

ИЕРАРХИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ

О. Е. Безбородова

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
oxana243@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Повышение эффективности сбора и обработки данных необходимо для обеспечения гарантированной безотказной работы информационно-измерительных и управляющих систем. В данном случае речь идет об автоматизации процессов сбора и обработки данных, о максимально надежном хранении данных, о гарантированном постоянном доступе к ним и о возможности быстрой адаптации информационно-измерительных и управляющих систем к изменяющимся требованиям внешней среды. *Материалы и методы.* Рассмотрено решение задачи обеспечения эффективности работы синергетических информационно-измерительных и управляющих систем. Разработана структурная схема синергетической информационно-измерительной и управляющей системы на основе мультиагентных технологий и приведена декомпозиция целей. Для гетерогенной группы беспилотных воздушных судов, участвующей в поисково-спасательных работах в зоне чрезвычайной ситуации, предложены алгоритмы управления, основанные на использовании синергетического эффекта. Показано, что синергетический эффект заключается в совместном взаимодействии разноплановых беспилотных воздушных судов гетерогенной группы. Приведены расчеты и построены графы, иллюстрирующие работу гетерогенной группы беспилотных воздушных судов в нормальном режиме и при выходе из строя одного из беспилотных воздушных судов. Доказано, что за счет синергетического эффекта группа способна выполнить поставленную задачу. *Результаты.* Использование синергетического подхода в информационно-измерительных и управляющих системах на основе интеллектуального взаимодействия агентов мультиагентной системы позволяет сохранить эффективность проведения поисковых спасательных работ при выходе из строя беспилотного воздушного судна за счет нелинейной составляющей эффективности, возникающей из-за синергетического эффекта в системе. *Выводы.* Структурно-функциональная модель предложенной синергетической информационно-измерительной и управляющей системы характеризуется набором структурных элементов и их функциональным назначением, присущим большинству современных информационно-измерительных и управляющих систем, что делает ее инвариантной относительно области применения. Использование предлагаемой синергетической информационно-измерительной и управляющей системы для управления беспилотным воздушным судном в условиях чрезвычайной ситуации позволяет оптимизировать ресурсы за счет синергетического эффекта и достичь поставленной цели даже при выходе агента из строя, так как является восстанавливаемой и сохраняющей работоспособность при выходе из строя агента.

Ключевые слова: интеллектуальная информационно-измерительная и управляющая система, мультиагентная система, чрезвычайная ситуация, беспилотное воздушное судно

Для цитирования: Безбородова О. Е. Иерархическая структура мультиагентной системы // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 2. С. 29–38. doi:10.21685/2307-5538-2022-2-4

HIERARCHICAL STRUCTURE OF A MULTI-AGENT SYSTEM

O.E. Bezborodova

Penza State University, Penza, Russia
oxana243@yandex.ru

Abstract. *Background.* Improving the efficiency of data collection and processing is necessary to ensure guaranteed trouble-free operation of information-measuring and control systems. In this case, we are talking about the automation of data collection and processing processes, the most reliable data storage, guaranteed constant access to them, and the ability to quickly adapt information-measuring and control systems to changing environmental requirements. *Materials and methods.* The article considers the solution to the problem of ensuring the efficiency of synergetic information-measuring and control systems. A block diagram of a synergetic information-measuring and control system based on multi-agent technologies has been developed and a decomposition of goals has been given. For a heterogeneous group

of unmanned aerial vehicles involved in search and rescue operations in an emergency zone, control algorithms based on the use of a synergistic effect are proposed. It is shown that the synergistic effect lies in the joint interaction of diverse unmanned aerial vehicles of a heterogeneous group. Calculations are given and graphs are constructed illustrating the operation of a heterogeneous group of unmanned aircraft in normal mode and when one of the unmanned aircraft fails. It is proved that due to the synergistic effect, the group is able to complete the task. *Results.* The use of a synergistic approach in information-measuring and control systems based on the intelligent interaction of agents of a multi-agent system makes it possible to maintain the efficiency of search and rescue operations in the event of an unmanned aircraft failure due to the non-linear component of efficiency arising from the synergistic effect in the system. *Conclusions.* The structural-functional model of the proposed synergistic information-measuring and control system is characterized by a set of structural elements and their functional purpose inherent in most modern information-measuring and control systems, which makes it invariant with respect to the field of application. The use of the proposed synergistic information-measuring and control system for controlling an unmanned aerial vehicle in an emergency allows you to optimize resources due to the synergistic effect and achieve your goal even if the agent fails, as it is recoverable and remains operational when the agent fails.

