

УДК 681.5:62-503.5

DOI: 10.22213/2410-9304-2023-4-117-124

## Развитие научно-технических основ совершенствования автоматизированных систем оперативного контроля и управления процессами теплоснабжения

А. М. Петров, кандидат технических наук, доцент,

Заполярный государственный университет им. Н. М. Федоровского, г. Норильск, Россия

А. Н. Попов, старший преподаватель, Тюменский государственный университет;

Государственный аграрный университет Северного Зауралья, Тюмень, Россия

*Научное исследование посвящено теплоснабжению Норильского промышленного района и, прежде всего, учитывает конструктивные, технологические и прочие особенности функционирования данных систем в условиях Заполярья. Отличительные признаки промышленного района заключаются в низком температурном режиме, среднегодовые показатели которого находятся на отметке ниже  $-15^{\circ}\text{C}$ . Данные признаки закладывают потребности в развитии теоретических основ автоматизированного управления ТЭЦ, оптимизируя оперативное управление тепловой мощностью и смежных технических систем, учитывая критерии «живучесть» и «надежность».*

*В научной статье рассматривается моделирование и формализация процессов проектирования, разработки и внедрения автоматизированной системы оперативного контроля и управления (АСОКиУ) тепловой мощностью для управления процессами теплоснабжения Норильского промышленного района.*

*Рассматриваются особенности района: разрозненные населенные пункты, которые в совокупности представляют единое муниципальное образование, что порождает и единую технически сложную техническую инфраструктуру, сложную с точки зрения и управления, и обслуживания.*

*Выделяются предпосылки возникновения такой единой системы, связанные с климатическими особенностями данного района.*

*Рассматривается возможность применения теоретических основ автоматизированного управления ТЭЦ с применением рекурсивного, перманентного уточненного анализа функций имитационных моделей объектов системы теплоснабжения и ТЭЦ путем оптимизации оперативного управления тепловой мощностью и смежными техническими системами с учетом критериев «живучесть» и «надежность».*

*Отмечается, что внедрение рассматриваемой системы приведет к автоматизации оперативного контроля и управления тепловой мощностью ТЭЦ на уровне приложения, а также к повышению эффективности функционирования ТЭЦ и системы теплоснабжения на теоретическом уровне за счет диагностической оценки состояния объектов и связанных технических систем.*

**Ключевые слова:** Норильский промышленный район, система теплоснабжения, оптимизация системы автоматизации ТЭЦ, имитационные математические модели, формализация процессов проектирования, Protégé, инженерные онтологии, база знаний, интеллектуальные системы управления.

### Введение

Данная статья является продолжением предыдущих работ авторов [1, 2], в которых использовались такие методы исследований, как системный анализ, теория автоматического управления, математическое и имитационное моделирование, регрессионный анализ, объектно ориентированное программирование, методы оптимизации и методологии построения интеллектуальных систем, на основе баз знаний и инженерных онтологий.

Предметом исследования в данной работе являются методы моделирования и реализации систем автоматизированного управления ТЭЦ.

Объектом исследования являются непосредственно сами автоматизированные системы управления тепловой мощностью ТЭЦ и смежные технические системы.

Целью научной работы является разработка концепции интегрированного управления тепловой мощностью ТЭЦ Норильского промышленного района с учетом особых климатических особенностей региона и системы в целом.

Ключевым практическим результатом, описанным в статье, будет являться, прежде всего, формализация процессов проектирования, разработки и внедрения АСОКиУ процессами теплоснабжения нового поколения, которые способны производить диагностику и оценку состояния объектов системы теплоснабжения и ТЭЦ в реальном времени, а также автоматически оптимизировать текущие технологические процессы в соответствии с заданием оператора.

Норильский промышленный район (НПР) – это уникальное для Российской Федерации явление как с точки зрения инфраструктурной связанности, так и с точки зрения взаимодействия, эксплуатации и обеспечения корректного функционирования различных технических систем [3].

НПР представляет собою группу территориально разрозненных населенных пунктов, которые административно и юридически образуют единое муниципальное образование под названием «город Норильск» (рис. 1).

