi}$ и Act_{vi} . При этом набор дублируемых компонентов $D(RS_{vi})$ и коэффициенты репликации $R(D(RS_{vi}))$ по умолчанию являются идентичными в рамках каждого отдельно взятого типа РС v :

$$D(RS_{va}) = D(RS_{vb}) = \{DPh_v, DSens_v, DAct_v\}, a \neq b$$

$$R(D(RS_{va})) = R(D(RS_{vb})), a \neq b,$$

где DPh_v , $DSens_v$ и $DAct_v$ – наборы дублируемых физических компонентов, датчиков и исполнительных механизмов соответственно.

В соответствии с принятой концепцией дублирующиеся компоненты каждого из РС остаются деактивированными и не задействуются при реализации каких-либо процессов в рамках КФС до тех пор, пока не будут активированы системой в связи с выходом из строя ряда уже активных компонентов. Таким образом, каждое РС RS_{vi} , входящее в состав КФС является ассоциированным с наборами дублируемых компонентов DPh_{vi} , $DSens_{vi}$, $DAct_{vi}$ и соответственно могут быть определены следующие отображения:

$$\begin{aligned} fPh: RS_{vi} &\rightarrow DPh_{vi}, \\ fSens: RS_{vi} &\rightarrow DSens_{vi}, \\ fAct: RS_{vi} &\rightarrow DAct_{vi}. \end{aligned}$$

Принимая во внимание представленные выше выражения, автономная мобильная КФС CPS в терминах компонентов может быть определена следующим образом:

$$CPS = \langle Ph, Sens, Act, DPh, DSens, DAct, Lg, Hum \rangle,$$

где Ph – набор активных физических компонентов, $Sens$ – набор активных датчиков, Act – набор активных исполнительных механизмов, DPh – набор резервных физических компонентов, $DSens$ – набор резервных датчиков, $DAct$ – набор резервных исполнительных механизмов, Lg – набор логических компонентов, Hum – набор лиц, вовлеченных в процессы функционирования КФС, находящихся внутри киберфизического окружения или являющихся конечными пользователями системы.

Набор активных физических компонентов Ph представляет собой набор всех активных физических компонентов, размещенных на различных РС и используемых в процессе функционирования CPS :

$$Ph = \left\{ \bigcup_v \left\{ \bigcup_i Ph_{vi} \setminus DPh_{vi} \mid i = \overline{1, I_v} \right\} \mid v = \overline{1, V} \right\}.$$

Набор активных датчиков *Sens* представляет собой набор всех активных датчиков, размещенных на различных РС и используемых в процессе функционирования *CPS*:

$$Sens = \left\{ \bigcup_v \left\{ \bigcup_i Sens_{vi} \setminus Sens_{vi} \mid i = \overline{1, I_v} \right\} \mid v = \overline{1, V} \right\}.$$

Набор активных исполнительных механизмов *Act* представляет собой набор всех активных исполнительных механизмов, размещенных на различных РС и используемых в процессе функционирования *CPS*:

$$Act = \left\{ \bigcup_v \left\{ \bigcup_i Act_{vi} \setminus Act_{vi} \mid i = \overline{1, I_v} \right\} \mid v = \overline{1, V} \right\}.$$

Схожим образом определяются наборы резервных физических компонентов, датчиков и исполнительных механизмов:

$$\begin{aligned} DPh &= \left\{ \bigcup_v \left\{ \bigcup_i DPh_{vi} \mid i = \overline{1, I_v} \right\} \mid v = \overline{1, V} \right\}; \\ DSens &= \left\{ \bigcup_v \left\{ \bigcup_i DSens_{vi} \mid i = \overline{1, I_v} \right\} \mid v = \overline{1, V} \right\}; \\ DAct &= \left\{ \bigcup_v \left\{ \bigcup_i DAct_{vi} \mid i = \overline{1, I_v} \right\} \mid v = \overline{1, V} \right\}. \end{aligned}$$

Логические компоненты *Lg* включают в себя все уровни программного обеспечения (встроенное ПО, обработчики, драйверы, операционные системы и приложения), сети и сетевое окружение логического уровня, а также информацию на уровне данных, информации и знаний [U.S. Access Board (2010) Draft Information and Communication Technology (ICT) Standards and Guidelines (U.S. Access Board, Washington, DC). <https://www.accessboard.gov/attachments/article/560/draft-rule2010.pdf>].

Соответственно протекающие в данных компонентах процессы являются преимущественно информационными и включают в себя различные процессы по сбору, агрегации, обработке и анализу данных, а также

процессы создания, получения, хранения, поиска и распространения информации.

Взаимодействие людей с КФС характеризуется определенной вариативностью. Так, человек может быть как пользователем системы Hum_U , так элементом внешней среды по отношению к КФС – Hum_{Env} . Таким образом, набор Hum включает в себя два набора различной мощности, характеризующих все многообразие пользователей:

$$Hum = \{Hum_U, Hum_{Env}\}.$$

В контексте функционирования КФС CPS , определим набор функциональных компонентов КФС F , как набор совокупностей логических и физических компонентов системы, которые при взаимодействии формируют базовые единицы функциональности:

$$F = \{ \langle Ph_i, Lg_i \rangle \mid Ph_i \subseteq Ph, Lg_i \subseteq Lg, i = \overline{1, M} \}.$$

В соответствии с определением, каждый функциональный компонент КФС F_q обладает следующими свойствами:

- наличие аппаратных и вычислительных мощностей, а также программного обеспечения, необходимого для реализации собственных функций;
- наличие достаточного объема памяти для хранения всех необходимых для осуществления собственной деятельности данных;
- наличие прямой или опосредованной связи между составляющими компонентами на физическом или информационно-логическом уровнях;
- способность устанавливать сетевые соединения с другими компонентами системы и обеспечивать целевую передачу данных;
- способность к получению необходимой информации о состоянии окружающей среды и других компонентов системы;
- способность к самодиагностике в контексте выявления собственной неисправности, а также к информированию связанных компонентов в случае возникновения такой неисправности.

Каждый функциональный компонент ассоциирован с определенным набором датчиков и исполнительных механизмов. Такие наборы в совокупности образуют набор преобразователей функциональных компонентов Tr :

$$Tr = \{ \langle Sens_j, Act_j \rangle \mid Sens_j \subseteq Sens, Act_j \subseteq Act, j = \overline{1, L} \},$$

что позволяет функциональным компонентам осуществлять различного рода преобразования на физическом и логическом уровнях в контексте взаимодействия с внешней средой и пользователями КФС, включая как обмен и преобразование энергии (механической, электрической и тд.) – на физическом уровне, так и обмен, преобразование и синтез информации – на логическом уровне. Таким образом, для любой КФС может быть определено отображение f :

$$f: F \rightarrow Tr,$$

а автономная мобильная КФС соответственно может быть охарактеризована набором упорядоченных пар вида:

$$CPS = \{ \langle F_k, Tr_k \rangle \mid F_k \in F, Tr_k \in Tr, k = \overline{1, K} \}.$$

Следует отметить, что элементы любого преобразователя потенциально могут быть интероперабельными, как следствие наборы элементарных компонентов КФС, входящие в состав некоторого преобразователя, могут входить в состав неограниченного числа иных преобразователей функциональных компонентов.

Согласованное взаимодействие наборов функциональных компонентов КФС и ассоциированных с ними преобразователей позволяет обеспечить предоставление сервисов КФС S_{CPS} потребителям $Cons$, в качестве которых могут выступать как иные функциональные компоненты, так и люди:

$$Cons = F \cup Hum.$$

Стоит также отметить, что наборы потребителей в общем случае могут отличаться для каждого отдельно взятого сервиса КФС:

$$Cons_S = \{ Cons_i \mid Cons_i \subseteq Cons, i = \overline{1, n} \}.$$

Наличие однозначной ассоциативной связи между наборами потребителей и сервисами КФС позволяет нам ввести следующее отображение g :

$$g: S_{CPS} \rightarrow \{Cons_S \mid S = \overline{1, ser}\},$$

где ser – общее число сервисов, предоставляемых КФС.

Поскольку сервисы КФС реализуются посредством согласованного взаимодействия различных функциональных компонентов, то также может быть определено следующее отображение h :

$$h: F \rightarrow S_{CPS}$$

Таким образом, композиция отображений $h \circ g$ позволяет установить соответствие между потребителями сервисов (будь то пользователь или другой функциональный компонент КФС) и функциональными компонентами, необходимыми для реализации соответствующих сервисов КФС.