Keywords: intelligent information-measuring and control system, multi-agent system, emergency, unmanned aerial vehicle

For citation: Bezborodova O.E. Hierarchical structure of a multi-agent system. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(2):29–38. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-2-4

Постановка проблемы

Повышение эффективности сбора и обработки данных необходимо для обеспечения гарантированной безотказной работы информационно-измерительных и управляющих систем (ИИУС). В данном случае речь идет об автоматизации процессов сбора и обработки данных, о максимально надежном хранении данных, о гарантированном постоянном доступе к ним и о возможности быстрой адаптации ИИУС к изменяющимся требованиям внешней среды.

В последние годы наблюдается рост интереса к междисциплинарному направлению – синергетике. Синергетические подходы и модели нашли широкое применение не только в философии, но и во многих отраслях науки: технике, социологии, педагогике, филологии и др. Основоположниками в этой предметной области являются Г. Хакен [1], И. Р. Пригожин [2], С. П. Курдюмов [3], Д. С. Чернавский [4], А. А. Самарский [5] и др.

Общим недостатком приведенных в специализированной литературе синергетических систем, посвященных решению задач управления процессами и объектами, является отсутствие описания технической реализации: описание алгоритмов функционирования приведено только на концептуальном уровне.

Синергетический подход к созданию систем управления строится на системных принципах, базовыми из которых являются взаимодействие и взаимозависимость системы и внешней среды, иерархичность структуры системы, целенаправленность деятельности, адаптивность к условиям внешней среды, самоорганизация, приоритет общих интересов системы, надежность.

Согласно свойству эмерджентности, совместное действие нескольких факторов почти всегда отличается от суммы отдельных эффектов. Именно это отличие, которое обычно называют эффектом синергии, фактором взаимодействия или кооперативным эффектом, является количественным выражением синергии.

Синергетический подход к проектированию систем управления заключается в переходе от непредсказуемого поведения системы по алгоритму диссипативной структуры к направленному движению вдоль желаемых инвариантных многообразий – аттракторов (Ψ_s), к которым подстраиваются все другие параметры системы (x_n). Это – целевой способ самоорганизации синергетических управляющих систем. При таком подходе цель – аттрактор $\Psi_s(x_1, \dots, x_n) = 0$ – определяет сущность процесса управления, а его содержание заключается в самоуправлении и направленной самоорганизации в соответствии с заданной целью [6].

Все это характеризует синергетическую систему как интеллектуальную, частным случаем которой является мультиагентная система, состоящая из интеллектуальных агентов различного происхождения (программных, аппаратных, биологических). По данным исследователей [7–9] практическая реализация синергетических подходов при создании специали-

рованных систем управления процессами и объектами многократно повышает эффективность их функционирования.

Другим, основополагающим принципом построения ИИУС является иерархический принцип, согласно которому иерархическая структура создает относительную свободу действий над отдельными элементами для каждого уровня системы и возможность различных сочетаний локальных критериев оптимальности с глобальным критерием оптимальности функционирования системы в целом; обеспечивает относительную гибкость системы управления и возможность приспосабливаться к изменяющимся условиям; повышает надежность за счет возможности введения элементной избыточности, упорядочения направлений потоков информации. Главной задачей стратегического уровня иерархии является обеспечение гарантированной безотказной работы ИИУС, консолидация вычислительных мощностей и систем хранения. На тактическом уровне иерархии ИИУС осуществляется автоматизация процессов сбора и обработки информации, максимально надежное хранение данных, гарантированный постоянный доступ к ним. На этом уровне организации ИИУС можно модернизировать структуру, добавляя вычислительные ресурсы и увеличивая объем памяти под хранение данных, что означает возможность быстрой адаптации к изменяющимся требованиям внешней среды. На оперативном уровне иерархии ИИУС осуществляется реализация функций ИИУС.

Материалы и методы

Техногенные объекты (ТО) – это сложные системы, состоящие из большого количества подсистем (агентов), которые работают при изменяющихся внутренних и внешних условиях, адекватно реагируя на эти изменения. Поэтому безаварийное функционирование ТО не может быть обеспечено без участия ИИУС. Сбои в процессе управления и контроля ТО ведут к возникновению чрезвычайных ситуаций (ЧС). Параметрами эффективности ИИУС являются их надежность (безаварийность функционирования) и возможность быстрой адаптации к изменяющимся требованиям внешней среды, а в случае ЧС – время и ресурсы, необходимые на восстановление работоспособности контролируемого ТО.

