

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-3-167-180>

УДК 681.5.09

Адаптивное управление многоагентной интеллектуальной системой: алгоритмический аспект

Кандидаты техн. наук, доценты А. В. Гулай¹⁾, В. М. Зайцев¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. В процессе построения многоагентной интеллектуальной системы рассматриваются, как правило, стадии структурно-функциональной декомпозиции системы и определения ее задач, выделения или формирования необходимых группировок агентов, выполнения процедур системного администрирования и оперативного контроля работоспособности всех составных частей системы. В связи с этим проведено сопоставление различных вариантов структурного построения мультиагентной системы с учетом гибкости управления, возможностей по функциональному резервированию ее компонентов и их реконфигурированию, что позволило выделить и рекомендовать к широкому применению древовидную сетевую топологию. В качестве узлов топологии введены объекты планирования и контроля результативности действий исполнительных агентов, а также объект планирования и контроля результативности действий системы. Показано, что для организации адаптивного управления требуется формализованное отображение в объектах и агентах системы определенных сегментов системной топологии, а также состояний внешней среды, органов планирования, агентов системы, каналов обеспечения информационно-технического взаимодействия и функциональных задач. Рациональным приемом такого отображения является построение системными аналитиками и инженерами-системотехниками журналов состава системы, состава сегментов топологии и журналов функционирования агентов в виде логико-множественных отношений. Указанные отношения связывают различные типы объектов, агентов и задач с атрибутами доменов системных характеристик, параметров и состояниями работоспособности системы. Представлена принципиальная возможность определения рационального состава доменов отношений, который допускает функциональное расширение. Описан алгоритм функционирования многоагентной системы, в котором каждый цикл основывается на результатах оперативного сканирования индивидуальных журналов состава агентов и их функционирования, а также отбора из отношений кортежей очередных заданий для обеспечения последующего решения определенного экземпляра задачи. С помощью специальных оповещений в циркулярном режиме передачи обеспечиваются самосинхронизация и адаптивный выбор работ агентами системы в пределах каждого сегмента топологии.

Ключевые слова: интеллектуальная технология, мультиагентная система, динамическая сеть, адаптивное управление, логическое отношение, системный агент

Для цитирования: Гулай, А. В. Адаптивное управление многоагентной интеллектуальной системой: алгоритмический аспект / А. В. Гулай, В. М. Зайцев // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 3. С. 167–180. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-3-167-180>

Adaptive Management of Multi-Agent Intelligent System: Algorithmic Aspect

A. V. Gulay¹⁾, V. M. Zaitsev¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. In the process of constructing a multi-agent intelligent system, the stages of structural and functional decomposition of the system and the determination of its tasks, the allocation or formation of the necessary groups of agents, implementation

Адрес для переписки

Гулай Анатолий Владимирович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 24,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: + 375 17 293-91-85
is@bntu.by

Address for correspondence

Gulay Anatoly V.
Belorussian National Technical University
24, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: + 375 17 293-91-85
is@bntu.by

of system administration procedures and operational control of the operability of all components of the system are considered, as a rule. In this regard, a comparison was carried out of various options for the structural construction of a multi-agent system, taking into account the flexibility of control, the possibilities for functional redundancy of its components and their reconfiguration, which made it possible to identify and recommend a tree-like network topology for widespread application. Objects of planning and monitoring the effectiveness of the actions of executive agents, as well as an object of planning and monitoring the effectiveness of the system's actions, have been introduced as nodes of the topology. It is shown that the organization of adaptive management requires a formalized representation in the objects and agents of the system of certain segments of the system topology, as well as the states of the external environment, planning authorities, system agents, channels for ensuring information and technical interaction and functional tasks. A rational method of such mapping is the construction by systems analysts and systems engineers of system composition logs, composition of topology segments, and agent operation logs in the form of logical-multiple relations. The specified relationships link various types of objects, agents, and tasks with attributes of system characteristics, parameters, and states of system operability. A fundamental possibility of determining a rational composition of relation domains that allows for functional expansion is presented. The algorithm for functioning of a multi-agent system is described, in which each cycle is based on the results of operational scanning of individual logs of the composition of agents and their functioning, as well as selection from the relations of tuples of the next tasks to ensure the subsequent solution of a specific instance of the task. With the help of special alerts in the circular transmission mode, self-synchronization and adaptive selection of work by system agents within each segment of the topology are ensured.

Keywords: intelligent technology; multi-agent system; dynamic network; adaptive management; logical relationship; system agent

For citation: Gulay A. V., Zaitsev V. M. (2025) Adaptive Management of Multi-Agent Intelligent System: Algorithmic Aspect. *Science and Technique*. 24 (3), 167–180. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-3-167-180> (in Russian)

Введение

Значительное число систем технического назначения относится к категории эргатических логико-технических конструкций с развитой пространственно-распределенной структурой [1]. Каналы передачи вещества, энергии и информации в таких системах позволяют проводить объединение и организовывать функциональное взаимодействие разнородных механических, электротехнических, электронных, программных и информационных системных компонентов. Конструктивно указанные компоненты систем могут размещаться как в стационарных, так и в подвижных (мобильных) объектах космического, воздушного, наземного, надводного и подводного базирования [2]. Создание условий для самостоятельного функционирования подобных объектов при одновременной концентрации их усилий на решении заданного множества системных задач на основе единого замысла дает возможность рассматривать эти объекты в качестве автономных исполнительных элементов систем с мультиагентной архитектурой.

Потребность в насыщении мультиагентных систем средствами интеллектуализации с целью обеспечения их целенаправленного функционирования и эффективного применения предполагает сохранение и расширение области активного участия системных аналити-

ков, инженеров-системотехников в организации и построении системных процессов. Использование интеллекта этих специалистов, как правило, связывается с необходимостью обеспечения деятельности органов управления на стадиях, объективно требующих сложного логического смысловозначительного анализа, который слабо поддается формализации. Прежде всего, рассматриваются стадии структурно-функциональной декомпозиции системы и ее задач, выделения или формирования необходимых группировок агентов, проведения предварительных материально-технических и штурманских расчетов в условиях ряда неопределенностей и возможных конфликтов, выполнения процедур системного администрирования и оперативного контроля работоспособности составных частей системы.

