

Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН

ЦЕНТР ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ЦИФРОВОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ ИПУ РАН: РЕЗУЛЬТАТЫ, ПЛАНЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ

Александр Пащенко
руководитель Центра
интеллектуальной цифровой
электроэнергетики ИПУ РАН



НАПРАВЛЕНИЯ РАБОТ ЦЕНТРА

Основное научное направление: **ЭНЕРГЕТИКА ЗДАНИЙ ОБЩЕСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ**
Common Buildings -- занимают от 30% до 50% всего энергопотребления

Проекты Центра интеллектуальной цифровой электроэнергетики

1. Построение цифрового двойника энергосети ИПУ

- Обследование энергосети ИПУ
- Создание системы сбора данных об энергопотреблении
- Web-платформа для публикаций датасетов и научных исследований
- Исследования в области предсказания энергопотребления и NILM

2. Процессы управления энергетикой и внутренней средой

- Автоматизация рабочих мест дежурных ОГЭ, слежение за приоритетными объектами (серверная, морозильная камера)
- Создание испытательных полигонов (Микроклимат, Обрыв нуля)
- Внедрение управления по обратной связи в энергосистему
- Исследования в области управления микроклиматом и комфортом

3. Создание новых компетенций сотрудников ИПУ и студентов

- Интеграция служб ИПУ в рабочие процессы
- Проведение практик у студентов ведущих ВУЗов
- Соревнования по анализу данных Центра
- Общественный семинар «Интеллектуальные системы управления в энергетике»

ПОЭТАЖНОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ

Более чем на 98% завершено обследование помещений лабораторного корпуса. В настоящий момент завершается обследование подвальных помещений

Сводные данные по обследованию (дообследованию) ЛПК

Этаж	Всего помещений	Из них не обследованы	Щитов (в 2023 г.)	Автоматических выключателей тока (в 2023 г.)	Потребителей (в 2023 г.)	Процент обследования (по помещениям)
1	169	4	55 (55)	491 (491)	401 (399)	97,6%
2	219	4	65 (13)	551 (150)	565 (213)	98,2%
3	172	3	48 (3)	356 (16)	449 (109)	98,3%
4	145	0	43 (2)	282 (17)	380 (89)	100,0%
5	146	2	45 (0)	280 (1)	409 (260)	98,6%
6	138	3	76 (76)	468 (468)	433 (433)	97,8%
Всего	989	16	332(149)	2428(1143)	2637(1503)	98,4%

ОБСЛЕДОВАНИЕ ПОСТРОЕК

В 2023 году проведено полное обследование помещений корпусов 3 – 9, расположенных во внутреннем дворе

Сводные данные по обследованию построек в 2023 году

Строение	Всего помещений	Из них не обследованы	Щитов	Автоматических выключателей тока	Потребителей	Процент обследования (по помещениям)
3	32	0	17	115	59	100,0%
4	60	0	16	138	82	100,0%
5	25	0	23	154	94	100,0%
6	30	0	3	54	75	100,0%
7	37	0	5	34	79	100,0%
8	11	0	3	12	21	100,0%
9	11	1	9	60	20	90,9%
Всего	206	1	76	567	430	99,5%

Ведется переработка собранной информации по КОИ с учетом последней версии поэтажных планов, выбранного стандарта обозначения щитов, автоматов, потребителей.

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ЭНЕРГОСЕТИ

Построение цифрового двойника для комплекса зданий ИПУ

- Обследование электросети
- Высоочастотный сбор данных
- Работы проводятся силами технических служб ИПУ
- Выявляются проблемные места в энергообеспечении
- Создано автоматизированное рабочее место дежурного электрика

1. Разрабатывается интерактивная схема, объединяющая электросеть ИПУ и архитектурный план строений ЛПК, КОН и хозяйственных строений
2. Для привлечения исследователей создается платформа для публикации и анализа предобработанных данных Центра
3. На основе собираемых данных проведено разведочное исследование пиковых и среднесуточных нагрузок на сеть Института

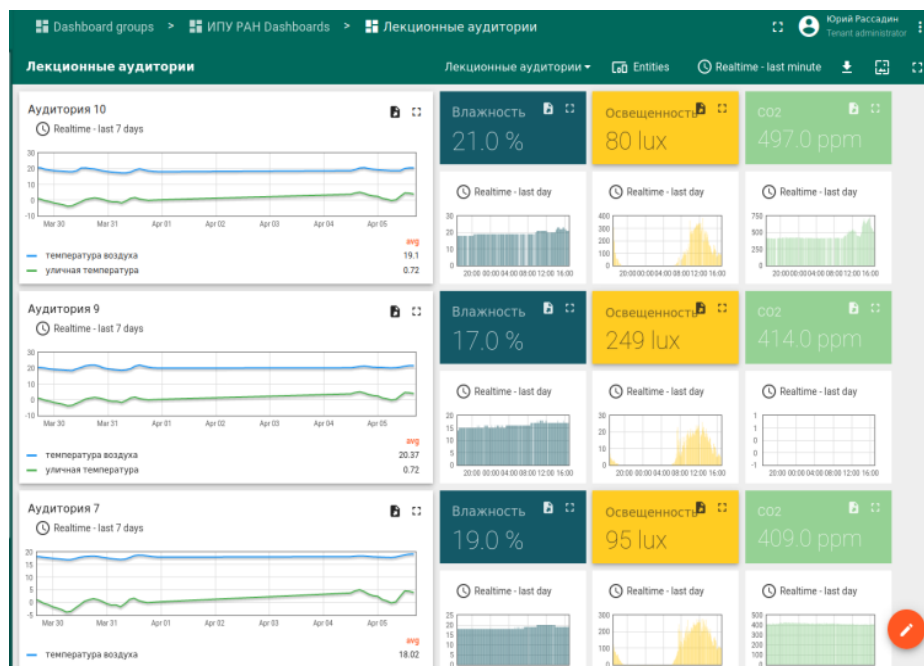
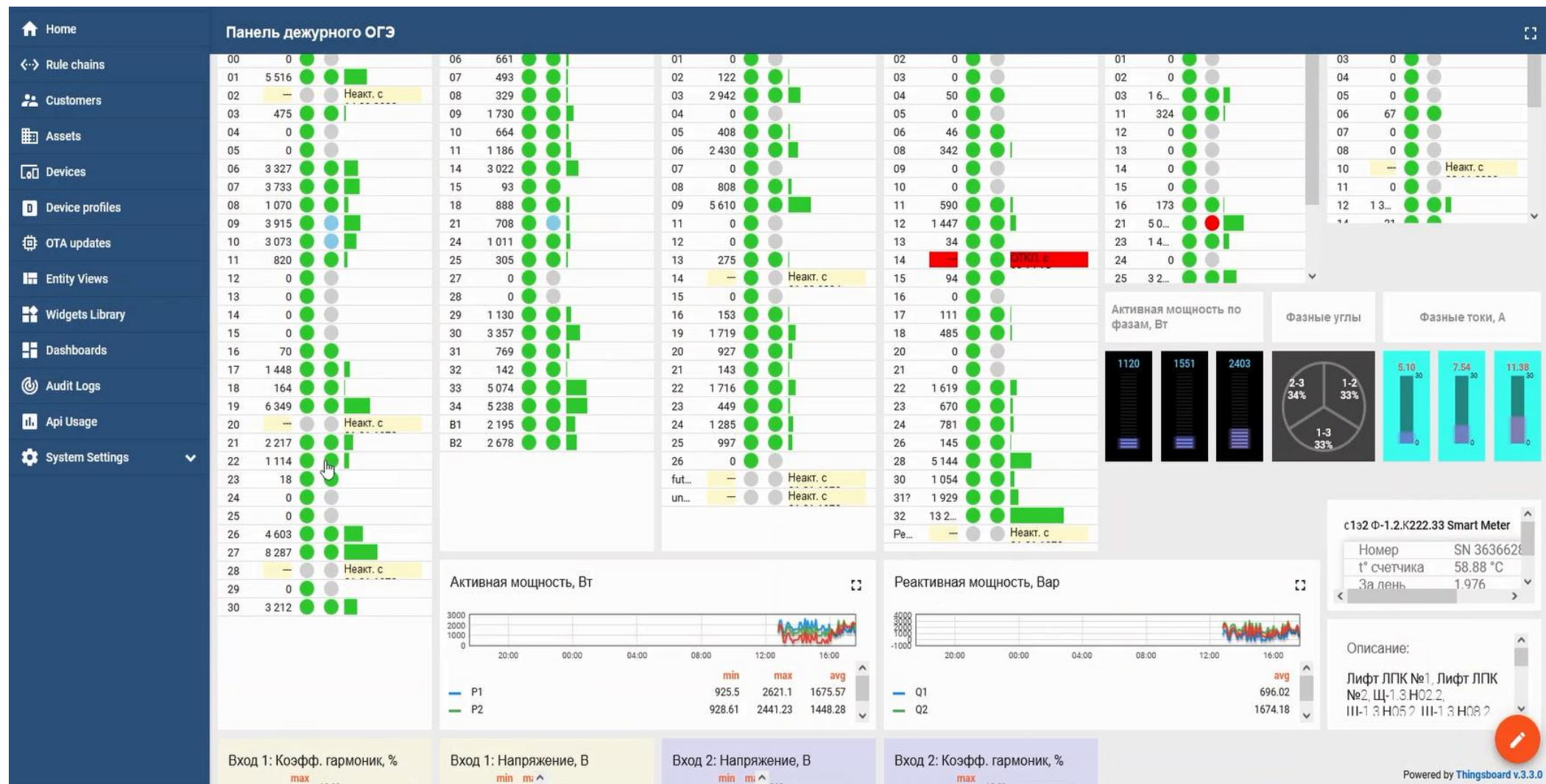