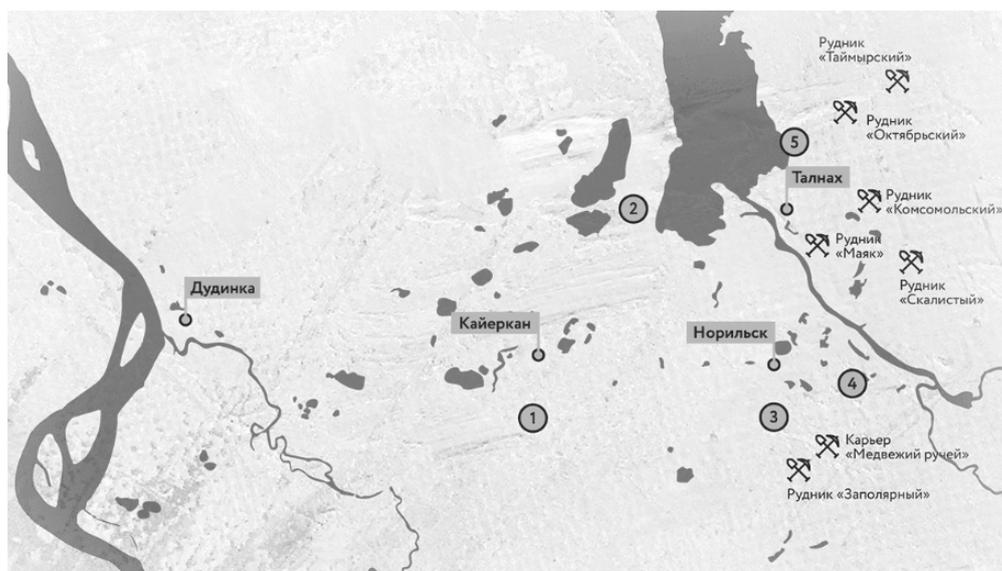


Рис. 1. Норильский промышленный район: 1 – аэропорт Норильска; 2 – Надеждинский металлургический завод; 3 – Норильская обогатительная фабрика; 4 – Медный завод; 5 – Талнахская обогатительная фабрика

Fig. 1. Norilsk Industrial District: 1 – Norilsk Airport, 2 – Nadezhda Metallurgical Plant, 3 – Norilsk Ore Dressing Plant, 4 – Copper Plant, 5 – Talnakh Ore Dressing Plant

НПР – это, прежде всего, технически сложная инфраструктура, представляющая собой ряд производственных комплексов, функционирующих как единый. При этом ключевой его функционал заключается в добыче и производстве драгоценных и цветных металлов, добытых из недр Таймырского полуострова.

Указанные на рис. 1 такие наименования, как Кайеркан и Талнах, представляют собой районы (города-спутники) непосредственного центра – города Норильска, также есть два жилых образования: Огандер и Снежногорск. Существует и отдельный от Норильска город-порт Дудинка, который функционально и неразрывно связан с НПР.

#### Технологические особенности системы теплоснабжения НПР

Уникальная система технических и технологических взаимодействий внутри НПР появилась в результате особых климатических условий, сложных условий добычи руды, ее производства и транспортировки, в результате чего в настоящее время НПР изобилует огромным количеством собственных технических и технологических решений, инновационными подходами в создании автоматизированных

систем управления, а главное – их прикладной реализацией на базе действующих предприятий. Особенно интересными являются технологические и технические решения, связанные с системой теплоснабжения города Норильска, с учетом годовых максимумов и минимумов температур за последние 3 года. Среднегодовая температура воздуха держится на отметке ниже  $-15^{\circ}\text{C}$ . Если учесть суровые ветра, высокий уровень осадков и иные непредсказуемые явления, то условия организации и эксплуатации работоспособной системы теплоснабжения для НПР будут тяжелыми.

Теплоснабжение районов Норильска, Талнаха, Кайеркана и промышленных площадок НПР осуществляется от ТЭЦ-1, ТЭЦ-2, ТЭЦ-3, которые не связаны между собой.

Необходимо отметить, что данная система теплоснабжения является самостоятельной, так как не связана с Единой энергетической системой России. Учитывая это и сложные климатические условия Заполярья, становится понятно, что преобладающими свойствами системы теплоснабжения НПР стали надежность и живучесть [4–6]. Приведем данные о ТЭЦ НПР (таблица).

#### Характеристики ТЭЦ НПР

##### Characteristics of a thermal power plant

Наименование	Суммарная тепловая мощность, Гкал/ч	Собственные нужды станции, %	Вид теплоносителя		Тип системы теплоснабжения
			Гражданская зона	Промышленная зона	
ТЭЦ-1	2320,7	0,15	Горячая вода	Горячая вода и пар	Открытый
ТЭЦ-2	1 151	0,12	Горячая вода	Горячая вода и пар	Открытый
ТЭЦ-3	1 049	0,23	Горячая вода	Горячая вода и пар	Открытый

Технически и технологически все ТЭЦ НПП очень друг на друга похожи, что позволяет предположить возможность дублирования инноваций в области автоматизации и ИТ от одного объекта к другому.

Регулирование отпуска тепла происходит по типу: централизованное, качественное. Распределение горячей воды в сети теплоснабжения осуществляется путем непосредственного разбора на разные категории потребителей (жилые, административно-бытовые и производственные здания). Особо необходимо отметить, что возврат конденсата от потребителей и конденсатоотводчиков к источнику тепла не предусмотрен – отсутствуют конденсатопроводы. Тепловые сети работают по тупиковой схеме.