Опубликованные в научно-технических источниках результаты большинства исследований различных аспектов создания и использования мультиагентных систем и технологий управления агентами и их группами, как правило, представляют собой укрупненное и схематичное изложение тематических материалов [3–8]. Некоторые научные публикации, напротив, ориентированы на изложение конкретных частных вопросов разработки и обеспечения процессов функционирования отдельных компонентов системы [9, 10]. В таких публикациях чаще всего обсуждаются общие

положения централизованных, децентрализованных и комбинированных методов управления, группирование агентов системы в пространственные построения типа «фронт», «пеленг», «клин», использование конфигураций типа «рой», сохранение порядка следования объектов в группах, назначение лидеров и распределение работ между агентами, проведение штурманских расчетов, введение стоимостных ограничений.

В силу сложности и существенного многообразия вариантов построения и использования систем с мехатронными и программными агентами опубликованные сведения не позволяют с необходимой полнотой и глубиной представить комплексные варианты структурного построения систем и сформулировать общие принципы выбора оптимальных системных конфигураций. Они не дают возможности обеспечить применение наиболее рациональных схем передачи управленческой информации, а также построить процессы эффективной координации и синхронизации взаимодействия системных компонентов. Таким образом, материалы научно-технических источников, по сути, не позволяют представить целостную картину построения и организации процесса функционирования сложных мультиагентных образований. С учетом изложенного выше в настоящей работе рассмотрены особенности типовой структуры и топологических решений мультиагентных систем, а также практические алгоритмы организации адаптивного управления действиями исполнительных агентов. При изложении содержательной части указанных вопросов использованы методы вербального и графического отображения пошаговой реализации процедур, которые предусматриваются соответствующими алгоритмами управления.

Концепция структурного и информационного построения мультиагентной интеллектуальной системы

Сопоставление различных вариантов структурного построения мультиагентных систем с учетом гибкости управления, возможностей по функциональному резервированию компонентов и их реконфигурированию позволяет

выделить и рекомендовать к широкому применению логическую сетевую структуру с многоуровневой древовидной топологией. Указанное топологическое построение системы не ограничивает на физическом уровне возможностей по использованию того или иного вида пространственного строя исполнительных агентов. В качестве узлов сети рассматривается орган управления системой – объект планирования и контроля результативности действий системы, а также органы управления агентами сегментов топологии – объекты планирования и контроля результативности действий исполнительных агентов (ОПКРДА). Эти объекты играют роль логических лидеров многоагентной системы и ее сегментов. В мультиагентных системах с многоуровневой древовидной топологией в подчинении объекта контроля системы обычно находятся объекты контроля агентов. В свою очередь, в подчинении объекта контроля агента некоторого уровня (ранга) находятся группы исполнительных агентов определенной функциональной ориентации, но могут вводиться также иные объекты контроля агентов вместе с подключенными к ним группами исполнительных агентов более низких рангов.

Независимо от функционального назначения системы наличие физического объекта контроля системы является обязательным; он может непосредственно входить в структуру системы или может быть вынесен за ее пределы. При этом он дистанционно выполняет необходимые логические и управленческие действия, создавая эффект работы «без центрального объекта – лидера системы». Такими возможностями обладает также объект контроля агентов, но при этом его функции должен принимать на себя объект контроля системы, создавая эффект работы всех или отдельных сегментов «без лидирующего объекта сегмента». В состав сегментов системы могут вводиться исполнительные агенты с расширенными функциями, которые позволяют оперативно акцептировать обязанности лидеров.

Схема возможного конфигурирования составных частей мультиагентной системы показана на рис. 1. Приведенный вариант построения системы обладает определенной универсальностью, поскольку он с помощью инсталляционных данных и оперативного кон-

фигурирования предоставляет возможность задавать требуемое количество сегментов, гибко изменять масштабы каждого сегмента топологии и переходить от централизованного режима управления к децентрализованному режиму.

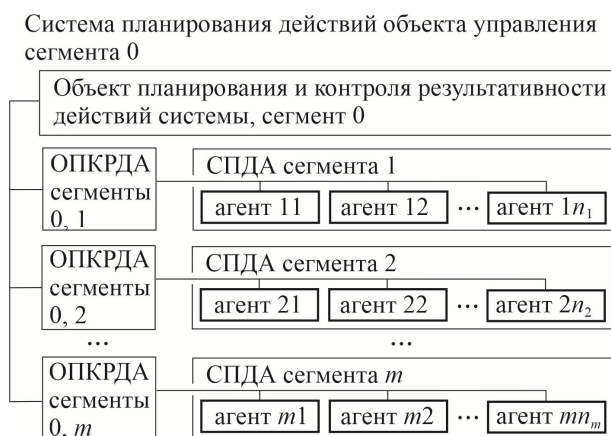


Рис. 1. Схема конфигурирования составных частей мультиагентной системы

Fig. 1. Configuration scheme of the components of a multi-agent system

В мультиагентных системах состав органов управления и исполнительных агентов на период выполнения запланированного комплекса работ с определенной номенклатурой и объемами обычно консервируется. В некоторых проектах (в основном научно-исследовательского предназначения) допускается применение принципа динамического пополнения состава агентов и объема решаемых задач по указанию должностных лиц органов управления.

Для организации взаимодействия объектов контроля системы с объектами контроля агентов целесообразно использовать выделенную сеть передачи данных между объектами управления с шинной топологией и методом множественного доступа с проверкой сигналов несущей частоты. Группы исполнительных агентов любого ранга в свою очередь объединяются в сегменты с помощью индивидуальных сетей передачи данных между агентами (СПДА), для которых также предпочтительны шинная топология построения и множественный доступ.

Обмен информацией по внутрисистемным сетям наиболее эффективно осуществляется в циркулярном (широковещательном) режиме. В данном случае отправители в границах сегмента выполняют однократную передачу каж-

дого блока данных, при этом информацию получают одновременно все объекты и агенты этого сегмента без автоматической выработки подтверждений фактов получения. Это наиболее скоростной режим информационного взаимодействия агентов, который необходим для корректной самоорганизации системы. Следует отметить, что при такой организации информационного обмена сетевые задержки существенно зависят не только от интенсивностей потоков данных, передаваемых по сети, но и от количества объектов и агентов в сегментах системы.