ИЛЛЮСТРАЦИЯ РАБОТЫ

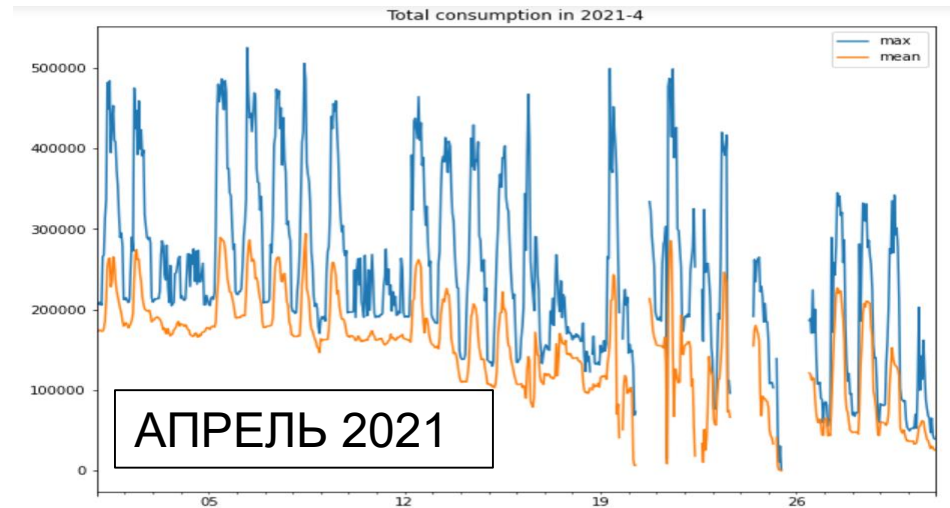


АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ИПУ

За 2021: Оценка максимальной потребляемой мощности

Для доступных фидеров рассчитывались следующие показатели (помесячно):

1. S_{mean} - средняя мощность за каждый час
2. S_{max} – сумма максимальных мощностей за час

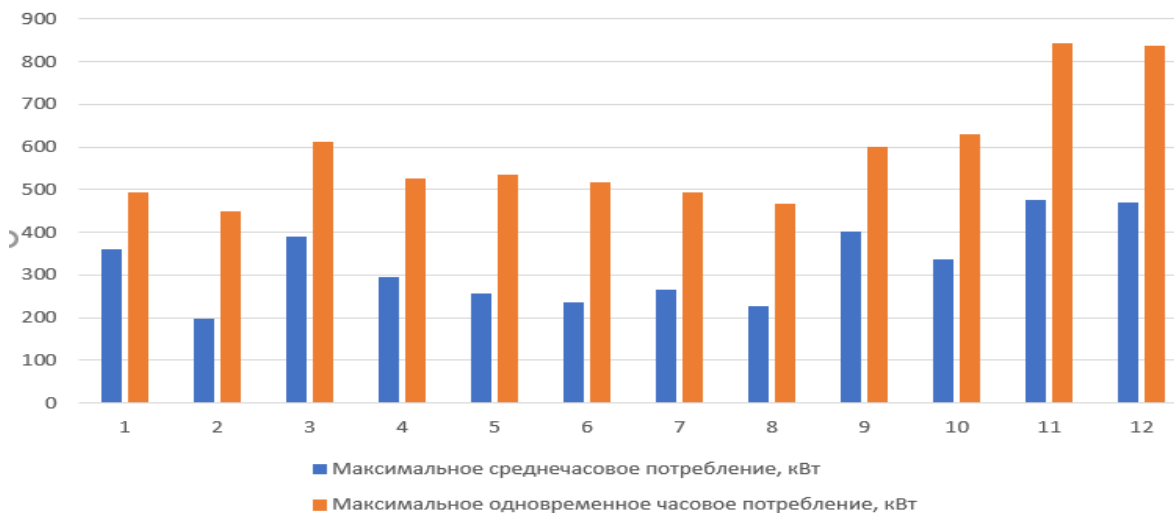


Итого в 2021 году максимальное потребление:

Среднечасовое S_{mean} = 477 кВт (ноябрь 2021, 95 фидеров)

Сумма часовых максимумов S_{max} = 842 кВт (ноябрь 2021, 95 фидеров)

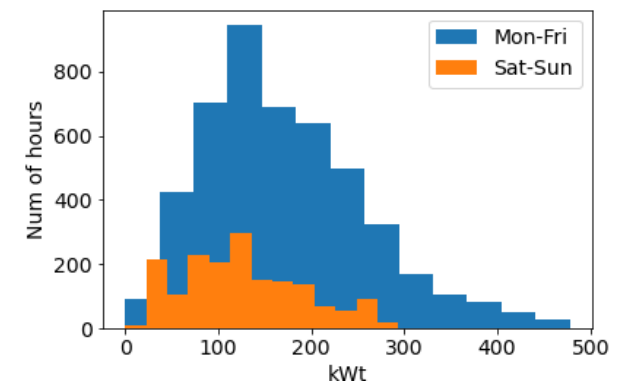
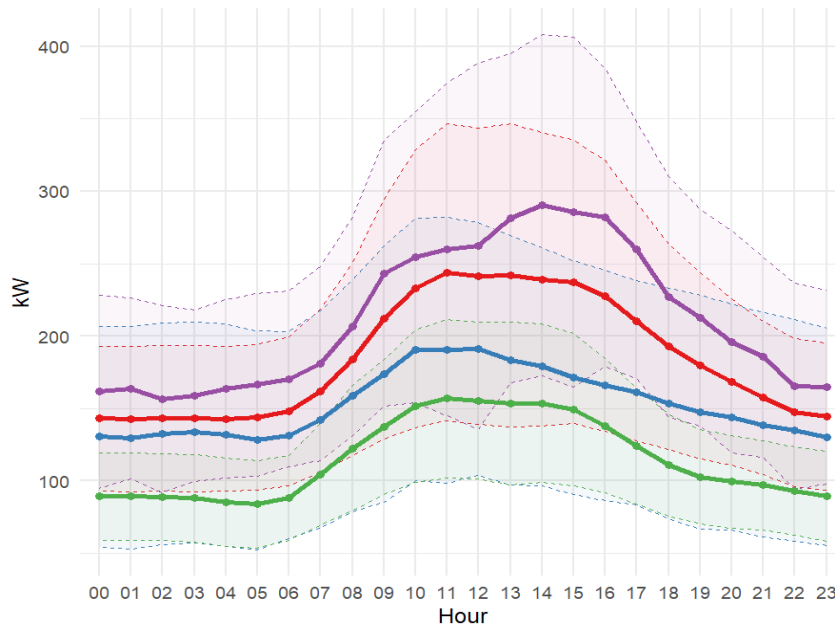
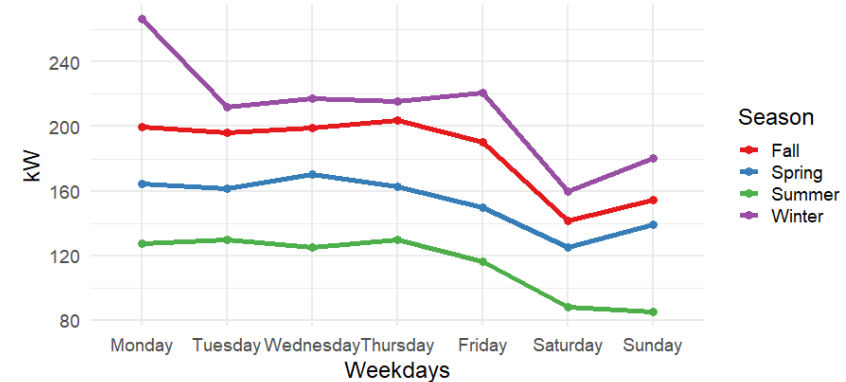
Максимальные показатели за каждый месяц 2021 г.:



