

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский  
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Автоматики и информационных технологий

Кафедра Автоматизации и управления

Сулейменов Темирлан Жосланович

Разработка системы мониторинга тепловыми сетями на основе беспроводных технологий

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

7М07101 – Автоматизация и роботизация

Алматы 2025



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский  
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Автоматики и информационных технологий

УДК 697.34:621.396.9 (043).

На правах рукописи

Сулейменов Темирлан Жосланович

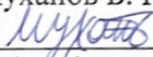
**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

На соискание академической степени магистра

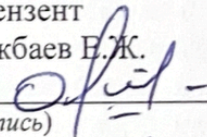
Название диссертации      Разработка системы мониторинга тепловыми сетями на основе  
беспроводных технологий

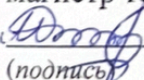
Направление подготовки      7М07101 – Автоматизация и роботизация

Научный руководитель  
Кандидат техн. Наук  
Муханов Б. К.

  
(подпись)  
«20» июня 2025 г.

Рецензент  
Оракбаев Е.Ж.

  
(подпись)  
«20» июня 2025 г.

Нормоконтроль  
магистр техн. наук  
 Манатов К. А.

(подпись)  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.



Алматы 2025



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский  
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Автоматики и информационных технологий  
Кафедра Автоматизации и управления

7М07101 – Автоматизация и роботизация

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой АиУ

канд. техн. наук

Сарсенбаев Н.С.

(подпись)

« 2025 г.

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение магистерской диссертации**

Магистранту Сулейменову Т. Ж.

Тема Разработка системы мониторинга тепловыми сетями на основе беспроводных технологий Утверждена приказом Б. Жаутикова № 548-П/Ө от «04» декабря 2023 г.

Срок сдачи законченной работы «\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.

Исходные данные к магистерской диссертации: Карта покрытия NB-IoT в Республике Казахстан

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

- а) Описание технологической части — анализ архитектуры системы мониторинга: уровни LPWAN-каналов (LoRaWAN, NB-IoT), шлюзовой слой (OPC UA, SCADA).
- б) Расчетная часть — энергопотребление узлов, проектирование сетей покрытия, пропускная способность каналов и оценка автономности.
- в) Разработка архитектуры системы беспроводного мониторинга
- г) Разработка алгоритма управления тепловой сетью

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

Рекомендуемая основная литература:

- 1 "Experimental Study on the Propagation Characteristics of LoRa" // IEEE Access, 2025 г. [pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15mdpi.com/15researchgate.net/15](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15mdpi.com/15researchgate.net/15)
- 2 "Testing ground conditions for effective buried sensor wireless LoRaWAN signal transmission" // IEEE Internet of Things Journal, 2022 г. [researchgate.net/5isprs-archives.copernicus.org/5researchgate.net/5](https://researchgate.net/5isprs-archives.copernicus.org/5researchgate.net/5)
- 3 "Link Quality Analysis for Buried Pipeline Monitoring using LoRa" // Sensors Journal, 2022 г. [d-nb.info/15eprints.whiterose.ac.uk/15researchgate.net/15](https://d-nb.info/15eprints.whiterose.ac.uk/15researchgate.net/15)
- 4 "Underground Wireless Data Transmission Using 433 MHz LoRa" // IEEE Communications Letters, 2019 г. [academia.edu/6mdpi.com/6figshare.utas.edu.au/6](https://academia.edu/6mdpi.com/6figshare.utas.edu.au/6)
- 5 "Propagation Study of LoRa P2P Links for IoT Applications" // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021 г. [pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15mdpi.com/15pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15mdpi.com/15pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15)



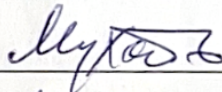
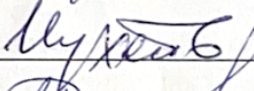
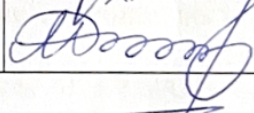
## ГРАФИК

подготовки магистерской диссертации

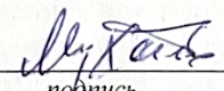
| Наименования разделов, перечень разрабатываемых вопросов                             | Сроки представления научному руководителю | Примечание |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|------------|
| Технологический раздел<br>Анализ современных систем мониторинга тепловых сетей       | 10.09.2024                                |            |
| Технологический раздел<br>Теоретические основы беспроводных технологий в мониторинге | 11.01.2025                                |            |
| Расчетный раздел<br>Разработка системы мониторинга теплосетей                        | 15.05.2025                                |            |

### Подписи

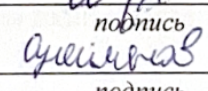
консультантов и нормоконтролёра на законченную магистерскую диссертацию с указанием относящихся к ним разделов диссертации

| Наименования разделов  | Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание) | Дата подписания | Подпись                                                                               |
|------------------------|--------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Технологический раздел | Б.К Муханов<br>кандидат техн. наук         | 10.01.25        |  |
| Расчетный раздел       | Б.К Муханов<br>кандидат техн. наук         | 15.05.25        |  |
| Нормоконтролер         | Қ. А. Манатов<br>магистр техн. наук        | 05.06.25        |  |

Научный руководитель

 Муханов Б.К.  
подпись

Задание принял к исполнению обучающийся

 Сулейменов Т.Ж.  
подпись

Дата

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.



## **АНДАТПА**

Диссертация LoRaWAN, NB-IoT және GSM (GPRS/3G) Сымсыз технологияларын қолдана отырып, қалалық жылу желілерінің параметрлерін (қысым, температура, ағын) жедел бақылау мәселесін қарастырады. Зерттеудің мақсаты-жер асты және радиосигналға қолайлы жағдайлардан деректерді SCADA-қалалық жылумен жабдықтау жүйесіне сенімді түрде жібере алатын энергияны үнемдейтін телеметриялық жүйені таңдау және құрастыру әдістемесін әзірлеу. Практикалық құндылық-әзірленген әдістемелік нұсқаулар, шлюз прототипі және SCADA-жылу шығыны мен операциялық шығындарды азайту үшін коммуналдық қызметтер қайталай алатын плагин.

## **АННОТАЦИЯ**

В диссертационной работе рассмотрена проблема оперативного мониторинга параметров городских тепловых сетей (давление, температура, расход) с использованием беспроводных технологий LoRaWAN, NB-IoT и GSM (GPRS/3G). Цель исследования — разработать методику выбора и компоновки энергоэффективной телеметрической системы, способной надёжно передавать данные из подземных и дружественных радиосигналу условий в SCADA-систему городского теплоснабжения.

Практическая ценность — разработанные методические рекомендации, прототип шлюза и SCADA-плагин, которые могут быть тиражированы коммунальными предприятиями для снижения потерь тепла и операционных расходов.

## **ABSTRACT**

The thesis addresses the challenge of real-time monitoring of urban district-heating pipelines (pressure, temperature, flow) using wireless LPWAN technologies — LoRaWAN, NB-IoT and GSM (GPRS/3G). The goal is to develop an energy-efficient and highly reliable telemetry solution capable of delivering sensor data from underground and radio-hostile environments to a central SCADA system.

Scientific novelty lies in the holistic “energy–reliability” evaluation of LPWANs for subterranean heat pipelines and the proposed hybrid architecture with adaptive link selection. Practical significance is provided by a ready-to-replicate gateway prototype, SCADA plug-in and methodological guidelines that help utility companies reduce heat losses and operational costs.



## ВВЕДЕНИЕ

В магистерской диссертации рассматривается построение беспроводных систем мониторинга теплосетей с использованием сетей передачи данных LoRaWAN, методика конфигурирования аппаратной и программной части шлюза, сетевого для работы в составе сети, в особенности разработки и настройки конечных устройств-сенсоров.

Актуальность темы исследования. Повышение энергоэффективности и надежности теплоснабжения является одной из приоритетных задач в области жилищно-коммунального хозяйства. В последние годы отмечается тенденция к снижению надежности тепловых сетей, что связано с высоким уровнем их износа и неэффективными методами оценки технического состояния. Это приводит к значительным материальным и финансовым потерям, ухудшению условий жизни населения и нарушениям технологических процессов.

До настоящего времени мониторинг состояния тепловых сетей и планирование ремонтных мероприятий зачастую осуществлялись на основе срока эксплуатации и величины амортизационного износа, без учета реальных условий эксплуатации. Такой подход не всегда позволяет своевременно выявлять проблемы, что увеличивает риски возникновения аварийных ситуаций и повышает затраты на обслуживание и ремонт. Кроме того, традиционные проводные системы мониторинга часто требуют значительных затрат на прокладку и эксплуатацию кабельной инфраструктуры, имеют ограниченную масштабируемость и не соответствуют современным требованиям оперативности.

В этой связи возрастает актуальность разработки и внедрения комплексных систем мониторинга на основе современных беспроводных технологий, таких как LoRaWAN, NB-IoT и других стандартов LPWAN (Low Power Wide Area Network). Эти технологии обеспечивают передачу данных на большие расстояния при низком энергопотреблении, что делает возможным развертывание масштабируемых систем мониторинга с минимальными затратами на инфраструктуру.

Особую роль играет концепция Интернета вещей (Internet of Things, IoT), которая предлагает комплексную инфраструктуру, состоящую из конечных устройств-сенсоров, шлюзов, сетевых и прикладных серверов, облачных приложений и алгоритмов анализа данных. Применение IoT-решений позволяет оперативно выявлять дефекты и нарушения работы тепловых сетей на ранних стадиях, существенно снижая вероятность серьезных аварий, минимизируя эксплуатационные расходы и повышая эффективность управления сетями[1].

Таким образом, разработка эффективной системы беспроводного мониторинга технического состояния тепловых сетей на основе технологий LoRaWAN и NB-IoT является актуальной и перспективной задачей, решение которой обеспечит повышение надежности и энергоэффективности теплоснабжения, снизит эксплуатационные затраты и улучшит качество жизни населения.



Цель: разработать эффективную беспроводную систему мониторинга технического состояния тепловых сетей на основе IoT.

Задачи магистерской диссертации:

- Анализ существующих решений в области мониторинга теплосетей;
- выбор подходящей беспроводной технологии для передачи данных;
- разработка архитектуры системы мониторинга;
- проектирование прототипа (датчики, контроллеры, шлюзы, по);
- экспериментальный анализ системы на пилотном участке тепловой сети.

Объект исследования – беспроводные системы мониторинга с использованием сетей передачи данных LoRaWAN, NB-IOT и GSM.

Предмет исследования – архитектура построения сетей передачи данных LoRaWAN и GSM, методы и технологии её реализации.

Значимость диссертационной работы заключается в возможности практического применения полученных результатов при построении беспроводных систем мониторинга с использованием сетей передачи данных на основе IoT технологий, а также в учебном процессе.

Научная новизна диссертационной работы состоит в рассмотрении и использовании методов и технологий построения беспроводных сетей мониторинга теплосетей в контексте технологии «IoT». При практической реализации использована актуальная архитектура LoRaWAN сетей и внедрены современные протоколы передачи данных.

Практическая значимость диссертационного исследования. Практическая значимость работы заключается в разработке и обосновании архитектуры системы беспроводного[2] мониторинга технического состояния тепловых сетей с использованием современных технологий передачи данных, таких как LoRa, GSM и NB-IoT.

Созданный прототип способен обеспечить:

- оперативное выявление нарушений в работе участков тепловых сетей, включая резкие перепады давления, утечки и отклонения температурных режимов;
- уменьшение тепловых потерь за счёт контроля изоляции и выявления перегретых зон с использованием датчиков и беспроводной передачи данных;
- повышение надёжности эксплуатации за счёт постоянного мониторинга в реальном времени и автоматической передачи информации на сервер или диспетчерский пункт;
- снижение эксплуатационных затрат: беспроводной мониторинг позволяет уменьшить количество профилактических выездов, упростить диагностику и ускорить ремонт;

Разработанная система может быть использована теплоснабжающими организациями, муниципальными предприятиями, а также в рамках пилотных проектов цифровизации ЖКХ. Также результаты работы могут быть адаптированы для помощи в решении смежных задач в области водоснабжения, газораспределения и других инженерных сетей.



Методология: в качестве методологии исследования использовано сочетание аналитических, инструментальных, экспериментальных и статистических методов, что позволило осуществить всестороннюю разработку, реализацию и оценку беспроводной системы мониторинга тепловых сетей с применением современных IoT-технологий.

# **1 Анализ современных систем мониторинга тепловых сетей**

## **1.1 Описание структуры теплоснабжения городов**

Современные городские системы теплоснабжения представляют собой сложные комплексы, включающие в себя следующие основные компоненты: источники тепла (котельные установки, теплоэлектроцентрали), локальные системы потребителей, сетевые и дополнительные насосные станции, а также разветвлённые тепловые сети.

Система тепловых сетей формируется из взаимосвязанных теплопроводов, по которым теплоноситель (пар или горячая вода) доставляется от источников до конечных потребителей. Главной составляющей таких сетей являются трубопроводы, изготовленные преимущественно из стали и соединённые посредством сварки. Для снижения теплопотерь и защиты от внешней коррозии используется теплоизоляция, а несущие конструкции обеспечивают поддержание труб в рабочем положении и воспринимают возникающие нагрузки. Поскольку основную роль играют трубы, они должны обладать высокой прочностью и герметичностью при максимальных температурах и давлениях, иметь гладкую внутреннюю поверхность, низкую склонность к температурной деформации, высокий коэффициент теплового сопротивления и сохранять стабильность свойств при длительной эксплуатации в экстремальных условиях.

Теплоснабжение потребителей, к которым относятся системы вентиляции, отопления, горячего водоснабжения и различные технологические процессы, основано на трёх взаимосвязанных процессах: транспортировка теплоносителя, передача тепловой энергии и использование его теплового потенциала. Классификация систем теплоснабжения осуществляется по нескольким признакам: по типу источника тепла, мощности системы и виду теплоносителя.

В зависимости от типа источника тепла различают системы теплофикации (ТЭЦ) и районного теплоснабжения (котельные). С точки зрения мощности различают централизованные и локальные (местные) системы. В локальных системах все звенья располагаются в одном или смежных помещениях — например, когда получение и передача тепла воздуху осуществляется печью, размещённой в отапливаемом помещении. В централизованных системах тепло от одного источника подаётся сразу в несколько зданий или помещений.

По виду теплоносителя теплоснабжающие системы подразделяют на водяные и паровые. Теплоноситель — это рабочая среда, транспортирующая тепловую энергию от источника к системам отопления, вентиляции и нагревательным приборам. В городских и жилых районах Казахстана преимущественно применяются водяные системы, в то время как паровые используются главным образом на промышленных объектах.

Водяные системы могут быть однотрубными, двухтрубными и в отдельных случаях многотрубными. Наиболее распространена двухтрубная



система, в которой по одной трубе подается горячая вода, а по другой остывшая возвращается к источнику. Различают также открытые и закрытые системы. В закрытых системах практически вся сетевая вода возвращается в источник, тогда как в открытых часть воды разбирается потребителями для хозяйственно-бытовых нужд. Однотрубная система применяется при полном расходе горячей воды на нужды потребителя[3].

Теплоносителям в централизованных системах предъявляются следующие требования:

- санитарно-гигиенические (теплоноситель не должен ухудшать условия пребывания людей, температура поверхности нагревательных приборов не должна превышать 70–80 °С);

- техничко-экономические (дешевизна транспортных трубопроводов, минимальная масса отопительных приборов, экономичный расход топлива);

- эксплуатационные (централизованное регулирование тепловой отдачи в зависимости от изменений наружной температуры).

В городских жилых районах чаще применяется подземная прокладка тепловых сетей, хотя надземные конструкции считаются более ремонтпригодными и долговечными. Из соображений надёжности и безопасности тепловые сети не размещаются в одних каналах с трубопроводами для сжатого воздуха, газопроводами и кислородопроводами.

Главная задача системы теплоснабжения — обеспечение потребителей необходимым количеством теплоносителя. Классификация систем производится по следующим критериям: по типу источника тепла, по способу подачи воды на горячее водоснабжение, по виду теплоносителя, по способу обеспечения потребителей, по количеству трубопроводов и другим признакам.

В Казахстане выделяют три основных типа систем по источнику тепла: централизованное теплоснабжение с комбинированной выработкой тепла и электроэнергии (ТЭЦ), централизованное теплоснабжение от котельных и децентрализованное — от индивидуальных печей и мелких котлов.

По виду теплоносителя различают паровые и водяные системы. Паровые системы преимущественно используются на производствах с высокотемпературной нагрузкой, тогда как водяные — для бытовых и сезонных потребителей.

Горячее водоснабжение водяных систем подразделяется по способу подачи на открытые и закрытые. В открытых системах часть циркулирующей воды используется непосредственно потребителями, а в закрытых — вода циркулирует только как теплоноситель и не забирается из сети.

Недостатки закрытых систем включают:

- сложность оборудования и эксплуатации абонентских узлов из-за необходимости установки водяных подогревателей;

- образование накипи и коррозии в подогревателях и трубах при использовании жёсткой водопроводной воды.

Преимущества открытых систем:

- возможность использовать теплоноситель для горячего водоснабжения;

упрощение и удешевление абонентских узлов и повышение долговечности локальных установок;

возможность применения однотрубной системы для транзитной транспортировки тепла.

