

УДК 004.8
EDN: VXTJSC

СОЦИО-КИБЕРФИЗИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ

©Автор(ы) 2024
SPIN: 3024-1393
AuthorID: 183204
ORCID: 0000-0001-9299-1005
ResearcherID: Y-3115-2018
ScopusID: 56613172200

БОДИН Олег Николаевич, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Биомедицинская инженерия»

Пензенский государственный технологический университет
(440039, г. Пенза, проезд Байдукова / улица Гагарина, д. 1а/11, e-mail: bodin_o@inbox.ru)

SPIN: 3519-3682
AuthorID: 271281
ORCID: 0000-0002-3726
ResearcherID: V-7481-2018
ScopusID: 57205663503

БЕЗБОРОДОВА Оксана Евгеньевна, доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Техносферная безопасность» Политехнический институт

Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, улица Красная, 40, e-mail: oxana243@yandex.ru)

SPIN: 7718-0729
AuthorID: 1250197
ORCID: 0009-0003-9352-5876
eLIBRARY ID: 58800354

ЖИГАЧЕВ Василий Маратович, кандидат технических наук,
докторант кафедры «Техническое управление качеством»

Пензенский государственный технологический университет
(440039, г. Пенза, проезд Байдукова/улица Гагарина, д. 1а/11, e-mail: zhigachevvm@mail.ru)

SPIN: 9459-8170
AuthorID: 1122812
ORCID: 0009-0000-1224-1770
ResearcherID: JCW-6897-2023

МИШИНА Кристина Дмитриевна, аспирант,
кафедра «Техносферная безопасность» Политехнический институт

Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, улица Красная, 40, e-mail: kristina_mishina_1998@mail.ru)

Аннотация. При цифровой трансформации промышленности необходимы принципиально новые способы организации, связанные с изменением места и роли человека в технологической цепочке. Учитывая постоянно возрастающий объем обрабатываемых данных и требования к скорости принятия управляющих решений, человек проигрывает при внедрении оборудования цифрового производства, управляемого интеллектуальными системами в режиме реального времени. Целью исследования является – разработка социо-киберфизической системы мониторинга и управления на основе мультиагентной технологии. Методология исследования основана на использовании междисциплинарного подхода, базирующегося на фундаментальных научных положениях таких отраслей, как системный анализ, автоматическое управление процессами, технологии управления качеством, математическое моделирование. Результатами работы являются классификация (систематизация) элементов социо-киберфизических систем; разработка структуры мультиагентной подсистемы в составе социо-киберфизической системы и модели управления; разработка технологии социо-киберфизической системы мониторинга и управления. Разработана социо-киберфизическая система мониторинга и управления на основе мультиагентной технологии. Применение мультиагентной технологии позволяет при интеллектуальной обработке данных: оптимизировать процессы мониторинга и управления за счет иерархии интеллектуальных агентов; сократить время обработки данных за счет клонирования агентов и параллельных вычислений; повысить точность обработки данных за счет использования цифрового двойника объекта и его оптимизационной модели.

Ключевые слова: социо-киберфизическая система, мониторинг и управление, мультиагентная технология, интеллектуальный агент.

SOCIO-CYBERPHYSICAL SYSTEMS FOR MONITORING AND CONTROL OF OBJECTS

©The Author(s) 2024

BODIN Oleg Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor,
head of the department «Biomedical Engineering»

Penza State Technological University

(440039, Penza, Baidukova proezd/Gagarin Street, 1a/11, e-mail: bodin_o@inbox.ru)

BEZBORODOVA Oksana Evgenievna, doctor of technical sciences, docent,
head of the department «Technosphere Safety» Polytechnic Institute

Penza State University

(440026, Russia, Penza, Krasnaya Street, 40, e-mail: oxana243@yandex.ru)

ZHIGACHEV Vasily Maratovich, candidate of technical sciences,
doctoral student at the department «Technical Quality Management»

Penza State Technological University

(440039, Penza, Baidukova proezd/Gagarin Street, 1a/11, e-mail: zhigachevvm@mail.ru)

MISHINA Kristina Dmitrievna, postgraduate student department «Technosphere Safety» Polytechnic Institute
Penza State University

(440026, Russia, Penza, Krasnaya Street, 40, e-mail: kristina_mishina_1998@mail.ru)

Abstract. With the digital transformation of industry, fundamentally new ways of organizing are needed, related to changing the place and role of a person in the technological chain. Given the ever-increasing volume of processed data and the requirements for the speed of management decision-making, a person loses out when implementing digital production equipment controlled by intelligent systems in real time. The purpose of the research is to develop a socio-cyberphysical monitoring and management system based on multi-agent technology. The research methodology is based on the use of an interdisciplinary approach based on the fundamental scientific positions of such industries as system analysis, automatic process control, quality management technologies, mathematical modeling. The results of the work are the classification (systematization) of elements of socio-cyberphysical systems; development of the structure of a multi-agent subsystem as part of a socio-cyberphysical system and management model; development of technology for a socio-cyberphysical monitoring and management system. A socio-cyberphysical monitoring and management system based on multi-agent technology has been developed. The use of multi-agent technology allows for intelligent data processing: to optimize monitoring and management processes due to the hierarchy of intelligent agents; to reduce data processing time due to agent cloning and parallel computing; to increase the accuracy of data processing by using the digital twin of the object and its optimization model.