Месяц	Кол-во фидеров	S_{mean} , кВт	S_{max} , кВт
1	55	360	494
2	62	197	448
3	62	390	613
4	62	294	525
5	81	257	535
6	81	235	517
7	81	266	494
8	81	227	467
9	92	402	599
10	92	336	631
11	94	477	842
12	95	470	838

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ИПУ

- Наблюдаются дневная, недельная периодичность и сезонные колебания
- Средняя нагрузка в рабочие дни больше на 25%, а максимальная – на 38%, чем в выходные
- Зимнее и осеннее потребление отличается от весеннего и летнего
- Потребление зимой и осенью выше, чем весной и летом
- Зимой наблюдается пик после 14 часов



ПЛАТФОРМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Обоснование:

В рамках работы с инфраструктурной основой Центра – технологическими полигонами, происходит сбор значительного объема данных. По мере увеличения различных устройств, датчиков и частоты их опроса, растут и объемы хранимых данных.

При подготовке соревнований по анализу данных (хакатонов) стало понятно, что в данный момент возникают сложности с использованием этих данных.

Естественным этапом развития технологических полигонов является платформа анализа полученных данных, позволяющая осуществлять комфортный доступ к данным в удобном формате, предварительный (разведочный) анализ и формулировку и тестирование исследовательских гипотез на начальном этапе исследований.

Целью работы

являлась разработка платформы анализа данных, позволяющая осуществлять комфортный доступ к данным в удобном формате, предварительный (разведочный) анализ и формулировку и тестирование исследовательских гипотез на начальном этапе исследований.

В 2023:

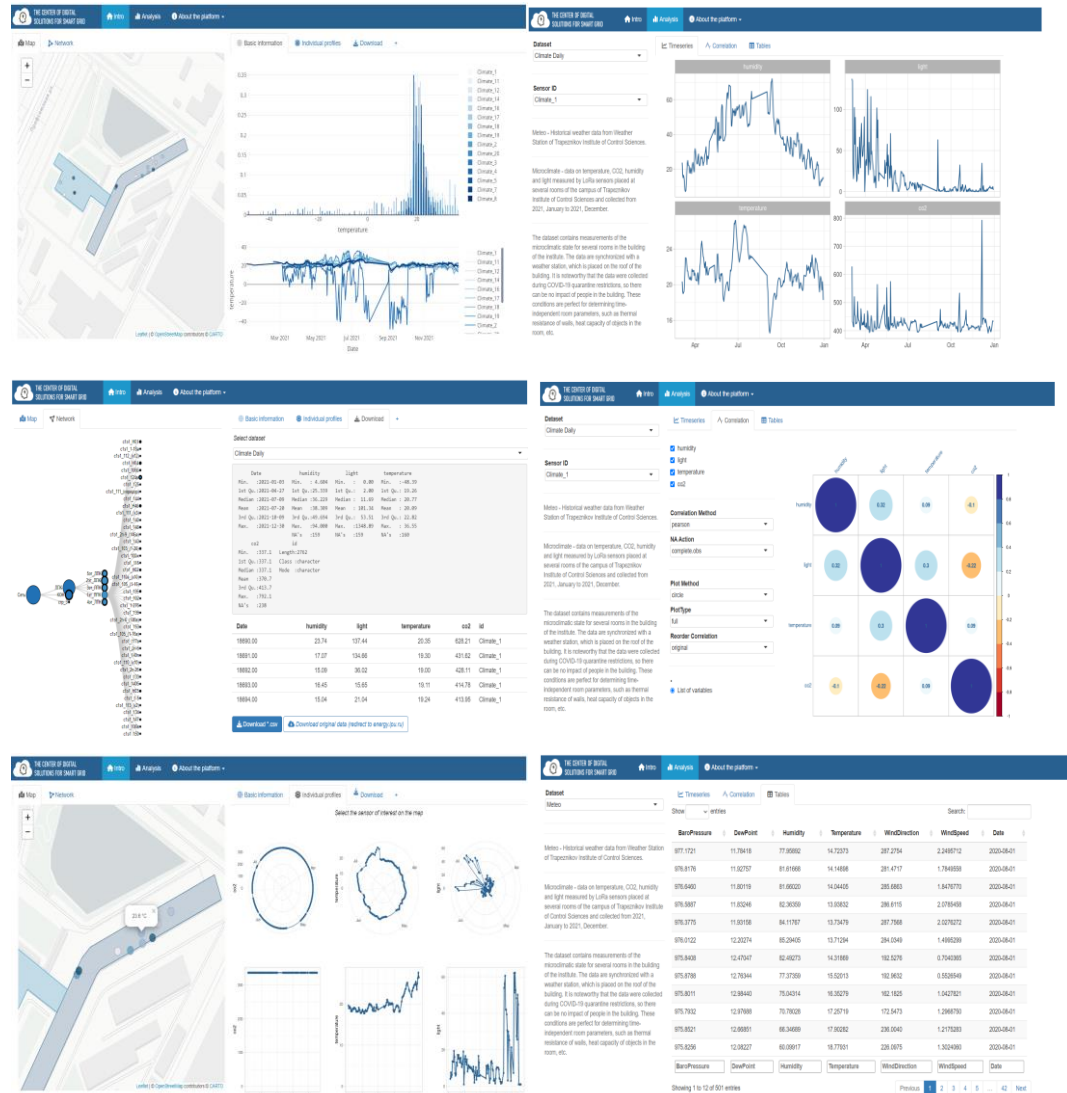
Был создан прототип платформы анализа данных в целях PoC (Proof of concept) - "доказательства работоспособности, востребованности и перспективности подобных разработок". Инструменты - R/Shiny (Javascript + CSS + HTML + R).

ПЛАТФОРМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

создан инструмент для:

- Публикации наборов данных
- Компоновки исследователем интересующего набора данных с необходимыми переменными (столбцами), за требуемый период и на различном уровне агрегирования;
- Первичного ознакомления с данными, подсчетом описательных статистик и визуализации;
- Реализации собственного алгоритма, разведочного исследования.
- Взаимосвязи между архитектурным планом здания и иерархической структуры электросети и микроклиматических датчиков.