В тоже время каждый преобразователь функциональных компонентов транзитивно ассоциирован с некоторым сервисом CPS и является одним из средств его предоставления. Учитывая интероперабельность преобразователей, для каждого сервиса S_{CPS} можно определить конечный набор преобразователей, реализующих предоставление данного сервиса для соответствующей группы потребителей $Cons_S$:

$$e: S_{CPS} \rightarrow \{\{Tr_i \mid Tr_i \subseteq Tr, i = \overline{1, n}\}_S \mid S = \overline{1, ser}\}.$$

Рассмотрим далее обобщенную динамическую модель функционирования автономной мобильной КФС. Введем, согласно [Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.], обобщенный вектор состояния КФС и вектор выходных характеристик КФС, а также обобщенный вектор соответственно:

$$\bar{x}(t) = \|\bar{x}_F^T, \bar{x}_{Tr}^T\|^T,$$

$$\bar{y}(t) = \|\bar{y}_F^T, \bar{y}_{Tr}^T\|^T.$$

Допустим, некоторое изменение физической среды $\xi_{ph}(t)$ приводит к изменению n различных физических параметров P_t :

$$P_{tk} = \{p_{tk} \in P_t / \xi_{ph}(t) \rightarrow P_t, k = \overline{1, n}\}$$

и регистрируется датчиками, в совокупности формирующими набор $Sens_t$:

$$Sens_{tj} = \{sens_{tj} \in Sens_t / P_t \rightarrow Sens_t, j = \overline{1, m}\}.$$

Поскольку каждый датчик $sens_{tj}$ из набора датчиков $Sens_t$, регистрирующих изменение параметра p_{tk} , может входить в одно или сразу несколько подмножеств вида $Sens_i$, таких что $Sens_i \subseteq Tr_i, i = \overline{1, L}$, соответственно регистрация изменений датчиком $sens_{tj}$ приводит к изменению состояний **всех функциональных компонентов** $F_{ij} \subseteq F$ с чьими преобразователями $Tr_{ij} \subseteq Tr$ ассоциирован данный датчик.

Учитывая то, что с каждым из преобразователей функциональных компонентов $Tr_i, i = \overline{1, L}$, ассоциирован целый набор датчиков $Sens_i$, то **обновленное состояние $\bar{X}_F(t_1)$, каждого из функциональных компонентов множества F определяется исключительно на основе лишь тех изменений физических параметров среды P_{tk} , которые были зарегистрированы датчиками, принадлежащими набору $Sens_{ti}$** . При этом в набор $Sens_{ti}$ входят только те датчики, которые: а) зарегистрировали изменение внешней среды ($Sens_{ti} \subseteq Sens_t$); б) принадлежат набору датчиков, входящему в состав соответствующего преобразователя функциональных компонентов Tr_i ($Sens_{ti} \subseteq Sens_i$):

$$Sens_{ti} = Sens_i \cap Sens_t.$$

Ответ системы на изменения информационного окружения $\xi_{Lg}(t)$ во многом аналогичен ответу на изменения в физической среде. Допустим, изменение информационного окружения $\xi_{Lg}(t)$ приводит к изменению p логических параметров L_t :

$$L_{tj} = \{l_{tj} \in L_t / \xi_{Lg}(t) \rightarrow L_t, j = \overline{1, p}\}$$

и регистрируется логическими компонентами КФС $Lg_t \subseteq Lg$. Поскольку каждый логический компонент Lg_{ij} из набора Lg_t может входить в одно или сразу несколько подмножеств вида Lg_i , таких что $Lg_i \subseteq F_i$, $i = \overline{1, M}$, соответственно регистрация изменений компонентом Lg_{ij} приводит к изменению состояний **всех функциональных компонентов** $F_{ij} \subseteq F$ с которыми ассоциирован данный компонент.

Учитывая то, что с каждым из функциональных компонентов F_i ассоциирован целый набор логических компонентов Lg_i , то **обновленное состояние $\bar{x}_F(t_1)$ каждого из функциональных компонентов** множества F определяется исключительно на основе изменений логических параметров L_{ii} , зарегистрированных компонентами, принадлежащими набору Lg_{ii} , в который входят только те логические компоненты, которые:
а) зарегистрировали изменение логических параметров ($Lg_{ii} \subseteq Lg_t$); б) принадлежат набору логических компонентов, входящему в состав соответствующего функционального компонента F_i ($Lg_{ii} \subseteq Lg_i$):

$$Lg_{ii} = Lg_t \cap Lg_i.$$

Отметим, что в обоих случаях изменение состояния i -го функционального компонента F_i приводит к опосредованному изменению состояний физических и логических компонентов системы, принадлежащих наборам Ph_i и Lg_i соответственно. Кроме того, переход i -го функционального компонента из состояния $\bar{x}(t_0)$ в состояние $\bar{x}(t_1)$ может индуцировать изменение выходных характеристик системы $\bar{y}(t)$, в частности, посредством активации исполнительных механизмов из набора $Act_i \subseteq Tr_i$.

Таким образом, датчики реагируют на изменение физической среды $\xi_{ph}(t)$, вследствие чего формируется новое состояние системы $\bar{x}(t_1)$, отражающее данные изменения, аналогичным образом осуществляется реакция системы на изменение информационного окружения $\xi_{Lg}(t)$. Исполнительные механизмы выполняют, по сути, обратную функцию, преобразуя обобщенные управляющие сигналы системы $u_{pr}(\bar{y}(t), t)$ и $v(\bar{x}(t), t)$ (которые являются по сути планами функционирования основных элементов

и управлений, реализующих планы на этапе применения в условиях возмущающих воздействий $\xi(t)$ в новое представление системы $\bar{y}(t)$ и соответствующим образом воздействуя на физическую среду, в которой функционирует КФС.

В контексте автономных мобильных КФС важно отметить тот факт, что изменение в физической среде в данном случае может быть не только зарегистрировано набором датчиков вида $Sens_t$, но и проявить себя как отказ некоторого набора физических компонентов Ph_{tf} , набора датчиков $Sens_{tf}$, и набора исполнительных механизмов Act_{tf} в следствие неблагоприятного воздействия внешней среды.

Отказ каждого физического компонента Ph_{tfk} ($Ph_{tfk}, k = \overline{1, K}$) из набора Ph_{tf} провоцирует отказ ряда функциональных компонентов в состав которых входят компоненты Ph_{tfk} . Соответственно принадлежность некоторого функционального компонента F_{tfm} к набору отказавших компонентов F_{tf} можно определить следующим образом:

$$F_{tfm} \in F_{tf}, \text{ если } \exists Ph_{tfk}: Ph_{tfk} \subseteq F_{tfm}, Ph_{tfk} \in Ph_{tf}.$$

Набор сервисов КФС S_{tf} , отказ которых будет вызван выходом из строя набора функциональных компонентов F_{tf} может быть определен как:

$$S_{tf} = h(F_{tf}).$$

Восстановление работы соответствующего набора сервисов требует восстановления набора функциональных компонентов F_{tf} . Обладая информацией о наборе вышедших из строя физических компонентов КФС Ph_{tf} и наборе резервных физических компонентов DPh , можно определить набор доступных физических компонентов NPh для формирования функциональных компонентов F_{tnm} , тождественных по своей сути функциональным компонентами F_{tfm} :

$$NPh = \left(\bigcup_{m=1}^{M_{tf}} Ph_i \mid Ph_i \in F_{tfm}, i = \overline{1, I_m} \right) \cup DPh \setminus Ph_{tf};$$

$$F_{tn} = \{ \langle Ph_i, Lg_i \rangle \mid Ph_i \subseteq NPh, Lg_i \subseteq Lg, i = \overline{1, M_{tf}} \}.$$

Изменение структуры КФС CPS с точки зрения физических компонентов может быть отражено следующим образом:

$$Ph = \left(\bigcup_{m=1}^{M_{tf}} Ph_i \mid Ph_i \in F_{tnm}, i = \overline{1, I_m} \right) \cup Ph \setminus Ph_{tf};$$

$$DPh = \left(DPh \cup \left(\bigcup_{m=1}^{M_{tf}} Ph_i \mid Ph_i \in F_{tfm}, i = \overline{1, I_m} \right) \setminus Ph_{tf} \right) \setminus \left(\bigcup_{m=1}^{M_{tf}} Ph_i \mid Ph_i \in F_{tnm}, i = \overline{1, I_m} \right).$$

Последствия отказа набора датчиков $Sens_{tf}$, и набора исполнительных механизмов Act_{tf} во многом аналогичны последствиям отказа набора физических компонентов системы. Отказ каждого датчика $Sens_{tfk}$ ($Sens_{tfk}$, $k = \overline{1, K}$) из набора $Sens_{tf}$, а также каждого исполнительного механизма Act_{tfk} (Act_{tfk} , $k = \overline{1, K}$) из набора Act_{tf} приводит к нарушению работы ряда преобразователей функциональных компонентов, в состав которых входят датчики $Sens_{tfk}$ и/или исполнительные механизмы Act_{tfk} . Соответственно принадлежность некоторого преобразователя Tr_{tfm} к набору отказавших преобразователей Tr_{tf} можно определить следующим образом:

$$Tr_{tfm} \in Tr_{tf}, \text{ если } \exists Sens_{tfk}: Sens_{tfk} \subseteq Tr_{tfm}, Sens_{tfk} \in Sens_{tf} \vee \\ \exists Act_{tfk}: Act_{tfk} \subseteq Tr_{tfm}, Act_{tfk} \in Act_{tf}.$$

Набор сервисов КФС S_{tf} , нарушение процесса предоставления которых будет вызвано выходом из строя набора преобразователей Tr_{tf} , может быть определен как:

$$S_{tf} = e(Tr_{tf}).$$

Восстановление процессов предоставления соответствующего набора сервисов требует восстановления набора преобразователей Tr_{tf} . Обладая информацией о наборах вышедших из строя датчиков $Sens_{tf}$ и исполнительных механизмов Act_{tf} , а также о соответствующих резервных наборах $DSens$ и $DAct$, можно определить наборы доступных датчиков $NSens$

и $NAct$ для формирования преобразователей Tr_{tnm} , тождественных по своей сути преобразователям Tr_{tfm} :

$$NSens = \left(\bigcup_{m=1}^{M_{tf}} Sens_i \mid Sens_i \in Tr_{tfm}, i = \overline{1, I_m} \right) \cup DSens \setminus Sens_{tf};$$

$$NAct = \left(\bigcup_{m=1}^{M_{tf}} Act_i \mid Act_i \in Tr_{tfm}, i = \overline{1, I_m} \right) \cup DAct \setminus Act_{tf};$$

$$Tr_{tn} = \{ \langle Sens_j, Act_j \rangle \mid Sens_j \subseteq NSens, Act_j \subseteq NAct, j = \overline{1, M_{tf}} \}.$$