Keywords: socio-cyberphysical system, monitoring and management, multi-agent technology, intelligent agent.

Для цитирования: Бодин О.Н. Социо-киберфизические системы для мониторинга и управления объектами / О.Н. Бодин, О.Е. Безбородова, В.М. Жигачев, К.Д. Мишина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 4(68). – С. 20-29. – EDN: VXTJSC.

Введение. При цифровой трансформации промышленности необходимы принципиально новые способы организации, связанные с изменением места и роли человека в технологической цепочке. Учитывая постоянно возрастающий объем обрабатываемых данных и требования к скорости принятия управляющих решений, человек проигрывает при внедрении оборудования цифрового производства, управляемого интеллектуальными системами в режиме реального времени. Для выравнивания возможностей искусственного интеллекта и человека при управлении технологическими процессами и производствами многие авторы [1, 2, 3, 4] предлагают перейти от классических автоматических систем управления, у которых отсутствуют возможности оперативно подстраиваться под изменяющиеся условия, которые чаще всего обладают только функцией автоматического управления объектами различной природы происхождения, выполняют при этом типовые операции к более совершенным системам управления. На сегодняшний день наиболее перспективными системами управления являются ки-

берфизические системы, являющиеся объединением технологических и информационных процессов и технологий. Эти системы работают в масштабе реального времени и, при взаимодействии с внешней средой, способны подстраиваться (адаптироваться) под ее изменения. В [5, 6] киберфизическая система (КФС) определена как совокупность информационных (базы данных, компьютерное и коммуникационное оборудование, программное обеспечение), физических (инженерных, экологических) и человеческих компонентов. Такие системы состоят из разнородных объектов: природных и технических систем, сети датчиков, управляющих контроллеров, вычислительных средств, объединяемых в единое целое средствами интернет (интранет).

Учитывая, что КФС автоматизированная система, человек сохраняется в контуре управления. Поэтому, взаимодействуя с информационными и физическими компонентами, он может выступать как оператор, управляющий системой, элемент системы (объект исследования) или элемент внешней среды (наблюдатель-контролер). Такое взаимодействие преобразует

киберфизические системы в социо-киберфизические (СКФС) [7].

Распространение СКФС породило проблему обеспечения качества и безопасности их функционирования. Поэтому стала актуальной разработка новых и совершенствование существующих методов и средств для СКФС как систем управления, функционирующих в режиме реального времени. Целью СКФС является установление отклонений наблюдаемых параметров объектов от их теоретических или нормальных значений и формирования сигнала о необходимости управляющего воздействия (минимизации выявленных отклонений), а также прогноз состояния объекта для обоснованного снижения степени неопределенности, риска при принятии решений. В основе любого прогноза лежит использование модели объекта, в частности математической. Поэтому разработка новых математических моделей объектов и новых способов

использования уже существующих математических моделей также представляют теоретический и практический интерес.

Целью исследования является – разработка СКФС мониторинга и управления на основе мультиагентной технологии.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

- классификация (систематизация) СКФС;
- разработка структуры мультиагентной подсистемы в составе СКФС и модели управления;
- разработка технологии СКФС мониторинга и управления.

Методология. Учитывая особенности «включения» человека в СКФС, он может выступать как оператор, управляющий системой, элемент системы (объект исследования) или элемент внешней среды (наблюдатель) (табл. 1).

Таблица 1 – Классификация социо-киберфизических систем по степени взаимодействия человека с информационными и физическими компонентами

Элемент структуры СКФС \ Выполняемые функции	Человек			
	оператор	объект исследования	оператор и объект исследования	наблюдатель-контролер
Объект управления	–	+	+	–
Элемент подсистемы управления	+	–	+	–
Элемент внешней среды	+	+	+	+

Выступая в качестве оператора, человек является элементом подсистемы управления, работая в ручном или автоматизированном режиме. В этих режимах он включен в контур СКФС и либо сам задает и осуществляет управляющие команды, либо подтверждает варианты управляющих команд, сформированных СКФС. Быстродействие такой системы определяется, в большей степени, быстродействием человека.

Возможен вариант работы СКФС, когда человек является ее объектом исследования. И если такое исследование проходит в автоматическом режиме, то измерение, обработку результатов и формирование управляющей команды выполняет СКФС без возможности человека вмешаться в ход процесса. Если такое исследование происходит в автоматизированном режиме, то есть человек включен в контур СКФС и как объект исследования, и как элемент подсистемы управления.

Если рассматривать человека как наблюдателя-контролера СКФС (автоматический режим работы), то он исключен из контура управления СКФС и не может вмешаться в процессы мониторинга и управления. Поэтому все управляющие и корректирующие команды формирует и выполняет СКФС, действуя по заданной программе, зачастую не учитывая нюансы изменения состояния объекта управления.

Учитывая, что СКФС характеризуются значительной сложностью, ее возможности обуславливаются используемыми методами и средствами управления. Для этого наиболее предпочтителен

распределенный подход к управлению объектом, на основе мультиагентной технологии [8, 9]. При использовании в составе СКФС мультиагентной подсистемы появляется возможность выбирать наиболее подходящее к текущей ситуации состояние объекта и средства и методы его достижения на основе заданных граничных условий.

