

Результаты работ по госзаданию
ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ УЧЕТА И КОНТРОЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ЗДАНИЙ И ПОМЕЩЕНИЙ. 2018-2019 гг.

Из отчета за 2018 год.

4. Автоматизированная система учета тепловой энергии

4.1 Структура автоматизированной системы учета тепловой энергии

Задачи учета тепловой энергии и мониторинга теплового режима помещений решаются нами путем измерения в реальных условиях температур объектов и обработке результатов с помощью математической модели, описанной во второй и третьей главах данного отчета, а также в работах. Модель представляет собой систему балансных дифференциальных уравнений для средних температур отопительного прибора, воздуха и внутреннего ограждения помещения. Параметрами уравнений являются коэффициенты теплоотдачи отопительных приборов, коэффициенты теплопередачи через внешние и внутренние ограждения, теплоемкости элементов помещения. Эти параметры находятся при решении обратной задачи: тепловой режим приводится в нестационарное состояние путем нагревания или охлаждения помещения. При обработке полученной температурной зависимости находятся искомые величины. Автоматизированный комплекс, реализующий этот алгоритм, представляет собой систему температурных датчиков, микроконтроллер, радиоканал передачи данных и центральный сервер. Область применения разрабатываемой автоматизированной системы – объекты жилого, коммерческого и производственного назначения.

Основными функциями разрабатываемой системы являются: сбор данных с температурных датчиков, установленных в отдельных помещениях здания, и передача их на устройство сбора и передачи данных (УСПД), которое, в свою очередь, отправляет данные на центральный сервер для дальнейшей обработки.

На рисунке 4.1 приведена структура автоматизированной системы, в состав которой входят следующие основные элементы:

- Терморадиомодуль (ТРМ): приемопередатчик, антенна, источник электропитания, датчики температуры, микроконтроллер;
- Устройство сбора и передачи данных (УСПД);
- Центральный сервер (ЦС);
- Программно-методическое обеспечение, позволяющее осуществлять сбор, передачу и обработку данных с терморадиомодулей.

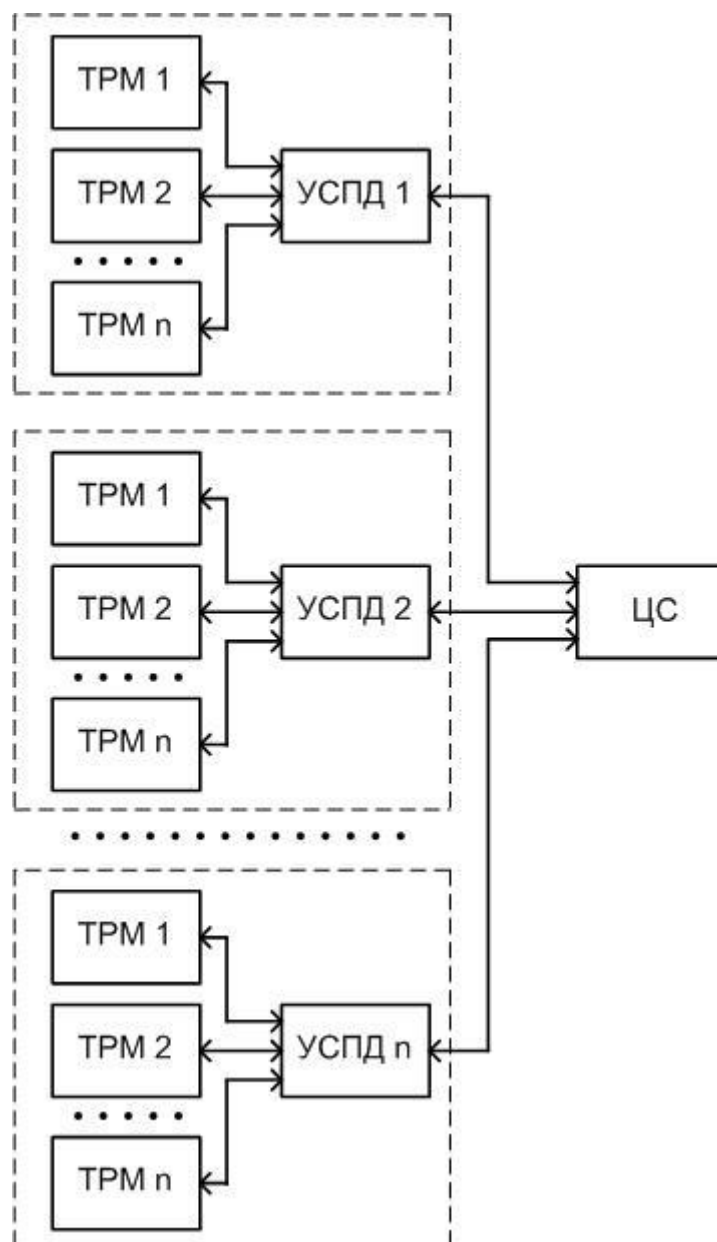


Рисунок 4.1 – Структура автоматизированной системы учета тепловой энергии

Сбор и передача данных осуществляется на базе следующих элементов:

- терморадиомодуль (ТРМ), имеющий в составе микроконтроллер и приемопередатчик, датчик температуры – считывает показания с датчиков и передаёт их по радиоканалу;
- устройство сбора и передачи данных (УСПД) – принимает данные по радиоканалу и передаёт их центральному серверу;
- центральный сервер (ЦС) – устанавливает параметры обмена, принимает, хранит и обрабатывает данные.

Различие между радиомодемом, входящим в состав терморадиомодуля («Ведомый») и модемом в УСПД («Ведущий») состоит только в программном

обеспечении для микроконтроллеров. В остальном данные платы радиомодемов имеют схожую структуру.

УСПД представляет собой узловой блок, который собирает с подключаемых терморадиомодулей данные по радиоканалу и передает их на центральный сервер через Ethernet, а также производит оценку работоспособности и настройку своей подсети.

Центральный сервер представляет собой стандартное сетевое оборудование, с установленным программным обеспечением для хранения, обработки и визуализации полученных данных.

Поскольку разрабатываемая система использует оригинальную методику вычисления тепловой энергии, терморадиомодуль должен изменять режимы работы вовремя эксплуатации (рабочий режим и режим калибровки).

4.2 Основные технические характеристики

Измеритель или Терморадиомодуль (ТРМ) должен работать в режиме калибровки и в режиме эксплуатации. ТРМ должен обеспечивать работоспособность в диапазоне температур от +15 до + 85 градусов С.

В состав ТРМ в качестве основных элементов входят такие узлы как, приемопередатчик, антенна, источник электропитания (аккумулятор или батарея), датчики температуры, микроконтроллер.

К температурному датчику были выдвинуты следующие требования: точность: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$; низкий ток потребления; компактное исполнение; отсутствие дополнительного оборудования; отсутствие необходимости калибровки датчика; невысокая стоимость.

Сформулируем дополнительные требования:

- интервал взятия температурных отсчетов лежит в пределах от нескольких минут до часа;
- время термической реакции должно быть меньше интервала взятия отсчетов, порядка 30 секунд;
- низкая потребляемая мощность;
- небольшие габариты датчика;
- наличие цифрового выхода;
- небольшая стоимость устройства.

