Вестник Череповецкого государственного университета. 2025. № 1 (124). С. 46–58.
Cherepovets State University Bulletin, 2025, no. 1 (124), pp. 46–58.

Научная статья
УДК 681.518.5
https://elibrary.ru/knagby
https://doi.org/10.23859/1994-0637-2025-1-124-4

Модернизация системы управления объектом теплоснабжения с использованием агентно-ориентированного подхода

Михаил Андреевич Макаровский[1]✉, **Анатолий Николаевич Швецов**[2]✉
[1,2] Вологодский государственный университет,
Вологда, Россия
[1]✉makarovskiima@vogu35.ru, https://orcid.org/0009-0008-8765-1370
[2]✉smithv@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8297-8077

Аннотация. Разработана SCADA-система для управления и мониторинга теплотехнического оборудования газовой котельной в реальном времени. Представлены архитектура системы и основные характеристики контрольно-измерительных приборов, силового и вспомогательного оборудования. Показана схема размещения оборудования автоматизации и объектов котельной, а также схема визуализации производственного процесса. Применен мультиагентный подход для профилактики и ремонта оборудования.
Ключевые слова: АСУТП, SCADA, температура, давление, визуализация, интерфейс, протокол, мнемосхема, мультиагентный подход
Для цитирования: *Макаровский М. А., Швецов А. Н.* Модернизация системы управления объектом теплоснабжения с использованием агентно-ориентированного подхода // Вестник Череповецкого государственного университета. 2025. № 1 (124). С. 46–58. https://doi.org/10.23859/1994-0637-2025-1-124-4; EDN: KNAGBY

Modernization of the heat supply facility management system applying an agent-based approach

Mikhail A. Makarovskiy [1]✉, **Anatoly N. Shvetsov** [2]✉
[1,2] Vologda State University,
Vologda, Russia
[1]✉makarovskiima@vogu35.ru, https://orcid.org/0009-0008-8765-1370
[2]✉smithv@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8297-8077

Abstract. A SCADA system has been developed for controlling and monitoring the heating equipment of a gas boiler house in real time. The authors present the system architecture and the main characteristics of instrumentation, power and auxiliary equipment. A layout diagram of automation equipment and boiler room facilities is shown, as well as a visualization diagram of the production process. The authors also applied a multi-agent approach for equipment prevention and repair.

© Макаровский М. А., Швецов А. Н., 2025

Keywords: Automated control system, SCADA, temperature, pressure, visualization, interface, protocol, mnemonic circuit, multi-agent approach
For citation: Makarovskiy M. A., Shvetsov A. N. Modernization of the heat supply facility management system applying an agent-based approach. *Cherepovets State University Bulletin*, 2025, no. 1 (124), pp. 46–58. (In Russ.) https://doi.org/10.23859/1994-0637-2025-1-124-4; EDN: KNAGBY

Введение

В современном мире ключевую роль в национальной экономике страны играет теплоснабжение. Надежная и стабильная работа системы теплоснабжения является неотъемлемым условием для бесперебойного снабжения энергией потребителей. Однако большинство существующих газовых котельных физически устарели, их технико-экономические показатели оставляют желать лучшего, а отсутствие автоматизированных систем управления приводит к ограничениям в снабжении тепловой энергией районов с высокой нагрузкой. В свете этих факторов предприятиям необходимо уделять особое внимание автоматизации и диспетчеризации котельных, а также системе технического ремонта и обслуживания оборудования.

Процесс работы газовых отопительных инженерных сооружений первой категории осуществляется по следующему плану[1]. Вода, необходимая для работы котельного цеха, поступает из городского водоснабжения. Для того, чтобы предотвратить возможные утечки, она накапливается в специальных баках. Затем вода направляется в трубчатую рубашку водоподогревателя, где происходит теплообмен с нагретой сетевой водой. В результате этого процесса температура воды повышается, и она становится пригодной для использования персоналом в собственных нуждах. Одновременно с этим в катионитовых фильтрах происходит важный процесс деаэрации. Деаэрация представляет собой очищение подпитывающей воды от газовой смеси, которая может привести к разрушению металлических труб и конструкции в результате окисления. Деаэраторы имеют функцию сбережения, т. е. в них хранится химически очищенная вода для будущего использования. Также из солерастворителя поступает солевой раствор на вводы деаэраторов. Для эффективной работы котла необходима автоматика, которая контролирует процесс нагрева и поддерживает оптимальные условия работы. Для обеспечения питания котла используется газообразное топливо. Природный газ, поступающий из городской газораспределительной станции, проходит через газорегуляторные установки, которые снижают его давление. Затем газ по трубопроводу доставляется к горелкам котла, где он смешивается с воздухом, подаваемым в топочные камеры с помощью вентиляторов. Это смешение газа и кислорода с последующим сгоранием обеспечивает нагрев теплоносителя. Однако при сгорании газа выделяются вредные для здоровья человека продукты сгорания. Для их удаления из системы используются дымососы, которые отводят их через дымовую трубу. Это позволяет минимизировать воздействие вредных веществ на окружающую среду и обеспечить безопасную эксплуатацию системы. Для эффек-