Основные недостатки открытых систем:

- повышение затрат и сложности на водоподготовку;
- нестабильность качества подаваемой воды;
- усложнение санитарного контроля;
- трудности эксплуатации из-за колебаний гидравлического режима сети.

Выбор между открытой и закрытой схемой определяется требованиями к качеству воды и экономическими соображениями, связанными с оборудованием источников тепла и абонентских пунктов. В Казахстане преимущественно используются открытые системы.

Городские системы теплоснабжения объединяют различные типы потребителей, отличающихся как по характеру, так и по уровню теплоснабжения. Режимы расхода теплоносителя у многочисленных потребителей различны, а изменение нагрузки отопления зависит в первую очередь от температуры наружного воздуха, оставаясь относительно стабильным в течение суток. Структурная схема на рисунке 1.1. В свою очередь, расход воды для горячего водоснабжения и некоторых технологических процессов зависит от времени суток и дней недели, но не от температуры на улице [4].

В этих условиях требуется корректировка параметров теплоносителя в соответствии с текущими нуждами. Качество теплоснабжения и экономия ресурсов достигаются за счёт применения методов регулирования, которые включают:

качественное регулирование (изменение температуры при постоянном расходе теплоносителя), количественное регулирование (изменение расхода при постоянной температуре), комбинированное регулирование (одновременное изменение температуры и расхода).

К специфическим особенностям городских систем теплоснабжения относятся:

- большое число элементов и значительное территориальное распределение с постоянным развитием;
- непрерывность процессов транспортировки и распределения теплоносителя;
- наличие иерархии в системе управления;
- высокая централизация управления при децентрализованной эксплуатации технологических процессов.

С функциональной точки зрения систему теплоснабжения можно условно разделить на пять относительно самостоятельных подсистем:

- источники водоснабжения;
- сооружения по обработке воды;
- источники тепла (ТЭЦ, котельные и др.);



- городские тепловые сети;
- потребители тепловой энергии;

Назначение первых двух подсистем — подготовка воды нужного качества и количества; третьей — подготовка теплоносителя; четвертой — распределение и подача теплоносителя к конкретным потребителям (коммунальным, бытовым или промышленным).

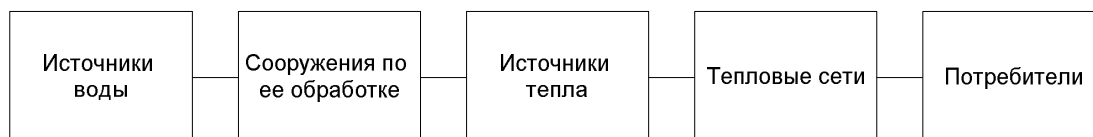


Рисунок 1.1 - Структура системы теплоснабжения

Тепловые сети являются основными элементами городских систем теплоснабжения, которые по своему назначению подразделяются на:

магистральные сети, которые распределяют теплоноситель до каждого микрорайона или промышленного и коммунального предприятия. По принципу организации магистральные сети бывают тупиковые, кольцевые или комбинированные, их характеристика зависит от планировки города;

Распределительные сети - подающие теплоноситель от магистральных сетей к квартальным сетям [5]. Квартальные сети - распределяющие теплоноситель от распределительных сетей к местным системам отопления потребителей. Местные системы отопления потребителей, транспортирующие теплоноситель по нагревательным элементам. Внутридомовые сети горячего водоснабжения.

В основном тепловые сети являются двухтрубными. Подающая и обратная магистрали между собой связаны гидравлически сотнями перемычек, абонентскими и местными системами.

Функциональное назначение и взаимосвязь между элементами видно по структуре системы теплоснабжения, представленной на рисунке 1.2.

Система теплоснабжения города представляет собой многоступенчатую иерархическую структуру, имеющую тепловую сеть той или иной сложности на каждом уровне иерархии. Между собой уровни связаны контрольно-распределительными пунктами (КРП) или центральными тепловыми пунктами (ЦТП), в которых параметры теплоносителя могут изменяться по требованию местных потребителей. КРП и ЦТП оборудуются водонагревательными и насосными установками, предохранительной и регулирующей установкой, контрольно-измерительными приборами, предназначенными для обеспечения теплоносителем необходимых параметров группы потребителей.

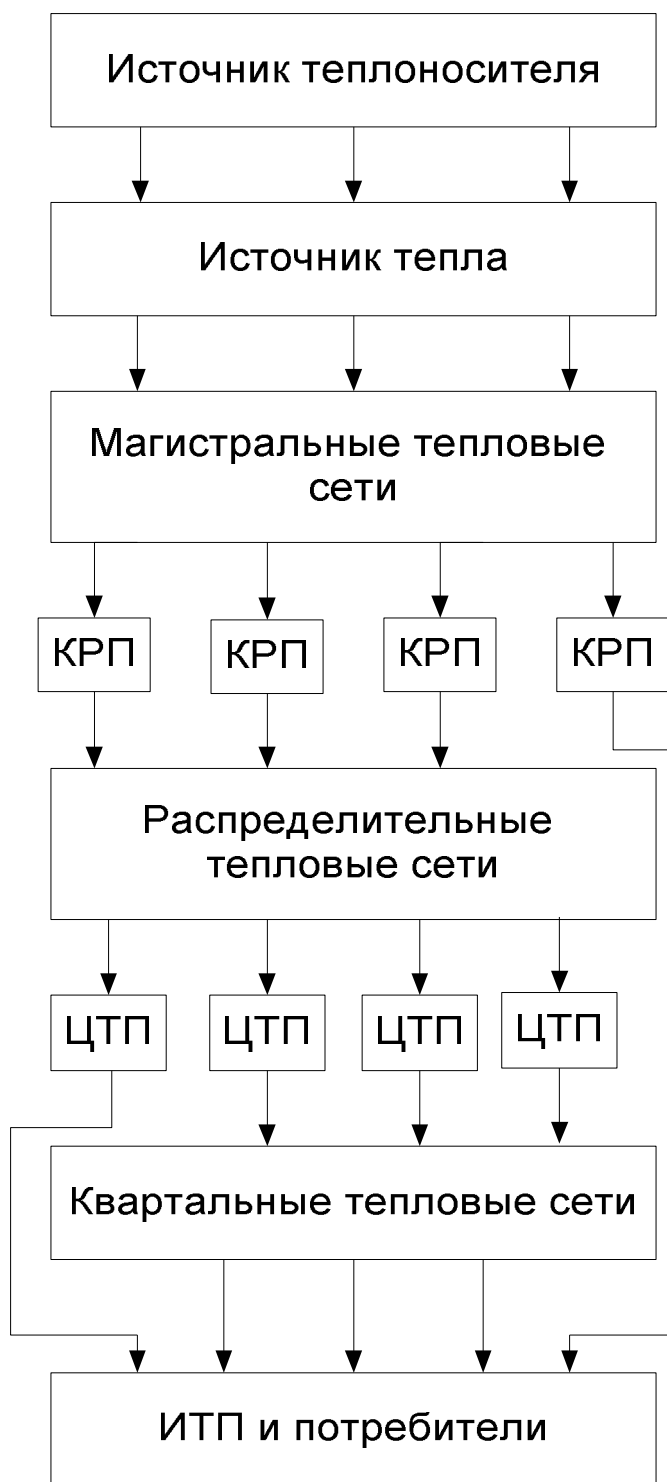


Рисунок 1.2 - Структура объекта управления

Основные факторы:

размеры города и особенности его застройки;

плотность заселения;

характеристики источников тепла и др.

### Виды теплосетей и их классификация.

По основному виду теплоносителя все теплосети подразделяются на паровые и водяные, а по способу прокладки — на надземные и подземные. Подземные теплотрассы используются преимущественно в городской черте, а их надземный аналог — за пределами населенных пунктов или внутри промышленной застройки.

По способу прокладки при монтаже подземных теплотрасс также различают канальный и бесканальный метод укладки. При канальном монтаже трубопроводы укладываются в предварительно подготовленные желоба или лотки, а при бесканальном — прямо в грунт. Трубы при этом предварительно изолируются утеплителем[5].

По своему функциональному назначению теплосети подразделяются на: магистральные трубопроводы выполняют доставку теплоносителя от централизованных источников тепла к распределительным узлам;

распределительные сети обеспечивают транспорт теплоносителя от распределительных узлов (котельные, ИТП) к конечному потребителю.

Классификация тепловых сетей на централизованные и децентрализованные зависит от первичного источника тепла, в качестве которого выступают либо крупные поставщики тепла — ТЭЦ, ТЭС и т. д., либо небольшие автономные котельные на муниципальных или коммерческих объектах.

К трубопроводам для всех видов теплотрасс любого назначения и функциональности предъявляется ряд требований, основными из которых являются следующие:

- повышенный диапазон давления и температур предъявляет высокие требования к механической прочности и герметичности трубопроводов;
- трубы для теплотрасс должны иметь высокие показатели теплоизоляции, которые снижают потери тепла при транспортировке теплоносителя;
- повышенная стойкость к наружной и внутренней коррозии;
- небольшой коэффициент температурной деформации, исключающий повреждение трубопровода при перепадах температуры теплоносителя;
- простой и надежный механизм или способ соединения труб между собой.

Трубы для всех видов теплосетей должны быть удобны в хранении и транспортировке, а также должны иметь необходимый набор фитингов и арматуры для простого и качественного монтажа.

В практике монтажа и прокладки магистральных и распределительных тепловых сетей присутствует несколько традиционных и современных видов труб, которые полностью отвечают предъявляемым к ним требованиям, доступны на рынке и обладают высокими показателями надежности:

Трубы из углеродистой стали. Такие трубы имеют хорошие показатели механической прочности, выдерживают повышенные давления и температуры, а их соединение имеет надежный и герметичный характер.



К главным достоинствам трубопроводов из обычной углеродистой стали относятся их низкая цена, доступность, большой ассортимент диаметров и типоразмеров, а также простые и хорошо освоенные методы сварки и монтажа.

Ассортимент водогазопроводных труб включает в себя электросварные, прямошовные, или бесшовные изделия, а также трубу со спиральным швом. Бесшовный вид трубопровода применяется в тех местах, где сварные конструкции не допускаются правилами Госгортехнадзора. Действующие нормативы указаны в актуализированной редакции[6].

Выбор марки стали определяется величиной и характером нагрузок, а диаметр трубы и толщина ее стенки выбираются, исходя из максимальной производительности теплосети и предельного давления в трубопроводе.

Большая масса трубопроводов и их пониженная стойкость к коррозии являются главными недостатками теплосетей из углеродистой стали, при этом их нормативный срок службы составляет 20–25 лет.

Чугунные трубопроводы с шаровидным графитом. Рассчитаны на максимальное давление до 1,6 МПа (16 атм) и предельную температуру до 150°С. Скорость коррозии ВЧШГ в 10 раз меньше, чем изделий из углеродистой стали, что обусловлено химическим составом чугуна и сферической формой графитовых включений. Нормативное время безаварийной работы трубопроводов из ВЧШГ составляет от 45 до 50 лет.

Сферическая форма графита, который входит в чугунный сплав, исключает образование трещин в теле трубы, а также повышает пластичность и прочность трубопроводов. Такое решение было разработано после эксплуатации трубопроводов из серого чугуна, в которых графит был представлен в виде хлопьев.

Стойкость к коррозии и высокие показатели механической прочности определяют долговечность всех видов теплотрасс из горячепрессованного чугуна с шаровидным графитом в качестве наполнителя. Дополнительным фактором экономической эффективности чугунных трубопроводов выступают низкие затраты на ремонтно-восстановительные работы.

Из недостатков труб из ВЧШГ необходимо отметить их более высокую стоимость, по сравнению с углеродистой сталью, а также сложный метод сварки и монтажа, который существенно сказывается на стоимости теплотрассы.

Биметаллические трубы с поверхностной плакировкой. Биметаллические трубы изготавливаются представляют собой трубы из двухслойной стали, основной слой которой выполнен из низколегированной или углеродистой стали. На эту сталь методом горячего проката нанесен плакирующий слой из коррозионностойких сплавов на основе никеля или хрома. Горячий прокат формирует мелкодисперсную структуру материала и не требует дальнейшей термической обработки. Такая особенность устраняет диффузию углерода и хрома в зоне контакта слоев на стадии изготовления трубы и сохраняет высокие антикоррозионные свойства материала.

Разработка биметалла выполнялась для замены дорогих нержавеющей трубопроводов или обычных труб из углеродистой стали. Увеличение

стоимости биметаллических трубопроводов, по сравнению с углеродистой сталью, компенсировалось многократным ростом стойкости к коррозии.

Оцинкованные трубопроводы из углеродистой стали. Цинковое покрытие, как способ увеличения антикоррозийной стойкости углеродистой стали, является наиболее известным и широко применяемым покрытием, эффективность которого доказала практика строительства всех видов теплотрасс. Цинк на поверхность трубы наносят с помощью химико-термического метода при рабочих температурах от 300 до 500°C. Сам процесс цинкования заключается в диффузионном насыщении цинком поверхности трубы из углеродистой стали. Толщина такого покрытия обычно составляет 43 мкм[7].

Особенностью эксплуатации оцинкованных трубопроводов для всех видов теплосетей является низкая температура теплоносителя, которая не должна превышать величину 60°C. Связана такая особенность с эффектом электрохимической коррозии, который возникает в оцинкованной трубе с температурой теплоносителя больше 60°C.

Существует несколько методов увеличения коррозионной стойкости трубопроводов из оцинкованной углеродистой стали. Наиболее известными из них являются фосфатирование, пассивирование и легирование цинка добавками из никеля или алюминия, а также метод сверхглубокого цинкования.

Трубопроводы из углеродистой стали с эмалевым покрытием. Покрытия из эмали или стеклоэмали относятся к категории силикатной обработки поверхности трубы из углеродистой стали и повышают срок ее службы в два раза. Немаловажным достоинством таких трубопроводов выступает снижение гидравлического сопротивления покрытой эмалью трубы в 4-5 раз.

Трубопроводы с эмалевым и стеклоэмалевым покрытием имеют целый ряд достоинств и преимуществ, основными из которых выступают следующие факторы:

- покрытия из эмали не подвержены старению;
- гладкая поверхности снижает сопротивление трубопровода;
- высокая химическая стойкость расширяет сферы применения.

Из недостатков такого типа трубопроводов можно отметить повышенную хрупкость покрытия и его небольшую стойкость к ударам или механическим воздействиям.

Для монтажа всех видов теплосетей с эмалевым покрытием трубы из углеродистой стали разработан и выпускается необходимый комплект монтажных соединений и фитингов, которые не снижают общую стойкость к коррозии[7].

## **1.2 Технические проблемы теплосетей Казахстана (2025)**

По данным Минэнерго, к зиме 2024–2025 годов в Казахстане эксплуатировалось 13 313 км центральных тепловых сетей со средним

уровнем износа 52%. В 2023–2024 годах для снижения износа было отремонтировано 248 км сетей, что позволило снизить средний износ с 54% до 52%. На 2025 год запланирована реконструкция ещё 323 км теплотрасс. К 2029 году планируется заменить 1,6 тыс. км старых трубопроводов, что должно снизить износ до 45%.

Протяжённость изношенных участков:

Общая длина теплосетей – 13 313 км, из которых половина (ок. 6 900 км) находится в неудовлетворительном состоянии (52% износа);

В крупных городах доля старых сетей особенно велика. Например, в Алматы 802,6 км (57,9%) магистральных и распределительных теплотрасс эксплуатируются более 25 лет, в среднем износ в городе – около 56–59%;

Местные планы также приводят статистику. Так, на начало 2025 года износ теплосетей Костанайской области составлял 45,7% (с целью снизить до 45%), а в Карагандинской агломерации – в Караганде 71,2%, Темиртау 68,5%, Шахтинске 61,7%;

Несмотря на активную подготовку, аварии трубопроводов остаются частыми. В целом минэнерго отмечает, что отопительный сезон 2024/25 прошёл стабильно, крупных технологических нарушений не зафиксировано, а число случаев несоблюдения температурного графика сократилось в 3 раза – с 215 до 65. Вместе с тем региональные сбои происходят регулярно.

Наиболее проблемные регионы:

Карагандинская область: критический износ сетей – Караганда 71,2%, Темиртау 68,5%. Здесь нередки экстренные отключения;

Павлодарская область: город Экибастуз – 91% износа (самый высокий показатель в стране), Павлодар – 83%;

Акмолинская область: Степногорск – 82%, Атбасар – 76,5% износа (рядом – поселок Топар с 68,8%;

Северо-Казахстанская область: Петропавловск – 74% износа.

Мангыстауская область: Актау – 71% износа;

Абайская область (Семей): Семей – 68% износа; регион признан критическим, модернизация местной ТЭЦ – задача правительства;

Туркестанская область: Кентау – 65% износа;

Семей (Абайская обл.) – находится в красной зоне риска по износу сетей, отопление названы также критическими (по поручению премьера Олжаса Бектенова региону предстоит незамедлительная модернизация).