К микроконтроллеру предъявляются следующие требования:

- низкое энергопотребление;
- наличие спящего режима с поддержкой часов реального времени;
- наличие интерфейса UART;
- напряжение питания от 2.5 до 3.6 В;
- рабочая частота не менее 2 МГц.

Всем этим требованиям удовлетворяют микроконтроллеры компании ST:STM32. Они обладают более низкой ценой и высокой мощностью по сравнению с микроконтроллерами других производителей. Также эти микроконтроллеры обладают удобным интерфейсом для программирования, требующим всего три вывода и программатор ST-LINK, который является достаточно дешёвым.

Технические характеристики (параметры) приемопередатчика:

- рабочая частота – 868 МГц.
- излучаемая мощность не более 25 мВт.
- питание от аккумуляторной батареи;
- интервал передачи данных – сервисная настройка;

Лидерами в сфере разработки приёмопередатчиков любительских диапазонов на данный момент являются фирмы Texas Instruments, Analog Devices и Semtech International. Каждая из этих фирм выпускает довольно широкие линейки приемопередатчиков разных частотных диапазонов.

При реализации радиомодема возможен выбор частотного диапазона: 433 МГц, 868 МГц, 2400 МГц. Анализ помеховой обстановки в черте городской застройки, описанный в [63], показал, что наиболее предпочтителен диапазон 868 МГц. Тем не менее, особенности измерителя и влияния отопительного прибора на диаграмму направленности антенны радиомодема не исключают и других возможных вариантов. Выяснение этого вопроса требует дополнительных исследований.

Для проектируемой системы сбора и передачи данных был выбран диапазон 868 МГц. Этот диапазон был сравнительно недавно разрешён для использования без лицензии, поэтому на данный момент не так сильно используется, как диапазон 433 МГц. Согласно проведённым экспериментам [63], в частотном диапазоне 430-435 МГц вероятность наблюдать помеху составляет 6 %. Причем с вероятностью около 3 % возможно одновременно наблюдать около 6 источников помех, максимальная мощность которых может достигать минус 38 дБмВт. Помехи могут возникать с интервалом до 1,5 часов, минимально наблюдаемый интервал времени между помехами достигает 1,6 секунды. Средняя длительность помехи составляет около 1,73 секунды, максимальная – 14 секунд. В сравнении с радиодиапазонами 433 МГц и 2,4 ГГц степень загруженности диапазона 868 МГц крайне мала. Устройства, осуществляющие передачу в диапазоне 868 МГц, представлены датчиками пожарной сигнализации, автомобильными сигнализациями, беспроводными метеостанциями и др. Излучаемая мощность представленных устройств не превышает норм ГКРЧ, а дальность варьируется от 50 до 2500 метров. Наибольшее влияние с точки зрения помех будут вносить устройства, применяющие технологию псевдослучайной перестройки рабочей частоты, т.к. возможна передача данных в

частотном подканале разрабатываемого устройства. С точки зрения загруженности более привлекательным является диапазон 868 МГц.

Приёмопередатчики данного диапазона, ввиду отсутствия единого стандарта можно настроить на довольно низкое потребление (около 30мА), большую дальность (порядка километра в условиях прямой видимости). Ввиду низкочастотности диапазона он имеет ограничение в возможной скорости, но для реализации данного проекта большие скорости не требуются.

В данной автоматизированной системе все параметры работы задаются сервером, которые он передает на УСПД. УСПД, в свою очередь, отправляет параметры радиомодему ТРМ. Основная задача радиомодема собрать температуры с датчика. Частота сбора задается Центральным сервером (ЦС).

Основная задача УСПД – передавать радиомодему ТРМ команды Центрального сервера и выдавать ЦС принятые данные от радиомодема ТРМ. Основная задача ЦС – осуществление управления и обработка данных.

4.3 Аппаратная часть. Прототипы терморадиомодуля и УСПД

С учётом выдвинутых для системы требований необходимо выбрать следующие ее узлы:

- термодатчик;
- микроконтроллер;
- приёмопередатчик;
- антенны;
- интерфейс для общения с сервером;
- батарея для Ведомого радиомодема.

4.3.1 Термодатчик

Нами анализировались два типа термодатчиков, наиболее соответствующие описанным выше требованиям: ADT7410 (Analog Devices) и DS18B20 (Dallas Semiconductor). Основные характеристики этих термодатчиков представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Основные характеристики термодатчиков

	ADT7410	DS18B20
Температурный диапазон, °С	-40 - +105	-10 - +85
Точность, °С	0.5	0.5
Напряжение питания, В	2.7-5.5	3.0-5.5
Разрядность	13	12
Потребление, мкА	210	0
Количество выводов	8	3
Интерфейс связи	I2C	1Wire

Наиболее существенным отличием этих термодатчиков является их интерфейс связи. За счёт использования интерфейса 1wire датчик DS18B20 имеет всего 3 вывода, вместо 4 у ADT7410. Так же ещё одним преимуществом интерфейса 1wire является возможность паразитного питания за счёт передаваемых данных. Таким образом количество используемых выводов можно сократить до двух. При этом из-за меньшего количества выводов датчик DS18B20 представлен в более удобном форм-факторе.

Для измерения температур воздуха помещения, ограждений и теплового прибора были выбраны цифровые измерители температуры DS18B20 с разрешением преобразования 9 - 12 разрядов и функцией тревожного сигнала контроля за температурой. Параметры контроля могут быть заданы пользователем и сохранены в энергонезависимой памяти датчика. DS18B20 обменивается данными с микроконтроллером по однопроводной линии связи, используя протокол интерфейса 1-Wire. Питание датчик может получать непосредственно от линии данных, без использования внешнего источника. В этом режиме питание датчика происходит от энергии, запасенной на паразитной емкости. Диапазон измерения температуры составляет от -55 до +125 °C. Для диапазона от -10 до +85 °C погрешность не превышает 0,5 °C.

У каждой микросхемы DS18B20 есть уникальный серийный код длиной 64 разряда, который позволяет нескольким датчикам подключаться на одну общую линию связи. Т.е. через один порт микроконтроллера можно обмениваться данными с несколькими датчиками, распределенными на значительном расстоянии. Режим крайне удобен для использования в системах экологического контроля, мониторинга температуры в зданиях, узлах оборудования.

Особенности DS18B20:

- Для однопроводного интерфейса 1-Wire достаточно одного порта связи с контроллером.
- Каждое устройство имеет уникальный серийный код длиной 64 разряда.
- Возможность подключения нескольких датчиков через одну линию связи.
- Нет необходимости во внешних компонентах.
- Возможность получать питание непосредственно от линии связи. Напряжение питания в пределах 3,0 В ... 5,5 В.
- Диапазон измерения температуры -55 ... +125 °C.
- Погрешность не превышает 0,5 °C в диапазоне -10 ... +85 °C.
- Разрешение преобразования 9 ... 12 бит. Задается пользователем.
- Время измерения, не превышает 750 мс, при максимально возможном разрешении 12 бит.
- Возможность программирования параметров тревожного сигнала.

- Тревожный сигнал передает данные об адресе датчика, у которого температуры вышла за заданные пределы.
- Совместимость программного обеспечения с DS1822.
- Крайне широкие области применения.