Анализ результатов проведенных исследований показывает, что при количестве объектов и агентов в пределах одного сегмента не более 5, коэффициенте загрузки канала на уровне 0,75 и номинальной скорости передачи информации по каналам внутрисегментных сетей 16 кбит/с задержка в доставке блока данных объемом 512 бит в пределах одного сегмента составляет около 48 с [11, 12]. При сохранении коэффициента загрузки канала на том же уровне увеличение количества объектов и агентов в составе сегмента до 10 приводит к увеличению этих задержек до 54 с. Если общее количество активных объектов и агентов сети превосходит некоторое критическое значение, то задержки в передаче информации могут неограниченно возрастать вплоть до потери системой работоспособности при полной исправности ее технических и программных средств (сеть переходит в режим информационной перегрузки).

Для обеспечения требуемых уровней достоверности передачи оперативных сведений между объектами и агентами при отсутствии решающей обратной связи нужны специальный подбор и реализация эффективных методов избыточного помехоустойчивого кодирования. Это особенно важно для обеспечения дистанционного взаимодействия составных частей системы на радиоканалах низкого качества в условиях помех, при относительно высоких скоростях битовых ошибок на уровнях $10^{-2} - 5 \cdot 10^{-3}$ и ожидаемой кратности 3–4 ошибки на один блок данных объемом 512 бит. Среди блочных кодов для применения во внутрисистемных сетях следует, прежде всего, выделить циклические коды Боуза – Чоудхури – Хоквингема и их

важнейшее подмножество – коды Рида – Соломона [13, 14].

Внутри физически обособленных объектов и агентов, где протяженность магистральных высококачественных линий связи составляет несколько метров при скоростях ошибок 10^{-6} – 10^{-8} , в ряде случаев оказывается достаточным применение кодов Хэмминга с корректировкой однократных ошибок [15]. При выборе систем помехоустойчивого кодирования следует учитывать позитивное влияние уровня избыточности на способность кода к выявлению и корректировке кратных ошибок, а также негативное влияние этого уровня на эффективную скорость передачи данных по сегментным сетям. В такой ситуации необходим поиск компромиссного решения, которое в большинстве случаев может быть найдено только при повышении номинальной скорости канальной передачи информации, которая имеет свои пределы.

Практическое создание и опыт эксплуатации систем с многограновой топологией позволяют сделать заключение о нежелательности введения в их структуру сетей с рангами выше 3, поскольку при этом с образованием каждого последующего уровня наблюдается естественное, причем крайне быстрое нарастание задержек распространения сведений между органами управления и агентами. В состав объектов и агентов системы целесообразно ввести средства натурной оценки фактических показателей качества каналов связи и механизмы организации соответствующей адаптивной перенастройки параметров помехоустойчивого кодирования при подготовке системы к работе. Необходимо предусмотреть также возможность одновременного функционирования объектов контроля агентов в нескольких сегментах топологии на каналах разного качества с применением различных помехоустойчивых кодов.

В системах с повышенной ответственностью каналы передачи данных подвергаются криптографической защите или, по крайней мере, скремблированию с целью предотвращения компрометации управления и защиты от навязывания ложной информации. При этом всем объектам, агентам и сегментам присваиваются системные идентификационные номе-

ра (адреса). Поскольку общих правил назначения идентификационных номеров не имеется, в каждой системе могут использоваться различные принципы их формирования.

В практическом плане представляет интерес реализация адаптивных циклов централизованного или децентрализованного управления действиями агентов. Организация адаптивного управления требует формализованного отображения в объектах и агентах системы определенных сегментов системной топологии, а также состояний внешней среды, органов планирования, агентов системы и каналов обеспечения информационно-технического взаимодействия. Рациональным приемом такого отображения является построение системными аналитиками и инженерами-системотехниками журнала состава системы и его фрагментированных копий в виде логико-множественных отношений [1]. Указанные отношения связывают различные типы объектов и агентов с их характеристиками, параметрами и состояниями работоспособности. С этой целью эффективно используется набор доменов, атрибуты которых принимают следующие статические и динамические значения:

⟨Номер сегмента системной топологии, к которой принадлежит объект⟩,

⟨Признак системы помехоустойчивого кодирования⟩,

⟨Идентификатор типа объекта⟩,

⟨Номер объекта⟩,

⟨Номер объекта – владельца рассматриваемого отношения как информационного ресурса⟩,

⟨Дата регистрации сведений⟩,

⟨Дата последнего обновления сведений⟩,

⟨Время последнего обновления сведений⟩,

⟨Обобщенный признак работоспособности объекта⟩,

⟨Признак работоспособности канала информационно-технического взаимодействия объекта с объектом – владельцем рассматриваемого отношения⟩,

〈Дата последнего обновления признака работоспособности канала〉,

〈Время последнего обновления признака работоспособности канала〉,

〈Атрибуты индивидуальных характеристик объекта〉.

В сегменте 0 («ноль») топологии в качестве объекта – владельца рассматриваемого отношения как информационного ресурса выступает элемент с идентификатором «объект контроля системы», а в остальных сегментах – элементы с идентификатором «объект контроля агента». В одноранговых системах применяется только один элемент управления – объект контроля системы, с которым непосредственно взаимодействуют исполнительные агенты по сети. Очевидно, что возможны и иные схемы конфигурирования мультиагентной системы, но все они должны допускать отображение в виде журнала состава системы.

Домен 〈Атрибуты индивидуальных характеристик объекта〉 является факультативным и в кортеж отношений может не вводиться. При необходимости он может подвергаться конкретизации и расщеплению на составные части. Например, предусматриваются дополнительные домены для отображения признаков применяемых координат пространственного местоположения объектов или агентов (географических, местных, прямоугольных, полярных), а также для непосредственного задания текущих и прогнозируемых значений координат и координатных скоростей, указания характера действий.