Соответствующее изменение структуры автономной мобильной КФС CPS может быть отражено следующим образом:

$$Sens = \left(\bigcup_{m=1}^{M_{tf}} Sens_i \mid Sens_i \in Tr_{tnm}, i = \overline{1, I_m} \right) \cup Sens \setminus Sens_{tf};$$

$$Act = \left(\bigcup_{m=1}^{M_{tf}} Act_i \mid Act_i \in Tr_{tnm}, i = \overline{1, I_m} \right) \cup Act \setminus Act_{tf};$$

$$DSens = \left(DSens \cup \left(\bigcup_{m=1}^{M_{tf}} Sens_i \mid Sens_i \in Tr_{tfm}, i = \overline{1, I_m} \right) \setminus Sens_{tf} \right) \setminus \left(\bigcup_{m=1}^{M_{tf}} Sens_i \mid Sens_i \in Tr_{tnm}, i = \overline{1, I_m} \right);$$

$$DAct = \left(DAct \cup \left(\bigcup_{m=1}^{M_{tf}} Act_i \mid Act_i \in Tr_{tfm}, i = \overline{1, I_m} \right) \setminus Act_{tf} \right) \setminus \left(\bigcup_{m=1}^{M_{tf}} Act_i \mid Act_i \in Tr_{tnm}, i = \overline{1, I_m} \right).$$

Непрерывная циклическая реализация описанных в представленной модели процессов изменения структуры КФС, а также состояния компонентов КФС и внешней среды в полной мере отражает процесс функционирования автономных мобильных КФС в динамических средах.

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.

В ходе выполнения проекта были разработаны тестовые сценарии апробации предложенной структурно-параметрической модели КФС для решения прикладных задач в условиях динамического окружения, выполняемых посредством согласованного взаимодействия групп мобильных агентов, представленных гетерогенными РС. Для наглядности реализации сценариев различного типа функционирования КФС в условиях динамического окружения была выбрана сфера экологического туризма, в частности, обслуживание туристов на территории крупных туристических парков, заповедников, заказников. Рассматриваемые сценарии включают следующие задачи КФС:

1. доставка продуктов питания и оборудования для туризма;
2. быстрое реагирование для оказания медпомощи;
3. мониторинг состояния инфраструктуры парка (детектирование людей в неположенных местах, детектирование несанкционированной деятельности, например костров, купания);
4. поиск и уборка мусора;
5. замена неисправных модулей робототехнических средств, входящих в состав КФС.

Зададим параметры окружающего пространства для рассматриваемых сценариев. В данном проекте будем рассматривать некоторую зону крупного туристического парка площадью S кв. км. Парк имеет тропинки и заранее спланированные маршруты передвижения групп туристов. В парке преобладает неоднородный рельеф местности, наличие растительности различного типа, тропинки могут быть выполнены из различных материалов

(щебень, песок, земля, деревянные настилы). Период функционирования системы – летние месяцы года. Предполагается, что разрабатываемая КФС должна функционировать непрерывно. Каждая группа туристов, выдвигающаяся на маршрут, имеет устройство (далее по тексту - маяк), которое является элементом КФС. Маяк представляет собой устройство, оборудованное: интерфейсом для взаимодействия с пользователем, системой связи, системой приема и передачи мультимедийных данных, камерой, микрофоном, GPS-устройство и системой автономного питания. На выбранной территории парка предполагается, что одновременное выполнение задач по предоставлению сервисов КФС возможно не более чем для N групп туристов. Группа туристов может отправить различные, заранее заданные типы сигналов в КФС при помощи маяка для осуществления взаимодействия с другими узлами. Далее рассмотрим предлагаемые тестовые сценарии.

1. Оперативное развертывание узлов КФС для обеспечения связи с группами туристов. Сценарий предполагает наличие заранее заложенного маршрута групп туристов, который они отправляют в КФС перед началом движения. Движение каждой из групп от начала до конца маршрута предполагается не более 8 дней. На основе маршрута производится поиск ключевых точек базирования РС для обеспечения связи и обслуживания групп. РС могут выступать как ретрансляторами сигналов, так и узлами для обеспечения обслуживания различных групп. Также наземные РС могут производить развертывание стационарных, временных ретрансляторов сигнала, чтобы покрыть необходимые расстояния между узлами системы и сохранить её целостность. В ходе продвижения групп туристов по маршрутам наземные РС могут изменять свои позиции и положение стационарных ретрансляторов. Таким образом РС и ретрансляторам необходимо поддерживать оптимальную топологию сети КФС для обеспечения связью всех групп туристов. На основе сигналов от маяка определяется его текущее местоположение. Если маяк не выходит на связь

спустя определенный промежуток времени, то считается, что целостность КФС нарушена. В данном случае происходит отправка РС в предполагаемый район местонахождения маяка и группы туристов. РС при помощи системы связи пытается установить связь с маяком и параллельно обнаружить группу при помощи устройств технического зрения. Для локализации маяка или группы туристов могут быть использованы как наземные мобильные и стационарные, так и воздушные узлы КФС. Для реализации данного сценария предполагается разработать решения, которые позволят не только оптимально располагать узлы КФС в пространстве для обеспечения связи, но и за минимальное время восстанавливать целостность КФС при потере связи. Исход сценария считается положительным при условии постоянной поддержки связи с маяком, установки связи или локализации группы за n времени при выходе из строя маяка.

2. Доставка продуктов питания и снаряжения для группы. Сценарий начинается с посылки специализированного сигнала от группы туристов с запросом на доставку определенного несрочного груза. После получения сигнала узлы КФС должны определить наличие и местоположение запрашиваемых грузов. Затем происходит определение метода доставки запрашиваемого груза посредством РС – наземный, воздушный, комбинированный. Выбор метода доставки зависит от местоположения различных РС и группы туристов, выполняемых РС задач, потенциальном положении группы в момент доставки груза. Для реализации данного сценария предполагается разработать решения, которые позволят минимизировать количество ресурсов, используемых КФС для доставки груза посредством модификации уже выполняемых задач различными РС. Исход сценария считается положительным при условии доставки груза до места расположения группы туристов.

3. Оперативное реагирование для оказания медицинской помощи. Сценарий начинается с посылки специализированного сигнала от группы туристов с запросом оказания медицинской помощи. Сигнал должен

поступить на пункт оперативного реагирования, где происходит его классификация и принимается решение о дальнейших действиях. В зависимости от произошедшей ситуации будет принято одно из трех решений или их комбинация: отправить группу спасателей для оказания помощи, развернуть видеосвязь с врачом, отправить медикаменты при помощи РС. В случае отправки спасателей сценарий считается успешно завершенным. Для установления оперативной видеосвязи с врачом временно приостанавливаются текущие задачи, которые выполняют РС, оснащенные специализированными приемниками-передатчиками для трансляции мультимедийных данных. РС занимают на территории парка необходимые позиции и создают сеть, по которой производится передача мультимедийных данных. В данном случае сценарий считается успешно завершенным при организации и постоянном поддержании передачи данных. При реализации задачи, связанной с оперативной доставкой небольших грузов до трех килограммов, предполагается временно приостановить рутинные задачи узлов КФС, произвести поиск оптимальных с точки зрения времени маршрутов и методов для перемещения груза (наземный, воздушный, комбинированный). Исход сценария считается положительным при условии доставки груза до места расположения группы туристов за не более чем n времени.

4. Мониторинг состояния инфраструктуры парка. Данный сценарий предполагает использование различных РС для выявления людей в зонах, запрещённых для купания и несанкционированного разжигания костров. РС должны быть оснащены камерами в ИК и видимом диапазонах. Предполагается, что заранее известны координаты и площадь зон, мониторинг которых необходимо производить. Мониторинг должен производиться k раз в день. Для обеспечения мониторинга необходимо использовать БЛА, которые входят в состав КФС. В определенный момент времени КФС должна определить и назначить БЛА для мониторинга, затем необходимо проложить траектории движения с учетом точек взлета и

посадки. Сценарий считается успешно выполненным если была произведена аэрофотосъемка необходимых площадей, обработка полученных данных и информирование необходимых узлов КФС о результатах обработки для того, чтобы предпринять дальнейшие действия.

5. Поиск и уборка мусора. В ходе эксплуатации наземные РС дополнительно производят поиск загрязнений на тропинках. РС, оборудованные манипулятором, могут сразу производить уборку мелких объектов в контейнер. РС, не оснащенные манипулятором, при детектировании мусора производят информирование других узлов КФС для обеспечения принятия дальнейших решений. Сценарий считается успешно выполненным, если на протяжении определенного маршрута, по которому перемещался РС, было детектировано не менее 70% всего мусора, данные были успешно доставлены в необходимые узлы КФС и распределены задачи для обеспечения сбора мусора.