Структуру мультиагентной подсистемы формируют исходя из состава и иерархии системы управления, характером связей между ее узлами и блоками, интенсивностью работы, выбранными целевыми управляющими функциями, множествами предпочтительных и допустимых состояний объекта управления, способами информационного обмена. Предложенные авторами общая структурная схема СКФС, архитектура и функциональная схема самореализации мультиагентной подсистемы рассмотрены в [10-12].

В соответствии с [13] СКФС управления содержит следующие подсистемы (рис. 1): измерения параметров объекта, оценки состояния объекта, управления состоянием объекта. СКФС управления является многомерной динамической системой, так как при взаимодействии с внешней средой объект управления обменивается с ней материальными (М), энергетическими (Э) и информационными (И) потоками. Измеряемые значения контролируемых СКФС параметров содержат случайную составляющую – помехи $\eta(t)$, которые искажают результаты измерений, а также оценки и команды, отдаваемые подсистемой управления.

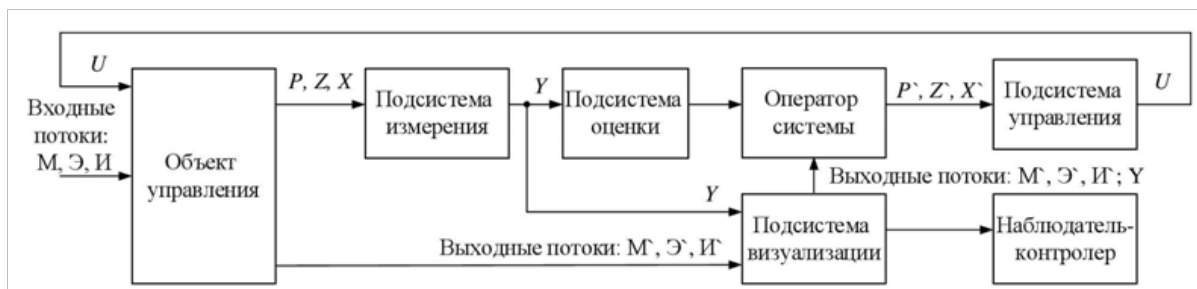


Рисунок 1 – Общая структурная схема социо-киберфизической системы

При использовании мультиагентной подсистемы управления в составе СКФС необходимо учитывать особенности объекта управления. Для успешного взаимодействия с мультиагентной подсистемой объект управления необходимо оснастить рецепторами, позволяющими воспринимать информацию из внешней среды (различного рода датчики и сенсоры, контрольно-измерительную аппаратуру), и эффекторами – исполнительными блоками, реализующими управляющие воздействия (программируемые логические контроллеры (ПЛК)). Для обработки сигналов рецепторов и эффекторов в состав системы необходимо включить вычислительный модуль, содержащий блок обработки полученных данных и память. Вычислительный модуль – это сервер для сбора, обработки и хранения данных таких как структура мультиагентной подсистемы, измеренные параметры объекта, функции и задачи интеллектуальных агентов, база знаний и т.д. С сервера, в случае сбоя в системе, интеллектуальный агент получает данные.

Мультиагентная подсистема является множеством интеллектуальных агентов, характеризующихся определенным состоянием, и взаимодействующих виртуально. Для выполнения поставленных задач они имеют возможность по заданному динамическому расписанию формировать и распускать коалиции, клонировать интеллектуальных агентов.

В СКФС как интеллектуальные агенты, то есть программно-аппаратные сущности, рассматриваются все подсистемы (рис. 1), причем подсистемы оценки состояния объекта и управления объектом выступают в качестве коалиций интеллектуальных агентов, объединенных для выполнения задач оценки состояния и управления объектом.

СКФС оперирует следующими массивами информации: входящая информация (множество P), информация о состоянии объекта управления (множество Z), выходная информация (множество X); измерительные данные, совмещенные с помехами (множество Y); результаты оценки: входных сигналов (множество P), состояния объекта управления (множество Z), выходных сигналов (множество X); сформированные управляющие сигналы (множество U).

Содержание баз данных СКФС зависит от специфики объекта управления. Для идентификации и выполнения команд объект управления оснащен

соответствующими приборами, оборудованием и узлами. Так как объект управления является многопараметрическим, то в каждый момент времени t_i он характеризуется множествами: входных параметров $\{p_1(t), p_2(t), \dots, p_k(t)\}$, где k – размерность входного процесса объекта, параметров состояния объекта $\{z_1(t), z_2(t), \dots, z_n(t)\}$, где n – размерность объекта управления и выходных параметров $\{x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)\}$, где m – размерность выходного процесса. Чаще всего контроль и управление осуществляют по наиболее значимым параметрам, наиболее полно характеризующим объект, изменение которых ведет к изменению других параметров.

Подсистема измерения параметров объекта управления получает с системы датчиков и первичных преобразователей информацию о контролируемых параметрах в момент времени t_i . Эта информация искажена помехами и представлена в виде множества $\{y_1(t), y_2(t), \dots, y_l(t)\}$, где l – размерность этого множества.