[1] Боровков В. М., Калютик А. А., Сергеев В. В. Теплотехническое оборудование. Москва: Академия, 2015. 191 с.

тивной работы теплофикационной системы также необходимо обеспечить подачу дополнительной очищенной воды. Это осуществляется через подпиточную станцию, которая подает воду в обратную трубу тепловой сети. Сетевые насосы, в свою очередь, способствуют движению жидкости в котлы и далее по магистрали, обеспечивая равномерное распределение тепла. Из солерастворителя солевой раствор поступает на вводы деаэраторов. Далее с помощью подпиточной станции очищенная вода поступает в обратную трубу тепловой сети, а сетевые насосы способствуют движению теплоносителя через котлы и по магистрали. В котлах происходит нагрев воды. Для эффективной работы котла необходима автоматика, которая контролирует процесс нагрева и поддерживает оптимальные условия работы. Для обеспечения питания котла используется газообразное топливо. Природный газ, поступающий из городской газораспределительной станции, проходит через газорегуляторные установки, которые снижают его давление. Затем газ по трубопроводу доставляется к горелкам котла, где он смешивается с воздухом, подаваемым в топочные камеры с помощью вентиляторов. Горячая очищенная вода под давлением движется по отопительным контурам и отдает тепло потребителям, остывает и по обратным трубам возвращается в котлы для нагрева. Происходит повторение цикла.

При существующем управлении технологическим процессом с помощью традиционной автоматики возникают следующие проблемы: диспетчер узнает о случившемся спустя длительный промежуток времени, так как оператор передает информацию с помощью телефонной связи из-за отсутствия беспроводного соединения между котельной и диспетчерской; регистрация событий оформляется в письменном виде, электронный журнал в котельной и диспетчерской зачастую отсутствует; избыточное количество силового и вспомогательного оборудования вынуждают оператора передвигаться по цеху, чтобы зафиксировать конкретный параметр, поскольку у оператора на его рабочем месте нет доступа ко всем параметрам в электронном виде.

При исследовании области эксплуатации технического оборудования необходимо выделить основные стратегии ремонта: аварийно-восстановительный ремонт, планово-предупредительный ремонт, ремонт по техническому состоянию.

Стратегия аварийно-восстановительного ремонта играет важную роль в обслуживании промышленного оборудования. Она помогает восстановить работоспособность механизмов после их отказа, позволяя максимально использовать ресурсы оборудования. Однако, несмотря на ее преимущества, она также сопровождается частыми и продолжительными остановками технологических процессов, которые могут привести к финансовым потерям и затратам на ремонт. Основная идея стратегии аварийно-восстановительного ремонта заключается в том, чтобы продолжать работу основного оборудования в случае отказа некритических механизмов. Это позволяет избежать полной остановки технологических процессов и сохранить ритм производства.

Стратегия планово-предупредительного ремонта является важным аспектом обеспечения эффективной работы оборудования и минимизации простоев. Она основывается на выполнении профилактических мероприятий в строго определенные сроки, соответствующие установленной структуре ремонтного цикла. Периодич-

ность проведения профилактических работ является одной из ключевых составляющих этой стратегии. Регулярное техническое обслуживание и проверка оборудования позволяют выявлять потенциальные проблемы и устранять их до того, как они приведут к серьезным поломкам или остановке работы. Такой подход помогает предотвратить возможные аварии и значительно сократить время, потраченное на ремонт. Важным элементом стратегии являются типовые объемы работ по техническому обслуживанию и ремонту. Они включают в себя текущий, средний и капитальный ремонт. Также учитываются трудовые и материальные затраты, необходимые для проведения профилактических мероприятий.