Прототип доступен на нашем сайте по ссылке: <https://energy.ipu.ru/datasets/#platforma>



Параллельно в рамках студенческих практик —¹⁰ разрабатываются альтернативные инструменты

ПЛАТФОРМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Overview Individual profiles Download

Select dataset

Power

Select frequency

day

File size:

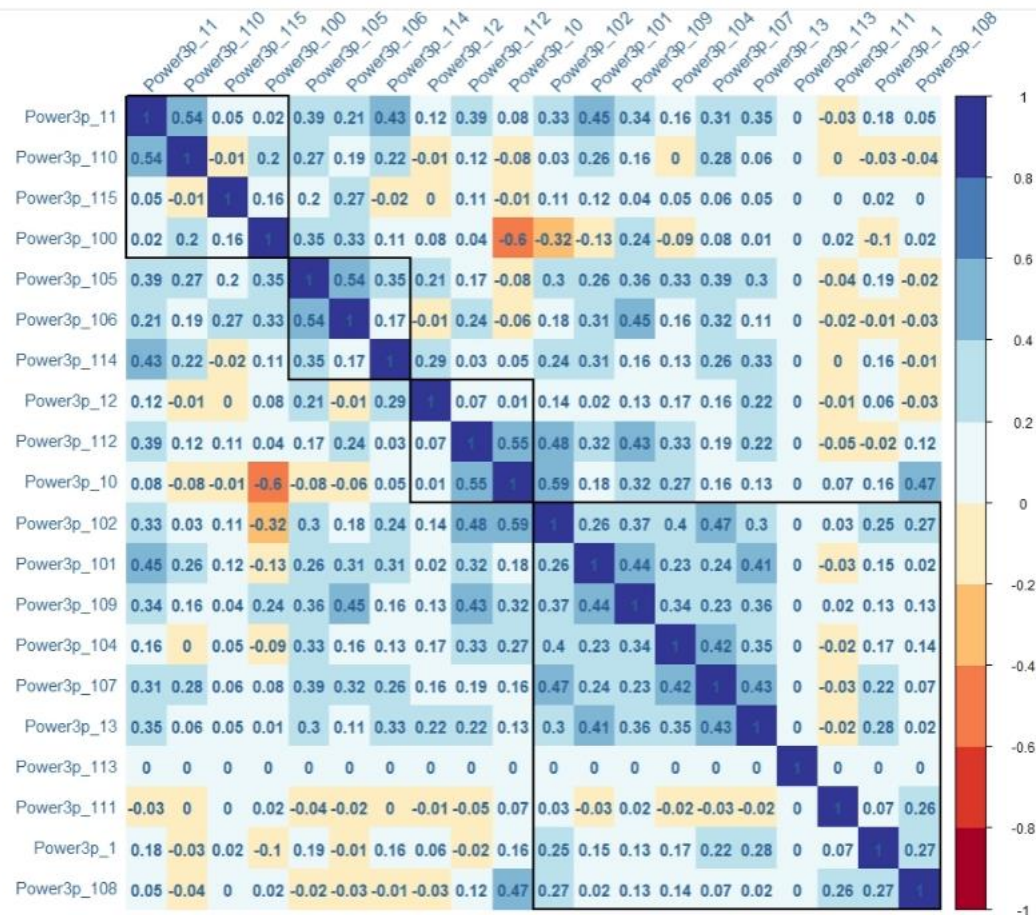
2.1 Mb

Date	entity_id	data_name
Min. :2021-01-03 00:00:00	Length:45243	Length:45243
1st Qu.:2021-08-08 00:00:00	Class :character	Class :char
Median :2021-12-21 00:00:00	Mode :character	Mode :char
Mean :2022-02-13 06:47:03		
3rd Qu.:2022-07-16 00:00:00		
Max. :2023-12-08 00:00:00		

QT	ST
Min. : 0.0	Min. : 0.00
1st Qu.: 0.0	1st Qu.: 88.28
Median : 0.0	Median : 575.15
Mean : 1018.3	Mean : 2113.45
3rd Qu.: 246.7	3rd Qu.: 1650.15
Max. :160252.6	Max. :213198.02
NA's :8513	NA's :6842

Download *.csv

Download original data (redirect to energy.l)



Warning: The following pairs in calculated correlation have been converted to zero because they produced NAs!

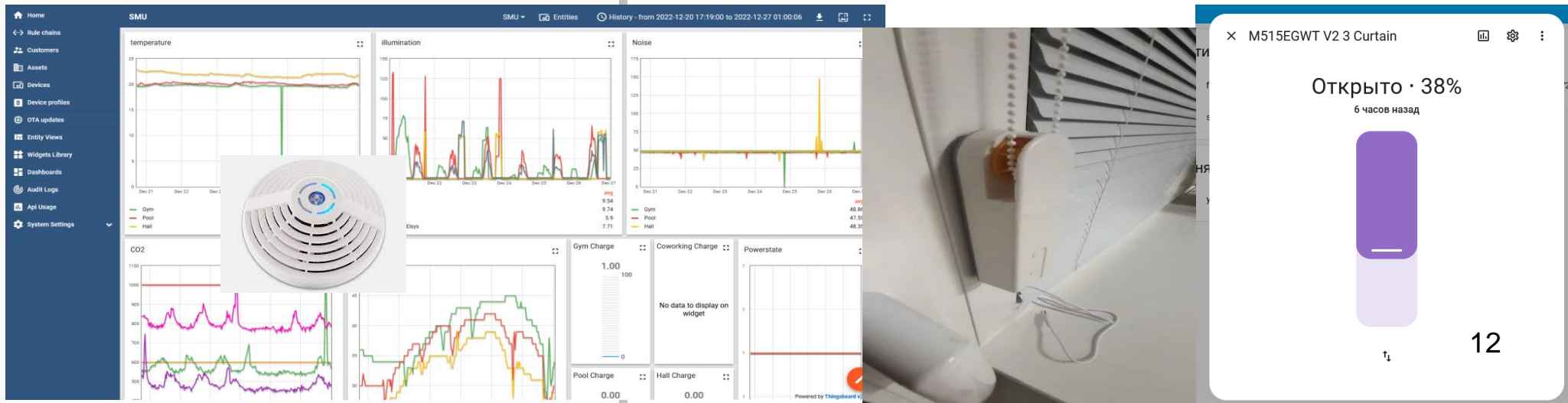
ПОДСИСТЕМА МИКРОКЛИМАТА

- Территория Института - зона приема для беспроводных датчиков различной природы
- Измерения микроклимата ведется на экспериментальных полигонах
- Автоматизированное рабочее место дежурного электрика (в составе беспроводной системы наблюдения) слежение за температурой в основной серверной
- Слежение за морозильной камерой столовой ИПУ

Теперь у нас есть:

- опыт построения системы сбора данных
- готовые датасеты
- возможность быстро ставить нужные эксперименты

В 2023 была начата работа по внедрению управления в систему. Были добавлены автоматические шторы, которыми по WI-FI можно управлять дистанционно через систему Home Assistant. Через систему Thingsboard можно проводить анализ освещения и температуры в комнате и по протоколу MQTT передавать команды на степень закрытия штор. Планируется добавить устройства работающие на протоколе Zigbee.



МОДЕЛЬ МИКРОКЛИМАТА ПОМЕЩЕНИЯ

Задача: оптимизация режимов функционирования микроклиматических управляющих устройств при одновременном рассмотрении задач обеспечения комфорта и экономии энергии

Базовая модель динамики температуры в помещении строится на основе уравнений теплового баланса и имеет вид:

$$C_p m \dot{T} = U(T_{\text{out}} - T) + U_{\text{in}}(T_{\text{in}} - T) + Q_{\text{adj}} + W_{\text{hum}} N_{\text{hum}} + Q_{\text{hvac}},$$
$$C_p m_{\text{in}} \dot{T}_{\text{in}} = -U_{\text{in}}(T_{\text{in}} - T),$$

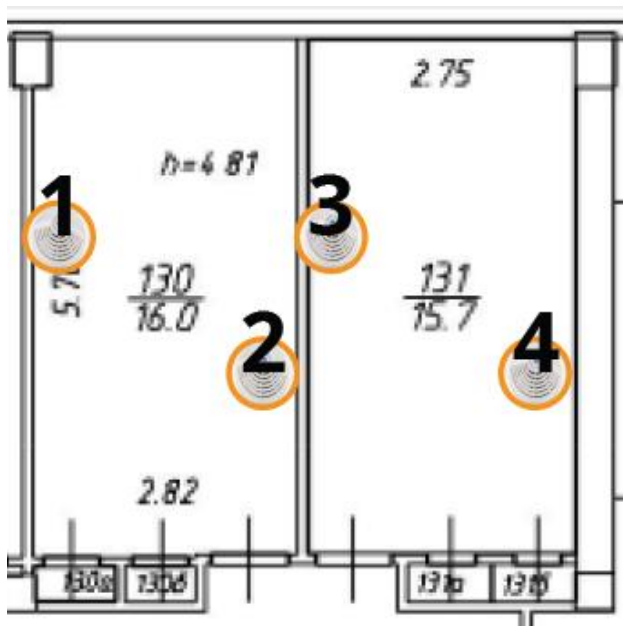
где C_p – теплоемкость воздуха, m – масса воздуха в комнате, T – температура воздуха, $W_{\text{hum}} N_{\text{hum}} + Q_{\text{hvac}}$ – тепло, поступившее в тепло, поступившее в комнату от находящихся внутри людей, нагревательных приборов, с приточной вентиляцией, Q_{adj} – тепло, поступившее в помещение от соседних помещений внутри здания, T_{in} – обобщенная температура объектов внутри помещения, U – соответствующие коэффициенты