Подсистема оценки состояния объекта, анализируя результаты измерения Y с использованием алгоритмов фильтрации и обработки информации, получает оценки: входного процесса P , состояния объекта управления Z и выходного процесса X в виде множеств $\hat{P} = \{\hat{p}_1(t), \hat{p}_2(t), \dots, \hat{p}_k(t)\}$, $\hat{Z} = \{\hat{z}_1(t), \hat{z}_2(t), \dots, \hat{z}_n(t)\}$, $\hat{X} = \{\hat{x}_1(t), \hat{x}_2(t), \dots, \hat{x}_m(t)\}$.

Подсистема оценки состояния объекта для оценки состояния объекта управления в момент времени t_i использует дополнительную информацию. Это задаваемые на основе технологических (уставки), справочных (физические и химические константы, формулы пересчета в вспомогательные единицы измерения и пр.), нормативных документов предельные (граничные) значения по каждому контролируемому параметру. Эта информация для настройки СКФС может задаваться оператором системы вручную или формироваться подсистемой оценки по заложенным при создании правилам и моделям.

Данные с выхода подсистемы оценки состояния объекта $\hat{P}, \hat{Z}, \hat{X}$ подают в подсистему управления, и они являются исходными для корректировки управляющих воздействий $U = \{u_1(t), u_2(t), \dots, u_p(t)\}$ – команды в соответствии с результатами оценки состояния объекта (p – размерность управляющего воздействия). Эту информацию подают в подсистему визуализации в удобной для восприя-

тия пользователем форме – в виде шкал, графиков, коротких текстовых заметок, сигнальных кнопок и прочего. Пользователями этой информации является наблюдатель-контролер (при работе системы в автоматическом режиме), или оператор системы (при работе в автоматизированном режиме).

Учитывая возможность изменения значений контролируемых параметров при длительной работе объекта управления возникает необходимость их корректировки. Эту коррекцию возможно осуществлять в автоматическом режиме при наличии в подсистеме динамической математической модели объекта управления высокой точности, то есть цифрового двойника объекта управления (ЦД-1) с переменными коэффициентами. В подсистему заложены коэффициенты ЦД-1 для исходного (номинального) состояния объекта управления. Эта модель определяет разработку алгоритмов автоматической работы СКФС. В процессе эксплуатации состояние объекта управления меняется и возникают отклонения значений контролируемых параметров объекта управления по отношению к номинальным, заложенным в ЦД-1. Чтобы определить поправки необходимо сформировать идентифицирующее воздействие на объект управления. Оно представляет собой сигналы малой амплитуды определенной, заранее известной формы (импульс или синус, например), не искажающие основные управляющие воздействия. Зная значения характеристик идентифицирующих сигналов, по ЦД-1 определяют параметры сигнала на выходе подсистемы измерения параметров объекта. При обнаружении разницы между определенным и измеренным значениями делают вывод об отклонении в состоянии объекта управления, не учтенном ЦД-1. Варьируя коэффициентами ЦД-1 устраняют разницу между определенными и измеренными значениями. По этому принципу в ходе длительной работы системы ее модель непрерывно корректируют, подгоняя под изменяющиеся условия.

Наличие математической модели объекта управления дает возможность оптимизировать алгоритм управления объектом. Условием возможности этого процесса является наличие оптимизационной модели (ЦД-2), которую можно получить на основе ЦД-1. Для этого ЦД-1 необходимо обеспечить целевой функцией F , задаваемой при настройке СКФС. Параметрами целевой функции могут быть, например, минимизация образования отходов, выбросов, сбросов при работе объекта управления, минимизация его энергозатрат и пр. Используя ЦД-1 и целевую функцию задают вектор управляющего воздействия $U^0 = \{u_1^0(t), u_2^0(t), \dots, u_p^0(t)\}$, при котором целевой параметр имеет предпочтительное значение. Оптимизировать управление состоянием объекта можно по одному контролируемому параметру или по их совокупности (Парето-оптимальное состояние, когда нельзя улучшить значение ни одного параметра, одновременно не ухудшая значения как

минимум одного из остальных) или по комплексному показателю состояния объекта.

Таким образом, работа СКФС управления заключается в определении и оценке состояния объекта управления, а также определении необходимости корректировки состояния. Для решения этих задач авторами предлагается мультиагентная управляющая подсистема.

Результаты. Мультиагентная подсистема имеет сложную архитектуру: модули веб-платформа, коммуникаций, управления интеллектуальными агентами, баз данных, а также приемо-передающий модуль. Информационные потоки между модулями в мультиагентной системе приведены на рисунке 2 [15].

Модуль веб-платформы построен на основе клиент-серверной архитектуры. Именно такая архитектура позволяет операторам системы и администраторам использовать необходимые данные, а интеллектуальным агентам, выполненным на индивидуальных модулях веб-платформы, обеспечивает доступ к базам данных через специальное программное обеспечение. Через клиент-серверное приложение интеллектуальные агенты получают доступ к пользовательскому интерфейсу в случае необходимости активации агентов. В подсистеме действуют агенты двух видов: внешние и внутренние [15].

Внутренние интеллектуальные агенты (оценки состояния объекта, настройки оценки состояния объекта, формирования баз данных, оптимизации состояния объекта) выполняют задания внутри мультиагентной подсистемы и не имеют права выхода во внешнюю сеть.