Для обеспечения необходимых параметров эффективности ИИУС должна быть построена таким образом, чтобы агенты (подсистемы) развивались самостоятельно, обеспечивая эффективность функционирования ИИУС по целевым параметрам. Такое поведение, когда одновременное эволюционное развитие нескольких агентов приводит к перестройке всей системы принятия решений в ИИУС, можно отнести к категории синергетических эффектов. Поэтому для обеспечения техносферной безопасности необходимы синергетические ИИУС, состоящие из большого числа агентов, находящихся в согласованном взаимодействии, определяющем поведение и свойства системы в целом [1].

В ИИУС различают вычислительные, информационные, интеллектуальные ресурсы и ресурсы времени. При построении и анализе ИИУС в основном оперируют вычислительными и временными ресурсами, но это не значит, что другие виды ресурсов, например, материально-технические, для решения конкретной задачи игнорируются.

Как следует из функционального назначения ИИУС, ее основной задачей является оптимальная организация информационного взаимодействия для обеспечения выполнения поставленных задач.

Под оптимизацией понимается процесс нахождения экстремумов (глобального максимума или минимума), которые могут быть оценены как лучшие значения (показатели) определенной целевой функции или выбор наилучшего (оптимального) варианта из множества возможных.

Оптимизация ресурсов может осуществляться на разных уровнях иерархии ИИУС. Одновременно должен быть выполнен принцип глобальной оптимизации, т.е. локальные критерии оптимизации и принимаемые на их основе решения не должны противоречить глобальному оптимуму ИИУС в целом.

При этом у любой ИИУС ресурсы для достижения стратегических, тактических или оперативных целей ограничены. Поэтому задача оптимизации ресурсов в ИИУС может быть сформулирована двояко:

1. При ограниченных ресурсах добиться глобального максимума векторной целевой функции ИИУС, т.е. надо хранить больше данных в выделенном пространстве, быстрее производить вычисления, не потребляя и не выделяя слишком много энергии, передавать больше

информации по имеющимся каналам связи, обеспечивать максимальную степень готовности эксплуатируемых подсистем.

2. При запланированных значениях показателей ИИУС добиться совокупного минимума используемых ресурсов.

Сказанное говорит о важности разработки методов и средств повышения эффективности функционирования ИИУС при решении задач управления процессами и объектами.

Целью работы является разработка структуры и алгоритма ИИУС, обеспечивающих оптимальное функционирование на основе синергетического подхода и иерархического принципа построения мультиагентной ИИУС.

Результаты и обсуждение

Синергизм ИИУС проявляется в усилении свойств системы (эффективности E) при объединении отдельных агентов, что выражается общей формулой [10]:

$$E_{1+\dots+N} > E_1 + \dots + E_N, \quad (1)$$

где N – количество агентов, объединенных в систему.

Синергетическую эффективность процесса объединения логично определить как системную эффективность. Тогда эта эффективность характеризует общую эффективность нелинейного взаимодействия агентов, входящих в состав системы. Следовательно, синергетическая эффективность – это способ учета общей эффективности системы, складывающийся из нескольких видов эффективности, когда ее невозможно определить простым суммированием эффективностей отдельных агентов системы.

Эффективность синергетической системы можно представить в виде двух составляющих «линейной эффективности» и «нелинейной эффективности». «Линейная эффективность» создается простым суммированием эффективностей отдельных агентов в составе синергетической ИИУС, а «нелинейная эффективность» формируется за счет появления у системы свойств и параметров не характерных для отдельных агентов (эмерджентность). Синергетическую эффективность E_s можно записать как

$$E_s = E_L + E_N, \quad (2)$$

где E_L – линейная составляющая эффективности; E_N – нелинейная составляющая эффективности.

Синергетическая эффективность является характеристикой работоспособности системы, надежности ее функционирования в границах диапазона базовых параметров (время и ресурсы) для конкретной системы [10].

Основой синергетической ИИУС является иерархическая мультиагентная система (МАС), функционирование которой направлено на обеспечение работоспособности ИИУС в нормальных и чрезвычайных условиях [11]. Это достигается гибкой согласованной корректировкой функционирования системы в ответ на изменения в окружающей ее среде в зависимости от возникающих событий (самоорганизация). В результате с помощью МАС параллельно осуществляются процессы сбора данных, анализа, планирования, оптимизации, мониторинга и контроля состояния ТО в режиме реального времени, что обеспечивает повышение безопасности его функционирования.