4.3.2 Микроконтроллер

Выдвинутым в подразделе 4.2 требованиям удовлетворяют микроконтроллеры компании ST: STM32. Они обладают более низкой ценой и высокой мощностью по сравнению с микроконтроллерами других производителей. Также эти микроконтроллеры обладают удобным интерфейсом для программирования SWD, требующим всего для вывода и программатор ST-LINK, который является достаточно дешёвым. Компания ST оказывает широкую поддержку своим микроконтроллерам в области программного обеспечения: предоставляется большое количество библиотек и примеров кода, что позволяет проще и быстрее добиться нужного результата. Исходя из выдвинутых требований, основной выбор микроконтроллера делался из линейки STM32L, обладающей лучшими параметрами в области энергопотребления. Наилучшими характеристиками обладает микроконтроллер STM32L152.

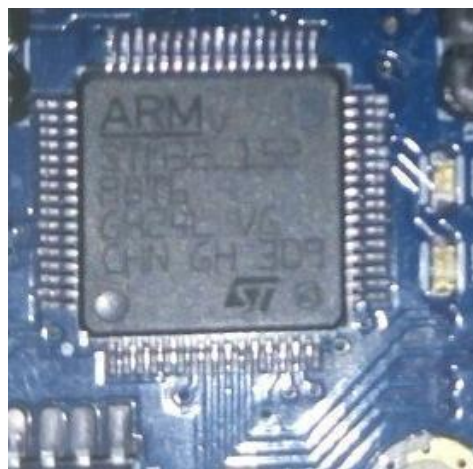


Рисунок 4.3 – Микроконтроллер STM32L152

Основные характеристики микроконтроллера STM32L152:

- Напряжение питания 1.65-3.6 В;
- Потребление в рабочем режиме – 9 мкА;
- Потребление в спящем режиме с ЧРВ – 1.2 мкА;
- 10 таймеров;
- 128 Кбайт flash-памяти;
- Поддержка I2C, SPI, USART;
- Отладочный интерфейс SWD;
- Цена – 2.6\$.

4.3.3 Приёмопередатчик

Лидерами в сфере разработки приёмопередатчиков любительских диапазонов на данный момент являются фирмы Texas Instruments, Analog Devices и Semtech International. Каждая из этих фирм выпускает довольно широкие линейки приёмопередатчиков разных частотных диапазонов. Наиболее подходящими под поставленные задачи являются трансиверы CC1120, ADF7023 и SX1233, основные характеристики которых представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Основные характеристики приёмопередатчиков

	CC1120	ADF7023	SX1233
Поддерживаемые диапазоны, МГц	169, 315, 433, 868, 915, 920	868, 433	433, 868, 915
Мощность передатчика, дБм	16	13.5	17
Чувствительность, дБм	-123	-120	-116
Потребление			
- при передаче	45 мА (16дБм)	32 мА (13дБм)	95 мА (17дБм)
- при приёме	17 мА	17 мА	17 мА
- в режиме сна	0.12 мкА	0.33 мкА	1мкА
Интерфейс управления	SPI	SPI	SPI
Поддерживаемые модуляции	2-FSK, 2-GFSK, 4-FSK, 4-GFSK, MSK, OOK	2-FSK, GFSK, GMSK, OOK	FSK, GFSK, MSK, GMSK, OOK

Из рассмотренных приёмопередатчиков наиболее оптимальным соотношением динамического диапазона и потребляемой мощности обладает CC1120.

4.3.4 Антенны

Чаще всего для задач подобного вида используются антенны двух типов:

- штыревые полуволновые и chip-антенны (рисунки 4.4 и 4.5).



Рисунок 4.4 – Штыревая антенна для диапазона 868 МГц

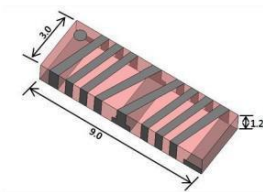


Рисунок 4.5 – Chip-антенна для диапазона 868 МГц

Преимуществом chip-антенн являются их небольшие габариты, позволяющие располагать их прямо на плате. Из-за небольших габаритов меньше излучаемая мощность, а, следовательно, и дальность связи. В связи с этим решено было использовать штыревую антенну.

В качестве антенны для радиомодемов ТРМ и УСПД установили медную пружинную антенну SW868-TH13:

- Диапазон частот: 868 МГц (+ / -5)
- КСВН: $\leq 1,5$
- Входное сопротивление: 50 Ом
- Максимальная мощность: 5 Вт
- Усиление: 2,15 дБи
- Диаметр проволоки: 0,8 мм
- Вес: 1 г , Высота: 13 + / -1 мм

4.3.5 Интерфейс для общения с сервером

Для решения подобных задач обычно используются интерфейсы Ethernet и RS-485. В классической сети Ethernet применяется 50-омный коаксиальный кабель двух видов (толстый и тонкий). Однако в последнее время (с начала 90-х годов) большое распространение получает версия Ethernet, использующая в качестве среды передачи витые пары. Определен также стандарт для применения в сети оптоволоконного кабеля. В стандарты были внесены соответствующие добавления. В 1995 году появился стандарт на более быструю версию Ethernet, работающую на скорости 100 Мбит/с (так называемый Fast Ethernet, стандарт IEEE 802.3u), использующую в качестве среды передачи витую пару или оптоволоконный кабель. Появилась и версия на скорость 1000 Мбит/с (Gigabit Ethernet, стандарт IEEE 802.3z).

Интерфейс RS-485 обеспечивает обмен данными между несколькими устройствами по одной двухпроводной линии связи в полудуплексном режиме. Широко используется в промышленности при создании АСУ ТП. RS-485 обеспечивает передачу данных со скоростью до 10 Мбит/с. Максимальная дальность зависит от скорости: при скорости 10 Мбит/с максимальная длина линии – 120 м, при скорости 100 кбит/с – 1200 м. Количество устройств, подключаемых к одной линии интерфейса, зависит от типа примененных в устройстве приемопередатчиков.

Один передатчик рассчитан на управление 32 стандартными приемниками. Выпускаются приемники со входным сопротивлением 1/2, 1/4, 1/8 от стандартного. При использовании таких приемников общее число устройств может быть увеличено соответственно: 64, 128 или 256. Стандарт не нормирует формат информационных кадров и протокол обмена. Наиболее часто для передачи байтов данных используются те же фреймы, что и в интерфейсе RS-232: стартовый бит, биты данных, бит паритета (если нужно), стоповый бит. Протоколы обмена в большинстве систем работают по принципу "ведущий-ведомый". Одно устройство на магистрали является ведущим (master) и инициирует обмен посылкой запросов подчиненным устройствам (slave), которые различаются логическими адресами.

Каждый из описанных интерфейсов способен удовлетворить требованиям, поэтому ключевое значение в выборе интерфейса приобретает простота реализации. Наиболее оптимальным решением в этом случае является применения Ethernet.

4.3.6 Устройство сбора и передачи данных (УСПД)

Устройство сбора и передачи данных (УСПД) должно обеспечивать связь по радиоканалу с терморадиомодулями и связь с центральным сервером посредством Ethernet. УСПД решено было реализовать с использованием Ведущего радиомодема и одноплатного компьютера Raspberry Pi 3 Model B со встроенным портом Ethernet (рисунок 4.6).