6. Замена модулей на РС. При эксплуатации РС может произойти выход из строя одного и более модулей или понадобится смена функционального назначения робота. В таком случае РС отправляет сигнал в КФС и сообщает о выходе из строя или необходимости замены определенного модуля. КФС производит поиск необходимых робототехнических средств, которые могут обеспечить замену модуля. По результатам поиска определяются траектории движения для двух РС при условии, что обслуживаемый РС способен перемещаться. Если обслуживаемый РС не способен перемещаться, то траектория движения строится от обслуживающего до обслуживаемого РС. После того, как роботы окажутся в необходимых для замены модулей позициях, обслуживающее РС должно произвести замену модуля и убедиться в правильности произведенных действий и работоспособности замененного модуля. В случае неработоспособности замененного модуля РС должно попытаться произвести повторную замену самостоятельно и в случае неудачи оповестить КФС для инициации повторения процесса замены. Сценарий считается успешно

выполненным при успешной замене модуля или при оповещении КФС о повторной замене при условии, что были предприняты все попытки, чтобы решить сложившуюся проблему.

Представленные сценарии позволяют в полной мере апробировать предложенную структурно-параметрическую модель КФС для решения прикладных задач в условиях динамического окружения, выполняемых посредством согласованного взаимодействия групп мобильных агентов, представленных гетерогенными РС.

Заключение

В ходе выполнения проекта были проанализированы исследовательские работы, посвященные вопросам функционирования КФС в условиях динамической среды, стратегиям поведения КФС в условиях временной потери связности системы, а также проблемы самоорганизации КФС при отказе отдельных её узлов и/или компонентов. Проблемы, связанные с построением децентрализованных архитектур КФС, поведением КФС в случае потери связности системы, самоорганизацией КФС при отказе отдельных её компонентов или составных частей являются предметом исследования многих ведущих научных коллективов. Однако, при наличии множества отдельных разработок в этих областях, отсутствует целостный, исчерпывающий подход, в рамках которого возможно построение устойчивых КФС, функционирующих на открытых территориях в динамической среде. Были выделены основные ограничения существующих подходов:

- требование прямой видимости между устройствами и/или малого расстояния между ними;
- необходимость в большом количестве устройств для поддержания достаточного уровня связи;
- применимость только для стационарных устройств КФС;
- необходимость в больших вычислительных мощностях устройств КФС;
- возможность работы только в статичном и определённом окружении, либо необходимость в длительном и ресурсоёмком процессе переобучения;
- наличие центральных, критических узлов и узких мест, выход из строя или перегрузка которых приведёт к отказам в системе;
- ограниченный спектр задач децентрализации;
- узкая специализация децентрализованных КФС.

На основе проведенного анализа были сформированы рекомендации и предложения для построения КФС, отвечающих поставленным в проекте требованиям:

- следует использовать типовые многоцелевые узлы КФС, которые различаются по набору поддерживаемых функций, физическим и вычислительным мощностям, что позволит таким узлам заменять друг друга и при этом не приведёт к необходимости разработки универсальных узлов;
- следует выделять роли, доступные каждому виду узлов, и реализовывать алгоритмы их динамического назначения; роли подразделяются на прикладные (выполнение задач КФС) и служебные (ретрансляция сигналов, управление другими компонентами КФС);
- следует избегать наличия незаменимых (критических) узлов КФС, выход из строя которых сделает невозможным выполнение задач КФС при наличии остальных исправных узлов;
- следует обеспечить избыточность узлов КФС каждого вида для перераспределения ролей и задач в случае выхода отдельных узлов из строя, а также для дублирования каналов связи;
- следует использовать оборудование, которое обладает достаточным для исследуемой местности уровнем защиты от воздействия окружающей среды (влаги, пыли, температур), чтобы снизить вероятность выхода оборудования из строя;
- следует поддерживать актуальные данные о территории, что включает в себя как предварительный сбор данных (например, радиообследование территории вручную или при помощи БЛА с построением карты препятствий, мешающих распространению радиосигнала и передвижению роботов), так и переобучение КФС в процессе работы (например, с использованием алгоритмов SLAM).

Кроме того, для функционирования КФС необходимо обеспечить ряд принципов построения сети:

- в любой момент времени сеть должна обеспечивать прием/передачу данных на приемлемой в контексте выполняемых задач скорости в любой точке сети;
- сеть должна поддерживать бесшовное подключение («бесшовный роуминг»), т. е. автоматическое переподключение без задержек от одного ретранслятора к другому;
- сеть должна обеспечивать избыточность путей передачи данных в каждый момент времени;
- сеть должна быть расширяемой, гибкой в конфигурировании и администрировании;
- сеть должна быть защищена от несанкционированного доступа и подключения сторонних неавторизованных устройств.

Решения, которые лишены указанных выше недостатков и в полной мере соответствуют изложенным требованиям и принципам, на данный момент в литературе не встречаются. КФС, способные к быстрому развертыванию и оперативной адаптации собственной инфраструктуры к изменяющимся условиям окружения, на сегодняшний день практически отсутствуют. Перспективной представляется интеграция существующих решений на разных уровнях модели ISO/OSI, но это требует дополнительных исследований.

С точки зрения самоорганизации КФС при отказе отдельных её узлов и/или компонентов очень мало внимания уделяется обеспечению отказоустойчивости автономных мобильных робототехнических платформ, входящих в состав КФС. Актуальной проблемой является отсутствие возможности быстрой замены полностью или частично неисправных частей мобильной платформы. Указанная проблема может быть решена, если устройства, сочетающие в себе различные программно-аппаратные решения

для выполнения набора задач, будут разделены на узкоспециализированные модули, каждый из которых предназначен для решения конкретной задачи. В базовой конфигурации автономная мобильная платформа может состоять из следующих модулей: модули мотор-колес для приведения устройства в движение, модули сенсоров для обеспечения локализации и навигации устройства, вычислительные модули, модуль энергосистемы и модули связи. Для обеспечения отказоустойчивости робототехнических устройств, работающих в группе, предлагается разработать модель автономной мобильной платформы, ориентированной на взаимодействие группы мобильных агентов, представленных гетерогенными роботами и способными осуществлять замену неисправных или неподходящих модулей на отдельных устройствах в зависимости от стоящих перед группой в данный момент задач. Замена модулей может обеспечиваться использованием манипулятора со специализированным захватным механизмом, взаимодействующим с конструкцией модулей, предназначенным для соединения с подобными модулями или общей рамой. При этом манипулятор, как устройство, также может быть представлен как один из модулей автономной мобильной платформы. Основой для модульной платформы, обеспечивающей быструю автоматизированную замену модулей, может служить рамная конструкция (каркас). Для этого каркас должен иметь посадочные места для установки модулей, а также проводную систему коммуникаций для обеспечения взаимодействия модулей в системе. Система коммуникаций при этом также может быть представлена в виде отдельного заменяемого модуля. При этом конструкция модулей должна обеспечивать взаимодействие с захватным механизмом манипулятора, осуществляющего установку и замену модулей на платформе. Посадочные места, расположенные на каркасе, должны быть приспособлены для установки следующих типов модулей, разделяемых по назначению аппаратного обеспечения в них: вычислительный модуль, аккумуляторная батарея, двигательная система, модуль контроллеров, модуль беспроводной связи, модуль датчиков препятствий контактного типа,

модуль ультразвуковых датчиков препятствий, модуль навигации и локализации, модуль компьютерного зрения, модуль управления питанием, модуль зарядки, модуль внутренних коммуникаций, модуль манипулятора. Для обеспечения надежного соединения конструкция посадочных мест должна обеспечивать высокую точность установки и базирования модулей относительно каркаса платформы.

В ходе выполнения проекта был разработан метод автономного распределения инфраструктурных ролей между множеством компонентов киберфизической системы, представленных гетерогенными робототехническими средствами, в условиях изменяющегося окружения и возможного выхода из строя отдельных узлов КФС. Предлагаемый метод учитывает характеристики узлов КФС и их инфраструктурные роли на разных уровнях функционирования КФС, определяет поведение системы при выходе отдельных узлов из строя и включает сценарии перераспределения ролей для устойчивого функционирования в условиях изменяющегося окружения. Выполненная формализация состава, свойств и поведения КФС позволяет выполнить синтез 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 робототехническими средствами (РС). В качестве входных данных для этой модели используется конечное множество гетерогенных РС и их типов, которые характеризуются набором параметров, связанных с наличием у РС физических и логических компонентов, датчиков и исполнительных механизмов. Синтезируемая модель позволяет определить набор недостающих функциональных компонентов КФС для дальнейшего уточнения состава системы в целях её устойчивого функционирования. Для построения модели требуется определить пространство активации оборудования, в рамках которого выполняется управление избыточной

дублирующей функциональностью РС, которая в начальном состоянии используется частично, но активизируется в процессе перераспределения ролей при адаптации КФС. Это позволяет построить итоговое параметрическое представление КФС и саму модель функционирования, которая в полной мере отражает процесс функционирования автономных мобильных КФС в динамических средах. Такой метод позволяет сформировать перечень недостающих функциональных компонентов для устойчивого функционирования КФС и скорректировать её состав.

Была разработана структурно-параметрическая модель 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. В общем случае автономная мобильная КФС может быть представлена как конечный набор гетерогенных РС различных типов, каждое из которых представлено набором физических компонентов: датчиков, исполнительных механизмов и инженерных модулей и их параметрами, что обеспечивает полноту представления аппаратных компонентов в модели и позволяет описать процессы их автоматизированной замены в случае выхода из строя какого-либо узла. Одним из элементов обеспечения повышенной отказоустойчивости КФС является внедрение дублирующих компонентов на уровне каждого отдельного РС. Дублирующие компоненты каждого из РС остаются деактивированными и не задействуются при реализации каких-либо процессов в рамках КФС до тех пор, пока не будут активированы системой в связи с выходом из строя ряда уже активных компонентов. В терминах компонентов автономная мобильная КФС в процессе функционирования может быть определена набором активных и резервных физических компонентов, датчиков, исполнительных механизмов, набором логических компонентов, а также набором лиц, вовлеченных в процессы функционирования КФС, находящихся внутри киберфизического окружения

или являющихся конечными пользователями системы. Логические компоненты модели включают в себя все уровни программного обеспечения, сети и сетевое окружение логического уровня, а также сведения на уровне данных, информации и знаний, что обеспечивает полноту описания процессов сбора, агрегации, обработки и анализа данных, а также процессов создания, получения, хранения, поиска и распространения информации.