Основным проявлением самоорганизации синергетической ИИУС служит реконфигурирование структуры МАС и усложнение системы через флуктуации (случайные отклонения в режиме нормального функционирования ИИУС или выхода из строя отдельных агентов) состояний ее агентов. Такие флуктуации подавляются за счет отрицательных обратных связей, обеспечивающих сохранение структуры, работоспособности и близкого к равновесному состоянию системы. Но в более сложных ИИУС отклонения со временем возрастают, накапливаются и приводят либо к разрушению прежней структуры, либо к возникновению новой (включение дублирующих линий и элементов, клонирования и образования коалиций агентов).

Самоорганизация, результатом которой является реконфигурирование системы, может произойти лишь в системах высокого уровня сложности, обладающих определенным количеством взаимодействующих между собой агентов, имеющих некоторые критические параметры связи и относительно высокие значения вероятностей своих флуктуаций. В противном случае эффекты от синергетического взаимодействия будут недостаточны для появления кол-

лективного поведения агентов и тем самым возникновения самоорганизации. Недостаточно сложные ИИУС не способны к спонтанной адаптации и к развитию и при чрезмерных воздействиях извне теряют свою структуру и необратимо разрушаются.

Самоорганизация ИИУС происходит только при преобладании положительных обратных связей над отрицательными. Функционирование МАС основывается на получении обратных сигналов от датчиков, несущих информацию о состоянии ТО (окружающей ИИУС среды) и последующей корректировке параметров функционирования ТО за счет действия исполнительных механизмов (система поддержки принятия решения (СППР)). В самоорганизующейся ИИУС такие изменения не устраняются, а накапливаются и усиливаются вследствие интеллектуальности входящих в состав системы агентов, что приводит к возникновению нового порядка и реконфигурированию ИИУС, образованной из элементов прежней, измененной системы.

Этот процесс осуществляется путем клонирования агентов и образования ими коалиций в составе МАС. Если от ТО через датчики поступают данные, свидетельствующие о невозможности системой достичь поставленной цели (обеспечение нормального функционирования ТО), то МАС после анализа ситуации, без внешнего вмешательства, дает команду на реконфигурирование структуры либо за счет клонирования агентов, либо перераспределения обязанностей между агентами в составе коалиции однофункциональных агентов. Выбор варианта самоорганизации системы зависит от критичности параметров функционирования ИИУС и ТО. Если нужно действовать быстро (критичный параметр время), то может быть задействовано большее количество ресурсов (агентов). Но если критическими параметрами являются и время, и ресурсы, то за счет синергизма ИИУС и наличия нелинейной эффективности (см. формулу (2)), возможно достичь цели без привлечения дополнительных ресурсов и в срок за счет перераспределения обязанностей между однофункциональными агентами [12].

Основополагающими принципами самоорганизации синергетической ИИУС являются простота информационного взаимодействия агентов МАС и возможность оперативного реконфигурирования структуры ИИУС.

Синергетическая ИИУС строится по стандартной схеме, в состав которой входят центр контроля и управления объектами, датчики и исполнительные механизмы (рис. 1). Более того, синергетическая ИИУС может быть многофункциональной, осуществлять контроль и управление различными по природе объектами. Но алгоритм достижения целей всегда один и тот же. МАС, работая на достижение поставленной цели, разбивает цель на задачи, осуществляет прогноз результата решения каждой задачи, составляет план решения каждой задачи, оценивает возможности каждого агента для решения задачи и распределяет их (рис. 2). Результаты решения отдельных задач интегрируются в результат достижения цели, на основе чего отдается команда исполнительным механизмам на изменение внешней (окружающей) среды.