На всех основных тепловых магистралях и на пунктах разграничения ответственности между теплоснабжающими организациями установлены измерительные приборы. Осуществляется сброс конденсата на рельеф. Общая протяженность тепловых сетей составляет 109 погонных километров.

Климатические особенности влияют на температурный график системы теплоснабжения, который формируется как 115/70 °С. Данный график является самым оптимальным по техническим и экономическим критериям, так как его повышение в условиях вечной мерзлоты вызовет таяние вечномерзлого грунта и, как следствие, приведет к его подвижкам, что в свою очередь вызовет дополнительное напряжение в трубопроводах путем внешнего давления и деформации, что в дальнейшем приведет к авариям.

Уникальная система теплоснабжения НПП формирует локальную научную проблему, решение которой в долгосрочной перспективе способно изменить подход в проектировании систем теплоснабжения.

Данная научная проблема, прежде всего, заключается в том, что возникла потребность в развитии теоретических основ автоматизированного управления ТЭЦ с учетом рекурсивного, непрерывно уточняющего ана-

лиза функций имитационных моделей объектов системы теплоснабжения и ТЭЦ. При этом оптимизируется оперативное управление тепловой мощностью и смежными техническими системами и учитываются критерии «живучесть» и «надежность».

Создание подобной автоматизированной системы, которая управляет комплексом смежных технических систем, не является новой. Данной идеей занималось множество ученых с середины первой половины двадцатого века. Теоретически, подобная система должна обладать рядом ключевых особенностей:

1. Система не должна нарушать основного технологического процесса.

2. Система должна с высокой точностью диагностировать текущее состояние объектов системы теплоснабжения и ТЭЦ.

3. Система должна самостоятельно определять, какие объекты и/или смежные технические системы могут выполнять поставленную оператором задачу лучше.

В связи с этим решение локальной научной проблемы для НПП принесет на прикладном уровне реализованную автоматизированную систему оперативного контроля и управления тепловой мощностью ТЭЦ, а на теоретическом уровне повышение эффективности функционирования ТЭЦ и системы теплоснабжения с учетом диагностической оценки состояния объектов и смежных технических систем.

Разработанное программное обеспечение на базе высокоуровневых онтологий позволяет проектировать, визуализировать и реализовывать различные автоматизированные/автоматические системы в климатических условиях города Норильска.

В соответствии с концепцией многовариативной структуризации при управлении цифровой средой организации, описанной в работах Р. К. Халкечев [7, 8], сама разработка АСОКиУ осуществляется в рамках стадий, представленных на рис. 2.

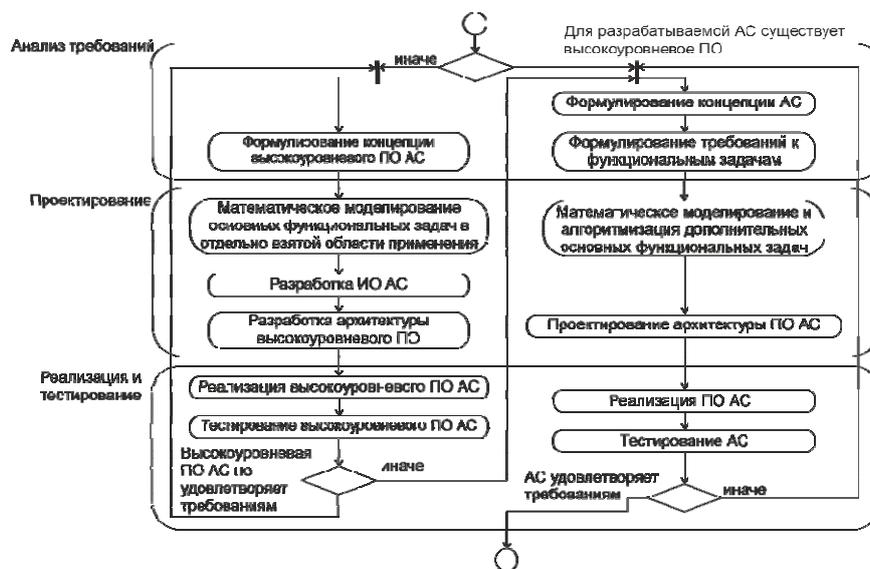


Рис. 2. Каркасный метод разработки АСОКиУ с основами многовариативной структуризации  
 Fig 2. Frame-based method of development of ACS and IU with the basics of multivariate structuring

Рассмотрим данную схему подробно. Согласно рис. 2, с учетом особенности каркасного метода с основами многовариативной структуризации, схема делится на левый и правый потоки управления.

В левой части указываются те стадии, выполнение которых происходит в том случае, если у организации (ТЭЦ) отсутствует цифровая инфраструктура. Иными словами, нет высокоуровневого каркаса программного обеспечения (далее ПО) АСОКиУ, который способен в автоматическом режиме решать административные (служебные) и функциональные задачи. В противном случае разработка системы, которая осуществляет оперативный контроль и управление в автоматическом режиме, будет начинаться с этапов, которые представлены в правой части схемы (рис. 2).