В предлагаемой модели определен набор функциональных компонентов КФС как набор совокупностей логических и физических компонентов системы, которые при взаимодействии формируют базовые единицы функциональности. При этом каждый функциональный компонент обладает аппаратными и вычислительными мощностями, необходимыми для реализации собственных функций, достаточным объемом памяти для хранения данных; прямой или опосредованной связью между составляющими компонентами на физическом и информационно-логическом уровнях; способностью устанавливать сетевые соединения с другими компонентами системы и обеспечивать целевую передачу данных;

способностью получать необходимую информацию о состоянии окружающей среды и других компонентов системы; способностью самодиагностики и информирования связанных компонентов в случае возникновения неисправности. Каждый функциональный компонент ассоциирован с набором преобразователей, что обеспечивает взаимодействие с внешней средой и пользователями КФС, включая как обмен и преобразование энергии (механической, электрической и т. д.) – на физическом уровне, так и обмен, преобразование и синтез информации – на логическом уровне. Особенностью предлагаемой модели является то, что элементы любого преобразователя потенциально могут быть интероперабельными, т.е. наборы элементарных компонентов КФС, входящие в состав некоторого преобразователя, могут входить в состав неограниченного числа иных преобразователей функциональных компонентов. Согласованное взаимодействие наборов функциональных

компонентов КФС и ассоциированных с ними преобразователей позволяет обеспечить предоставление сервисов КФС потребителям, в качестве которых могут выступать как иные функциональные компоненты, так и пользователи.

Приведенная динамическая модель функционирования автономной мобильной КФС обеспечивает представление взаимодействия функциональных компонентов КФС с внешней средой, включая регистрацию изменения среды наборами датчиков и исполнительных механизмов КФС. Зарегистрированные изменения среды инициируют изменение логического состояния системы, включая возможный отказ некоторого набора физических компонентов. Отказ некоторого физического компонента провоцирует отказ ряда функциональных компонентов, в состав которых он входит, что может вызвать отказ в работе сервисов, ассоциированных с данными функциональными компонентами. Обладая информацией о наборе вышедших из строя физических компонентов КФС и наборе резервных физических компонентов, можно определить набор доступных физических компонентов для восстановления работоспособности КФС. Восстановление процессов предоставления соответствующего набора сервисов требует восстановления набора преобразователей на основе имеющихся резервных компонентов. Непрерывная циклическая реализация описанных в представленной модели процессов изменения структуры КФС, состояния её компонентов и внешней среды в полной мере отражает процесс функционирования автономных мобильных КФС в динамических средах.

В ходе выполнения проекта были разработаны тестовые сценарии апробации предложенной структурно-параметрической модели КФС для решения прикладных задач в условиях динамического окружения, выполняемых посредством согласованного взаимодействия групп мобильных агентов, представленных гетерогенными РС. Для наглядности реализации сценариев различного типа функционирования КФС в условиях динамического окружения была выбрана сфера экологического туризма, в частности, обслуживание туристов на территории крупных туристических

парков, заповедников, заказников. Рассматриваемые сценарии включают следующие задачи КФС:

1. доставка полезных грузов (продуктов питания, оборудования);
2. быстрое реагирование для оказания медицинской помощи (вызов спасательной бригады, доставка медикаментов, обеспечение мультимедийного канала связи с врачом для удаленного консультирования);
3. мониторинг состояния инфраструктуры парка (детектирование людей в неположенных местах, детектирование несанкционированной деятельности, например разведения костров, купания);
4. поиск и уборка мусора;
5. замена неисправных модулей робототехнических средств, входящих в состав КФС.

Заданные параметры рабочего пространства КФС в предложенных сценариях обеспечивают полноту представления различных условий динамического окружения, включая многообразие и неоднородность обрабатываемых данных, высокий уровень помех и препятствий естественного характера, затрудняющих развертывание и функционирование КФС, а также высокие риски выхода из строя компонентов КФС. Предлагаемые сценарии обеспечивают апробацию оперативного развертывания узлов КФС для обеспечения связи на обширной территории. Наземные и воздушные РС могут выступать как в качестве ретрансляторов сигнала, так и в качестве узлов для обеспечения обслуживания пользователей. Также наземные РС могут производить развертывание стационарных временных ретрансляторов сигнала, чтобы покрыть необходимые расстояния между узлами системы и сохранить её целостность. При этом в ходе выполнения текущих задач наземные РС могут изменять свои позиции и положение стационарных ретрансляторов. Таким образом, в ходе предлагаемых сценариев могут быть апробированы решения для обеспечения связью всех групп туристов за счет поддержания компонентами КФС оптимальной топологии сети, что позволяет оценить стратегии

поведения КФС при нарушении целостности данных в случае временной потери связности системы.

Сценарий доставки продуктов питания и снаряжения для группы туристов позволяет апробировать решения, минимизирующие количество энергетических ресурсов, используемых КФС при выполнении ресурсоемких задач за счет модификации уже выполняемых задач различными РС. В ходе данного сценария может быть оценена способность КФС к самоорганизации посредством координации автономных роботов при выполнении прикладной задачи на обширной территории со множеством естественных препятствий, что обеспечивает необходимость учета особенностей организации информационных потоков и взаимодействия аппаратных средств между собой.

Сценарий оперативного реагирования КФС для оказания медицинской помощи предполагает усложнение задачи обеспечения связи между компонентами КФС, поскольку требует организации устойчивого канала передачи мультимедийных данных (аудио и/или видео для наиболее полного оценивания ситуации персоналом парка и принятия решения о дальнейших действиях). Данный сценарий позволяет апробировать стратегии приоритезации и экстренного переназначения задач компонентами КФС, а также оценить функционирование КФС с точки зрения времени их выполнения.

Сценарий мониторинга состояния инфраструктуры парка предполагает сбор, агрегирование, обработку и анализ больших объемов разнородных данных средствами КФС. Данный сценарий позволяет апробировать метод автономного распределения инфраструктурных ролей между множеством компонентов КФС (БЛА и наземными РС), а также подходы к организации децентрализованного сбора, анализа и хранения данных.

Сценарий поиска и уборки мусора позволяет оценить стратегии самоорганизации КФС при решении прикладных задач, выполняемых посредством согласованного взаимодействия групп гетерогенных РС.

Сценарий замены неисправных модулей робототехнических средств, входящих в состав КФС, позволяет апробировать стратегии самоорганизации КФС при отказе отдельных узлов и/или компонентов, а также модель автономной мобильной платформы, способной к автоматизированной реконфигурации.

Представленные сценарии позволяют в полной мере апробировать предложенную структурно-параметрическую модель КФС для решения прикладных задач в условиях динамического окружения, выполняемых посредством согласованного взаимодействия групп мобильных агентов, представленных гетерогенными РС. Это позволит сформировать принципы проектирования КФС, отличающихся высокой степенью универсальности, способных к автоматическому развертыванию и функционированию на открытых территориях в условиях изменяющегося окружения за счет мобильности и автономности ее основных компонентов.

Список использованных источников

1. W. Shi, J. Cao, Q. Zhang, Y. Li and L. Xu, "Edge Computing: Vision and Challenges," in IEEE Internet of Things Journal, vol. 3, no. 5, pp. 637-646, Oct. 2016, DOI: 10.1109/JIOT.2016.2579198.
2. Lavric, A., & Popa, V. (2017, July). Internet of things and LoRa low-power wide-area networks: a survey. In Signals, Circuits and Systems (ISSCS), 2017 International Symposium on (pp. 1-5). IEEE.
3. Alguliyev R., Imamverdiyev Y., Sukhostat L. Cyber-physical systems and their security issues. Computers in Industry, V. 100, 2018, pp. 212-223, DOI: 10.1016/j.compind.2018.04.017; C.H. Liu, Y. Zhang Cyber Physical Systems: Architectures, Protocols and Applications CRC Press, Taylor & Francis Group Florida (2016).
4. Lavric, A., & Popa, V. (2017, October). A LoRaWAN: Long range wide area networks study. In Electromechanical and Power Systems (SIELMEN), 2017 International Conference on (pp. 417-420). IEEE
5. Cagatan, G. K. B., Magsumbol, J. A. V., Baldovino, R., Sybingco, E., & Dadios, E. P. (2017, December). Connectivity analysis of wireless sensor network in two-dimensional plane using Castalia simulator. In Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM), 2017 IEEE 9th International Conference on (pp. 1-8). IEEE
6. Rahim, H., Ghazel, C., & Saidane, L. A. (2018, June). An Alternative Data Gathering of the Air Pollutants In the Urban Environment using LoRa and LoRaWAN. In 2018 14th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC) (pp. 1237-1242). IEEE
7. Barriquello, C. H., Bernardon, D. P., Canha, L. N., e Silva, F. E. S., Porto, D. S., & da Silveira Ramos, M. J. (2017, August). Performance assessment of a low power wide area network in rural smart grids. In Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2017 52nd International (pp. 1-4). IEEE