Теплопотери (или теплопоступления) здания, либо помещения при взаимодействии с окружающей средой определяются выражением

$$Q = F \cdot k \cdot (t_n - t_e) \cdot \Psi,$$

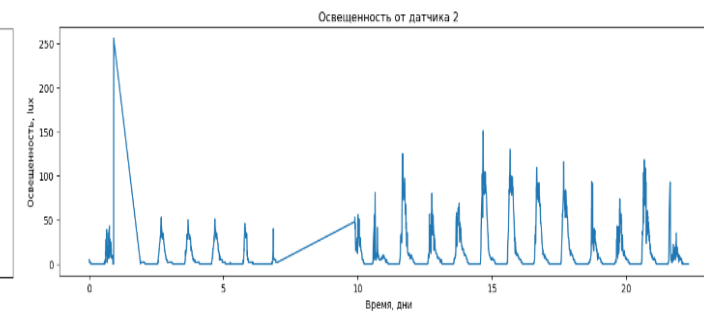
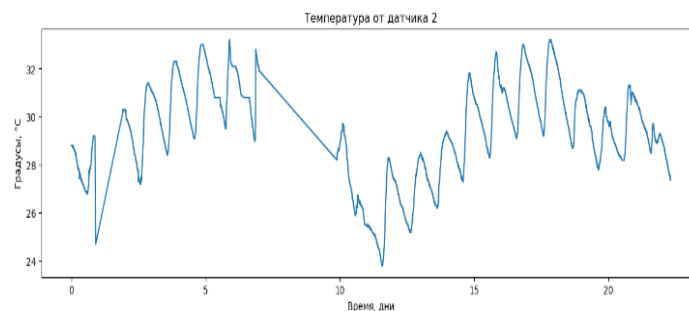
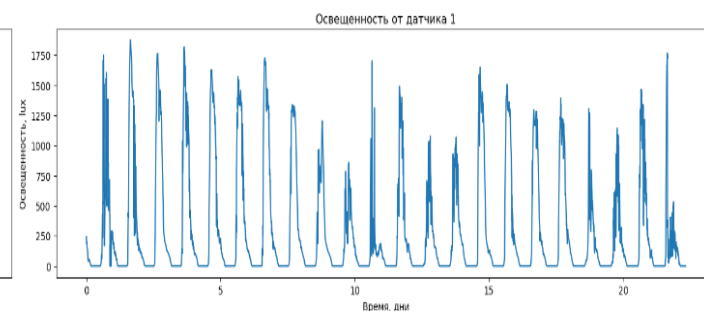
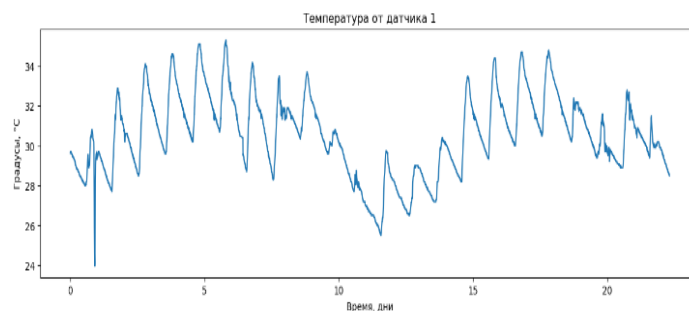
где F – площадь элемента конструкции м^2 , k – коэффициент теплопередачи элемента конструкции, имеющий размерность $(\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К})$, t_e – расчётная температура внутреннего воздуха в градусах Цельсия, t_n – расчётная температура наружного воздуха, С; Ψ – составной поправочный коэффициент.

МОДЕЛЬ МИКРОКЛИМАТА ПОМЕЩЕНИЯ



Корреляция T между значениями датчиков

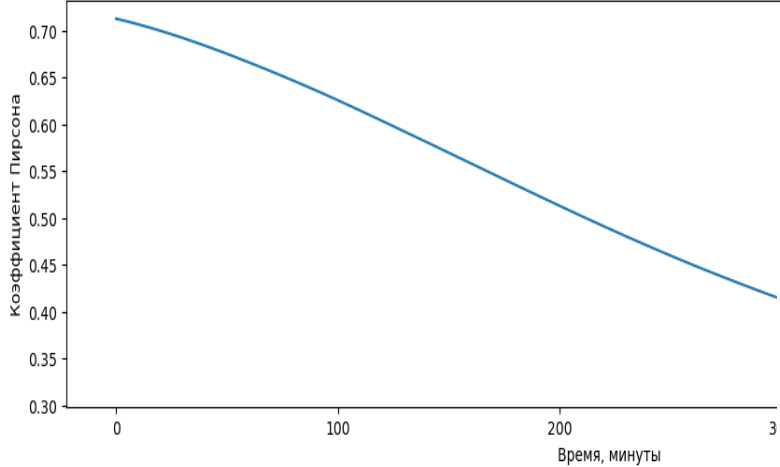
	Д 1	Д 2	Д 3	Д 4
Д 1	1	0.975	0.914	0.887
Д 2	0.975	1	0.913	0.882
Д 3	0.914	0.913	1	0.995
Д 4	0.887	0.882	0.995	1



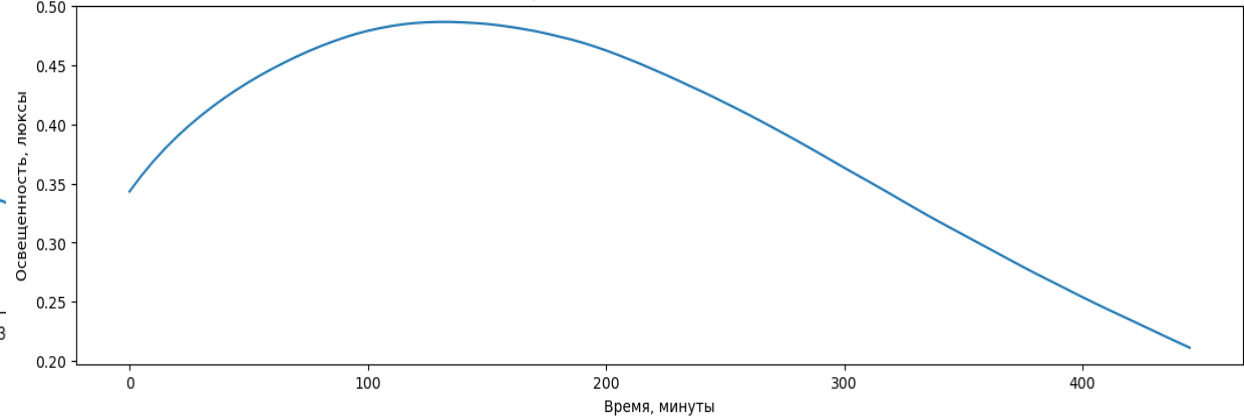
Показания датчиков температуры и освещенности в обычном режиме и в затемненном помещении