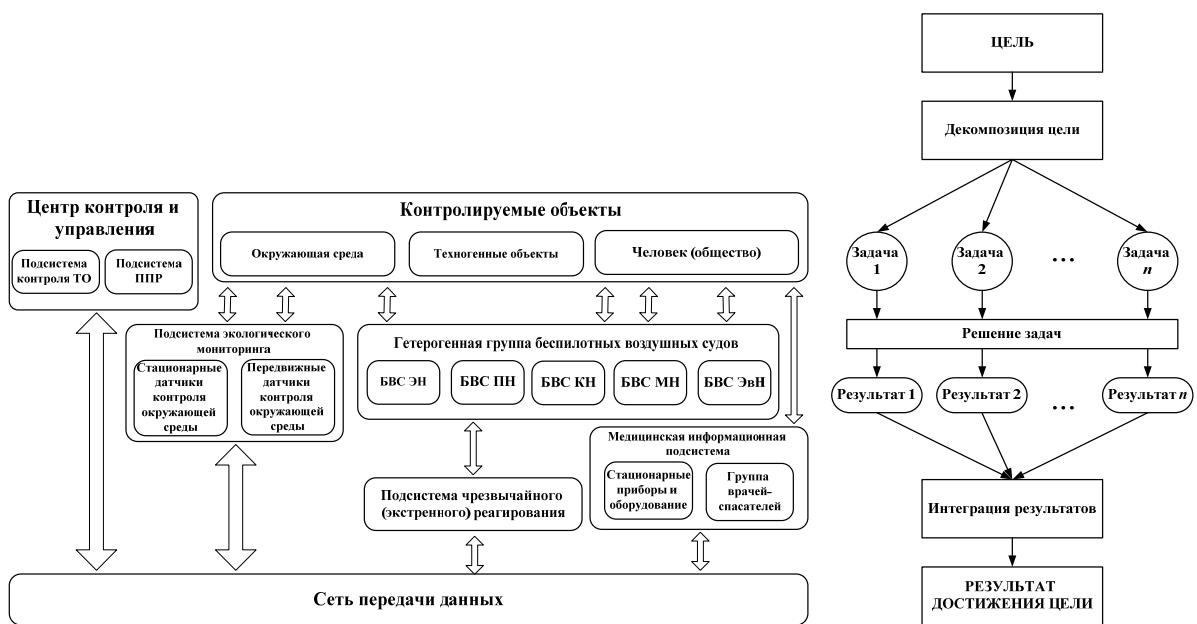


Рис. 1. Структурно-функциональная модель синергетической ИИУС

Рис. 2. Декомпозиция цели МАС синергетической ИИУС

Рассмотрим проявление синергетической эффективности ИИУС на примере работы гетерогенной группы беспилотных воздушных судов (БВС) в зоне ЧС. В соответствии с работой [13] в зону ЧС при проведении поисково-спасательных работ (ПСР) отправляют гетерогенную группу БВС, входящую в состав подсистемы чрезвычайного (экстренного) реагирования. Способ проведения ПСР заключается в реализации всех этапов проведения ПСР: разведка зоны ЧС, поиск пострадавших и определение их места нахождения, минимизация уровней воздействия поражающих факторов (ПФ) ЧС, оказание пострадавшим медицинской помощи, эвакуация транспортабельных пострадавших. Все эти этапы реализуют с использованием специально оборудованной гетерогенной группы БВС, причем БВС каждой специализации может быть несколько. Гетерогенная группа БВС включена в состав подсистемы чрезвычайного (экстренного) реагирования с целью минимизации времени на обнаружение пострадавших, экстренного оказания им медицинской помощи, а также оперативной эвакуации, обнаружения и минимизации источников поражающих факторов ЧС.

Алгоритм работы (рис. 3) гетерогенной группы БВС включает этапы сбора и обработки данных, а также реализации на их основе действий, изменяющих внешнюю среду. Эти действия осуществляются синергетической ИИУС на основе интеллектуального взаимодействия агентов (в данном случае БВС) МАС, обеспечивающего при отказе одного БВС сохранение работоспособности всей гетерогенной группы [12]. Действительно, структурный расчет надежности показывает, что при отказе одного из N БВС не произойдет потеря работоспособности всей гетерогенной группы. Система переходит в более напряженный режим работы, в котором, обладая меньшими ресурсами, она выполняет заданные функции. При этом, безусловно, снижается производительность и эффективность решения задачи.

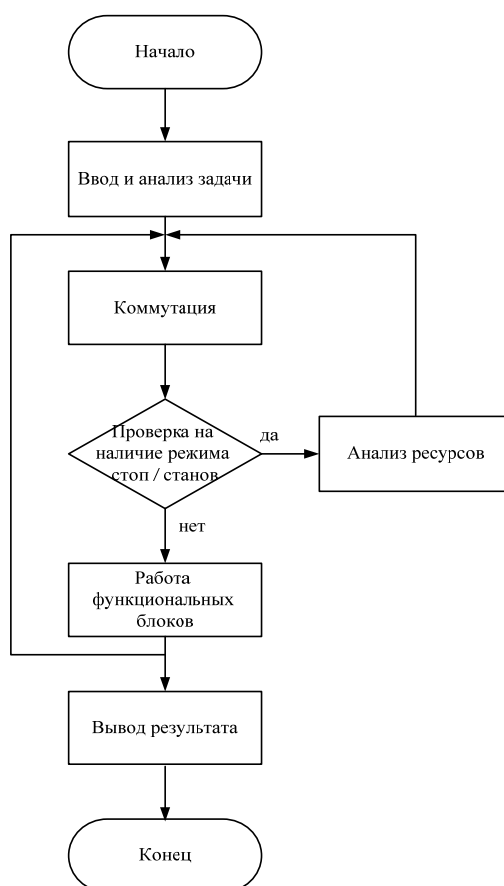


Рис. 3. Алгоритм работы синергетической ИИУС

В случае отсутствия режима «Стоп» перераспределения обязанностей БВС не осуществляется, и ПСР проходят по заранее определенному плану работы. В случае наличия режима «Стоп» анализатор ресурсов синергетической ИИУС по алгоритму, приведенному на рис. 4, осуществляет перераспределения обязанностей БВС.