Стратегия профилактики по техническому состоянию является важным аспектом обеспечения надежности работы оборудования. Она основана на применении различных методов и средств технической диагностики, которые позволяют контролировать изменения параметров оборудования, влияющих на его работоспособность. Одним из основных преимуществ такой стратегии является возможность непрерывного или дискретного контроля за состоянием оборудования. Когда параметры оборудования достигают предельного состояния, проводится ремонт, чтобы избежать возможных проблем в будущем. Это позволяет снизить вероятность аварийных ситуаций, увеличить надежность работы и продлить срок службы оборудования.

Основная часть

Предлагаемым решением представленных выше проблем является внедрение SCADA-системы, которая обеспечивает взаимодействие программного обеспечения и оборудования с целью контроля за состоянием всего технологического процесса[1]. SCADA-система позволит в режиме реального времени получать информацию обо всем оборудовании котельной на мониторе оператора, что позволяет оперативно реагировать на различного рода ситуации и принимать необходимые меры для их решения. Внедрение базы данных и электронного журнала упростит детальную запись о происходящих событиях, а также будет способствовать более точному анализу и поиску информации в будущем.

Система управления разработана как трехуровневая иерархическая система[2], которая представлена в виде структурной схемы на рис. 1.

[1] Бакаев В. Н. Моделирование систем. Вологда: Вологодский государственный технический университет, 2013. 159 с.

[2] Макаровский М. А. Разработка SCADA-системы для котельного оборудования // XV Ежегодная научная сессия аспирантов и молодых ученых (г. Вологда, 23 ноября 2021 г.). Вологда: Вологодский государственный университет, 2021. С. 149–152. EDN: WULBEZ

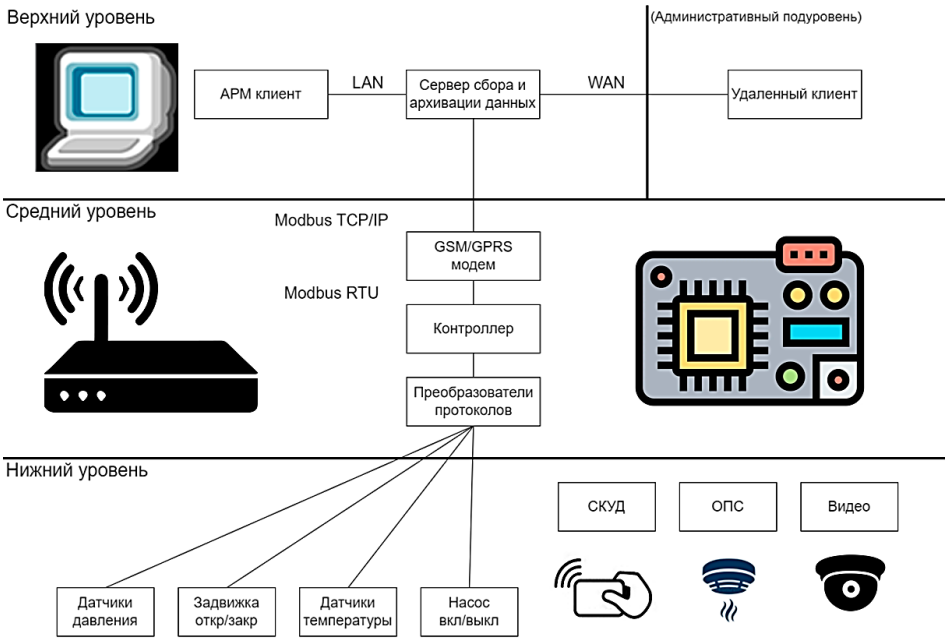

Рис. 1. Структурная схема SCADA-системы

Нижний, или полевой, уровень SCADA-системы осуществляет сбор данных о параметрах технологического процесса и реализует управляющие воздействия. Основным техническим оборудованием на этом уровне являются контрольно-измерительные приборы, преобразователи и датчики, а также исполнительные механизмы и преобразователи частоты. Определение физических величин и реализация управляющего воздействия являются их главной задачей.

Средний уровень SCADA-системы принимает информацию с нижнего уровня и передает его на верхний или принимает управляющее воздействие с верхнего и передает на полевой уровень. Техническое оборудование представляют программируемые логические контроллеры, интерфейсы обмена данных и их преобразователи, сетевое вспомогательное оборудование.

Верхний уровень SCADA-системы работает с информацией, полученной от предыдущего уровня, а именно осуществляет ее сбор, хранение, обработку и визуализацию. Реализуется на базе персонального компьютера, серверов и сетевого оборудования для доступа из диспетчерской, а также дополнительных устройствах слежения за процессом.