Реальные мультиагентные системы переработки вещества, энергии и информации в большинстве своем ориентируются на решение задач с материальными или с логическими результатами, которые имеют необходимую смысловую направленность (системное предназначение) и задаются соответствующими исходными функционально-техническими требованиями. Здесь под задачами понимаются проблемные ситуации с явно заданным результатом, который необходимо получить, или с явно заданной целью, которая должна быть

достигнута. Отдельные задачи выделяются и формулируются системными аналитиками в процессе обоснования декомпозиции важнейших системных функций с последующим приведением каждой задачи к атомарному виду и закреплением возможности решения за определенными объектами управления или за исполнительными агентами. Объекты планирования и контроля результативности действий системы и агентов ориентируются преимущественно на решение управленческих задач с логическими результатами.

Задачи атомарного вида обладают свойством материальной и информационной «монологичности», то есть способностью к автономному решению в отрыве от других задач в объеме функционального комплекса системы. В системах любого типа и назначения решение атомарных задач с материальными или логическими результатами приводит к реализации определенных системных функций. При этом сложные функции могут потребовать решения групп определенных атомарных задач. Каждую задачу в процессе создания системы целесообразно сопровождать индивидуальными характеристиками ее типа в виде набора выполняемых системных функций, экспертных оценок системной важности (значимости), относительного приоритета, сложности решения и объемов необходимых работ. От совокупности решаемых задач зависит состав, параметры и характеристики всех функциональных элементов многоагентных систем.

Задачи выступают в качестве логических классификационных кластеров, которые подлежат конкретному наполнению как при подготовке системы к функционированию, так и в процессе ее работы. В логическом и материальном смысле отдельные экземпляры атомарных задач представляют собой самостоятельные единицы работы компонентов многоагентных систем и объединяются в общесистемные журналы функционирования сегментов топологии. Общесистемные журналы размещаются в объектах контроля систем и агентов. В исполнительных агентах сегментов располагаются фрагментированные копии соответствующих

общесистемных журналов, которым присваивается статус индивидуальных.

Рациональным и достаточно гибким подходом к формированию общесистемных журналов функционирования является принятие системными аналитиками следующих исходных положений: о допустимости введения в один общесистемный журнал экземпляров задач различного типа; о представлении журнала в виде динамического логико-множественного отношения. Кортежи такого отношения могут быть построены на наборе следующих доменов:

⟨Идентификатор типа задачи⟩, ⟨Идентификатор экземпляра задачи⟩, ⟨Относительный приоритет⟩,

⟨Список номеров агентов, за которыми может закрепляться решение экземпляра задачи⟩,

⟨Номер агента, за которым фактически закрепляется решение экземпляра задачи⟩,

⟨Фактическое время начала решения задачи⟩,

⟨Признак и значение планируемого или фактического времени завершения решения задачи⟩,

⟨Атрибуты индивидуальных характеристик экземпляра задачи⟩.

Домен *⟨Атрибуты индивидуальных характеристик экземпляра задачи⟩* может быть расщеплен на более мелкие составляющие, если этого требуют особенности обработки кортежа отношения функционирования агентов.

В любой момент времени тот или иной агент ориентируется на обработку только одного кортежа рассматриваемого отношения, то есть на решение одного экземпляра конкретной задачи индивидуального журнала. Выбор агентом последующего кортежа отношения выполняется с учетом относительного приоритета нового задания, причем без прерывания обработки задачи текущего кортежа и только после ее полного завершения.

Построение логико-динамических отношений состава системы и отношений функционирования агентов, а также их взаимное согласование для всех структурных компонентов завершает стадию начального планирования

работы мультиагентной системы. Определенная часть доменов наполняется условно-постоянными значениями атрибутов. К таким доменам относятся:

⟨Номер сегмента системной топологии, к которой принадлежит объект⟩,

⟨Идентификатор типа объекта⟩, ⟨Номер объекта⟩,

⟨Номер объекта – владельца отношения как информационного ресурса⟩,

⟨Идентификатор типа задачи⟩, ⟨Идентификатор экземпляра задачи⟩, ⟨Относительный приоритет⟩,

⟨Номера агентов, за которыми может закрепляться решение экземпляра задачи⟩.

Домен *⟨Номер агента, за которым фактически закрепляется решение экземпляра задачи⟩* наполняется в органе управления условно-постоянными значениями только при централизованной схеме управления мультиагентной средой. В схеме децентрализованного управления этот домен наполняется динамической информацией непосредственно в процессе функционирования агентов, остальные домены отношений наполняются исключительно динамическими данными.

Режим начальной инсталляции и запуска функционирования мультиагентной системы

Эффективное функционирование мультиагентной системы требует организации в ее объектах и агентах ряда пространственно разделенных и параллельно развивающихся во времени технических и программных процессов. По составу операций и временным диаграммам информационного и материально-энергетического обмена между составными частями системы все ее сегменты эквивалентны. При этом в сегменте 0 («ноль») роль лидирующего элемента выполняет объект контроля системы, а функции подчиненных элементов возложены на объекты контроля агентов. В остальных сегментах в этих целях используются соответственно объекты контроля агентов и исполнительные агенты.

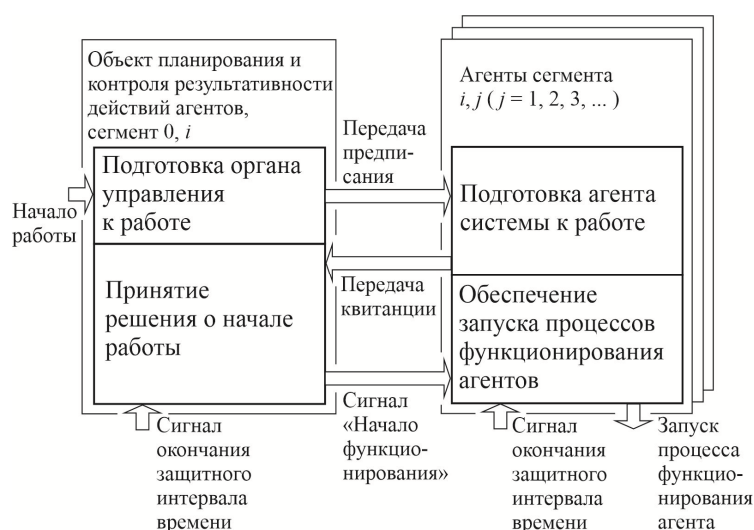


Рис. 2. Схема начальной инсталляции и запуска процессов штатного функционирования одного сегмента топологии мультиагентной системы

Fig. 2. Diagram of initial installation and launch of processes of regular operation of one segment of the topology of a multi-agent system

Вербальная и графическая форма представления алгоритмов позволяет отобразить пошаговые действия, которые должны выполняться органами управления и агентами сегментов системы. Предполагается, что системными специалистами все необходимые отношения и диаграммы взаимодействия разработаны заблаговременно. Следует отметить, что на логическом уровне (то есть в отношениях) предусматривается возможность введения в сегменты системы реальных резервных объектов управления и резервных агентов.

Схема начальной инсталляции и запуска процессов штатного функционирования сегмента топологии мультиагентной системы представлена на рис. 2. Конкретные функции системы по начальной инсталляции исполнительных агентов изложены в табл. 1.

Таблица 1

Функции системы по начальной инсталляции исполнительных агентов

Functions of the system for the initial installation of executive agents

Компонент системы	Функциональный модуль	Функция компонентов многоагентной системы
Объект планирования и контроля результативности действий исполнительных агентов (сегмент 0, j)	Модуль подготовки органа управления к работе	Подготовка технических и программных средств органа управления системы к работе. Прием и усечение копии журнала состава сегмента топологии с номером i , а также копии общесистемного журнала функционирования. Передача агентам в циркулярном режиме предписания на инсталляцию и установку индивидуальных журналов функционирования. Установка в органе управления защитного интервала времени ΔT_3 . Переход в режим ожидания поступления последующих активизирующих сигналов
	Модуль принятия решения о начале штатного функционирования	Прием квитанции – подтверждения от агента и ее фиксация в кортеже агента по журналу состава сегмента. Переход в режим ожидания поступления последующих активизирующих сигналов. Проверка поступлений квитанций – подтверждений от агентов системы и оценка полноты поступлений. Принятие решения о позитивном завершении инсталляции (при поступлении за защитный интервал времени квитанций 90–95 % от общего количества агентов системы). Передача агентам в циркулярном режиме сигнала начала штатного функционирования. Переход в режим ожидания поступления последующих активизирующих сигналов. Принятие решения о негативном завершении инсталляции (при уровне поступления квитанций ниже 90–95 % от общего количества агентов системы за защитный интервал времени). Отработка протоколов функционирования системы и агентов в особых (специальных) ситуациях

Окончание табл. 1

End of Table 1

Компонент системы	Функциональный модуль	Функция компонентов многоагентной системы
Исполнительные агенты сегмента i, j	Модуль подготовки агента системы к работе	Подготовка технических и программных средств агента системы к работе. Переход в режим ожидания активизирующих сигналов. Прием предписания, формирование и установка индивидуального журнала функционирования агента. Передача квитанции – подтверждения в орган управления и в другие агенты сегмента i . Установка интервала времени ожидания сигнала начала штатного функционирования ΔT_n . Переход в режим ожидания поступления последующих активизирующих сигналов
	Модуль запуска процессов функционирования агента	Прием сигнала начала штатного функционирования от органа управления. Отработка протокола функционирования агента в особых (специальных) ситуациях (при отсутствии факта поступления сигнала начала работы за интервал времени ΔT_n). Обеспечение запуска процессов штатного функционирования агента (при поступлении сигнала начала штатного функционирования за интервал времени ΔT_n)

Информационное взаимодействие объектов и агентов системы предполагает движение по ее сетям информационных блоков в виде предписаний, докладов, запросов, справок, квитанций и подтверждений. Регистрация фактов передачи и приема указанных информационных блоков с одновременным контролем времени реализации этих событий позволяет сформировать полноценное отображение в системе информационной связности ее объектов и агентов. При этом относительно жесткие требования к интервалам времени обработки информации ограничивают возможность применения в вычислительном оборудовании развитых языковых средств манипулирования данными и их конструкциями.

Непосредственно перед началом работы объекты контроля действий системы и ее компонентов выполняют нисходящую по рангам иерархии («сверху вниз») процедуру инсталляции сегментов топологии и соответствующих им агентов с целью корректной организационно-технической консолидации их усилий. С помощью информационных блоков – предписаний как административных документов обязательного исполнения из объекта контроля системы в каждый подчиненный объект контроля агента и далее к агентам соответствующих сегментов направляются и вводятся в их блоки памяти полные или фрагментированные (усеченные по составу кортежей) копии журна-

ла состава сегмента топологии и общесистемного журнала функционирования агентов. Эти копии строго соответствуют сегменту топологии и имеют статус индивидуальных журналов.

Промежуточные объекты контроля агентов по мере нисходящей передачи копий журналов по рангам топологии от исходного объекта контроля системы к требуемым конечным исполнителям агентам в пределах каждого подчиненного сегмента подвергают эти копии соответствующему смысловому и объемному усечению. После передачи из органа управления предписания на установку индивидуальных журналов функционирования агентов в соответствующих органах контроля агентов назначается защитный интервал времени ΔT_z ожидания поступления ответных организационно-технических квитанций – подтверждений готовности агентов к системной работе.

После получения исполнителем агентом от органа управления предписания на формирование индивидуальных журналов и их установку в блоке памяти агент проводит передачу по системной сети в циркулярном режиме служебной квитанции – подтверждения органу управления и остальным агентам сегмента системы. Агент назначает интервал времени ΔT_n ожидания от органа управления сигнала начала работы и переходит в режим ожидания.

В мультиагентных системах процессы движения смысловой и служебной информации позволяют рассматривать их в качестве средств функционального контроля связности объектов и агентов. Результаты этого контроля целесообразно отображать в доменах отношений состава сегментов:

⟨Признак работоспособности канала информационно-технического взаимодействия объекта с объектом – владельцем рассматриваемого отношения⟩,

⟨Дата последнего обновления признака работоспособности канала⟩,

⟨Время последнего обновления признака работоспособности канала⟩.

Истечение защитного интервала времени ΔT_3 позволяет органу управления принять решение о позитивном исходе инсталляции и о начале системной работы, если в течение защитного интервала времени ответные квитанции поступили не менее чем от 90–95 % агентов сегмента. Решение органа управления о позитивном исходе инсталляции сопровождается

передачей в циркулярном режиме агентам системы сигнала о начале работы. При негативном исходе инсталляции продолжение и характер системной деятельности органа управления и агентов определяется специальными документами, учитывающими особенности предназначения системы и мнения экспертов.

Режим штатного функционирования органа управления и агентов системы

При поступлении сигнала о начале работы исполнительный агент системы начинает функционировать. Если в течение защитного интервала времени указанный сигнал не получен, то продолжение системной работы агента определяется специальными инструктивными документами, которые составлены экспертами и учитывают характерные особенности системы. Схема штатного функционирования органа управления и агентов сегмента топологии мультиагентной системы приведена на рис. 3. Основные функции системы по управлению действиями исполнительных агентов представлены в табл. 2.



Рис. 3. Схема организации штатного функционирования органа управления и агентов сегмента топологии мультиагентной системы

Fig. 3. Organizational scheme of the regular functioning of the management body and agents of the topology segment of the multi-agent system

Таблица 2

Функции системы по управлению действиями исполнительных агентов
Functions of the system for managing the actions of executive agents

Компонент системы	Функциональный модуль	Функции компонентов многоагентной системы
Объект планирования и контроля результативности действий исполнительных агентов (сегмент 0, j)	Модуль установки интервала времени контроля	Установка интервала времени ΔT_k периодического контроля состояния системного журнала. Переход в режим ожидания поступления последующих активизирующих сигналов
	Модуль обработки информации о решении задачи	Прием оповещения. Идентификация оповещения. Обработка информации о начале или о завершении решения экземпляра задачи (при результативной идентификации оповещения). Переход в режим ожидания поступления последующих активизирующих сигналов. Отработка протокола функционирования органа управления в особых (специальных) ситуациях (при отсутствии результатов идентификации оповещения)
	Модуль выявления задержки обработки заданий	Контроль кортежей отношения системного журнала, выявление и обработка фактов задержки агентами процессов обработки заданий с превышением установленного предела длительности выполнения работ. Переход в режим ожидания поступления последующих активизирующих сигналов
Исполнительные агенты сегмента i, j	Модуль обработки заданий исполнительным механизмом	Установка интервала времени ΔT_k периодического контроля состояния индивидуальной копии журнала функционирования. Оперативное сканирование индивидуального журнала функционирования и отбор по определенным условиям кортежа очередного задания для обеспечения последующего решения экземпляра задачи. Назначение верхней границы интервала времени ΔT_p ожидания выполнения работы и расчет предельного значения времени планируемого завершения решения задачи. Заполнение в отобранном кортеже полей доменов виртуальными параметрами. Передача по сети сегмента в циркулярном режиме оповещения о начале обработки задания агентом сегмента. Обработка задания с помощью исполнительных механизмов агента, которые выполняют целенаправленные действия и обеспечивают решение конкретного экземпляра задачи. Передача по сегментной сети в циркулярном режиме оповещения о завершении обработки задания агентом сегмента
	Модуль обработки информации о решении задачи	Прием оповещения. Идентификация оповещения. Обработка информации о начале или о завершении решения экземпляра задачи (при результативной идентификации оповещения). Переход в режим ожидания поступления последующих активизирующих сигналов. Отработка протокола функционирования агента системы в особых (специальных) ситуациях (при отсутствии результатов идентификации оповещения)
	Модуль выявления задержки обработки заданий	Контроль кортежей отношения в копии системного журнала функционирования, выявление и обработка фактов задержки агентами процессов выполнения заданий с выходом значений их длительности за установленные пределы. Переход в режим ожидания поступления последующих активизирующих сигналов

Начало штатного функционирования исполнительного агента предполагает, что после поступления сигнала начала работы в нем выполняется установка интервала времени ΔT_k

периодического запуска процесса контроля состояний индивидуальных копий журналов функционирования. Аналогичный процесс контроля состояний общесистемного журнала

функционирования запускается также в органах управления, но в отличие от агентов системы орган управления после запуска процесса контроля переходит в режим ожидания.

Функционирование исполнительного агента организуется на основе циклического выполнения определенных системных процессов. Каждый цикл основывается на результатах оперативного сканирования индивидуального журнала и отбора из отношения кортежа очередного задания для обеспечения последующего решения экземпляра поставленной задачи. Условия отбора задаются следующими параметрами фильтрации:

- экземпляр задачи не должен быть охвачен рабочими действиями иных агентов системы и не должен иметь значение «пусто» в поле домена *⟨Номер агента, за которым фактически закрепляется решение экземпляра задачи⟩*;

- номер агента должен находиться в списке поля домена *⟨Номера агентов, за которыми может закрепляться решение экземпляра задачи⟩*;

- поле домена *⟨Относительный приоритет⟩* должно иметь наибольшее числовое значение среди экземпляров задач, не охваченных рабочими действиями агентов системы.

Если указанным условиям фильтрации соответствуют несколько кортежей с одинаковыми значениями приоритета, то отбирается задание, которое ближе всего расположено к началу журнала. Возможны также иные решающие правила, которые назначаются системными аналитиками.

В зависимости от значений атрибутов в поле *⟨Атрибуты индивидуальных характеристик экземпляра задачи⟩* отобранного кортежа агент назначает верхнюю границу интервала времени ожидания выполнения работы ΔT_p и рассчитывает предельное значение времени планируемого завершения решения задачи. В отобранном кортеже производится заполнение полей доменов *⟨Номер агента, за которым фактически закрепляется решение экземпляра задачи⟩*, *⟨Фактическое время начала решения задачи⟩*. В поле следующих доменов вводятся определенные виртуальные параметры: *⟨Признак и значение планируемого или фактического времени завершения решения*

задачи⟩ = ПЛАН, *⟨Фактическое время начала решения задачи⟩* + ΔT_p .

Исполнительный агент производит передачу по системной сети в циркулярном режиме оповещения о начале обработки задания, которое принимается органом управления i -м сегментом и агентами сегмента. В основной части оповещения размещаются значения полей указанных динамических доменов, а также значения статических доменов *⟨Идентификатор типа задачи⟩*, *⟨Идентификатор экземпляра задачи⟩*.