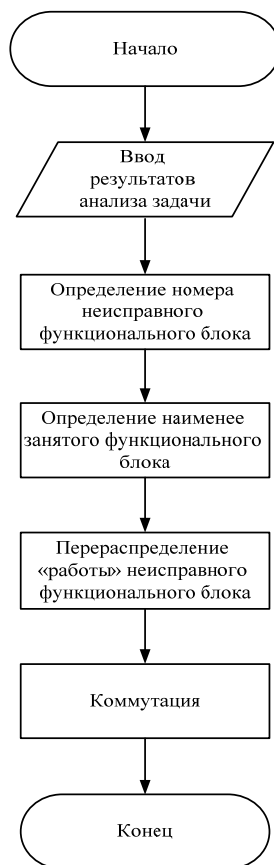


Рис. 4. Алгоритм работы анализатора ресурсов синергетической ИИУС

Синергетическая ИИУС работает следующим образом: сначала агент 1-го уровня иерархии анализирует поставленную цель, в том числе и по параметрам «ресурсы – время», и распределяет ее решение на ряд параллельных задач для обеспечения децентрализации управления и сокращения времени проведения ПСР. Соответственно, по результатам анализа исходной цели агентом 2-го уровня иерархии осуществляется коммутация ресурсов ИИУС (распределение задач агентам 3-го уровня). Такая организация работы ИИУС обеспечивает максимально возможную загрузку БВС исходя из особенностей алгоритма решаемой каждой задачи и аппаратных ограничений каждого БВС. Все БВС, входящие в состав гетерогенной группы, работают параллельно и независимо друг от друга, в соответствии с задачами, но обмениваются собранными данными, что сокращает время решения поставленных задач перед каждым из них. Работу анализатора ресурсов можно рассмотреть на примере реализации формулы

$$(c_1, c_2) = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где c_1 и c_2 – синергетическая эффективность системы с учетом анализируемых параметров «ресурсы – время»; a_{ij} – агенты системы, для которых определяющим является i -й параметр; b_i – агенты системы, для которых определяющим является $i+1$ -й параметр.

В выражении (3) значения (c_1, c_2) количественно характеризуют ресурсы системы необходимые для достижения цели. Покажем изменение времени функционирования ИИУС при выполнении задания в случае работоспособных БВС и в случае выхода из строя одного из БВС.

Допустим, что гетерогенная группа БВС состоит из шести агентов $A := \{a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}, b_1, b_2\}$. Для четырех БВС определяющим является i -й параметр, для остальных – $i+1$ -й. Тогда реализация формулы (3) в случае всех работоспособных БВС происходит, как показано

на рис. 5. В табл. 1 представлена работа агентов (БВС) по тактам в нормальном режиме. Анализатор ресурсов в этом случае осуществляет контроль работы гетерогенной группы БВС путем проверки на наличие режима «Стоп».

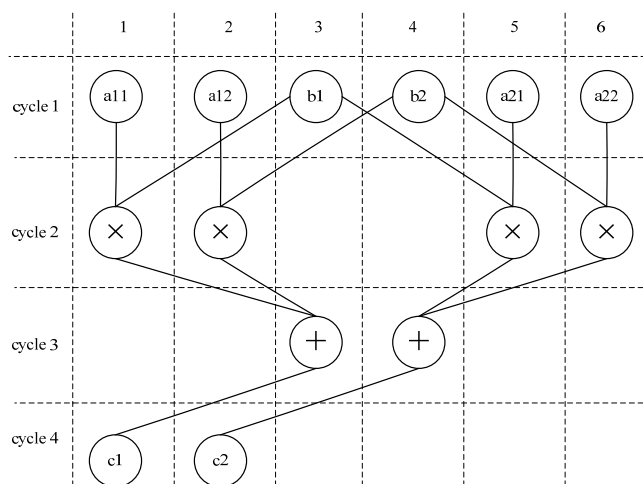


Рис. 5. Граф проведения ПСР при работоспособных БВС

Таблица 1

Работа агентов по тактам в нормальном режиме

Такты	A1	A2	A3	A4	A5	A6
1	чт a11	чт a12	чт b1	чт b2	чт a21	чт a22
2	1×3	2×4			3×5	4×6
3			1+2	5+6		
4	зп c1	зп c2				

П р и м е ч а н и я: чт – чтение данных; зп – запись данных.