Оборудование и программное обеспечение SCADA-системы, применяемой с целью автоматизации городских газовых котельных, должно отвечать следующим техническим требованиям: разработка человеко-машинного интерфейса обеспечивается простотой и удобством; подключение и осуществление диагностики между оборудованием производится автоматически, после устранения аварии в энергосистеме; измерение, обработка и сохранение информации осуществляется регулярно; управ-

ляющее воздействие происходит с высокой точностью; имеются перспективы для модернизации всей системы.

На рынке существует различное множество зарубежных и отечественных SCADA-систем. Они имеют аналогичные функции и свойства, но разработаны под конкретные системы, поэтому выбор подходящей SCADA-системы может оказаться сложной задачей. Одним из популярных отечественных программно-аппаратных комплексов является MasterSCADA 4D от компании «ИнСАТ»[1]. Ключевыми особенностями данного комплекса являются: объектный подход, который позволяет настроить объект под конкретную задачу; совместимость с большим количеством оборудования, которое используется на газовых котельных; встроенная библиотека направлена на создание человеко-машинного интерфейса для котельной; совместимость с популярными СУБД; наличие оборудования для модернизации.

На инженерно-техническом объекте, расположенном в городе Вологде, был проведен анализ установленного и внедряемого оборудования, которое имеет совместимость с программно-аппаратным комплексом MasterSCADA и удовлетворяет существующим условиям, при которых необходимо решать задачи импортозамещения и конкретных технических требований.

В качестве основного управляющего устройства выступает программируемый логический контроллер отечественной фирмы «ОВЕН» модели ПЛК110-220.30.P-MS4-3[M02], который поддерживает передачу информации используемыми интерфейсами и протоколами данных. Измерение давления воды осуществляется при помощи преобразователя давления фирмы «ОВЕН» модели ПД100-ДИ, диапазон рабочего давления от 0,016 до 40 МПа. Непрерывное измерение давления газа осуществляется с помощью преобразователя давления фирмы «Метран» модели 55-ДИ18, который имеет рабочий диапазон от 0,25 до 2,5 МПа. Измерение температуры воды и дымовых газов в котле осуществляют датчики температуры ДТС 095-50М.В3.100, которые имеют рабочее давление от 0,4 до 10 МПа. Фотоэлектронные сигнализаторы модели ФСП 1.2 прослеживают присутствие пламени на горелках котла. Для непрерывного измерения давления воздуха и его разрежения в котле используются модели АДН-50.2 и АДР-50.2, которые имеют диапазоны измерения от -50 до 50 кПа. Расходомеры электромагнитные фирмы «ВТК» модели РСЦ имеют рабочие давление от 0 до 2,5 МПа. Насосы и преобразователи частоты фирмы “Wilo” и “OMRON” работают с номинальной мощностью от 11 до 30 кВт.

От корректного размещения оборудования зависят мотивация, безопасность и эффективность работы персонала котельной. Невыполнение норм и правил размещения оборудования приводит к травматизму и загромождению производственного помещения.

План размещения технического оборудования изображен на рис. 2.

[1] ИнСАТ. URL: https://www.insat.ru (дата обращения: 03.11.2023).

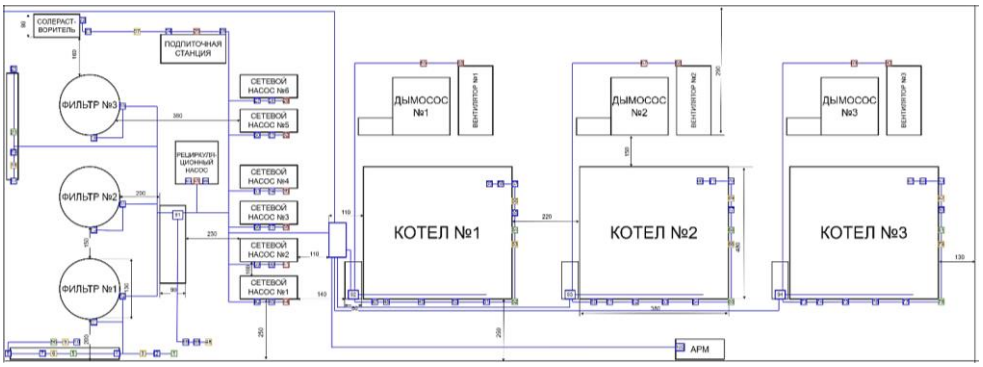

Рис. 2. Схема размещения оборудования

Каждому техническому элементу автоматизации соответствует свой номер и цвет на рис. 2, их обозначения занесены в табл. 1.