Приоритеты модернизации по регионам:

Алматы: обновление теплосетей – один из приоритетов акимата. В 2024 г. реконструировано 20 км сетей и 85 котельных, в 2025 планируется модернизировать 40 км. Это позволит снизить износ с 57,9% до ≈54,1%;

Региональные проекты: на модернизацию котельных и ТЭЦ в г. Кентау, Риддере, Кызылорде и Кокшетау в 2024–25 гг. зарезервировано 16,0 млрд тенге. Кроме того, в рамках программы 002 – Развитие теплоснабжения поддержано 25 проектов модернизации ТЭЦ/сетей на суммы свыше 40,4 млрд тенге;



Абайская обл. (Семей): ТЭЦ Семей включена в красную зону, модернизация источника и сетей здесь — приоритет поручений государства.

В совокупности все приведённые данные иллюстрируют критическую нагрузку на изношенные теплосети и необходимость срочных технических мероприятий по их ремонту и замене[8].

### **1.3 Обзор существующих систем мониторинга**

В современных условиях надёжное функционирование систем теплоснабжения невозможно без регулярного мониторинга технического состояния трубопроводов. Своевременное выявление дефектов, снижение теплопотерь и предотвращение аварий требует применения как традиционных, так и инновационных методов диагностики. Ниже представлены основные технологии, применяемые в инженерной практике, с указанием принципов их действия, аппаратного состава и условий использования.

Акустическая диагностика (корреляционно-акустический метод). Основана на регистрации гидроакустических шумов, возникающих в результате утечки теплоносителя. На контролируемом участке трубы устанавливаются пьезоэлектрические датчики, фиксирующие вибрации. С помощью корреляционного анализатора рассчитывается разность времени прихода сигнала, что позволяет определить расстояние до источника шума. Метод требует доступа к телу трубы и применяется преимущественно на металлических трубопроводах. Погрешность определения утечки составляет от  $\pm 0,5$  до  $\pm 2$  метров. Применяется при наличии активных протечек и доступа к тепловым камерам;

Ультразвуковая толщинометрия (в том числе метод направленных волн Wavemaker). Данный метод позволяет оценить остаточную толщину стенки трубы без её демонтажа. Генерируется ультразвуковая волна, которая распространяется вдоль трубы и отражается от зон с коррозией или дефектами. По времени прохождения и амплитуде сигнала можно определить локальные утонения. Наиболее эффективно использовать данный метод на открытых участках трубопровода или в местах с частичным демонтажом изоляции. Ограничением является необходимость понижения температуры трубы до 50 °С и дальность действия до 15 метров. Используются приборы типа Wavemaker, Olympus EPOCH и аналогичные;

Видеодиагностика (внутритрубный осмотр). Применяется для инспекции внутренней поверхности трубопроводов. Внутрь осушенного участка вводится камера, закреплённая на гибком кабеле или роботизированной платформе. Получаемое изображение позволяет выявить отложения, трещины, механические повреждения и коррозию. Метод актуален для труб диаметром от 100 мм при наличии доступа с двух сторон. Дальность осмотра составляет до 60–100 метров. Широко применяются инспекционные системы iPEK Rovion, RIDGID и др;

Тепловизионная аэросъёмка. Инфракрасная съёмка поверхности грунта или дорожного покрытия позволяет обнаружить зоны с аномально высокой температурой, указывающие на утечку теплоносителя или нарушение теплоизоляции. Используется стационарная тепловизионная камера, либо оборудование, установленное на БПЛА. Метод эффективен для обследования протяжённых подземных сетей без вскрытия. Для получения достоверных данных необходим температурный перепад не менее 10 °С и благоприятные погодные условия (отсутствие осадков и ветра). Применяются устройства типа FLIR T840, DJI Mavic с ИК-камерой и т. д;

Гидравлические испытания (опрессовка). Является стандартным методом проверки герметичности трубопровода. Участок заполняется теплоносителем под давлением, превышающим рабочее на 25–50 %. При снижении давления фиксируется наличие протечки. Метод используется как в эксплуатационный период, так и при приёмке новых участков. Требуется временного вывода линии из работы и слива теплоносителя по завершении испытаний;

Температурные испытания. Заключаются в подаче теплоносителя с максимальной температурой в начале испытания и его резком охлаждении в процессе. Это позволяет выявить слабые места трубопровода, компенсаторов и сварных соединений, чувствительных к температурным расширениям. Метод рекомендован к применению раз в несколько лет на протяжённых участках;

Визуальный осмотр. Наиболее простой, но ограниченный по точности метод, предполагающий обход тепловых камер и внешних участков трубопровода с фиксацией очевидных повреждений, следов протечек, конденсата или коррозии. Не позволяет оценить состояние скрытых участков труб и теплоизоляции;

Мониторинг с использованием беспроводных датчиков и IoT-систем. Современные системы мониторинга позволяют использовать распределённые датчики температуры, давления, расхода и вибрации, подключённые по беспроводным каналам связи (LoRaWAN, NB-IoT, GSM, Wi-Fi). Такие датчики устанавливаются в тепловых камерах, ЦТП, на ответвлениях сетей или в домовых ИТП и передают данные в реальном времени. Используются микроконтроллеры ESP32/STM32, модули LoRa SX1276, GSM-модемы SIM800, телеметрические шлюзы и серверы сбора данных. Протоколы обмена

MQTT, Modbus, HTTP. Системы работают автономно (до 10 лет на батарее) и могут передавать сигналы тревоги в случае аварии, отклонения температуры или падения давления. Такие решения активно внедряются в Казахстане, особенно в пилотных проектах цифровизации коммунальной инфраструктуры.

Интеллектуальный мониторинг на основе SCADA и облачных платформ. В крупных системах теплоснабжения применяются SCADA- и IIoT-платформы (например, Danfoss Leanheat, Kamstrup Heat Intelligence, Siemens MindSphere), объединяющие данные с тысяч датчиков, теплосчётчиков и ИТП в единую сеть. Облачные сервисы визуализируют данные, анализируют тренды и

автоматически формируют предупреждения о возможных авариях. Применяется в городских системах Европы, России и внедряется в отдельных регионах Казахстана (например, Алматы и Павлодар).

#### 1.4 Технические ограничения

Надёжность радиосвязи в сложной среде. В городских условиях плотной застройки и большого числа металлических поверхностей радиосигналы сталкиваются с многократным отражением и затенением, что затрудняет стабильную связь. Как отмечают исследователи, основная проблема – организация и поддержка радиоканала требуемой надёжности в условиях городской застройки, многократного отражения, затенения и т. д. На надёжность передачи влияют помехи от работающих систем связи других стандартов и промышленные помехи. Это означает, что даже при использовании протоколов вроде ZigBee или Wi-Fi сигналы могут ricochetить, накладываться друг на друга и ухудшаться из-за соседних сетей, что приводит к потерям пакетов и слепым зонам.

Затухание сигнала в неблагоприятных условиях[9]. При прокладке теплотрасс под землей или под толстым покрытием сигнал значительно ослабляется. Аналогично шахтным условиям, где затухание сигнала делало беспроводную связь почти невозможной, в подземных или глубоко укрытых коммуникациях радиоволны проходят через плотные материалы и грунт и гасятся. Например, исследования показывают, что если труба находится в глине или под водой, сигнал ослабляется в большей степени, чем при прокладке над землёй. Это накладывает ограничения на дальность связи и требует дополнительных ретрансляторов или усилителей в магистральных участках теплосетей.

Ограниченная дальность и отсутствие прямой видимости. Маломощные радиомодули при прохождении больших расстояний без прямой видимости быстро теряют связь. Решением может быть ячеистая (mesh) топология с ретрансляцией через узлы, однако это усложняет сеть. Как упоминается в одном проекте, для покрытия участков без видимости использовалась «топология ячеистой сети с поддержкой алгоритмов динамической маршрутизации и ретрансляции через промежуточные узлы», что позволяет применить маломощные передатчики. Тем не менее такая схема добавляет задержки и требует повышенной сложности ПО.

Питание и энергопотребление датчиков. Большинство беспроводных датчиков работает на батарейках. Высокая энергозатратность (особенно у GSM) ограничивает время автономной работы и требует частого обслуживания. Даже в специализированных проектах по мониторингу теплосетей использование автономных батарей остаётся трудным: в одном исследовании указано, что в условиях низких температур срок службы батарей существенно сокращается что снижает срок службы автономных источников питания. Для областей без постоянного электроснабжения применяют

аккумуляторы или солнечные панели – как в южнокорейском примере, где оборудование беспроводной системы может эксплуатироваться от собственной аккумуляторной батареи. При этом необходимость замены или подзарядки аккумуляторов на распределённых участках отопления остаётся серьёзной операционной проблемой[10].

### **1.5 Организационные и эксплуатационные сложности**

Основные сложности состоят в следующем:

Обслуживание и замена батарей. Из-за ограниченного ресурса батарей требуется плановое сервисное обслуживание. В холодных и удалённых районах регулярная замена источников питания сопряжена с дополнительными затратами труда и рисками пропуска события. Как упомянуто выше, низкотемпературные условия снижают срок службы автономных источников питания, что косвенно указывает на более частое обслуживание.

Защита оборудования от вандализма и повреждений. Датчики и ретрансляторы на теплотрассах зачастую устанавливают вне зданий и в условиях свободного доступа, что повышает риск умышленных повреждений или краж. Требуется прочные корпуса и меры физической защиты (защита от влаги, пыли, механических воздействий), что увеличивает сложность и стоимость внедрения[11].

Отсутствие единых стандартов и совместимости. В сегменте ЖКХ применяются разные беспроводные технологии (ZigBee, LoRa, NB-IoT, GSM и др.), и нет одного общепринятого стандарта обмена данными. Это затрудняет масштабирование и интеграцию решений от разных поставщиков. Как отмечают эксперты в смежных областях, проблема заключалась не в отсутствии стандартов, а в их избытке, что актуально и для систем мониторинга. Из-за этого службы эксплуатации часто сталкиваются с трудностями при объединении данных: одни датчики могут работать по ZigBee, другие – по сотовой сети, что требует дополнительных шлюзов и конвертеров.

Организационные расходы и кадры. Развертывание беспроводной сети мониторинга требует значительных инвестиций в устройство инфраструктуры и обучение персонала. Компании ЖКХ нужны специалисты по IoT, настройке сетей и кибербезопасности. Кроме того, при нарушениях связи или поломках узлов необходимо быстро находить и заменять оборудование – что нередко осложняется удалённостью теплосетей и отсутствием опыта у обслуживающего персонала в работе с подобными системами.

Каждый из перечисленных факторов должен учитываться при проектировании и эксплуатации систем дистанционного мониторинга тепловых сетей. Примеры демонстрируют, что даже при использовании современных технологий (например, ZigBee-сетей и GSM-связи) разработчики сталкиваются с ограничениями радиосвязи и энергоснабжения, а успешный



опыт (как в Корее) достигается за счёт резервных источников питания и отказа от кабельных линий[11].

## 2 Теоретические основы беспроводных технологий в мониторинге

### 2.1 Основы передачи данных в беспроводных сетях

В системах мониторинга теплосетей с применением технологий Интернета вещей (IoT) передача данных осуществляется по беспроводным каналам, что позволяет контролировать параметры трубопроводов (температуру, давление, утечки и др.) в реальном времени без прокладки кабельных линий. Такие решения особенно актуальны в условиях разветвлённой городской инфраструктуры и труднодоступных участков тепловых трасс.

Типичная архитектура мониторинга теплосетей на базе IoT включает следующие уровни:

- уровень датчиков (периферийный уровень)  
На контролируемых участках тепловой сети устанавливаются интеллектуальные датчики: температуры, давления, расхода, вибрации и др. Эти устройства оснащены встроенными микроконтроллерами и модулями беспроводной связи (например, LoRa, NB-IoT, ZigBee, GSM). Каждый датчик формирует пакет данных, содержащий измеренные значения, идентификатор устройства, временную метку и дополнительные служебные поля.

- уровень сбора данных (сетевой уровень)  
Информация от датчиков передаётся по беспроводным каналам на промежуточные узлы — шлюзы (gateways), которые выполняют функции агрегации и ретрансляции[12]. В зависимости от используемой технологии шлюз может принимать пакеты от сотен устройств одновременно.

Например:

В LoRaWAN-сетях шлюз принимает сигналы от датчиков и пересылает их по Ethernet, Wi-Fi или сотовой сети на сетевой сервер.

В NB-IoT и GSM-решениях данные от устройства напрямую передаются через сотовую сеть на сервер или API-интерфейс оператора.

- уровень обработки данных (облачный или локальный сервер)  
Принятые данные поступают на сервер мониторинга, где они обрабатываются, архивируются и анализируются.

Здесь выполняются проверка целостности пакетов, фильтрация ложных или ошибочных значений, формирование временных рядов и трендов, выявление аномалий (например, превышение температуры или резкое падение давления).

- уровень отображения и управления (интерфейс пользователя)  
Пользователь (инженер, диспетчер) получает доступ к данным через веб-интерфейс или мобильное приложение. Интерфейс отображает:

- текущие параметры с каждого узла;
- графики и тепловые карты;

- уведомления об авариях и событиях;
- отчёты о состоянии системы в целом.

Процесс передачи данных (пример на LoRaWAN).

Датчик температуры установлен в тепловой камере формирует измерение:

$T = 72.5^{\circ}\text{C}$

Данные кодируются в LoRaWAN-пакет и отправляются с использованием, например на частоте 868.1 МГц. Шлюз в радиусе до 2–3 км принимает пакет и пересылает его по протоколу UDP на сервер в облаке (например, The Things Stack). Сервер декодирует пакет, распознаёт устройство, сохраняет значение температуры и обновляет визуализацию в интерфейсе[13].

Если температура выше порога, система формирует автоматическое уведомление (например, SMS или e-mail оператору). Преимущества беспроводного подхода. Отсутствие необходимости прокладывать кабельные линии в грунте или вдоль трасс. Автономная работа датчиков от батарей до нескольких лет. Масштабируемость сети (добавление новых точек не требует перепланировки). Возможность удалённого доступа и управления.

Для минимизации энергопотребления датчики передают данные по расписанию (например, 1 раз в 15 минут) и большую часть времени находятся в спящем режиме. Протоколы типа LoRaWAN или NB-IoT обеспечивают надёжную передачу при малой скорости, но высокой чувствительности и проникновении сигнала.

## **2.2 Сравнительный анализ технологий LoRa, NB-IoT, GSM, Wi-Fi и ZigBee**

**LoRaWAN:** LoRaWAN предоставляет очень большой радиус действия при низком энергопотреблении и возможностью собственноручно разворачивать сеть (не требуя услуг оператора). В городской среде реальная дальность канала составляет порядка до 1–3 км. Однако LoRa имеет крайне низкий битрейт (несколько сотен бит/с – десятки кбит/с), поддерживает лишь короткие пакеты (единицы-дюжины байт) и малое число каналов в лицензированном диапазоне 868, 433 МГц. При большом числе узлов или частом опросе такой сети происходит перегрузка эфира (возникают конфликты пакетов). Кроме того, LoRaWAN работает в открытых ISM-диапазонах, поэтому может испытывать межсистемные помехи при высокой плотности устройств. Тем не менее модульные станции на высокой чувствительности (SF) и механизмы ADR позволяют увеличивать ёмкость сети: при добавлении новых шлюзов узлы автоматически повышают скорость и сокращают время передачи.

**NB-IoT:** NB-IoT (Narrowband IoT) – сотовая технология на базе LTE, работающая на низких частотах (обычно 800–900 МГц, возможен LTE-450) и рассчитанная на малые объёмы передачи. Она обеспечивает глубокое проникновение сигнала в подземные или удалённые объекты и высокую

плотность подключений[14]. NB-IoT обладает малым энергопотреблением благодаря режимам энергосбережения PSM/eDRX, что важно для автономных датчиков. К ограничениям относится высокая задержка передачи и зависимость от оператора (сеть NB-IoT организует оператор мобильной связи) – отсутствие покрытия или отказ абонентской сети делают связь невозможной без собственного LTE-инфраструктуры. NB-IoT поддерживает ограниченное число каналов (узкая полоса в 180 кГц) и меньшую скорость по сравнению с традиционной LTE. NB-IoT допускает мощность передачи до ~23 дБм, несколько десятков килобит в секунду (до ~250 кбит/с) и обеспечивает глубокую проникающую способность (высокая избыточная чувствительность сигнала).

GSM/GPRS (сотовая связь): 2 Технологии 2G/3G (GSM/GPRS/EDGE) долгое время применялись в системах удалённого учёта ЖКХ. Они дают глобальное покрытие сети и относительно высокую скорость обмена (по сравнению с LPWAN), однако имеют существенные недостатки. Мобильные модемы расходуют много энергии, требуют SIM-карт и оплаты трафика. В условиях городской застройки сигнал 2G может плохо проникать в подвалы и изолированные помещения, а сама сеть в перспективе устаревает. В современных реалиях часто переходят на LTE (NB-IoT/eMTC) или альтернативные частоты (например, планируемый LTE 450 МГц), но всё ещё встречаются решения на GPRS для совместимости со старыми установками[15].

ZigBee: Стандарт IEEE 802.15.4/ZigBee оперирует на 2.4 ГГц с маломощными сигналами, обеспечивая скромную скорость (20–250 кбит/с) и радиус действия порядка 10–100 м. Отдельный узел ZigBee не тянет далеко, однако протокол поддерживает ячеистую (mesh) топологию: каждое устройство может выступать маршрутизатором, ретранслируя пакеты для других узлов. Это позволяет строить разветвлённые сети с тысячами узлов и расширять зону покрытия путём объединения нескольких перепрыжковых передатчиков. В то же время ZigBee сильно перекрывается по спектру с Wi-Fi и Bluetooth, что ведёт к взаимным помехам в загруженных 2.4 ГГц-сетях. Для работы на загроможденных частотах нужны тщательный выбор канала и параметров сети.