При выходе из строя одного из БВС анализатор ресурсов осуществляет восстановительные процедуры в соответствии с вышеописанным алгоритмом. Например, пятый БВС в гетерогенной группе вышел из строя, тогда реализация формулы (3) будет выглядеть по-другому, так, как представлена на рис. 6. В табл. 2 представлена работа агентов (БВС) по тактам с неработоспособным агентом.

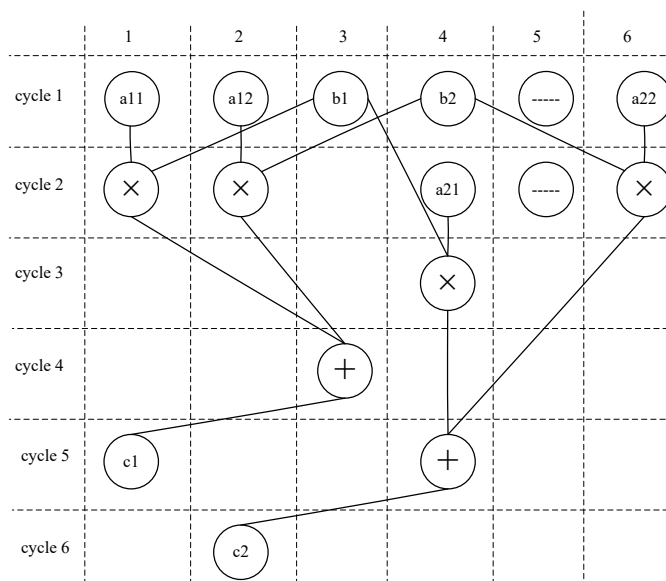


Рис. 6. Граф проведения ПСР при неработоспособном БВС

Таблица 2

Работа агентов по тактам с неработоспособным агентом

Такты	A1	A2	A3	A4	A5	A6
1	чт a11	чт a12	чт b1	чт b2	–	чт a22
2	1×3	2×4		чт a21	–	4×6
3				3×4	–	
4			1+2		–	
5	зп c1			4+6	–	
6		зп c2			–	

П р и м е ч а н и я: чт – чтение данных; зп – запись данных.

Как следует из рассмотрения рис. 6, «работу» пятого БВС берет на себя четвертый БВС. Работа всей гетерогенной группы продолжается, несмотря на выход из строя одного из БВС.

Таким образом, использование синергетического подхода в ИИУС на основе интеллектуального взаимодействия агентов МАС позволяет сохранить эффективность проведения ПСР при выходе из строя БВС за счет нелинейной составляющей эффективности, возникающей из-за синергетического эффекта в системе.

Заключение и выводы

Таким образом, структурно-функциональная модель предложенной синергетической ИИУС характеризуется набором структурных элементов и их функциональным назначением, присущим большинству современных ИИУС, что делает ее инвариантной относительно области применения. Использование предлагаемой синергетической ИИУС для управления БВС в условиях ЧС позволяет оптимизировать ресурсы за счет синергетического эффекта и достичь поставленную цель даже при выходе агента из строя, так как является восстанавливаемой и сохраняющей работоспособность при выходе из строя агента (БВС).