Таблица 1

Перечень оборудования на рисунке 2

Номер	Перечень оборудования
1, 5, 20, 98	РСЦ на вводе водопровода
2, 4, 7, 8, 17, 19, 21, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 22, 23, 24, 26, 98, 99, 48, 49, 50, 51, 61, 62, 63, 64, 74, 75, 76, 77, 58, 71, 84, 95, 96, 97, 27, 28, 30, 31, 33, 34, 36, 37, 39, 40, 42, 43	ПД-100 ДИ
3, 6, 9, 18, 46, 56, 69, 82, 53, 66, 79	ДТС 095-50М.В3.100.1 на вводе водопровода
10	АИР-20/М2-ДА
52, 65, 78	АИР-20/М2-ДИ
55, 68, 81	АИР-20/М2-ДД
97	АИР-20/М2-ДГ
25	МН1-405/ЕР
29, 32, 35, 38, 41, 44	Е-9Р-030Т4Х
45	ATV212HD11N4
85, 87, 89	Е-9Р-022Т4Х
86, 88, 90	Е-9Р-011Т4Х
91, 92, 93, 94	ПЛК110-220.30.Р-MS4-3 [М02] в щитах автоматики
59	Распределительный щит управления питанием

Продолжение таблицы 1

Номер	Перечень оборудования
100	Автоматизированное рабочее место и EKI-1222I
47, 60, 73	Метран-55-ДИ 518
54, 67, 80	АДН-50.2 на каждом котле
57, 70, 83	АДР-50.2 на каждом котле
100	Рабочее место оператора

Схема подключения оборудования автоматизации изображена на функциональной схеме на рис. 3. К программируемому логическому контроллеру подключены датчики и преобразователи частоты по интерфейсу RS-485, использующие протокол Modbus, сигнал передается в обоих направлениях. Топология сети выражена в виде длинной линии, к которой в разных местах подключены устройства КИП. Реле контроля состояний и сигнализаций котла присоединены к дискретным входам и выходам. Преобразователь протоколов объединяет все программируемые логические контроллеры и подсоединяется к персональному компьютеру оператора. Далее информация о котельной по сети GSM передается в диспетчерский пункт. В программном обеспечении MasterPLS Designer создается программа работы, а затем она загружается в контроллер.

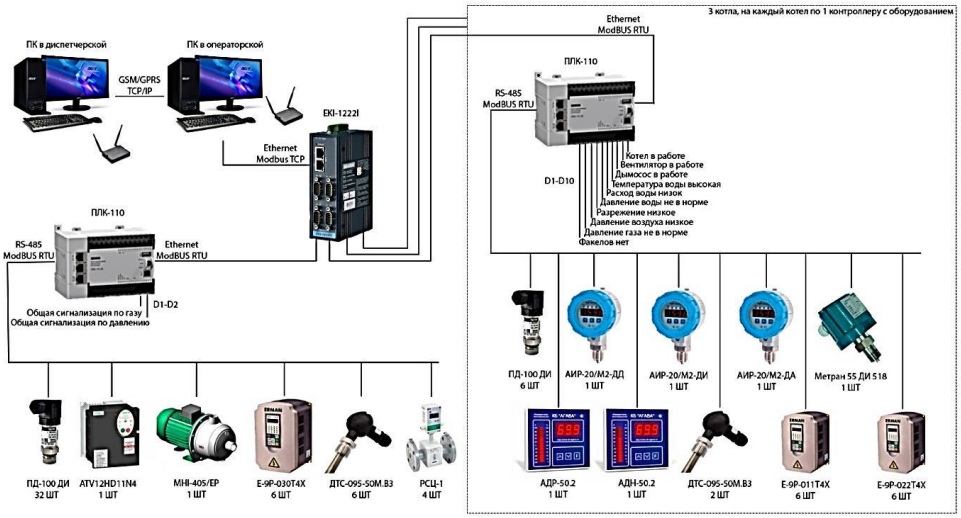

Рис. 3. Функциональная схема

Корректно сконфигурированный и введенный в эксплуатацию человеко-машинный интерфейс предоставляет возможность управления и наблюдения за технологическим процессом[1]. Мнемосхема позволяет следить за состоянием устройств КИП, а также за их параметрами: давлением, температурой теплоносителя и газов, скоростью вращения электродвигателя насоса, вентиляторов и дымососов. Мнемосхема должна быть понятна и удобна для взаимодействия с оператором и старшим персоналом котельной[2].