8. Швецова А. А. Влияние атмосферных условий на передачу радионавигационных сигналов // Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы-2019. – 2019. – С. 254-257. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41467808>
9. Волков В. В., Гордяскина Т. В. Исследование аналогового радиотехнического канала связи в программном пакете Mathcad. URL: http://xn-----7kcgqc6assog3b.xn--p1ai/2020/PDF/9_6.pdf
10. Демиденко О. М., Кулинченко В. Н. Изучение влияния внешних помех на качество сигнала в сетях WI-FI. – 2015. http://pfmt.gsu.by/files/pfmt_2015_4_25.pdf#page=96
11. Борздыко И. А., Иванашко Е. А. Причины помех и ошибок в сети Wi-Fi // Ученые записки Брянского государственного университета. – 2017. – №. 1. – С. 7-10. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30291232>.
12. Rabie, T., & Suleiman, S. (2016, December). A novel wireless mesh network for indoor robotic navigation. In 2016 5th International Conference on Electronic Devices, Systems and Applications (ICEDSA) (pp. 1-4). IEEE
13. Jiménez A. C., García-Díaz V., Bolaños S. A decentralized framework for multi-agent robotic systems // Sensors. – 2018. – Т. 18. – №. 2. – С. 417. DOI: 10.3390/s18020417
14. Jawhar I. et al. Communication and networking of UAV-based systems: Classification and associated architectures // Journal of Network and Computer Applications. – 2017. – Vol. 84. – pp. 93-108
15. Kakamoukas G. A., Sarigiannidis P. G., Economides A. A. FANETs in Agriculture-A routing protocol survey //Internet of Things. – 2020. – С. 100183
16. Ali Khan, Farooq Aftab, Zhongshan Zhang. Self-organization based clustering scheme for FANETs using Glowworm Swarm Optimization, Physical Communication, Volume 36, 2019, 100769, DOI: 10.1016/j.phycom.2019.100769
17. Srinivasan S. Design and use of managed overlay networks: дис. Georgia Institute of Technology, 2007

18. Ермаков А. В., Сучкова Л. И. Разработка алгоритмов для надежного обмена данными между автономными роботами на основе принципов самоорганизующейся сети // Надежность. – 2020. – Т. 20. – №. 2. – С. 35-42. URL: <https://www.dependability.ru/jour/article/view/372/609>
19. Majcherczyk N. et al. Decentralized connectivity-preserving deployment of large-scale robot swarms //2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – IEEE, 2018. – С. 4295-4302. <https://sci-hub.do/10.1109/IROS.2018.8594422>
20. Chai Keong Toh Ad Hoc Mobile Wireless Networks, Prentice Hall Publishers, 2002. ISBN 978-0-13-007817-9
21. Sahban S. et al. Group Communication Management in UAV-MBN Networks //International Journal of Pure and Applied Mathematics. – 2018. – Т. 118. – №. 7. – С. 349-355
22. Megyesi D., Leško J., Schreiner M. Evaluation of multihop UAV communication model based on protocol-independent and protocol-dependent methods //2019 Modern Safety Technologies in Transportation (MOSATT). – IEEE, 2019. – С. 108-112
23. Alexander Smirnov, Nikolay Shilov. Service-Based Socio-Cyberphysical Network Modeling for Guided Self-Organization, Procedia Computer Science, Volume 64, 2015, Pages 290-297, DOI: 10.1016/j.procs.2015.08.492
24. Malandra, F., & Sansò, B. (2018). A Markov-modulated End-to-end Delay Analysis of Large-scale RF-Mesh Networks with Time-slotted ALOHA and FHSS for Smart Grid Applications. IEEE Transactions on Wireless Communications
25. Петручук Е.В., Иванов Д.Я. Организация информационного обмена в децентрализованных роевых системах управления мультиробототехническими комплексами с использованием технологии ZigBee // Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова. 2019. №7

26. Potrino G., Serianni A., Palmieri N. Drones coordination protocols in the precision agriculture context //Autonomous Air and Ground Sensing Systems for Agricultural Optimization and Phenotyping IV. – International Society for Optics and Photonics, 2019. – Т. 11008. – С. 110080G
27. Wang J. et al. Taking drones to the next level: Cooperative distributed unmanned-aerial-vehicular networks for small and mini drones //Ieee vehIcular technology magazIne. – 2017. – Т. 12. – №. 3. – С. 73-82
28. Tropea M. et al. Reactive flooding versus link state routing for FANET in precision agriculture //2019 16th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC). – IEEE, 2019. – С. 1-6
29. De Rango F. et al. A simulator for UAVs management in agriculture domain //2017 International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems (SPECTS). – IEEE, 2017. – С. 1-8
30. Юдинцев Б. С., Алексеев А. Ю. Синтез распределенной системы управления группой мобильных роботов // Труды Института механики им. ПР Мавлютова УНЦ РАН. – 2017. – Т. 12. – №. 2. – С. 199-205
31. Шляхов Н.Е., Ватаманюк И.В., Ронжин А.Л. Обзор методов и алгоритмов агрегации роя роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18, No 1. С. 22–29
32. Андреев В. П., Плетенев П. Ф. Метод информационного взаимодействия для систем распределённого управления в роботах с модульной архитектурой //Информатика и автоматизация. – 2018. – Т. 2. – №. 57. – С. 134-160
33. J.V. Pradilla, C.E. Palau. Chapter 7 - Micro Virtual Machines (MicroVMs) for Cloud-assisted Cyber-Physical Systems (CPS). Editor(s): Rajkumar Buyya, Amir Vahid Dastjerdi. Internet of Things, Morgan Kaufmann, 2016, Pages 125-142, DOI: 10.1016/B978-0-12-805395-9.00007-1.
34. Schneider G.F., Wicaksono H., Ovtcharova J. Virtual engineering of cyber-physical automation systems: The case of control logic //Advanced Engineering Informatics. – 2019. – Т. 39. – С. 127-143

35. Foehr M., Vollmar J., Calà A., Leitão P., Karnouskos S., Colombo A.W. Engineering of next generation cyber-physical automation system architectures //Multi-Disciplinary Engineering for Cyber-Physical Production Systems. – Springer, Cham, 2017. – C. 185-206.
36. Evans Sowah Okpoti, In-Jae Jeong. A reactive decentralized coordination algorithm for event-driven production planning and control: A cyber-physical production system prototype case study. Journal of Manufacturing Systems, Volume 58, Part A, 2021, Pages 143-158, DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.11.002
37. Gerostathopoulos I., Bures T., Hnetynka P., Keznikl J., Kit M., Plasil F., Plouzeau N. Self-adaptation in software-intensive cyber–physical systems: From system goals to architecture configurations //Journal of Systems and Software. – 2016. – T. 122. – C. 378-397
38. Rosenthal F., Jung M., Zitterbart M., Hanebeck U.D. CoCPN–Towards Flexible and Adaptive Cyber-Physical Systems Through Cooperation //2019 16th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC). – IEEE, 2019. – C. 1-6; Rosenthal F., Hanebeck U. D. A Control Approach for Cooperative Sharing of Network Resources in Cyber-Physical Systems //2019 IEEE International Conference on Industrial Cyber Physical Systems (ICPS). – IEEE, 2019. – C. 361-367
39. Павленко Е. Ю. Обеспечение информационной безопасности киберфизических систем на основе принципа гомеостаза. – 2018; Зегжда Д.П., Павленко Е.Ю., Лаврова Д.С., Штыркина А.А. Подход к созданию критерия устойчивого функционирования киберфизических систем // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2019. – №. 2. – С. 156-163
40. Minelli M., Panerati J., Kaufmann M., Ghedini C., Beltram, G., Sabattini L. Self-optimization of resilient topologies for fallible multi-robots //Robotics and Autonomous Systems. – 2020. – T. 124. – C. 103384

41. Guo Y., Hu X., Hu B., Cheng J., Zhou M., Kwok R.Y. Mobile cyber physical systems: Current challenges and future networking applications //IEEE Access. – 2017. – Т. 6. – С. 12360-12368
42. Chaâri R., Ellouze F., Koubâa A., Qureshi B., Pereira N., Youssef H., Tovar E. Cyber-physical systems clouds: A survey //Computer Networks. – 2016. – Т. 108. – С. 260-278.
43. Geng M. et al. Learning to cooperate via an attention-based communication neural network in decentralized multi-robot exploration //Entropy. – 2019. – Т. 21. – №. 3. – С. 294
44. Токарев Д. Г., Францева Ю. А. Аппаратно-программное обеспечение модернизированной системы управления роботом //Символ науки. – 2017. – Т. 2. – №. 4
45. Гурьянов Е. Д., Дубов М. А. ПОСТРОЕНИЕ САМООРГАНИЗУЮЩЕЙСЯ РАДИОСЕТИ ДЛЯ МАЛЫХ МОБИЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ // Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий-РЭУС-2019. – 2019. – С. 100-103
46. Григорьев В. В. и др. Способ создания аппаратно-программного комплекса централизованного и децентрализованного управления группировкой робототехнических комплексов. – 2017
47. Li K. et al. Decentralized robust connectivity control in flocking of multi-robot systems //IEEE Access. – 2020. – Т. 8. – С. 105250-105262
48. Шабанов В.Б., Иванов Д.Я. Применение хаотических моделей и блокчейн-технологий для организации защищенного информационного обмена в группах роботов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. №10
49. Шабанов В. Б., Капустян С. Г. УПРАВЛЕНИЕ ГРУППАМИ ХАОТИЧЕСКИХ МИКРОРОБОТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСПРЕДЕЛЁННОГО РЕЕСТРА //Материалы XII мультikonференции по проблемам управления (МКПУ-2019). – 2019. – С. 112-115
50. Шабанов В. Б. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РАСПРЕДЕЛЕННОГО РЕЕСТРА В ГРУППАХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ

//XII Мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2019). – 2019. – С. 164-166

51. Амелин К. С., Амелина Н. О. Передача информации через достижение консенсуса в децентрализованной сети робототехнических комплексов // Стохастическая оптимизация в информатике. – 2019. – Т. 15. – №. 2. – С. 3-12

52. Ваулин Ю. В. и др. Реконфигурируемая система управления и навигации для многофункциональных подводных роботов // Подводные исследования и робототехника. – 2017. – №. 1. – С. 4-13

53. Хохлов Н. И. и др. A protocol for organizing a decentralized wireless communication network for ensuring the interaction of a group of intelligent mobile robots //Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2020. – Т. 63. – №. 12.