Основные характеристики Raspberry Pi 3 Model B приведены ниже:

- Процессор: BCM2837 Broadcom 1.2 ГГц;
- 64-bit quad-core ARM Cortex-A53;
- Wi-Fi 802. 11 b/g/n;
- Bluetooth 4.1;
- Оперативная память: 1 GB LPDDR2;
- 10/100 Ethernet порт;
- HDMI video/audio разъем;
- RCA video/audio разъем;
- CSI camera разъем;
- 4 x USB 2.0;
- 40 GPIO;
- DSI display разъем;
- Слот microSD;
- Размеры: 85 x 56 x 17 мм.



Рисунок 4.6 – Raspberry Pi 3 Model B

Для связи Ведущего радиомодема с одноплатным компьютером решено использовать интерфейс USB. Микроконтроллер STM32L152, входящий в состав радиомодема не обладает реализацией интерфейса USB, поэтому необходимо дополнить плату Ведущего радиомодема преобразователем USB-UART. К преобразователю были выдвинуты следующие требования:

- стандарт: usb 2.0;
- напряжение питания: 3...3.6В;
- компактное исполнение;
- невысокая стоимость.

С учётом выдвинутых требования для использования в Ведущем радиомодеме был выбран преобразователь USB-UART CP2102-GMR (рисунок 4.7).

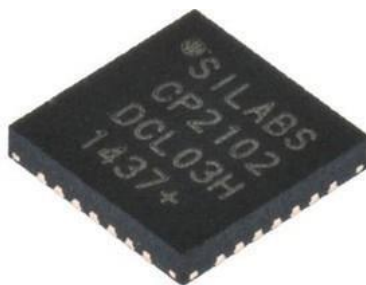


Рисунок 4.7 – Преобразователь USB-UART CP2102-GMR

4.3.7. Батарея для Ведомого радиомодема

Так как Ведомый радиомодем будет располагаться в помещении (квартире) потребителя, возникают трудности в обеспечении его электропитанием. Прокладывание к радиомодему питающих проводов усложняет монтаж конструкции и ухудшает её эстетические характеристики. В связи с этим целесообразно обеспечить радиомодем батарейным питанием.

Для выбора ёмкости батареи рассчитаем потребление радиомодема. Радиомодем имеет три рабочих режима: «спящий режим», режим снятия данных и режим передачи данных. Далее более подробно о каждом из режимов:

- «Спящий» режим – в этом режиме микроконтроллер и приёмопередатчик находятся в «спящем» режиме с ультранизким потреблением. Вход в этот режим осуществляется по завершению считывания или передачи данных. Выход происходит по прерыванию от часов реального времени в микроконтроллере в установленное для снятия или передачи данных время. Потребляемый ток в данном режиме в основном складывается из потребления микроконтроллера и приёмопередатчика:

$$I_{sleep} = I_{МКsleep} + I_{ППsleep} = 0.26 \text{ мкА} + 0.12 \text{ мкА} = 0.38 \text{ мкА}.$$

- Режим снятия данных – в этом режиме микроконтроллер считывает данные с датчика, а приёмопередатчик по-прежнему в спящем режиме.

Потребляемая сила тока в этом режиме:

$$I_{read} = I_{МК} + I_{ППsleep} = 360 \text{ мкА} + 0.12 \text{ мкА} = 360 \text{ мкА}.$$

- Режим передачи данных – в этом режиме микроконтроллер и приёмопередатчик находятся в рабочем режиме. Потребляемая сила тока в этом режиме:

$$I_{send} = I_{МК} + I_{ПП} = 360 \text{ мкА} + 30 \text{ мА} = 30.3 \text{ мА}.$$

В режиме передачи данных радиомодем потребляет значительно больше, в связи с этим выгодно производить передачу данных как можно реже. Однако очень редкие сеансы связи не позволят оперативно выявить проблему, и большая часть данных будет утеряна. В связи с этим решено выбрать компромиссный вариант – устраивать сеанс связи раз в сутки. Считывание данных необходимо производить раз в час. Всё остальное время радиомодем проводит в «спящем» режиме.

Потребление радиомодема за сутки:

$$I_{day} = (24 - 24 \cdot 0.0011 - 0.0028) \cdot I_{sleep} + 24 \cdot 0.0011 \cdot I_{read} + 0.0028 \cdot I_{send} = 9.1 \text{ мкАч} + 9.5 \text{ мкАч} + 84.84 \text{ мкАч} = 103 \text{ мкАч}$$

Срок работы батареи должен превышать три года. Таким образом, батарея должна иметь ёмкость: $Q = 3 \cdot 365 \cdot I_{day} = 113.25 \text{ мАч}$

В соответствии с полученными данными для радиомодема подойдёт батарейка Minamoto ER-14335, ёмкость которой равна 1650мАч (рисунок 4.8).



Рисунок 4.8 – Батарейка Minamoto ER-14335

4.3.8. Прототипы устройств

Терморадиомодуль в своем составе содержит плату «Ведомого» радиомодема, термодатчик DS18B20 и элемент питания Minamoto ER-14335.

В состав УСПД входит плата «Ведущего» радиомодема и одноплатный компьютер Raspberry Pi 3 Model B.

Плата «Ведомого» радиомодема состоит из микроконтроллера STM32L152, приемопередатчика CC1120, антенны SW868-TN13 и элементов обвязки.

Плата «Ведущего» радиомодема содержит те же элементы, что и плата «Ведомого» и дополняется преобразователем USB-UART CP2102-GMR.

4.4 Структура программного обеспечения и алгоритмы функционирования автоматизированной системы

Каждый элемент автоматизированной системы из рисунка 4.1 должен обладать собственным программным обеспечением, которое должно обеспечивать не только внутреннюю работу устройства, но и взаимодействие со связанным элементом схемы.

Система состоит из трех уровней:

- ПО терморадиомодуля;
- ПО УСПД;
- ПО центрального сервера.

4.4.1 Алгоритм функционирования ПО терморадиомодуля

- ПО терморадиомодуля обеспечивает его работу от батарейного источника питания с минимальным энергопотреблением.
- ПО терморадиомодуля работает в трех режимах:
 - тестовый;
 - калибровочный;

- сбор данных.

- Тестовый режим запускается при включении питания модуля, после успешного завершения теста, программа переходит в режим сбора данных.

- В начале тестового режима проводится тестирование термодатчиков и замер температур.
- По окончании цикла опроса температур терморадиомодуль переходит - режим ожидания связи с УСПД.
- При отсутствии связи с УСПД терморадиомодуль переключается в режим сна. При выходе из режима сна терморадиомодуль повторно переходит в режим ожидания связи.

• После выхода на связь с УСПД передаются данные термометров. Если термодатчики неисправны, то вместо значений температур передаются несуществующие коды.

- После передачи данных терморадиомодуль ожидает получение инструкций.
- При неудачном сеансе связи устройство уходит в режим сна.
- В режиме сбора данных опрашивается датчик температуры с периодом заданным оператором.
- Данные с датчика температур и текущее время измерений записываются в буфер, размер буфера определяется периодичностью передачи данных на УСПД.
- При заполнении буфера данные передаются на УСПД. После успешной передачи данных терморадиомодуль получает инструкции о дальнейшем режиме работы.
- Режим калибровки задается тремя инструкциями: время начала калибровки, время выхода из калибровки, интервал сбора данных.
- Данные калибровки записываются в буфер теплосчетчика с признаком калибровки и передаются на общих условиях.

После окончания калибровки устройство переходит в режим сбора данных с параметрами, установленными до калибровки.