Разработанная мнемосхема в программном обеспечении MasterSCADA 4D показана на рис. 4.

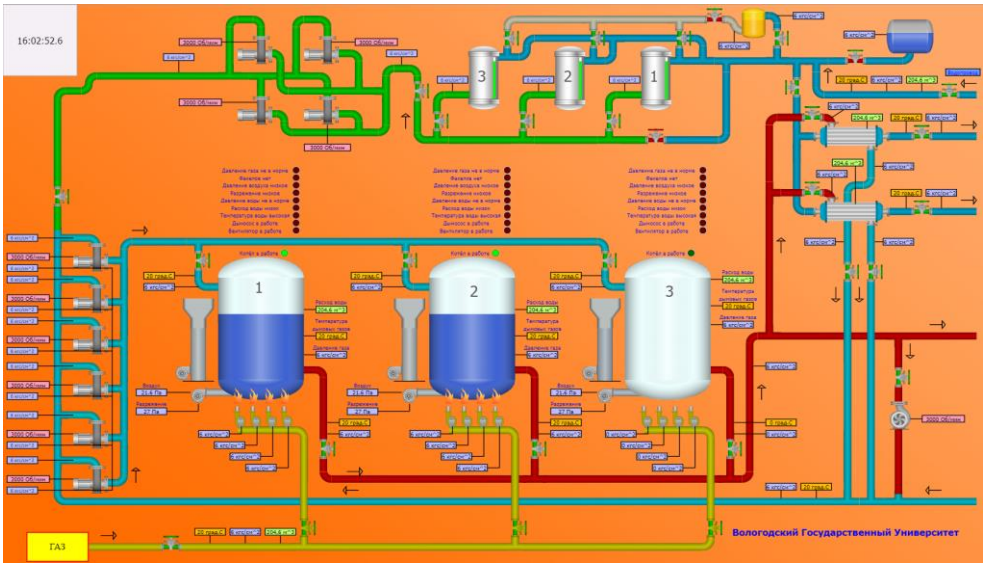

Рис. 4. Мнемосхема

Для более эффективного функционирования SCADA-системы необходимо постоянно контролировать состояние самого оборудования автоматизации. Одним из перспективных направлений исследования сложных систем является мультиагентный подход, который использует представления систем в виде совокупностей независимых агентов, способных взаимодействовать друг с другом и с окружающей средой.

[1] Kamizi S. A. UI/UX of Human-Machine Interface for Industrial Application: Review and Preleminary Design // FCSIT UNIMAS FYP Symposium (Malaysia, January, 2021). P. 1–4.

[2] Qasim I., Anwar M. W., Azam F., Tufail H., Halder W., Zafar M. N. A Model-Driven Mobile HMI Framework (MMHF) for Industrial Control Systems // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 10827–10846. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2965259

В контексте АСУТП каждый агент может быть специализирован на определенном компоненте системы[1], и его задача – воспринимать и передавать информацию о состоянии оборудования с минимальными усилиями со стороны человека[2].

Применительно к данной задаче спроектирована мультиагентная система для сбора данных и извлечения знаний, структура которой изображена на рис. 5.