Внешние интеллектуальные агенты имеют права выхода во внешнюю среду и выполняют специальные задания вне среды мультиагентной подсистемы.

Базы данных накапливают информацию, состоящую из данных оперативного анализа, предписаний для каждого из интеллектуальных агентов, набор служебных данных. Базы данных размещают либо на сервере, либо на рабочей станции (в зависимости от конфигурации системы). Они содержат измерительную, справочную, расчетную информацию об объекте, результаты ее обработки. Для работы интеллектуальных агентов необходимы поисковые и оперативные предписания, служебные данные.

На рисунке 3 приведена функциональная схема самореализации разработанной мультиагентной подсистемы. Запуск интеллектуального агента осуществляет модуль управления агентами по расписанию хранящемуся в базе данных. Во время работы интеллектуального агента этот модуль управляет очередью решаемых агентом задач за счет распределенной передачи сообщений.

В передаче сообщений принимает участие модуль коммуникации. Он же осуществляет взаимодействие между агентами различных уровней при выполнении запроса.

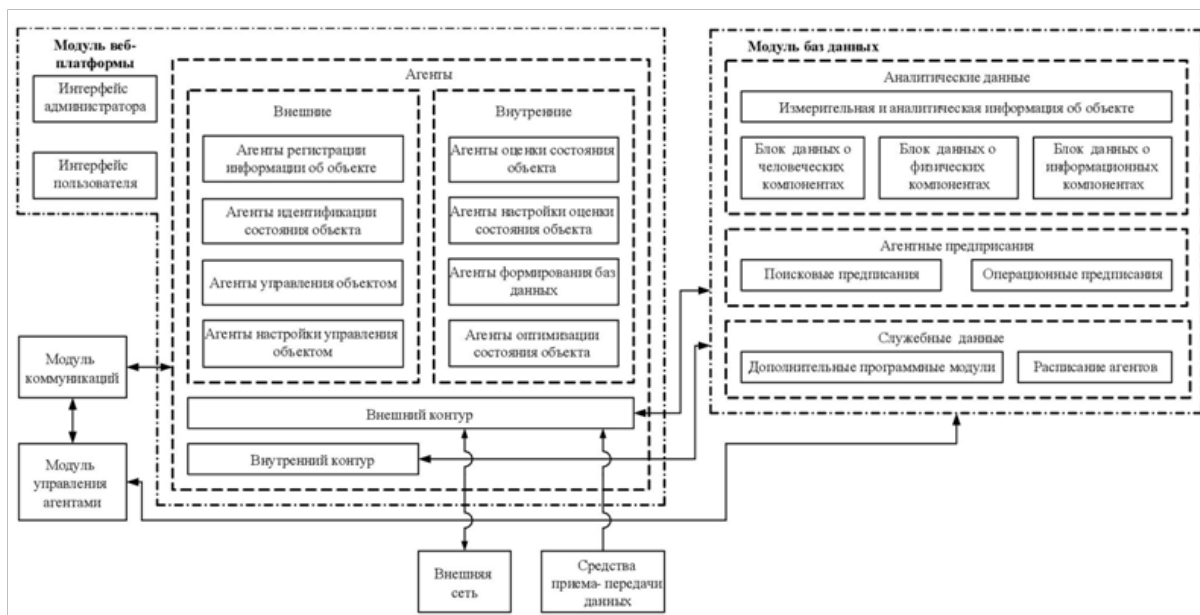


Рисунок 2 – Архитектура мультиагентной подсистемы в составе социо-киберфизической системы