4.4.2 Алгоритм функционирования ПО УСПД

- При включении питания на УСПД запускается связь с сервером.
- Из сервера получают следующие данные:
 - текущие дата и время;
 - адреса опрашиваемых терморадиомодулей;
 - период снятия температур;
 - длина буфера.
- Далее производится циклический опрос терморадиомодулей с заданными адресами, обнаружение и тестирование терморадиомодулей.

- При успешном тестировании терморadiомодулей производится переключение их в режим сбора данных и задаются полученные от сервера настройки.
- По окончании цикла опроса заданных адресов УСПД передает на сервер список необнаруженных устройств и продолжает их циклический опрос до успешного их обнаружения.
- При получении из сервера обновленного списка адресов процедура поиска продолжается по вышеописанному алгоритму.
- При получении из сервера команды калибровки терморadiомодули переключаются в заданный режим в соответствии с адресами и параметрами калибровки.

4.4.3 Алгоритм функционирования ПО центрального сервера

- ПО центрального сервера обеспечивает управление оператором процессом сбора данных, обработку, хранение и визуализацию полученных данных.
- Обеспечена возможность ввода оператором следующих данных:
 - таблицы соответствия объектов, УСПД, терморadiомодулей;
 - режимы работы терморadiомодулей.
- ПО центрального сервера обеспечивает передачу введенных оператором данных на УСПД.
- ПО центрального сервера обеспечивает запрос и ввод температурных данных с УСПД.
- Полученные данные сохраняются в соответствии с таблицей соответствия объектов, УСПД, терморadiомодулей.
- ПО центрального сервера обеспечивает визуализацию температурных данных по объектам.
- ПО центрального сервера обеспечивает обработку калибровочных данных и сохранение калибровочных коэффициентов в соответствии с таблицей соответствия объектов, УСПД, терморadiомодулей.
- ПО центрального сервера обеспечивает расчет тепловой энергии.

Из отчета за 2019 год.

4 Опытная эксплуатация автоматизированной системы на объектах ЖКХ

4.1 Описание объекта ЖКХ

В рамках выполнения настоящей работы по гос. заданию в период с ноября 2018 по декабрь 2019 г. нами были проведены исследования с помощью установленной автоматизированной системы в жилом доме с административными помещениями по адресу г. Томск, ул. Смирнова, 36 (рисунок 4.1). Разработанная автоматизированная система учета тепловой энергии была установлена в офисных и технических помещениях ООО «Центр сервисного обслуживания» в подвале, а также на первом и втором этажах. Данные считывались с температурных датчиков, подсоединённых к отопительным приборам, с определенным временным интервалом, заносятся в память компьютера и обрабатывались в соответствии с разработанными нами алгоритмом и методикой. Данный метод повышает точность измерений т/э, отдаваемой ОП, с учетом его индивидуальных особенностей и существенно сокращает время измерения коэффициента теплоотдачи.



Рисунок 4.1 – Внешний вид входа в помещения ООО «Центр сервисного обслуживания» по адресу г. Томск, ул. Смирнова, 36

Данный объект интересен для опытной эксплуатации тем, что содержит помещения с разными условиями микроклимата: отдельные комнаты без окон; помещения с большими витражными окнами; помещения, не имеющие наружных стен (только перегородки), но оборудованные отопительными приборами.

Режимы работы помещений также были различны:

- помещения общего пользования со входными дверями и контактом с улицей;
- отдельные офисные помещения;
- складские помещения.

Специально для проведения опытной эксплуатации и экспериментальных исследований во всех помещениях ОП были заменены на однотипные чугунные радиаторы семизвенные разной высоты МС-140-500М и МС-140-300. Все ОП оборудованы байпасами, терморегуляторами на вводе и отсечными кранами на выходе. Также присутствовали три типа схем подключения ОП к тепловой сети:

- прямая (параллельная) из подающего в обратный трубопровод;
- из подающего трубопровода в подающий;
- последовательная из подающего трубопровода в обратный.

4.2 Состав автоматизированной системы учета тепла

Автоматизированная система учета тепла предназначена для автоматизированного контроля, сбора и обработки данных с температурных датчиков, установленных в помещении.

Область применения разрабатываемой автоматизированной системы – объекты жилого, коммерческого и производственного назначения.

Основными функциями разрабатываемой системы являются: сбор данных с температурных датчиков, установленных в отдельных помещениях здания, и передача их на устройство сбора и передачи данных (УСПД), которое, в свою очередь, отправляет данные на центральный сервер для дальнейшей обработки.

На рисунке 4.2 приведена структура автоматизированной системы, в состав которой входят следующие основные элементы:

- Терморадиомодуль (ТРМ): приемопередатчик, антенна, источник электропитания, датчики температуры, микроконтроллер;
- Устройство сбора и передачи данных (УСПД);
- Центральный сервер (ЦС);
- Программно-методическое обеспечение, позволяющее осуществлять сбор, передачу и обработку данных с терморадиомодулей.

Сбор и передача данных осуществляется на базе следующих элементов:

- терморадиомодуль (ТРМ), имеющий в составе микроконтроллер и приемопередатчик, датчик температуры – считывает показания с датчиков и передаёт их по радиоканалу;
- устройство сбора и передачи данных (УСПД) – принимает данные по радиоканалу и передаёт их центральному серверу;
- центральный сервер (ЦС) – устанавливает параметры обмена, принимает, хранит и обрабатывает данные.