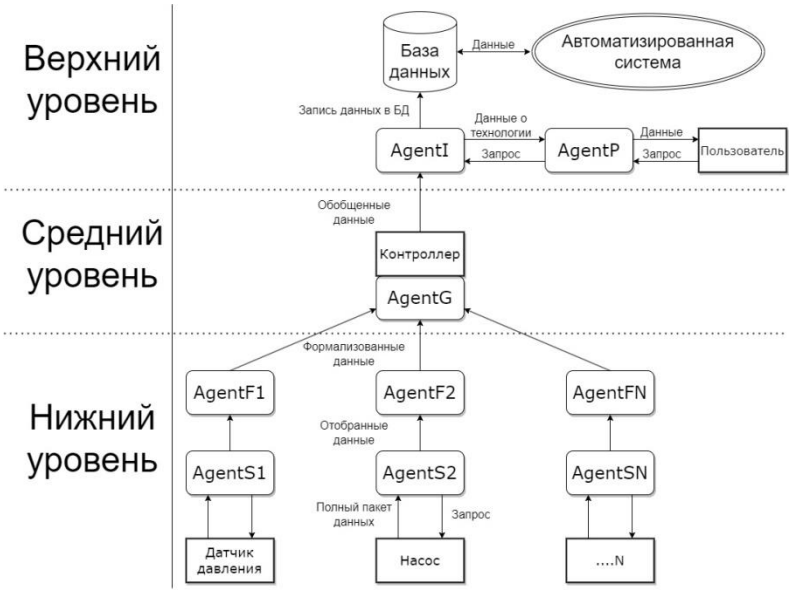

Рис. 5. Взаимодействие агентов в системе

SCADA-система построена на базе трех уровней, мультиагентная система выстроена по такому же принципу, каждый из уровней включает своих агентов со своими задачами. $\mathrm{AgentS} = \{\mathrm{AgentS_i}/\mathrm{i} = 1 \dots \mathrm{n}\}$ настроен на конкретный датчик, собирает всю информацию и отбирает только ту, которая соответствует заданному критерию. $\mathrm{AgentF} = \{\mathrm{AgentF_i}/\mathrm{i} = 1 \dots \mathrm{n}\}$ приводит отобранные данные к унифицированному виду. $\mathrm{AgentG} = \{\mathrm{AgentG_i}/\mathrm{i} = 1 \dots \mathrm{n}\}$ обобщает полученные данные. $\mathrm{AgentI} = \{\mathrm{AgentI_i}/\mathrm{i} = 1 \dots \mathrm{n}\}$ занимается организацией взаимодействия пользовательских данных. $\mathrm{AgentP} = \{\mathrm{AgentP_i}/\mathrm{i} = 1 \dots \mathrm{n}\}$ задает общие методы и данные для всех сборщиков информации.

[1] Швецов А. Н. Суконщиков А. А., Кочкин Д. В., Андрианов И. А. Ситуационные интеллектуальные системы поддержки принятия решений. Курск: Университетская книга, 2018. 251 с.

[2] Дианов С. В., Швецов А. Н. Синтез агент-ориентированных моделей для поддержки принятия решений по управлению промышленным предприятием // Автоматизация и энергосбережение в машиностроении, энергетике и на транспорте: материалы XVI Международной научно-технической конференции (г. Вологда, 8 декабря 2021 г.). Вологда: Вологодский государственный университет, 2022. С. 208–212.

Агентно-функциональная схема на рис. 6 показывает характерные объекты теплотехнического оборудования. Создана сеть агентов, которые могут обмениваться информацией о состоянии оборудования на всех уровнях АСУТП. Состояние каждого датчика на котле оценивает свой агент, передавая далее информацию агенту, отвечающему за программируемый логический контроллер. Прочие агенты на других объектах системы, таких как подпиточная станция, газораспределительный пункт, водоподготовка, сетевые насосы и сеть трубопроводов действуют по такому же принципу. С контроллеров агент передает информацию на автоматизированное рабочее место оператора и в диспетчерскую, где проводится анализ и решение последующих задач.

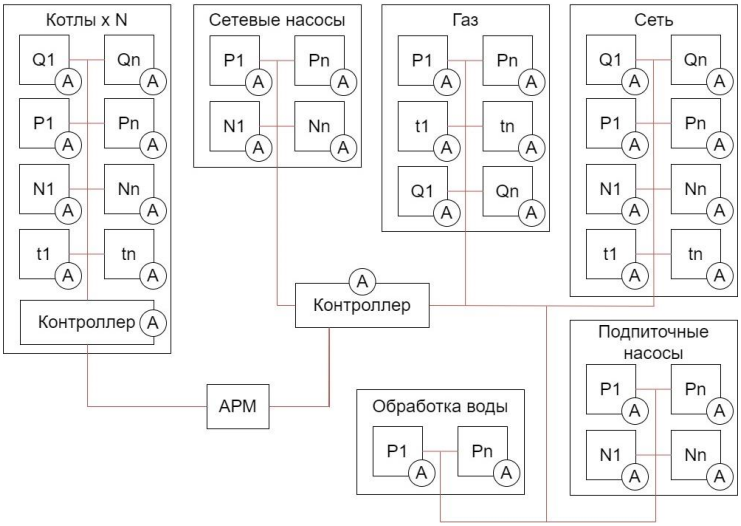

Рис. 6. Агентно-функциональная схема:
Q, P, N, t – датчики, A – агенты, АРМ – автоматизированное рабочее место

Выводы

Основной целью представленного исследования была разработка SCADA-системы, которая позволит существенно сократить время и ресурсы, необходимые для поиска утечек и предотвращения аварий на котельных. Применение мультиагентного подхода в данной системе позволит оперативно обнаруживать неисправности и предотвращать возможные поломки, что, в свою очередь, повысит эффективность работы системы и снизит затраты на обслуживание.