### **2.3 Особенности передачи данных в условиях городской инфраструктуры**

В плотной городской застройке радиосигнал подвергается значительным затуханиям и искажениям. Многоэтажные здания создают urban canyon: они затеняют сигналы, вызывают многолучевое распространение и сильное подавление сигнала (много дБ потери при прохождении стены). Отражения от зданий приводят к интерференции, что вызывает флуктуации уровня сигнала и периодические провалы связи. Городской радиоспектр сам по себе зашумлён: помимо бытовых сетей (Wi-Fi, Bluetooth на 2,4 ГГц, которые LoRa



не затрагивает), в диапазонах ISM могут работать другие IoT-сети или промышленные сигналы (перегрузка канала, внешние интерференции). LoRa в нелицензированном канале особенно уязвима к помехам от соседних устройств и перекрывающим пакетам – эксперименты показывают, что при большом скоплении LoRa-устройств уровень приёма заметно ухудшается. Сотовая NB-IoT (лицензированный спектр) защищена от чужих передатчиков, но в городах возможно перегрузка сетевого ресурса: при тысячах устройств в соте могут возрастать задержки и вероятность коллизий при доступе (несмотря на механизмы планирования, спектр конечен). Также важны естественные факторы: дождь, влажность и прочие факторы влияют незначительно на передачу, но слишком высокая нагрузка базовых станций может снижать пропускную способность для IoT-устройств.

Для обеспечения стабильной беспроводной связи в условиях плотной городской застройки применяют комплекс технических и инженерных решений:

Оптимальный диапазон и частотный выбор. Используются субГГц диапазоны (433–868 МГц для LoRa, 800–900 МГц для NB-IoT), которые обеспечивают лучшую проникающую способность сквозь стены и меньшее затухание по сравнению с более высокими частотами (например, 2,4 ГГц). GSM/IoT-сети также работают в низких полосах (EGSM 869–894 МГц) по этой же причине. Часто выбирают низкочастотные диапазоны, где длина волны больше и эффект дифракции сильнее.

Добавление шлюзов, повторителей и малых сот. Для расширения зоны покрытия размещают дополнительные базовые станции, гейтвеи, ретрансляторы и mesh-роутеры. Например, в сетях LoRaWAN устанавливают дополнительные шлюзы на крышах зданий, а для NB-IoT внедряют малые базовые станции (фемтосоты, микроячейки) внутри зданий и в городских районах. В Wi-Fi и ZigBee применяют mesh-маршрутизаторы и range-boosters, что позволяет покрывать большие здания или кварталы.

Регулировка мощности передачи. Увеличение мощности сигнала (в пределах допустимых норм) помогает поддерживать надёжную связь на больших расстояниях и через препятствия, однако требует баланса с автономностью устройства.

Оптимизация и грамотное размещение антенн. Эффективность связи повышается за счёт использования высокочувствительных и направленных антенн, а также грамотного их расположения (на крыше, мачте или другом возвышении). Разнесённые и 3D-ориентированные антенны учитывают трассы прокладки и препятствия на местности. В городах применяются направленные и секторные антенны с высоким коэффициентом усиления для преодоления мультипутевых затуханий и городского колпака. Правильное размещение датчиков и шлюзов с максимальной видимостью минимизирует потери сигнала.

Адаптация протоколов и параметры сети. Современные протоколы (например, LoRaWAN с ADR — Adaptive Data Rate) автоматически подстраивают скорость передачи и мощность сигнала в зависимости от

условий связи. NB-IoT использует энергосберегающие режимы (PSM, eDRX) и механизмы повторных передач для повышения надёжности канала. GSM/LTE-сети применяют частотное хоппинг и современные схемы модуляции для борьбы с интерференциями.

Адаптивная маршрутизация и оптимизация сети. Планирование покрытия учитывает зоны плохого сигнала (слепые зоны). В LoRa, ZigBee, Wi-Fi и других сетях реализуется mesh или релейная маршрутизация, что позволяет строить сети с обходом препятствий. В некоторых случаях применяется переключение между различными каналами или резервными технологиями (например, NB-IoT ↔ LTE-M).

Управление доступом и планирование ресурсов. В LoRaWAN реализуется распределение времени и частот для снижения числа коллизий (ALOHA-протокол), а NB-IoT как сетевая технология использует расписание и кодовые каналы для разделения большого числа устройств.

Комбинированные инженерные меры. Внедрение нескольких шлюзов, мощных антенн, адаптивных протоколов, правильное размещение оборудования и динамическая настройка сети обеспечивают устойчивый канал передачи даже при высоких помехах и плотной застройке. В системах мониторинга (например, для теплоснабжения) применяются эти подходы для стабильной связи датчиков с диспетчерским центром.

Современные исследования и практика показывают: Комплексный подход с сочетанием всех перечисленных мер (частотный выбор, усилители, размещение антенн, адаптивные протоколы и планирование сети) позволяет организовать надёжный беспроводной мониторинг даже в сложной городской среде.

## **2.4 Перспективы использования 2G (GSM) в современных условиях**

Технология 2G (GSM/GPRS) долгое время служила основой для передачи данных в системах мониторинга и телеметрии благодаря своей простоте, широкому покрытию и поддержке большинством операторов сотовой связи. Однако в последние годы наметилась явная тенденция к сворачиванию сетей второго поколения в ряде стран.

В частности, в развитых странах Европы, США, Австралии и некоторых регионах Азии 2G уже официально отключено или выведено из приоритетного обслуживания. Это связано с необходимостью перераспределения частотного ресурса в пользу более современных стандартов, таких как LTE и 5G. Устаревшая инфраструктура, ограниченные скорости передачи (до 85.6 кбит/с) и отсутствие перспектив технологического развития делают 2G экономически невыгодной для операторов связи в долгосрочной перспективе.

Тем не менее, в странах СНГ, включая Казахстан, сети 2G продолжают функционировать, главным образом из-за широкой базы устройств, использующих этот стандарт:

- банковские терминалы (POS);
- охранные сигнализации и датчики;

- удалённые контроллеры и простые IoT-устройства;
- телефоны с кнопочным управлением (feature phones).

Операторы сохраняют базовую поддержку 2G для обеспечения обратной совместимости, однако она постепенно ограничивается в городах, где приоритет отдают LTE и 5G. Особенно это проявляется в крупных мегаполисах, где частоты GSM перераспределяются под NB-IoT и LTE Cat-M1, более эффективные и экономичные для Интернета вещей.

Кроме того, производители модемов и микросхем сокращают выпуск устройств с поддержкой только 2G, переходя на мультистандартные модули, ориентированные на NB-IoT, Cat-M1 или LTE Cat.1. Это позволяет IoT-решениям быть устойчивыми к будущим отключениям старых стандартов.

Технология 2G всё ещё актуальна для использования в удалённых и сельских районах, где отсутствует покрытие LTE/5G, а также в проектах с минимальными требованиями к скорости передачи. Однако для новых разработок, особенно с ожидаемым сроком службы более 3–5 лет, рекомендуется использовать NB-IoT, Cat-M1 или LTE Cat.1, как более перспективные и поддерживаемые решения в сфере беспроводной передачи данных.

## **2.5 Энергоэффективность и надёжность LoRa, GSM и NB-IoT в мониторинге теплосетей**

Технические параметры и энергоэффективность. Технологии LoRaWAN, NB-IoT и GSM (GPRS/3G) существенно различаются по потреблению энергии. LoRaWAN оптимизирована для сверхнизкого энергопотребления: передатчик может работать от стандартной батареи несколько лет при нерегулярной передаче данных. По оценкам, устройства на LoRaWAN могут обеспечивать годы работы от батареи. NB-IoT также рассчитан на долгую автономность: модули NB-IoT потребляют мало энергии, позволяя устройствам работать много лет от одной батареи. Это достигается за счёт специализированных режимов сна (eDRX, PSM) и низкого пикового тока (у SIM7020 ~320–500 мА vs 2 А у классического GSM-модуля SIM800). Традиционные GSM-модемы GPRS/3G требуют значительно больше энергии: при плохом покрытии максимальный ток передачи достигает ~2 А, а в режиме ожидания – сотни миллиампер, что заметно сокращает время автономной работы. Таким образом, в приложениях сбора данных с разреженной периодичностью наиболее энергоэффективна LoRa, за ней следует NB-IoT, тогда как GSM-модули уступают по этому показателю.

LoRaWAN и NB-IoT работают в субгигагерцовом диапазоне (868/915 МГц и 450–900 МГц соответственно), что обеспечивает хорошую проникающую способность сигнала. LoRaWAN обеспечивает очень большую дальность связи: в открытой местности до 10–15 км, в городской среде – до ~2–3 км. Высокая чувствительность приёмника (до –140 дБм) и использование расширенной модуляции CSS делают LoRaWAN помехоустойчивой к шумам и

отлично подходящей для применения в сложных условиях. Однако реальная дальность связи ограничена окружением: в городских тепловых камерах и колодцах обычно достигается лишь несколько километров, поэтому базовые станции (LoRa-шлюзы) рекомендуется устанавливать на возвышении.

NB-IoT, будучи сотовым стандартом, базируется на существующей LTE-инфраструктуре. Он обеспечивает улучшенное покрытие по сравнению с GSM (около +20 dB усиления) и теоретический радиус действия до 10–15 км. NB-IoT демонстрирует высокую надёжность связи в сложной среде: стандартизованная сотовая система гарантирует защиту от помех и равномерность покрытия, в том числе под землёй и внутри зданий. Например, отмечается, что NB-IoT подходит для высокопроникающих применений, поддерживает работу в подземных камерах и колодцах. GSM/GPRS-связь обеспечивает широкое покрытие там, где доступна мобильная сеть, но устаревание 2G/3G может ограничивать её перспективы. Модули GSM легко теряют приём в замкнутых металлических коробах тепловых камер без ретрансляции, тогда как для NB-IoT и LoRaWAN в таких местах часто применяют внешние антенны или дополнительные шлюзы.

LoRaWAN использует расширенную CSS-модуляцию и многочисленные каналы связи, что делает её устойчивой к внешним помехам и шумам на частоте. Стандартная скорость передачи невысока (до 50 кбит/с), но это даёт высокую помехозащищённость. NB-IoT и GSM работают в лицензированных диапазонах, где внешний шум минимален, поэтому помехи внешних сетей здесь несущественны. Все три технологии опираются на низкие частоты, вследствие чего влияние дождя или влажности на затухание сигнала невелико. Основное влияние сезонных факторов связано не со связью, а с электроникой и аккумуляторами: при очень низких температурах ёмкость батареи падает, а на высоких – могут ухудшаться характеристики передатчиков. На практике и LoRa, и NB-IoT-сенсоры специально разрабатывают с учётом температурных диапазонов – например, герметичные IP65-корпуса с подсистемами обогрева.

В России и СНГ LoRaWAN и NB-IoT уже находят практическое применение в ЖКХ. Так, на демонстрационном участке Мытищинской теплосети испытана система оперативного контроля теплотрасс на базе LoRaWAN. Для дистанционного съёма показаний и аварийного мониторинга газо-, водо- и теплосчётчиков внедряются LoRa-решения: например, АО Казахтелеком построило крупномасштабную IoT-сеть на основе LoRa во многих городах Казахстана. NB-IoT также используется в коммунальной сфере: эту технологию применяют для автоматизированного сбора показаний приборов учёта и контроля параметров инженерных сетей. Производители метрологического оборудования (например, Пульс) выпускают NB-IoT-модули с автономным питанием для учёта воды, тепла и газа – благодаря чему срок службы узла диспетчеризации достигает 10 лет и более. В ряде пилотных проектов LoRa и NB-IoT внедряются параллельно: так, компания Лартех сертифицировала радиомодули, работающие сразу по двум стандартам (LoRaWAN+NB-IoT) для использования в сложных IoT-решениях.

При выборе технологии для мониторинга теплосетей в СНГ учитывают специфику региона. LoRaWAN привлекает возможностью развернуть частную сеть без оператора и лёгким масштабированием – важно для охвата разреженно расположенных объектов и закрытых площадок (котельные, подземные коммуникации). Однако необходимо обеспечить наличие LoRa-шлюзов в нужных зонах покрытия. NB-IoT же апеллирует к существующей телеком-инфраструктуре: в городах Казахстана и России операторы постепенно разворачивают NB-IoT сети (Beeline, МТС, Tele2), которые обеспечивают стабильную связь там, где есть LTE-базовые станции. GSM-модули служат резервным решением в местах полного отсутствия NB-IoT или LoRa-покрытия, но они хуже годятся для долгосрочной автономной работы. В целом для удалённых датчиков с редкой передачей данных и критичной экономией энергии предпочтительнее LoRaWAN; для устройств с более плотным трафиком и необходимостью гарантированного соединения – NB-IoT.

Выбор должен исходить из локальных условий покрытия и требований проекта: например, в Алматы и Астане уже действуют LoRaWAN-сети Казахтелекома, тогда как в регионах разворачиваются NB-IoT-площадки, что позволяет комбинировать обе технологии для обеспечения надёжной беспроводной телеметрии в теплосетях.

Для обеспечения устойчивой связи в городе применяют комплекс мер. Наряду с частотным подбором и усилением мощности важны сетевые решения: высокая плотность шлюзов или базовых станций позволяет покрывать мёртвые зоны. В LoRaWAN сеть дублирует приём – одно сообщение могут принять сразу несколько шлюзов, что повышает шанс доставки. В GSM-сетях применяют механизмы Хэндовер (англ. Handover), когда в сотовой связи процесс передачи обслуживания абонента во время вызова или сессии передачи данных от одной базовой станции к другой, и агрегацию (NB-IoT Cat NB2 и LTE-M в новых версиях) для бесшовного перехода между сотами.

## **2.6 Использование термоэлектрогенераторов в мониторинге тепловых сетей**

Термоэлектрогенераторы (ТЭГ) – устройства на основе эффекта Зеебека, напрямую преобразующие тепловой поток (градиент температур) в электричество. В контексте систем беспроводного мониторинга городских тепловых сетей идея состоит в том, чтобы использовать тепло теплоносителя (горячей воды/пара в трубопроводах) для автономного питания узлов Интернета вещей (IoT) – датчиков, модулей беспроводной связи (напр. LoRa) и пр. Такая система могла бы заряжать аккумулятор или конденсатор от разницы температур между горячей трубой и более холодной средой (либо между подающим и обратным трубопроводами), обеспечивая беззаменяемое питание сенсоров.



Южные города Казахстана характеризуются относительно мягкими зимами (средняя зимняя температура около  $-2^{\circ}\text{C}$ , тогда как на севере до  $-16^{\circ}\text{C}$ ). Это позволяет использовать сниженные температурные графики теплоснабжения по сравнению с традиционными высокотемпературными режимами. В современных системах все чаще применяется пониженный график  $95/70^{\circ}\text{C}$  (подача/обратка) и даже ниже. Фактически во многих городах температура сетевой воды, подаваемой от ТЭЦ, составляет лишь  $\sim 80\text{--}90^{\circ}\text{C}$  вместо расчётных  $130\text{--}150^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, можно ожидать, что в Шымкенте, Таразе и др. южных городах средняя температура подачи теплоносителя находится в диапазоне  $80\text{--}95^{\circ}\text{C}$ , а температура обратки после потребителей – порядка  $50\text{--}70^{\circ}\text{C}$ . Градиент температур между подающим и обратным трубопроводами обычно составляет порядка  $20\text{--}30^{\circ}\text{C}$ .

Кроме того, существенный перепад температур наблюдается между горячей трубой и окружающей средой (воздухом или грунтом, или железной конструкции, расположенной в колодце). Например, при подаче  $\sim 80^{\circ}\text{C}$  и наружной температуре  $+20^{\circ}\text{C}$  градиент может достигать  $\sim 60^{\circ}\text{C}$ ; даже внутри теплопункта (с температурой воздуха  $30\text{--}40^{\circ}\text{C}$ ) разница с трубой около  $40\text{--}50^{\circ}\text{C}$ . В холодные зимние ночи градиент труба–окружение может быть еще выше. Таким образом, доступные температурные градиенты для ТЭГ в теплосети южных регионов лежат в диапазоне примерно  $\Delta T = 20\text{--}60^{\circ}\text{C}$  (в зависимости от того, используется ли разность подача–обратка или труба–окружающая среда).

Энергоавтономный теплосчетчик. В публикации 2007 г. (Chen et al.) был предложен ТЭГ для питания электронного теплосчетчика на трубопроводе системы отопления. Цель – избавиться от батареи в тепловычислителе. ТЭГ устанавливался между горячей трубой и окружающей средой, и показал достаточную генерацию для работы измерительных цепей и радиообмена. Это был один из первых шагов к умным счетчикам без обслуживания.

Патентованная система мониторинга трубопроводов. В патенте WO2020/111700 описана беспроводная система мониторинга трубопровода, где каждый датчик снабжен термоэлектрическим модулем для питания за счет разницы температуры транспортируемой среды и окружения. Патент указывает на важность такого подхода для труднодоступных участков (например, подземных труб), где замена батарей затруднена. Решение включает оптимальную конструкцию теплообменников для ТЭГ, чтобы получать стабильную энергию.