МОДЕЛЬ МИКРОКЛИМАТА ПОМЕЩЕНИЯ

Оценка интервала "запаздывания" для температуры окружающего воздуха¹

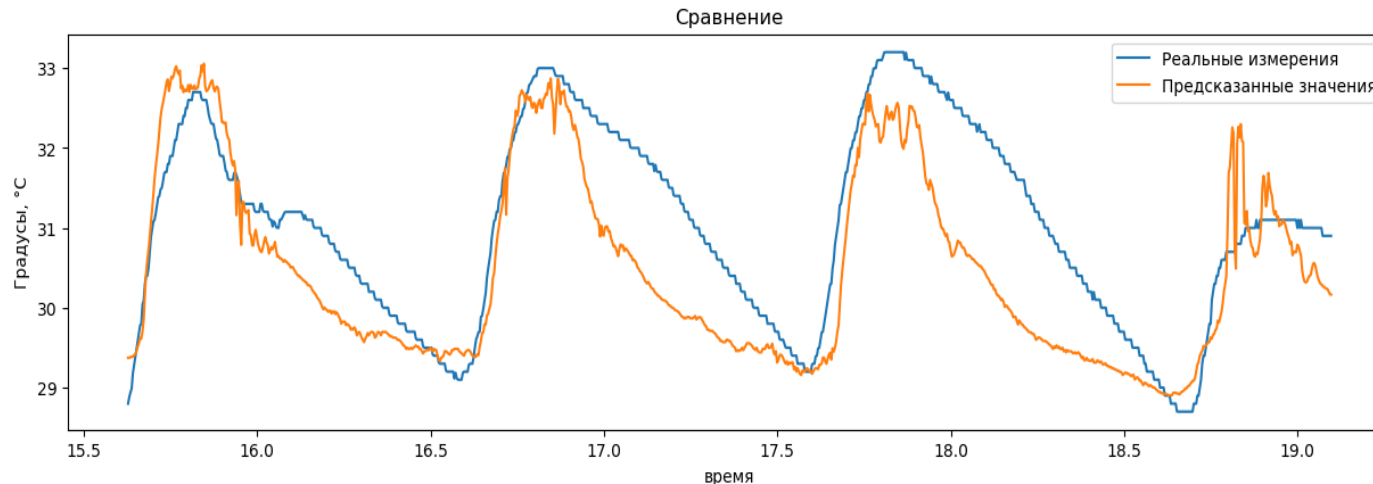


Оценка интервала запаздывания для освещенности¹



$$T_{in1}(t) = 18,678 + 0,00065 \cdot I(t - \tau_{ill}) + 0,369 \cdot T(t - \tau_{temp})$$

Прогнозная модель температуры в помещении



MAE - 0,698. Коэффициент R^2 - 0,795

НАУЧНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

- Сотрудниками Центра в 2023 году было опубликовано 9 научных работ, в том числе 6 работ, входящих в перечень Scopus и Web of Science
- Организована и проведена секция «Smart control systems in power production and power distribution» на конференции 12-th International Conference on Mathematical Modeling in Physical Sciences (Белград, август 2023 г.). На секции было представлено 4 доклада от сотрудников Центра. Труды конференции входят в базы цитирования Scopus и Web of Science
- Организован постоянно действующий общемосковский семинар «Интеллектуальные системы управления в энергетике» (совместно с МЭИ).

ПОИСКОВАЯ / ИНЖЕНЕРНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

Для создания системы мониторинга и управления энергетикой здания (комплекса строений) требуется решить некоторые задачи, такие как:

- Получение и запись большого количества данных в короткие промежутки времени;
- Хранение большого объема данных с учётом временных меток и меток отдельных устройств;
- Быстрое агрегирование большого объема данных;
- Визуализация большого объема данных;
- Формирование отдельных наборов данных;
- Резервное копирование большого объема данных.

Для решения этих задач и проводятся исследования и сравнения:

1. Доступных систем управления базами данных
2. Утилит визуализации
3. Типов данных и форматов файлов с целью сравнения
 - скорости чтения,
 - скорости записи
 - Передачи
 - Хранения
 - агрегирования и визуализации больших объемов данных с временными метками.
4. Выбор протоколов передачи данных

ПОИСКОВАЯ / ИНЖЕНЕРНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

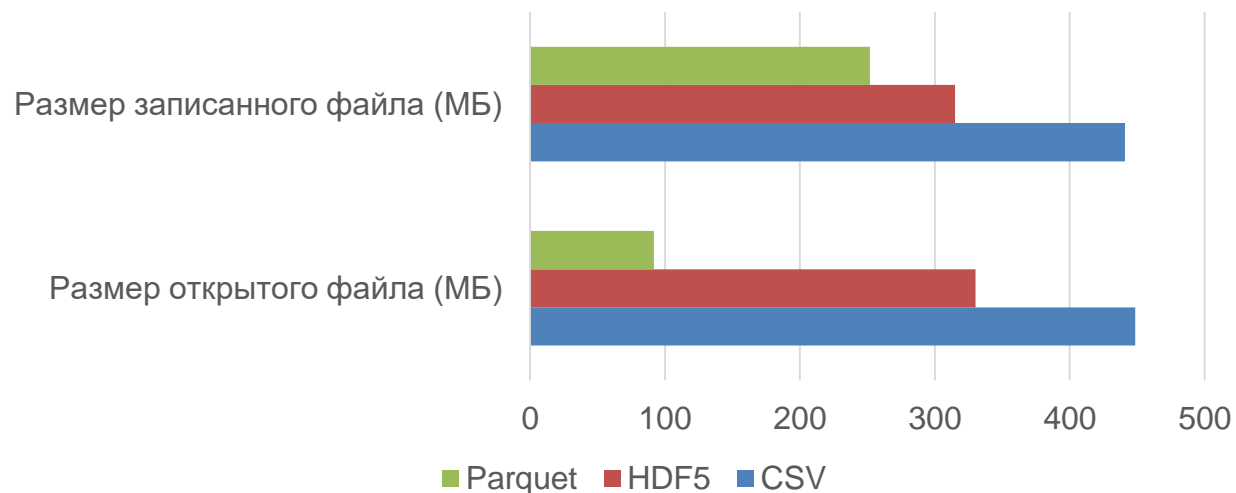
Для разрабатываемой WEB-платформы формирования наборов данных возникла необходимость выбора формата хранения большого объема данных с возможностью их быстрого чтения и записи.

Обзор форматов хранения данных:

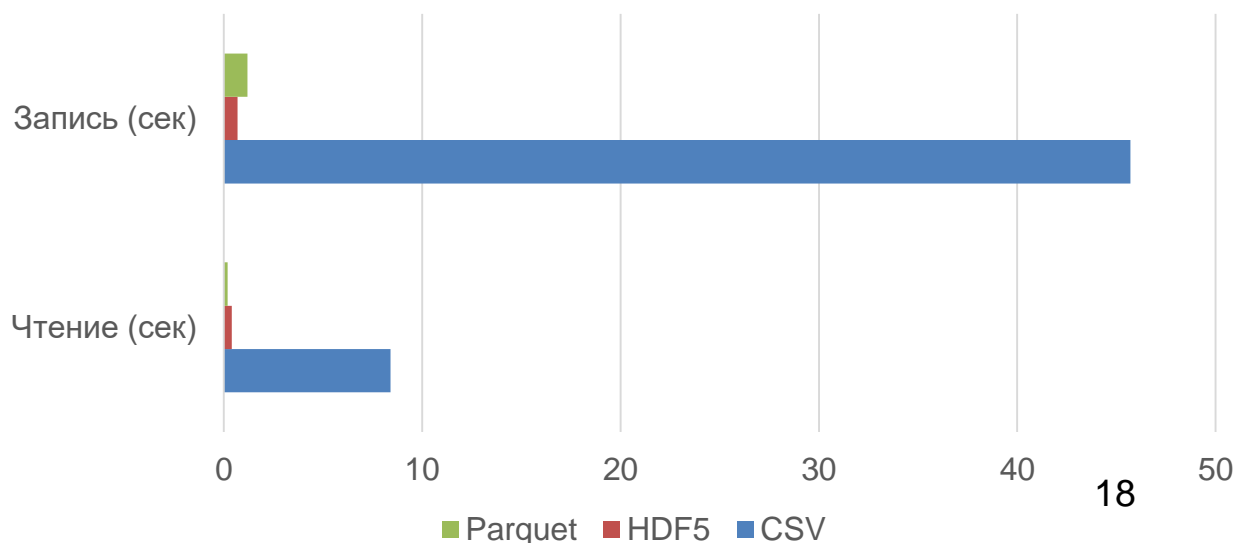
- Анализ скорости записи и чтения;
- Анализ размера получаемых файлов;
- Сохранение типов данных при чтении и записи.