Список литературы / References

Бакаев В. Н. *Моделирование систем*. Вологда: Вологодский государственный технический университет, 2013. 159 с.

Bakaev V. N. *Modeling of systems*. Vologda: Vologodskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2013. 159 p. (In Russ.)

Боровков В. М., Калютик А. А., Сергеев В. В. *Теплотехническое оборудование*. Москва: Академия, 2015. 191 с.

Borovkov V. M., Kalyutik A. A., Sergeev V. V. *Heat engineering equipment*. Moscow: Akademiia, 2015. 191 p. (In Russ.)

Дианов С. В., Швецов А. Н. Синтез агент-ориентированных моделей для поддержки принятия решений по управлению промышленным предприятием. *Автоматизация и энергосбережение в машиностроении, энергетике и на транспорте*: *материалы XVI Международной научно-технической конференции (г. Вологда, 8 декабря 2021 г.).* Вологда: Вологодский государственный университет, 2022, с. 208–212. EDN: ZMSOPA

Dianov S. V., Shvetsov A. N. Synthesis of agent-oriented models to support decision-making on industrial enterprise management. *Automation and energy saving in mechanical engineering, energy and transport*. *Proceedings of XVI International Scientific and Technical Conference (Vologda, December 8, 2021).* Vologda: Vologodskii gosudarstvennyi universitet, 2022, pp. 208–212. (In Russ.) EDN: ZMSOPA

ИнСАТ. URL: https://www.insat.ru (дата обращения: 03.11.2023).

InSAT. Available at: https://www.insat.ru (accessed: 03.11.2023). (In Russ.)

Макаровский М. А. Разработка SCADA-системы для котельного оборудования. *XV Ежегодная научная сессия аспирантов и молодых ученых (г. Вологда, 23 ноября 2021 г.).* Вологда: Вологодский государственный университет, 2021, с. 149–152. EDN: WULBEZ

Makarovskiy M. A. Development of a SCADA system for boiler equipment. *XV Annual scientific session of postgraduate students and young scientists (Vologda, November 23, 2021).* Vologda: Vologodskii gosudarstvennyi universitet, 2021, pp. 149–152. (In Russ.) EDN: WULBEZ

Швецов А. Н. Суконщиков А. А., Кочкин Д. В., Андрианов И. А. Ситуационные интеллектуальные системы поддержки принятия решений. Курск: Университетская книга, 2018. 251 с.

Shvetsov A. N. Sukonshchikov A. A., Kochkin D. V., Andrianov I. A. *Situational intelligent decision support systems*. Kursk: Universitetskaia kniga, 2018. 251 p. (In Russ.)

Kamizi S. A. UI/UX of Human-Machine Interface for Industrial Application: Review and Preliminary Design. *FCSIT UNIMAS FYP Symposium (Malaysia, January 2021)*, pp. 1–4.

Qasim I., Anwar M. W., Azam F., Tufail H., Halder W., Zafar M. N. A Model-Driven Mobile HMI Framework (MMHF) for Industrial Control Systems. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 10827–10846. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2965259

Сведения об авторах

Михаил Андреевич Макаровский – аспирант; https://orcid.org/0009-0008-8765-1370, makarovskiima@vogu35.ru, Вологодский государственный университет (д. 15, ул. Ленина, 160000 Вологда, Россия); **Mikhail A. Makarovskiy** – Postgraduate Student, https://orcid.org/0009-0008-8765-1370, makarovskiima@vogu35.ru, Vologda State University (15, ul. Lenina, 160000 Vologda, Russia).

Анатолий Николаевич Швецов – доктор технических наук, профессор; https://orcid.org/0000-0001-8297-8077, smithv@mail.ru, Вологодский государственный университет (д. 15, ул. Ленина, 160000 Вологда, Россия); **Anatoly N. Shvetsov** – Doctor of Technical Sciences, Professor, https://orcid.org/0000-0001-8297-8077, smithv@mail.ru, Vologda State University (15, ul. Lenina, 160000 Vologda, Russia).

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 30.09.2024; одобрена после рецензирования 14.10.2024; принята к публикации 28.10.2024.

The article was submitted 30.09.2024; Approved after reviewing 14.10.2024; Accepted for publication 28.10.2024.