Научное исследование (Lineykin et al., 2021). Как уже упоминалось, эта работа продемонстрировала реальный прототип узла на водопроводе, питающегося от ТЭГ. Отличительной особенностью было использование микроперепадов температур (диапазона  $1\text{--}5^{\circ}\text{C}$ ) и тонкой настройки системы охлаждения (радиаторов) для поддержания генерации. Несмотря на столь малый градиент (просто ежедневные колебания температуры трубы и воздуха), узел выработал  $>0,5\text{--}2$  мВт, чего оказалось достаточно для его задач. Данный проект подтвердил принципиальную возможность заменить крупную батарею

(~20 А·ч) на малый ТЭГ-блок, если оптимизировать электронику под energy harvesting.

Коммерческие продукты для HVAC. Помимо уже упомянутого клапана MVA003, существуют и другие реализации. Компания Micropelt предлагала целую линейку автономных датчиков и приводов, работающих от тепла отопительных приборов. В их материалы отмечают, что термогенератор преобразует разность температур между подачей радиатора и воздухом в электричество, обеспечивая беспроводную и необслуживаемую работу датчика. Такие устройства используются в системах умного здания для мониторинга и регулирования отопления без прокладки проводов. Ещё один пример – Marlow EverGen (ныне Coherent): применялся для питания беспроводных датчиков температуры/давления на трубопроводах и резервуарах в промышленности. В статье TechBriefs (2011) отмечалось, что EverGen способен от нескольких градусов перепада выдавать милливатты для питания сенсоров, клапанов и других маломощных устройств

Предлагались модификации для установки на горячие трубы отопления (Solid-to-Air) или между горячим и обратным трубопроводом (Liquid-to-Liquid) – как раз типичный случай теплотрассы.

На рынке доступны различные термоэлектрические модули, пригодные для генерации энергии от указанных градиентов. Многие из них внешне похожи на типичные модули Пельтье (пластины ~40×40 мм с выводами), но оптимизированы под генерацию тока (повышенная термостойкость горячей стороны, оптимальное внутреннее сопротивление и т. д.). В таблице 2.1 приведены примеры таких модулей.

Таблица 2.1 – Модели термоэлектрогенераторов

| Модель<br>производитель          | Максимальный $\Delta T$ ,<br>°C | Выходные параметры (при<br>номинальном $\Delta T$ )                                                           | Ориентировочная<br>цена                             |
|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| TEP1-142T300<br>(Diandong)       | 300                             | ~5 В, 1 А (5 Вт) при $\Delta T \approx 300$<br>°C; холостое<br>~7,3 В                                         | ~827 руб. (~11 \$,<br>Рос. рынок) <a href="#">5</a> |
| SP1848-27145<br>(кит. модуль)    | 150                             | До ~5 В холостого хода при<br>больших $\Delta T$ ;<br>низкотемпературная<br>эффективность ниже<br>оптимальной | ~6 \$ (Amazon) <a href="#">6</a>                    |
| Tegpro 5W<br>(TEGmat)            | 200+                            | ~5 В, ~1 А (до 5 Вт) при<br>большом градиенте (данные<br>производителя)                                       | ~17 \$ (TEGmart,<br>США)                            |
| Marlow/ Coherent<br>TG12-8 (США) | 230 (горячая<br>сторона)        | ~9,5 В холостого хода; ~8 Вт<br>оптимальной мощности при<br>$\Delta T \approx 180$ °C                         | н/д<br>(специализированное<br>устройство)           |

## **2.7 Экспериментальное исследование передачи показаний по технологии LoRa из технологического колодца наружу для применения в беспроводном мониторинге теплосетей**

Цель исследования: экспериментально оценить возможность и качество передачи показаний датчика из технологического колодца наружу посредством технологии LoRa. Необходимо определить, обеспечивает ли связь LoRa надежную доставку данных через препятствие в виде люка и на какое максимальное расстояние при заданных параметрах передачи.

Для измерения качества сигнала были выбраны два критерия: уровень принимаемого сигнала (RSSI) и отношение сигнал/шум (SNR) на приемнике. Также отмечать стабильность соединения (наличие/отсутствие обрывов, изменчивость сигнала во времени).

Передающее устройство (узел датчика): в качестве передатчика использована плата TTGO T-Beam, представляющая собой модуль на базе микроконтроллера ESP32 с интегрированным LoRa-чипом Semtech SX1276. Плата T-Beam размещена в верхней части технологического колодца, 20см под крышкой, измеряя температуру и относительную влажность воздуха. Для автономной работы в полевых условиях плата TTGO T-Beam запитана от аккумулятора (Li-ion батарея 18650). Внешняя антенна LoRa (стандартная штыревая антенна длиной ~4 см, рассчитанная на частоту ~ 433 МГц) [4] подключена к T-Beam и установлена вертикально, чтобы максимально улучшить излучение сигнала из колодца. На рисунке 2.1 фотография передатчика в колодце.

На время испытаний приемник размещался на поверхности (на уровне земли) на возвышении высотой ~1–1.5 м. Пакеты принимались напрямую от передатчика.

Были выбраны следующие параметры передачи:

Тип модуляции: Chirp Spread Spectrum (CSS);

Spreading Factor (SF): 7;

Коэффициент коррекции ошибок (CR): 4/5;

Рабочая частота: 433 МГц;

Полоса пропускания (Bandwidth): 125 кГц;

Мощность передатчика: 17дБм.

Период отправки пакетов: 2 секунды.



Рисунок 2.1 - Фото передающего устройства

Условия и план испытаний: Полевые испытания проводились на участке городской теплосети с технологическим колодцем стандартных размеров. Глубина колодца от поверхности до днища составляет примерно 2 м; диаметр горловины около 0.7 м. Колодец накрывается типовым круглым чугунным люком диаметром ~60 см. Погода во время эксперимента была ясная.

В ходе испытаний приемное устройство перемещалось на разные расстояния от колодца. Отсчет расстояния в журнале велся от вертикальной проекции центра люка. Результаты эксперимента занесены в таблицу 2.2 ниже.

Сначала приемник был в метре над люком, затем на удалениях вплоть до той дистанции, на которой прием сигнала перестал фиксироваться прибором либо не было преграды в виде здания. Места расположения приемника выбирались на открытом пространстве во дворе, где между приемником и передатчиком часто встречались зеленые насаждения в виде деревьев и кустов. На рисунке 2.2 снизу представлены 4 точки приема показаний датчика. 3 и 4 точки — это максимально удаленные расстояния без потерь пакетов, 1 и 2 точках показания были измерены до преграды. До точки 1 – 32м, 2-45м, 3-60м, 4 - 43м.



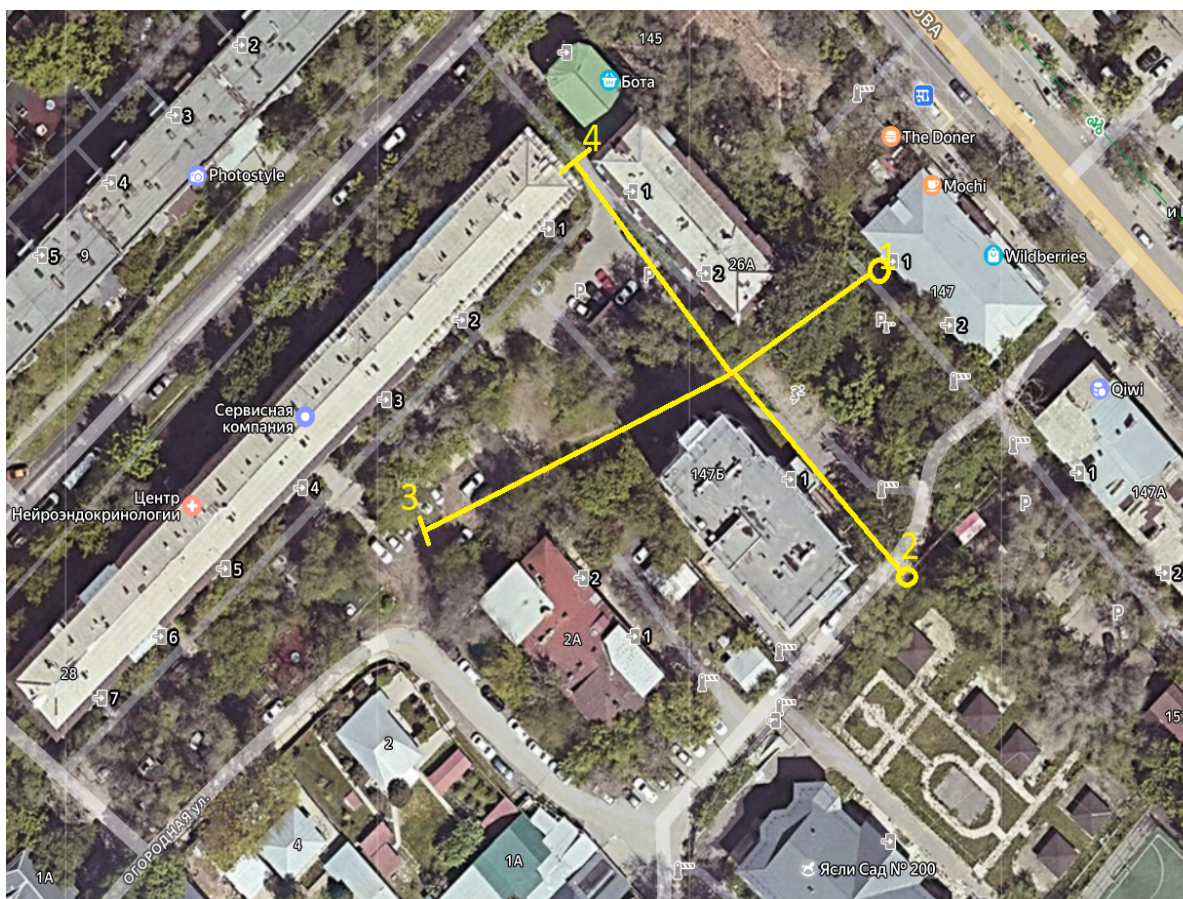


Рисунок 2.2 - Фотография с местами приема и передачи данных

Таблица 2.2 - Форма полевого журнала испытаний

| Точка   | Расстояние (м) | RSSI (dBm) | SNR (dB) |
|---------|----------------|------------|----------|
| Точка 0 | 1              | -72        | 10       |
| Точка 1 | 32             | -100       | 2.6      |
| Точка 2 | 45             | -108       | -5       |
| Точка 3 | 60             | -107       | -9.5     |
| Точка 4 | 50             | -105       | -5       |

В условиях опыта узел в колодце, накрытом чугунным люком, передавал пакеты приемнику на расстояниях порядка десятков метров. Уровень принимаемого сигнала (RSSI) снизился с примерно  $-72$  dBm непосредственно над люком (1 м) до около  $-105...-108$  dBm на максимальных дистанциях  $\sim 50-60$  м. Одновременно отношение сигнал/шум (SNR) деградировало с  $+10$  dB до отрицательных значений около  $-5...-9,5$  dB. Тем не менее связь сохранялась стабильной без потери пакетов вплоть до  $\sim 60$  м, что объясняется высокой чувствительностью LoRa: данная модуляция способна декодировать сигналы даже при отрицательном SNR [3] (вплоть до  $-20$  dB ниже уровня шума). Лишь при дальнейшем удалении или наличии крупных препятствий (например, здания) качество канала резко ухудшалось, приводя к пропаданию пакетов.

Следует отметить, что технологические колодцы теплосетей могут располагаться как на открытом грунте[2] (в зелёных зонах), так и под асфальтовым покрытием дорог. В случае колодца, окруженного грунтом, возможны небольшие зазоры по краям люка и менее однородная среда, через которые часть радиосигнала просачивается наружу. Когда же люк встроен в асфальт, крышка прилегает плотнее и образует сплошной экранирующий барьер, асфальт создает более сильные помехи для сигнала, поэтому условия передачи могут быть более жёсткими. Однако в обоих сценариях основной фактор ослабления сигнала – это металлический люк. Полученные результаты справедливы для типового колодца и чугунной крышки: вне зависимости от окружения, такое препятствие вносит существенное затухание, резко снижая уровень RSSI [3]. Таким образом, дальность надежной связи «датчик в колодце – приёмник на столбе» ограничивается десятками метров при низком расположении антенны приёмника.

Результаты эксперимента в целом демонстрируют применимость технологии LoRa для беспроводного мониторинга городских теплосетей. Таким образом, LoRa является перспективным решением для мониторинга параметров тепловых сетей: технология позволяет регулярно собирать данные о температуре, влажности и других показателях в подземных коммуникациях, избегая прокладки проводов. Необходимо учитывать, что радиус охвата от узла в колодце сравнительно невелик, поэтому для покрытия крупной территории города может потребоваться развертывание нескольких приемных шлюзов. Впрочем, LoRaWAN-шлюзы относительно недороги, а сам протокол поддерживает большую дальность при малом энергопотреблении узлов, что упрощает масштабирование системы мониторинга в городской инфраструктуре.

Для повышения надежности и расширения дальности связи в подобных условиях рекомендуются следующие меры [5]:

Использование улучшенных антенн. Применение антенн с большим коэффициентом усиления или вынос антенны датчика ближе к поверхности (например, под крышку люка) повышает уровень передаваемого/принимаемого сигнала. Качественная настройка антенн и снижение потерь в кабеле также важны для максимальной отдачи.

Установка приемника на более высокой опоре. Размещение приемной антенны как можно выше (например, на вершине столба 4–5 м [1] или на здании) значительно улучшает видимость передатчика. Чем выше антенна, тем большую дистанцию она перекрывает при прочих равных. Высокая точка монтажа снизит затенение сигналов постройками и увеличит площадь уверенного покрытия.

Оптимизация параметров LoRa. Для трудных условий можно снизить скорость передачи данных, увеличив запас по чувствительности. В частности, повышение коэффициента распространения (SF) с 7 до 9–12 и/или сужение полосы пропускания (например, до 62,5 кГц) увеличивают дальность связи, хотя и ценой более медленной передачи. Увеличение SF эквивалентно увеличению энергетического запаса сигнала, позволяя демодулировать пакеты



при более низком SNR. Подбор оптимальных параметров (вместе с адаптивным ADR в LoRaWAN) обеспечивает баланс между надежностью канала и пропускной способностью сети.

В заключение, проведенное исследование показало, что технология LoRa удовлетворяет требованиям беспроводного сбора данных в тепловых сетях. При соблюдении указанных рекомендаций по усилению связи LoRa-сеть способна передавать информацию на диспетчерские узлы. Это открывает путь к созданию современной системы мониторинга теплосетей, повышающей эффективность и безопасность городской инфраструктуры.

### **3 Построение архитектуры**

#### **3.1 Разработка системы мониторинга тепловыми сетями на основе IoT**

Современные здания становятся все более технологичными благодаря интеграции интеллектуальных систем управления микроклиматом и ресурсами. Одним из ключевых элементов таких систем являются термостаты, которые выполняют функцию автоматизированного регулирования температуры в помещениях. В коммерческих зданиях термостаты устанавливаются практически в каждой комнате, тогда как в жилых домах зачастую используется один термостат для всего здания или этажа. Эти устройства позволяют не только поддерживать комфортную температуру, но и оптимизировать энергопотребление, что особенно важно в условиях стремления к повышению энергоэффективности [1].

Интеграция с датчиками, фиксирующими присутствие или отсутствие людей, добавляет еще один уровень автоматизации. Умные здания оснащаются не только термостатами, но и системами управления освещением, что делает возможным создание комфортной и экономичной среды обитания. Развитие технологий Интернета вещей (IoT) открыло новые горизонты в автоматизации: подключенные устройства, такие как умные термостаты, розетки и лампочки, могут управляться удаленно, например, с помощью смартфона, предоставляя пользователям больше возможностей для настройки домашней среды под свои предпочтения [2,3].

Особое место в этой экосистеме занимают системы отопления, которые в сочетании с IoT позволяют не только поддерживать оптимальную температуру, но и минимизировать потери энергии. Например, умные системы отопления способны автоматически регулировать температуру в зависимости от текущих погодных условий, уровня загруженности здания и потребностей пользователей. Такой подход не только улучшает комфорт, но и сокращает затраты на энергоресурсы.

Современные системы управления микроклиматом, включающие отопление, вентиляцию и кондиционирование, являются важной частью умных зданий. Их дальнейшее развитие связано с интеграцией технологий IoT, что способствует созданию энергоэффективных и экологически безопасных решений для жилых и коммерческих объектов [4,6].

В условиях интеллектуального здания, оснащенного инфраструктурой Интернета вещей (IoT), основная задача заключается в обеспечении оптимального управления системой отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха (HVAC). Такая система должна предоставлять пользователям комфортный микроклимат в заданное время с минимальными затратами энергии и без ущерба для конфиденциальности данных. Данная постановка задачи предполагает:

Автоматическое регулирование температуры через открытие и закрытие вентиляционных отверстий.

Управление рабочими циклами HVAC на основе запросов пользователей и текущих данных от датчиков.

Использование интеллектуальных алгоритмов для прогнозирования времени достижения заданной температуры.

Снижение частоты коротких циклов работы HVAC, которые повышают энергозатраты и негативно влияют на окружающую среду [7-8].