В настоящий момент на ТЭЦ НПР отсутствует подобное высокоуровневое ПО. Таким образом, формирование ПО для АСОКиУ НПР начнется с изучения требований, предъявляемых к формулированию основ высокоуровневого каркаса программного обеспечения.

Естественно, в дальнейшем, при увеличении количества подобных каркасов, начальным этапом связанных с анализом требований можно будет пренебречь.

Поскольку в ТЭЦ НПР каркас ПО отсутствует, то формируются цели, описание и требования к программным и аппаратным элементам каркаса ПО АСОКиУ. Таким образом, формируется общая концепция.

Далее происходит формирование требований к функциональным задачам ПО АСОКиУ. Разрабатываются всевозможные сценарии использования ПО, которые учитывают все от нормального критического режима функционирования ТЭЦ, при этом учитываются все внешние элементы, которые не являются частью каркаса, но влияют на его работу, в нашем случае это климатические особенности региона (низкая среднегодовая температура, резкие перепады температур, штормовые ветра, повышенная влажность воздуха, подвижность грунтов и т. п.).

В завершение данной стадии осуществляется логичный переход к стадии математического и имитационного моделирования основных процессов и функциональных задач системы теплоснабжения и ТЭЦ. Подобные модели приведены в трудах [9–13]. Соответственно, после набора каталога математических и имитационных моделей осуществляется разработка каркаса математического обеспечения (далее МО) АСОКиУ.

Под МО АСОКиУ понимается совокупность универсальных имитационных и математических моделей, выраженных в виде алгоритмов, результатом выполнения которых будут способы решения основных функциональных задач в АСОКиУ.

После формирования МО АСОКиУ в виде алгоритмического каталога можно перейти к стадии проектирования, связанной с разработкой информационного обеспечения (далее ИО) АСОКиУ. Данная стадия связана с формированием баз данных, инженерных онтологий и, как следствие, получения баз

знаний, необходимых для решения функциональных задач.

Проектирование баз данных заключается в сборе и структуризации информационных массивов. Создание инженерных онтологий для баз данных заключается в построении для них семантических моделей, которые выражаются с помощью графических нотаций и open-source ПО Protégé [14]. Совмещение баз данных с инженерными онтологиями, учитывающими специфику предметной области функциональных задач ТЭЦ НПР, порождает базы знаний для ПО АСОКиУ.

При завершении разработки ИО АСОКиУ проектируется детализированная архитектура каркаса высокоуровневого ПО АСОКиУ. Происходит это посредством анализа функциональных задач, который сможет выполнить ПО АСОКиУ с имеющимися у него базами знаний, алгоритмами и иным цифровым инструментарием.

После получения детализированной архитектуры происходит переход к реализации и тестированию. Результатом данного этапа является проверка полученных результатов, происходит непосредственное сравнение со сформулированными требованиями. Если соответствия отсутствуют либо их количество критическое, то архитектура перерабатывается. Данный цикл повторяется, пока не будет получена высокоуровневая структура ПО АСОКиУ, удовлетворяющая требованиям разработчика.

Таким образом, мы получаем прототип ПО АСОКиУ и можем осуществить переход к правой части схемы, представленной на рис. 2. Первым этапом является формулирование технического обеспечения (далее ТО) АСОКиУ и прописывается взаимодействие между элементами. Система из прототипа переходит в подсистемы, связанные между собой и реализованные с помощью одного или нескольких высокоуровневых языков программирования.

После разработки программного кода ПО АСОКиУ осуществляется спецификация технического обеспечения (далее ТО) АСОКиУ. На данном этапе учитывается потребность каждого пользователя АСОКиУ, в том числе и самой системы, в рамках потребности в вычислительных ресурсах, степени защиты и общей аппаратной архитектуры. Определяются виды и количество используемых технических устройств, а также интерфейсы между ними.

После этого происходит процедура тестирования АСОКиУ, состоящей из программно-технических средств. По результатам тестирования делается вывод о соответствии АСОКиУ требованиям пользователя.

С помощью предложенной концепции многовариативной структуризации возможно приступить к разработке высокоуровневого ПО АСОКиУ, то есть к левой части потока на рис. 2, а затем на основе полученного ПО к разработке частных экземпляров АСОКиУ – процессов системы теплоснабжения.

В соответствии с предложенным методом разработки определим цели, общее описание и требования к разрабатываемому программному обеспечению и аппаратно-техническому сопровождению.

Высокоуровневый каркас ПО АСОКиУ разрабатывается с целью выявления связей между пакетами классов, сущностями и объектами, точная спецификация которых осуществляется с помощью применения механизмов наследования, агрегирования и добавления функциональных возможностей принадлежности нечетким множествам.