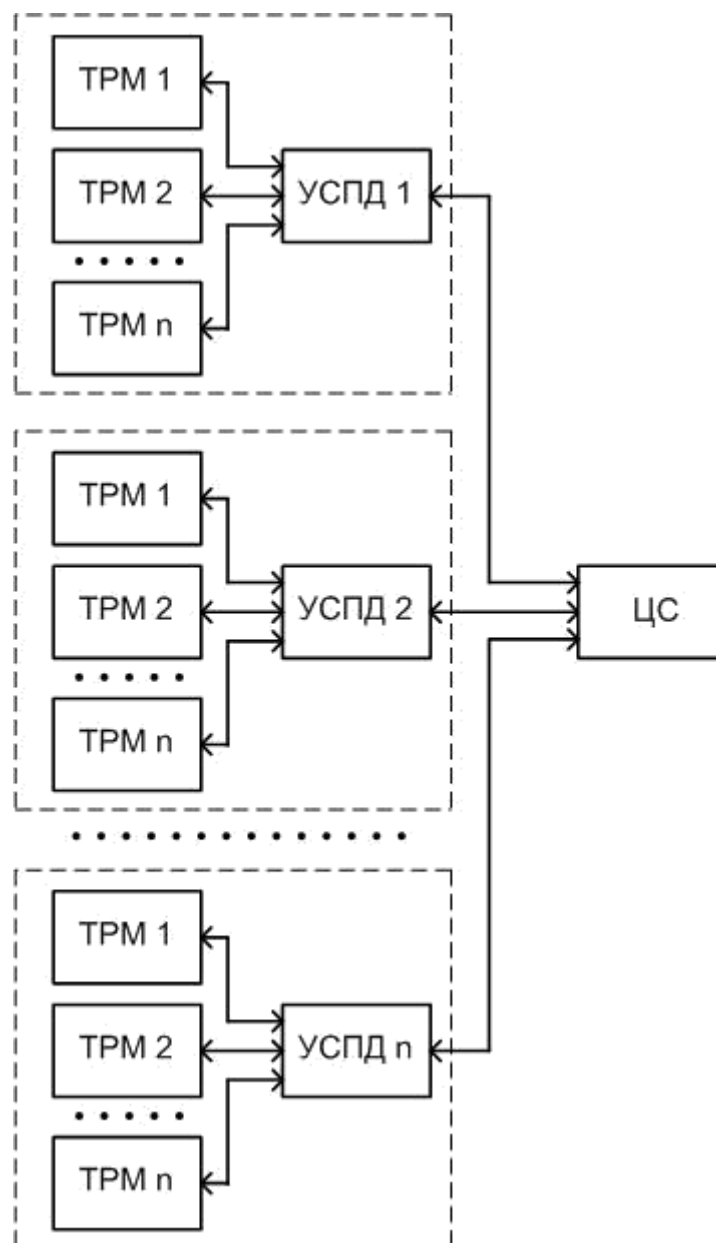


Рисунок 4.2 – Структура автоматизированной системы учета тепловой энергии

Различие между радиомодемом, входящим в состав терморadiомодуля («Ведомый») и модемом в УСПД («Ведущий») состоит только в программном обеспечении для микроконтроллеров. В остальном данные платы радиомодемов имеют схожую структуру.

УСПД представляет собой узловой блок, который собирает с подключённых терморadiомодулей данные по радиоканалу и передает их на центральный сервер через Ethernet, а также производит оценку работоспособности и настройку своей подсети.

Центральный сервер представляет собой стандартное сетевое оборудование, с установленным программным обеспечением для хранения, обработки и визуализации полученных данных.

Поскольку разрабатываемая система использует оригинальную методику вычисления тепловой энергии, терморадиомодуль должен изменять режимы работы вовремя эксплуатации (рабочий режим и режим калибровки).

Одним из важнейших вопросов является выбор физической среды и интерфейса передачи данных между УСПД и ТРМ. Подключение по радиоканалу позволяет максимально гибко соединять УСПД и ТРМ, исключая прокладку кабельных линий. Также можно подключать другие приборы учета энергоресурсов. Недостатки использования радиоканала: значительное затухание при распространении сигнала через перекрытия и стены [28]; наличие активных радиопомех; частотная селективность канала из-за многолучевого эффекта; необходимость использовать батарейное питание – как следствие малая излучаемая мощность и ограниченный срок работы. Для передачи по радиоканалу, применяются стандартные приемо-передатчики или вариации на их основе.

Основные технические характеристики системы, описание аппаратной части и прототипов терморадиомодуля и УСПД, а также структура программного обеспечения и алгоритмы функционирования автоматизированной системы были описаны в четвертой главе Промежуточного отчета о НИР № АААА-А18-118030690028-6 от 25.01.2019г.

Конструкции терморадиомодулей и структура программного обеспечения верхнего уровня автоматизированной системы описаны во второй и третьей главе настоящего отчета.

Измеритель или Терморадиомодуль (ТРМ) должен работать в режиме калибровки и в режиме эксплуатации. ТРМ должен обеспечивать работоспособность в диапазоне температур от +15 до + 85 градусов С.

В состав ТРМ в качестве основных элементов входят такие узлы как, приемопередатчик, антенна, источник электропитания (аккумулятор или батарея), датчики температуры, микроконтроллер.

К температурному датчику были выдвинуты следующие требования: точность: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$; низкий ток потребления; компактное исполнение; отсутствие дополнительного оборудования; отсутствие необходимости калибровки датчика; невысокая стоимость. Для измерения температур воздуха помещения, ограждений и теплового прибора были выбраны цифровые измерители температуры DS18B20.

К микроконтроллеру предъявляются следующие требования:

- низкое энергопотребление;
- наличие спящего режима с поддержкой часов реального времени;
- наличие интерфейса UART;
- напряжение питания от 2.5 до 3.6 В;
- рабочая частота не менее 2 МГц.

Всем этим требованиям удовлетворяют микроконтроллеры компании ST:STM32. Они обладают более низкой ценой и высокой мощностью по сравнению с микро- контроллерами других производителей. Также эти микроконтроллеры обладают удобным интерфейсом для программирования, требующим всего три вывода и программатор ST-LINK, который является достаточно дешёвым.

Технические характеристики (параметры) приемопередатчика:

- рабочая частота – 868 МГц.
- излучаемая мощность не более 25 мВт.
- питание от аккумуляторной батареи;
- интервал передачи данных – сервисная настройка;

Из рассмотренных приёмопередатчиков наиболее оптимальным соотношением динамического диапазона и потребляемой мощности обладает CC1120.

Для проектируемой системы сбора и передачи данных был выбран диапазон 868 МГц. Согласно проведённым экспериментам [28], в сравнении с радиодиапазонами 433 МГц и 2,4 ГГц степень загруженности диапазона 868 МГц крайне мала. Устройства, осуществляющие передачу в диапазоне 868 МГц, представлены датчиками пожарной сигнализации, автомобильными сигнализациями, беспроводными метеостанциями и др. Излучаемая мощность представленных устройств не превышает норм ГКРЧ, а дальность варьируется от 50 до 2500 метров. Наибольшее влияние с точки зрения помех будут вносить устройства, применяющие технологию псевдослучайной перестройки рабочей частоты, т.к. возможна передача данных в частотном подканале разрабатываемого устройства. С точки зрения загруженности более привлекательным является диапазон 868 МГц.

В данной автоматизированной системе все параметры работы задаются сервером, которые он передает на УСПД. УСПД, в свою очередь, отправляет параметры радиомодему ТРМ. Основная задача радиомодема собрать температуры с датчика. Частота сбора задается Центральным сервером (ЦС).

Основная задача УСПД – передавать радиомодему ТРМ команды Центрального сервера и выдавать ЦС принятые данные от радиомодема ТРМ. Основная задача ЦС – осуществление управления и обработка данных.

Устройство сбора и передачи данных (УСПД) должно обеспечивать связь по радиоканалу с терморадиомодулями и связь с центральным сервером посредством Ethernet. УСПД решено было реализовать с использованием Ведущего радиомодема и одноплатного компьютера RaspberryPi 3 ModelB со встроенным портом Ethernet. Для связи Ведущего радиомодема с одноплатным компьютером решено использовать интерфейс USB.

Всего на объекте ООО «Центр сервисного обслуживания» было установлено двадцать шесть ТРМ: по одному на каждый отопительный прибор и по одному для измерения воздуха в помещении. Выбор **оптимальной точки** установки температурного датчика ТРМ на отопительный прибор с учетом лабораторных экспериментов и результатов использования тепловизора подробно приведен в подразделе 2.2 отчета о НИР № АААА-А18-118030690028-6 от 25.01.2019г. [13].

В ряде помещений имелись как капитальные несущие стены, так и тонкие перегородки, поэтому обойтись одним УСПД не удалось. Всего на объекте было установлено три УСПД, передающие данные по Ethernet на сервер. Сервер представляет собой рабочую станцию с соответствующим ПО.