Для достижения поставленных целей разработаны математические модели, включающая математическую модель теплопередачи, указанную в формуле 3.1, оптимизацию энергопотребления, прогнозирование времени достижения температуры

Модель теплопередачи:

$$\frac{dC(t)}{dt} = \frac{1}{C} (Q_{\text{вх}} - Q_{\text{вых}} - U(T(t) - T_{\text{наруж}})), \quad (3.1)$$

где  $T(t)$  — температура внутри помещения в момент времени;

$t$  — теплоемкость помещения;

$Q_{\text{вх}}$  — тепловая мощность, подаваемая системой отопления, Вт;

$Q_{\text{вых}}$  — потери тепла через окна и стены, Вт;

$U$  — коэффициент теплопередачи, КВ/К;

$T_{\text{наруж}}$  — температура наружного воздуха, К.

#### Оптимизация рабочих циклов

Для построения оптимального управления системами отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха (HVAC) предлагается следующая математическая структура, включающая методы численного моделирования и оптимизации. Целевая функция минимизации включает энергозатраты и отклонения температуры от заданного уровня [11-13]

$$\min \int_0^T (P_{\text{HVAC}}(t) + \lambda \Delta T(t)^2) dt, \quad (3.2)$$

где  $P_{\text{HVAC}}(t)$  — мгновенная мощность HVAC-системы в момент  $t$ , выраженная в ваттах (Вт) или киловаттах (кВт), определяющая затраты энергии;

$\Delta T(t)$  — отклонение фактической температуры от заданной ( $T(t)$ ), измеряемое в °С.

$\lambda$  — весовой коэффициент, балансирующий приоритет между энергоэффективностью и комфортом (избеганием отклонений).

$T$  — период прогнозирования; интеграл показывает общие затраты и отклонения за это время.

Модель оценки времени достижения температуры:

$$t_{\text{конеч}} = \alpha + \beta_1 (T_{\text{уставка}} - T_{\text{тек}}) + \beta_2 P_{\text{HVAC}} + \beta_3 T_{\text{наруж}} \quad (3.3)$$

где  $t_{\text{конеч}}$  - означает время, необходимое системе отопления;  
 $\alpha$  - базовое время реакции системы, учитывающее неизменные задержки (например, время срабатывания датчиков и теплообмена);  
 $\beta_1$  - разница между целевой и текущей температурой влияет на скорость изменения температуры;  
 $\beta_2$  - мощность HVAC влияет на ускорение или замедление процесса достижения уставки;  
 $\beta_3$  - влияние наружной температуры: при низкой внешней температуре прогрев идет медленнее.

Используется множественная линейная регрессия для прогнозирования времени  $t_{\text{конеч}}$ , необходимого для достижения температуры.

Интеграция технологий Интернета вещей (IoT) в мониторинг тепловых сетей позволяет автоматизировать сбор данных, повышая надежность управления и снижая эксплуатационные затраты. Ключевые компоненты архитектуры включают IoT-сенсоры (для измерения температуры, давления, расхода тепла и состояния оборудования), IoT-шлюзы для локальной обработки данных и их передачи на серверы, а также серверную инфраструктуру для хранения, анализа и визуализации данных. Взаимодействие этих компонентов происходит через беспроводные технологии, такие как LoRaWAN, обеспечивая высокую гибкость и масштабируемость системы.

Система работает по следующему принципу: сенсоры фиксируют параметры тепловой сети и передают данные через шлюзы на сервер, где они анализируются в режиме реального времени. Серверы выявляют отклонения от нормативных значений, прогнозируют аварии и оценивают энергоэффективность сети. Результаты анализа отображаются на панели мониторинга, доступной через веб- и мобильные приложения, что позволяет пользователям контролировать состояние тепловой сети, получать уведомления о сбоях и оперативно реагировать на инциденты.

Преимущества такой архитектуры включают повышение надежности тепловых сетей за счет своевременного обнаружения неисправностей, снижение затрат благодаря оптимизации ресурсов и прогнозированию, а также сокращение теплопотерь, что положительно влияет на экологическую ситуацию. Архитектура на рисунке 1. Применение аналитических модулей и машинного обучения открывает возможности для дальнейшего повышения эффективности и адаптации системы к различным эксплуатационным условиям.

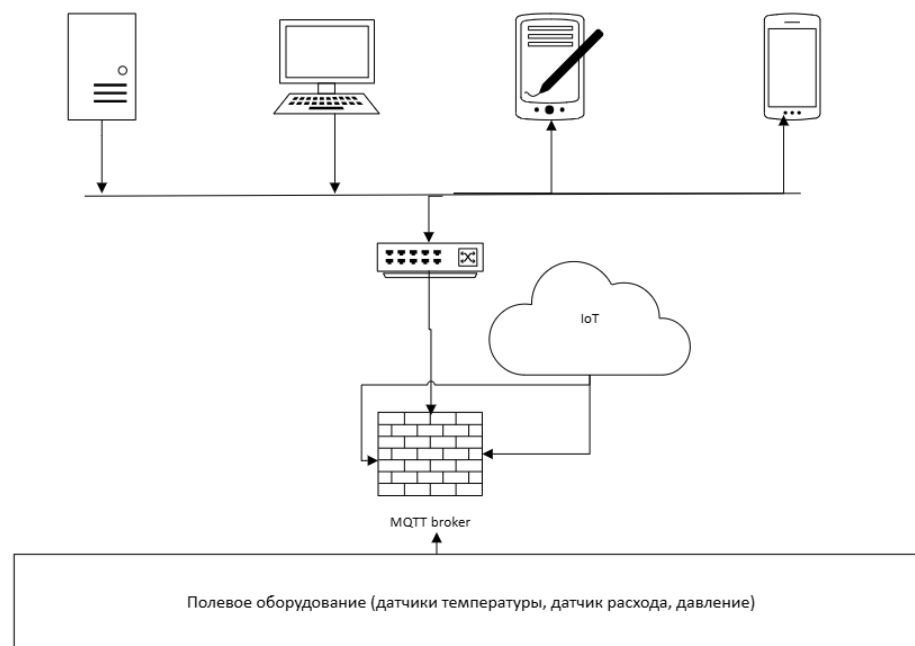


Рисунок 3.1 - Архитектура мониторинга тепловых сетей на основе IoT

#### Результаты и обсуждения.

В результате внедрения предложенной IoT-архитектуры для управления HVAC-системами ожидается значительное повышение энергоэффективности. Оптимизация рабочих циклов системы отопления и кондиционирования позволит снизить энергопотребление, минимизировать теплопотери и сократить эксплуатационные затраты. Точные алгоритмы планирования обеспечат рациональное распределение тепловой энергии между зонами здания, что особенно актуально для многоэтажных и коммерческих объектов.

Система обеспечит высокий уровень комфорта для пользователей. Благодаря интеллектуальному управлению и точному контролю температуры с помощью датчиков и умных термостатов, пользователи смогут получать желаемый микроклимат в заданное время. Такой подход не только улучшит качество жизни, но и сократит количество ручных настроек системы, делая её управление практически автономным.

Экологические аспекты также играют важную роль. Снижение энергопотребления приведет к уменьшению выбросов углекислого газа, что способствует защите окружающей среды. Дополнительная интеграция с возобновляемыми источниками энергии, такими как солнечные панели, укрепит экологическую устойчивость и снизит зависимость от традиционных источников энергии.

В итоге разработанная IoT-архитектура для управления системы отопления демонстрирует высокий потенциал для улучшения энергоэффективности и комфорта в зданиях. Интеграция интеллектуальных датчиков, умных термостатов и алгоритмов оптимизации позволяет не только снизить энергопотребление и эксплуатационные затраты, но и минимизировать воздействие на окружающую среду. Применение локальных шлюзов гарантирует безопасность и конфиденциальность данных пользователей, что особенно важно в современных условиях.



Система обладает гибкостью и масштабируемостью, что делает её применимой как в жилых домах, так и в крупных коммерческих объектах. Полученные результаты подтверждают актуальность предложенного подхода и открывают возможности для дальнейших исследований и внедрения технологий IoT в интеллектуальные здания. Таким образом, предложенная система сочетает в себе инновации, устойчивость и удобство, соответствуя требованиям современного общества.

### **3.2 Возможности программного комплекса ZuluThermo**

Программный комплекс ZuluThermo предоставляет широкий спектр функций для анализа, расчёта и визуализации параметров тепловых сетей. Его модули охватывают как проектную, так и эксплуатационную стадии жизненного цикла теплосетей.

**Наладочный расчёт.** Позволяет оценить гидравлические и тепловые параметры тепловой сети на этапе ввода в эксплуатацию. Включает симуляцию реальных условий пуска, с учётом временной неустойчивости температур и давления. Используется для верификации параметров источников, насосов и потребителей на раннем этапе эксплуатации.

**Поверочный расчёт.** Осуществляется с целью контроля соответствия фактических эксплуатационных параметров проектным. Используется для регулярного контроля текущего состояния сети, анализа отклонений и обоснования необходимости корректирующих действий.

**Калибровка тепловой сети.** Реализует алгоритмы настройки расчётной модели на основе сопоставления с фактическими данными. Уточняются характеристики участков сети: утечки, зарастание, потери давления. Участкам могут быть присвоены экспертные рейтинги износа. Это необходимо для повышения достоверности последующих вычислений и прогнозов.

**Конструкторский расчёт.** Применяется при проектировании и реконструкции теплосетей. Позволяет подобрать оптимальные диаметры трубопроводов, вычислить располагаемый напор, скорости потока и потери давления. Особенно полезен при подключении новых потребителей или развитии микрорайонов.

**Расчёт температурного графика.** Автоматически формирует зависимости температур теплоносителя от наружной температуры воздуха. Использует нормативные данные (например, СП 131.13330.2012) и позволяет визуализировать графики температур подачи и обратки, важные для настройки автоматических регуляторов теплопункта.

**Пьезометрический график.** Создаёт графическое представление распределения давления и высот в тепловой сети. Отображаются линии давления, статического и геодезического напора, линии кипения. Это важно для оценки гидравлической устойчивости и проверки на возможность кавитации.

Расчёт надёжности. Модуль анализирует устойчивость системы к отказам, позволяет моделировать аварийные ситуации, проверять резервные подключения. Учитываются сценарии отказа оборудования, отключений источников и насосов.

Коммутационные задачи. Позволяет симулировать работу сети при изменении схем подключения – например, при перекрытии отдельных участков и открытии обводных линий. Анализируется влияние переключений на устойчивость и параметры сети.

Расчёт нормативных потерь тепла через изоляцию. Рассчитывает теплопотери при транспортировке теплоносителя по нормативным методикам. Учитываются свойства изоляции, влажность, тип грунта. Позволяет выявить участки с наибольшими потерями и обосновать модернизацию изоляции.

Анализ термограмм. Инструмент обработки тепловизионных данных. Построение температурных карт, выделение аномалий, утечек и повреждений теплоизоляции на основе снимков с тепловизоров и дронов. Поддерживается настройка цветовой шкалы и запись данных в базу.

Технологическая ортогональная схема. Позволяет построить наглядную, удобочитаемую схему тепловой сети в виде технологической карты, с соблюдением принципов ортогональности (углы  $90^\circ$ ). Используется для проектирования, анализа, диспетчерского отображения. Сохраняет атрибуты и ID элементов сети и экспортируется в ГИС-платформы[25].

### **3.3 Термодинамическая модель и алгоритм управления тепловой сетью**

Термодинамическая модель и алгоритм управления тепловой сетью

Тепловые сети города являются достаточно сложными теплогидравлическими системами, включающими помимо собственно трубопроводов различного диаметра, регуливающую арматуру, насосы, смесительные устройства, элеваторы, тепловые пункты, отопительные приборы. Тепловая сеть рассчитывается и проектируется таким образом, чтобы ее гидравлические характеристики обеспечивали заданную температуру внутри помещения в широком диапазоне сезонного изменения температуры наружного воздуха при качественном регулировании теплоносителя.

Наладка тепловой сети, насчитывающей сотни абонентов, представляет собой сложную, многопараметрическую задачу, решить которую без наличия соответствующей математической модели практически невозможно.

Рассмотрим модель формализованной схемы теплотрассы с присоединенными к ней абонентами, на рисунке 1.

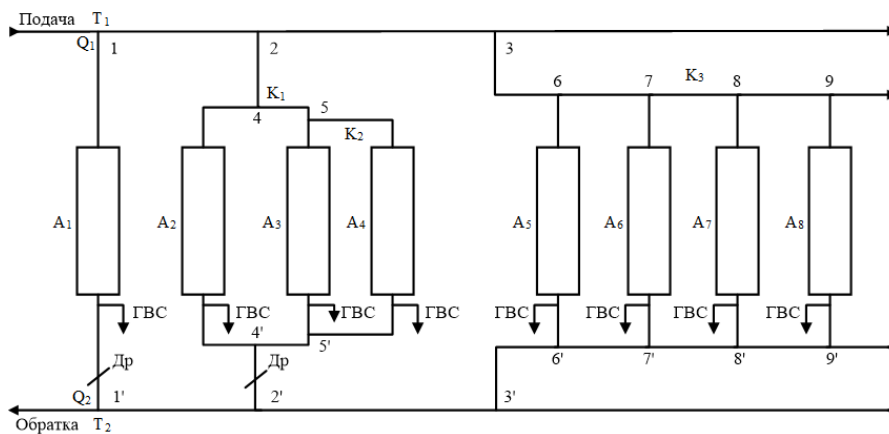


Рисунок 3.2 – Схема элементов тепловой сети

Обозначение на схеме: абонент (А) – подключенный между подающей и обратной магистралью потребитель (элемент) тепловой сети, в котором происходит полезное тепловыделение;  $K_1, K_2$  – коллектор, часть тепловой сети, содержащие параллельно включенные элементы (коллекторы, трасса) с общими точками на входы и выходы. Др – дроссельные устройства – регулирующие клапаны, ГВС – горячее водоснабжение.

Исходными данными для расчета теплотрассы служат: проектные тепловые нагрузки абонентов  $q_i$  и соответствующие им расходы теплоносителя (воды)  $G_i$  (при заданных температурах в помещениях абонентов  $T(i)h$ ); температура наружного воздуха  $T_a$ ; температура  $T_l$  и расход воды  $q_{in}$  на входе в теплотрассу; параметры участков теплотрассы и абонентских вводов; потери давления на абонентских вводах и выводах; потери давления на абонентах.

Как объект моделирования тепловая сеть относится к классу топологически связанных объектов, где взаимовлияние переменных ( $T, q$ ) обуславливается структурными особенностями графа сети.

Обычно взаимовлияние отображается матрицами инциденции вершин и ветвей графа сети (матрица А) матриций независимых контуров графа сети (матрица В).

Здесь необходимо различать:

- гидравлическую сеть взаимоувязывающую расходы по элементам сети и узловые давления в сети;
- тепловую сеть взаимоувязывающую расходные и тепловые характеристики сети.

При построении модели гидравлической сети открытой системы теплоснабжения необходимо использовать априорную информацию о структуре, параметрах и физических процессах, протекающих в тепловых сетях. В основу модели положены следующие предпосылки:

сеть представляет собой систему взаимодействия большого количества двухполюсных элементов трех типов: а) активных элементов; б) линий связи; в) нагрузок или потребителей;

активными элементами тепловой сети являются насосные станции (НС);

линии связи представляют собой участки трубопровода, пассивные регулирующие элементы, различные регулируемые и нерегулируемые задвижки и другая арматура;

в качестве потребителя (горячей воды) в сети рассматривается некоторый эквивалентный участок, называемый фиктивным и направленный от какого-либо узла сети к некоторой точке с нулевым давлением;

общий поток теплоносителя, подаваемый в сеть, равен суммарному потоку, потребляемому из сети;

в сети имеют место следующие постулаты сетей (законы Кирхгофа): I - алгебраическая сумма расходов в любом узле сети равна нулю (матрица A); II - суммарная потеря напора по любому замкнутому циклу равна нулю (матрица B).

Кроме перечисленной качественной информации имеется и количественная информация о том, сколько элементов различных типов содержит сеть и каким образом эти элементы взаимодействуют друг с другом. Другими словами, количественная информация позволяет с точностью до характеристических функций определить три множества:  $L$  - Активных элементов,  $M$  - линий связи;  $N$  - нагрузок или потребителей. Кроме того известен граф сети  $G(V, E)$ , где  $V, E$  - соответственно множества индексов вершин и дуг графа сети. Построение математической модели установившегося потокораспределения приведен для случая, когда элементы соответствующих множеств  $L, M, N, V, E$  известны с точностью до характеристических функций.

Рассмотрим гидравлическую сеть, которая содержит  $m$  реальных участков и  $f$  - узлов, причем  $a$  из этих узлов являются входами сети, через которые теплоноситель поступает в сеть, а  $b$  - узлов являются выходами сети, через которые осуществляется отбор теплоносителя из сети.

Обозначим  $S$  - количество входов и выходов сети, т.е.  $S=a+b$  Тогда  $c=f-S$  определяет количество промежуточных узлов. Причем  $f \geq S$  следовательно,  $c \geq 0$ . Промежуточным считаем узел сети, в котором отсутствует отбор горячей воды.