К основным функциональным задачам относятся:

1. Определение деформационных, термодинамических и иных свойств объекта теплоснабжения, связанного с эксплуатационными характеристиками наружных трубопроводов.

2. Установление взаимосвязей между свойствами окружающей трубопровод среды (климатическими и погодными особенностями НПП), действующими на различные объекты системы теплоснабжения.

3. Поиск и закрепление иных свойств объектов многовариативной структуры с учетом масштабного эффекта.

К административным (служебным) функциональным задачам относятся:

1. Проведение процедуры анализа данных.
2. Учет ресурсной и материалов на корректное функционирование системы теплоснабжения.
3. Подготовка плана задач и событий.
4. Создание отчетов на основе полученных данных.
5. Проверка подлинности пользователей в системе.
6. Создание резервных копий и восстановление данных.

Использование проектируемого программного обеспечения в долгосрочной перспективе должно сократить сроки разработки и параллельно с этим формировать гибкие АСОКиУ на различных уровнях системы теплоснабжения.

Разрабатываемое ПО должно быть кросс-платформенным, реализовываться на высокоуровневых языках программирования.

В части аппаратно-технического оснащения системы проектируемое программное обеспечение должно взаимодействовать с уже существующими системам ТЭЦ-1 города Норильска и иными внешними подсистемами системы теплоснабжения города. Выбор платформы для портирования каркаса зависит от типа разрабатываемой АСОКиУ.

Решения для всех исследованных ТЭЦ НПП в организационной части АСОКиУ идентичны, поэтому будет описан общий подход.

В настоящее время ТЭЦ НПП обладают структурной схемой АСУТП, которая состоит из нескольких частей:

1. Часть, относящаяся к полевым компонентам, включает в себя датчики, измерительные устройства и исполнительные механизмы.

2. Управляющая часть состоит из программных логических контроллеров (ПЛК), которые обеспечивают управление и контроль за системой.

3. Диспетчерская часть, на которой размещается SCADA-систем и происходят процессы анализа, обработки и визуализации данных.

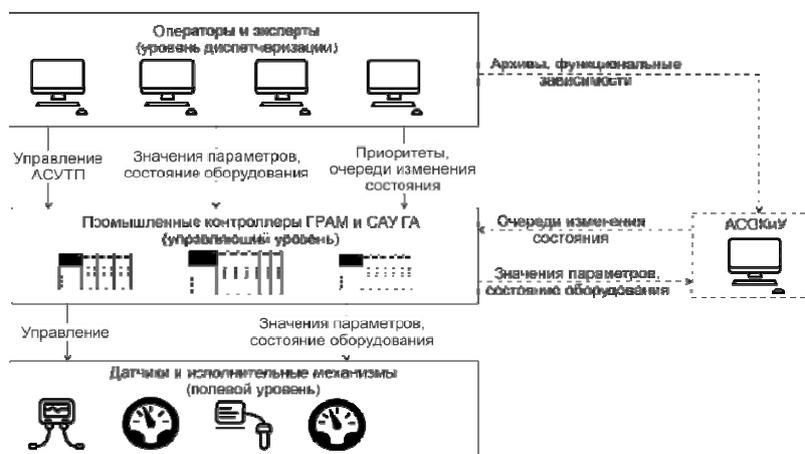


Рис. 3. Структурная схема АСУТП с разработанной АСОКиУ

Fig. 3. Structural diagram of the automated process control system

Контроль и регулирование тепловой мощности ТЭЦ осуществляется на уровне управления. Для этого ПЛК выполняет функции реализации управляющих алгоритмов, контроля времени и проверки корректности команд оператора (полученных от системы SCADA). Однако объем данных, вычисления и требования к ПЛК значительно выше из-за этого. Для оптимизации управления объектами ТЭЦ предлагается использовать отдельный пакет/подсистему АСОКиУ, которая содержит базу знаний о технологическом процессе объектов.

Подобная подсистема реализована и представляет собой ПО, которое считывает сигнал через последовательный порт физического интерфейса. Полученный сигнал отправляется в искусственную нейронную сеть (далее ИНС), выполняющую функцию автокодирования. В случае если сигнал «знаком» ИНС, то ошибка восстановления для нее является малой, тогда появляется возможность определить, к какому виду относится полученный сигнал. В приведенном ниже примере сигнал визуализируется с помощью четырех состояний (рис. 4), в которых находилась система [15, 16].