Результат: для хранения данных предпочтительнее формат **Parquet**, но для скачивания данных обычным пользователям более доступен легко читаемый CSV.

Сравнение размеров файлов



Сравнение скорости чтения и записи данных



ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

Центры компетенций ИПУ РАН позволяют сотрудникам ИПУ осваивать новые области знаний, новые постановки задач.

Принципы работы Центра интеллектуальной электроэнергетики подразумевают привлечение сторонних исследователей к анализу собираемых данных, к проектированию новых экспериментальных полигонов, разработке новых алгоритмов анализа энергопотребления и управления энергетическими объектами.

Центр активно сотрудничает с лучшими техническими ВУЗами



Привлеченный партнер: СПбГУ, факультет Математики и компьютерных наук.

В 2022-2023 учебном году проведено:

6 полугодовых практик студентов 2-3 курсов
Защищен дипломный проект бакалавра, работа удостоена диплома участника **Всероссийского конкурса научных работ молодых ученых по теории управления и ее приложениям**

Кроме того, в Центре проходили и проходят практику студенты МАИ, МИРЭА

В 2023 году с использованием данных Энергополигона был защищен магистерский диплом в МФТИ:

«Алгоритм приближенного динамического программирования для задачи оптимизации режима электроэнергетической системы со многими сетевыми накопителями электроэнергии»

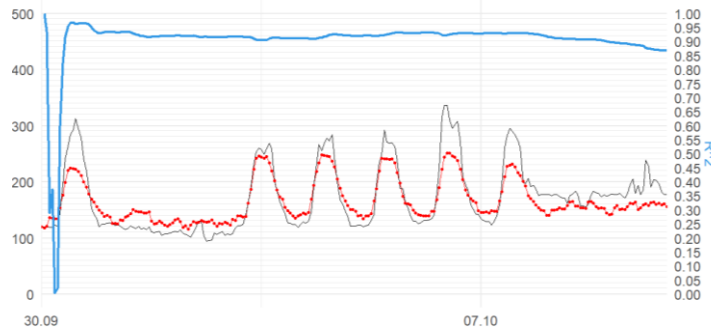
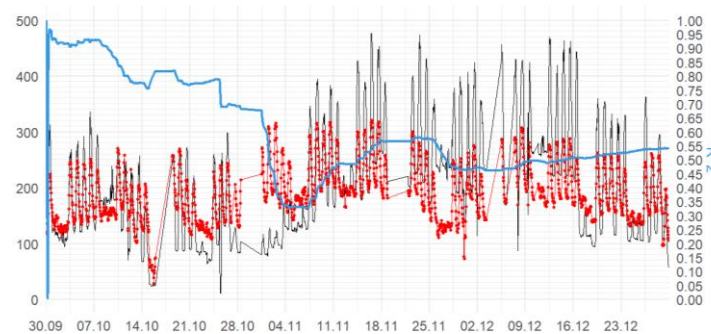


ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

Соревнование по анализу данных центра в рамках конференции УБС-2023

Участникам предлагалось решить задачу прогнозирования энергопотребления. В рамках конференции были проведены вводная лекция (1.5 часа) и итоговое собрание с обсуждением решений. На решение задачи отводилось 40 часов. В итоге от 11 участников было зарегистрировано 149 решений. Список победителей:

1. Алексей Тюрин (ЛГТУ, НЛМК)
(MAE = 54 кВт.ч, $R^2 = 0.54$)
2. Павел Лысенко (ИПУ РАН)
(MAE = 56 кВт.ч, $R^2 = 0.48$)
3. Е. Гришин и С. Галахов (ИПУ РАН)
(MAE = 58 кВт.ч, $R^2 = 0.42$)



Описание соревнования и итоговые результаты доступны на платформе Kaggle:

<https://www.kaggle.com/competitions/challenge23/leaderboard>.

- Лучшее решение - Алексей Тюрин (ЛГТУ, НЛМК), ошибка:
- на горизонте трех месяцев: MAE = 54 кВт.ч, $R^2 = 0.54$;
 - на горизонте одного месяца: MAE = 29 кВт.ч, $R^2 = 0.78$;
 - на горизонте 10 дней: MAE = 23 кВт.ч, $R^2 = 0.86$.

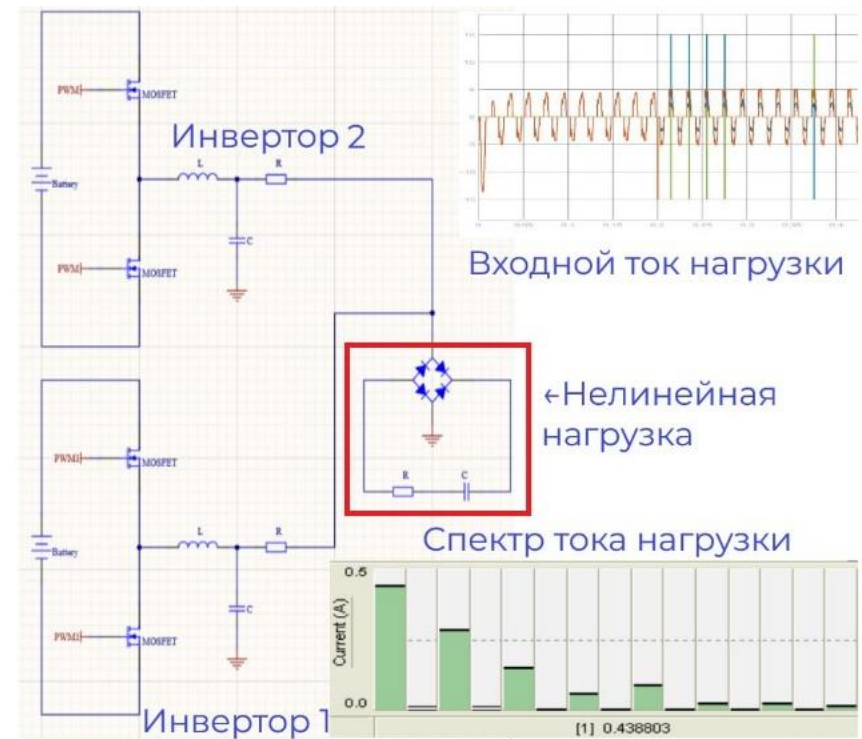
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С РАЗРАБОЧИКАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА ИПУ РАН

Электрический транспорт как источник электроэнергии



Возможности и ограничения концепции «vehicle-to-grid» (V2G) в географических локациях со сложными климатическими и ландшафтными условиями

Пример научной задачи:



Моделирование работы сети микрогрид, состоящей из двух инверторов в условиях изменяющейся нагрузки

ПОЛИГОН «УМНАЯ КВАРТИРА»

- дирекцией Института выделены помещения площадью 50 кв.м. на 2-м этаже КОИ под обустройство полигона «Умная квартира». Ведутся монтажные работы.
- Составлен предварительный дизайн-проект полигона, совместно с отделом главного инженера и отделом главного энергетика разработаны ключевые технические требования к помещению
- Осуществлен предварительный подбор основного оборудования полигона
- Отдельные элементы инфраструктуры тестируются сотрудниками Центра в других помещениях
- Запуск полигона запланирован на лето 2024 года



МЕТОДЫ ДЕКОМПОЗИЦИИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ

Energy disaggregation или **NILM (Non-Intrusive Load Monitoring)** – методы, позволяющие определить активные устройства в сети на основе только агрегированных показаний мощности

Методы решения задачи NILM

Доступные наборы данных: REDD, UK-DALE, BLUED, GREEND и др. – в основном частные жилые дома

Математический аппарат

- Обучение с учителем

Нейронные сети: LSTM, автоэнкодеры, сверточные сети

- Обучение без учителя

Кластеризация скачков потребления [Hart, 1985]

Скрытые марковские модели [Kim 2011]

- Синтетические данные [Harell, 2020]



РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ NILM В ИПУ РАН

Что у нас есть

- инфраструктура сбора неразмеченных данных энергопотребления
- небольшой датасет, использованный на хакатоне в 2022 г.