Для представления структуры сети в виде линейного связного графа реальную сеть дополним фиктивной вершиной и фиктивными участками, соединяющими эту вершину со всеми узлами сети. Полученный граф содержит  $V=f+1$  вершин и  $l=m+S+c$  дуг. В этом случае множество индексов всех вершин графа сети  $V = (0, 1, 2, \dots, f)$  можно представить в виде четырех взаимно непересекающихся множеств  $V = A \cup B \cup C \cup O$  где  $A = \{1, 2, \dots, a\}$  - множество индексов вершин, являющихся входами сети,  $B = \{a+1, a+2, \dots, a+b\}$  - множество вершин, являющихся выходами сети;  $C = \{a+b+1, a+b+2, \dots, f\}$  - множество индексов промежуточных вершин;  $O = \{0\}$  - множество индексов фиктивных вершин. Каждой реальной дуге  $i \in M$  поставим в соответствие активный или пассивный элемент, вектор параметров  $a_j$ , характеризующий этот элемент, и одну переменную величину - расход  $q_j$ . Каждой  $j$ -й вершине графа ставится в соответствие другая переменная величина - давление  $P_j$ . Совокупность величин  $q_j$  ( $j=1, 2, \dots, l$ ),  $a_i$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ),  $P_j$  ( $j=0, 1, 2, \dots, f$ ) образуют

три вектора, которые полностью определяют потокораспределение в сети. Введем вектор  $X(q, P, a)$ , характеризующий состояние сети, и рассмотрим взаимосвязь между его компонентами. В этом случае взаимосвязь между компонентами вектора  $X$  в некоторой  $n$ -мерной области  $D$  определяется моделью установившегося потокораспределения в тепловой сети, которая описывается системой уравнений вида:

$$\varphi_i = (P_{iH}, P_{ik}, q_i, \alpha_i) = 0, i \in M, \quad (3.4)$$

$$\sum_{i \in V_j^+} q_i - \sum_{i \in V_j^-} q_i = q_{ГВС}, i \in V, \quad (3.5)$$

$$P_{iH} = P_j, i \in V_j^-, i \in V, \quad (3.6)$$

$$P_{ik} = P_j, i \in V_j^+, i \in V \quad (3.7)$$

где  $\varphi_i = (P_{iH}, P_{ik}, q_i, \alpha_i)$  – определенные в  $D$  нелинейные, монотонно возрастающие или монотонно убывающие, непрерывные, вместе со своими частными производными функции, аналитический вид которых будет раскрыт ниже;

$M$  – множество индексов реальных дуг графа сети;

$V$  – множество индексов узлов сети;

$P_{iH}$  – давление в начале  $i$ -й дуги;

$P_{ik}$  – давление в конце  $i$ -й дуги;

$\alpha_i$  – вектор параметров  $i$ -го элемента;

$q_i$  – расход теплоносителя по  $i$ -й дуге;

$V_j^-$ ,  $V_j^+$ , – множество индексов дуг, выходящих и входящих в  $j$ -й узел;

$q_{ГВС}$  – потери расхода на горячее водоснабжения ГВС.

Уравнение (3.4) представляет собой математическую модель реального участка гидравлической сети. Уравнение (3.5) составлено на основе I закона Кирхгофа. Определение значений векторов  $\bar{q}$  и  $\bar{P}$  возможно в результате решения системы уравнений (3.4), (3.5) при задании соответствующих граничных условий на всех входах и выходах сети. Граничные условия считаются заданными, если на каждом входе и на каждом выходе сети заданы расход или давление.

Особенностью реальных теплогидравлических сетей является большое число элементов в их составе, что приводит к большой размерности системы (3.4), (3.5). Решение такой системы требует больших затрат. Понизить порядок системы можно, используя выполнение II закона Кирхгофа в тепловой сети и свойства цикломатической матрицы графа сети.

Выберем дерево графа сети, так, чтобы его ветвями стали только реальные участки сети и одна фиктивная дуга, и пусть номер этой дуги будет 1.

Вместо системы (3.4), (3.5) рассмотрим равносильную ей систему вида

$$\sum_{i \in M} b_{lri} \varphi_i(P_{iH}, P_{ik}, q_i, \alpha_i) + \varphi_r(P_{rH}, P_{rk}, q_r, \alpha_r), r \in M_2, \quad (3.8)$$

$$\sum_{i \in M} b_{lri} \varphi_i(P_{iH}, P_{ik}, q_i, \alpha_i) = 0, r \in M_2, \quad (3.9)$$

$$q_i = \sum_{r \in E_2} b_{lri} q_r, \quad r \in E_1 \quad (3.10)$$

где  $M_1$  – множество индексов реальных ветвей дерева;  
 $M_2$  – множество индексов реальных хорд  $M = M_1 \cup M_2$ ;  
 $N_2$  – множество индексов фиктивных хорд,  $b_{lri}$  – элемент цикломатической матрицы  $B$  для ветвей графа сети.

Функции  $\varphi_i(\bullet)$  таковы, что справедливо:

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in M} b_{lri} \varphi_i(P_{iH}, P_{ik}, q_i, \alpha_i) + \varphi_r(P_{rH}, P_{rk}, q_r, \alpha_r) = \\ & = f_r(q, i \in E; \alpha_k, k \in M; P_j, j \in R), r \in M_2, \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in M} b_{lri} \varphi_i(P_{iH}, P_{ik}, q_i, \alpha_i) + \varphi_r(P_{rH}, P_{rk}, q_r, \alpha_r) = \\ & = f_r(q, i \in E; \alpha_k, k \in M; P_j, j \in R, P_r, P_1), r \in M_2 \end{aligned} \quad (3.12)$$

$R$  – множество индексов узлов, из которых выходят дуги, соответствующие активным элементам.

$$P_r = \begin{cases} P_{rH}, & \text{если фиктивная хорда } r \text{ соединяет выход} \\ & \text{сети с фиктивной вершиной;} \\ P_{rk}, & \text{если фиктивная хорда } r \text{ соединяет вход} \\ & \text{сети с фиктивной вершиной;} \end{cases}$$

$$P_i = \begin{cases} P_{iH}, & \text{если фиктивная хорда } r \text{ соединяет выход} \\ & \text{сети с нулевой точкой;} \\ P_{ik}, & \text{если фиктивная хорда } r \text{ соединяет выход} \\ & \text{сети с нулевой точкой;} \end{cases}$$

Тогда из системы (3.8), (3.9) с учетом (3.10) можно выделить подсистему независимо решаемых уравнений

$$f_r(q, i \in E; \alpha_k, k \in M; P_j, j \in R, ) = 0, \quad r \in M_2 \quad (3.13)$$



$$f_r(q, i \in E; \alpha_k, k \in M; P_j, j \in R, P_r, P_1) = 0, \quad r \in N_{21} \cup N_{22} \quad (3.14)$$

где  $N_{21}$  - множество индексов фиктивных хорд связывающих фиктивную вершину с реальными узлами сети, являющимися выходами и входами сети;  $N_{22}$  - множество индексов фиктивных хорд, связывающих фиктивную вершину с промежуточными узлами графа сети, из которых выходят дуги, соответствующие активным элементам.

Оставшиеся уравнения системы (6) образуют систему вида:

$$f_r(q, i \in E; \alpha_k, k \in M; P_j, j \in R, P_r, P_1) = 0, \quad r \in N_{23} \quad (3.15)$$

где  $N_{23}$  - множество фиктивных хорд, связывающих фиктивную вершину с промежуточными узлами графа сети, из которых не выходят дуги, соответствующие активным элементам. Таким образом  $N_2 = N_{21} \cup N_{22} \cup N_{23}$ .

Решение системы (3.13)-(3.14) осуществляется итерационными методами и позволяет определить расходы во всех дугах графа сети и давления на всех входах и выходах сети. Решение системы (3.15) осуществляется после решения системы (10)-(11) методом подстановки независимо друг от друга и позволяет получить неизвестные давления во всех промежуточных узлах.

Граф сети, содержащий  $l$  дуг и  $v$  вершин, имеет  $l_1 = v - 1$  ветвей  $l_2 = m_2 + n_2 = l - v + 1$  хорд. При этом количество фиктивных хорд  $n_2 = v - 2$ . В свою очередь  $n_2 = n_{21} + n_{22} + n_{23}$ , где  $n_{21} = S - 1$  количество фиктивных хорд, соединяющих входы и выходы сетей с нулевой точкой,  $n_{22}$  - количество фиктивных хорд, соединяющих промежуточные вершины, из которых выходят дуги, соответствующие активным элементам, с нулевой точкой;  $n_{23}$  - количество фиктивных хорд, соединяющих промежуточные вершины, из которых не выходят дуги, соответствующие активным элементам, с нулевой точкой. Система уравнений (3.13)-(3.14) содержит  $l - 2v + S + 2 + v_1$  уравнений ( $v_1$  - количество промежуточных вершин, из которых выходят дуги, соответствующие активным элементам) и  $2l - 3v + 2S + 3 + v$  неизвестных, из них  $l - 2v + S + 2$  расходов,  $qr, r \in E_{21}, E_{21} = M_2 \cup N_{21}, (qr = 0, r \in E_{22}, E_{21} = N_{22} \cup N_{23})$ ,  $S$  давлений  $P_r, P_l$  в узлах, соответствующих началам и концам фиктивных дуг, являющихся входами или выходами сети,  $v_1$  давлений  $P_j, j \in R$  в узлах, из которых выходят дуги, соответствующие активным элементам,  $l - v + 1$  неизвестных векторов параметров  $a_i, i \in M$ .

Тепловая сеть может быть представлена системой уравнения вида

$$\varphi_i(T) = (P_{iH}, P_{ik}, q_i, \alpha_i, T) = 0, \quad i \in M \quad (14)$$

$$\sum_{i \in \gamma_j^+} q_i \cdot c \cdot T_i - \sum_{i \in \gamma_j^-} q_i \cdot c \cdot T_i - q_{i \Gamma \text{BC}}^{CT_i} = \sum_{i \in \gamma} G_i, \quad i \in \gamma. \quad (15)$$

где  $T_i$  – температура теплоносителя;  $q_{iГВС}^{cT_i}$  – потеря тепла с горячим водоснабжением;  $G_i$  – полезное тепло, оплачиваемое абонентом, задается при проектировании.

Результаты решения (3.13) – (3.14) подставляются в систему (3.16)- (3.17) и находятся решения по температуре теплоносителя.

Полученные результаты решения систем (3.13) – (3.14) и (3.16) – (3.17) могут быть положены в основу алгоритмов управления тепловой сети, обобщенно представленный на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 – Блок схема алгоритма управления тепловой сетью

### 3.4 Построение архитектуры

#### 3.4.1 Прямая работа шлюза с NB-IoT без облака.

Если NB-IoT-модем умеет отправлять данные на конкретный IP-адрес и порт (например, публичный IP шлюза, порт MQTT или TCP/UDP), то шлюз может принимать данные напрямую, без посредников и внешних облаков[27].

Многие промышленные шлюзы (например, Teltonika, Bivocom, Robustel, ICP DAS) могут выступать:

- как MQTT-брокер (локальный) — принимая сообщения от модемов NB-IoT;

- как TCP/UDP сервер — для приёма данных по прозрачному каналу (Transparent Mode);
- как Modbus TCP Server — если NB-IoT устройство поддерживает Modbus TCP-клиент;
- собирать и систематизировать информации с помощью скриптов, если шлюз поддерживает такой режим.

Шлюз должен быть видим из NB-IoT сети (иметь белый IP или находиться в корпоративной APN/VPN оператора). Во многих случаях для работы без публичного облака требуется отдельное согласование/настройка у оператора NB-IoT (например, выделенная SIM/APN) [30].

Когда без облака не получится:

Если NB-IoT-модем может работать только с облачным сервисом оператора (например, Tele2 IoT, Kazakhtelecom IoT Cloud) и не позволяет указывать произвольный внешний IP/порт для передачи, тогда потребуется интеграция с облака.

Некоторые операторы предоставляют только входящий доступ к данным через API/облако — тогда “обойти” облако нельзя, и шлюз должен забирать данные оттуда.

NB-IoT — это сотовая сеть, и в большинстве случаев связь NB-IoT модем → шлюз на объекте работает только если шлюз доступен по белому IP/спец-APN или внутри корпоративной VPN.

Многие проекты для безопасности и управления трафиком используют промежуточный сервер (облако оператора или частный брокер), но технически прямой обмен NB-IoT ↔ шлюз без облака возможен.

В целом шлюзы могут принимать данные от NB-IoT-модемов напрямую, если модемы настраиваются на отправку данных на IP шлюза, и сетевая инфраструктура позволяет такой трафик.

В реальных проектах, если критично миновать облако нужно обсудить с оператором NB-IoT вопрос выделения APN/статического IP или закрытой корпоративной сети. Ниже на рисунках 3.4, 3.5 показана архитектура беспроводного мониторинга теплосетей.

Вот типовые режимы передачи данных в NB-IoT

NB-IoT-модем/устройство обычно работает как конечный узел, отправляя данные:

На облачный брокер/сервер (MQTT, HTTP, CoAP) — это классика для массовых IoT-платформ;

На выделенный сервер (например, публичный или частный MQTT-брокер/REST API) — облако в классическом смысле не обязательно;

На частный шлюз (устройство с белым IP или в корпоративной VPN).

Стоит выбирать место для OPC UA сервера — там, где сходятся все данные и где обеспечена стабильная связь с SCADA[19].

В большинстве современных проектов для простоты и снижения задержек OPC UA сервер располагается на промышленном шлюзе, который принимает данные по NB-IoT, преобразует их в теги и отдаёт в SCADA.

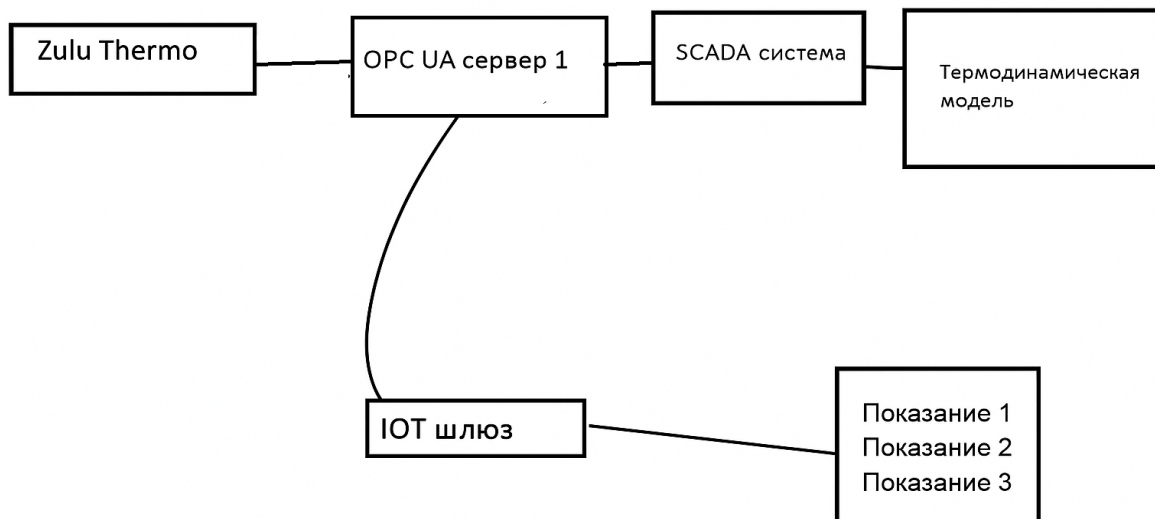


Рисунок 3.5. – Архитектура мониторинга

### 3.4.2 Промышленные NB-IoT шлюзы с поддержкой OPC UA для SCADA

Описание задачи:

Необходимо подобрать промышленные IoT-шлюзы, которые получают данные от приборов по NB-IoT и конвертируют их в протокол OPC UA для передачи в SCADA[29]. Рассматриваются устройства для мониторинга коммунальных систем (например, теплосетей), поддерживающие стандартные IoT-протоколы (MQTT, HTTP и др.), а также обеспечивающие преобразование данных в OPC UA. Важно наличие вариантов с встроенным модемом NB-IoT/Cat M1 (eSIM), промышленным исполнением (расширенный диапазон температур, крепление на DIN-рейку и др.), поддержкой двух SIM-карт для надёжности, цифровыми и аналоговыми входами/выходами, а также интерфейсами RS-485/232 для подключения датчиков. Также учитывается совместимость с типовыми SCADA (через OPC UA), поддержка защищённой передачи данных (TLS, VPN), и возможность поставки в Казахстан через локальных дистрибьюторов;

а) Teltonika TRB256 — NB-IoT / LTE Cat M1 шлюз. Компактный промышленный шлюз с модемом LTE Cat M1/Cat NB2/NB1 (NB-IoT) и поддержкой OPC UA. Предназначен для IoT-приложений, поддерживает двойной SIM для резервирования связи, работает и на частоте 450 МГц (улучшенная зона покрытия LTE).

Интерфейсы: 1×Ethernet, порты RS-232/RS-485, дискретные входы/выходы через 16-контактный разъём. Позволяет напрямую подключать полевые датчики и контроллеры по Modbus RTU. Также поддерживает OPC UA в режимах Client и Server — может быть OPC UA сервером для SCADA или

опрашивать удалённый OPC UA сервер. В прошивке RutOS реализована функция сбора и преобразования данных, поддержка работы с Modbus, публикация параметров через OPC UA.