Список литературы

1. Khaken G. The hierarchy of instabilities in self-organizing systems and devices. Moscow : Mir Publ., 1985.
2. Nikolis G., Prigozhin I. Self-organization in nonequilibrium systems. Moscow : Mir Publ., 1979.
3. Kniازهva E. N., Kurdiymov S. P. Foundation of synergetics. Synergetic world-view. Moscow : KomKniga Publ., 2010.
4. Chernavskii D. S. Synergetics and information: Dynamic information theory. Moscow : URSS Publ., 2004.
5. Samarskii A. A., Mikhailov A. P. Mathematical modeling: Ideas. Methods. Examples. URL: www.twirpx.com/file/20242/
6. Колесников А. А. Синергетические системы // Программные продукты и системы. 2002. № 1. С. 3–6.
7. Манова М. В., Ширина Е. В. Синергетическая система управления интеллектуальной собственностью // Балтийский гуманитарный журнал. 2015. № 2. С. 150–153.
8. Решетников И. С. Синергетическая модель построения многомодульной информационно-управляющей системы // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2011. № 3. С. 264–267.
9. Лебедев В. И., Лебедева И. В., Шуваев А. В. Синергетические модели социально-экономических систем // Fundamental research. 2018. № 11. С. 256–260.
10. Sukharev O. S. The theory of effectiveness of economy : monograph. 2nd ed., cor. Moscow : INFRA-M, 2014. 367 p. URL: https://studref.com/428048/ekonomika/sinergeticheskaya_effektivnost
11. Bezborodova O., Gromkov N., Bodin O. [et al.]. Multi-agent Technologies for Comprehensive Monitoring of the State of Territorial Technosphere // 2019 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), Budva, Montenegro. 2019. P. 1–4. doi:10.1109/MECO.2019.8760064
12. Пат. 2292075 РФ. Синергетическая вычислительная система / Бодин О. Н., Логинов Д. С., Тернопольский К. А. ; № 2005119236/09 ; заявл. 21.06.2005 ; опубл. 20.01.2007, Бюл. № 2. 20 с.
13. Patent 2694528 Russian Federation, Int. Cl. A62B 99/00 (2009.01). Search and rescue method / Sherstnev V. V., Bodin O. N., Bezborodova O. E., Rakhmatullof F. K., Gerasimov A. I., Ozhikenov K. A., Bayanbaj N., Berdibaeva G. K. ; № 2018139491 : Date of filing 07.11.2018 : Date of publication 16.07.2019. 31 p.

References

1. Khaken G. *The hierarchy of instabilities in self-organizing systems and devices*. Moscow: Mir Publ., 1985.
2. Nikolis G., Prigozhin I. *Self-organization in nonequilibrium systems*. Moscow: Mir Publ., 1979.
3. Kniazeva E.N., Kurdiunov S.P. *Foundation of synergetics. Synergetic world-view*. Moscow: KomKniga Publ., 2010.
4. Chernavskii D.S. *Synergetics and information: Dynamic information theory*. Moscow: URSS Publ., 2004.
5. Samarskii A.A., Mikhailov A.P. *Mathematical modeling: Ideas. Methods. Examples*. Available at: www.twirpx.com/file/20242/
6. Kolesnikov A.A. Synergetic systems. *Programmnye produkty i sistemy = Software products and systems*. 2002;(1):3–6. (In Russ.)
7. Manova M.V., Shirina E.V. Synergetic system of intellectual property management. *Baltiyskiy gumanitarnyy zhurnal = Baltic Humanitarian Journal*. 2015;(2):150–153. (In Russ.)
8. Reshetnikov I.S. A synergetic model for building a multimodule information and control system. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo = Bulletin of the Nizhny Novgorod University named after N. I. Lobachevsky*. 2011;(3):264–267. (In Russ.)
9. Lebedev V.I., Lebedeva I.V., Shuvaev A.V. Synergetic models of socio-economic systems. *Fundamental research*. 2018;(11):256–260. (In Russ.)
10. Sukharev O.S. *The theory of effectiveness of economy: monograph. 2nd ed., cor.* Moscow: INFRA-M, 2014:367. Available at: https://studref.com/428048/ekonomika/sinergeticheskaya_effektivnost
11. Bezborodova O., Gromkov N., Bodin O. [et al.]. Multi-agent Technologies for Comprehensive Monitoring of the State of Territorial Technosphere. *2019 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*. Budva, Montenegro. 2019:1–4. doi:10.1109/MECO.2019.8760064
12. Pat. 2292075 RF. Synergistic computing system. Bodin O.N., Loginov D.S., Ternopol'skiy K.A.; No. 2005119236/09; appl. 21.06.2005; publ. 20.01.2007, bull. № 2:20. (In Russ.)
13. Patent 2694528 Russian Federation, Int. Cl. A62B 99/00 (2009.01). *Search and rescue method*. Sherstnev V.V., Bodin O.N., Bezborodova O.E., Rakhmatullof F.K., Gerasimov A.I., Ozhikenov K.A., Bayanbaj N., Berdibaeva G.K.; No. 2018139491: Date of filing 07.11.2018: Date of publication 16.07.2019:31.

Информация об авторах / Information about the authors

Оксана Евгеньевна Безбородова

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой техносферной безопасности,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: oxana243@yandex.ru

Oksana E. Bezborodova

Candidate of technical sciences, associate professor,
head of the sub-department of technosphere safety,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 21.03.2022

Поступила после рецензирования/Revised 25.04.2022

Принята к публикации/Accepted 8.05.2022