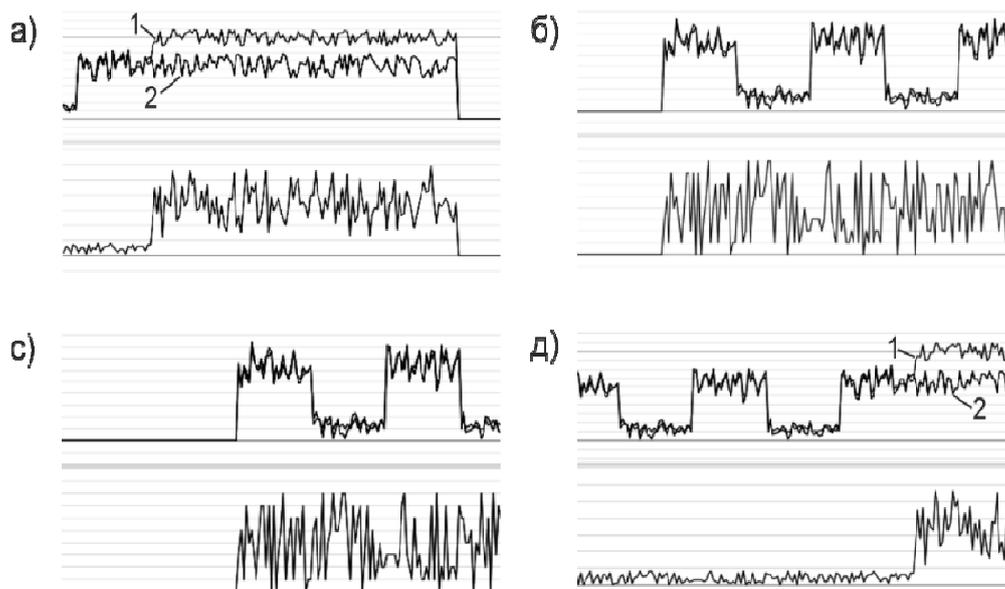


Рис. 4. Подсистема АСОКиУ, визуализирующая состояние системы по характеристике тепловой мощности

Fig. 4. Subsystem visualizing the system state based on thermal power characteristic

Как можно видеть, на рис. 4 нижняя кривая отвечает за степень ошибки/узнавания ИНС сигналом. Верхние кривые отвечают за фазность рабочего тела внутри трубопровода (1 – за воду, 2 – за пар). Если кривые располагаются друг на друге, это означает, что рабочее тело в трубопроводе находится в одной фазе (как показано на графике рис. 4, б). Если фазы расслаиваются (рис. 4, а), то тепловая мощность в трубопроводе критичная. Если фазы расслаиваются, как это показано на рис. 4, д, то критичная тепловая мощность у потребителя. Если кривые строятся так же, как на визуализации рис. 4, с, то либо утерян сигнал от порта, либо сигнал ИНС «не знаком». ПО АСОКиУ в настоящий момент прошло лабораторные испытания и готов для внедрения на ТЭЦ НПр.

#### Заключение и выводы

В результате проведенной работы на прикладном уровне предложена ПО АСОКиУ, способная повысить эффективность работы ТЭЦ и которая может быть легко интегрирована с существующей АСУТП. В перспективе планируется взаимодействие с оперативным и эксплуатационным персоналом ТЭЦ с целью уточнения критериев обучения ИНС и, как следствие, улучшения алгоритмов системы рационального управления объектами технологического процесса.

На теоретическом уровне разработана концепция интегрированного управления объектами ТЭЦ с учетом рекурсивного, перманентного уточненного анализа функций имитационных моделей объектов системы теплоснабжения и ТЭЦ, оптимизирующая оперативное управление тепловой мощностью и смежных технических систем, учитывающая критерии «живучесть» и «надежность».

Также изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие НПр.

#### Библиографические ссылки

1. Петров А. М., Попов А. Н., Кузьяков О. Н. Совершенствование архитектуры интеллектуальных систем управления // Автоматизация и информатизация ТЭК. 2023. № 4 (597). С. 15–22. DOI 10.33285/2782-604X-2023-4(597)-15-22.
2. Petrov A., Popov A., Molotok A. Development of a laboratory installation of a digital measuring system for visualization of internal pipeline processes // Journal of Physics: Conference Series, Voronezh, 10–13 декабря 2019 года. Voronezh, 2020. P. 012036. DOI 10.1088/1742-6596/1614/1/012036.
3. Муравьева Ю. А. Концептуальная модель Норильского промышленного кластера // Дискуссия. 2016. № 6 (69).
4. Цуверкалова О. Ф. Отбор участков тепловых сетей для капитального ремонта при реализации схем теплоснабжения территорий // Наука Красноярья. 2020. Т. 9, № 3-4. С. 173–182. DOI 10.12731/2070-7568-2020-3-4-173-182.
5. Бисерова К. А. Анализ основных проблем современных сетей централизованного теплоснабжения // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2021. Т. 1. С. 294–296.
6. Вишняков С. В., Геворкян В. М., Зейн А. Н. Разработка интеллектуальной системы обработки данных результатов экспериментальных и численных исследований физических процессов, протекающих в элементах энергетического оборудования // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: материалы 93-го заседания семинара. В 2 кн. Волжский, 13–17 сентября 2021 года / отв. редактор Н. И. Воропай. Вып. 72. Кн. 2. Иркутск: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, 2021. С. 191–199.
7. Халкечев Р. К. Разработка каркасной мультифрактально-модельной методологии построения АСНИ и АСУ ТП в горной промышленности: специальность 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами»: дис. ... д-ра тех-

нических наук / Халкечев Руслан Кемалович. М., 2020. 495 с.

8. Халкечев Р. К. Теоретические основы мультифрактального моделирования функциональных задач автоматизированной системы научных исследований физических процессов горного производства // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 8. С. 136–142.

9. Jakubek D., Ocloń P., Nowak-Ocloń M., Sułowicz M., Varbanov P., Klemeš J. Mathematical modelling and model validation of the heat losses in district heating networks. *Energy*, 2023, Vol. 267. DOI 10.1016/j.energy.2022.126460.

10. Chen X., Ren L., Zheng Q., Yang G., Akkurt N., Liu L., Liu Z., Qiang Y., Yang H., Xu Q., Ding Y. Heat loss optimization and economic evaluation of a new fourth generation district heating triple pipe system. *Applied Thermal Engineering*, 2023, Vol. 233. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2023.121160.

11. Луценко Е. В. Интеллектуальные информационные системы: учеб. пособие для студентов специальности 230400 «Информационные системы и технологии». Краснодар : КубГАУ, 2013. – 645 с.

12. Громов Ю. Ю., Иванова О. Г., Алексеев В. В. Интеллектуальные информационные системы и технологии : учеб. пособие. Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2013. 244 с.

13. Макаренко С. И. Интеллектуальные информационные системы : учеб. пособие. Ставрополь: СФ МГГУ, 2009. 206 с.

14. Bernardo R., Sousa J., Gonçalves P. A novel framework to improve motion planning of robotic systems through semantic knowledge-based reasoning. *Computers & Industrial Engineering*, 2023, Vol. 182. DOI doi.org/10.1016/j.cie.2023.109345.

15. Катасёва Д. В. Нейронечеткая модель и программный комплекс формирования баз знаний для оценки состояния объектов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2022. № 1 (57). С. 65–76.

16. Sansyzbay L. Zh., Orazbayev B. B. The development of the model of the intelligent system on the basis of fuzzy sets for microclimate control of building // Bulletin of the Karaganda University. Mathematics Series. 2019. No. 4 (96). P. 109-117. DOI 10.31489/2019M4/109-117.

### References

1. Petrov A.M., Popov A.N., Kuziakov O.N. [Improving the architecture of intelligent control systems]. *Avtomatizatsiia i informatizatsiia TEK*, 2023, vol. 4, no. 597, pp. 15-22 (in Russ.). DOI 10.33285/2782-604X-2023-4(597)-15-22.

2. Petrov A., Popov A., Molotok A. [Development of a laboratory installation of a digital measuring system for visualization of internal pipeline processes]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, P. 012036. DOI 10.1088/1742-6596/1614/1/012036.

3. Murav'eva Iu.A. [Conceptual model of the Norilsk industrial cluster]. *Diskussiia*, 2016, vol. 6, no. 69 (in Russ.).

4. Tsuverkalova O.F. [Selection of sections of heat networks for major repairs in the implementation of heat supply schemes for territories]. *Nauka Krasnoiar'ia*, 2020, vol. 9, no. 3-4, pp. 173-182 (in Russ.). DOI 10.12731/2070-7568-2020-3-4-173-182.

5. Biserova K.A. [Analysis of the main problems of modern district heating networks, *Sovremennye tekhnologii v stroitel'stve*]. *Teoriia i praktika*, 2021, vol. 1, pp. 234-296 (in Russ.).

6. Vishniakov S.V., Gevorkian V.M., Zein A.N. *Razrabotka intellektual'noi sistemy obrabotki dannykh rezul'tatov eksperimental'nykh i chislennykh issledovaniy fizicheskikh protsessov, protekayushchikh v elementakh energeticheskogo oborudovaniya* [Development of an intelligent system for processing data from the results of experimental and numerical studies of physical processes occurring in elements of power equipment]. *Metodicheskie voprosy issledovaniia nadezhnosti bol'shikh sistem energetiki : Materialy 93-ego zasedaniia seminarov* [Proc. Methodological issues in studying the reliability of large energy systems: materials of the 93rd meeting of the seminar]. Book no. 2. Irkutsk: Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Energy Systems named after. L.A. Melentiev Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2021, pp. 191-199 (in Russ.).

7. Khalkechev R.K. Development of a wireframe multifractal-model methodology for building ASNI and APCS in the mining industry: specialty, 05.13.06 – «Avtomatizatsiia i upravlenie tekhnologicheskimi protsessami i proizvodstvami: dissertatsiia doktora tekhnicheskikh nauk, Moscow, 2020, 495 p. (in Russ.).

8. Khalkechev R.K. [Theoretical Foundations of Multifractal Modeling of Functional Problems of an Automated System for Scientific Research of Physical Processes in Mining]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten'*, 2015, vol. 8, pp. 136-142 (in Russ.).

9. Jakubek D., Ocloń P., Nowak-Ocloń M., Sułowicz M., Varbanov P., Klemeš J. Mathematical modelling and model validation of the heat losses in district heating networks. *Energy*, 2023, Vol. 267. DOI 10.1016/j.energy.2022.126460.

10. Chen X., Ren L., Zheng Q., Yang G., Akkurt N., Liu L., Liu Z., Qiang Y., Yang H., Xu Q., Ding Y. Heat loss optimization and economic evaluation of a new fourth generation district heating triple pipe system. *Applied Thermal Engineering*, 2023, Vol. 233, DOI 10.1016/j.applthermaleng.2023.121160.

11. Lutsenko E.V. *Intellektual'nye informatsionnye sistemy* [Intelligent information systems: a textbook for students of the specialty 230400 "Information systems and technologies"]. Krasnodar: KubGAU, 2013. 645 p. (in Russ.).

12. Gromov Iu.Iu., Ivanova O.G., Alekseev V.V. *Intellektual'nye informatsionnye sistemy i tekhnologii* [Intelligent information systems and technologies: textbook], TGTU, 2013, 244 p. (in Russ.).

13. Makarenko S.I. *Intellektual'nye informatsionnye sistemy* [Intelligent information systems: textbook], Stavropol: SF MGGU, 2009, 206 p. (in Russ.).

14. Bernardo R., Sousa J., Gonçalves P. A novel framework to improve motion planning of robotic systems through semantic knowledge-based reasoning. *Computers & Industrial Engineering*, 2023, vol. 182. DOI doi.org/10.1016/j.cie.2023.109345.

15. Kataseva D.V. A neuro-fuzzy model and a software package for generating knowledge bases for assessing the state of objects, *Prikaspiiskii zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii*, 2022, vol. 1, no. 57, pp. 65-76 (in Russ.).

16. Sansyzbay L. Zh., Orazbayev B.B. [The development of the model of the intelligent system on the basis of fuzzy sets for microclimate control of building]. *Bulletin of the Karaganda University. Mathematics Series*, 2019, no. 4. Pp. 109-117. DOI 10.31489/2019M4/109-117.

### Development of Scientific and Technical Foundations for Improving Automated Control and Management Systems for Heat Supply Processes

A. M. Petrov, PhD in Engineering, Associate Professor, Head Department of Electric Power and Automation, Fedorovsky Polar State University, Norilsk, Russia,

A. N. Popov, Senior Lecturer, Academic department, University of Tyumen, Agrarian University of Northern Trans-Urals, Tyumen, Russia.

*The scientific research is dedicated to the heat supply of the Norilsk industrial district and, primarily, takes into account the structural, technological, and other peculiarities of these systems' operations in the Arctic conditions. The distinctive features of the industrial district include the low temperature regime, with average annual temperatures below  $-15^{\circ}\text{C}$ . These characteristics require the development of theoretical foundations for automated control of heat and power plants, optimizing the operational control of heat capacity and related technical systems, while considering the criteria of "resilience" and "reliability".*

*The scientific article considers the modeling and formalization of the design, development, and implementation processes of an automated system for operational control and management of heat capacity to manage heat supply processes in the Norilsk industrial district.*

*The article examines the peculiarities of the district, including scattered settlements that together represent a single municipal entity, resulting in a complex technical infrastructure that is challenging both in terms of management and maintenance. The prerequisites for the emergence of such a unified system, related to the climatic characteristics of the district, are identified.*

*The possibility of applying theoretical foundations for automated control of heat and power plants, taking into account recursive and continuous refined analysis of the functions of simulation models of heat supply system and heat and power plants, optimizing the operational control of heat capacity and related technical systems, while considering the criteria of "resilience" and "reliability", is considered.*

*It is noted that the implementation of the proposed system will lead to the automation of operational control and management of heat capacity at the application level, as well as to the increased efficiency of the operation of heat and power plants and heat supply systems at a theoretical level, through diagnostic assessment of the state of objects and related technical systems.*

**Keywords:** Norilsk industrial district, heat supply system, automation system, simulation mathematical models, formalization of design processes, Protégé, engineering ontologies, knowledge base.

Получено: 13.11.23

#### Образец цитирования

Петров А. М., Попов А. Н. Развитие научно-технических основ совершенствования автоматизированных систем оперативного контроля и управления процессами теплоснабжения // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 4. С. 117–124. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-4-117-124.

#### For Citation

Petrov A.M., Popov A.N. [Development of Scientific and Technical Foundations for Improving Automated Control and Management Systems for Heat Supply Processes]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2023, vol. 21, no. 4, pp. 117-124. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-4-117-124.