Обработка задания реализуется с помощью исполнительных механизмов агента, которые выполняют целенаправленные действия и обеспечивают решение конкретного экземпляра задачи. После завершения обработки задания агент производит передачу по системной сети в циркулярном режиме оповещения, которое принимается органом управления и агентами сегмента. В оповещении размещаются значения статических доменов *⟨Идентификатор типа задачи⟩*, *⟨Идентификатор экземпляра задачи⟩*, а также признак ФАКТ и текущее значение времени в домене *⟨Признак и значение планируемого или фактического времени завершения решения задачи⟩*.

При поступлении в орган управления или к агенту сегмента очередного оповещения получатель информации организует процесс ее обработки. Для поиска требуемого экземпляра задачи в журнале функционирования органа управления или в индивидуальных копиях агентов сегмента в качестве ключевых атрибутов применяются значения статических доменов *⟨Идентификатор типа задачи⟩*, *⟨Идентификатор экземпляра задачи⟩*. В этом случае в идентифицированном кортеже общесистемного или индивидуального журналов модифицируются следующие значения определенных доменов:

- если обрабатывается оповещение о начале процесса решения задачи, то в операциях участвуют домены *⟨Номер агента, за которым фактически закрепляется решение экземпляра задачи⟩*, *⟨Фактическое время начала решения задачи⟩*, *⟨Признак и значение планируемого или фактического времени завершения решения задачи⟩*;

- при обработке оповещения о завершении процесса решения задачи в операциях участвует только домен *⟨Признак и значение планируемого или фактического времени завершения решения задачи⟩*.

В процессе работы системы могут возникать ошибочные ситуации, в которых по ключевым атрибутам кортеж идентифицировать не удастся. В этих случаях неопознанные оповещения целесообразно блокировать или подавлять принудительно.

При завершении в органе управления или в каком-либо из агентов очередного интервала времени контроля журнала функционирования осуществляется запуск процесса анализа журнала. При этом выбираются кортежи, соответствующие экземплярам задач, которые на текущий момент времени охвачены процессами обработки со стороны мультиагентной среды. Если для этих кортежей признаки в доменах *⟨Признак и значение планируемого или фактического времени завершения решения задачи⟩* соответствуют значениям ПЛАН, то длительность указанного промежутка времени в поле домена должно превосходить его текущее значение. Данное условие указывает на допустимость дальнейшей обработки задания назначенным агентом. В противном случае выявляется особая ситуация, в которой продолжение системной деятельности агента определяется специальным образом, что учитывается в процессе построения системы. В простейшем случае обработка задания может быть заблокирована простановкой в рассматриваемом домене значения признака БЛОК и текущего значения времени.

При «свободном» состоянии активных ресурсов некоторого агента системы после завершения процесса решения очередной задачи (как и после формирования индивидуальной копии журнала его функционирования) выполняется информирование об этом факте всех компонентов соответствующего сегмента системы. Это достигается с помощью специального оповещения в циркулярном режиме передачи; тем самым обеспечивается самосинхронизация и адаптивный выбор работ агентами системы в пределах каждого сегмента топологии.

В идеальном варианте работы мультиагентной системы в объектах и агентах каждого ее сегмента синхронно ведутся индивидуальные копии журнала функционирования, которые являются информационной основой корректной работы каждого агента и адаптивного управления мультиагентной средой в целом. Следует

отметить, что для мультиагентных систем большое значение имеет служба единого времени, которая должна охватывать все объекты и агенты системы. С этой целью может быть использована частотно-стабилизированная схема выработки и передачи по сетям сигналов меток времени.

ВЫВОДЫ

1. Проведено сопоставление основных вариантов структурного построения мультиагентной системы с учетом гибкости управления, возможностей по функциональному резервированию ее компонентов и их реконфигурированию, что позволило выделить и рекомендовать к применению древовидную сетевую топологию. В качестве узлов топологии введены объекты планирования и контроля результативности действий исполнительных агентов, а также объект планирования и контроля результативности действий системы.

2. Показано, что для организации адаптивного управления требуется формализованное отображение в объектах и агентах системы определенных сегментов системной топологии, а также состояний внешней среды, органов планирования, агентов системы, каналов обеспечения информационно-технического взаимодействия и функциональных задач. Рациональным приемом такого отображения является построение журналов состава системы, состава сегментов топологии и журналов функционирования агентов в виде логикомножественных отношений.

3. Представлена принципиальная возможность определения рационального состава доменов отношений, который допускает функциональное расширение. Описан алгоритм работы многоагентной системы, в котором каждый цикл основывается на результатах оперативного сканирования индивидуальных журналов состава агентов и их функционирования, а также отбора из отношений кортежей очередных заданий для обеспечения последующего решения определенного экземпляра задачи. С помощью специальных оповещений в циркулярном режиме передачи обеспечиваются самосинхронизация и адаптивный выбор работ агентами системы в пределах каждого сегмента топологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гулай, А. В. Конвергенция интеллектуальных систем / А. В. Гулай, В. М. Зайцев. Минск: ИВЦ Минфина, 2020. 384 с.

2. Зайцев, В. М. Организация распределенной обработки данных на вычислительных комплексах АСУ / В. М. Зайцев // Вопросы радиоэлектроники. Сер. общетехническая. 1982. Вып. 10. С. 26–32.
3. Городецкий, В. И. Многоагентные системы (обзор) / В. И. Городецкий, М. С. Грушинский, А. В. Хабалов // Новости искусственного интеллекта. 1998. № 2. С. 64–116.
4. Карпов, В. Э. Модели социального поведения в групповой робототехнике / В. Э. Карпов // Управление большими системами. 2016. Вып. 59. С. 165–232.
5. Тарасов, В. Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям / В. Б. Тарасов. М.: Эдиториал УРСС, 2002. 352 с.
6. Guessoum, Z. Towards Reliable Multi-Agent System: An Adaptive Replication Mechanism / Z. Guessoum, J.-P. Briot, N. Faci, O. Martin // Multiagent and Grid Systems. 2010. Vol. 6, No 1. P. 1–24. <https://doi.org/10.3233/mgs-2010-0139>.
7. Hübner, J. F. A Normative Programming Language for Multi-Agent Organizations / J. F. Hübner, O. Boissier, R. H. Bordini // Annals of Mathematics and Artificial Intelligence. 2011. Vol. 62, No 1–2. P. 27–53. <https://doi.org/10.1007/s10472-011-9251-0>.
8. Boissier, O. Dimensions in Programming Multi-Agent Systems / O. Boissier, R. H. Bordini, J. F. Hübner, A. Ricci // Knowledge Engineering Review. 2019. Vol. 34, No 2. P. 1–28. <https://doi.org/10.1017/s026988891800005x>.
9. Ерофеева, В. А. Управление роем динамических объектов на базе мультиагентного подхода / В. А. Ерофеева, Ю. В. Иванский, В. И. Кияев // Компьютерные инструменты в образовании. 2015. № 6. С. 34–42.
10. Воробьев, В. В. Алгоритмы выбора лидера и кластеризации в статическом рое роботов / В. В. Воробьев // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18, № 3. С. 166–172. <https://doi.org/10.17587/mau.18.166-173>.
11. Зайцев, В. М. Явление интерференции в телекодированных сетях АСУ / В. М. Зайцев // Вопросы радиоэлектроники. Сер. общетехническая. 1981. Вып. 12. С. 35–41.
12. Зайцев, В. М. Определение параметров передачи данных на основе принципа информационной стабилизации / В. М. Зайцев // Вопросы радиоэлектроники. Сер. общетехническая. 1981. Вып. 12. С. 42–51.
13. Гулай, А. В. Достоверность передачи транзакций в мехатронных системах: выбор триплетов помехоустойчивого кода / А. В. Гулай, В. М. Зайцев // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17, № 1. С. 26–31. <https://doi.org/10.17587/mau.17.26-31>.
14. Гулай, А. В. Помехоустойчивые коды Рида–Соломона: применение в технологии построения интеллектуальных систем / А. В. Гулай, В. М. Зайцев // Актуальные вопросы развития современной науки и технологий: монография. Петрозаводск: МЦНП «Новая наука», 2023. С. 377–406.
15. Смит, С. Цифровая обработка сигналов / С. Смит. М.: Изд. дом «ДодЭка-XXI», 2008. 718 с.
2. Zaytsev V. M. (1982) Organization of Distributed Data Processing on Automated Control Systems. *Voprosy Radioelektroniki. Ser. Obshchetechnicheskaya* [Questions of Radio Electronics. General Technical Series], Iss. 10, 26–32 (in Russian).
3. Gorodetsky V. I., Grushinsky M. S., Khabalov A. V. (1998) Multi-Agent Systems (Review). *Novosti Iskusstvennogo Intellekta* [Artificial Intelligence News], (2), 64–116 (in Russian).
4. Karpov V. E. (2016) Models of Social Behavior in Group Robotics. *Upravlenie Bolshimi Sistemami* [Managing Large Systems], Iss. 59, 165–232 (in Russian).
5. Tarasov V. B. (2002) *From Multi-Agent Systems to Intelligent Organizations*. Moscow, Editorial URSS Publ. 352 (in Russian).
6. Guessoum Z., Briot J.-P., Faci N., Martin O. (2010) Towards Reliable Multi-Agent System: An Adaptive Replication Mechanism. *Multiagent and Grid Systems*, 6 (1), 1–24. <https://doi.org/10.3233/mgs-2010-0139>.
7. Hübner J. F., Boissier O., Bordini R. H. (2011) A Normative Programming Language for Multi-Agent Organizations. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, 62 (1), 27–53. <https://doi.org/10.1007/s10472-011-9251-0>.
8. Boissier O., Bordini R. H., Hübner J. F., Ricci A. (2019) Dimensions in Programming Multi-Agent Systems. *Knowledge Engineering Review*, 34 (2), 1–28. <https://doi.org/10.1017/s026988891800005x>.
9. Erofeeva V. A., Ivansky Yu. V., Kiyayev V. I. (2015) Control of A Swarm of Dynamic Objects Based on A Multi-Agent Approach. *Kompyuternye Instrumenty v Obrazovanii = Computer Tools in Education Journal*, (6), 34–42 (in Russian).
10. Vorobyov V. V. (2017) Leader Selection and Clusterization Algorithms in a Static Robot Swarm. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 18 (3), 166–173. <https://doi.org/10.17587/mau.18.166-173> (in Russian).
11. Zaytsev V. M. (1981) The Phenomenon of Interference in Automated Control Systems Telecode Networks. *Voprosy Radioelektroniki. Ser. obshchetechnicheskaya* [Questions of Radio Electronics. General Technical Series], Iss. 12, 35–41 (in Russian).
12. Zaytsev V. M. (1981) Determination of Data Transmission Parameters Based on the Principle of Information Stabilization. *Voprosy Radioelektroniki. Ser. Obshchetechnicheskaya* [Questions of Radio Electronics. General Technical Series], Iss. 12, 42–51 (in Russian).
13. Gulay A. V., Zaitsev V. M. (2016) Transmission Reliability of Transactions in Mechatronic Systems: Choice of Triplets for Noiseproof Code. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 17 (1), 26–31. <https://doi.org/10.17587/mau.17.26-31> (in Russian).
14. Gulay A. V., Zaitsev V. M. (2023) Reed-Solomon Error-Correcting Codes: Application in Intelligent Systems Technology. *Current Issues in the Development of Modern Science and Technology*. Petrozavodsk, Publishing House of International Center for Scientific Partnership “Novaya Nauka”, 377–406 (in Russian).
15. Smith S. (2008) *Digital Signal Processing*. Moscow, Dod-Eka-XXI Publ. 718 (in Russian).

Поступила 12.02.2025

Подписана в печать 15.04.2025

Опубликована онлайн 30.05.2025

REFERENCES

1. Gulay A. V., Zaytsev V. M. (2020) *Convergence of Intelligent Systems*. Minsk, Publishing House of Information and Computing Center of the Ministry of Finance. 384 (in Russian).

Received: 12.02.2025

Accepted: 15.04.2025

Published online: 30.05.2025