4.3. Методика проведения экспериментальных исследований

Задачи учета тепловой энергии и мониторинга теплового режима помещений решаются нами путем измерения в реальных условиях температур объектов и обработке результатов с помощью математической модели, описанной во второй и третьей главах Промежуточного отчета о НИР № АААА-А18-118030690028-6 от 25.01.2019г. Модель представляет собой систему балансных дифференциальных уравнений для средних температур отопительного прибора, воздуха и внутреннего ограждения помещения. Параметрами уравнений являются коэффициенты теплоотдачи отопительных приборов, коэффициенты теплопередачи через внешние и внутренние ограждения, теплоемкости элементов помещения. Эти параметры находятся при решении обратной задачи: тепловой режим приводится в нестационарное состояние путем нагревания или охлаждения помещения. При обработке полученной температурной зависимости находятся искомые величины. Автоматизированный комплекс, реализующий этот алгоритм на рассматриваемом объекте, представляет собой тринадцать ТРМ, измеряющих температуру воздуха в помещениях, три УСПД, радиоканал передачи данных и центральный сервер.

Весь **процесс работы системы сбора и передачи данных** можно разделить на несколько режимов:

- Инициализация: система оказывается в этом режиме после подключения питания. Предназначен для изначального задания параметров «Ведущего» и «Ведомого»: адресов, текущего времени, интервалов снятия и передачи данных.

В этом режиме «Ведомый» радиомодем всегда находится на связи.

- Калибровка: система переходит в него по команде сервера. Режим предназначен для сбора данных и последующего вычисления по ним коэффициента теплоотдачи отопительного прибора. В этом режиме данные снимаются раз в минуту и отправляются на сервер по завершению процесса калибровки.

- Эксплуатация: система переходит в него по команде сервера по завершению инициализации. Предназначен для работы для сбора данных и последующего

вычисления по ним тепловой энергии. В этом режиме данные снимаются раз в час и отправляются на сервер раз в сутки.

В начале эксперимента тепловая система находилась в режиме эксплуатации. Все тепловые приборы были прогреты, помещения находились в обычном тепловом режиме. На ОП закреплялись терморадиомодули в составе термодатчика и ведомого радиомодема.

В одном из помещений располагался сервер, к которому был подключен УСПД с ведущим радиомодемом, собиравший данные со всех ТРМ. Температура воздуха измерялась отдельными выносными датчиками. Значения температур по радиоканалу передавались на сервер и записывались в память по мере поступления. В режиме эксплуатации измерения температур производились один раз в час. Данные по температурам передавались на сервер один раз в сутки, когда ТРМ выходил из спящего режима и устанавливал связь с Сервером (в целях экономии батарейного питания). В ответ Сервер посылал распорядок поведения ТРМ на следующий настраиваемый период. В режим калибровки сервер переводился по команде оператора. Одновременно перекрывались отсечные краны на отопительных приборах. Термодатчики передавали информацию о температурах остывающих радиаторов с интервалом в одну минуту. Процесс калибровки занимал четыре часа. После ее завершения возобновлялась подача теплоносителя и тепловая система переводилась в режим эксплуатации. В результате были получены зависимости коэффициента теплоотдачи ОП от температурного напора, приведенные на рисунке 4.3.

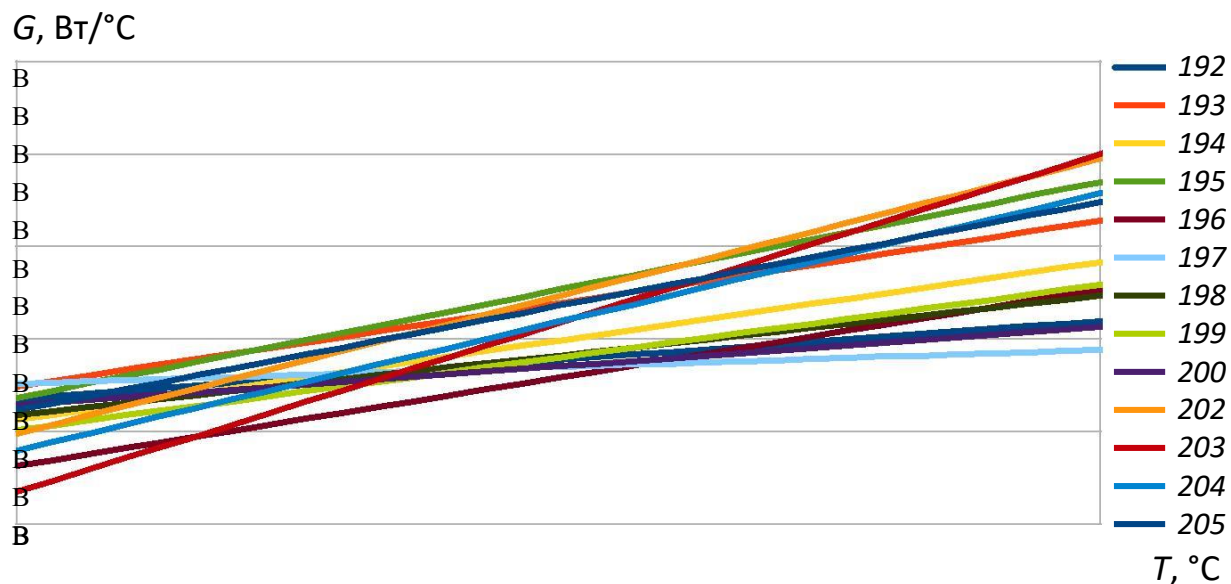


Рисунок 4.3 – Зависимости коэффициентов теплоотдачи от температурного напора для тринадцати отопительных приборов

Видно, что у ОП одного типа, установленных в разных помещениях, значения коэффициентов теплоотдачи значительно разнятся. При этом зависимости для

радиаторов в кабинете, кухне и спальне близкие друг к другу. Полученные результаты демонстрируют разные условиями эксплуатации ОП.

На первом этапе опытной эксплуатации системы (отопительный сезон 2018г.) были использованы терморадиомодули в составе с одним температурным датчиком, для измерения температуры поверхности отопительного прибора. Второй датчик был предназначен для измерения средней температуры воздуха в помещении и располагался, согласно рекомендациям АВОК, на высоте 0,75 м. от пола и не менее 1,5 м. от поверхности отопительного прибора.

На втором этапе опытной эксплуатации (отопительный сезон 2019 г.) ододатчиковые терморадиомодули были заменены на двухдатчиковые. Первый датчик в составе ТРМ измерял температуру поверхности отопительного прибора, второй датчик располагался на лицевой крышке ТРМ и измерял температуру воздуха помещения. Это позволило использовать лишь одно устройство в помещении для измерения параметров.

4.4. Анализ результатов экспериментов и опытной эксплуатации

Опытная эксплуатация системы на первом этапе выявила некоторое количество отказов, как в аппаратной, так и в программной части. На втором этапе причины отказов были устранены. В целом система показала надежную работу, достаточную для применения в коммерческой эксплуатации.

В соответствии с техническим заданием была выполнена калибровка всех отопительных приборов, которая показала существенную разницу в коэффициентах теплоотдачи отопительных приборов, обусловленную местом установки и условиями эксплуатации.

Измеренные коэффициенты теплоотдачи позволили вычислить количество тепловой энергии отдаваемой каждым отопительным прибором и суммарное потребление помещениями. При составлении теплового баланса учитывались следующие факторы: показания всех первичных устройств и найденная экспериментальным путем тепловая энергии подводящих труб и теплового узла. При сравнении показаний с стационарным узлом учета установленным на вводе в офис зафиксирована разница порядка 10%, которая не противоречит метрологическим основам коммерческих измерений.

На рисунке 4.3 приведены зависимости коэффициентов теплоотдачи от температурного напора для тринадцати отопительных приборов. Зависимости сняты в период с ноября по декабрь 2019 года.

Измеренные коэффициенты теплоотдачи позволили вычислить количество тепловой энергии, отдаваемой каждым отопительным прибором и суммарное потребление помещениями.

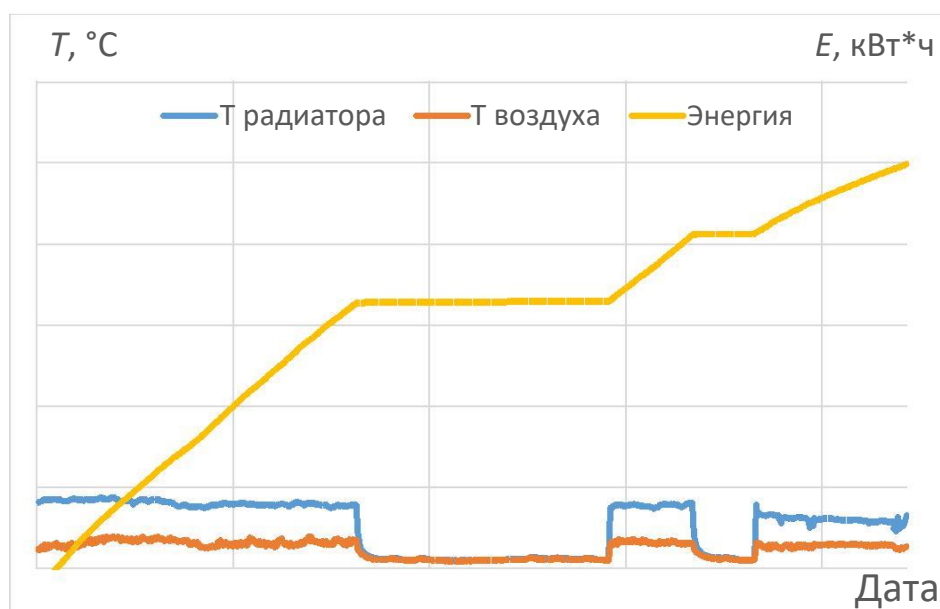


Рисунок 4.4 – Зависимости температур отопительного прибора и воздуха в кабинете № 4 (по левой оси Y) и тепловой энергии для этого кабинета (по правой оси Y) за период с 23.11.2019 по 23.12.2019

На рисунке 4.4 приведены графики зависимостей температур отопительного прибора и воздуха в кабинете № 4 (по левой оси Y) и тепловой энергии для этого кабинета (по правой оси Y) за период с 23.11.2019 по 23.12.2019.

При составлении теплового баланса учитывались следующие факторы: показания всех первичных устройств и найденная экспериментальным путем тепловая энергии подводящих труб и теплового узла. При сравнении показаний со стационарным узлом учета, установленным на вводе в офис, зафиксирована разница порядка 10%, которая не противоречит метрологическим основам коммерческих измерений.

В таблице 4.1 приведена рассчитанная тепловая энергия для каждого помещения в отдельности и суммарная по всем помещениям за период с 19.01.2019 по 19.03.2019.

Таблица 4.1

Рассчитанная тепловая энергия за период с 19.01.2019 по 19.03.2019

Помещение	Тепловая энергия, кВт*ч
Кабинет 1	282,603
Кабинет 2 ОП1	567,254
Кабинет 2 ОП2	269,950
Кабинет 4	559,529
Кабинет 5	684,836
Кабинет 6	382,656
Кабинет 7	552,348
Кабинет 8	790,857
Кабинет 9	353,323
Аппаратная	436,357
Склад	173,403

Прихожая	500,732
Коридор	722,141
Суммарная (весь офис)	6275,989

За тот же временной период показания вычислителя тепловой энергии (классический метод учета потребленной тепловой энергии) равны 7995,2 кВт*ч. Отклонение предложенного нами метода, относительно классического, составило 21,5 %. Под учет этого вычислителя тепловой энергии попадают все помещения объекта ЖКХ.

Отопительными приборами оборудована часть помещений, поэтому для вычисления вклада теплоотдачи подводящих трубопроводов в общее количество потребленной тепловой энергии предпринимались специальные действия: ОП отключались от системы отопления запорной арматурой, циркуляция теплоносителя происходила через байпас (которые установлены перед каждым ОП), что позволило вычислить тепловой вклад системы отопления в потребляемую ТЭ объекта ЖКХ без работающих ОП.

Подводя итоги, следует отметить, что проводимые натурные испытания позволили решить сразу несколько вопросов:

1. Сравнить результаты экспериментов, проведенных в лабораторных и полевых условиях. В том и в другом случае использовались чугунные радиаторы. Однако, в натурных испытаниях отопительные приборы работали в принципиально различных условиях эксплуатации (кабинеты, проходной коридор, склад, мастерская), соответственно, обогревались внутренние и наружные стены, помещения с витринным остеклением и со стандартными оконными проемами, подвальные помещения и помещения первого, второго этажей. В то время как в лабораторных условиях создать такое разнообразие внешних условий одновременно невозможно.

2. Осуществить оценку работоспособности программного обеспечения сбора данных с нескольких устройств. При разработке ПО были протестированы симплексный, дуплексный и полудуплексный режим взаимодействия системы мастер – слэйв. При этом в роли мастера выступал УСПД на базе микрокомпьютера, а слэйвами были первичные устройства ТРМ, установленные на отопительных приборах. Были проанализированы как прямое снятие данных с оконечных устройств, так и снятие данных по расписанию, с промежуточным хранением в памяти первичного преобразователя. Лучше себя показал режим снятия данных с промежуточным сохранением в памяти первичного преобразователя, увеличивший надежность системы в целом и, в частности, сохранность данных в критических ситуациях.

3. Проведены сравнительные замеры с самостоятельными датчиками, измеряющими температуру воздуха в помещении, расположенными вне устройства, закрепляемого на отопительном приборе в месте, с условно средней температурой

воздуха данного помещения, и оконечными устройствами с двумя датчиками температуры, измеряющими температуру поверхности отопительного прибора и температуру воздуха в непосредственной близости от отопительного прибора. Сравнительные замеры показали одинаковые результаты. Таким образом, применение обоих подходов не нарушает достоверность измерения тепловой энергии. Проведены расчеты коэффициентов теплоотдачи отопительных приборов по разным методикам с применением специальных и стандартных статистических методов обработки информации. При этом применялись методы математического сглаживания массива данных экспериментальных замеров, в том числе методом скользящего окна, прямое исключение значений с явно завышенными/ заниженными значениями. Результаты сравнивались с полученными в лабораторных условиях, с целью подтверждения общих трендов корреляций.

5. Вычисление тепловой энергии проводилось как сумма тепловых вкладов каждого отопительного прибора, вычисленная по разработанной методике через известный коэффициент теплоотдачи, тепловой вклад системы теплоснабжения помещений, вычисленный через показания теплосчетчика на вводе при отключенных отопительных приборах.

Таким образом, результаты опытной эксплуатации на объекте ЖКХ подтверждают, что разработанная система сбора, передачи и обработки данных с приборов учета и контроля эффективности теплоснабжения зданий и помещений готова для дальнейшего внедрения.