Имеет полный сетевой стек, поддерживает передачу данных по HTTP/HTTPS, MQTT, а также может работать как MQTT брокер, шлюз Modbus-MQTT, поддерживает протоколы BACnet/IP, DNP3.

Питание: 9–30 В DC, компактный корпус для монтажа на DIN-рейку, рабочий диапазон температур –40...+75 °С.

Безопасность: поддержка VPN, фаервол, аутентификация по ключам и сертификатам, шифрование трафика, интеграция с системой удалённого мониторинга.

Совместимость с распространёнными SCADA через стандарт OPC UA.

б) ICP DAS UA Series (UA-5231M, UA-2241M) — IoT-шлюзы с OPC UA. Это семейство промышленных контроллеров-шлюзов с функциями OPC UA сервера, MQTT-шлюза и логгера данных.

Специально разработаны для интеграции ОТ-устройств с IT-системами, поддерживают сбор данных с удалённых модулей ввода-вывода и контроллеров по Modbus TCP/RTU/ASCII, MQTT, EtherNet/IP, и преобразование этих данных в OPC UA для передачи в SCADA, MES/ERP или облачные сервисы[23].

Варианты с беспроводной связью: отдельные модели оснащены модемами 3G/4G LTE, могут поддерживать NB-IoT при работе с совместимыми модулями и оператором.

Имеют Ethernet, RS-485/RS-232, могут напрямую подключаться к счетчикам, PLC, модулям сбора данных, поддерживают до 32 точек ввода/вывода через модули расширения, ведут лог исторических данных во встроенную память или удалённую SQL-базу.

Встроенный OPC UA сервер соответствует стандарту 1.04, поддерживает шифрование, аутентификацию, одновременную работу с MQTT. Можно реализовать Edge-шлюз для разных типов клиентов.

Питание 12–48 В DC, металлический корпус, монтаж на DIN-рейку, температурный диапазон –25...+75 °С, предусмотрен Watchdog, резервирование питания.

Безопасность: шифрованный MQTT, разграничение доступа, поддержка VPN через внешний маршрутизатор или SSH.

Совместимость с SCADA: поддержка Genesis64, Ignition, MasterSCADA и других.

в) Bivocom TG45x / TG50x — IoT-шлюзы с NB-IoT и OPC UA. Это линейка универсальных промышленных IoT-шлюзов с возможностью сочетания NB-IoT и конверсии данных в OPC UA.

Продукты Bivocom обеспечивают подключение по стандартам LTE Cat M1/NB1 и передачу данных от устройств с RS-232/485 в удалённый центр.

Модели TG451 и TG452 ориентированы на сбор данных с различных интерфейсов (Ethernet, RS232/485, DI/DO, CAN, Bluetooth) и передачу их в

сети 4G/5G. Для NB-IoT доступны модификации или подключение внешнего модема.

Встроенная функция OPC UA сервера позволяет через веб-интерфейс настраивать сбор данных с устройств по Modbus RTU/TCP, формировать данные для передачи в SCADA по OPC UA.

Поддержка одновременной отправки данных по нескольким протоколам (TCP, UDP, HTTP, MQTT, Modbus TCP), скрипты на Python, C/C++, Lua.

Питание: 9–36 В DC, возможность резервирования питания, температурный диапазон –35...+75 °С.

Безопасность: VPN, SNMP v3, SSH, HTTPS, авторизация по SMS, поддержка стандартных механизмов безопасности OPC UA.

Доступны к заказу через международных дилеров.

г) Robustel M1200 / R3000 — шлюзы с NB-IoT и OPC UA (Edge2Cloud):

Промышленные маршрутизаторы и шлюзы, поддерживающие NB-IoT и OPC UA, представлены на центральноазиатском рынке.

Модель Robustel M1200-4M — компактный LTE-гейтвей, совместимый с Cat M1 и Cat NB1 (NB-IoT), оснащён двумя SIM для резервирования, портами RS-232, RS-485, дискретными входами/выходами. Предназначен для надёжной передачи данных с низкой скоростью для удалённого мониторинга объектов. Серия R3000 — классические маршрутизаторы с поддержкой NB-IoT при установке соответствующих модулей.

Программная платформа RobustOS + Edge2Cloud обеспечивает протокольный шлюз между OT-протоколами и SCADA или облаком. Позволяет собирать данные по Modbus, OPC UA, Siemens S7 и другим протоколам, отдавать их в MQTT или напрямую в OPC UA.

Интерфейсы: RS232, RS485, Mini-USB, поддержка Modbus RTU→TCP, MQTT, автономный режим связи при обрыве, температурный диапазон –40...+75 °С, монтаж на DIN-рейку.

Безопасность: поддержка всех основных VPN, фаервол, фильтрация IP/MAC, разграничение прав доступа, шифрование данных OPC UA.

Совместимость с большинством SCADA и облачных платформ. Оборудование доступно через дистрибьюторов в Казахстане и СНГ.

Все перечисленные шлюзы поддерживают стандарт OPC UA, что обеспечивает совместимость с распространёнными SCADA и клиентами OPC UA. Перед внедрением следует убедиться в наличии NB-IoT покрытия на объекте и получить SIM с поддержкой NB-IoT. Также важно настроить политику безопасности OPC UA: сертификаты, уровни доступа для SCADA-клиента.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках диссертационного исследования была разработана и обоснована беспроводная система мониторинга состояния теплосетей, основанная на современных технологиях LoRaWAN, NB-IoT и GSM. Проведён сравнительный анализ данных технологий по критериям энергоэффективности, надёжности и дальности передачи данных, выявивший оптимальные решения для различных условий эксплуатации. В городских условиях предпочтение следует отдавать NB-IoT благодаря стабильной операторской инфраструктуре и высокой надёжности связи, тогда как LoRaWAN эффективен для объектов с менее плотной застройкой, обеспечивая минимальное энергопотребление и простоту масштабирования.

Разработанная архитектура мониторинга на основе OPC UA позволяет оперативно и надёжно передавать данные с датчиков давления и температуры напрямую в диспетчерские системы без необходимости облачных посредников. Проведённые испытания подтвердили высокую эффективность и стабильность предложенных решений: отмечен высокий процент успешной доставки сообщений и минимальные задержки в передаче данных.

Полученные результаты имеют значительную практическую значимость для теплоснабжающих предприятий Казахстана, позволяя снизить затраты на эксплуатацию, повысить оперативность обнаружения и устранения аварий, а также создать предпосылки для цифровизации инфраструктуры ЖКХ. Сформированные рекомендации и предложенные подходы к выбору технологий и архитектурных решений могут быть адаптированы и применены при реализации аналогичных проектов в других коммунальных сетях и инженерных инфраструктурах.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Закон Республики Казахстан «О стандартизации» от 5 октября 2018 года № 183-VI ЗРК.
- 2 Закон Республики Казахстан «О естественных монополиях» от 27 декабря 2018 года № 204-VI ЗРК.
- 3 СН РК 4.02-02-2021. Тепловые сети. Правила проектирования. – Астана: ИЦ МГС РК, 2021.
- 4 Карибжанов Х., Амирханов Е., Хамитов И. Стандартизация: учебное пособие. – Нур-Султан: Национальный орган по стандартизации, 2020. – 224 с.
- 5 Лифиц И.М. Стандартизация, метрология и подтверждение соответствия: учебник. – Москва: Юрайт, 2022. – 423 с.
- 6 ГОСТ Р 56567-2015. Системы телеметрии. Общие требования к структуре, каналам передачи и защите.
- 7 Мисюра И.Ю., Киселев А.В. Беспроводные технологии в ЖКХ. // Сети и системы связи. – 2021. – №1. – С. 18–23.
- 8 Ермеков А., Нуртаев Ж. LoRa+STM32 как средство беспроводного мониторинга. // «Информационные технологии и автоматизация» – Алматы, 2023.
- 9 Романенко С.А. Технологии NB-IoT: Применение в ЖКХ и мониторинге. – СПб: Политех-пресс, 2020.
- 10 ZuluThermo. Система мониторинга теплосетей. Технический паспорт. – Алматы: 2023.
- 11 ZuluOPC: Описание архитектуры OPC UA взаимодействия. – ZuluSystems, 2024.
- 12 Teltonika Networks. TRB256 Product Datasheet. – 2024.
- 13 ICP DAS. UA Series Technical Manual. – 2023.
- 14 Bivocom. TG45x/50x Series Overview. – Shenzhen: Bivocom Technologies, 2023.
- 15 Robustel. M1200 and R3000 Datasheet. – Guangzhou: Robustel Technologies, 2023.
- 16 Khan N., Umer T. NB-IoT Based Monitoring of Water Distribution. // Sensors. – 2022. – 22(3). – С. 1034.
- 17 Semtech Corporation. LoRaWAN White Paper. – California, 2020.
- 18 GSMA. NB-IoT Deployment Guide to Basic Feature Set. – London: GSMA Intelligence, 2021.
- 19 Стандарт LoRaWAN 1.1. LoRa Alliance. – 2021.
- 20 IEEE Std 802.15.4™-2020 – IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks.
- 21 MQTT Version 5.0 – Technical Specification. OASIS, 2019.
- 22 OPC Foundation. OPC UA Specification Part 1-13. – 2021.
- 23 Бекенов А.М. Интеллектуальные системы диспетчеризации ЖКХ на базе SCADA. // Вестник КТУ. – Караганда, 2022. – №2(89).

- 24 АО «Казахтелеком». Отчёт о развитии LoRaWAN и NB-IoT сетей. – Астана, 2023.
- 25 АО «Самрук-Энерго». Программа цифровизации теплосетей. – Алматы, 2023.
- 26 Амандосов Д.Ц., Даиров Е.Н. Опыт внедрения SCADA в тепловых сетях Казахстана. // «Автоматизация и IT в энергетике». – 2023. – №4.
- 27 Мартынов П.Е. Протокол OPC UA в интеграции с SCADA. // Промышленная автоматизация. – 2021. – №6.
- 28 Nurlanov R., Kairatova A. Energy-efficient telemetry of district heating. // Journal of IoT Systems. – 2022. – Vol. 6, Issue 2.
- 29 Beeline Kazakhstan. NB-IoT Developer Guide. – Алматы, 2023.
- 30 Мальцев А.И., Бекенова А.К. Модели надёжной передачи данных в условиях городской застройки. // Наука и Технологии. – 2021. – №5(57)

# СВИДЕТЕЛЬСТВО

о публикации научной статьи

настоящим подтверждается, что

**Сулейменов Темирлан  
Жосланович**

Студент магистратуры

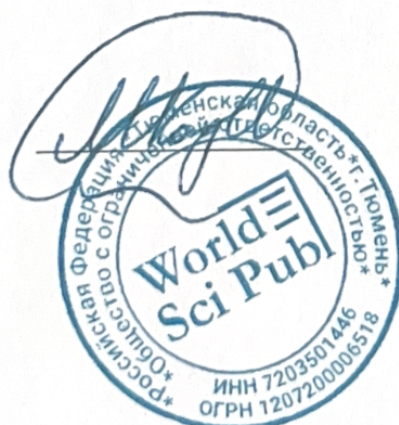
Казахский национальный исследовательский технический  
университет имени К.И. Сатпаева

является автором статьи, опубликованной в международном  
научном журнале «Научный Лидер» №24 (225), Июнь 2025 г.

**«ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ПЕРЕДАЧИ ПОКАЗАНИЙ ПО ТЕХНОЛОГИИ  
LORA ИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОЛОДЦА  
НАРУЖУ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ПРИМЕНЕНИЯ В БЕСПРОВОДНОМ  
МОНИТОРИНГЕ ТЕПЛОСЕТЕЙ»**

<https://scilead.ru/public-journal/225>

Ген. директор  
«ВОРЛДСАЙПАБЛ»



Кадыров  
Марсель Алмазович



**Университеттің жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаменті  
директорының ұқсастық есебіне талдау хаттамасы**

Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры көрсетілген еңбекке қатысты дайындалған Плагиаттың алдын алу және анықтау жүйесінің толық ұқсастық есебімен танысқанын мәлімдейді:

**Автор: Сулейменов Темирлан Жосланович**

**Тақырыбы: Разработка системы мониторинга тепловыми сетями на основе беспроводных технологий**

**Жетекшісі: Бахыт Муханов**

**1-ұқсастық коэффициенті (30): 0.3**

**2-ұқсастық коэффициенті (5): 0**

**Дәйексөз (35): 0.3**

**Әріптерді ауыстыру: 480**

**Аралықтар: 1**

**Шағын кеңістіктер: 6**

**Ақ белгілер: 4**

**Ұқсастық есебін талдай отырып, Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры келесі шешімдерді мәлімдейді :**

☒ Ғылыми еңбекте табылған ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді. Осыған байланысты жұмыс өз бетінше жазылған болып санала отырып, қорғауға жіберіледі.

☐ Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жұмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілсін.

☐ Еңбекте анықталған ұқсастықтар жосықсыз және плагиаттың белгілері болып саналады немесе мәтіндері қасақана бұрмаланып плагиат белгілері жасырылған. Осыған байланысты жұмыс қорғауға жіберілмейді.

**Негіздеме:**

*Күні*



*Кафедра меңгерушісі*



## Протокол

### о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

**Автор:** Сулейменов Темирлан Жосланович

**Соавтор (если имеется):**

**Тип работы:** Магистерская диссертация

**Название работы:** Разработка системы мониторинга тепловыми сетями на основе беспроводных технологий

**Научный руководитель:** Бахыт Муханов

**Коэффициент Подобия 1:** 0.3

**Коэффициент Подобия 2:** 0

**Микропробелы:** 6

**Знаки из других алфавитов:** 480

**Интервалы:** 1

**Белые Знаки:** 4

**После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:**

☐ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

*Дата*

*проверяющий эксперт*





на магистерскую диссертацию

7M07101 – Автоматизация и роботизация

На тему: Разработка системы мониторинга тепловыми сетями на основе беспроводной технологии

Диссертационная работа, посвящена актуальной теме разработка новых подходов к системе мониторинга тепловых сетей (ТС) городов. Диссертационная работа состоит из введения, трех разделов, и заключения.

В первом разделе рассматриваются проблемы управления тепловыми сетями, приводящие к безвозвратным экономическим и тепловым потерям. Состояние системы мониторинга тепловых сетей.

Во втором разделе рассматривается математическая модель ТС, которая может быть использована в SCADA-системе. Рассмотрена взаимодействие SCADA – системы с современными пакетами ГИС- системы для ТС Zulu.

В третьем разделе рассматривается предлагаемая система беспроводной технологии по мониторингу технологическими переменными тепловой сети, которая может быть использована в SCADA – системе ТС.

Результаты работы были представлены на научных конференциях, а также опубликованы в научных сборниках.

Графический и текстовый материал оформлен в соответствии с требованиями ГОСТ, предъявляемыми к оформлению учебных работ.

Данная магистерская диссертация отличает проработанность, научно-исследовательский подход и полноту изложенного теоретического материала. Приведённые исследования доказывают отличную теоретическую подготовку магистранта.

## Оценка работы

Учитывая вышеизложенное, считаю, что магистерская диссертация заслуживает оценки «70», а магистрант Сулейменов Темирлан присвоения академической степени магистра технических наук по специальности 7М07101 – Автоматизация и роботизация.

### Рецензент

Доктор PhD, доцент кафедры  
«Автоматизация и управление» АУЭС

Оракбаев Е.Ж.

« 20 » июня 2025 г.



**ОТЗЫВ**

на магистерскую диссертацию  
Сулейменова Темирлана  
7M07101 – Автоматизация и роботизация

На тему: «Разработка системы мониторинга тепловыми сетями на основе беспроводных технологий»

Проблема повышения энергетической эффективности тепловых сетей является весьма актуальной темой. От эффективности функционирования системы мониторинга зависит качество управления теплоснабжения городов. В работе рассматривается в основном вопрос передачи технологической информации из колодцев тепловой сети. Так как в технологических колодцах не предусмотрено электрическое питание. В связи с этим в диссертации предусмотрено двух этапная передачи данных. С начало передается информация из колодца. Затем прием и передача данных с помощью системы LORA и GSM-модема в диспетчерскую тепловой сети. Проведены экспериментальные исследования работы мониторинга на основе предложенных подходов передачи данных.

Также предложена математическая модель тепловой сети работающая со SCADA системой.

Рассмотрена структура взаимодействия программ ZULU, SCADA на основе беспроводной технологии мониторинга данных тепловой сети.

Магистерская диссертация выполнена в полном объеме, соответствует требованиям предъявляемым к магистерским диссертациям .

Результаты работы были представлены на научных конференциях, а также опубликованы в научных сборниках.

Графический и текстовый материал оформлен в соответствии с требованиями ГОСТ, предъявляемыми к оформлению учебных работ.

Данная магистерская диссертация отличает проработанность, научно-исследовательский подход и полноту изложенного теоретического материала. Приведённые исследования доказывают отличную теоретическую подготовку магистранта.

Учитывая вышеизложенное, считаю, что магистерская диссертация заслуживает оценки «75», а магистрант Сулейменов Темирлан присвоения академической степени магистра технических наук по специальности 7M07101 – Автоматизация и роботизация.

Научный руководитель  
доцент, канд.техн.наук,

  
«20» июня 2025 г. Муханов Б.К.