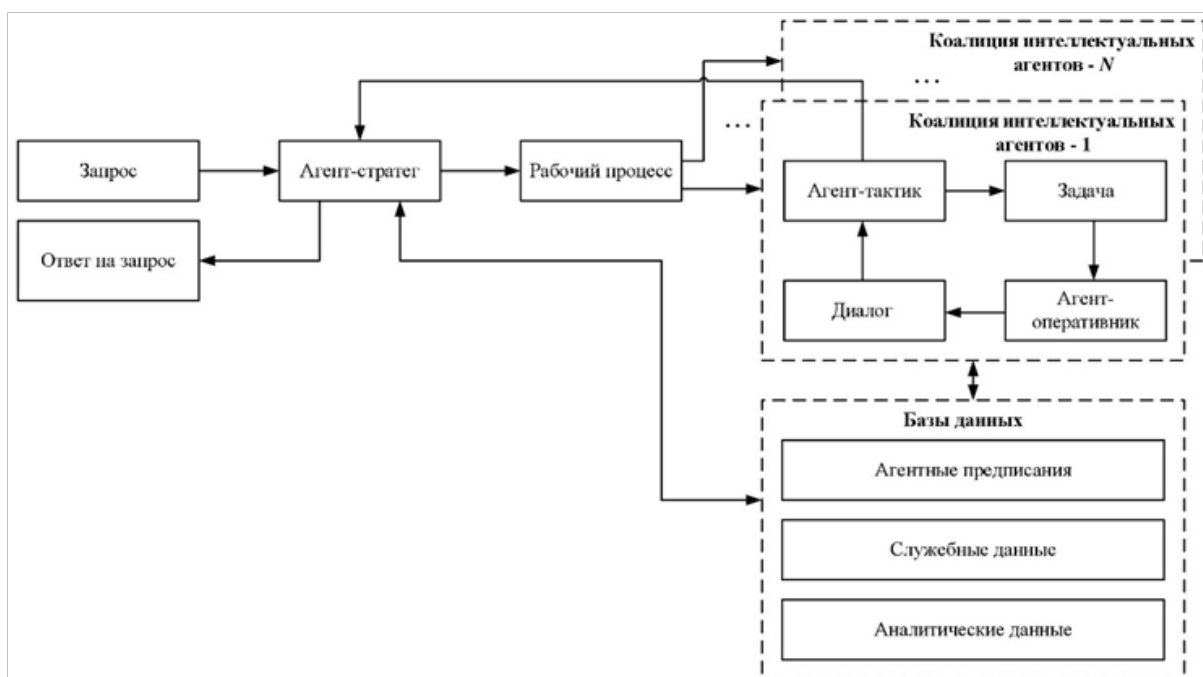


Рисунок 3 – Функциональная схема самореализации мультиагентной подсистемы

Алгоритм работы СКФС, имеющей в составе мультиагентную подсистему, можно описать используя формальный математический аппарат, основу которого составляет вариант темпоральной или динамической логики [14]. В соответствии с формально-логическим описанием определение состояния объекта управления и необходимости его корректировки осуществляется аппаратно-программной реализацией иерархической мультиагентной подсистемы.

Инициация начала работы этой подсистемы происходит либо по запросу оператора системы (автоматизированный режим), либо самой СКФС

(автоматический режим) по заданной программе (табл. 2, 3).

При работе СКФС в автоматизированном режиме необходимость выполнения корректирующего управляющего воздействия подтверждается или отменяется оператором системы. При работе СКФС в автоматическом режиме подтверждение наблюдателя-контролера для выполнения корректирующего управляющего воздействия не требуется.

На рисунке 4 приведена диаграмма взаимодействия интеллектуальных агентов при формировании управляющего воздействия [16].

Таблица 2 – Реализация алгоритма работы мультиагентной подсистемы [15]

Запрос	Определить состояние объекта управления и необходимость его корректировки	
Цель 1	Сформировать иерархическую мультиагентную подсистему, содержащую непустое конечное множество интеллектуальных агентов AG и непустое конечное множество состояний объекта S	$MAS = \{AG, S\}$
Задача 1.1	Сформировать конечное множество интеллектуальных агентов AG , содержащее три непустых подмножества интеллектуальных агентов:	$AG = \{AG^{str}, AG^{takt}, AG^{oper}\}$
	интеллектуальных агентов-стратегов AG^{str}	$AG^{str} = \{ag_i^{str}\}$
	интеллектуальных агентов-тактиков AG^{takt}	$AG^{takt} = \{ag_i^{takt}, \dots, ag_n^{takt}\}$
	интеллектуальных агентов-оперативников AG^{oper}	$AG^{oper} = \{ag_i^{oper}, \dots, ag_m^{oper}\}$
Задача 1.2	Запустить мультиагентную подсистему (интеллектуального агента-стратега) ag_i^{str}	
Задача 1.3	Преобразовать запрос в совокупность задач (сформулировать цели)	$Quest = \{Goal_1, \dots, Goal_x\}$
Задача 1.4	Сформулировать задачи для интеллектуальных агентов-оперативников	$Goal_x = \{task_1, \dots, task_y\}$
Задача 1.5	Разработать план для решения каждой задачи	$Plans = \{Plan_1, \dots, Plan_z\}$
Задача 1.6	Провести моделирование результатов осуществления каждого плана	$Model = \{models model : P_k \times A_{ag_i^{str}} \rightarrow 2^{P_k \times [0,1]}\}$
Задача 1.7	Выбрать план для решения каждой задачи с максимальной вероятностью ее решения	$model : P_k \times A_{ag_i^{str}} \rightarrow 2^{P_k \times [0,1]}$
Задача 1.8	Запустить интеллектуального агента-тактика AG^{takt}	
Задача 1.9	Определить приоритет задачи, принять и обработать запрос на формирование коалиций при невозможности решения задачи одним интеллектуальным агентом-оперативником	$coal : P_k \times task_k \rightarrow 2^{P_k}$
Задача 1.10	Сформировать интеллектуальных агентов-оперативников для решения каждого плана (индивидуально или в составе коалиции интеллектуальных агентов-оперативников)	$AG^{oper} = \{ag_i^{oper}, \dots, ag_m^{oper}\}$
Задача 1.11	Распределить задачи между интеллектуальными агентами-оперативниками или их коалициями	$task = \left\{ \left(task_k, w_k task_k : P_k \rightarrow \right) \right\}$ $\rightarrow [0,1], w_k \in [0, +\infty]$
Задача 1.12	Запустить интеллектуального агента-оперативника AG^{oper}	
Задача 1.13	Определить значения параметров объекта управления, решить поставленную задачу на основе определенных значений в соответствии с планом	$task_k : Plans \times P_k \rightarrow 2^{P_k}$
Задача 1.14	В случае невозможности самостоятельно решить задачу отправить запрос на формирование коалиций для решения задачи	$ag_m^{oper} = \langle ag_m^{oper}, task_y \rangle$
Задача 1.15	Обобщить результаты решения отдельных задач	$task_k : Plans \times P_k \rightarrow 2^{P_k \times [0,1]}$
Задача 1.16	Получить и оценить отчеты о выполнении планов	$plan_k : 2^{Goals} \times Models \rightarrow Plans$
Задача 1.17	Отправить результаты выполнения планов интеллектуальному агенту-стратегу	
Задача 1.18	Обобщить результаты выполнения планов и определить достигнута ли цель	$Goal_k : P_k \rightarrow [0;1]$
Задача 1.19	Оценить состояние объекта управления как	$S = \{S_1, S_2, \dots, S_q\} == S^{FAB} \cup S^{FAB}$
	соответствующее нормативным требованиям и не требующее корректировки	$S = S^{FAB}$
	несоответствующее нормативным требованиям и требующее корректировки	$S = S^{FAB}$
Задача 1.20	Сформировать вектор управляющих воздействий для коррекции состояния объекта управления	$U^0 = \{u_1^0(t), u_2^0(t), \dots, u_p^0(t)\}$

Таблица 3 – Действия интеллектуальных агентов при определении состояния объекта управления и необходимости его корректировки [15]

Цель 2	Определить состояние объекта управления		
Задача 2.1	Выбрать контролируемые параметры состояния объекта управления (либо оператор системы, либо подсистема управления)		
Задача 2.2	Отправить запросы интеллектуальным агентам-оперативникам (интеллектуальным датчикам) о проверке и восстановлении работоспособности		
Задача 2.3	Измерить значения контролируемых параметров состояния объекта управления		
Задача 2.4	Зафиксировать значения контролируемых параметров состояния объекта управления		
Задача 2.5	Отправить запросы интеллектуальным агентам-оперативникам (расчетным модулям программ) о проверке и восстановлении работоспособности		
Задача 2.6	Рассчитать значения контролируемых параметров состояния объекта управления		
Задача 2.7	Зафиксировать значения контролируемых параметров состояния объекта управления		
Задача 2.8	Сформировать матрицу результатов определения состояния объекта управления $Y = \{y_1(t), y_2(t), \dots, y_i(t)\}$ в момент времени t_i		
Задача 2.9	Определить (рассчитать) комплексный показатель состояния многопараметрического объекта управления $\Delta_i(t) = f(Y)$ в момент времени t_i		
Цель 3	Оценить состояние объекта управления		
Задача 3.1	Для каждого контролируемого параметра состояния объекта управления задать предельные (граничные) значения (одно или несколько – при мультиграничном контроле)		
Задача 3.2	Сравнить измеренные и/или рассчитанные значения контролируемых параметров состояния объекта управления с предельными (граничными) значениями		
Задача 3.3	Качественно и количественно оценить и зафиксировать результаты оценки значений контролируемых параметров объекта управления в момент времени t_i		
Задача 3.4	Качественно и количественно оценить и зафиксировать результаты оценки значения комплексного показателя состояния многопараметрического объекта управления в момент времени t_i		
Цель 4	Определить необходимость корректировки состояния объекта управления		
Задача 4.1	Задать целевую функцию для оптимальной корректировки состояния объекта управления		
	4.1.1 по одному значимому параметру состояния объекта управления	4.1.2 по совокупности параметров состояния объекта управления	4.1.3 по комплексному показателю состояния многопараметрического объекта управления
Задача 4.2	Сформировать вектор управляющих воздействий $U^0 = \{u_1^0(t), u_2^0(t), \dots, u_p^0(t)\}$ при котором целевая функция имеет наилучшее значение		
	4.2.1 $\ U^0 - U\ \rightarrow \min.$	4.2.2 $F = \{U^1, U^2, \dots, U^i\} \rightarrow \min;$ или $F = \{U^1, U^2, \dots, U^i\} \rightarrow \max.$	4.2.3 $\ \Delta^0 - \Delta\ \rightarrow \min.$

Обсуждение. В таблице 2 приведен пример реализации алгоритма работы мультиагентной подсистемы. Запрос формулируется как «Определить состояние объекта управления и необходимость его корректировки» и разбивается на группы задач. Последовательно-параллельное достижение цели приводит либо к подтверждению сохранения состояния объекта управления, либо к формированию управляющего воздействия корректирующего состояние объекта управления.

По описанному в таблице 2 алгоритму работы мультиагентной подсистемы при выполнении запроса «Определить состояние объекта управления и необходимость его корректировки» интеллек-

туальные агенты последовательно-параллельно решают три группы задач достигая поставленные цели (цель 2, цель 3, цель 4). Достижение этих целей приводит либо к подтверждению сохранения состояния объекта управления, либо к формированию управляющего воздействия корректирующего состояние объекта управления (см. таблицу 3).

Диаграмма взаимодействия интеллектуальных агентов наглядно иллюстрирует последовательность и очередность их действий и показывает, как:

– при работе интеллектуального агента-стратега происходит переработка запроса лица, принимающего решения в цель работы мультиагентной подсистемы, как цель разбивается на задачи и для

- при работе интеллектуального агента-оперативника решаются задачи и как для их скорейшего решения выполняются операции клонирования и объединения в коалиции, что повышает вероятность и скорость решения задач.



Выводы. В статье представлен новый подход к мониторингу и управлению объектами на основе СКФС, позволяющей объединить в единое целое информационные, физические и человеческие компоненты. В работе введены определения компонентов СКФС, представлена их классификация по степени взаимодействия человека с информационными и физическими компонентами. Приведена общая структурная схема СКФС. Предложены архитектура мультиагентной подсистемы в составе социо-киберфизической системы и функциональная схема самореализации мультиагентной подсистемы. Показано, что необходимость создания мультиагентной подсистемы продиктована изменением места и роли человека в технологической цепочке как важнейшим фактором при разработке систем управления.

Таким образом, разработана СКФС мониторинга и управления на основе мультиагентной технологии. Применение мультиагентной технологии позволяет при интеллектуальной обработке данных:

- оптимизировать процессы мониторинга и управления за счет иерархии интеллектуальных агентов;
- сократить время обработки данных за счет клонирования агентов и параллельных вычислений;
- повысить точность обработки данных за счет использования цифрового двойника объекта и его оптимизационной модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Пешкин, К.С. Назначение и перспективы развития киберфизических систем управления технологическими процессами // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2023. – №1 (77). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/naznachenie-i-perspektivy-razvitiya-kiberfizicheskikh-sistem-upravleniya-tehnologicheskimi-protsessami> (дата обращения: 04.10.2024).
2. Юдина, М.А. Индустрия 4. 0: перспективы и вызовы для общества // Государственное управление. Электронный вестник. 2017. №60. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/industriya-4-0-perspektivy-i-vyzovy-dlya-obschestva> (дата обращения: 04.10.2024).
3. Степановская, И.А. Управление развитием крупномасштабных систем на цифровой платформе социо-киберфизических систем / И.А. Степановская, А.Д. Цвиркун // Управление развитием крупномасштабных систем mlsd'2020: Труды тринадцатой Международной конференции, Москва, 28-30 сентября 2020 года / Под общей редакцией С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. – Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2020. – С. 1747-1752. – DOI 10.25728/mlsd.2020.1747.
4. Балюк, А.А. Многоагентная аутентификация цифровых двойников в киберфизических системах / А.А. Балюк, О.А. Финько // Вопросы кибербезопасности. – 2022. – № 5(51). – С. 100-113. – DOI 10.21681/2311-3456-2022-5-100-113.
5. Рогозинский Г.Г. Киберфизические объекты и их модели для мультисенсорного представления данных / Г.Г. Рогозинский // Т-сomm: Телекоммуникации и транспорт. – 2017. – Т.11, № 11. – С. 68-73.
6. Смышляева, А.А. Современные технологии в Индустрии 4.0 – киберфизические системы / А.А. Смышляева, К.М. Резникова, Д.В. Савченко // Интернет-журнал «Отходы и ресурсы», 2020. – №3. <https://resources.today/PDF/02INOR320.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/02INOR320.
7. Куприяновский, В.П. Киберфизические системы как основа цифровой экономики / В.П. Куприяновский, Д.Е. Намиот, С.А. Синягов // International Journal of Open Information Technologies. – 2019. – № 4. – С. 31-42.
8. Бурков В.Н. и др. Механизмы управления: Управление организацией: планирование, организация, стимулирование, контроль. / Под ред. Новикова Д.А. – М.: Ленанд, 2013. – 216 с.
9. Modi P.J. et al. An asynchronous complete method for distributed constraint optimization // AAMAS. – 2003. – V. 3. – P. 161-168.
10. Безбородова, О.Е. Мультиагентные технологии в медицинских информационных системах / О.Е. Безбородова, М.Н. Крамм, К.А. Ожикенов, А.К. Ожикенова / под редакцией О.Н. Бодина. – Алматы: Лантар Трейд, 2021. – 314 с.
11. Безбородова, О.Е. Мультиагентная обработка данных мониторинга территориальной техносферы / О.Е. Безбородова // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2022. – № 3. – С. 20-28. – DOI: 10.21685/2307-5538-2022-3-2.
12. Безбородова О.Е. Иерархическая структура мультиагентной системы / О.Е. Безбородова // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2022. – № 2. – С. 29-38. – DOI: 10.21685/2307-5538-2022-2-4.
13. Паршаков, С.И. Основы управления техническими процессами и системами: учебное пособие / С.И. Паршаков, М.В. Ерпалов; научный редактор Ю.В. Инарович; Министерство образования и науки Российской Федерации, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2017. – 148 с.
14. Emerson E.A. Temporal and modal logic // Handbook of Theoretical Computer Science. Amsterdam: North-Holland Pub. Co., 1990. Vol. B: Formal Models and Semantics. – P. 995-1072.
15. Безбородова О.Е. Разработка методологии информационно-измерительной системы определения экологического благополучия человека: дис. ... докт. техн. наук. – Пенза, 2023. – Режим доступа: https://dissov.pnzgu.ru/files/dissov.pnzgu.ru/2023/bezborodova/dissertaciya_bezborodovoy_o_e.pdf.
16. Bezborodova O.E. Improving data collection and processing efficiency by using hierarchies of intelligent agents in multi-agent systems / O.E. Bezborodova, O.N. Bodin, D.V. Paschenko // 2021 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1061 012009.

Статья поступила в редакцию 19.10.2024

Статья принята к публикации 13.12.2024