54. Хохлов Н. И. и др. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТОКОЛА МАРШРУТИЗАЦИИ БЕСПРОВОДНОЙ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ САМООРГАНИЗУЮЩЕЙСЯ СЕТИ //Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – №. 6

55. Канушкин С. В. Синергетический подход в управлении группой беспилотных летательных аппаратов системы охранного мониторинга //Правовая информатика. – 2018. – №. 3

56. Matoui F. et al. Path planning of a group of robots with potential field approach: decentralized architecture //IFAC-PapersOnLine. – 2017. – Т. 50. – №. 1. – С. 11473-11478

57. Chen L. et al. Non-Communication Decentralized Multi-Robot Collision Avoidance in Grid Map Workspace with Double Deep Q-Network // Sensors. – 2021. – Т. 21. – №. 3. – С. 841

58. Dutta R., Sun L., Pack D. A decentralized formation and network connectivity tracking controller for multiple unmanned systems //IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2017. – Т. 26. – №. 6. – С. 2206-2213

59. Lin C. W., Liu Y. C. Decentralized estimation and control for bilateral teleoperation of mobile robot network with task abstraction //2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – IEEE, 2017. – C. 5384-5391
60. Kit J. L., Mateo D., Bouffanais R. A decentralized mobile computing network for multi-robot systems operations //2018 9th IEEE Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON). – IEEE, 2018. – C. 309-314
61. Vatamaniuk I.V., Iakovlev R.N.: Generalized Theoretical Models of Cyberphysical Systems. Proceedings of the Southwest State University. 23(6), 161-175(2019). (In Russ.) DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-6-161-175
62. Ronzhin, A. L., Budkov, V. Y., Ronzhin, A. L.: User profile forming based on audiovisual situation analysis in smart meeting room. SPIRAS Proceedings, 4(23), 482-494. DOI: 10.15622/sp.23.28
63. Alguliev, R., Imamerdiev, Ya., Suxostat, L.: Ensuring information security of cyber-physical systems. 1st Republican conference on Scientific-practical problems of Software engineering, (2017). DOI: 10.25045/NCSoftEng.2017.07
64. Meshcheryakov, R. V., Iskhakov, A. Y., Evsutin, O. O.: Analysis of Modern Methods to Ensure Data Integrity in Cyber-Physical System Management Protocols. Informatics and Automation 19(5), 1089-1122 (2020). DOI: 10.15622/ia.2020.19.5.7
65. Knight, J. C., Sullivan, K. J., Elder, M. C., Wang, C.: Survivability architectures: Issues and approaches. In Proceedings DARPA Information Survivability Conference and Exposition. DISCEX'00, vol. 2, pp. 157-171. IEEE, (2000).
66. Castaño, F., Strzelczak, S., Villalonga, A., Haber, R. E., Kossakowska, J.: Sensor reliability in cyber-physical systems using internet-of-things data: A review and case study. Remote sensing, 11(19), (2019). DOI: 10.3390/rs11192252

67. Humayed, A., Lin, J., Li, F., Luo, B.: Cyber-physical systems security – A survey. *IEEE Internet of Things Journal*, 4(6), 1802-1831 (2017). DOI: 10.1109/JIOT.2017.2703172
68. Karim, M. E., Phoha, V. V.: Cyber-physical systems security. In *Applied Cyber-Physical Systems*, 75-83 (2014). DOI: 10.1007/978-1-4614-7336-7_7
69. Sanislav, T., Zeadally, S., Mois, G. D.: A Cloud-Integrated, Multilayered, Agent-Based Cyber-Physical System Architecture. *Computer* 50(4), 27–37 (2017). DOI: 10.1109/mc.2017.113
70. Sanislav, T., Zeadally, S., Mois, G., Fouchal, H.: Multi-agent architecture for reliable Cyber-Physical Systems (CPS). In *IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*. (2017). DOI: 10.1109/iscc.2017.8024524
71. Ratasich, D., Höftberger, O., Isakovic, H., Shafique, M., Grosu, R.: A self-healing framework for building resilient cyber-physical systems. In *2017 IEEE 20th International Symposium on Real-Time Distributed Computing (ISORC)*, pp. 133-140, IEEE (2017). DOI: 10.1109/ISORC.2017.7
72. Höftberger, O., Obermaisser, R.: Ontology-based runtime reconfiguration of distributed embedded real-time systems. In *16th IEEE International Symposium on Object/component/service-oriented Real-time distributed Computing (ISORC)*, pp. 1-9. IEEE (2016). DOI: 10.1109/ISORC.2013.6913205
73. Barbosa, J., Leitão, P., Teixeira, J.: Empowering a cyber-physical system for a modular conveyor system with self-organization. In *Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing*, pp. 157-170. Springer, Cham, (2018). DOI: 10.1007/978-3-319-73751-5_12
74. Barbosa, J., Leitão, P., Adam, E., Trentesaux, D.: Dynamic self-organization in holonic multi-agent manufacturing systems: The ADACOR evolution. *Computers in industry*, 66, 99-111 (2015). DOI: 10.1016/j.compind.2014.10.011

75. Leitão, P., Restivo, F.: ADACOR: A holonic architecture for agile and adaptive manufacturing control. *Computers in industry*, 57(2), 121-130 (2006). DOI: 10.1016/j.compind.2005.05.005
76. Zhang, Z., An, W., Shao, F.: Cascading Failures on Reliability in Cyber-Physical System. *IEEE Transactions on Reliability*, 65(4), 1745–1754 (2016). DOI:10.1109/tr.2016.2606125
77. Reppa, V., Polycarpou, M. M., Panayiotou, C. G.: Decentralized Isolation of Multiple Sensor Faults in Large-Scale Interconnected Nonlinear Systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 60(6), 1582–1596 (2015). DOI:10.1109/tac.2014.2384371
78. Alippi, C., Ntalampiras, S., Roveri, M.: Model-Free Fault Detection and Isolation in Large-Scale Cyber-Physical Systems. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence*, 1(1), 61–71 (2017). DOI:10.1109/tetci.2016.2641452
79. Jadoon, R. N., Awan, A. A., Khan, M. A., Zhou, W., Shahzad, A.: An Efficient Nodes Failure Recovery Management Algorithm for Mobile Sensor Networks. *Mathematical Problems in Engineering*, (2020). DOI: 10.1155/2020/1749467
80. Mechtri, L., Tolba, F. D., Ghanemi, S., Magoni, D.: A twofold self-healing approach for MANET survivability reinforcement. *International Journal of Intelligent Engineering Informatics*, 5(4), 309-326 (2017). DOI: 10.1504/IJIEI.2017.087931
81. Mitchell, R., Chen, R.: On survivability of mobile cyber physical systems with intrusion detection. *Wireless personal communications*, 68(4), 1377-1391 (2013). DOI: 10.1007/s11277-012-0528-3
82. Abad, F. A. T., Caccamo, M., Robbins, B.: A fault resilient architecture for distributed cyber-physical systems. In *2012 IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications*, pp. 222-231. IEEE (2012). DOI: 10.1007/s11277-012-0528-3

83. Tsiakkas, M., Kolios, P., Polycarpou, M., Panayiotou, C.: Establishing data integrity in networks of cyber-physical systems. In 2018 European Control Conference (ECC), pp. 350-355. IEEE (2018).
84. Wang, X., Hovakimyan, N., Sha, L.: L1Simplex: fault-tolerant control of cyber-physical systems. In 2013 ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems (ICCPS), pp. 41-50. IEEE (2013). INSPEC Accession Number: 13769933
85. Friedberg, I., McLaughlin, K., Smith, P., Lavery, D., Sezer, S.: STPA-SafeSec: Safety and security analysis for cyber-physical systems. *Journal of Information Security and Applications*, 34, 183-196. (2017). DOI: 10.1016/j.jisa.2016.05.008
86. Colson, C. M., Nehrir, M. H., Gunderson, R. W.: Distributed multi-agent microgrids: a decentralized approach to resilient power system self-healing. In 2011 4th International Symposium on Resilient Control Systems, pp. 83-88. IEEE (2011). DOI: 10.1109/ISRCS.2011.6016094
87. Демин, А. В., Адаптивное управление роботами с произвольно заданной модульной конструкцией // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Математика». – 2019. – Т. 29. – С. 10–21.
88. Andreev, V. Control system and design of the motion module of a heterogeneous modular mobile robot / V. Andreev, V. Kim // *Annals of DAAAM & Proceedings*. – 2016. – Vol. 27. – P. 586–595.
89. Saikin A. M. Perspectives of the unmanned cargo transport with electric traction development under the conditions of the Russian Federation // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – IOP Publishing, 2019. – T. 534. – №. 1. – C. 012002.
90. Ježek J. et al. TRANSMISSION DESIGN FOR AN AUTONOMOUS MODULAR PLATFORM
91. Saleh, T. Modular robotic platform for autonomous machining / T. Saleh, M.R. Khan // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2019. – Vol. 105(5), – P. 2557–2567.

92. Zarco, L. Software Model Requirements Applied to a Cyber-Physical Modular Robot in a Production Environment / L. Zarco , J. Siegert , T. Bauernhansl // *Procedia CIRP*. – 2019. – Vol. 81. – P. 352–357.
93. Cordie, T. Modular Field Robots for Extraterrestrial Exploration / T. Cordie, R. Steindl, R. Dungavell, T. Bandyopadhyay // *Advances in Astronautics Science and Technology*. – 2020. – Vol. 3(1). 37–47
94. Hirsig B. et al. Passive reconfigurable limb-link for mobile field robotics // *Proceedings of Australasian Conference on Robotics and Automation 2019: ACRA 2019*. – 2019;
95. Cordie T. P. et al. Modular field robot deployment for inspection of dilapidated buildings // *Journal of Field Robotics*. – 2019. – T. 36. – №. 4. – C. 641-655.
96. Blomqvist, Kenneth, et al. "Go fetch: mobile manipulation in unstructured environments." *arXiv preprint arXiv:2004.00899* (2020)
97. Pecka A. et al. Conceptual Design of Modular Multi Functional Agricultural Mobile Robot // *Research for rural development*. – 2018. – T. 1.
98. Luo Z. et al. Module-based structure design of wheeled mobile robot // *Mechanical Sciences*. – 2018. – T. 9. – №. 1. – C. 103-121.
99. Heggem C., Wahl N. M., Tingelstad L. Configuration and Control of KMR iiwa Mobile Robots using ROS2 // *2020 3rd International Symposium on Small-scale Intelligent Manufacturing Systems (SIMS)*. – IEEE, 2020. – C. 1-6.
100. Ramasubramanian A. K., Papakostas N. Operator-mobile robot collaboration for synchronized part movement // *Procedia CIRP*. – 2021. – T. 97. – C. 217-223.
101. Meier, F. (2016). Industry 4.0: Is your logistics equipped for the future?. *MHD Supply Chain Solutions*, 46(6), 20-22.
102. Frankovský, P., Pástor, M., Dominik, L., Kicko, M., Trebuňa, P., Hroncová, D., & Kelemen, M. (2018, May). Wheeled mobile robot in structured environment. In *2018 ELEKTRO* (pp. 1-5). IEEE.

103. Wilson, E. D., Assaf, T., Rossiter, J. M., Dean, P., Porrill, J., Anderson, S. R., & Pearson, M. J. (2021). A multizone cerebellar chip for bioinspired adaptive robot control and sensorimotor processing. *Journal of the Royal Society Interface*, 18(174), 20200750.
104. Baxendale, M. D. (2020). Calibration of Sound Source Localisation for Robots Using Multiple Adaptive Filter Models of the Cerebellum (Doctoral dissertation, University of the West of England)
105. Grimstad, Lars, and Pål J. From. "Software components of the Thorvald II modular robot." (2018): 157-165.
106. Grimstad, L. and From, P. J. Thorvald II - a Modular and Re-configurable Agricultural Robot. In IFAC 2017 World Congress. 2017a. doi:10.1016/j.ifacol.2017.08.1005.
- 107.
108. Di Castro, Mario, Manuel Ferre, and Alessandro Masi. "CERNTAURO: A modular architecture for robotic inspection and telemanipulation in harsh and semi-structured environments." *IEEE Access* 6 (2018): 37506-37522
109. Prados Sesmero C. Mechatronic design of an omnidirectional robotic platform and its navigation based on graphSLAM implementation: дис. – Universidad Politecnica de Madrid (ES)
110. Edlinger R., Nuechter A. MARC-Modular Autonomous Adaptable Robot Concept //2019 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR). – IEEE, 2019. – C. 1-7.
111. Liu Y. et al. A DESIGNATION OF MODULAR MOBILE RECONFIGURABLE PLATFORM SYSTEM //Journal of Mechanics in Medicine and Biology. – 2020. – T. 20. – №. 09. – C. 2040006.
112. Yuyao, S., Elara, M. R., Kalimuthu, M., & Devarassu, M. (2018). sTetro: A Modular Reconfigurable Cleaning Robot. 2018 International Conference on Reconfigurable Mechanisms and Robots (ReMAR). doi:10.1109/remar.2018.8449883.

113. Chebotareva E. et al. Person-Following Algorithm Based on Laser Range Finder and Monocular Camera Data Fusion for a Wheeled Autonomous Mobile Robot //International Conference on Interactive Collaborative Robotics. – Springer, Cham, 2020. – C. 21-33
114. Ruslanovich K. A. et al. RFID-based warehouse management system prototyping using a heterogeneous team of robots. – 2020.
115. Wilkins J. The Challenges of Using Mobile Robots //Environment. – 2020.
116. O'Brien J. et al. A feasibility and comparison study of Autonomous Robotic Vehicles for the FMCG manufacturing sector. – 2019.
117. Chitta S. et al. ros_control: A generic and simple control framework for ROS //The Journal of Open Source Software. – 2017. – T. 2. – №. 20. – C. 456-456
118. Chun B., Knight H. The Robot Makers: An Ethnography of Anthropomorphism at a Robotics Company //ACM Transactions on Human-Robot Interaction (THRI). – 2020. – T. 9. – №. 3. – C. 1-36.
119. Recker T., Heinrich M., Raatz A. A Comparison of Different Approaches for Formation Control of Nonholonomic Mobile Robots regarding Object Transport //Procedia CIRP. – 2021. – T. 96. – C. 248-253.
120. Yin, Hanlin. "The Development and prospection of Automatic Courier sorting robot." Proceedings of the 2020 2nd International Conference on Robotics, Intelligent Control and Artificial Intelligence. 2020.
121. Wise M. et al. Fetch and freight: Standard platforms for service robot applications //Workshop on autonomous mobile service robots. – 2016.
122. Lee, H.-Y., & Murray, C. C. (2018). Robotics in order picking: evaluating warehouse layouts for pick, place, and transport vehicle routing systems. International Journal of Production Research, 1–21. doi:10.1080/00207543.2018.1552031

123. Chen, Y., Leighton, B., Zhu, H., Ke, X., Liu, S., & Zhao, L. (2020). Submap-based indoor navigation system for the Fetch robot. *IEEE Access*, 8, 81479-81491.
124. Schulz, T., Holthaus, P., Amirabdollahian, F., & Koay, K. L. (2019, March). Humans' perception of a robot moving using a slow in and slow out velocity profile. In *2019 14th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)* (pp. 594-595). IEEE.
125. Blender T, Schlegel C. Motion control for omni-drive service robots under Kinematic, Dynamic And Shape Constraints. *IEEE 20th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)*, 2015; pp.1–8
126. Guzmán R, Ariño J, Navarro R, Lopes C M, Graça J, Reyes M, et al. Autonomous hybrid GPS/reactive navigation of an unmanned ground vehicle for precision viticulture-VINBOT, In *62nd German Winegrowers Conference At: Stuttgart*, 2016
127. Green O, Schmidt T, Pietrzkowski RP, Jensen K, Larsen M, Jørgensen RN. Commercial autonomous agricultural platform: Kongskilde Robotti. In *Proceedings of the Second International Conference on Robotics, Associated High-Technologies and Equipment for Agriculture and Forestry: New trends in mobile robotics, perception and actuation for agriculture and forestry 2014 May 21* (pp. 351-356). RHEA.
128. T.P. Lambrou and C.G. Panayiotou. 2009. A Survey on Routing Techniques Supporting Mobility in Sensor Networks. In *Proceedings of the 5th international conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Networks (MSN'09)*. pp.78-85
129. The Zone Routing Protocol (ZRP) for Ad Hoc Networks. URL: <https://tools.ietf.org/html/draft-ietf-manet-zone-zrp-04>
130. Ratasich, D., Höftberger, O., Isakovic, H., Shafique, M., & Grosu, R. (2017, May). A self-healing framework for building resilient cyber-physical systems. In *2017 IEEE 20th International Symposium on Real-Time Distributed Computing (ISORC)* (pp. 133-140). IEEE.

131. Höftberger, O., & Obermaisser, R. (2013, June). Ontology-based runtime reconfiguration of distributed embedded real-time systems. In 16th IEEE International Symposium on Object/component/service-oriented Real-time distributed Computing (ISORC 2013) (pp. 1-9). IEEE.

132. Денисов А.В. Разработка рекомендательной системы расчета параметров беспроводной сети сенсорных комплексов // МОИТ. - 2019. - 7(4). DOI: 10.26102/2310-6018/2019.27.4.025

133. Pallás-Areny R, Webster J (2001) Sensors and Signal Conditioning (John Wiley & Sons, New York, NY) 2nd Edition

134. U.S. Access Board (2010) Draft Information and Communication Technology (ICT) Standards and Guidelines (U.S. Access Board, Washington, DC). <https://www.accessboard.gov/attachments/article/560/draft-rule2010.pdf>

135. Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с