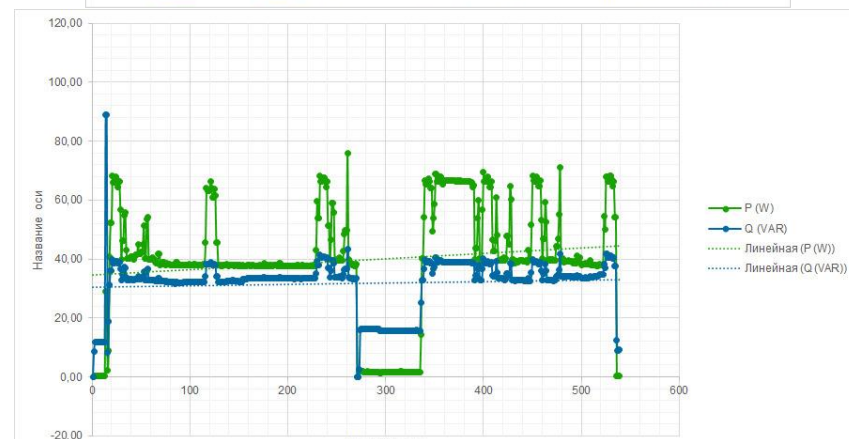
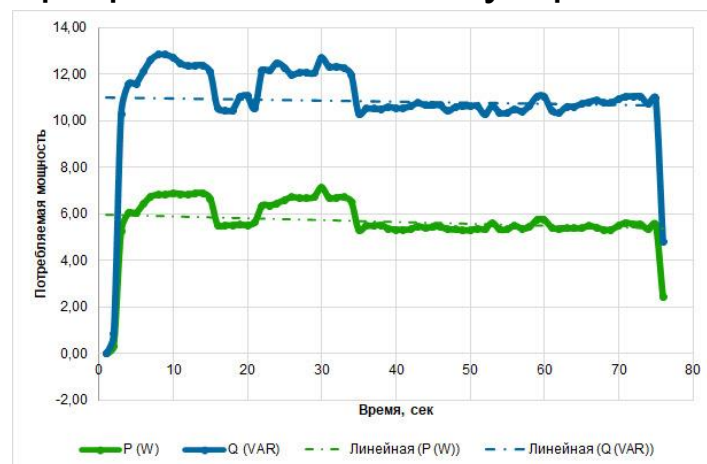
План исследований в 2024 г.

- сбор собственного датасета на 15-20 потребителей
- исследование эффективности существующих методов на данных ИПУ РАН
- создание демонстрационного стенда на ВСПУ-2024

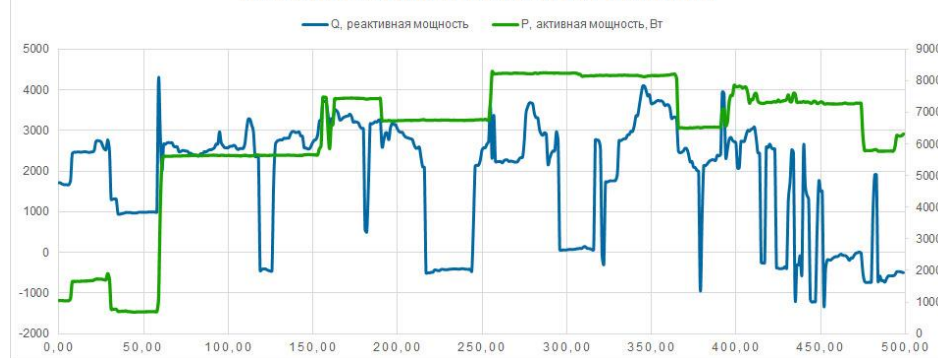


P, Q, U
1 Гц

Профили отдельных устройств



ПРОФИЛЬ СУММАРНОГО ПОТРЕБЛЕНИЯ



ТЕПЛОВАЯ ПОДСИСТЕМА СЕНСОРНОЙ СЕТИ

Контактные датчики температуры

Вега ТД-11



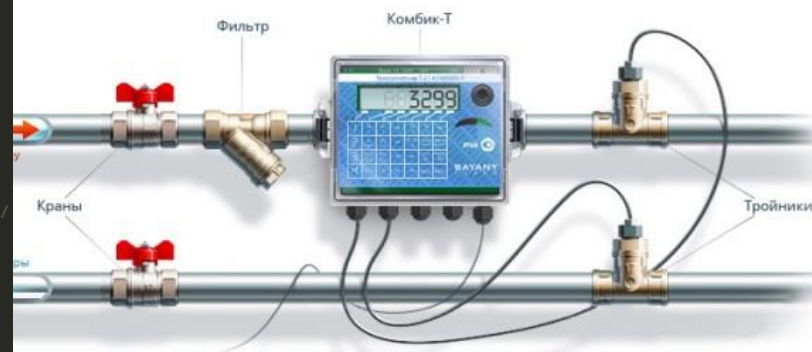
- Устройство класса А
- Архив показаний
- Внешний термодатчик
- Внутренние часы
- Период выхода на связь – до 1 секунды
- Измерение заряда встроенной батареи
- USB-порт
- Измеряемые температуры, °С: -55...+100
- Внутренняя антенна LoRaWAN™
- Дальность радиосвязи в городе до 5 км
- Настраиваемая мощность передачи (<100 мВт)
- Ёмкость встроенной батареи 3400 мАч
- Время работы от батареи до 10 лет
- Размеры корпуса, мм 95 x 50 x 45
- Датчик вскрытия корпуса (тампер)

```
static void Send( void* context )
{
  /* КОД ИПУ РАН */
  uint16_t pressure = 0;
  int16_t temperature = 0;
  uint16_t humidity = 0;
  uint8_t batteryLevel;
  sensor_t sensor_data;

  if ( LORA_JoinStatus () != LORA_SET )
  {
    /* НЕ ПОДСОЕДИНИЛОСЬ, ПРОбУЕМ ЕЩЕ РАЗ */
    LORA_Join();
    return;
  }
  /* ВЫВОДУ В UART СТАТУС */
  PRINTF("SEND REQUEST\n\r");

#ifdef CAYENNE_LPP
  int32_t latitude, longitude = 0;
  uint16_t altitudeGps = 0;
#endif
  /* ЧИТАЮ С АЦП НАПРЯЖЕНИЕ НА ТЕРМОРЕЗИСТОР */
  BSP_sensor_Read( &sensor_data );
#ifdef CAYENNE_LPP
```

Датчики тепла (расхода)



- 4 импульсных входа
- Частота импульсного сигнала < 200 Гц
- 2 выхода типа «открытый коллектор»
- До 4 охранных входов
- USB-порт
- Диапазон рабочих температур, °С - 40...+85
- Встроенный датчик температуры да
- Класс А или С в зависимости от внешнего питания
- 16 каналов LoRaWAN™
- Период выхода на связь 1, 6, 12 или 24 ч
- Внутренняя антенна LoRaWAN™
- Питание внешнее 5 В
- Размеры корпуса, мм 95 x 50 x 45

ПОЛИГОН УПРАВЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ

Предполагается создание макета системы распределенной генерации электроэнергии с использованием различных источников (генераторы, солнечная панель, ветрогенератор, АКБ) и потребители (бойлеры, электродвигатели, тэны, АКБ в режиме зарядки), подключенных к единой локальной энергосети.



Решаемые задачи:

- поддержание заданных параметров сети (частота и амплитуда напряжения, например, 50 Гц, 220 В) в зависимости от подключаемой нагрузки с помощью различных законов управления;
- перераспределение нагрузки между различными источниками, для выравнивания их режимов работы;
- задание различных регулируемых нагрузочных режимов;
- реализация системы диагностики и законов управления в аварийных режимах.

СПАСИБО
ЗА
ВНИМАНИЕ



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
**ИНСТИТУТ
ПРОБЛЕМ
УПРАВЛЕНИЯ**
ИМ. В.А. ТРАПЕЗНИКОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК